

LTE

轻松进阶

元 泉 / 编著
赵文超 / 插图



- 说故事讲理论，于轻松阅读中掌握LTE的精髓
- 应对广阔职场空间，掌握无限商机的葵花宝典



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

LTB总体

第
一
篇

鄧平竹樓

PDO

第 1 章

凤凰台上凤凰游——LTE 的演进目标

知识要点

无线宽带化和宽带无线化融合的趋势促进了 3GPP LTE 项目的产生。那么，大家首先应该了解的是，LTE 提出了哪些目标，为了实现这些目标做了哪些标准化的工作，LTE 的标准与 2G、3G 的增强型标准有哪些区别，如何查阅 LTE 标准化的协议。这些都是每个初学 LTE 的读者首先应该掌握的基本内容。

东胜神州的海滨有个三吉皮皮（3GPP 化名）国，吸天地之灵气、纳日月之光辉、集旷野之朝露、汇百川之俊秀，推出了一套新的贸易标准，取得了巨大的成功，已经发展成为一个颇有影响力的外贸大国。

它的贸易不是有形的货物，而是无形的数据，俗称为比特。但这里的人们仍习惯称为货物。高效、快速、可靠地传送这些货物是三吉皮皮国的最大追求。

三吉皮皮国的国王塞地安莫尔（CMDA 化名，后面简称国王）最近有些忧郁，他听说有个叫爱三易（IEEE 化名）的国家每秒最大的出口比特量（下行）可达 70 M，每秒最大进口比特量（上行）可达 30 M。而本国的每秒最大出口比特量仅为 14.4 M，每秒最大进口比特量仅为 5.76 M。

这一点给国王莫大的刺激，他发誓三吉皮皮国在比特贸易能力方面一定要超过爱三易国。他任命了专门的工作小组，代号 LTE（Long Term Evolution，长期演进），由接班人奥夫地安莫尔（OFDMA 化名，后面简称接班人奥先生）负责主持工作。

国王是一个诗人，喜欢用诗来表达自己的心情；而他表达的心情，接班人奥先生懂！

“凤凰台上凤凰游”，国王吟道。

接班人奥先生给大家翻译国王的心情：“这几十年，各种无线送货标准、无线送货体系粉末登场、纷繁芜杂。”

“风去台空江自流”，国王又吟道。

接班人奥先生继续翻译：“有些标准已经过时了，离开了比特贸易的舞台，但是用户的比特贸易需求像滔滔江水一样，从没有中断过。”

“吴宫花草埋幽径，晋代衣冠成古丘。”国王作怀古惋惜状。

接班人奥先生跟随着国王的心情，作惆怅状：“人工挑货的货物交换时代一去不复返了，模拟移动标准也已经入土为安。”

“三山半落青天外，二水中分白鹭洲。”国王描述当今大势。

接班人奥先生也理解当今时势：“三种3G比特贸易标准(TD-SCDMA, WCDMA, cdma2000 1x)已经被应用了若干年，但从使用标准的最终人数上看，两种2G标准(GSM、CDMA)仍然是服务用户的主力。”

“总为浮云能蔽日，长安不见使人愁。”国王描述对未来的期待。

接班人奥先生了解国王的期待：“当今多制式并存的乱局不能遮挡我们前进的道路，希望多网融合、一统江湖的LTE早日到来。”(见图1-1)

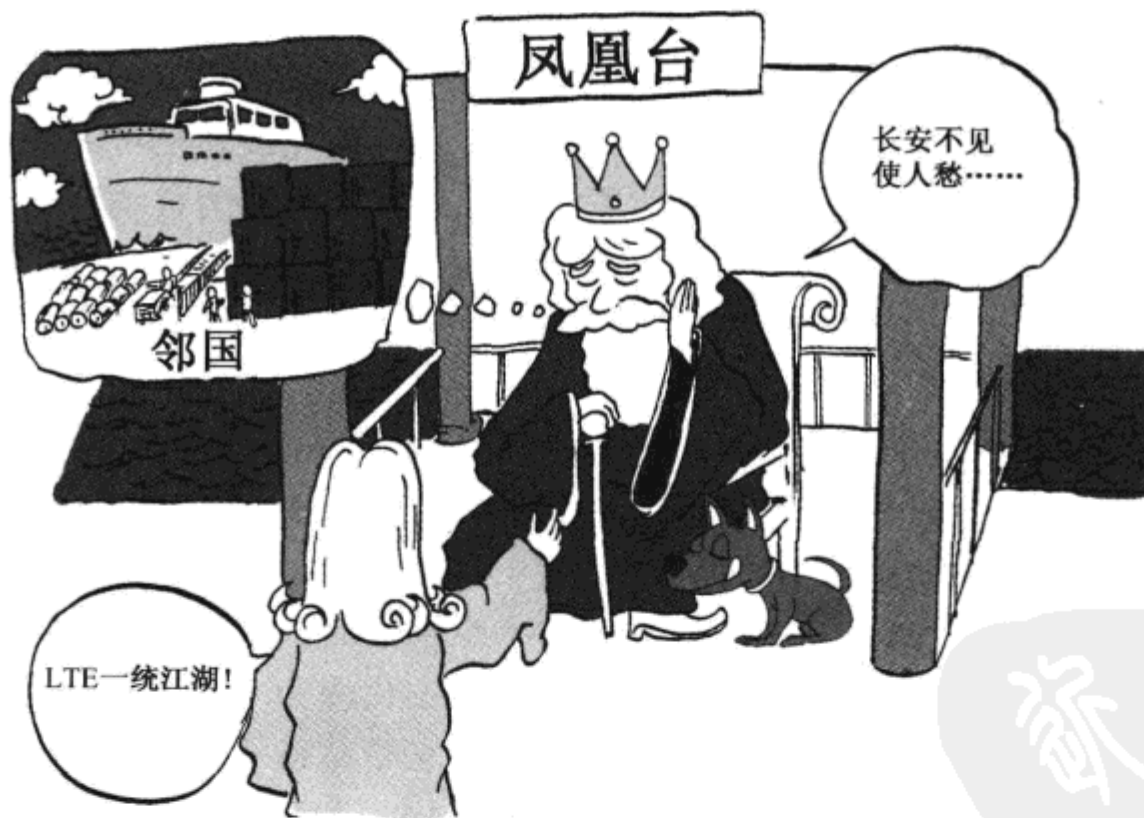


图 1-1 三吉皮皮国的期待

大家听完了国王和接班人奥先生的一唱一和，激动加感动外带心动，爆发出了雷鸣般的掌声。

接班人奥先生宣布：“国王时刻关注 LTE 的工作进展，要求整合国际上各大客户的需求，快马加鞭，推出有竞争力的、新的贸易标准。”

1.1 移动宽带化与宽带无线化

通信三要素：发送、接收、传送。其中信息传送技术是通信技术的基础。通信技术的不同，主要表现在传送方式的不同上。像戴宗送信、飞鸽传书，都是通信传送方式，但是这些都是通过有形的方式传送信息。广义地说，经过无形的媒介进行信息交换，就是“无线通信”，如古代的烽火、旗语的信息传送方式。

但是，现代真正意义的无线通信是在麦克斯韦预言电磁波的存在、赫兹证实了电磁波的存在、马可尼通过实验实现了无线通信之后开始的。

1.1.1 移动宽带化

无线接入技术（Radio Access Technology, RAT）的发展先后经历了无线移动化、模拟数字化、无线宽带化三大进程。

早在出现第一代移动通信（1G）之前，就存在“不移动”的无线通信。早在一战、二战期间，“无线电报”就大范围应用在了军事上。这样的无线通信方式不支持信号的发送或接收设备在不中断业务的情况下大范围移动。所以不能称为移动通信。

“蜂窝组网”和“频率复用”技术的实现，标识着无线移动化进程的完成，于是第一代移动通信（1G）制式诞生了。但是第一代移动通信是模拟系统，设备庞大，耗电量大，通信可靠性低。

伴随着模拟器件数字化的进程，移动通信设备也实现了数字化，第二代移动通信系统（2G）出现了。移动通信的模拟数字化的代表制式是 GSM（Global System for Mobile Communication，全球移动通信系统）、CDMA 95 A。

人们需要交换的信息量在不断地增长，数字洪水的时代大踏步地走来。人们对无线通信的需求不仅仅满足于窄带的语音业务，业务数据化成为不可逆转的趋势。传统的窄带无线通信系统必将向能提供综合数据信息服务的宽带移动通信发展。移动宽带化革命迎来了第三代移动通信系统，代表制式就是 WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000。

1.1.2 宽带无线化

与此同时，随着互联网技术的发展，以传统以太网为主的有线宽带技术越来越不能满足人们随时随地获取互联网信息的需求。宽带技术的无线化、移动化成为互联网技术的发展趋势。WLAN（Wireless LAN，无线局域网）、WiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access，全球微波互联接入）就是宽带无线化的主要代表。

IEEE 组织只是针对宽带无线制式的物理层 (PHY) 和媒质接入控制层 (MAC) 制定了标准, 并没有对高层进行规范。WiMAX 制式是 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 美国电气和电子工程师协会) 组织制定的 802.16 系列的协议; WLAN 是 IEEE 组织制定的 802.11 系列的协议; IEEE 802 是关于局域网和城域网的一系列标准; 我们比较熟悉的 IEEE 802.3 是固定以太网协议, IEEE 802.5 是令牌环协议。

谈到互联网技术, 大家想到了 IP 网。IP 传输网是主流的互联网技术, 属于分组包交换的技术, 效率较高, 但缺点是没有服务质量 (Quality of Service, QoS) 的保证, 对质量的保证只是尽力而为 (Best Effort)。对比 3G 无线制式 (如 WCDMA) 中使用的 ATM 技术, 传送效率不高, 但却有服务质量的保证。

1.1.3 LTE 的产生动因

移动宽带化进程和宽带无线化进程的融合为 LTE 的产生奠定了技术基础, 如图 1-2 所示。无线接入网的网元之间使用 IP 技术进行数据传输, 即移动通信网 IP 化是二者融合的网络基础。通信网 IP 化最重要的技术就是 IP 网支持 QoS 保证, 将 IP 网效率高的优点和通信网 QoS 保证的特点结合起来。

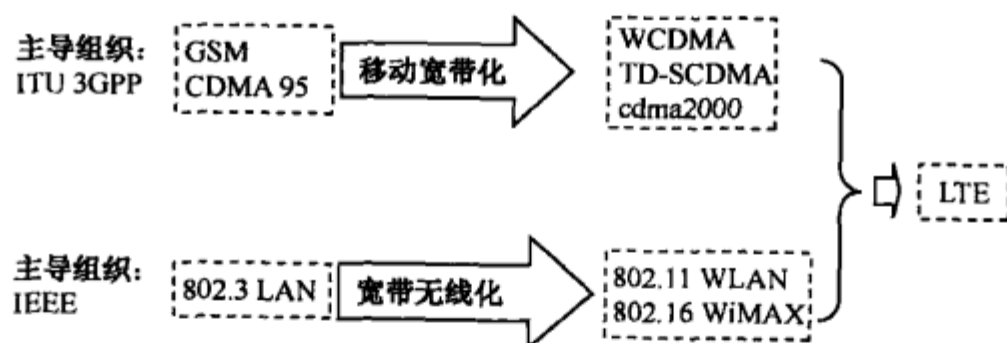


图 1-2 宽带无线化和移动宽带化的融合

随着通信技术、广电技术、互联网技术三网融合进程的快速发展, 通信产业的价值链从封闭走向开放, 无线通信业务数据化、多媒体化成为必然, 数字洪水的时代已悄然来临。未来无线通信的主体不只是人与人之间的通信, 还会扩展到人与物、物与物之间 (从物联网的发展可以看出端倪), 爆炸式的无线通信需求为 LTE 的发展奠定了坚实的市场基础。

3GPP 执意要把 LTE 打造成未来较长时间内领先的无线制式, 最直接的压力来自 WiMAX。3GPP 制定的 3G WCDMA 可以实现上行 128 kbps, 下行 14.4 Mbps 的时候, IEEE 制定的 WiMAX (802.16) 则号称在 20 MHz 带宽的时候, 上行 30 Mbps, 下行可达到 70 Mbps。虽然 IEEE 的 WiMAX 宣称的速率只是一个理论上的极限速率, 但这也给 3GPP 对 WCDMA 未来的信心构成了重大的负面影响。于是 3GPP LTE 的产生如箭在弦上, 不得不发了。

1.2 LTE 标准化

LTE (Long Term Evolution, 长期演进) 是 3GPP 主导制定的无线通信技术, 关注的核心是无线接口和无线组网架构的技术演进问题。LTE 不等于 4G, 人们更愿意称它为“准 4G”或者叫“3.9G”, 更愿意相信它是 3G 与 4G 之间的一个过渡, 这样就给未来的 4G 技术更大的想象空间。

但是, LTE 技术与其说是“Evolution”(演进), 不如说是“Revolution”(革命)。无论在无线接口技术上还是在组网架构上, LTE 相对于以往的无线制式都发生了革命性的变化。

既然是“长期”演进, 那 LTE 一定是志存高远。3GPP 的目标是使下一代的无线通信系统能够雄踞在现有无线制式能力之上, 全面掌控无线制式性能的制高点, “确保在未来 10 年内领先”(协议上原话)。

如何确保新制定的无线制式在未来的 10 年内领先呢? 有以下几个技术目标:

(1) 带宽灵活配置: 支持 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz 的带宽。

(2) 峰值速率更高: 下行 100 Mbps, 上行 50 Mbps。

(3) 时延更小: 控制面小于 100 ms, 用户面小于 5 ms。

(4) 支持高速: 速度大于 350 km/h 的用户支持最少 100 kbps 的业务接入。

(5) 简化结构: 取消电路 (CS) 域, 取消无线网络控制 (RNC) 节点。

在实现以上系统高目标的同时, 降低系统复杂性和组网成本。有点又让马儿跑得快, 又让马儿不吃草的味道。在降低系统复杂性这一条里, 在 LTE 的需求里提出了“最小化可选项、没有冗余的强制特性”的要求。这一点是一个典型的运营商主导的需求。为了说明这个要求, 先举个例子。

某美容院推出免费做脸部美容的活动。你的女友挺感兴趣, 进去了。美容院的服务员告诉你的女友, 免费的护肤品是最低档的, 有几种非常适合她皮肤的护肤品, 可以选择一下 (见图 1-3)。可选项太多 (最小化可选项多么必要), 你的女友选择了最贵的; 如此多个回合。最后, 美容院又说, 为了效果好, 必须买一种神仙水天天保养 (这就叫做强制特性)。从美容院里出来, 你的女友已经花了你 1 000 元钱。

看来运营商对这种减少配置低价吸引客户, 然后通过增加可选项, 增加新特性来扩大销售的营销策略是有所提防的。



图 1-3 最小化可选项的必要性

1.2.1 LTE 标准化进程

高速业务需求迅速增多的牵引力、移动宽带化和宽带无线化技术共同发展的合力、IEEE WiMAX 的压力共“三力”一起催生了 LTE 标准化项目的启动。

在 2004 年 12 月召开的多伦多 3GPP 会议上，LTE 的概念被正式提出。之后，启动了 3GPP LTE 的相关研究工作。为了保证竞争优势，计划用两年左右的时间完成 LTE 标准的制定。实际上，由于物理层技术确定过程的复杂性，标准制定过程被拖延了很长时间。

LTE 标准的制定分为三个阶段，如图 1-4 所示：需求讨论阶段、标准研究阶段、标准制定阶段。

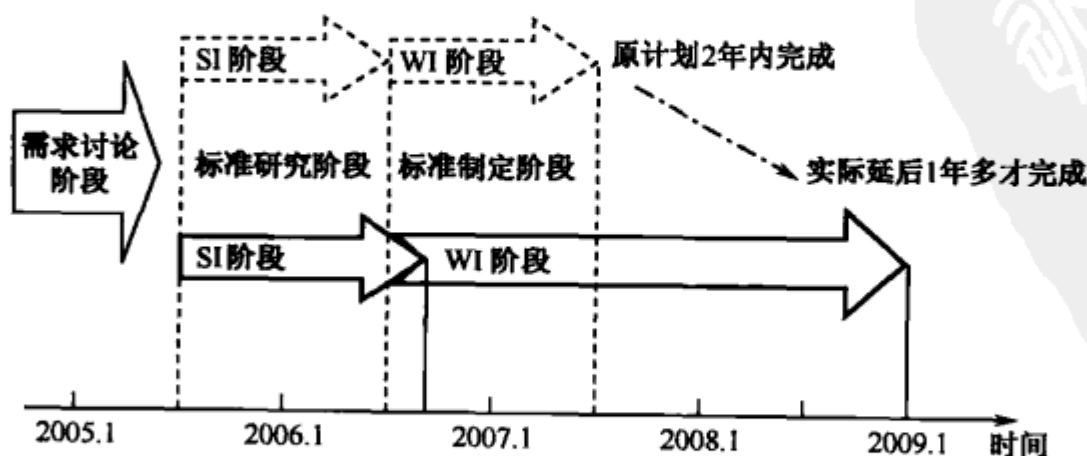


图 1-4 LTE 标准制定过程

从 2004 年 12 月到 2005 年 6 月，是 LTE 项目需求讨论阶段。

先定需求，再选用满足需求的可应用技术，这是 LTE 标准制定的一个特点。根据需求选取技术，不只看技术的先进性，还须考虑器件芯片的成熟程度、技术实现的复杂度和实现成本、理论及实测效果等多方面的因素。

以往的无线制式多是先看成熟的技术有哪些，再看能满足什么样的需求，而且在 LTE 的需求讨论中，有很多强势的运营商参与进去，如日本的 NTT Docomo、欧洲的沃达丰 (Vodafone) 等。中国移动在 2007 年以一个较高的姿态参与进去，目的是把 TDD 双工方式写入 LTE。

以前的无线制式制定，则主要是各设备厂家的事情，运营商很少参与。这就决定着 LTE 是更加贴近用户需求的技术。这一阶段的主要输出为：LTE 需求报告 (TR25.913)。

从 2005 年 6 月到 2006 年 9 月，是 LTE 标准研究阶段，即 SI 阶段 (Study Item Stage)。

SI 阶段原定于 2006 年 6 月完成，实际拖延了 3 个月，到 2006 年 9 月才完成可行性研究。这是因为在 2006 年 6 月完成的可行性报告里，LTE 的频谱效率没有达到运营商的要求。直到把 MIMO (Multiple Input Multiple Output, 多入多出) 天线技术的天线配置数目从 2×2 (输入 \times 输出) 提高到 4×4 ，才达到了运营商的频谱效率要求。

在 SI 阶段输出的是 TR25.xxx 系列的文档，其中 TR 是 Technical Report，属于研究报告类型，如 LTE 可行性研究报告 (TR25.912)、LTE 物理层研究报告 (TR25.814)、LTE 无线接口研究报告 (TR25.813) 等。

从 2006 年 9 月到 2008 年 12 月，是 LTE 标准制定阶段，即 WI 阶段 (Work Item Stage)。

2006 年 9 月正式开始 WI 阶段，由于 SI 阶段推迟了 3 个月，于是修改了计划完成日期。原定于 2007 年 9 月完成 LTE 的第一个商用标准版本，结果延期了一年多，到 2008 年年底才推出首个商用协议版本。

延期的主要原因是对物理层技术的选用存在很大的争议。有些技术在理论上很好，但实测或者仿真性能不理想；有些技术在理论和实测上都还可以，但设备实现的复杂度很大。延期的另一个原因是 LTE 的帧结构确定不下来，虽然后来帧结构确定以后，没有大家想象得那么复杂。经济基础决定上层建筑，物理层协议出不来，层二、层三的标准制定工作就会白费。最终选择的技术不一定是理论上最先进的，但一定是可实现的和满足需求的。

LTE 主要涉及 TS36.xxx 系列协议，其中 TS 是 Technical Specification，属于技术协议细则类型，如 LTE 系统整体描述报告 (TS36.300)。

当然，现在 LTE 标准还在不断完善更新之中，还会不断出现各种新标准、新技术，如 LTE Advanced、IMT-advanced。有兴趣的读者可以登录 <http://www.3gpp.org/> 网站，查看动态信息。

1.2.2 LTE 的设计目标

对 LTE 所有的需求概括一句话：网络性能更好，网络成本更低（当然相对 3G 系统来说），如图 1-5 所示。

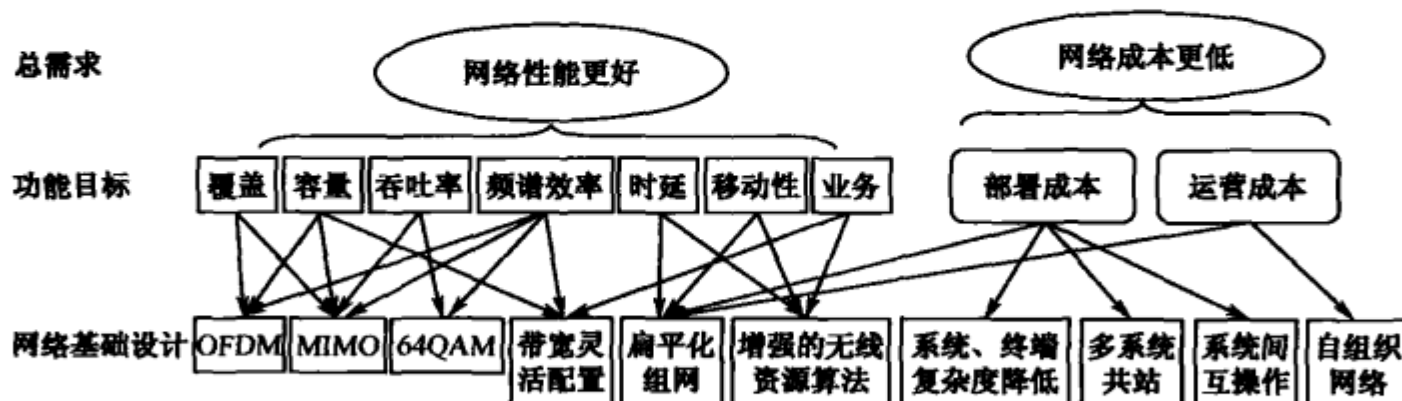


图 1-5 LTE 设计目标分解

网络性能更好包括更广的覆盖范围、更大的系统容量、更高的用户速率、更高的频谱效率、更短的等待时间、较高的移动速度、更丰富的业务种类、更佳的业务质量；网络成本的降低是指更低的部署成本和运营成本。

为了这样的需求，就需要明确 LTE 在无线接口和网络架构方面演进的设计目标。先从覆盖、容量、吞吐量、频谱效率、时延、移动性、业务支持等方面谈一下网络性能方面的功能设计目标。

（1）覆盖（Coverage）

在 5 km 范围内，能够满足 LTE 相关协议定义的吞吐量、频谱效率以及移动性需求；在 30 km 范围内，保证移动性需求的情况下，用户吞吐量允许轻微下降，频谱效率可以有明显的下降。100 km 的覆盖范围不排除支持。

在覆盖上的需求，LTE 技术如果能够满足的话，可以极大地降低建网成本和部署成本。但这将对 LTE 的发射功率和功放效率提出比较大的挑战。尤其是上行方向，手机如何实现，对终端和芯片、器件厂家的考验无疑是很大的。

（2）容量（Capacity）

在 5 MHz 带宽内，LTE 要支持 200 个激活用户；带宽在 5 MHz 到 20 MHz 范围内，要支持 400 个激活用户。

（3）吞吐量（Throughput）及频谱效率（Spectrum Effectiveness）

在 20 MHz 的带宽时，下行峰值数据速率（Peak Data Rate）达到 100 Mbps（频率效率：5 bs⁻¹/Hz）；上行峰值数据速率达到 50 Mbps（频率效率：2.5 bs⁻¹/Hz）。

LTE 在 MIMO 2×2 配置下，下行小区边缘用户吞吐量是 R6 HSDPA 的 2~3 倍；平

均用户吞吐率是 R6 HSDPA 的 3~4 倍；LTE 的频谱效率是 R6 HSDPA 的 3~4 倍；上行小区边缘用户吞吐率是 R6 HSUPA 的 2~3 倍；平均用户吞吐率是 R6 HSUPA 的 2~3 倍；频谱效率是 R6 HSUPA 的 2~3 倍。

LTE 实现吞吐率和频率利用效率大幅提升最给力的技术有 OFDM、MIMO、高阶调制技术 64QAM。OFDM、MIMO 这两个物理层技术的选用并不是 LTE 的首创，在 IEEE 标准的 WLAN、WiMAX 制式里，已经选用了这两项技术。

(4) 时延 (Latency)

无线接入网 UE 到 eNodeB 用户面的延迟时间低于 10 ms，控制面延迟时间低于 100 ms。注意，这里的时延不是端到端时延，而是无线接入侧的时延。即使如此，这个时延要求也是非常苛刻的。网络架构扁平化、调度粒度细微化是 LTE 实现低时延的主要手段。

(5) 移动性 (Mobility)

用户的移动速度在 15 km/h 以内时，保持最优的业务性能；在 15~120 km/h 范围内，能够有较高的业务性能；120~500 km/h 范围内，提供与 3GPP R6 质量相等或者更优的业务。LTE 技术对移动性的要求并不苛刻，主要考虑到选用的 OFDM 技术对多普勒频移较为敏感。

LTE 不仅支持大范围移动条件下的业务使用，更注重低速条件下的使用效果，像 WLAN 一样，支持对便携式终端话务的吸收，支持热点区域的小范围高质量的覆盖，如世博会。

(6) 业务支持

LTE 需要有效地支持多种业务，除了现有网页浏览、FTP、视频流、VoIP 业务之外，还需支持实时视频、Push-to-X (X 代表各种应用：Push-to-Talk，一键语音通话；Push-to-View，一键视频通话；Push-to-Share，一键文件共享) 等业务，支持增强型 MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service，多媒体广播和组播业务)。

为了支持上面的网络性能需求目标，LTE 网络的技术基础设计目标有：一个扁平化的网络架构、两个物理层关键技术 (OFDM、MIMO)，带宽灵活配置，各种无线资源算法。这些内容将在后面的章节中分别介绍。

为了降低建网成本，首先，从降低网络复杂性开始，要求接入网的网元种类减少，接口简单，单个网元功能增强，减少基站规模；其次，降低功能复杂性，严格禁止冗余的强制功能特性、可选特性最少化；再次，要求 LTE 支持和 2G、3G 无线制式共站址建设，降低建站成本；最后，要求 LTE 和其他制式能够互操作，实现多制式网络资源的共享。

为了降低运营成本，运营商要求 LTE 具备自组织网络 (Self Organization Network, SON) 功能，即要求 LTE 网络具有自规划 (Self-Planning)、自配置 (Self-Configuration)、自优化 (Self-Optimization)、自维护 (Self-Maintenance) 的能力。这是典型的、运营商

站在自己的利益角度提出的组网功能需求，目的是减少规划、优化、维护的成本，降低运营成本。

另外，LTE 在设计过程中，不强制要求网络同步（Network Synchronization），也就是说不用依赖美国的 GPS 进行同步，这一点非常类似于 WCDMA（软同步），有别于对同步要求相当严格的 TD-SCDMA 系统（硬同步）。

这里需要指出的是，严格地说，任何无线系统都需要同步，否则系统无法正常有序地工作，只不过同步实现的途径不同。

1.2.3 EDGE+、HSPA+、LTE 标准的比较

LTE 标准问世并开始逐渐成熟以后，很多运营商一方面在展望 LTE 带来的技术竞争力，另一方面却担心在已有无线制式 2G/3G 上投资浪费的问题。

LTE 毕竟是一个“革命性”的技术，在网络架构和无线空中接口上，都有很大的变化。那么人们自然会想，在 LTE 没有大规模部署之前，是否可以在网络架构和无线空中接口不做根本性变化的前提下，进一步挖掘已建无线网络（如 WCDMA/TD-SCDMA，GSM 等制式）的潜力，使之在业务速率上更上一层楼，做到物尽其用呢？

其实类似的问题在 3G 标准出来后也存在过。当时人们在问，WCDMA/TD-SCDMA 规模使用之前，能否进一步挖掘 GSM 的潜力？于是 EDGE（GPRS 增强版）技术产生了。也就是说，先有 WCDMA 的 R99 协议版本，后有 GSM 的 EDGE 技术。EDGE 技术在不改变已有无线接口的前提上，进一步提升了 GSM 的业务速率。

多址技术是不同于无线制式的重要区别之一。多址技术的不一样会使无线接口做重大改变。在多址技术方面，LTE 主要是 OFDMA；WCDMA 主要是宽带 CDMA（码分多址）。TD-SCDMA 主要是 SDMA（智能天线空分多址）、TDMA、CDMA、FDMA；GSM 则主要是 TDMA、FDMA。也就是说，要进一步增强 WCDMA、TD-SCDMA、GSM，它们已使用的多址技术不能变，即 LTE 的 OFDMA 不能在 WCDMA、TD-SCDMA、GSM 上使用，否则已有的无线制式的空中接口改变太大及设备射频部分变化太大，将无法做到尽量利用已有投资的目的。

那么，LTE 中的其他业务速率增强技术可否用来增强 WCDMA、TD-SCDMA 和 GSM 的容量特性呢？

于是人们想在不改变已有的时隙帧结构、信道结构的前提下，把多天线技术、高阶的调制技术用在已有的 3G 或 2G 网络，做到后向兼容。于是，出台了 HSPA+、EDGE+ 标准。也就是说，先有 LTE 标准，然后才有 HSPA+、EDGE+，它们的出现完全是为了尽量保护运营商的已有投资（见图 1-6）。

LTE 与 HSPA+、EDGE+ 技术特性对比如表 1-1 所示。在组网架构和多址技术方面，

已有无线制式的增强型版本和其派生母体保持一致。

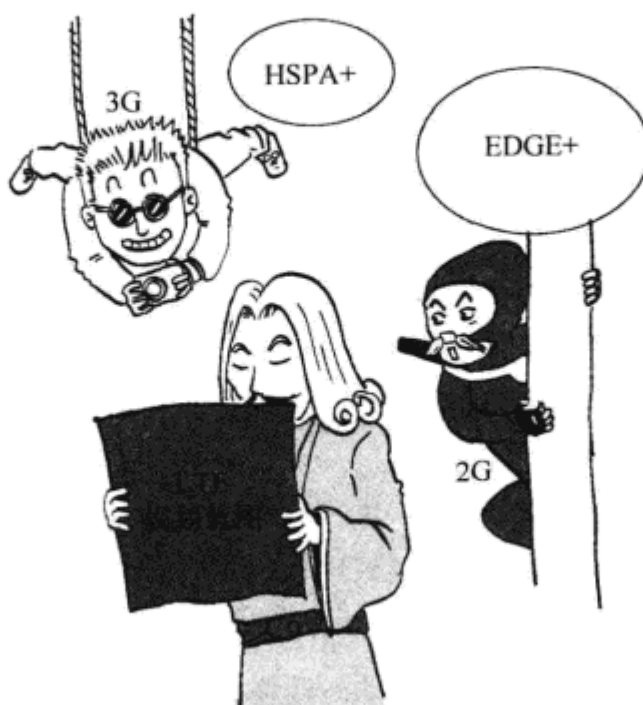


图 1-6 已有无线制式的功力提升

表 1-1 EDGE+、HSPA+、LTE 技术特性对比

	EDGE+	HSPA+	LTE
网络结构	与 GSM/EDGE 相同，四层组网架构，平滑升级	与 UMTS/HSPA 相同，四层组网架构，软件平滑升级	与 UMTS/HSPA 不同，扁平化的三层网络架构，组网架构需要大的变化
多址技术	FDMA、TDMA	CDMA	OFDMA
调制编码	支持 16QAM 和 32QAM 调制方式，支持 Turbo 编码	支持 64QAM	支持 64QAM
带宽	固定带宽：200 kHz	固定带宽：WCDMA、5M/TD-SCDMA、1.6 MHz	可变带宽：最大为 20 MHz
天线技术	FDD 智能天线、终端双天线接收分集	MIMO	MIMO
时延	50 ~ 70 ms (与 EDGE 相比，网络时延降低一半)	20 ~ 30 ms	10 ms
下行峰值速率	理论速率为 2 Mbps，实测速率可达 1 Mbps	42 Mbps	100 Mbps
兼容性	终端与 GSM、GPRS、EDGE 后向兼容	终端与 WCDMA/TD-SCDMA、HSPA 后向兼容	与 2G、3G 网络不兼容，终端、网络自成一体
产业链成熟期	2011 年	2009 年	2011 年以后

LTE 为三层的扁平化组网架构,但 HSPA+、EDGE+仍然保持 3G、2G 制式的四层架构;LTE 采用新的多址技术和新的空中接口技术(新的信道结构、时隙帧结构),而 HSPA+、EDGE+仍然沿用 3G、2G 制式原有的空中接口技术(旧的信道结构、时隙帧结构)。

高阶调制的信号峰均比更高,对功放功率回退的要求和接收机灵敏度的要求更加严格。由于高阶调制信号需要较多的功率回退,所以采用高阶调制的信号覆盖范围会变小。LTE 和 HSPA+可以使用 64QAM 的高阶调制技术,可选的还有 QPSK、16QAM 的调制方式;而 EDGE+则只做到 32QAM,可选的调制方式还有 GMSK、QPSK、8PSK、16QAM。

LTE 使用的是可变带宽,而 HSPA+、EDGE+使用的是固定带宽。在 HSPA+和 LTE 都使用 5 MHz 带宽的时候,业务性能是差不多的。LTE 和 HSPA+可以使用 MIMO 技术,EDGE+使用的是智能天线和接收分集的天线技术。

在时延、峰值速率等性能指标方面,HSPA+、EDGE+虽然无法超越 LTE,但已经达到了该制式在目前技术条件下的极致水平。

实现 HSPA+、EDGE+,终端比基站侧做的改动要大。支持 HSPA+的终端一定能够在 HSPA、R5 网络上使用,支持 EDGE+的终端一定能够在 GSM、GPRS/EDGE 网络上使用,这就是所谓的后向兼容性问题。但 LTE 的终端,和以往无线制式都不会兼容,需要等待产业链的进一步成熟。

1.3 LTE 协议族

一个社会的法律体系就是约束和规范社会各阶层经济生活、政治生活的参考依据。任何单位和个人的行为需要符合法律体系的规范内容。但是,一个想学习法律的人如果从逐篇阅读法律法规文档开始,那一定是一件非常痛苦的事情。

LTE 协议族是规范和指导 LTE 设备研发、LTE 组网技术的法律体系。LTE 标准研究阶段 SI 输出的是 TR25.xxx 系列的文档,沿用了原 3G RAN 的 25 系列编号;在 LTE 标准制定阶段开始后,给 LTE 规范分配了专门的编号,即 TS36.xxx 系列(见图 1-7)。

目前,LTE 的 TS36.xxx 协议已经包含了 50 多个技术规范,可以分为五大类:射频系列规范(TS36.1xx)、物理层系列规范(TS36.2xx)、高层系列规范(TS36.3xx)、接口系列规范(TS36.4xx)、终端一致性系列规范(TS36.5xx);后来又补充了两个系列规范(TS36.8xx 和 TS36.9xx)。表 1-2 所示为 LTE 主要的但不是全部的技术规范,在学习 LTE 时,这是优先查阅的参考文献。本书最后所附的参考文献按顺序给出了常用的 LTE 协议名称。

读者可以从 http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series 寻找自己所需的协议。

但是，通过阅读协议来学习 LTE 是一个相当痛苦的过程，会使很多意志坚强的人望而生畏。所以建议初学者使用通俗的 LTE 学习材料，掌握其中主要内容，然后需要的时候再通过查阅协议方式去学习技术细节。

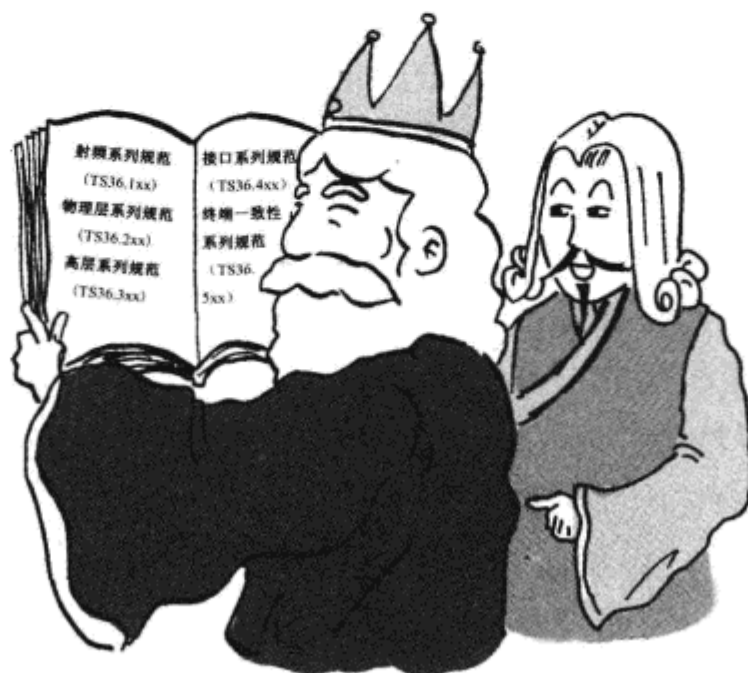


图 1-7 LTE 协议族

表 1-2 LTE 主要技术规范

规范分类	规范编号	规范英文名称	规范名称	内 容
射频系列规范	TS 36.101	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception	UE 无线发送和接收	描述 FDD 和 TDD UE 的最小射频特性
	TS 36.104	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception	BS 无线发送与接收	描述基站在成对频谱和非成对频谱的最小射频特性
	TS 36.133	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management	支持无线资源管理的要求	描述支持 FDD 和 TDD E-UTRA 的无线资源管理需求，包括对 eUTRAN 和 UE 测量的要求
物理层系列规范	TS 36.201	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description	LTE 物理层——总体描述	物理层综述协议，主要包括物理层在协议结构中的位置和功能，包括物理层 4 个规范 36.211、36.212、36.213、36.214 的主要内容和相互关系等

续表

规范分类	规范编号	规范英文名称	规范名称	内 容
高层系列 规范	TS 36.300	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (eUTRAN); Overall description; Stage 2	E-UTRA 和 eUTRAN 的总体描述	提供了 eUTRAN 无线接口协议框架的总体描述, 主要包括: eUTRAN 协议框架, eUTRAN 各功能实体功能划分, 无线接口协议栈, 物理层框架描述, 空口高层协议栈框架描述等
	TS 36.302	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Services provided by the physical layer	物理层提供的服务	主要描述了物理层的服务和功能, 共享信道, 广播信道, 寻呼信道和多播信道传输的物理层模型, 物理信道传输组合, 物理层可以提供的测量等内容
	TS 36.306	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities	UE 的无线接入能力	主要描述 UE 的无线接入能力, 包括 UE 等级划分方式, UE 各个参数的能力定义
接口系列 规范	TS 36.401	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Architecture description	架构描述	主要是对 eUTRAN 整体架构和整体功能的描述, 包括: 用户平面和控制平面协议, eUTRAN 框架结构, eUTRAN 主要功能和接口介绍
	TS 36.410	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); S1 layer 1 general aspects and principles	S1 总体方面和原理	主要是对 S1 接口的总体描述, 包括 S1 接口协议和功能划分, S1 接口协议结构, S1 接口的 3GPP TS36.41X 技术规范
	TS 36.420	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); X2 general aspects and principles	X2 总体方面和原理	主要是对 X2 接口的总体描述, 包括 X2 接口协议结构, X2 接口功能, X2 接口的 3GPP TS36.42X 技术规范
终端一致性 系列规范	TS 36.508	Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Common test environments for User Equipment (UE) conformance testing	UE 一致性测试的通用测试环境	主要描述终端一致性测试公共测试环境的配置, 包含小区参数配置以及基本空口消息定义等
补充系列 规范	TR 36.902	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions	LTE SON 网络特性	主要描述了 LTE 自组织网络的原理和实现要求
	TR 36.913	Requirements for further advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)	LTE-Advanced 需求	主要描述未来 LTE 的演进方向

第2章

国王答疑——咀嚼几个无线术语

知识要点

无线传输技术和多址技术的基础是信道资源的正交性。无线资源有多种形式，如何恰当地使用这些无线资源是各种无线制式都面临的核心问题。无线组网技术是关系网络性能的重要技术。无线传输技术、多址技术、无线资源使用技术、无线组网技术是无线通信技术的基础，LTE 也概莫能外。

自适应能力是无线制式资源使用优劣的重要衡量标准。从资源的使用范围上来看，无线资源分为共享资源和专用资源；从资源承载的信息性质上来看，可分为业务面和控制面；从获取资源的方式来看，可以分为基于竞争和基于调度；从物理资源的所在位置上来看，可分为集中配置和分布配置。

上一章介绍了 LTE 标准设计目标，本章将介绍实现 LTE 设计目标的最基本技术问题。

接班人奥先生就管理中的难题问计于国王：“工作效率提不高、汇报信息不可靠，怎么办？”

国王赞道：“问得好。效率不高的时候，一个人干多个人的活；信息不可靠的时候，多个人干一个人的活！”

接班人奥先生说：“不理解！愿闻其详！”

国王解释说：“一个人干多个人的活，就是提高一个人的复用度；左手打乒乓球，右手打篮球，这叫空分复用；这一秒钟打乒乓球，下一秒钟打篮球，这叫时分复用。复用提高了一个人的干活效率，但……”

接班人奥先生说：“有什么问题吗？”

国王说：“这个对人要求太高了。左手打乒乓球，右手打篮球，这就要求左手和右手互不影响；这一秒钟打乒乓球，下一秒钟打篮球，这就要求这一秒钟和下一秒钟互不影响。这就是正交性的要求”（见图 2-1）。

接班人奥先生说：“多个人干一个人的活，如何提高信息汇报的可靠性？”

国王说：“多个人就是多条渠道。从多条互不相关的渠道获取信息，综合一看，就能把正确的信息判断出来。”

接班人奥先生得到国王莫大的信任和鼓舞，吟道：“今日长缨在手，何时缚住苍龙”。



图 2-1 提高工作效率的关键

2.1 正交性、相关性

有了好处都想要，有了问题都想躲。怎么办？大家自然会想到：人们的责、权、利统一明确，彼此独立，避免相互交叉。用数学上的术语来表达就是一个人的责、权、利与另外一个人的责、权、利完全正交。

正交，在数学上就是相互垂直的意思；也就是说，相互正交的几个向量，也就是相互垂直的几个向量。

其实，“正交”可以理解为“互不依赖、相互独立，互不相关、没有重叠，相互区别、没有疑似”。甲的发展不依赖于乙的发展，彼此独立；甲的状况和乙的状况毫不相关、没有重叠；甲和乙的特性可以相互区别，没有似是而非的地方。诸如此类的表述，我们都可以认为是正交。

相关性，在数学上则是互不垂直的几个向量，其中一个向量在其他向量上有一定的分量。其实，“相关性”可以理解为“互相依赖、互不独立，互有重叠，相互耦合、你中有我”。甲的发展依赖于乙的发展，彼此促进或阻碍；甲的状况和乙的状况相关、有一定重叠；甲和乙的特性可以有一定重叠，有似是而非的地方。相关性过大，彼此无法区别。二者其实是合二为一，只能算一个。

“正交性”有什么好处呢？两个字：简单。把一个复杂的事情分解成相互独立、互不相关、互不依赖的几个因素，便于问题的分析和解决，我们称之为解耦。

编程序的人都知道，模块化设计的一个重要思想就是保证各模块之间的“正交性”。这样可以将软件设计过程简单化，可重复化；避免你中有我，我中有你，相关性强，这样剪不断、理还乱。

公司的管理也是如此。划分的部门的业务职能之间最好有一定的“正交性”。部门的业务职能的“正交性”太差，或者称“相关性”太大，彼此交叉太多，必然会增加业务管理的复杂性，产生争功诿过的现象，有人积极邀功领奖金，没有人主动担责接受处罚。

在无线通信环境中，相互正交的信道就是互不依赖、互不相关、相互区别的信道，可以通过空间、时间、频率、码等途径实现信道之间的“正交”。

无线空中接口资源是有限的。相互正交的信道可以传送完全不同的信息，在接收端同时接收不同信道的不同信息，重复利用空中接口资源，起到提高空中接口利用效率的作用；无线传播环境是险恶的，相互正交的信道可以传送完全相同的信息，在接收端合并不同信道来的相同信息，去伪存真，起到提高空中接口可靠性的作用。

2.1.1 正交码

对于无线的空口资源来说，空间、频率、时间都是硬资源。空间资源是指天线单元；频率资源是指载波、频点资源；时间的资源是指无线里的每一个时隙。我们说，这些资源都是有限的，不可再生的，属于硬资源。

码资源就不一样了。在理论上，相互正交的码可以在同一个空间、频率、时间资源上，区分出不同的信道来。这样，只要码足够长，同一空间、频率、时间，可以支持无穷多个相互正交的信道。也就是说，码资源是一种软资源。但是码不宜过长，否则计算复杂性增加，对芯片的计算能力要求就苛刻了。

基于 CDMA 原理的无线制式都采用了码分多址的技术。那么什么样的扩频码是正交呢？

满足下面两个条件的数字序列是相互正交的：

- (1) 自己和自己按位相乘之和大于 0；
- (2) 自己和别人按位相乘之和等于 0。

如扩频码 $a = \{1, -1, 1, -1\}$ 、 $b = \{1, -1, -1, 1\}$ ， a 和 b 按位相乘结果为 $\{1, 1, -1, -1\}$ ，此时各位之和为 0； a 或者 b 自己和自己按位相乘之和则大于 0。所以 a 和 b 是正交的，如图 2-2 所示。这样相互正交的码可以在同一时隙、频点、空间资源上传送不同的信息，而接收端使用同样的扩频码可以把原始信息正确地解扩后，接收下来。

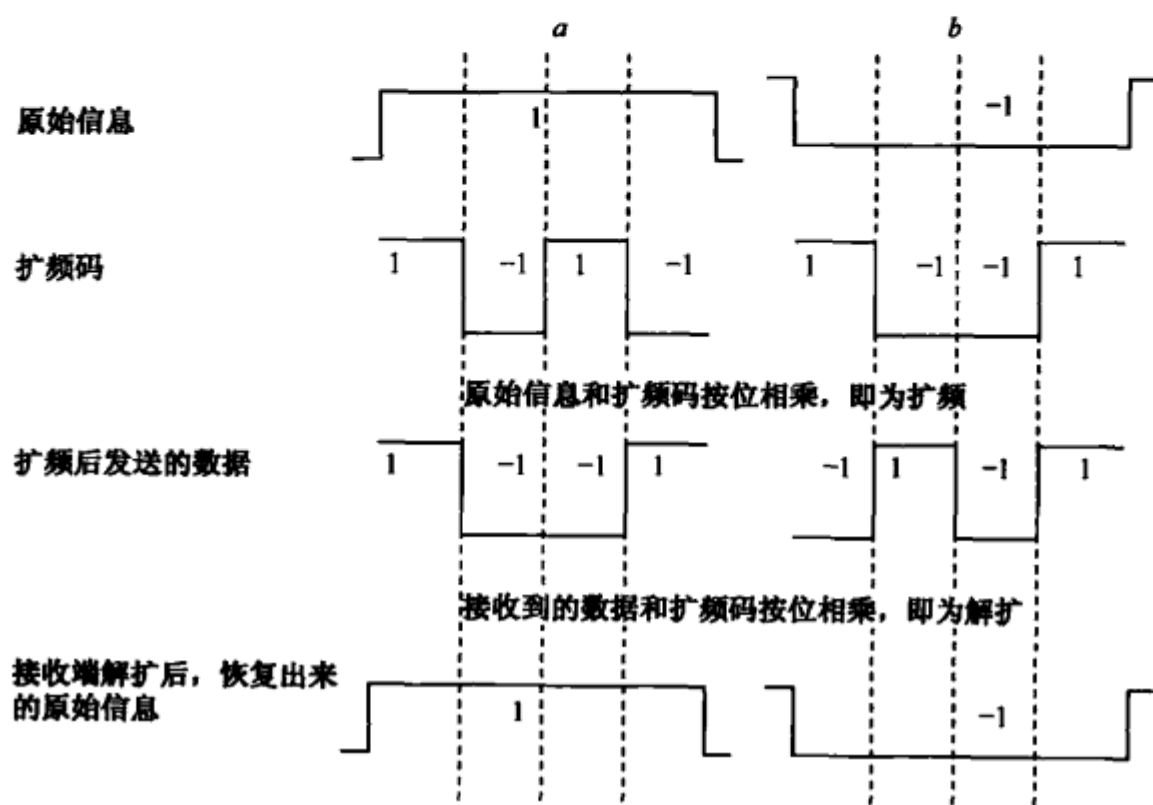


图 2-2 正交码

2.1.2 正交子载波

几乎所有的无线制式都采用频分多址的技术。传统的频分多址方式用不相重叠的两个频带及频带之间有一定的保护带宽来区分不同的信息通道。

人类的聪明在于发现了频带有所重叠的载波，也可以区分不同的信道，即引入了正交子载波的概念。那么什么样的子载波是正交的呢？

正弦波和余弦波就是正交的，因为它们满足以下两个条件：

(1) 正弦波和余弦波的乘积在一个周期 T 内的积分等于 0，即

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos \omega_0 t \sin \omega_0 t dt = 0 \quad (2-1)$$

(2) 正弦波或余弦波的平方在一个周期 T 内的积分大于 0，即

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos \omega_0 t \cos \omega_0 t dt > 0 \quad (2-2)$$

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin \omega_0 t \sin \omega_0 t dt > 0 \quad (2-3)$$

这样在发送端用一定频率的正弦波调制的无线信号，把要调制的数据（设为 a ，取值为 0 或 1）作为正弦波的系数。

在接收端如用余弦波解调，得到的数据永远是 0，即

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} a \sin m\omega_0 t \cos n\omega_0 t dt = 0 \quad (2-4)$$

而用正弦波解调，就能够把真实的数据 a 解出来。

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} a \sin m\omega_0 t \sin m\omega_0 t dt = ka \quad (k > 0) \quad (2-5)$$

同样地，任两个不同的正弦波（频率为 ω_0 的整数倍），任意两个不同的余弦波（频率为 ω_0 的整数倍），任一个正弦波和任一个余弦波都是正交的，即

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin n\omega_0 t \sin m\omega_0 t dt = \begin{cases} > 0 & (n = m) \\ = 0 & (n \neq m) \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos n\omega_0 t \cos m\omega_0 t dt = \begin{cases} > 0 & (n = m) \\ = 0 & (n \neq m) \end{cases} \quad (2-7)$$

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos n\omega_0 t \sin m\omega_0 t dt = 0 \quad (2-8)$$

只要两个子载波是正交的，就可以用它们来携带一定的信息。在接收端，只要分别用同样的子载波进行运算，就可以把相应的数据解出来。

LTE 的关键技术之一的 OFDM 就是正交子载波的频分复用技术。

2.2 复用、分集、多址

2.2.1 复用与分集

复用与分集是两种典型的无线传输技术。

复用（Multiplexing）技术，在通信领域，是指在同一个传输路径上传送多路独立的信号。也就是说，不同的信号、共同的通道，如图 2-3 所示。

在发送端，将多个独立信号合成为一个多路信号，叫做复用；在接收端，将多路信号分解成各个独立信号的过程，叫做解复用。通信领域里，复用的共同特点是在保证多路收发信息传送质量的同时，提高某一传送通路资源的利用效率。

和复用技术不同的是，在通信领域，分集（Diversity）技术是指多路彼此独立的传输路径上传送同一信号。也就是说，相同的信号、独立的通道，如图 2-4 所示。

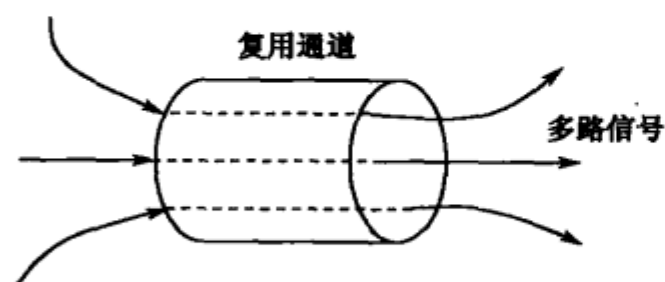


图 2-3 复用

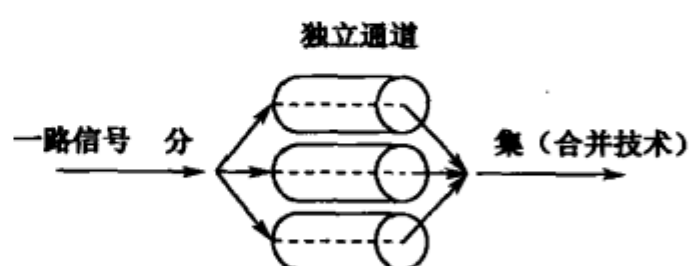


图 2-4 分集技术

同一信号经过彼此独立的通道发送出去，显然不能提高通道的利用效率，相反，降低了通道的利用效率。那么，这样做的目的只有一个：提高信息传送的可靠性、正确性。

在无线传播环境中，无线信号会碰到各种各样的衰落，影响接收机正确地接收信号。通过分集技术，同一信号在彼此独立的不同路径上传送，经历不同的衰落；在接收端把不同路径来的信号合并起来，可以获得分集增益，提高信号接收的正确性。

在一个通路中传送多路信号的复用技术，多路信号如何相互区分？在多个通路中传送同一信号的分集技术，多个通路如何彼此独立？也就是说，在通信领域，无论是复用技术、还是分集技术，都涉及“正交”的概念。

举例来说，频分复用区别的是频率，复用的是时隙等其他资源，即在同一时隙、同一空间（天线单元）、同一正交码的情况下，将一个载波带宽划分为相互区别的、多个不同频点的子信道，分别传送不同的信号。同样的道理可以理解时分复用、码分复用、空分复用，如表 2-1 所示。

表 2-1 复用通路

类 型	可复用的通路资源	相互区别的信号通路（正交信道）
频分复用	时隙、空间、码	频率
时分复用	频率、空间、码	时隙
码分复用	时隙、频率、空间	正交码
空分复用	时隙、频率、码	空间

同一信号必须经过相互独立的不同通路，才能起到分集作用。分集技术有很多种，如频率分集、时间分集、空间分集、角度分集、极化分集，如表 2-2 所示。不管什么类型的分集技术，必须有相互独立的信息通路，保证同一信号经历不同的衰落，以便合并的时候有相互参考、相互补充、相互验证的效果。

表 2-2 分集技术

	实现分集的途径
频率分集	不同频点的子载波、扩频
时间分集	大于一定间隔的时间（大于信道的相干时间）
空间分集	相隔数个波长（一般要求 10 个波长）的天线单元
角度分集	天线波束指向不同
极化分集	天线极化方向的不同，如水平和垂直极化、 $\pm 45^\circ$ 极化

LTE 使用多进多出的 MIMO 技术，可以起到空间复用和空间分集的作用。

2.2.2 复用与多址

经常张冠李戴，搞不清楚谁是谁，怎么办？避免张冠李戴、搞清楚谁是谁，就是所谓的多址技术。把人撒出去，还能认回来。这就需要按照一定规则区别这些人，避免混淆（见图 2-5）！

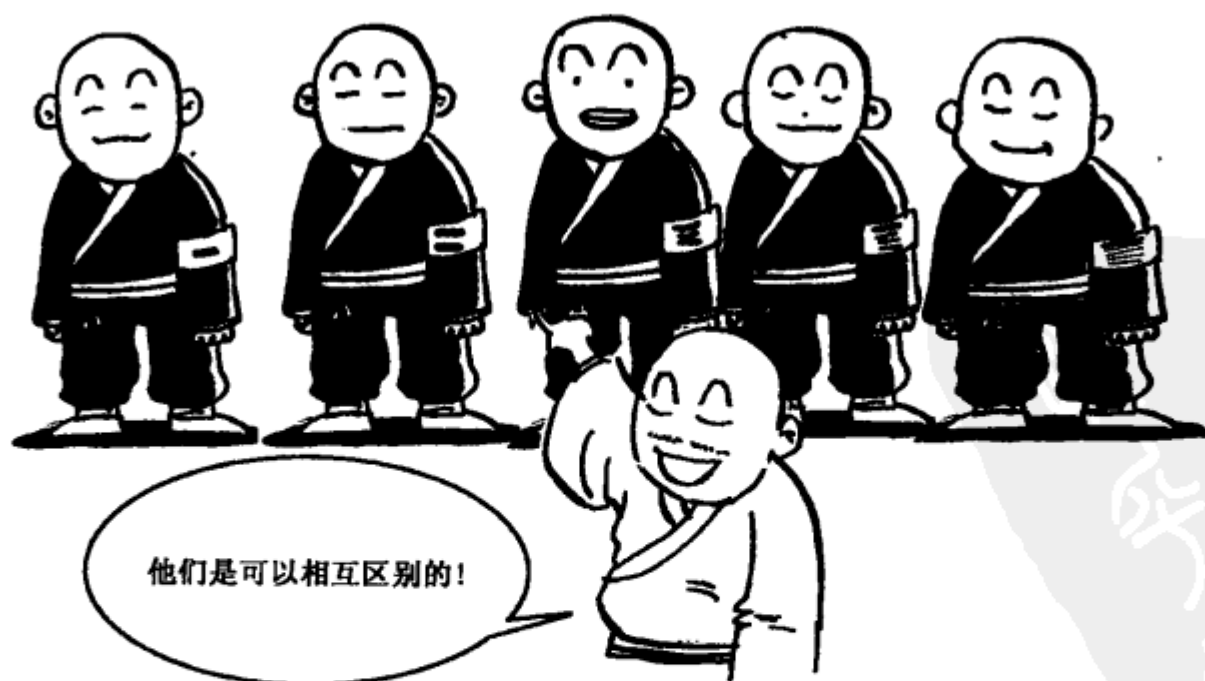


图 2-5 相互区别的必要性

复用 (Division Multiplexing, DM) 和多址 (Division Multiple Access, DMA) 的共同特点是在某一共同资源上传送多个数据流。但“复用”技术并不管多个数据流是用于一个用户, 还是几个用户。也就是说, “复用”只是区别不同的数据流, 并不区别数据流是哪个用户的。“多址”技术则是不同用户的多个数据流的复用, 是要区分不同用户的。

复用技术可以用“XDM”表示, 多址技术可以用“XDMA”来表示。其中“X”可以是“T”(Time, 时间)、“F”(Frequency, 频率)、“S”(Space, 空间)、“C”(Code, 码)。

以FDM和FDMA为例说明一下复用和多址的区别, 如图2-6所示。

总之, 在无线通信里面, 复用技术是为了提高无线信道的容量; 分集技术是为了提高信息传送的可靠性; 而多址技术则是为了把信息传送给正确的人。

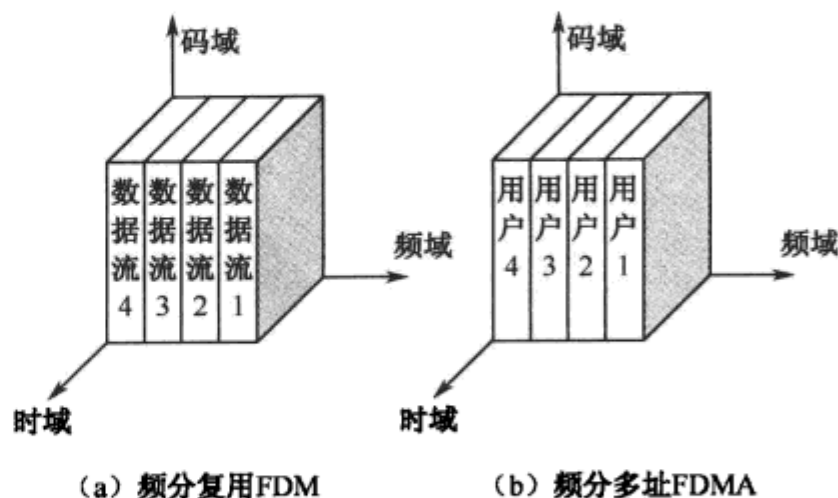


图 2-6 复用和多址

2.3 自适应

形势变了, 可很多人刻舟求剑, 静止地看问题。这样的人不是自以为是, 就是错误不断。

我们的态度是世易时移, 变法宜矣。反对刻舟求剑, 鼓励见机行事。也就是说, 提高人们的自适应能力, 环境、条件变了, 对策自然应该变化。

天气变冷了, 给孩子多穿一些衣服; 天气变热了, 给孩子少穿一些衣服。我们通过给孩子增减衣服来适应环境温度的变化。有一天, 孩子可以自己根据环境温度的变化来增减衣服了, 这叫做孩子具备了自适应 (Self-Adaptive) 能力 (见图 2-7)。

在通信系统里, 系统自身能够根据环境、目标、资源供给等条件的变化, 调节自己的状态, 无须人为参与, 称为自适应。这里面有三个关键点: 自身、适应、变化。

无线传播环境在随时随地的变化, 无线通信资源也在时多时少地波动。这就需要无线通信系统能够在无须人为参与的情况下, 适应这种变化, 保证无线通信业务的正常进行。

无线链路的自适应是现代无线制式首先要考虑的能力。没有这种自适应能力, 用户通信质量将无法切实保证, 网络通信资源难以高效利用。

无线链路自适应常通过功率控制或者速率控制来实现。无论是功率控制, 还是速率控制, 都是一种信道自适应技术。



图 2-7 自适应能力

有的“自适应”是变化的功率、恒定的速率(速率不控制),如 WCDMA 或 TD-SCDMA 中的 PS64k、PS128k;还有的“自适应”是变化的速率、恒定的功率,如 WCDMA 或 TD-SCDMA 中的 HSDPA (其业务信道不进行功控)。

还有一种动态信道分配 (Dynamic Channel Allocation, DCA) 的技术,也属于信道自适应技术,或者叫做资源自适应。

智能天线或者自适应天线,其实也是一种链路自适应的技术,属于空间自适应技术或者波束自适应技术范畴。

以上这些自适应技术,不外乎是空间、时域、码域、频域方面的自适应。在 LTE 中,一种全新的自适应技术——带宽自适应技术将被应用,我们将在后面的章节中介绍。

2.3.1 功率自适应

功率控制是无线链路自适应的一项重要技术,是发射端根据无线链路的接收电平、接收质量动态地调整发射功率的技术。

功率控制分为开环功控、闭环功控,如图 2-8 所示。

开环功控是终端或基站自己根据无线链路的状况判断功率发射的大小,而不交互升高和降低功率的命令,可称为“我的地盘我做主”的功率控制方式;而闭环功控是终端或基站根据对方升高和降低功率的命令,来决定发射功率的大小,可称为“唯马首是瞻”的工作方式。

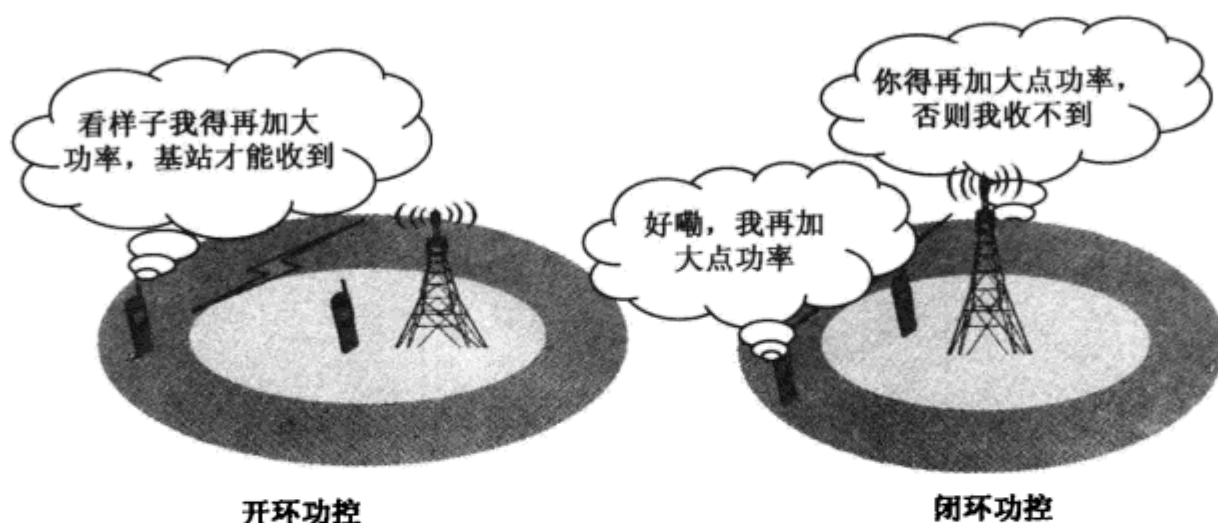


图 2-8 链路自适应功率控制

2.3.2 速率自适应

速率控制是系统通过调节业务速率的方式, 来自适应无线环境的链路自适应技术。速率的变化通常是通过调节数据块大小、编码方式和调制方式来实现的。

3G 中语音业务速率控制的技术是 AMR (Adaptive MultiRate, 自适应多速率)。在 GSM 中, 为了提高系统的无线链路的自适应能力, 引入了半速率技术; 有的厂家借鉴了 3G 的 AMR 技术, 在 GSM 中也实现了 AMR 技术。

AMR 共定义了 8 种语音业务的数据块大小模式, 每一种模式对应一种速率。在无线环境中, 由于用户通信位置的变换, 链路质量在不断变化。系统根据变化的无线环境, 选择一种模式, 即一种速率来适应这种变化。在进行语音通话的无线链路中, 当功率控制调整到极限仍不能适应无线链路的时候, 可以采用 AMR 的技术, 降低业务速率, 进而减少质量差的链路对网络资源的无效占用, 提高无线网络资源的使用效率。

3G 中 HSDPA 速率控制的技术是 AMC (Adaptive Moderation and Coding, 自适应调制编码)。其实, 在 GSM 的 GPRS/EDGE 制式中使用的也是这种速率控制方式。AMC 技术是发送端通过改变数据传输的编码和调制方式, 进而适应无线链路的变化, 如图 2-9 所示。

从 2G、3G, 甚至到 4G, 都有速率控制的自适应技术, 最基本的速率控制手段不外乎改变调制和编码的方式。

靠近基站的用户, 其无线环境良好, 接收到的无线信号功率强, 链路质量较高, 一般采用高阶调制方式 (如 HSDPA 中的 16QAM 和 EDGE 中的 8PSK) 和高效率信道编码 (如 3/4 编码速率), 可获得较高的数据业务吞吐率。

远离基站的用户, 其无线环境较差, 接收到的无线信号功率低, 链路质量很低, 一般采用低阶调制方式 (如 QPSK) 和低效率的信道编码 (如 1/4 编码速率), 可获得的数据业务吞吐率较低。

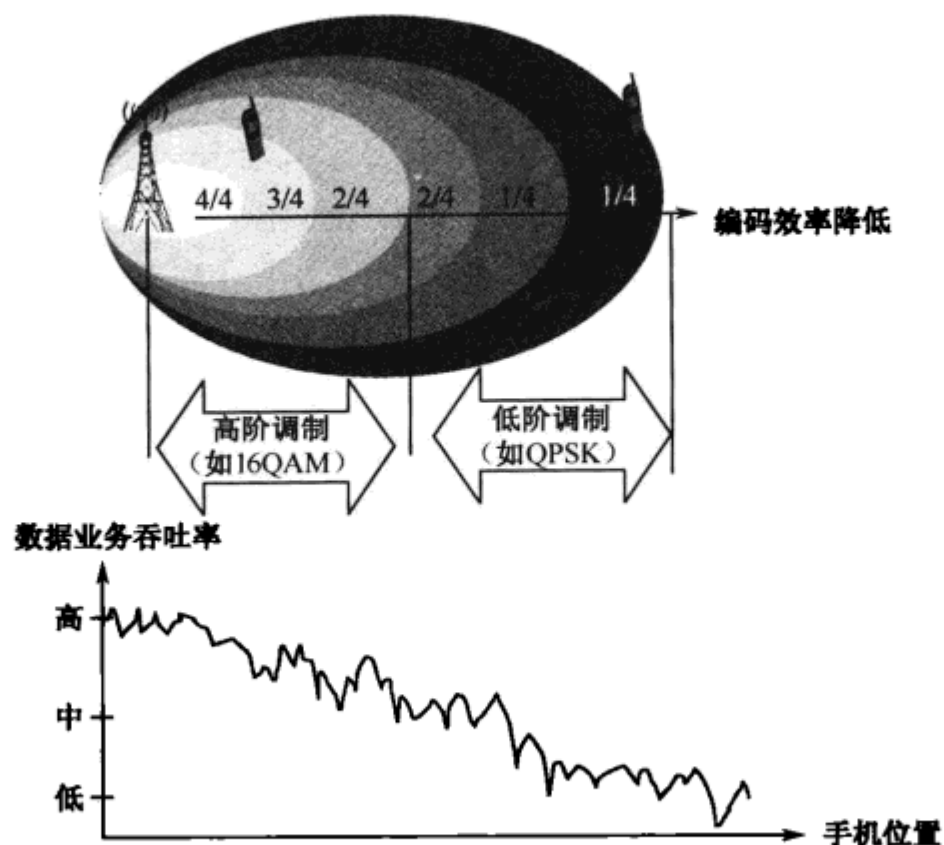


图 2-9 AMC 速率控制方式

2.4 共享和专用

资源使用效率很低，怎么办？提高资源的使用效率，就应该增加资源的共享性，尽量减少少数人独占资源。

想象一下，你是一家公司的领导，给你分配一间专用的办公室，由你一个人使用，办公条件相当优越，此时你会有一种运筹帷幄之中决胜千里之外的感觉。这时，你个人的用户体验是非常好的。

但是，好景不长，公司发展迅速，领导迅速增多。总经理觉得你一个人独自占用一间办公室，资源有些浪费，决定在这间办公室里再增加两张办公桌，同时考虑到领导经常出差，为了提高座位的利用率，再增加三个领导在这里办公。这时候，一间办公室、三张桌子、四个领导。领导需要共享座位资源。也就是说，地方是大伙的，你走了就是我的。伴随着公司资源利用率的提升，你的个人感觉就会不断下降。

同样大小的办公室，你一个人专用和大家共享，有什么不同呢？

你一个人专用，个人体验非常好，但是办公室的利用效率不高；大家共享，个人体验不好了，但是办公室的利用效率提高了（见图 2-10）。



图 2-10 专用和共享

在 GSM、WCDMA、TD-SCDMA 制式中，有电路交换域（CS 域）和分组交换域（PS 域）的区别，如图 2-11 所示。

电路交换域在连接建立时核心网要分配专用的网络资源，在释放连接时，释放专用资源；分组交换域的分组交换是以分组（Packet）为单位进行传输和交换的，无须在信息交互的双方建立专用的链接，无须为某一个业务分配专用的资源。电路交换域保证了业务的实时性，但资源利用效率不高；分组交换域提高了资源的共享性，但牺牲了业务的实时性。LTE 的核心网将取消 CS 域，全部采用 PS 域。

无线制式的物理或者传输信道的设计，也分共享（Shared）信道和专用（Dedicated）信道，如图 2-12 所示。共享信道（Shared Channel, SCH）可以由多个用户的信息共同占用，而专用信道（Dedicated Channel, DCH）在一定时间内仅由单个用户的信息占用。

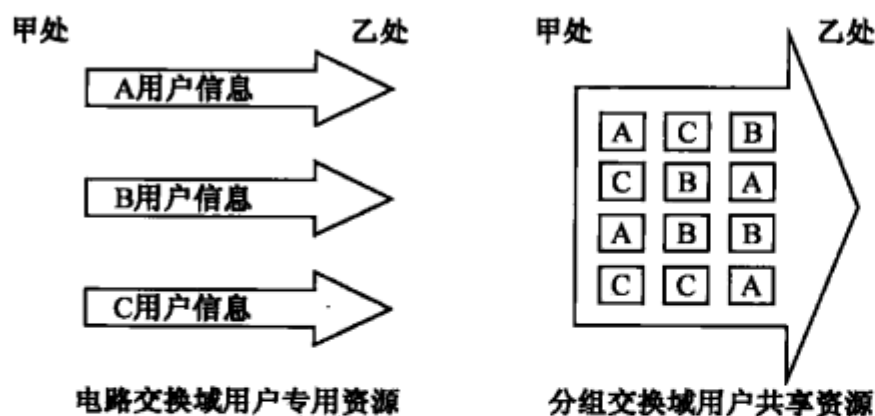


图 2-11 电路交换域和分组交换域



图 2-12 专用信道和共享信道

在 3GPP 设计的无线制式中，CS 业务（包括 AMR、VP）和 PS 业务（PS64k、PS128k、PS384k）的业务承载常采用专用信道的方式，而 HSDPA、HSUPA、LTE 中的业务承载则采用共享信道的方式。

2.5 竞争方式、调度方式

大家都知道，社会经济资源的配置方式主要有两种：市场经济、计划经济。

在市场经济里，生产资源的调度和配置，由市场说了算，也就是说，各生产企业根据自己对市场的理解来调整生产能力；而计划经济里的一切生产资源都是由计划部门负责调度和配置，也就是说，资源的配置权在某一个上级部门。

市场经济是基于竞争的资源分配方式，无须上下级频繁的信息交互，简化了主管部门的职能，对市场需求的反应快，资源利用充分，但容易产生过度竞争和经济危机。

计划经济是统一调度的资源分配方式，优点是资源调度有序，避免了过度竞争和经济危机；缺点是上下级信息交互频繁，对主管调度部门的事务处理能力要求较高，对市场需求的反应慢，资源利用不充分。

无线资源配置的方式也可以分为两种：基于竞争的分配方式和基于调度的分配方式。

2.5.1 基于竞争的资源分配方式

基于竞争的资源分配方式，类似于市场经济模式，网络中无须专门的资源调度设备。每一个用户在占用网络资源发送数据之前，需要自己了解网络资源。发现网络资源空闲的时候，就占用该资源。

假若有多个用户同时要发送数据，而且同时发现了网络资源有空闲，则需要通过竞争的方式获取网络资源。这种资源调度的方式，无须设备之间频繁的信令交互，设备管理功能简单，资源利用充分，但资源利用效率不高，容易产生过多冲突。

这种资源分配方式首先在以太网中使用，在 WLAN（Wireless LAN，无线局域网）中也使用这种方式，如 CSMA（Carrier Sense Multiple Access，载波侦听多路访问）。载波侦听（Carrier Sense）的含义是：在发送数据之前，用户设备会“侦听”网络资源，判断是否已经有其他数据传输。如果资源没有被占用，则可以传送信息；如果已监听到其他用户正在传送信息，则必须等待一定的时间再发送，避免冲突。

基于竞争的资源分配方式，类似开会时自由发言，发现别人说完话，自己趁没有人说话的时候赶快表达自己的观点（见图 2-13）。

2.5.2 基于调度的资源分配方式

基于调度的资源分配方式，类似计划经济模式。网络中需要进行无线资源管理（RRM）和调度，每一个用户对网络资源的占用不能自作主张，需要由相关部门分配（RRM 功能模块）。基于统一调度的资源分配方式，可以有效地分配网络资源，最大程度地提高

网络资源利用效率，避免由于竞争冲突造成的网络资源浪费；但是需要频繁的信令交互，对无线资源调度部门的处理能力要求较高。

基于调度的资源分配方式，类似开会时根据主持人的安排发言。想发言，那得等主持人同意了再说（见图 2-14）。



图 2-13 基于竞争的自由发言



图 2-14 主持人调度发言

在 2G、3G 无线制式中，无线资源管理模块在基站控制器（GSM 的 BSC、WCDMA 和 TD-SCDMA 的 RNC）中。在 LTE 中，无线资源管理模块下移到基站（eNodeB）中。

在一般情况下，无线资源的调度算法决定共享资源应该给哪些用户分配，有三种方式，如图 2-15 所示：轮询（Round Robin, RR）算法、最大载干比（Max C/I）算法和部分公平（Partional Fair, PF）算法。

轮询算法是“先到先分配”的方式，按照用户申请资源的先后顺序分配网络资源。这种算法公平地对待每一个用户，但整体资源调度效率却较低，有一点“大锅饭”的味道。这种算法具有公平性的上界，算法性能的下界。

最大载干比算法是把资源优先分配给那些信号质量较好的用户，这种算法整体资源调度效率较高，但有些质量差的用户可能始终得不到服务。这种算法具有算法性能的上界，公平性的下界，正所谓“强者恒强”，“近水楼台先得月，向阳花木易为春”。

既然“公平性”和“效率”不可兼得，只能各自做一些妥协、折中。于是提出部分公平的调度算法。这种算法是在牺牲部分公平性的情况下，尽量追求较高的整网资源调度效率，类似“构造和谐社会”的思路。

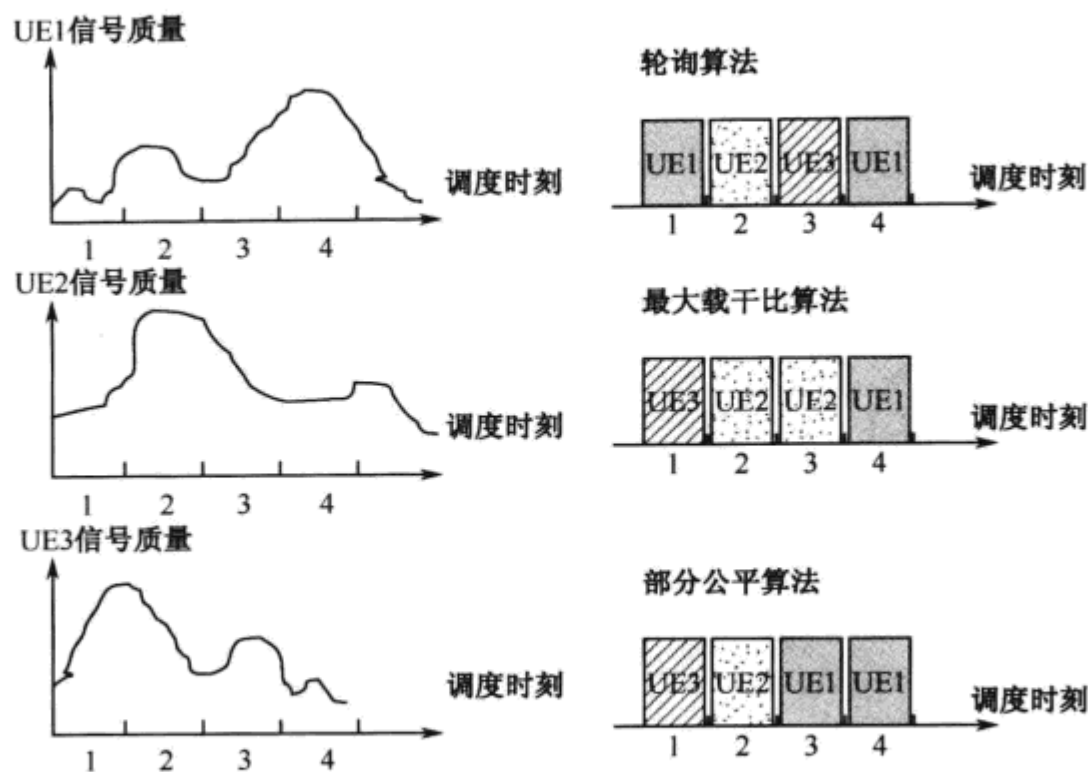


图 2-15 无线资源调度算法

2.6 业务面和控制面

一个货用列车的装卸工团队要想有效运作，必须有实际扛包干活的业务线人员，还要有负责协调管理工作的行政线人员。也就是说，从大的方面，可以划分为业务面和控制面。

在无线通信里，业务面，也叫做用户面，负责传送和处理用户业务数据的工作；控制面，负责传送和处理系统控制协调信令的工作。

无线信道一般都分为业务信道 (Traffic Channel, TCH) 和控制信道 (Control Channel, CCH) 两大类。

业务信道就是无线制式中真正传送业务数据的信道，就好比真正扛包干活的业务线人员。控制信道则是无线制式中指导业务信道给谁传送、如何传送 (传送格式)、何时传送、是否正确等内容的信道，好比负责指挥装卸工把包搬到什么地方、怎么运送、什么时候运送、包裹是否完好的管理人员一样。

举例来说，TD-SCDMA 制式的 HSDPA 技术，业务信道是 HS-DSCH，是真正负责扛数据包的信道；而 HS-SCCH 则为控制信道，负责协调数据包传送工作，协调的内容包括：数据包给谁发送 (用户 ID 信息)、这些数据包是如何打包的 (传输块格式)、采

用哪种调制和编码方式、是新传的包还是重新传的包（以前传送的包有问题），等等，如图 2-16 所示。

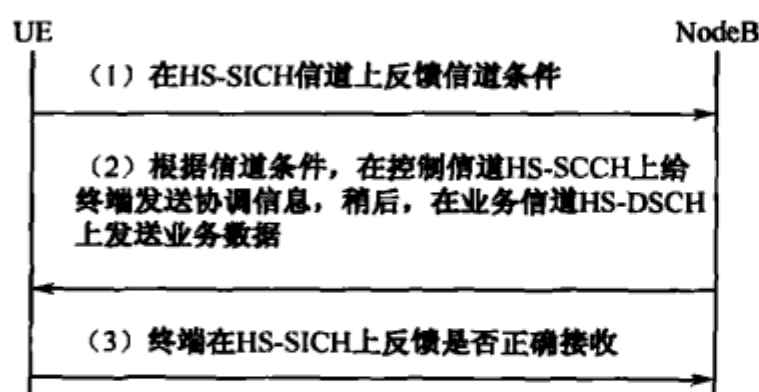


图 2-16 HSDPA 业务信道和控制信道协调工作

为了支持 HSDPA 技术，终端侧也要给基站反馈信道质量和是否正确接收数据包的信息，使用的信道是 HS-SICH，也是负责协调工作的信道。

NodeB 的调度模块根据不同用户在 HS-SICH 信道上反馈的信道条件，确定给谁服务，用什么样的格式传数据，确定好的协调信息通过控制信道 HS-SCCH 通知终端，随后在业务信道 HS-DSCH 发送数据。终端监测控制信道 HS-SCCH，看是否有发给自己的信息。如果有的话，终端开始接收 HS-DSCH。终端对接收到的数据进行解调，并根据校验结果，发送是否正确（ACK/NACK）的响应信息。如果 NodeB 收到了 NACK（数据接收不正确的反馈），进行数据的重发，直到收到终端的 ACK 消息或达到最大重传次数。

2.7 集中和分布

资源布置的方式包括两种：集中和分散（在无线通信领域，经常用“分布”），如图 2-17 所示。

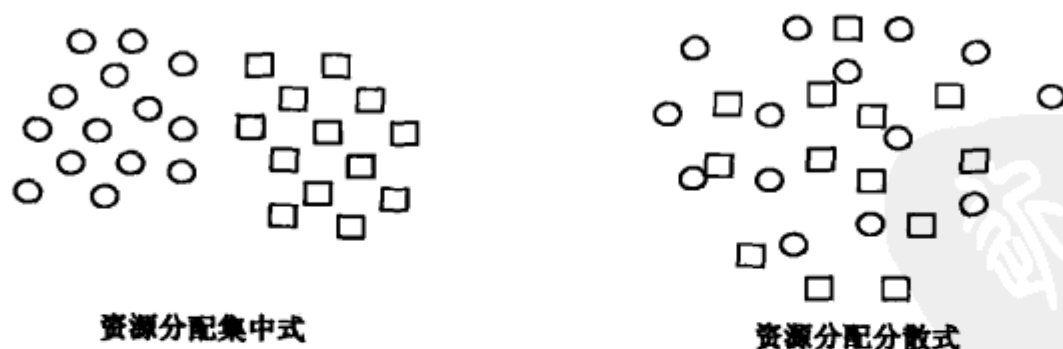


图 2-17 集中和分散

有句话说，集中优势兵力，各个击破敌人。集中资源的最大好处是调度简单、管理方便；化整为零的分散方式，则可以分散风险，避免被一网打尽，但管理困难，沟通协调复杂。

我们在投资、理财的时候也会碰到类似问题。把所有的钱投在一个方向上，可以集

中精力，可一旦出现风险，则可能损失较大；所以有人说，不要把鸡蛋放在一个篮子里，采用分散投资的方法，会使分散投资方式的管理复杂度增加，需要协调的事情增多。

无线通信的物理资源分配，也有两种：集中和分布（不用“分散”这个词），如图 2-18 所示。

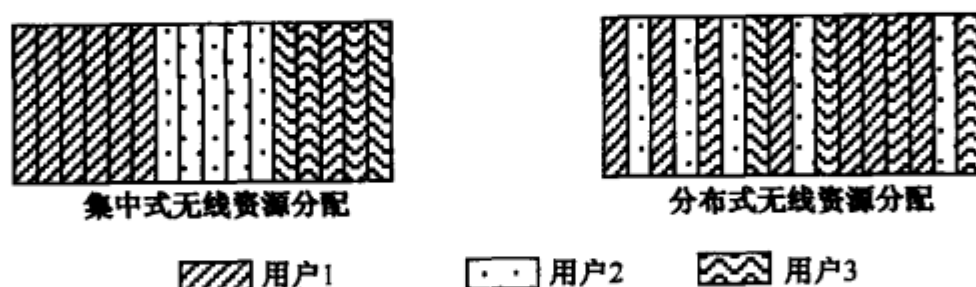


图 2-18 无线资源分配的集中和分布

集中式的物理资源分配方式是指给一个用户某一时间分配物理上连续的资源，或者是集中在一起的资源。集中式的物理资源分配方式，调度简单，但不灵活。

而分布式的物理资源分配方式，在某一段时间内给用户分配的物理资源分散在不同的地方，不是连续的资源。分布式的物理资源分配方式，可以灵活分配资源，但调度信令较复杂。

在 LTE 中，正交的子载波是一种无线的物理资源，系统在分配这个资源的时候，可以采用集中式，也可采用分布式，各有优缺点。关于 LTE 资源分配的内容，后面章节有所涉及。

2.8 层级化、扁平化、网状网

俗话说：“人上一百，形形色色。”要想把这些人组织起来形成一个有效的工作团队，有如图 2-19 所示的两种方式：层级化和扁平化。

2.8.1 组织结构

层级化的组织结构类似一个金字塔，位于塔尖的管理者的指令通过一级级的中层管理者到达底层；位于塔底员工的信息通过一层层的筛选，到达塔尖的管理者。

一个管理者的精力和能力有限，所以能够有效管理的下属人数也是有限的，这个限制称为管理幅度。管理幅度越窄，管理的层级就越多，对管理者的要求就会变得越简单。

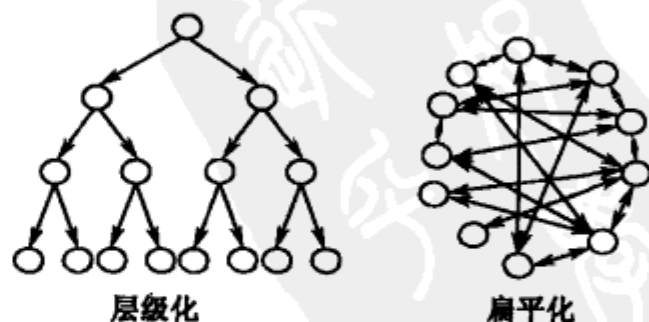


图 2-19 层级化和扁平化组织

管理幅度越宽，管理的层级就会越少，对底层人员和管理者的要求就会变得越复杂。

层级化的组织结构的结构清晰，管理职责简单，执行力强，但缺乏横向沟通渠道，沟通距离较长，沟通时延也大，而且信息传递过程中也会失真、被扭曲。随着规模的增大，管理层次众多的层级化组织结构对外界环境和市场需求变化的适应性减弱，响应能力降低。

层级化组织面临的问题如何解决呢？最有效的办法就是扁平化，即增加管理幅度，降低管理层次，将金字塔的组织形式压成扁平状的组织形式。

扁平化要求管理层级减少，沟通渠道缩短，管理幅度大大增加。扁平化组织结构要求底层成员之间建立有效的沟通渠道，要求管理者的职能范围增大，事务处理能力增加。扁平化组织结构带来的好处是信息传递的时延减少，效率增加，便于组织适应客户需求，便于组织自我修复和自我完善。缺点是对成员的事务处理能力要求较高。

层级化组织和扁平化组织的对比分析如表 2-3 所示。

表 2-3 层级化组织和扁平化组织的对比

比 较 项	层 级 化	扁 平 化
层次	多	少
管理幅度	窄	宽
节点功能	简单	复杂
沟通距离和时延	长	短
底层成员之间	无须沟通	需要复杂沟通
环境适应性	差	强
驱动力	高层驱动	网络自驱动

2.8.2 无线组网架构

无线接入网的组网结构也分层级化和扁平化两种形式。2G、3G 无线接入网都有两种网元，包括基站、基站控制器。基站之间没有接口，如图 2-20 所示。

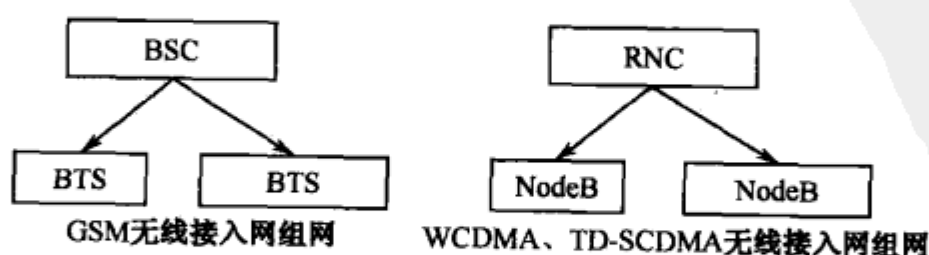


图 2-20 2G、3G 无线接入网的层级组网结构

在层级化的无线组网结构中，基站之间没有接口，基站之间的协调通过基站控制器

协调完成，信息传送距离较长，信息传送时延较大，网络的自适应能力较差。

为了克服层级化组网的缺点，未来网络架构需要向扁平化的方向演进。这就要求基站控制器的功能向基站转移。网络中任何一个节点兼有基站和基站控制器的功能，基站之间要建立信息传送接口。扁平化以后的网络结构，信息传送距离缩短，信息传送时延减少，网络的无线环境自适应能力增强。扁平化的无线组网结构又称为网状网。未来 LTE 无线接入网的组网架构就是网状网，它为扁平化的网络结构，如图 2-21 所示。

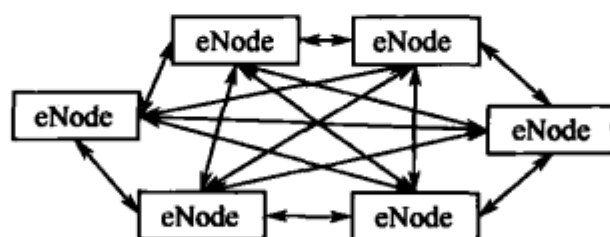


图 2-21 扁平化的网络结构

WLAN 的无线组网发展方向也是扁平化、网状网，如图 2-22 所示。WLAN 的 IEEE 802.11n 版本的英文名称为 Mesh，其含义就是“网孔”。和 LTE 不同的是：AP 之间接口的物理形式可以是无线的，而 LTE 中的 eNodeB 之间的接口则是有线的。

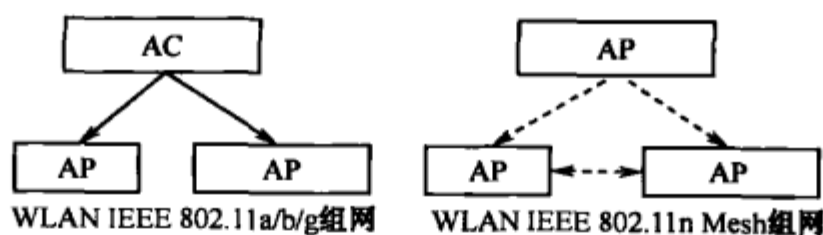


图 2-22 WLAN 的扁平化趋势

关于 LTE 组网架构方面的内容，将在下面章节中介绍。

机构变革、职能转换——扁平化的组网架构

知识要点

相对于以往的无线制式, LTE 在组网架构上有哪些改进? LTE 网络由哪些网元组成? 各有什么职能? 这是每一个 LTE 的无线工程师或无线项目管理者最起码应该知道的。

国王的谆谆教诲, 接班人奥先生很认同, 但还是心有顾虑, 面露怯色。

他的表情, 国王尽收眼底, “有什么难处就说吧!”

接班人奥先生说: “承蒙您的信任, 我受宠若惊。您的教诲非常正确, 但要我们的国家运作效率更高、竞争力更强, 组织结构得变! 这是一件大事啊!”

国王欣慰道: “我没有看错你。精兵简政, 管理层级扁平化, 把指挥所建在听得见炮声的地方!”

接班人奥先生是三吉皮皮国推行新政的鹰派人物, 他坚定地推行机构变革。为此, 他召开机构变革会议, 强调道: “动作要大一点, 言语要低调一些。”历来, 组织结构的变化, 都会触犯很多人的利益, 会遇到莫大的阻力。要促使组织结构的革命性变化, 但对外宣称这只是“演进”(见图 3-1)。

接班人奥先生把组织结构的“演进”工作概括为: “四化一分离。”

第一, 扁平化。取消中间层级, 加强基层职能。

第二, 分组化。取消专用特权通道, 加强分组共享能力。

第三, IP 高速化。取消传统信息传送方式, 修建现代 IP 信息高速公路。

第四, 多组织融合化。不仅考虑到兼容三吉皮皮国现有的成员, 还要考虑到非三吉皮皮国的成员。

一分离: 将实际干活的和协调干活的单位分开。

接班人奥先生组织结构变革的灵魂是: 快速、高效、高速、融合。他强调: “组织结构变革是大事, 要从地方到中央, 坚定不移地去执行。”

最后，他鼓励大家：“乘风破浪会有时，直挂云帆济沧海”。

会场上爆发出雷鸣般的掌声，余音缭绕，赶走了屋脊上的乌鸦，也赶走了人们心中的担忧。

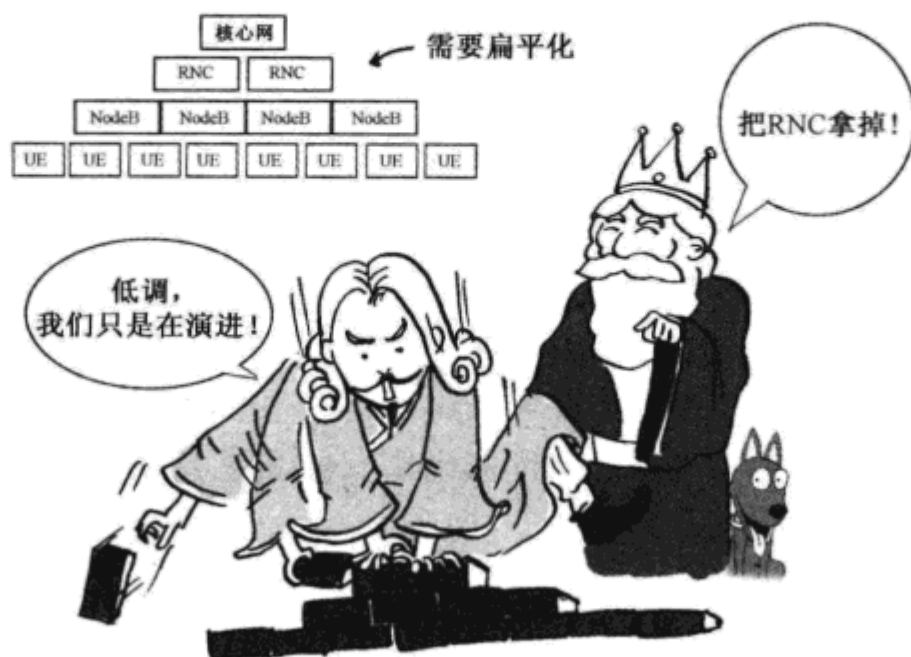


图 3-1 组织架构扁平化

3.1 从四层到三层

如果说无线通信系统是一家提供通信业务的公司的话，无线通信系统的组网架构相当于公司的组织架构。公司的变革很重要的一项内容就是组织架构的变化。组织架构变化的目的是提高公司运作效率，降低公司运作成本。

LTE 是长期演进的无线通信系统，为了提高系统的处理能力（诸如峰值速率、系统时延等指标），在很多方面需要“演进”，但对组网能力、系统成本影响重大的“演进”（我更愿意称之为“革命”）是系统架构的演进（System Architecture Evolution, SAE）。

在 3GPP 协议中，“SAE”这个词更多的是指核心网架构的“演进”，无线接入网架构的“演进”直接用 LTE 来表示。也就是说，LTE/SAE 才是指包括无线接入网和核心网在内的组网架构变迁，是 LTE 各项演进技术的重要基础。

LTE/SAE 的组网架构变迁主要包括扁平化、分组域化、IP 化、多制式融合化、用户面和业务面分离等工作，目的是提高峰值速率、降低系统时延、简化运营维护、降低系统成本。

LTE/SAE 的组网架构变迁不仅是层级关系的变化，还包括网元职能的转变，也就是各

个网元之间如何分工（功能划分）、如何配合（接口）、遵循什么样的规矩（协议）的问题。

3.1.1 少一层

在 3G UMTS 协议中，规定的组网架构是 4 层架构：终端（UE）、基站（NodeB）、无线网络控制器（RNC）、核心网（CN），如图 3-2 所示。这里需要说明的是，3G 中 RNC 位置的网元在 2G 网络中称为基站控制器（BSC），在 3G 中变了名字。这是由于 3G 的 RNC 之间有 Iur 接口，RNC 不只是基站控制器，而且是无线接入网络的控制器。

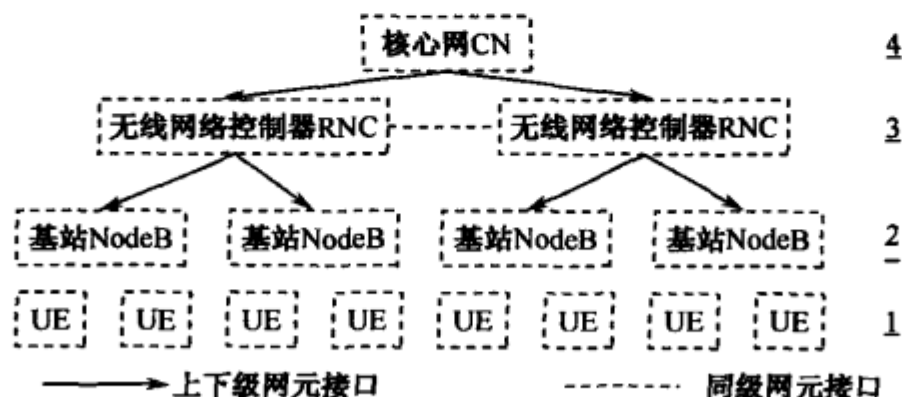


图 3-2 UMTS 4 层网络架构

LTE/SAE 将无线接入网演进为 eUTRAN（Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network），如图 3-3 所示。

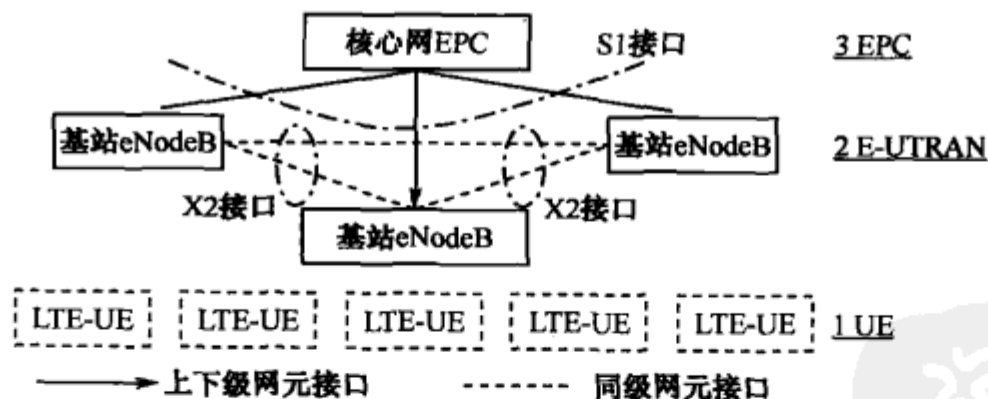


图 3-3 LTE/SAE 网络架构演进

eUTRAN 与 UTRAN 相比，去掉了 RNC。在 LTE/SAE 的组网架构中，减少了一层，减少了基站和核心网之间信息交互的多节点开销，向扁平化的网络迈进了一步。

在 LTE 标准制定的过程中，有很多参与过 WCDMA 标准制定工作的人，他们对 WCDMA 中的软切换情有独钟，希望 LTE 能够支持软切换。但是 LTE 要想支持软切换，必须有 RNC 这个节点。为了把组网架构扁平化，使 LTE 的组网层级还是 3 层，LTE 标准制定者忍痛把“软切换”技术给扼杀了。

LTE 扁平化网络结构的好处有：

- (1) 节点数量减少，用户平面的时延大大缩短。
- (2) 简化了控制平面从睡眠状态到激活状态的过程，减少了状态迁移的时间。
- (3) 降低了系统复杂性，减少了接口类型，系统内部相应的交互操作也随之减少了。

3.1.2 多一口

eUTRAN 是由若干个 eNodeB 组成的，eNodeB 之间增加了一个 X2 接口。可以以光纤为载体，实现无线侧 IP 化传输，使得基站网元之间可以协调工作。这一点和以往无线制式有着本质的不同（以往无线制式基站之间是没有接口的）。eNodeB 之间设计接口，可以方便 LTE 的无线网采用网格（Mesh）方式组成网状网。扁平化的网状网非常类似于 IEEE 802.11n WLAN 的 Mesh 组网方式。

eNodeB 之间实现互连，也就是说，一个基站和多个基站相连，任何两点之间的传输故障，不会造成某个基站成为“孤点”。该站总是可以取道其他传输通路与网络相连。这一点和 UMTS 不同，一旦 NodeB 和 RNC 之间的传输连接断掉，该 NodeB 立即成为孤点。如图 3-4 所示。eNode 的 Mesh 组网方式，最小化了“单点失败”（Single Points of Failure，协议用语），即减少了基站成为孤点的概率，增强了网络健壮性。

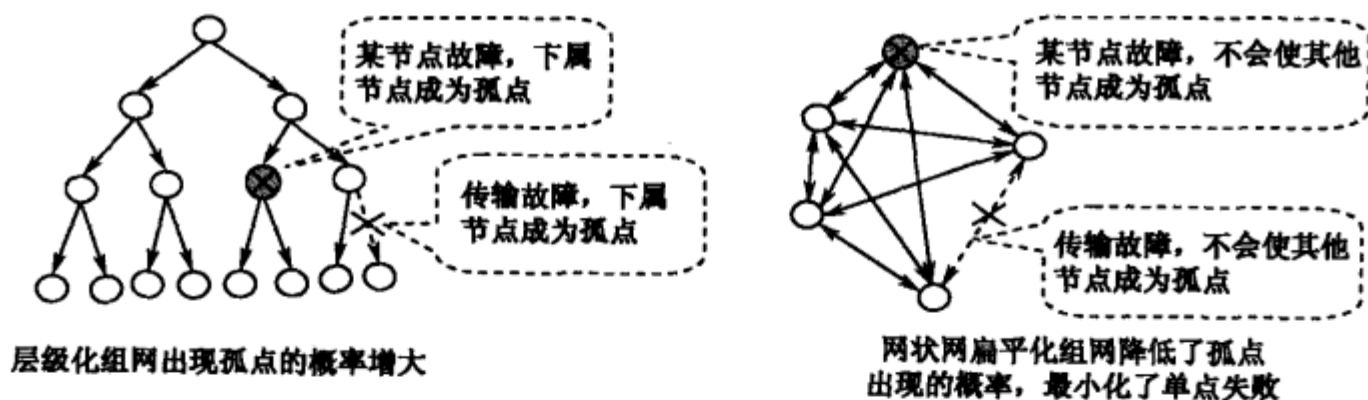


图 3-4 基站间互连最小化了单点失败

3.2 “胖”基站

在 3G 阶段的无线接入网 UTRAN，由基站（NodeB）和无线网络控制器（RNC）两种网元组成。

如果无线网络是城市的话，基站 NodeB 相当于村委会或街道办，直接和百姓打交道；而 RNC 则相当于乡镇政府或区政府，协调和控制管辖范围内的基层组织工作。

NodeB 是网络侧直接和终端 UE 交互信息的设备，主要完成射频处理和基带处理两大

类工作。射频处理主要完成发送或接收高频无线信号，以及高频无线信号和基带信号的相互转换功能；基带处理完成信道编/译码、复用/解复用、扩频调制及解扩/解调等功能。

RNC 则主要负责控制和协调基站间配合工作的，主要完成系统接入控制、承载控制、移动性管理、宏分集合并、无线资源管理等控制功能。

LTE 的 eUTRAN 去掉了 RNC 这个网元之后，将其底层功能分给了 eNodeB (eNB)，高层功能分给了核心网的 AGW (Access Gateway，接入网关，包括服务网关 SGW 和分组网关 PGW)。

LTE 的 eUTRAN 完全由众多的 eNodeB 组成。eNodeB 直接和 LTE 的终端交互信息。由于少了无线网络控制节点，eNodeB 要在以前功能的基础上，增加一些自我管理、多点协调的能力。也就是说，从功能上来讲，eNodeB 比 NodeB 变“胖”了。

eNodeB 在原来 NodeB 的功能基础上，增加了原 RNC 的系统接入控制、承载控制、移动性管理、宏分集合并、无线资源管理等控制功能及原 SGSN、GGSN 路由选择功能，即 eNodeB 的功能主要是由 3G 阶段的 NodeB、RNC、SGSN、GGSN 四个网元的部分功能演化而来的，如图 3-5 所示。

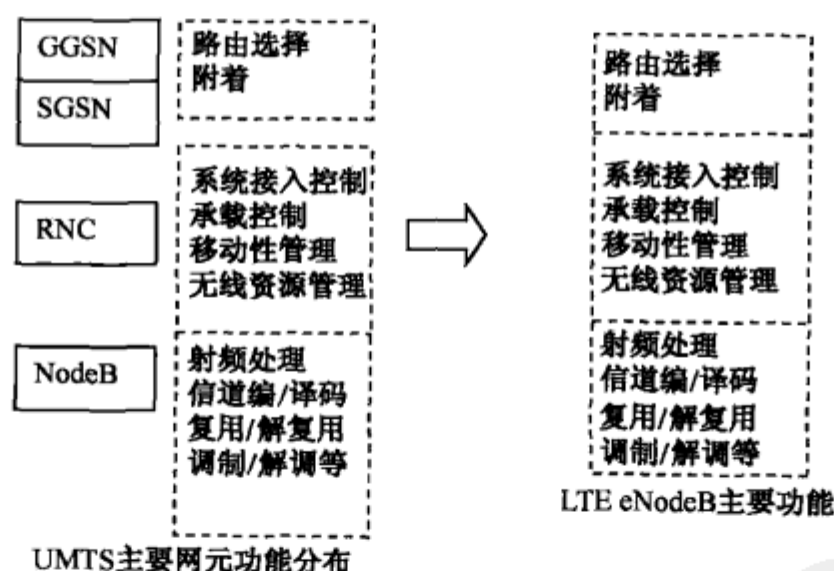


图 3-5 eNodeB 的功能演进

eNodeB 的功能除了上述功能之外，还包括与 LTE 的核心网 (EPC) 进行信息交互的功能，如 UE 附着状态时选择为之服务的移动性管理实体 (MME)，选择转发用户面数据的服务网关 (SGW) 的路由，等等。

在 WLAN 里，AP (Access Point，接入点) 有“胖瘦”之分，“瘦”AP 只有接入点的功能 (天线适配，IEEE 802.11a/b/g/n 协议)；而“胖”AP 除了接入点的功能之外，还包括 AC (Access Control，接入控制) 的功能，如加密、认证、转发、管理维护、移动性等功能。这里的“胖瘦”是从功能上的多寡来区别的。

LTE 的 eNodeB 的功能比 UMTS 的 NodeB 更多、更强。如果仿照 WLAN “胖瘦”

AP 的区别，LTE 的 eNodeB 就是“胖”基站，它集成了以往 NodeB 和 RNC 的主要功能，确确实实发福了（见图 3-6）。

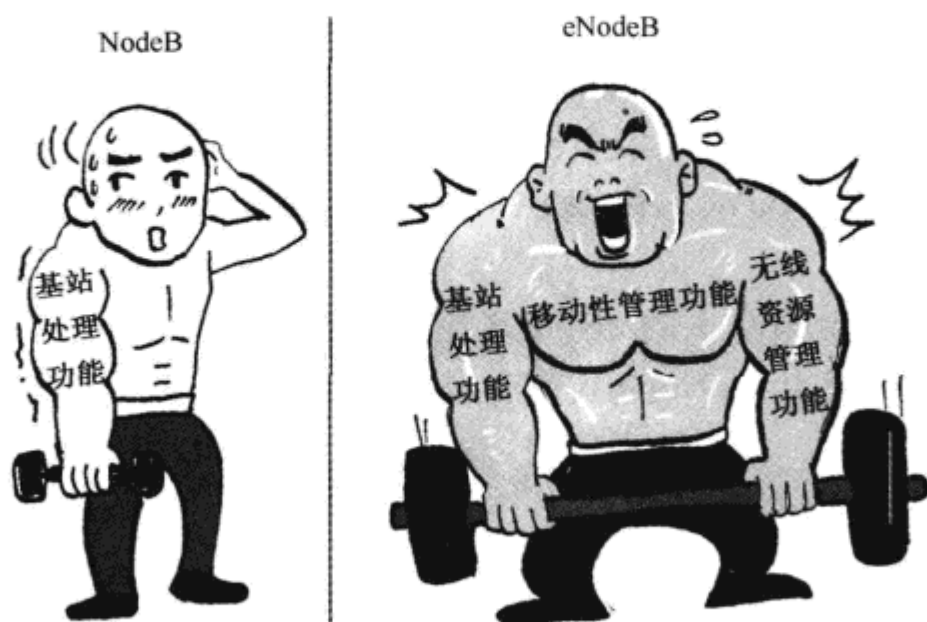


图 3-6 基站的“胖瘦”

3.3 中央机构 EPC

LTE/SAE 核心网的系统架构将演进为 EPC（Evolved Packet Core，演进的包交换核心），如图 3-7 所示。LTE 的核心网 EPC 主要由 MME（Mobility Management Entity，移动性管理实体），SGW（Serving Gateway，服务网关）和 PGW（Packet Data Node Gateway，PDN 网关或分组数据节点网关）组成。多个 EPC 的集合可以称为 EPS（Evolved Packet System，演进的分组交换系统）。

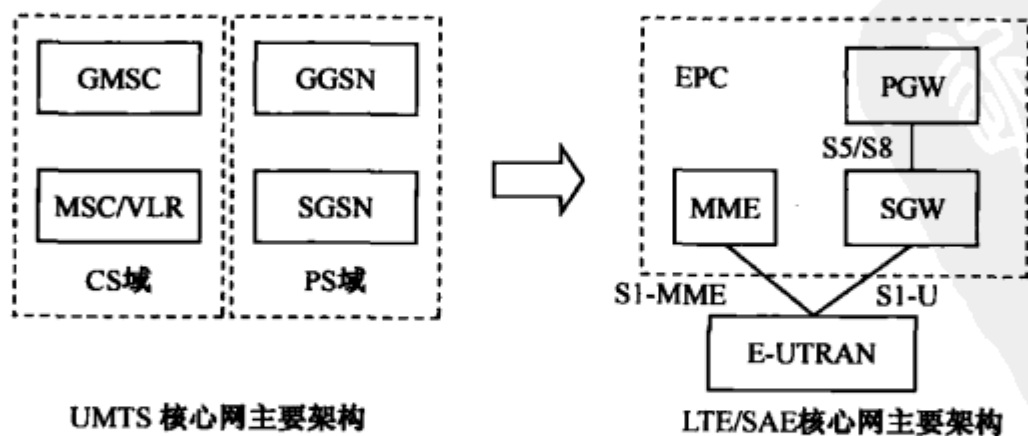


图 3-7 LTE/SAE 核心网演进

3.3.1 EPC 的演进

EPC 的“Evolved（演进）”表现在哪些方面呢？

首先，将 CS 域业务承载在 PS 域。取消了 CS 域，减少了 CS 域的网元种类，实现了核心网的 IP 化，进一步将系统结构简单化，方便低成本建网。语音业务（Voice）在以往无线制式里由 CS 域承载，而在 LTE 里则完全由 PS 域承载，所谓的 VoIP（Voice over IP），就是语音业务由分组网承载的意思。我们常说的 LTE 是“单一网络架构”，就是指全网为基于分组业务的网络架构。

其次，全网 IP 化。各网元节点之间的接口也都使用 IP 传输。eNodeB 之间可以实现 IP 传输，原 UTRAN 的 CS 域业务也可由 LTE 网络的 PS 域承载，于是 EPC 的各节点之间也可以进行 IP 化传输。互联网中的 IP 传输比无线通信中的 ATM 传输效率高，但 IP 传输是 Best Effort 的传输方式，缺乏 QoS 保证。因此，LTE 全网 IP 化的关键支撑就是端到端的 QoS 保障机制。

最后，LTE/SAE 在核心网的演进过程中实现了用户面和控制面的分离，即用户面和控制面分别由不同的网元实体完成，这样对降低系统时延，提高核心网业务处理效率大有好处。

CS 域在 3GPP 的 R5 版本中已经实现了用户面和控制面的分离（从 R4 用户面和控制面合一的 MSC 和 GMSC 演变为 R5 的 MGW 负责用户面，MSC Server/GMSC Server 负责信令面），而 PS 域在 UMTS 中仍然是控制面和用户面不分离的结构，无论是控制面信息，还是用户面信息，都要由 SGSN 设备处理。

MME 属于控制平面设备，负责控制面信令传输；而两个网关 SGW（服务网关）和 PGW（PDN 网关）属于用户面设备，负责用户包数据的过滤、路由和转发。

EPC 和 eUTRAN 之间的接口为 S1 接口。由于用户面和控制面的分离，S1 接口可以分为两种：用户面接口和控制面接口。与 MME 实体的接口 S1-MME，是控制面接口；与 SGW 实体的接口为 S1-U，是用户面 S1 接口。

最重要的是，LTE 的核心网应该支持多网融合。EPC 应该支持包括 LTE 在内的多种无线接入技术，不仅要支持 UMTS 网络的接入，甚至还支持非 3GPP 制式的网络接入，如 GSM、CDMA、WLAN、WiMAX 等网络，从而实现不同无线制式在 EPC 平台上的大融合。

EPC 和各种无线制式中都设计有标准接口，如图 3-8 所示，以方便实现业务使用时在不同制式的无线系统中无缝切换。

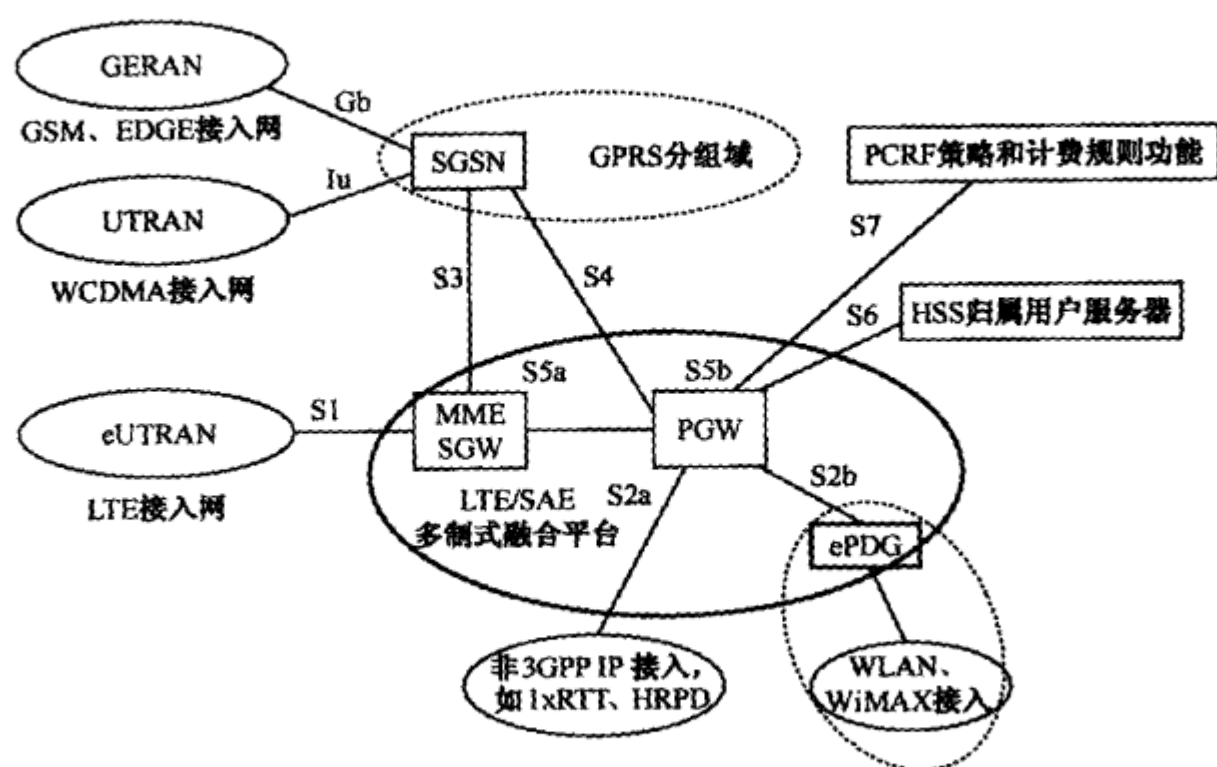


图 3-8 LTE/SAE 组网架构实现多制式融合

这里需要说明的是，LTE 制式对应的无线接入网称为 eUTRAN；UMTS (WCDMA 和 TD-SCDMA) 对应的无线接入网称为 UTRAN；GSM 和 EDGE 对应的无线接入网称为 GERAN (GSM EDGE Radio Access Network)；CDMA 对应的无线接入网称为 1xRTT (CDMA 1x Radio Transmission Technology)；3G 标准的 cdma2000 对应的无线接入网称为 HRPD (cdma2000 High Rate Packet Data, cdma2000 高速分组数据)。

3.3.2 职能划分

LTE/SAE 体系架构相当于精简了中央办事机构，增强了地方职能的政府，目的是办事高效、成本降低。但是为了协调工作，中央和地方总得有一个分工界面。eNodeB 和 EPC 之间的功能划分如图 3-9 所示。这个功能划分图相当于一个职位说明表，不同的职位对应着不同的工作要求。eNodeB 是服务一方子民 (UE) 的地方机构，而 EPC 则是负责分组数据交换的中央平台。

eNodeB 主要承担的是基层用户的服务和资源管理功能，即除了提供和管辖区域内的用户的空中接口功能之外，还要提供一些资源管理功能，资源调度功能，接入控制、承载控制、移动性管理等功能。

MME 的主要功能有寻呼、切换、漫游、鉴权，对 NAS (Non-Access Stratum, 非接入层) 信令的加密和完整性保护，对 AS (Access Stratum, 接入层) 安全性控制、空闲

状态移动性控制等。其中 NAS 信令是指 UE 和核心网 EPC 直接联系使用的，它是接入网 eUTRAN 不做分析，也不直接使用的信令；AS 信令是接入网 eUTRAN 分析并使用的信令。

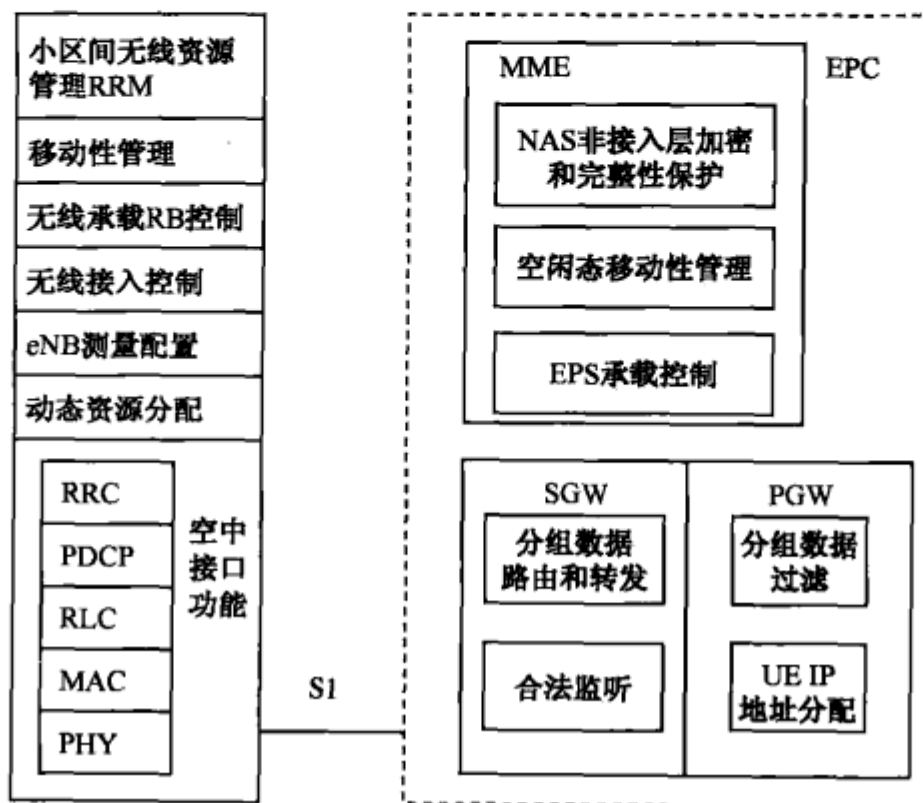


图 3-9 eNodeB 和 EPC 之间的功能划分

SGW（服务网关）是 EPC 和 eUTRAN 的一个边界网关，不和其他系统网关，如 GGSN、PDG 直接相连，主要功能包括 LTE 系统内的分组数据路由及转发、合法监听、计费。

PGW（PDN 网关）是和运营商外部或者内部的分组网络连接的网关，功能类似 UMTS 或 EGDE 中的 GGSN，是所有 3GPP 系统或者非 3GPP 系统分组网络的统一出入口。

PGW 主要功能包括分组包深度检查、分组数据过滤及筛选、转发、路由选择等。此外，PGW（PDN 网关）还负责 UE 的 IP 地址分配，速率限制、上/下行业务级计费等功能。设立 PDN 网关的目的是为了方便引入 LTE 系统以外的分组网络，使得多系统引入 LTE 的接口数目最小化，EPS 和外界的接口功能简单化、清晰化，从而使 LTE/SAE 的核心网真正成为一个多制式融合的平台。

打个比方，MME 是一个负责流动人口管理的公安部门，SGW 是一个负责人员和物资中转的快递公司，PGW 则是对人员和物资进行出入境检查的口岸（见图 3-10）。



图 3-10 EPC 的组成单元

EPC 的三个网元是逻辑上的概念，和物理形态不一定是一一对应的。MME 和 SGW 可以是一个物理节点，也可以是分离的两个物理节点；SGW 和 PGW 可以是一个物理节点，也可以是分离的两个物理节点。但一般 MME 和 PGW 不在一个物理实体里，更没有 MME、SGW、PGW 三位一体的。

沟通无障碍——接口协议

知识要点

上一章，我们知道了 LTE 网络由哪些网元组成，现在的问题是彼此之间应该如何联系呢？网元之间应该有标准化的接口。本章重点介绍 LTE 终端和网络间的空中接口 Uu、基站之间的 X2 接口、基站和核心网之间的 S1 接口；本章还简要介绍 LTE 的接口协议栈有何特点，和以往无线制式相比有什么特点。

国王伫立窗前，感慨道：“知我者谓我心忧，不知我者谓我何求？”

接班人奥先生非常懂得国王的心思，由于渠道不畅通，接口繁杂，上下级之间、同级之间的沟通确实存在障碍。下级不理解上级的要求。其实有时候，上级也不知道下级在说什么？

国王问接班人奥先生：“部门间接口工作，你是怎么想的？”

接班人奥先生回答道：“三个原则：简单、分层、分面。具体地说，减少接口种类，降低复杂度；调整接口部门功能层级，更加清晰明确；梳理接口部门工作，业务部门和行政部门分开。”

国王说：“部门之间的沟通总会有各种问题，部门之间的文书传递（信令及流程）不可随意发挥，要用一致的格式，语言没有二义性。”

接班人奥先生说：“现在基层组织规划了两种类型的接口，一个是官民接口（如同手机和网络的空中接口）；一个是官官接口（如同网元之间的地面接口）。官官接口又包括村委会或街道办之间的平级接口和村委会或街道办与中央之间的上下级接口。”

沟通无障碍，好运跟着来。良好的接口工作是事业成功的基石。对于这一点，国王和接班人奥先生达成了高度的一致。

4.1 接口协议栈

接口是指不同网元之间的信息交互方式。既然是信息交互，就应该使用彼此能够看得懂的语言，这就是接口协议。接口协议的架构称为协议栈。

无线通信制式的接口依所处的物理位置不同，可以分为空中接口和地面接口。相应地，接口协议也分为空中接口协议和地面接口协议。

空中接口是无线制式最具个性的地方。不同的无线制式，空中接口的最底层（物理层）的技术实现有很大的不同。

LTE 无线侧的主要接口也分空中接口和地面接口。LTE 空中接口是 UE 和 eNodeB 的 LTE-Uu 接口，LTE 无线侧的地面接口主要是 eNodeB 之间的 X2 接口及 eNodeB 和 EPC 之间的 S1 接口。

4.1.1 三层

为了简化设计，协议栈一定是分层结构。底层为上层提供服务，上层使用下层提供的功能，而不必清楚过程处理的细节。协议栈如同一个公司，内部进行分层和分工，各司其责；对外有统一接口，负责收集信息、发布信息。

比较常见的分层协议有 OSI 标准七层协议和 TCP/IP 四层协议。

无线制式的接口协议也要分层，粗略地分为物理层（Physical Layer, PHY）、数据链路层（Data Link Layer, DLL）、网络层（Network Layer, NL）。简单地说，可以分为层一（L1，物理层）、层二（L2，数据链路层）、层三（L3，网络层）。

层一的主要功能是提供两个物理实体间的可靠比特流的传送，适配传输媒介。在无线的空中接口中，适配的是无线环境；在地面接口中，适配的则是 E1、网线、光纤等传输媒介。

层二的主要功能是信道复用和解复用、数据格式的封装、数据包调度等。完成的主要功能是具有个性的业务数据向没有个性的通用数据帧的转换。

层三的主要功能则是寻址、路由选择、连接的建立和控制、资源的配置策略，等等。

eUTRAN 和 UTRAN 的分层结构类似，但为了灵活承载业务、简化网络结构、缩短处理时延，eUTRAN 接口协议栈的以下功能从层三（L3）转移到层二（L2）：

- （1）动态资源管理和 QoS 保证功能转移到 MAC（媒体接入控制）层。
- （2）DTX（不连续发射）/DRX（不连续接收）控制转移到 MAC 层。
- （3）业务量测量和上报由 MAC 层负责。
- （4）将控制平面的安全性（加密）和完整性保护转移到 PDCP。

4.1.2 两面

LTE 接口协议栈除了分层还要分面。

接口协议从信息处理的类型不同，可以分为用户面协议和控制面协议。

用户面和控制面分别相当于企业里面的业务线和管理线，业务线负责实际干活，管理线负责人力、物力、财力上的协调和控制。从组织管理的高效性来说，干活的人和管理协调干活的人应尽量分开；也就是说，建立职业经理人制度，控制面和业务面彻底分开。

用户面负责业务数据的传送和处理，控制面负责协调和控制信令的传送和处理。用户面和控制面都是逻辑上的概念。

在物理层，不区分用户面和控制面；而在层二，数据处理功能开始区分用户面和控制面；在层三，用户面和控制面则由不同的功能实体完成。

在无线侧，用户面和控制面还在一个物理实体 eNodeB 上；而在核心网侧，用户面和控制面则完全实现了物理上的分离，分别安排在不同的物理实体上了。

不同接口的协议在细节上有所不同，但在架构上，都可套用如图 4-1 所示的三层两面协议栈的通用模型。

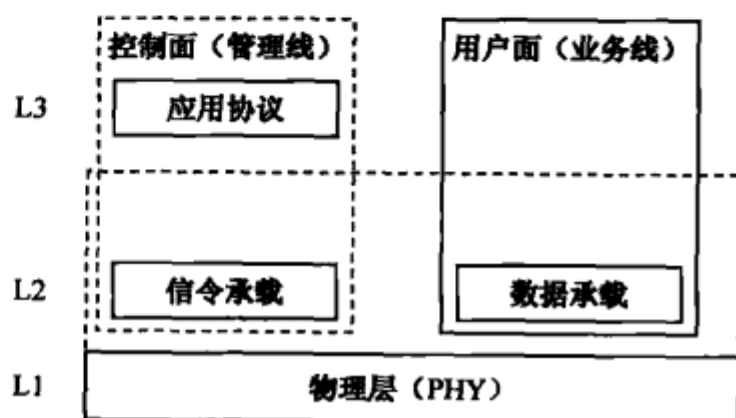


图 4-1 接口协议的通用模型

4.2 空中接口 Uu

LTE 空中接口的协议栈如图 4-2 所示。通过与图 4-3 所示的 UMTS 空中接口协议栈对比，来认识 LTE 空中接口协议栈的变化。

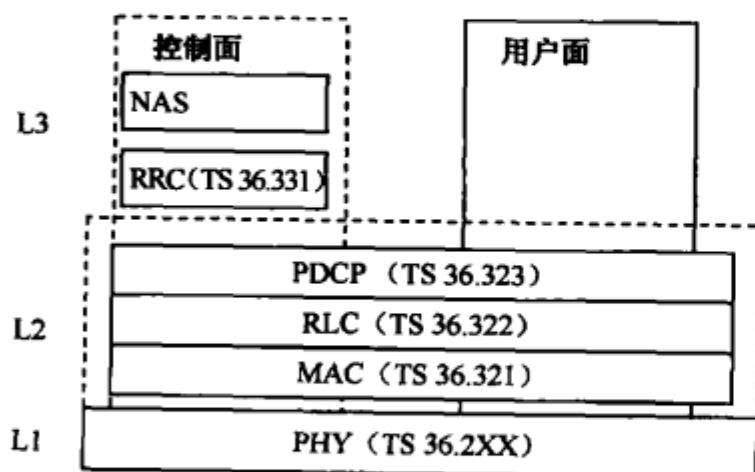


图 4-2 LTE-Uu 协议栈结构

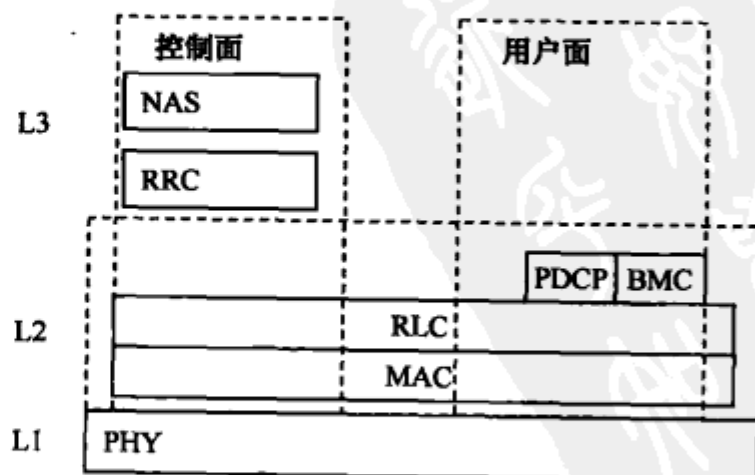


图 4-3 UMTS 空中接口协议栈结构

LTE 空中接口和 UMTS 空中接口都是三层两面的结构，二者主要区别有两点：PDCP (Packet Data Convergence Protocol, 分组数据汇聚协议) 和 BMC (Broadcast Multicast Control, 广播组播控制) 功能。

在 UMTS 架构中，由于并没有完全实现分组化，控制面信令并不通过 PDCP 处理；用户面的数据也分 CS 域、PS 域，只有 PS 域的数据才通过 PDCP 处理。而在 LTE 的架构中，没有 CS 域，包括控制面信令在内的一切数据流要通过 PDCP 处理。

在 UMTS 中, 还有 BMC 实体, 而在 LTE 中, 取消了这一功能实体, 由 MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service, 多媒体广播多播业务) 功能代替了。

4.2.1 层二功能模块

空中接口的用户面没有层三的功能模块，这一点和地面接口不同。

用户面的层二协议模块主要包括：MAC（Medium Access Control，媒质接入控制）、RLC（Radio Link Control，无线链路控制）、PDCP（Packet Data Convergence Protocol，包数据汇聚协议）三个功能模块，如图 4-4 所示。

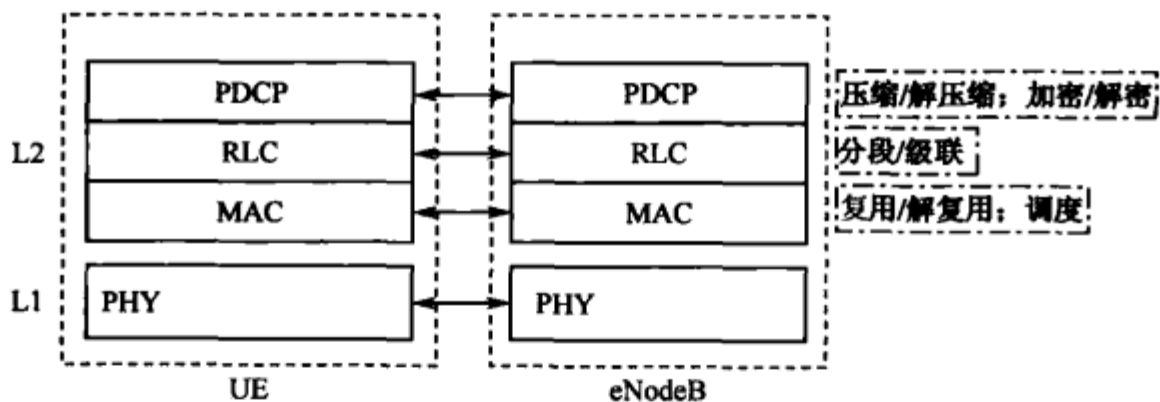


图 4-4 LTE 空中接口用户面协议

用户面的主要功能是处理业务数据流。在发送端,将承载高层业务应用的 IP 数据流,经过头压缩(PDCP)、加密(PDCP)、分段(RLC)、复用(MAC)、调度等过程变成物理层可处理的传输块;在接收端,将物理层接收到的比特数据流,按调度要求,解复用(MAC)、级联(RLC)、解密(PDCP)、解压缩(PDCP),成为高层应用可以识别的数据流。整个过程如图 4-5 所示。

LTE 空中接口控制面包括层二、层三的功能模块，如图 4-6 所示。

控制面层二的功能模块和用户面的是一样的，也包括 MAC、RLC、PDCP 三个主要模块。其中，MAC 和 RLC 层的功能与用户面相应模块的功能是一致的；而 PDCP 层的功能与用户面的有一些区别，除了对控制信令进行加密和解密的操作之外，还要对控制信令数据进行完整性保护和完整性验证。

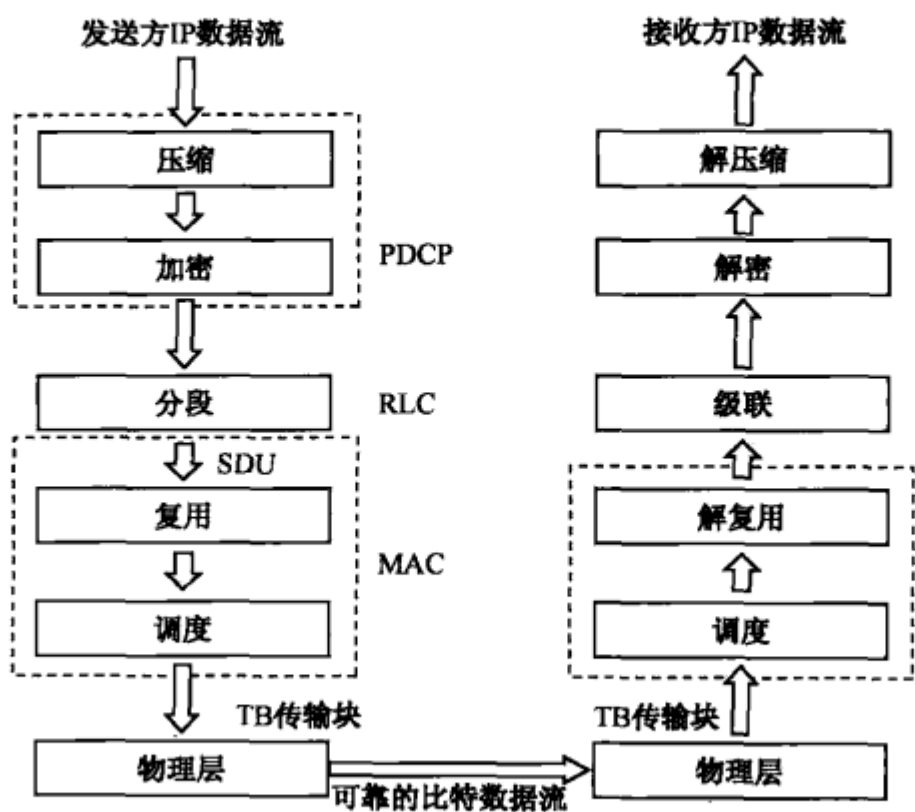


图 4-5 LTE 空中接口用户面数据流处理过程

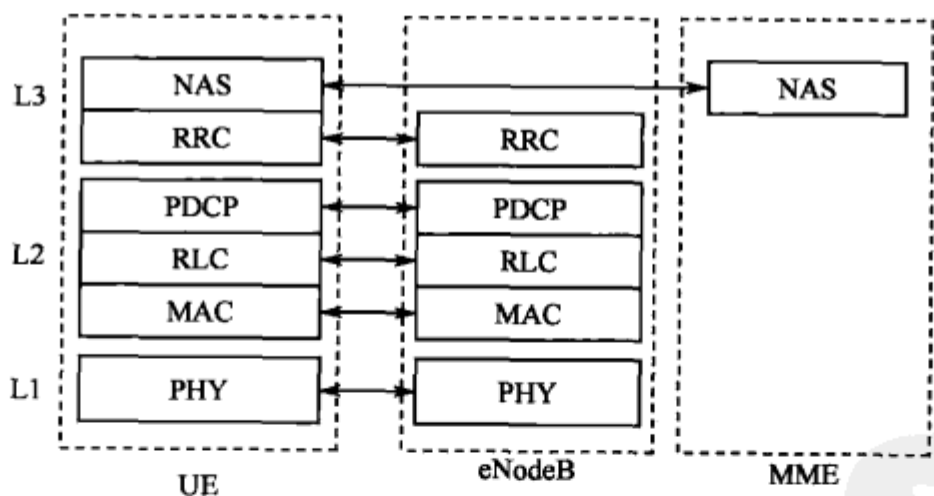


图 4-6 LTE 空中接口控制面协议

4.2.2 层三功能模块

LTE 空中接口控制面层三有两个功能模块：RRC（Radio Resource Control，无线资源控制）和 NAS（Non Access Stratum，非接入层）。

UE 和 eNodeB 之间的控制信令主要是无线资源控制（RRC）消息。它是地方军区的一个司令部，一方面负责本军区资源管理，给各个下属单位下达任务和命令；另一方面

需要接收来自中央军委（高层）的命令。RRC 就相当于 eNodeB 内部的一个司令部，RRC 消息携带建立、修改和释放层二和层一协议实体所需的全部参数；另外，RRC 还要给 UE 透明传达来自核心网的指示。

在干活之前先听一下领导的意见。UE 和 eNodeB 在承载业务之前，先要建立 RRC 连接。RRC 这个地方军区的司令部包括面向所属士兵（UE）的军部信息发布（系统信息的广播）；根据高层或外部要求，寻找某个士兵（寻呼）；命令传播渠道的建立和安全保障（RRC 连接建立）；各种作战物资的管理（无线资源控制）、部队调动换防的管理（移动性管理）（见图 4-7）。



图 4-7 RRC 模块

RRC 模块的主要功能有系统信息的广播、寻呼、RRC 连接管理、无线资源控制，移动性管理（包括 UE 测量控制和测量报告的准备和上报，LTE 系统内与 LTE 和其他无线系统间的切换）。

LTE 的 RRC 状态管理比较简单，只有两种状态：空闲状态（RRC_IDLE）和连接状态（RRC_CONNECTED）。系统信息块的个数降低了很多，传输信道的个数也减少了。这样，针对系统信息或传输信道的参数配置也减少了很多。这就满足了 LTE 需求阶段提出的“最小化配置的需求”。

UE 处于空闲状态时，接收到的系统信息有小区选择或重选的配置参数、邻小区信息；

在 UE 处于连接状态时，接收到的是公共信道配置信息。

寻呼（Paging）消息是 eUTRAN 用来寻找或通知一个或多个 UE，主要携带的内容包括拟寻呼 UE 的标识、发起寻呼的核心网标识、系统消息是否有改变的指示。UE 划分成多个寻呼组，在空闲状态时并不是始终检测是否有呼叫进入，而是采用非连续接收（Discontinuous Reception, DRX）的方式，只在特定的时刻接收寻呼信息。这样可以避免寻呼消息过多，减少手机功率消耗。

RRC 链接建立的初始阶段，安全机制没有启用，交互信令没有加密和完整性保护。在 RRC 建立连接过程中，一旦安全机制（加密和完整性保护）被激活，RRC 信令（Signal Radio Bearer, SRB）就被完整性保护；与此同时，RRC 信令（Signaling Radio Bearer, SRB）和用户数据（Data Radio Bearer, DRB）都被加密。

无线资源管理包括 RRC 信令（SRB）连接的增加和释放、用户数据承载（DRB）的增加和释放、MAC 调度机制的配置、物理信道的重配置等内容。

移动性管理包括小区间的切换和重选、跨系统（inter-RAT）的切换和重选、UE 的测量及对测量报告的控制。RRC 模块会指示 UE 测量什么，什么时候测量，如何对测量结果进行汇报。RRC 将依据测量结果来判断是否启动切换和重选，是启动小区间的切换和重选，还是启动系统间的切换和重选。

NAS 信令是指 UE 和 MME 之间交互的信令，eNodeB 只是负责 NAS 信令透明传输，不做解释、不做分析。NAS 信令相当于领导（MME）和下属（UE）直接沟通的信息，但是经过了邮递员（eNodeB）把这个信息传送了一下（见图 4-8）。NAS 信令主要承载的是 SAE 控制信息、移动性管理信息、安全机制配置和控制等内容。

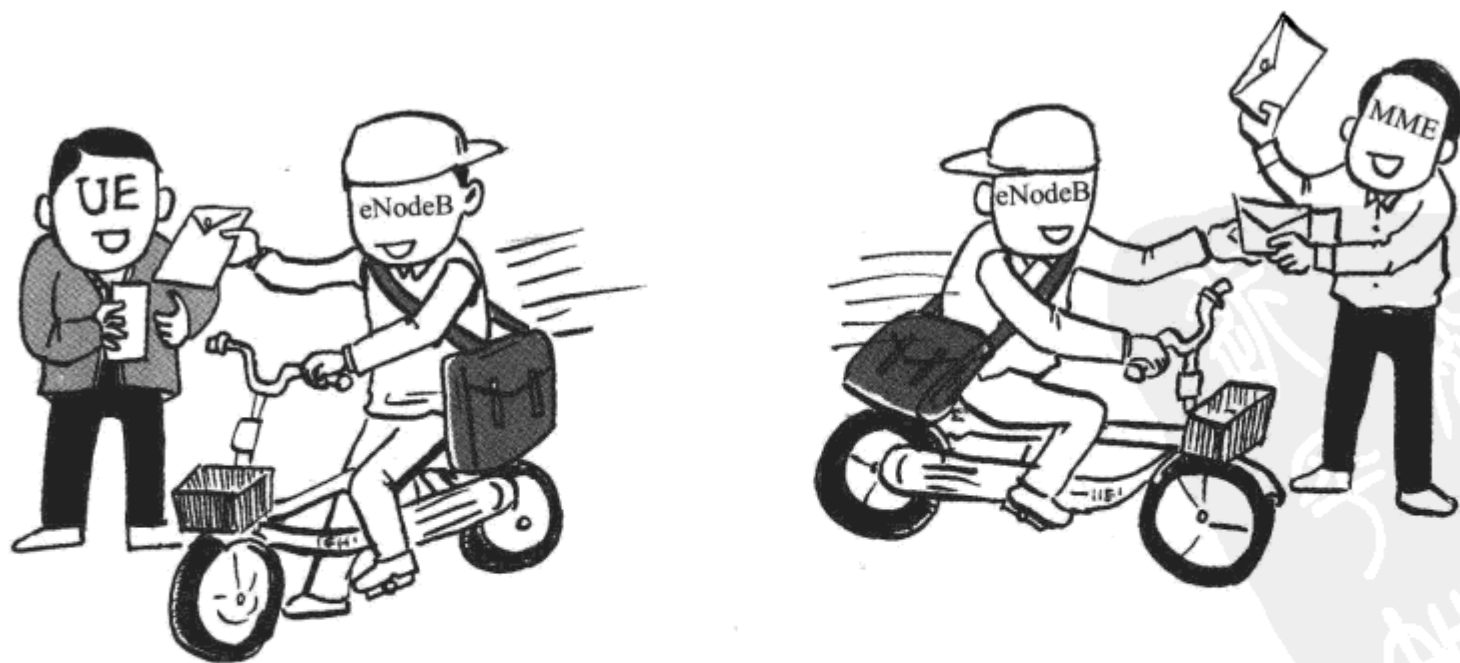


图 4-8 信息的透明传输

4.3 地面接口

地面接口是网络侧网元之间的信息沟通渠道。在 LTE 的无线接入网侧，主要包括两类：同级接口（基站间的接口）和上下级接口（基站与核心网的接口）。

4.3.1 同级接口——X2

在等级化的公司里面，不同部门员工间的工作沟通非常困难，必须通过其领导协调才能推动工作，这就是所谓的“部门墙”问题。现在，为了打破“部门墙”，有的企业推行项目管理，给不同部门的员工之间沟通建立了通道。

X2 接口是 LTE 为了方便平级网元进行工作沟通，打破以往无线制式基站沟通的“部门墙”而建立的。在以往制式中，基站之间是没有直接沟通的接口，UMTS 只建立了基站的主管 RNC 之间的沟通渠道——Iur 接口。在 LTE 中，取消了 RNC 网元；基站之间的接口为 X2，功能上继承了 Iur 接口，并有所增强。

X2 接口为用户面提供了业务数据的基于 IP 传输的不可靠链接，而为控制面提供了信令传送的基于 IP 传输的可靠链接。

X2 接口的用户面是在切换时 eNodeB 之间转发业务数据的接口。这当然也是一个 IP 化的接口。UDP/IP 是属于 TCP/IP 协议族的内容，是实时性较差的、不可靠链接的分组数据包传送协议。在 UDP/IP 之上是利用 GTP-U (GPRS Tunneling Protocol for User Plane, GPRS 用户平面隧道协议) 来传送用户分组数据单元 (Packet Data Unit, PDU) 的，其协议栈结构如图 4-9 所示。

X2 接口的控制面也是基于 IP 传输的，但是它利用 SCTP (Streaming Control Transport Protocol, 流控制传输协议) 为 IP 分组交换网提供可靠的信令传输，如图 4-10 所示。SCTP 的设计就是为了解决 TCP/IP 网络在传输实时信令和数据时所面临的不可靠传输、时延等问题。X2 接口的控制面协议为 X2 AP。

X2 接口控制面的主要功能是支持在 LTE 系统内，UE 在连接状态下从一个 eNodeB 切换到另外一个 eNodeB 的移动性管理。这个功能在 UMTS 中是位于 RNC 上的功能模块。X2 接口控制面还可以对各 eNodeB 之间的资源状态、负荷状态进行监测，用于 eNodeB 负载均衡、负荷控制或者准入控制的判断依据。此外，X2 接口控制面还负责 X2 连接的建立、复位、eNodeB 配置更新等接口管理工作。

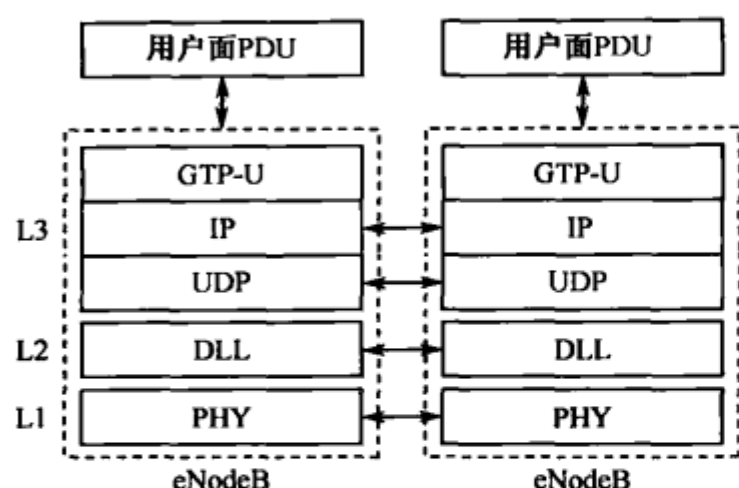


图 4-9 X2 接口用户面协议

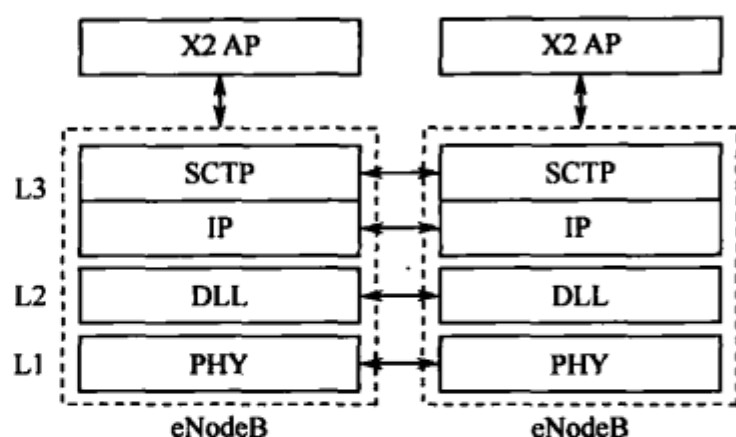


图 4-10 X2 接口控制面协议

4.3.2 上下级接口——S1

S1 用户面接口位于 eNodeB 和 SGW 之间。这个接口和 X2 用户面的架构是一致的，如图 4-11 所示，也是建立在 IP 传输之上，用 GTP-U 协议来携带用户面的 PDU。在 UMTS 里的 Iu-CS 接口中，用户面是建立在 AAL2 上的，是面向连接的。但 S1 接口则不同，是建立在 IP 协议上的分组交换，不是面向连接的可靠传输，有些类似 Iu-PS 接口。

S1 控制面接口位于 eNodeB 和 MME 之间，如图 4-12 所示，也是建立在 IP 传输基础之上的，这一点和 S1 用户面一样。和用户面不同的是，为了支持可靠的信令传输，在 IP 层上添加了 SCTP，这样，和 X2 控制面的基础架构是一致的。S1 AP 是 S1 的应用层信令协议。

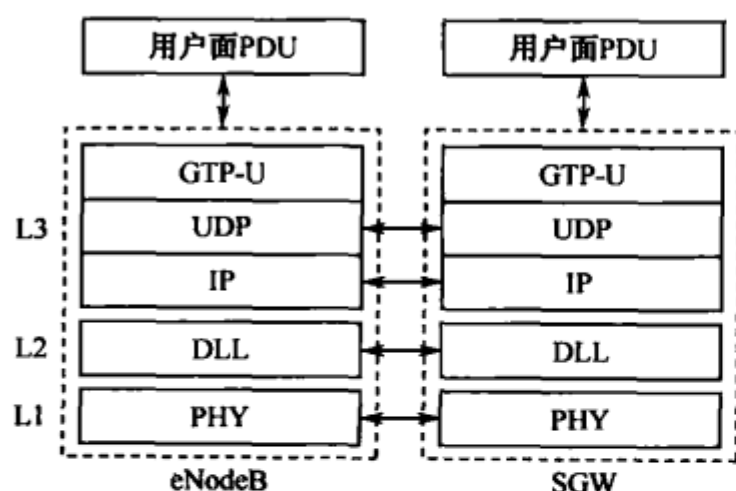


图 4-11 S1 接口用户面协议

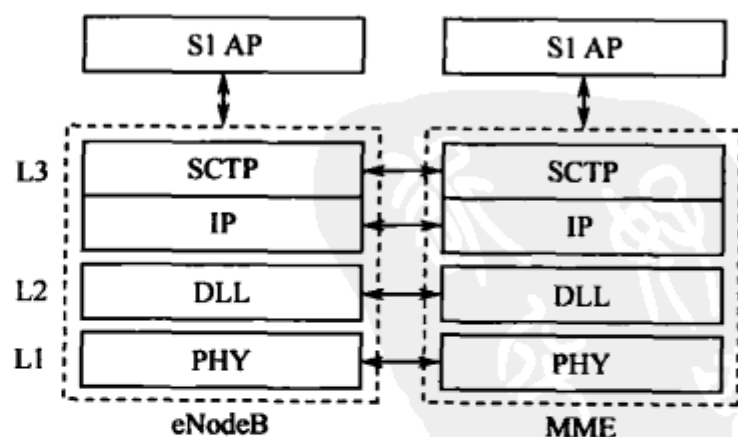


图 4-12 S1 接口控制面协议

S1 控制面的主要功能是建立与核心网的承载连接，即 SAE 承载管理功能，包括：SAE 承载建立、修改和释放。

S1 移动性管理不仅包括 LTE 系统内的切换, 还包括系统间切换。假若处于连接状态的 UE 从 LTE 覆盖区域移动到 WCDMA 的覆盖区域, S1 控制面接口助力 UE 完成系统间切换。对比一下: X2 接口的控制面没有系统间切换的功能, 只是 LTE 系统内的移动性管理。

此外, S1 接口还支持寻呼功能、NAS 信令的传输功能、S1 接口的管理功能等。

4.4 LTE 和 UMTS 接口协议栈的比较

LTE eUTRAN 的协议栈与 UMTS UTRAN 一样分层、分面, 但在具体设计细节上有很多改进。

改进的思路主要有以下三种: 功能简化, 降低系统复杂度; 功能位移, 实现位置下移; 功能增强, 替换实现方案。

(1) 功能简化, 降低系统复杂度。

LTE MAC 层实体个数减少了很多, 减少了传输信道的个数。通过这些功能实体的简化, 降低了系统设计和参数配置的复杂度, 符合运营商在 LTE 需求阶段提出的“降低系统复杂度”的要求。

LTE 减少了 UE 的状态, 如图 4-13 所示。在 eNodeB 中, 仅存在 2 种 RRC 状态: RRC_IDLE (空闲状态)、RRC_CONNECTED (连接状态)。

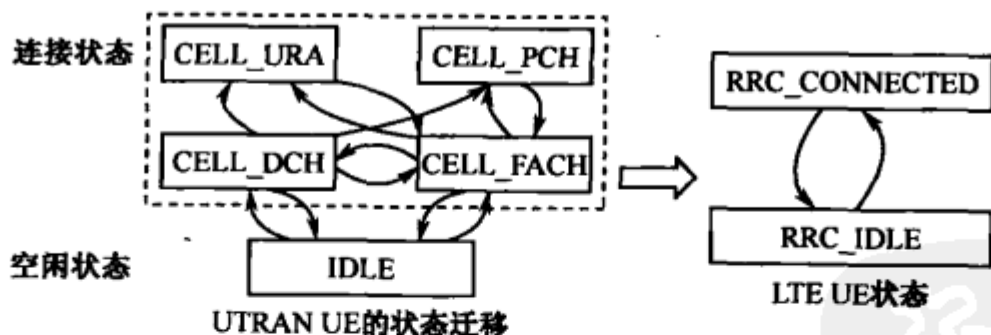


图 4-13 LTE 协议栈 UE 状态的减少

LTE 中删除了 CELL_FACH、CELL_URA、CELL_PCH, 简化了状态迁移管理的复杂度, 降低了状态迁移所用的时间。从设计实现的工作角度上来说, 这种简化设计减少了状态间转移的场景, 减少了移动性管理设计的工作量, 降低了系统复杂度, 减少了开发和测试的工作量。

在 aGW 网元中, LTE 的 UE 状态将 UTMIS 中的 RRC 状态和 PMM (PS Mobility Management, 核心网 PS 域移动性管理) 状态合并为一个状态集, 包含 RRC_IDLE (空

闲状态)、RRC_ACTIVE (激活状态) 和 RRC_DETACHED (分离状态) 这 3 种状态。UE 的上下文必须区分这 3 种状态, 如图 4-14 所示。

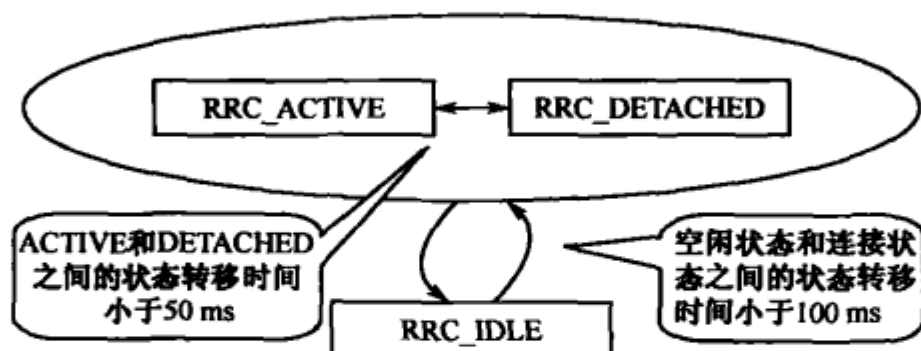


图 4-14 aGW 的 UE 状态

在 eNodeB 中, RRC_CONNECTED 对应着 aGW 中的 RRC_ACTIVE 状态, 无须保留 RRC_DETACHED 状态。这样, 处于 RRC_DETACHED (分离状态) 的 UE 在核心网属于“在线 (Online)”状态, 而在无线接入网侧则并不占用任何无线资源。

LTE 要与 WCDMA、GSM 等进行系统间互操作, 所以 LTE 系统中也要设计 LTE-RRC 状态和其他系统的 RRC 状态间的相互转移途径, 如图 4-15 所示。其中 CCO 为小区改变命令 (Cell Change Order)。

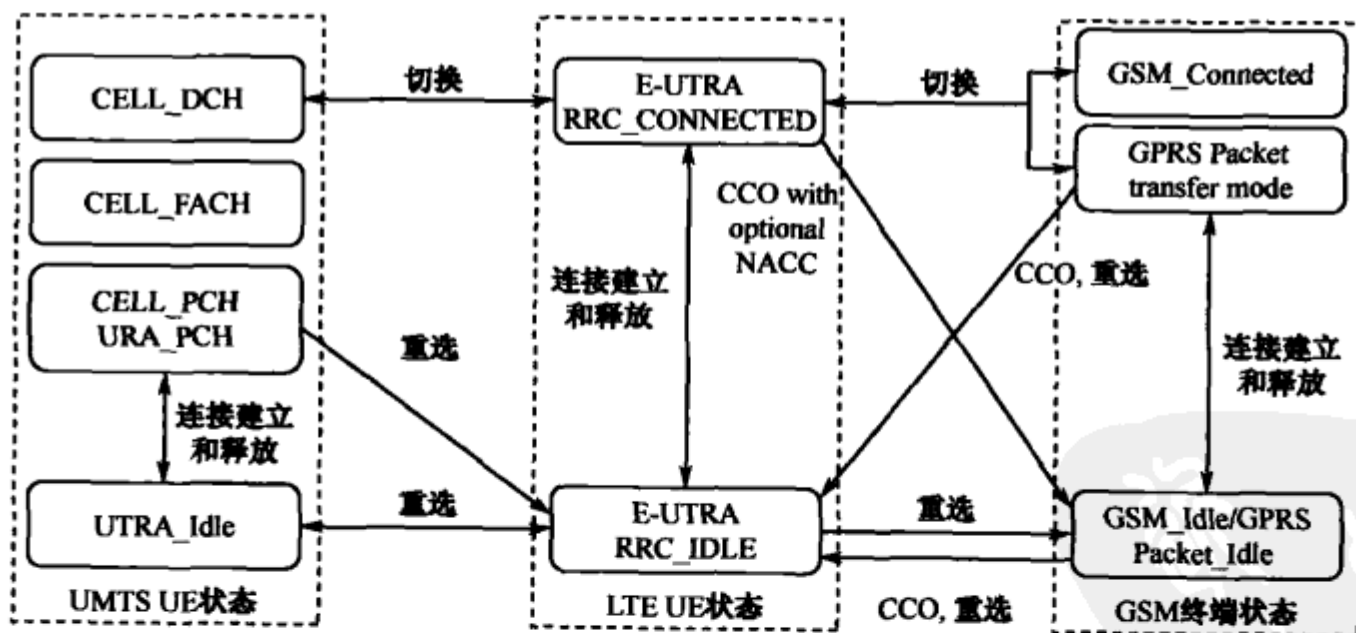


图 4-15 LTE 状态与其他系统状态间的转移关系

之所以可以减少 UE 连接状态的个数, 是因为 LTE 使用共享信道来承载用户的控制信令和业务数据, 取代了 3G 时代物理层中的专用信道。共享信道可以使多个用户共享空中接口的资源, 因此不需要区分 LTE 连接状态的细节, 可以根据需要动态地调整连接状态的资源。

摒弃专用信道，使用共享信道，对 MAC 在资源以及业务调度的功能方面提出了很高的要求，对芯片的运算能力要求也较高。协议本身主要描述的是终端行为，终端厂家需要遵从；但基站侧的实现规定的并不严格，由设备厂家发挥的余地非常大。

（2）功能位移，实现位置下移。

取消 RNC 网元，在 RNC 实现的功能都下移到了 eNodeB 上。如 UMTS 中在 RNC 上实现的无线资源调度功能、控制面 RRC 功能，在 LTE 中移入 eNodeB 中，并在网络侧终止于 eNodeB。

PDCP 功能也完全下移到了 eNodeB 上，核心网不再提供 PDCP 实体。由于 PDCP 功能的下移，导致 SGW 的功能基本成为简单的路由器，这一点方便了 LTE 和其他分组网络在核心网侧的融合。

（3）功能增强，替换实现方案。

使用 MBMS 代替了 UMTS 的 BMC 层（广播媒体控制层）以及公共业务信道 CTCH；使用时隙统筹（Scheduling Gap）方案替换了 WCDMA 异频测量过程中使用的压缩模式。

无线关键技术

第
二
篇

资源库
PDC

第 5 章

部门墙要不得——OFDM

知识要点

OFDM 是 LTE 物理层的最基础的技术, MIMO 技术、带宽自适应技术、动态资源调度技术都是在 OFDM 技术之上得以实现的。可以说, 没有 OFDM 就没有 LTE。OFDM 技术和以前使用的频分复用(FDM)技术有什么不同? OFDM 系统如何实现? OFDM 系统有哪些可调参数? 上/下行如何实现多址接入? 了解了这些内容, LTE 的知识殿堂就不再神秘了!

接班人奥先生发现现在基层单位之间为了避免彼此影响, 保护自身的利益, 设置了保护带, 不允许丝毫工作范围重叠, 部门墙较厚。这种情况不利于单位间的合作, 资源利用效率较低。

接班人奥先生希望基层单位之间在彼此独立、互不影响的前提下, 能够充分合作, 资源共享, 推倒部门墙、取消地方保护。为此, 推出了奥氏(OFDM)方案。

国王看完奥氏方案, 没有多说话, 又吟了一首诗: “寺里山因花得名, 繁英不见草纵横。”

接班人奥先生明白, 国王肯定了他的想法, 认为三吉皮皮国会因他的方案而更加出名(寺里山因花得名), 能够取得比较好的效果(繁英), 把基层工作单位(子载波)间的互相倾轧、相互干扰降到最低(不见草纵横)限度。

国王又往下说: “栽培剪伐须勤力, 花易凋零草易生。”

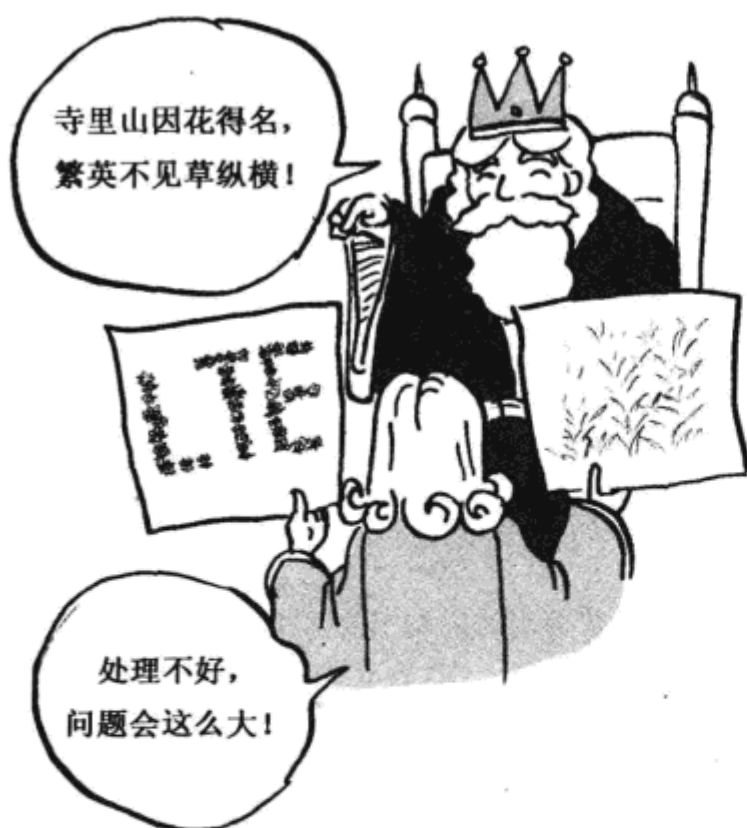


图 5-1 裁剪得当, 避免杂草丛生

接班人奥先生清楚，这是国王在提醒他，在方案的具体实现上，还需下点苦工夫（栽培剪伐须勤力），否则效果看不出来，还会增加基层工作单位（子载波）间的相互干扰（花易凋零草易生）（见图 5-1）。

5.1 OFDM 技术原理

LTE 标准体系中最基础、最复杂、最有个性化的地方是物理层。物理层技术中受芯片技术制约较大、实现较为困难的有两个：OFDM 和 MIMO。本章介绍 OFDM 技术，下一章介绍 MIMO 技术。

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)，是一种正交频分复用技术，是由多载波技术 MCM (Multi-Carrier Modulation，多载波调制) 发展而来的。OFDM 既属于调制技术，也属于复用技术。

在 20 世纪 60 年代，美国军方就建造了世界上第一个多载波调制 (MCM) 系统。1970 年，美国申请了 OFDM 专利，随后产生了采用多个子载波的 OFDM 系统。但之后，OFDM 技术的发展应用遇到了瓶颈。

采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 可以很好地实现 OFDM 技术，但在当时，由于技术条件限制，实现傅里叶变换的设备复杂度过大、成本高昂，发射机和接收机振荡器的稳定性难以保证，射频功率放大器的线性度要求难以保证。因此，很长一段时间内，OFDM 技术的应用仅局限在军事领域，难以扩展到民用通信设备。

自 20 世纪 80 年代以来，随着 DSP (Digital Signal Processing，数字信号处理) 芯片技术的发展，FFT 技术的实现设备向低成本、小型化的方向发展，使得 OFDM 技术走向了高速数字移动通信的领域。首批应用 OFDM 技术的无线制式有 WLAN、WiMAX 等。

5.1.1 OFDM 与 CDMA

多址方式是任何无线制式的关键技术，码分多址 (CDMA) 和正交频分复用 (OFDMA) 是当初 LTE 标准制定时所面临的两大选择。

在制定 LTE 物理层标准的过程中，为什么没有选用 CDMA 技术呢？有以下几个原因。

首先，CDMA 技术不适合宽带传输。CDMA 技术相对于 GSM 技术来说，只不过是增加了系统容量，提高了系统抗干扰能力。但 CDMA 在大带宽的时候，扩频实现困难，器件复杂度增加。这就可以理解 WCDMA 为什么不能把带宽从 5 MHz 增加到 20 MHz，或者做得再大一些。假若在未来无线制式支持 100 MHz 的时候，CDMA 缺点更大，但 OFDM 技术不存在这个问题（见图 5-2）。

其次，CDMA 技术绝大多数属于高通的专利，每年都要收取高额的专利费用，这对 CDMA

制式的发展有很大的制约作用。OFDM 技术专利期限已过，不存在专利方面的限制，可以摆脱高通公司在 CDMA 上的专制。

最后，从频谱效率上，对两种多址方式进行评估，在 5 MHz 带宽的时候，二者的频谱效率相近；在更高带宽的时候，OFDM 的优势才逐渐显现。

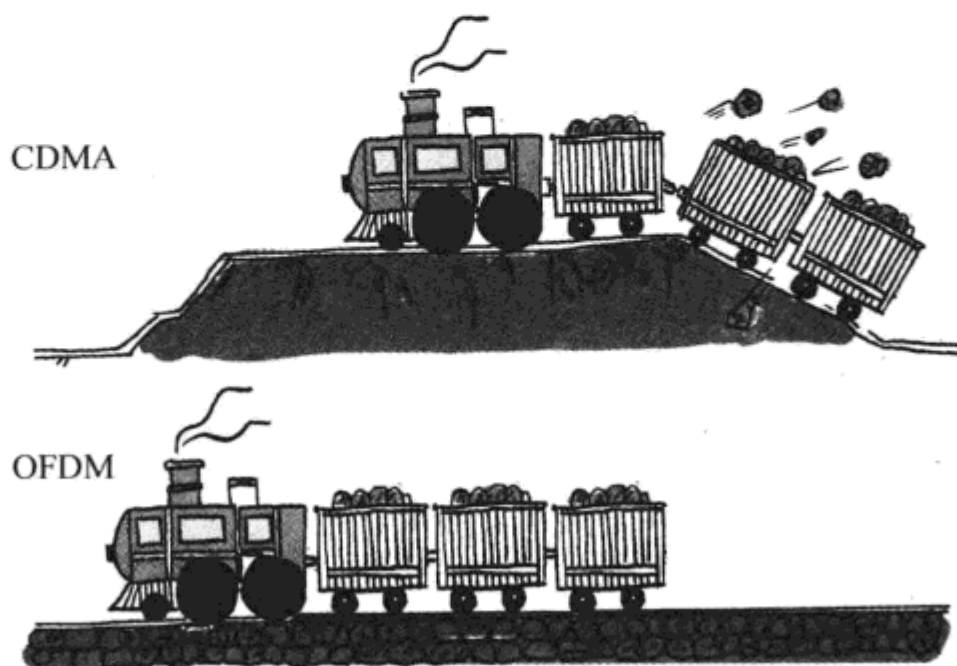


图 5-2 CDMA 和 OFDM 的带宽支撑能力

总之，LTE 如采用 CDMA 多址方式演进，虽可重用物理层的很多技术，有利于 UTRAN 版本的平滑升级，但无法满足 LTE 制定的带宽配置灵活、时延低、容量大、系统复杂度低等演进目标。OFDM 是真正适用于宽带传输的技术。LTE 采用 OFDM，空中接口的处理相对简单，有利于设计全新的物理层架构，有利于使用更大的带宽，有利于更高阶的 MIMO（多输入多输出）技术的实现，降低终端复杂性，方便实现 LTE 确定的演进目标。

5.1.2 OFDM 本质

OFDM 本质上是一个频分复用系统（Frequency Division Multiplexing, FDM）。FDM 并不陌生，用收音机接收广播的时候，不同的广播电台使用不同的频率，经过带通滤波器的通带，把想要听的广播电台接收下来，如图 5-3 所示。

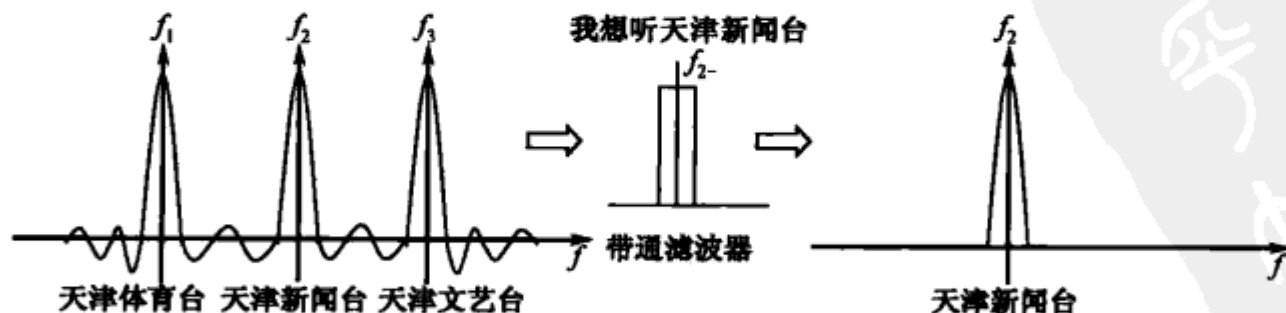


图 5-3 传统频分复用

在第一、二、三代移动通信（1G、2G、3G）中都用到了 FDM 技术。将整个系统的频带划分为多个带宽互相隔离的子载波；接收端的必备器件是滤波器，通过滤波器，将所需的子载波信息接收下来。

通过保护带宽隔离不同子载波，虽可以避免不同载波的互相干扰，但牺牲了频率利用效率。还有，当子载波数成百上千的时候，滤波器的实现就非常困难了。

OFDM 虽然也是一种 FDM，但是它克服了传统的 FDM 频率利用效率低的缺点，接收端也无须使用滤波器去区分子载波。

OFDM 就是利用相互正交的子载波来实现多载波通信的技术。在基带相互正交的子载波就是类似 $\{\sin(\omega t)$ 、 $\sin(2\omega t)$ 、 $\sin(3\omega t)\}$ 和 $\{\cos(\omega t)$ 、 $\cos(2\omega t)$ 、 $\cos(3\omega t)\}$ 的正弦波和余弦波，属于基带调制部分。基带相互正交的子载波再调制在射频载波 ω_c 上，成为可以发射出去的射频信号。

在接收端，将信号从射频载波上解调下来，在基带用相应的子载波通过码元周期内的积分把原始信号解调出来。基带其他子载波信号与信号解调所用的子载波由于在一个码元周期内积分结果为 0，相互正交，所以不会对信息的提取产生影响。

整个 OFDM 调制/解调过程如图 5-4 所示。

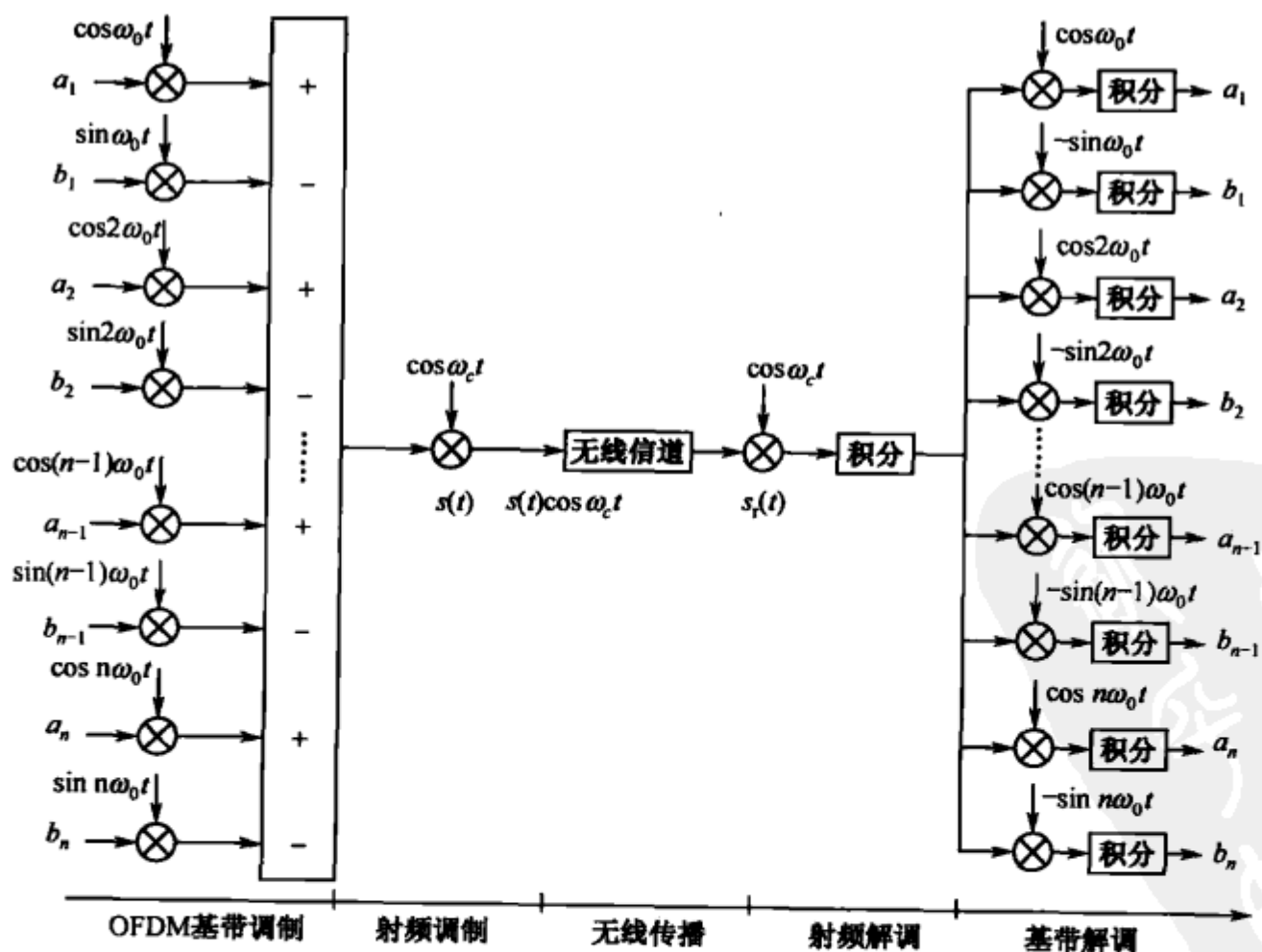


图 5-4 OFDM 调制/解调过程

在时域上信号为一个非周期矩形波,如图 5-5 (a) 所示,在频域上是满足 $A = \text{sinc}(f) = \frac{\sin f}{f}$ 的曲线,如图 5-5 (b) 所示。

假若有很多路不同的方波信号,如图 5-5 (c) 所示,在基带经过不同频率的子载波调制,形成了如图 5-5 (d) 所示的基带信号频谱图,经过射频调制,最终传送出去的射频信号的频谱图如图 5-5 (e) 所示。

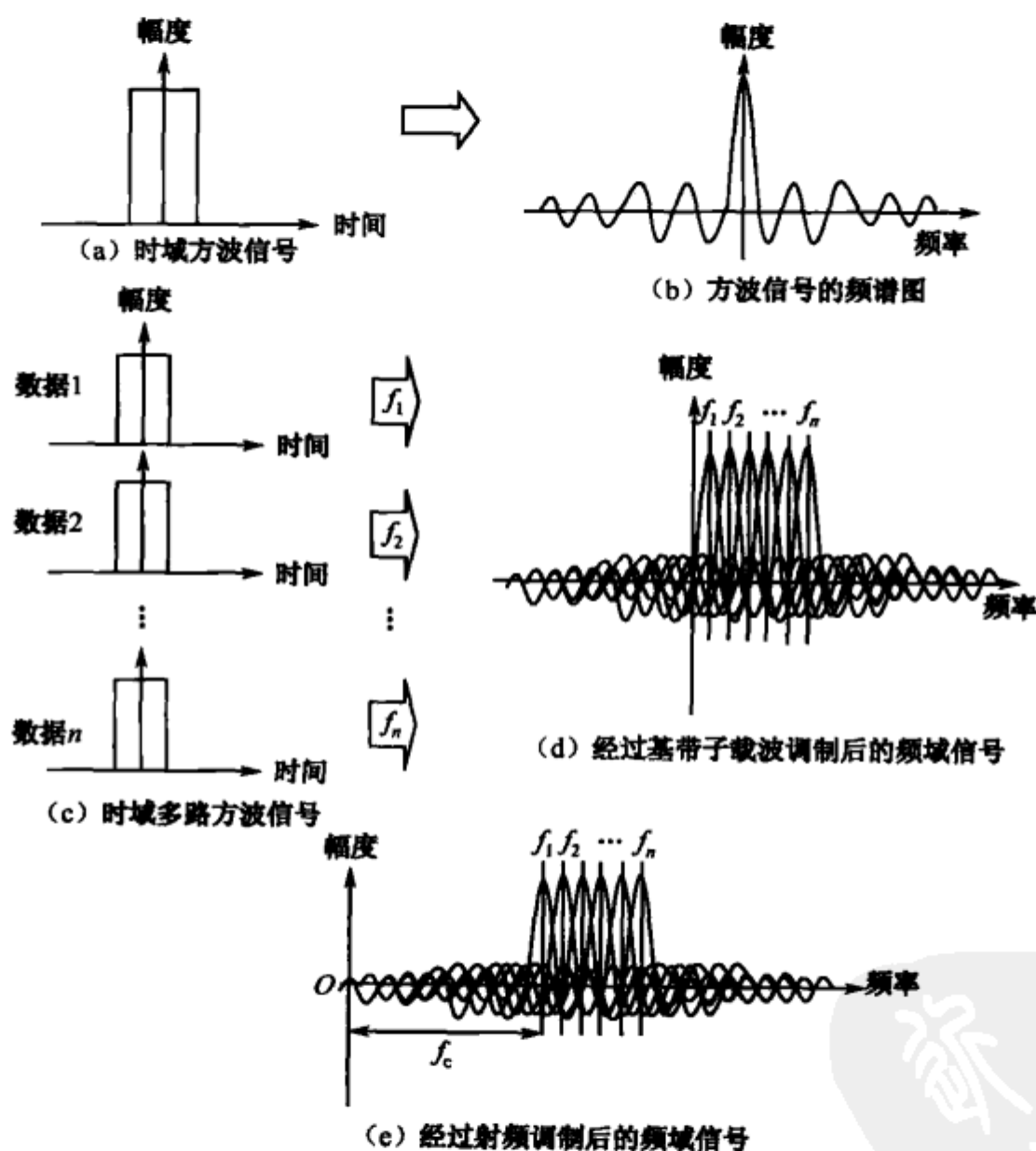


图 5-5 时域方波信号经过 OFDM 调制后的信号频谱

子载波之间的频率间隔为 OFDM 符号周期的倒数,每个子载波的频谱都是 $\text{sinc}()$ 函数。该函数以子载波频率间隔为周期反复地出现零值,这个零值正好落在了其他子载波的峰值频率处,所以对其他子载波的影响为零。

经过基带多个频点的子载波调制的多路信号,在频域中,是频谱相互交叠的子载波。由

于这些子载波相互正交，原则上彼此携带的信息互不影响。在接收端，通过相应的射频解调和基带解调过程，可以恢复出原始的多路方波信号。

5.2 OFDM 系统实现

OFDM 系统包含很多功能模块，OFDM 实现强相关的功能模块有三个：(1) 串/并、并/串转换模块；(2) FFT、逆 FFT 转换模块；(3) 加 CP、去 CP 模块，如图 5-6 所示。

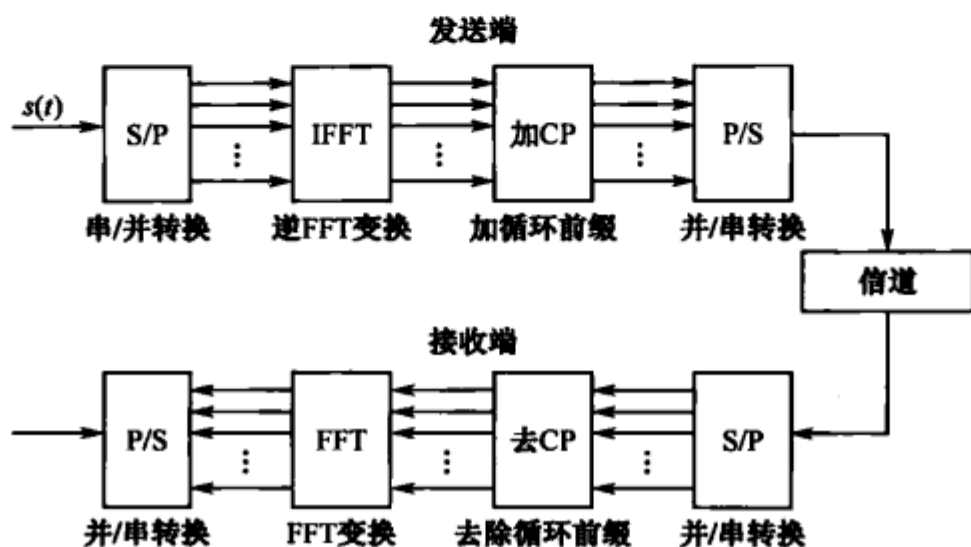


图 5-6 OFDM 系统实现模型

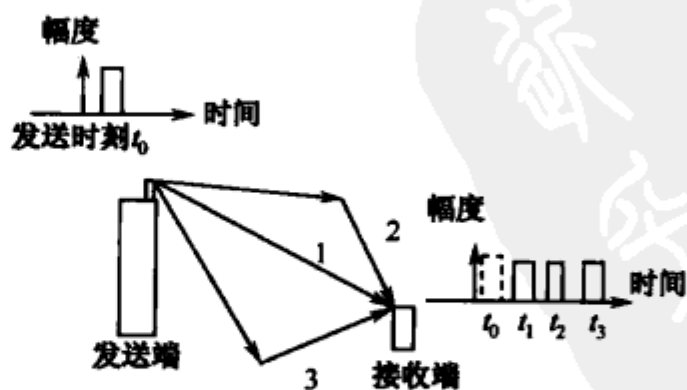
5.2.1 并行传输

无线信号在空中传播，对信号传播影响较大的是多径效应。

多径效应是指无线电波经过一点发射出去，经过直射、绕射、反射等多种路径到达接收端的时间和信号强度是不同的。到达时间不同，称为多径时延或时间色散，如图 5-7 所示；到达的信号强度不同，称为选择性衰落。

由于路径不同造成的衰落可以称为空间选择性衰落；而在宽带传输系统中，不同频率在空间中的衰落特性是不一样的，这称为频率选择性衰落，如图 5-8 所示。

多径时延可以引起符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI)，增大了系统的自干扰。频率选择性衰落易引起较大的信号失真，需要信道均衡操作，以便纠



注： t_1 、 t_2 、 t_3 分别是路径 1、路径 2、路径 3 达到接收端的时刻

图 5-7 多径时延

正信道对不同频率的响应差异，尽量恢复信号发送前的样子。带宽越大，信道均衡操作越难。

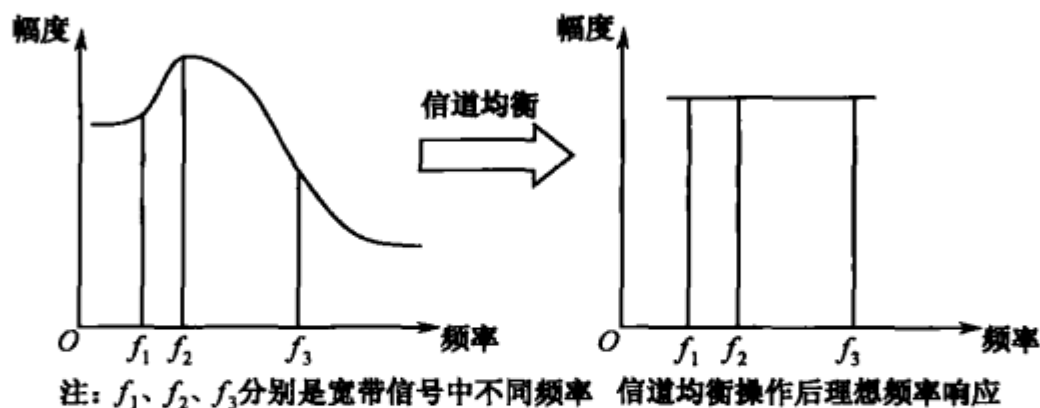


图 5-8 频率选择性衰落

在 OFDM 系统中，并行传输技术可以降低符号间干扰，简化接收机信道均衡操作，便于 MIMO 技术的引入。

在发射端，用户的高速数据流经过串/并转换后，成为多个低速率码流，每个码流可用一个子载波发送，如图 5-9 所示。这是一种并行传输技术，它可使每个码元的传输周期大幅增加，降低了系统的自干扰。当多径时延 τ 比码元周期 T 大很多的时候，可能带来比较严重的自干扰；相反地，当多径时延比码元周期小的时候，系统的自干扰减少。在高速宽带通信中，码元周期较小，多径时延与码元周期相比大了很多，自干扰比较严重。使用并行传输技术，可以延长码元周期，降低自干扰。



图 5-9 并行传输技术降低符号间干扰

对于宽带单载波传输，为了克服频率选择性衰落引起的信号失真，需要增加复杂信道的均衡操作。使用并行传输技术将宽带单载波转换为多个窄带子载波操作，每个子载波的信道响应近似没有失真，这样，接收机的信道均衡操作非常简单，极大地降低了信号失真，如图 5-10 所示。

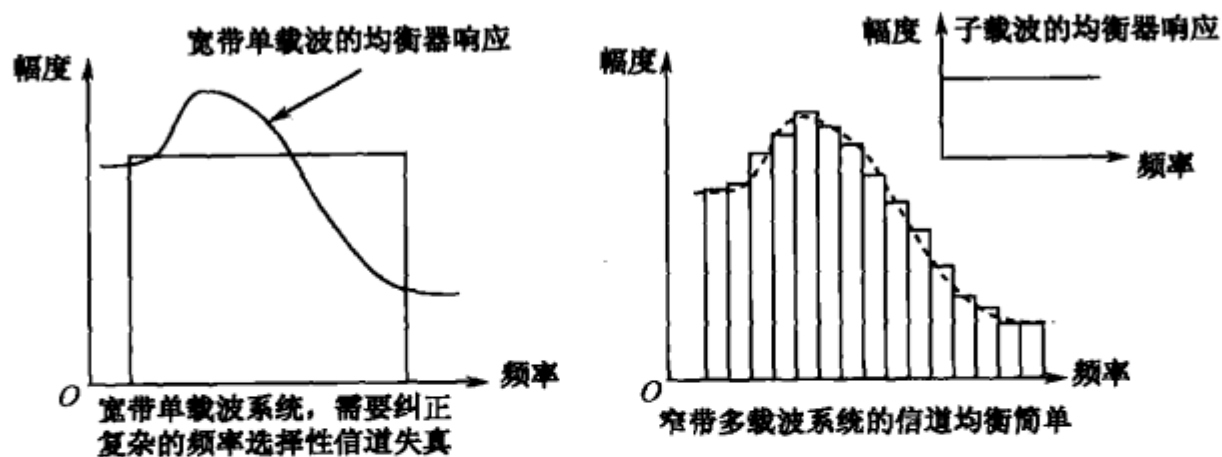


图 5-10 窄带并行传输简化均衡操作

5.2.2 FFT

OFDM 要求各个子载波之间相互正交, 在理论上已证明, 使用快速傅里叶变换 (FFT) 可以较好地实现正交变换。但在 OFDM 发明初期, 快速傅里叶变换需要的采样点太多, 当时的数字信号处理 (DSP) 运算不过来。20 世纪 90 年代, DSP 运算速度足够快, 才使得通过 FFT 实现 OFDM 成为可能, 从而也为系统小型化和降低成本奠定了基础。

在发射端, OFDM 系统使用 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, 逆快速傅里叶变换) 模块来实现多载波映射叠加过程, 经过 IFFT 模块可将大量窄带子载波频域信号, 变换成时域信号, 如图 5-11 所示。

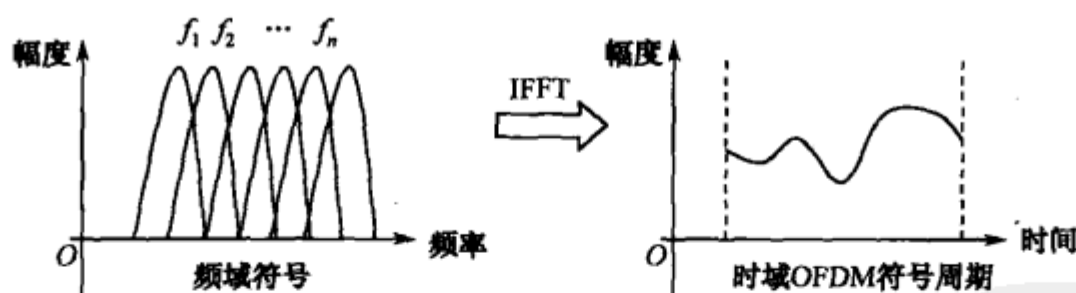


图 5-11 IFFT 变换

在接收端, OFDM 系统不能用带通滤波器来分隔子载波, 而是用 FFT 模块把重叠在一起的波形分隔出来。

总之, OFDM 系统在调制时, 使用 IFFT; 在解调时, 使用 FFT。

5.2.3 加入 CP

由于多径时延的问题, 导致 OFDM 符号到达接收端可能带来符号间干扰 (ISI); 同样由于多径时延的问题, 使得不同子载波到达接收端后, 不能再保持绝对的正交性, 为此引入了多载波间干扰 (Inter Carrier Interference, ICI), 如图 5-12 所示。

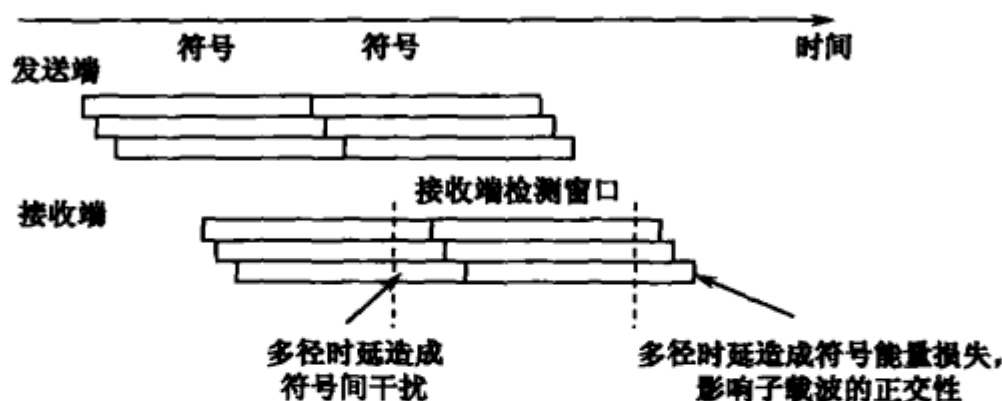


图 5-12 多径时延引起的干扰问题

如果在 OFDM 符号发送前, 在码元间插入保护间隔, 当保护间隔足够大的时候, 多径时延造成的影响不会延伸到下一个符号周期内, 从而消除了符号间干扰和多载波间的干扰, 如图 5-13 所示。

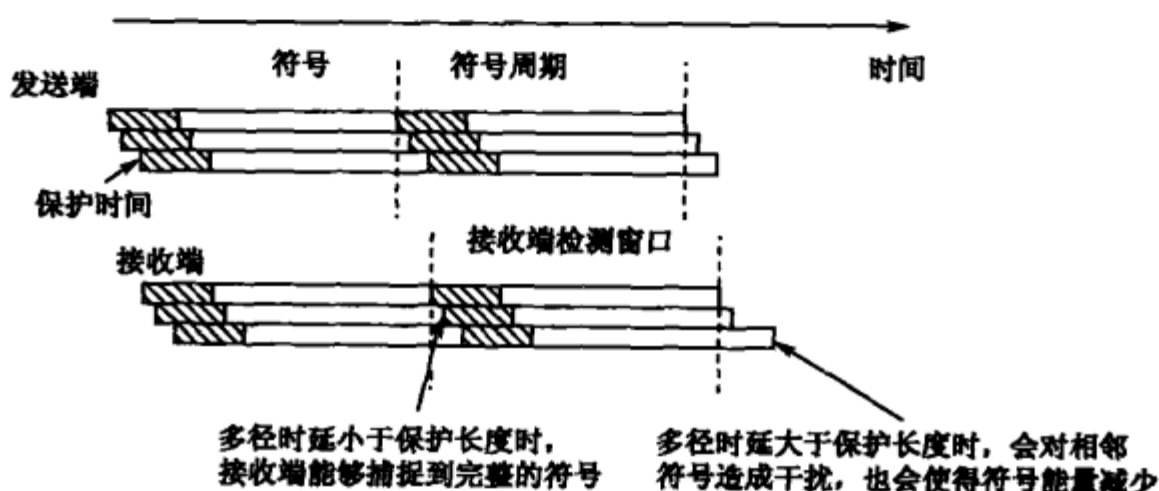


图 5-13 保护长度的作用

在 OFDM 中, 使用的保护间隔是 CP (Cyclic Prefix, 循环前缀)。所谓循环前缀, 就是将每个 OFDM 符号的尾部一段复制到符号之前, 如图 5-14 所示。加入 CP, 比起纯粹的加空闲保护时段来说, 增加了冗余符号信息, 更有利于克服干扰。

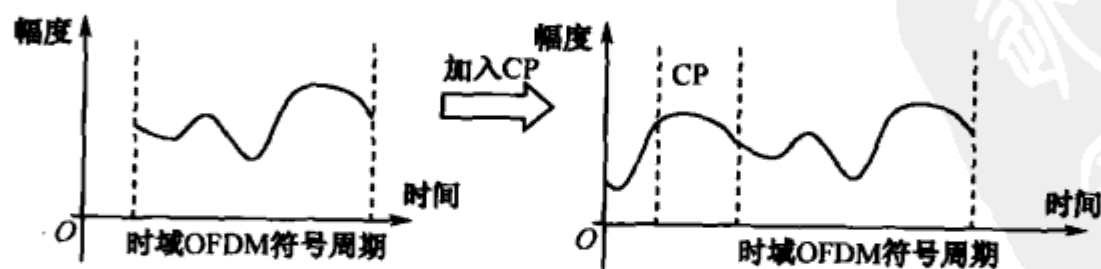


图 5-14 CP 加入

加入 CP 如同给 OFDM 加一个防护外衣, 携带有用信息的 OFDM 符号在 CP 的保护下, 不易丢失或损坏。OFDM 如同一个橄榄球运动员, 穿了厚厚的品牌名为 CP 的运动衣, 带着

橄榄球穿梭于人群中，对抗着其他运动员的疯狂抢夺（见图 5-15）。



图 5-15 穿上保护外衣的 CP

在 OFDM 的发展中，CP 是非常重要的思想，主要有下面两个作用：

- (1) CP 作为保护间隔，大大减少了 ISI。
- (2) CP 可以保证信道间的正交性，大大减少了 ICI。

5.3 OFDM 参数

与 OFDM 系统设计相关的参数有三类：与傅里叶变换相关的参数、与频域资源和时域资源相关的参数，如表 5-1 所示。

表 5-1 OFDM 参数设计

分 类	参 数
IFFT 子载波映射	采样频率 F_s
	采样周期 T_s
	FFT 点数 N_{FFT}
频域	子载波间隔 Δf
	可用子载波数目 N_c
	信号带宽 B_w
时域	有用符号时间 T_u
	循环前缀时间 T_{cp}
	OFDM 符号时间 T_{OFDM}
	时隙长度 T_{slot}

(1) 快速傅里叶变换参数。

OFDM 系统采用快速傅里叶变换及其逆变换, 实现频域多个子载波与时域信号之间的映射。快速傅里叶变换是离散傅里叶变换, 和它相关的参数有 FFT 采样点数 N_{FFT} 、采样频率 F_s 、采样周期 T_s 。

采样点 N_{FFT} 越大, 变换过程中的信息失真越少, 但对芯片的运算速度要求越高。

采样频率 F_s 和采样周期 T_s 的关系互为倒数, 如下式所示。

$$F_s = \frac{1}{T_s} \quad (5-1)$$

(2) 频域参数。

OFDM 系统的子载波的间隔 Δf 是影响 OFDM 性能的很重要的参数, 如图 5-16 所示。 Δf 不能设计过小, 过小的话, 对抗多普勒频移的影响能力下降, 无法支撑高速移动的无线通信; 当然, Δf 不能设计过大, Δf 过大的话, OFDM 符号周期 T 就会过小, 于是为克服子载波间的干扰, 加入 CP 的开销相对于有用符号来说就会过大, 使传送效率受到影响。

典型的 Δf 在 10~20 kHz 之间。LTE 的子载波间隔 $\Delta f = 15$ kHz, 而 WiMAX 的子载波间隔 $\Delta f = 10.98$ kHz。

采样频率 F_s 与采样点数目 N_{FFT} 之比就是 Δf , 如下式所示。

$$\Delta f = \frac{F_s}{N_{\text{FFT}}} \quad (5-2)$$

子载波间隔 Δf 和 OFDM 符号周期 T 互为倒数。如下式所示。

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (5-3)$$

Δf 与可用子载波数目 N_c 的乘积, 即为信道带宽 B_w , 有

$$B_w = N_c \times \Delta f \quad (5-4)$$

但在系统设计时, 带宽要留有足够的余量, 所以 B_w 要远远大于 $N_c \times \Delta f$ 。

(3) 时域参数。

一个 OFDM 符号周期 T_{OFDM} 应该包括有用符号时间 T_u 和循环前缀的时间 T_{cp} , 如图 5-17 所示, 如下式所示。

$$T_{\text{OFDM}} = T_u + T_{\text{cp}} \quad (5-5)$$

OFDM 系统的一个时隙长度 T_{slot} 会包括多个 OFDM 符号周期 T_{OFDM} 。对于 LTE 常规时隙来说, 一个时隙包括 7 个 OFDM 符号周期, 即

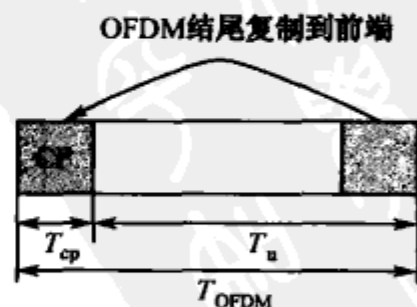


图 5-17 OFDM 符号周期

$$T_{\text{slot}} = 7 \times T_{\text{OFDM}}$$

CP 的长度 T_{cp} 不能过小，必须能够大于覆盖范围内可能的多径时延，否则将会造成符号间干扰 (ISI)；另一方面，CP 的长度 T_{cp} 不能过大，冗余开销太大，会影响系统的信息传送效率。在 LTE 中，根据不同应用场景的需要，设计了多种 CP 长度。

5.4 OFDM 多址接入

LTE 的空中接口的多址技术是以 OFDM 技术为基础的。前面讲的 OFDM 是从调制复用的角度上介绍的，这里从用户多址接入的角度介绍 OFDM。

LTE 的多址接入技术上、下行有别：下行主要是 OFDMA 技术，上行主要是 SC-FDMA。

既然是多址方式，就需要给不同的用户分配不同的资源。那么 OFDM 系统用户接入的资源是什么呢？

OFDM 多址接入的资源具有时间和频率两个维度。这两个维度的大小决定了用户接入资源占用的多少。也就是说，OFDMA 其实是 TDMA 和 FDMA 的结合。

5.4.1 OFDMA

LTE 在下行方向上（即从基站到终端的方向）使用的多址方式是 OFDMA。这个多址方式已经在 IEEE 802.11a/b/g (WLAN 协议)、IEEE 802.16 (WiMAX 协议)、HiperLAN-2 (欧洲无线局域网标准)、DVB (Digital Video Broadcasting, 数字视频广播) 和 DAB (Digital Audio Broadcasting, 数字音频广播) 得到了很成熟的应用。OFDMA 多址方式能够满足 LTE 带宽灵活配置和峰值速率的需求。

OFDMA 的主要思想是从时域和频域两个维度将系统的无线资源划分成资源块 (Resource Block, RB)，每个用户占用其中的一个或者多个资源块。从频域的角度说，无线资源块包括多个子载波；从时域上说，无线资源块包括多个 OFDM 符号周期。也就是说，OFDMA 本质上是 TDMA+FDMA 的多址方式。

LTE 的空中接口资源分配的基本单位是物理资源块 (Physical Resource Block, PRB)。1 个物理资源块 PRB 在频域上包括 12 个连续的子载波，在时域上包括 7 个连续的常规 OFDM 符号周期。LTE 的一个物理资源块 PRB 对应的是带宽为 180 kHz、时长为 0.5 ms 的无线资源。如图 5-18 所示。

LTE 的子载波间隔 $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ ，于是 PRB 在频域上的宽度为

$$12 \times 15 = 180 \text{ (kHz)}$$

7 个连续的常规 OFDM 符号周期的时间长度为 0.5 ms，每个常规 OFDM 符号周期为 71.4 μs 。

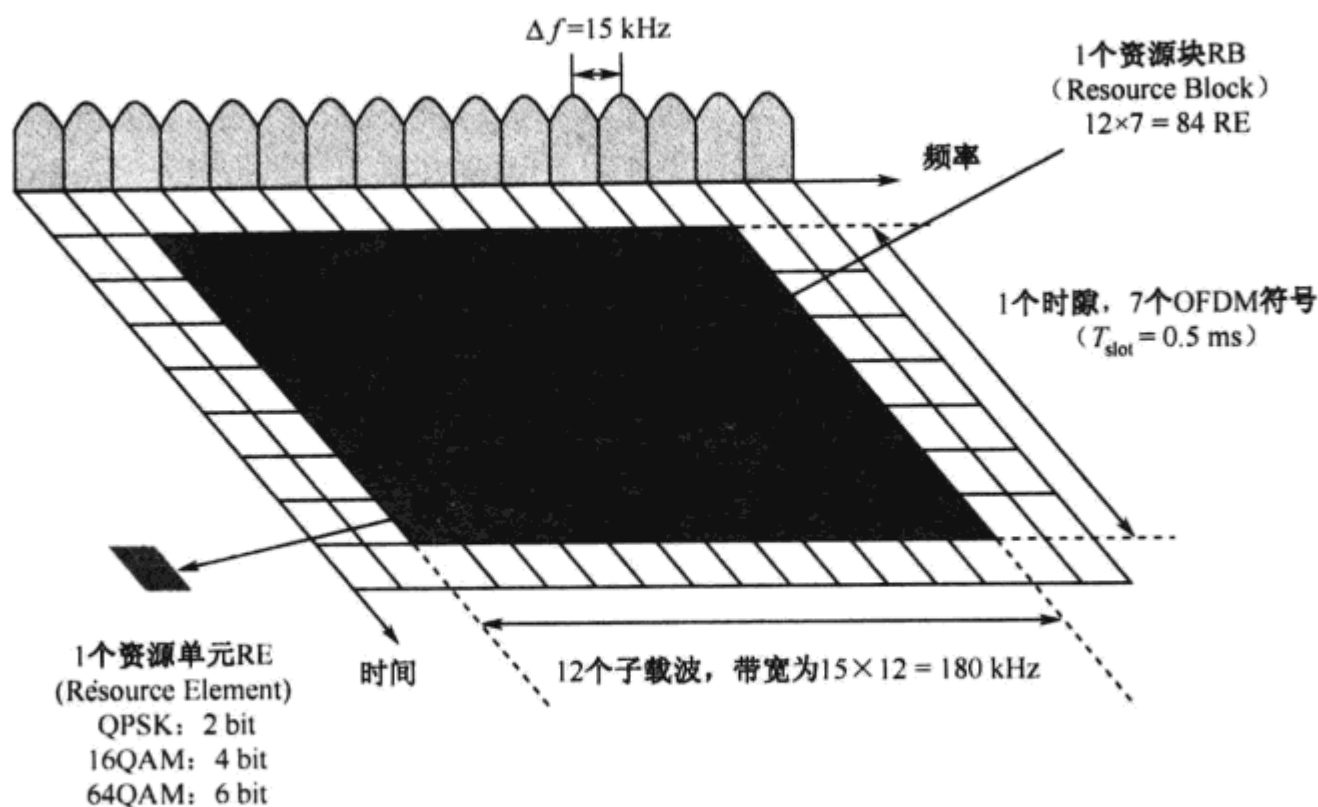


图 5-18 OFDMA 资源块 RB 结构

LTE 的下行物理资源可以看成由时域和频域资源组成的二维栅格。可以把一个常规 OFDM 符号周期和一个子载波组成的资源称为 1 个资源单位 (Resource Element, RE)。于是, 一个 RB 包含的 RE 数目为

$$12 \times 7 = 84 \text{ RE}$$

即一个 RB 包含 84 个 RE。

每一个资源单位 RE 都可以根据无线环境选择 QPSK、16QAM 或 64QAM 的调制方式。调制方式为 QPSK 的时候, 一个 RE 可携带 2 bit 的信息; 调制方式为 16QAM 的时候, 一个 RE 可携带 4 bit 的信息; 调制方式为 64QAM 的时候, 一个 RE 可携带 6 bit 的信息。

LTE 支持 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz 等级别的动态带宽配置, 带宽的动态配置是通过调整资源块 RB 数目的多少来完成的。不同的 RB 数目又对应着不同的子载波数目, 如表 5-2 所示。

表 5-2 带宽与资源块数目

信道带宽 (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
RB 个数	6	15	25	50	75	100
子载波数目	72	180	300	600	900	1 200

在 UMTS 系统中, 资源调度的最小单位是时间和码道组成的资源单元, 带宽资源不能灵活分配。WCDMA HSDPA 的时间调度最小单位为 2 ms, TD-SCDMA 的时间调度最小单位是

5 ms; WCDMA 码道调度的最小单位为 $SF=256$, TD-SCDMA 码道调度的最小单位为 $SF=16$ 。

在 LTE 中, 不存在码道的资源, 但带宽资源可以灵活分配。相对于 UMTS 系统来说, 资源分配的颗粒度更细, 资源调度更加灵活。资源调度的最小单位是 RB。也就是说, 时间最小的调度单位为 0.5 ms, 频带最小的调度单位为 180 kHz。但在实际应用中, 0.5 ms 的调度周期系统交互过于频繁, 一般选取 1 ms 为最小资源调度单位。

图 5-19 所示为多用户接入 OFDM 系统中的下行无线资源分配示例。在同一个时隙里, 不同的子载波上, 可以支持多个用户接入; 同样道理, 同样的子载波, 在不同的时隙里, 可以服务不同的用户。

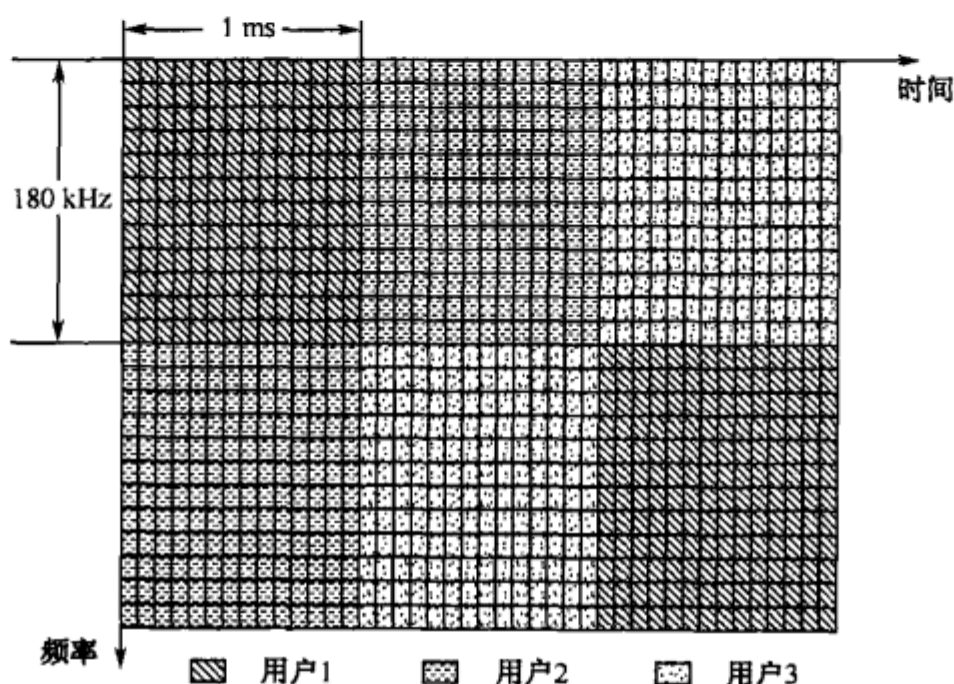


图 5-19 多用户接入 RB 分配

5.4.2 SC-FDMA

在 LTE 上行多址接入技术的选取过程中, 有过激烈的争论, 存在很大的分歧。很多设备商认为, OFDMA 具有较高的峰均比, 在上行使用会增加终端的功放成本和终端的耗电, 所以建议采用峰均比较低低的单载波频分多址方案 SC-FDMA。而另外一些参与过 WiMAX 标准制定的公司则会认为, OFDMA 峰均比过高的缺点不是不能克服。经过多轮研讨, 最终确定 SC-FDMA 为 LTE 上行多址接入技术。

SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access, 单载波频分多址) 兼有单载波传输技术峰均比低和频分多址技术频谱利用率高的优点。低峰均比可以降低终端对功放线性度的要求, 提高功放的效率, 延长终端的待机时间, 减少终端的体积和成本。SC-FDMA 能够实现动态频带分配, 频谱利用率虽然比 OFDMA 要低一些, 但比传统的频分多址要高很多。

降低 OFDM 系统峰均比的技术有两种：信号预失真技术和信号预扩展处理技术。

对于信号预失真技术，如削峰（Clipping）技术、峰加窗技术，一般用于下行 OFDMA 去降低峰均比。

对于信号预扩展处理技术，是在 IFFT 处理之前进行预扩展处理，这里又有两种实现方式：在时域上进行预扩展和在频域上进行预扩展。

LTE 最终选用的最典型预扩展处理技术是在频域中进行预扩展的技术：DFT-S-OFDM。

DFT-S-OFDM（Discrete Fourier Transform Spread OFDM，离散傅里叶变换扩展 OFDM）

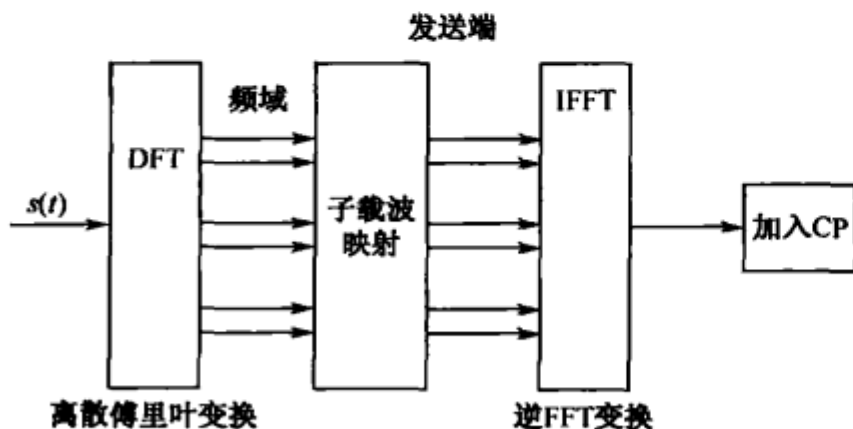


图 5-20 DFT-S-OFDM 实现框图

技术是一种调制复用技术，在 IFFT 处理之前，使用离散傅里叶变换（DFT）将时域信号转换到频域进行扩展，如图 5-20 所示。经过 IFFT 模块，又变成时域信号，然后发送出去。

DFT-S-OFDM 类似于 OFDM，根据用户的需求和系统资源调度的结果来分配频带资源，每个用户可占用系统带宽中的某一部分。

对于每个终端来说，在上行方向上，它的 DFT 模块处理的是单载波的信号，而这个单载波对于网络侧来说只是系统带宽的一部分。对于网络侧来说，系统带宽内可以支持这样多个带宽可变的单载波终端的上行接入，如图 5-21 所示。

DFT-S-OFDM 与传统单载波技术相比，用户之间无须保护带宽，不同用户占用的是相互正交的子载波，具有较高的频率利用效率。DFT-S-OFDM 系统的峰均比远低于 OFDMA。但相对于 OFDMA，DFT-S-OFDM 的频谱效率要低一些。

和下行多址接入方式 OFDMA 一样，DFT-S-OFDM 可以灵活地支持集中式（Localized）FDMA 和分布式（Distributed）FDMA 两种频谱资源的分配方式，如图 5-22 所示。

集中式（Localized）频率分配，即一个用户的 DFT 输出映射到连续的子载波上。这种方式的系统可以获取两种增益：调度增益、多用户增益。连续子载波调度给一个用户比离散子载波调度给一个用户的信令交互简单一些，因此有调度增益；不同的用户通过各自的选择去传输性能较优的子载波，可获得多用户分集增益。

分布式（Distributed）频率分配，即一个用户 DFT 的输出映射到离散子载波上。由于离散的频率，其频率的选择性衰落特性是不同的。相对于集中式（Localized）来说，分布式可以获得额外的频率分集增益。分布式频率分配的缺点是对频偏比较敏感，在高速移动情况下多普勒频移对其性能影响比较大。

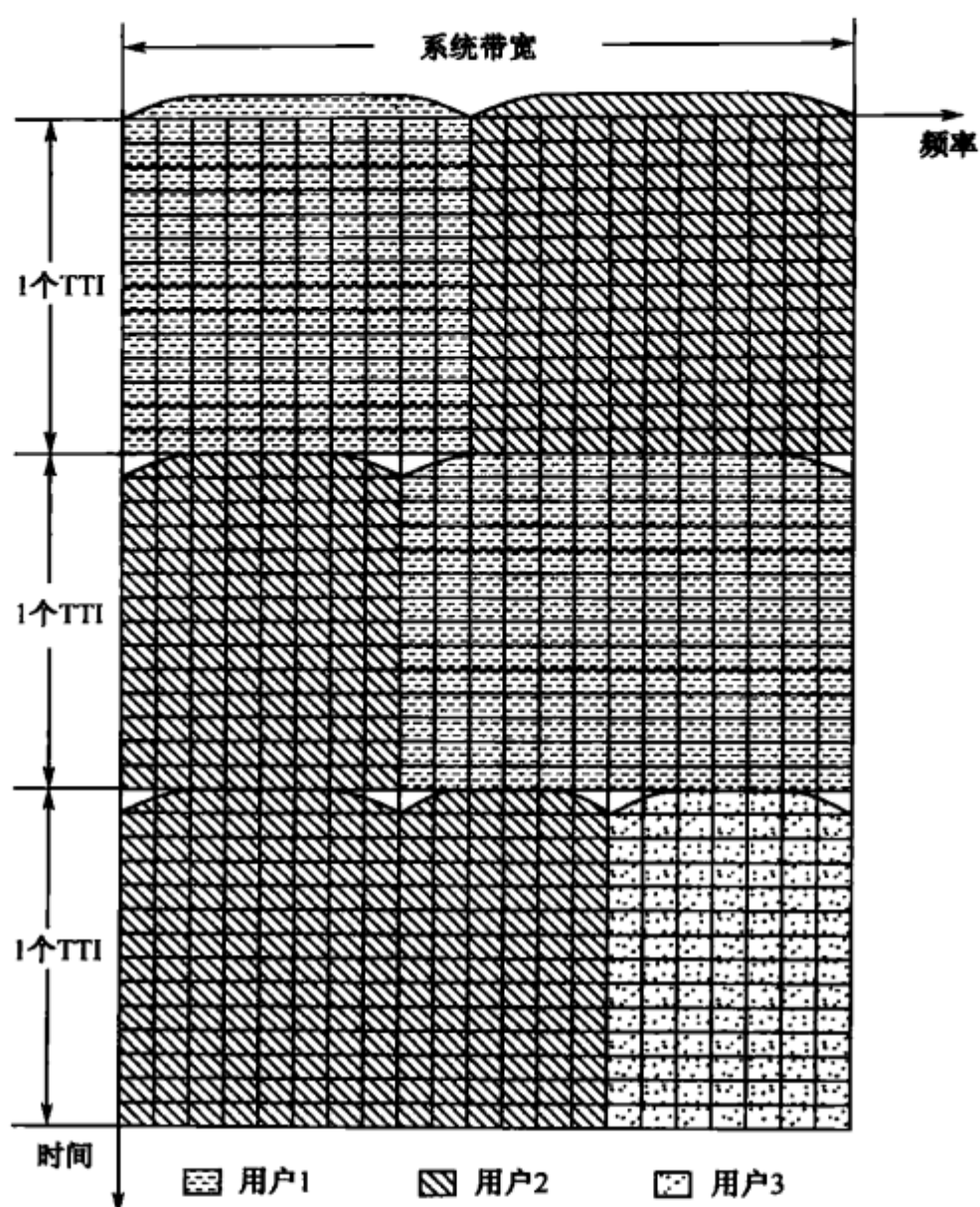


图 5-21 DFT-S-OFDM 上行用户资源分配

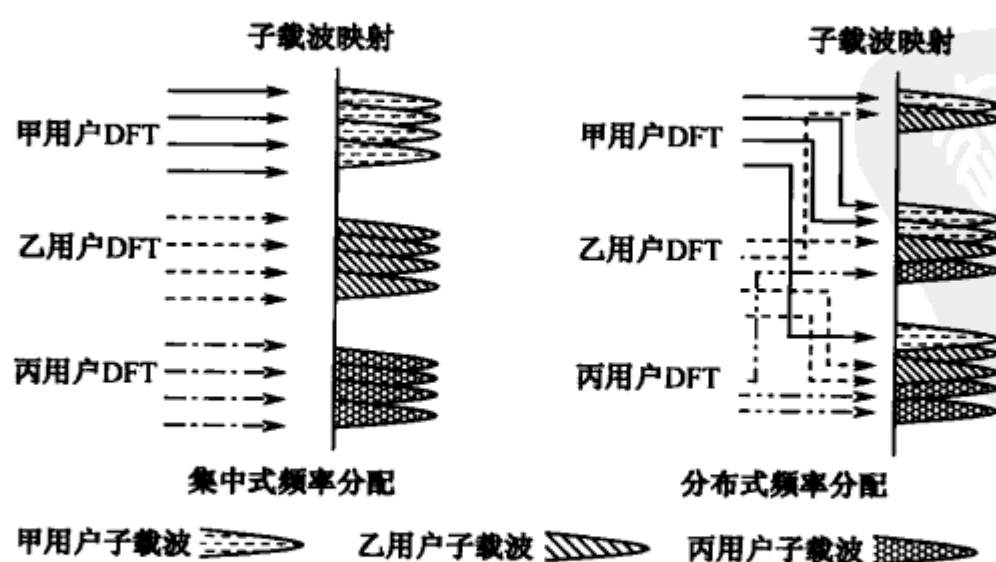


图 5-22 DFT-S-OFDM 的两种频谱资源分配方式

5.4.3 虚拟资源块 VRB

物理资源块 PRB 是时域和频域两个维度确定的空中接口资源。实际系统分配的时候，并不直接指定 PRB，而指定虚拟资源块（Virtual Resource Block, VRB）。VRB 定义了资源的分配方式，其大小和 PRB 是一样的，也是 1 个时隙（0.5 ms）和 12 个子载波。虚拟资源块和物理资源块具有相同的数目。



图 5-23 桌椅 PRB 和其编号 VRB 的关系

虚拟资源块 VRB 定义的目的是在改变物理资源块映射关系的时候，无须改变上层资源使用模块的程序，使得系统设计的时候可以分模块进行，从而降低设计的复杂性。

物理资源块 PRB 如同教室里摆放的一排排桌椅，虚拟资源块 VRB 则相当于给这些桌椅编上号。学校分配座位的时候，只要告诉学生座位号便可以。我们也可以调整编号和桌椅的对应关系，原来横排顺序优先编号，现在竖排顺序优先编号，这样在不通知学生的情况下，座位分配方案就变了（见图 5-23）。

VRB 和 PRB 分别有自己的资源块序号。PRB 的序号 n_{PRB} 是按照频域的物理位置顺序编号的；而 VRB 的序号 n_{VRB} 是系统进行资源分配时所指示的逻辑序号。VRB 和 PRB 之间根据情况不同，需要定义不同的映射关系，如图 5-24 所示。

对于集中式（Localized）频率分配方式，VRB 直接映射到 PRB 便可，无须定义复杂的映射关系，即 $n_{VRB} = n_{PRB}$ 。而对于分布式（Distributed）频率分配方式，连续 VRB 序号会映射到不连续的 PRB 序号上， n_{VRB} 和 n_{PRB} 的映射关系就是分布式频率分配的算法，如图 5-25 所示。

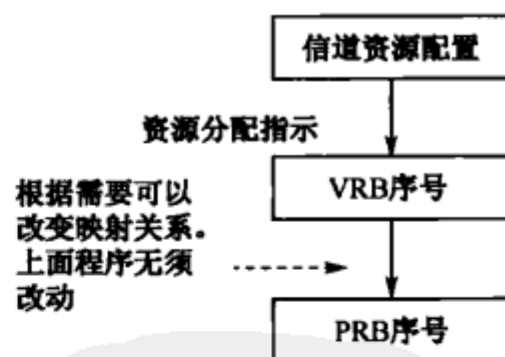


图 5-24 PRB 和 VRB 的关系

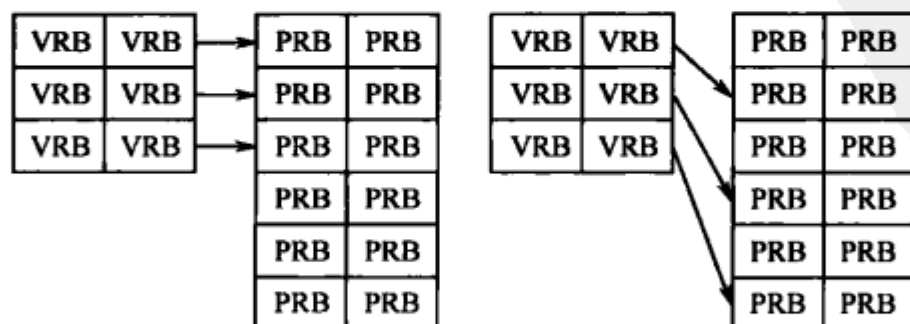


图 5-25 集中式与分布式频率分配

5.5 OFDM 特点

5.5.1 OFDM 优点

OFDM 系统通过多个正交的子载波来区分不同的信道，并行地承载数据。这个特点决定了 OFDM 系统相对于其他系统来说，有诸多优点：

首先，频谱利用效率高。

传统的 FDM 系统的载波之间必须有保护带宽，频率的利用效率不算高。OFDM 的多个正交子载波可以相互重叠，无须保护频带来分离信道，从而提高了频率利用效率，如图 5-26 所示。

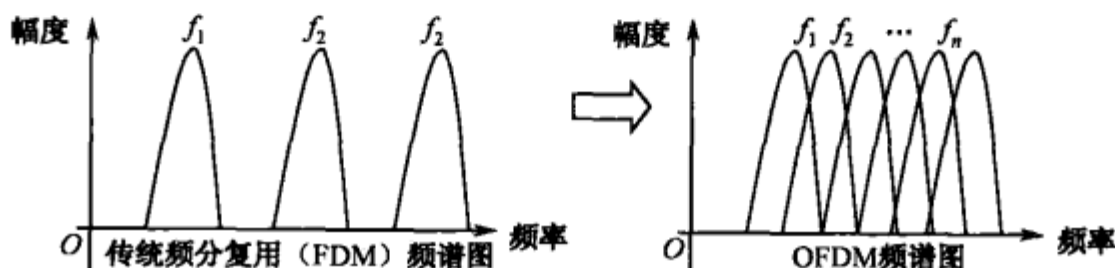


图 5-26 OFDM 频谱效率的提高

频谱效率是运营商非常关心的一个方面。这里强调的是 OFDM 不过是比 FDM 的频谱效率高而已，但和 CDMA 比较起来，在低带宽 (<5 MHz) 的时候，优势并不是很明显。3GPP 对 CDMA 和 OFDM 的频谱效率做过严格的对比测试，结论是二者的频谱效率差不多。

其次，带宽可灵活配置，且可扩展性强。

频带灵活配置有两层含义：

(1) 频段的大小可灵活分配，这是相对于以往固定带宽的系统来说的。如在 WCDMA 里面，上行 5 MHz 带宽、下行 5 MHz 带宽是固定好的，不能变化；但在 LTE 里面则可能出现某一时刻下行带宽 20 MHz、上行只用 1 MHz 带宽，而下一时刻是下行带宽 10 MHz、上行带宽 2.5 MHz 的情况。

(2) 频率可离散分配，这是相对于以往必须分配连续频率的系统来说的。但是支持离散频段的器件实现比较复杂，成本较高。在 WCDMA 中，所需的 5 MHz 带宽必须是连续的；而在 LTE 中，假若需要 5 MHz 带宽时，可以将 5 MHz 带宽分在不连续的频率上，如这个频段上分配 2 MHz，那个频段上分配 3 MHz，而这两个频段并不相连，如图 5-27 所示。

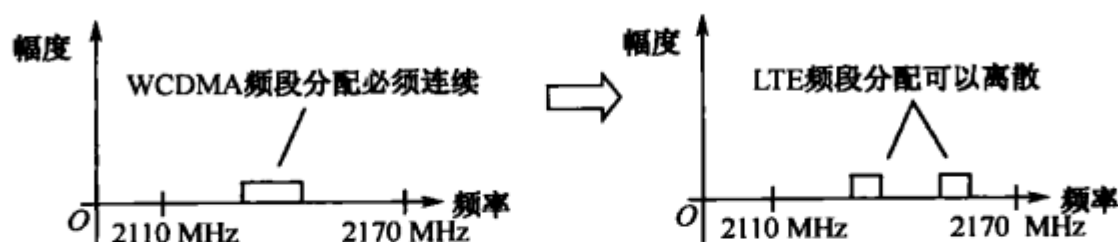


图 5-27 带宽分配灵活

带宽可扩展性强也有两层含义：

- (1) 带宽可以很大，目前 LTE 支持的最大带宽是 20 MHz。
- (2) 颗粒度可以很小，支持子载波级带宽分配。

目前 LTE 支持的带宽等级有：

- (1) 大带宽分配：10 MHz、15 MHz、20 MHz。
- (2) 窄带频谱分配：1.4 MHz、3 MHz、5 MHz。

再次，系统的自适应能力增强。

OFDM 的自适应能力包括两层含义：

- (1) 频率自适应。
- (2) 子载波级的调制自适应。

OFDM 技术持续不断地监控无线环境特性随时随地的变化，通过接通和切断相应的子载波，使之动态地去适应环境，来确保无线链路的传输质量。

以往无线自适应技术有天线自适应(如 TD-SCDMA 智能天线)、信道自适应(比如 HSDPA 中自适应编码调制 AMC)、资源分配的自适应(如 TD-SCDMA 的动态信道分配 DCA，属于无线资源管理 RRM 技术)，等等，但自适应技术只是时域和码域的自适应，没有频率自适应。

OFDM 将自适应能力扩展到了频域，支持频率位置、带宽大小对无线环境的适应能力，极大地提高了抗频率选择性衰落的能力。

OFDM 的资源分配是以 RB (Radio Block，无线资源块) 为单位的，一个 RB 里面有多个正交的子载波，也就是说，子载波的数量大小可以自适应。

OFDM 不仅支持子载波的数量大小的自适应，还支持子载波调制方式的自适应，如图 5-28 所示。OFDM 也可监测哪一个特定的子载波存在较高的信号衰减或干扰噪声，然后选择合适的调制方式来适应无线环境。

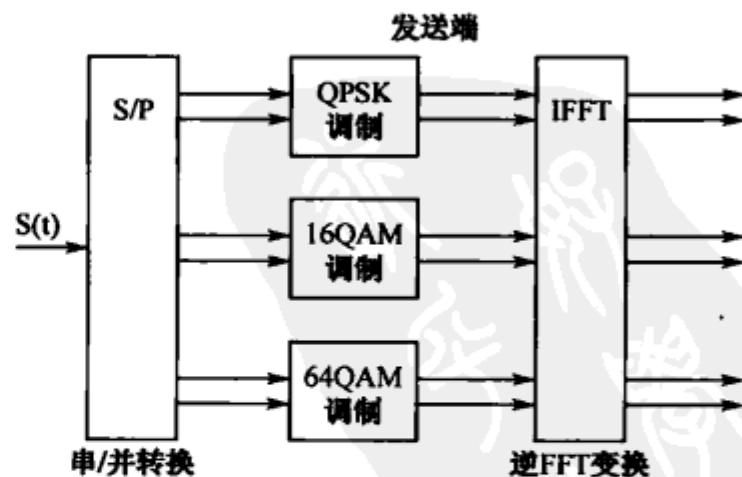


图 5-28 子载波调制自适应

OFDM 的各个子载波可以根据信道状况的不同选择不同的调制方式，如 BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、64QAM 等。当信道条件好的时候，采用高阶的调制方式；而当信道条件差

的时候，则需要采用抗干扰能力强的低阶调制方式。

最后，OFDM 系统的抗衰落能力和抗干扰能力得到增强。

OFDM 采用多个子载波并行传输技术，符号周期增加很多，对抗脉冲噪声(Impulse Noise)和信道快衰落的能力得到增强；采用子载波的联合编码，起到了子信道间的频率分集作用，降低了对时域均衡器的要求（为克服信道选择性衰落而使用的器件）。

OFDM 系统和其他系统不同的是无用户间干扰的概念，但有符号间干扰 ISI、载波间干扰 ICI 的概念。OFDM 并行传输技术和加入循环前缀 CP 技术，大大降低了 ISI、ICI 的影响。

在单载波系统中，单个衰落或者干扰可能导致整个无线链路被破坏；但在 OFDM 的多载波系统中，频率自适应通过合理地挑选子载波的位置，使得只有一小分子载波受到影响。纠错机制可帮助恢复这些受损子载波上的信息。因此，OFDM 系统较单载波系统有更强的抗衰落、抗干扰能力。

5.5.2 OFDM 缺点

尽管 OFDM 有诸多优点，但该技术也有不可忽略的几个缺点：峰均比高，多普勒频移(15k 子载波带宽)大，时间和频率同步要求严格，小区间干扰控制难度大。

最大的缺点是，OFDM 的峰均比过高，所要求的系统线性范围宽。

OFDM 符号由多个子载波信号组成，各个子载波信号是由不同的调制方式分别完成的。OFDM 符号在时域上表现为 N 个正交子载波信号的叠加。当这 N 个信号恰好同相，以峰值相叠加时，OFDM 符号将产生最大峰值（见图 5-29）。该峰值功率最大可以是平均功率的 N 倍。尽管峰值功率出现的概率较低，但峰均比越大，必然会对放大器的线性范围要求越高。也就是说，过高的峰均比会降低放大器的效率，增加 A/D 转换和 D/A 转换的复杂性，也增加了传送信号失真的可能性。

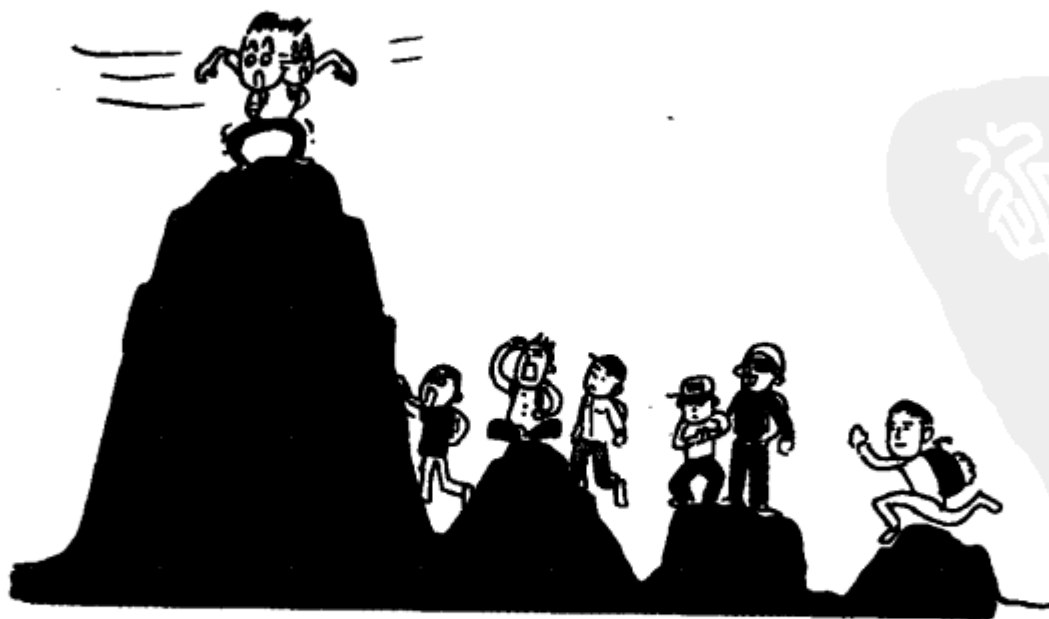


图 5-29 峰均比太大

OFDM 峰均比抑制是现在比较热的研究课题。信号预失真技术、编码技术、加扰技术都可以用来缓减峰均比过大所引起的信号失真的影响。

随着子载波数目 N 的增多，峰均比增加，二者的关系如下：

$$\text{PAPR}=10\lg N$$

举例来说：当 $N=601$ 的情况下，OFDM 系统的 $\text{PAPR}=2.8\text{ dB}$ 。

再次，多普勒频移对 OFDM 系统影响大，对相位噪声比较敏感。

OFDM 系统严格要求各个子载波之间的正交性，频偏和相位噪声会使各个子信道之间的正交特性恶化。任何微小的频偏都会破坏子载波之间的正交性，仅 1% 的频偏就会造成信噪比下降 30 dB，引起载波间的干扰 (ICI)。

当移动速度较高的时候，必然会产生多普勒频偏。对于宽带载波（数量级为 MHz）来说，多普勒频偏相对整个带宽比例较小，影响不大；而多普勒频偏相对于 OFDM 子载波（数量级为 15 kHz）来说，比例就比较大了。对抗多普勒频偏性能较差，是 OFDM 技术的一个非常致命的缺点。

同样，频偏会产生相位噪声，易导致高阶调制符号星座点的错位、扭曲，从而形成 ICI。而对宽带单载波系统来说，相位噪声就不会引起这个问题，只能降低接收到的信噪比 (SNR)，而不会引起载波间的相互干扰。

在 LTE 演进目标中，相对其他无线制式来说，移动性的要求并不算高。在整个速度范围内，要求 LTE 提供与 3GPP R6 版本的 CS 域质量相等或者更优的实时业务；CS 域同频切换的质量应该相等或者优于 UMTS 系统提供的切换质量。但考虑到 OFDM 对多普勒频移和相位噪声的相当敏感，而且，当终端移动速度高于 30 千米/每小时的时候，子载波级的自适应调制技术就不太好用了。所以 LTE 对移动性的要求和其他制式相比虽然没有明显的提高，其实也是非常苛刻的。

再次，OFDM 对时间和频率同步要求严格。时间失步，会导致符号间干扰 (ISI)；频率失步，则类似频偏的影响一样，导致载波间干扰 (ICI)。OFDM 系统通过设计同步信道、导频和信令交互，以及 CP 的加入，目前已经能够满足系统对同步的要求。

最后，OFDM 系统本身无法提供小区间的多址能力，所以小区间干扰控制难度大。OFDM 系统在抑制小区内的干扰方面，优势比较明显。但对于小区间的干扰抑制问题，需要依赖其他技术来辅助抑制，这是 OFDM 系统目前面临的最大问题。

进出口物流模式——两种帧结构

知识要点

上、下行信息如何复用有限的无线资源，这是所有无线制式必须考虑的双工技术问题。以往的无线制式要么支持时分双工（TDD），要么支持频分双工（FDD），而 LTE 标准上即支持时分双工（TDD），又支持频分双工（FDD），分别对应着不同的帧结构设计。这两种双工模式有何区别？二者在帧结构设计上有何异同？和 3G 制式相比，帧结构有哪些变化？本章对这些问题进行探讨。

关于进出口物流模式问题，三吉皮皮国进行了激烈的争论。概括起来有两种方案：

以提迪迪（TDD 化名，简称提先生）为代表的革新派主张“时分模式”，即进口物流和出口物流使用同一个通道（在无线通信制式中，对应频率的维度），但进出口必须在不同的时间传送货物。

以佛迪迪（FDD 化名，简称佛先生）为代表的保守派主张“道分模式”，即进口物流和出口物流使用不同的通道，于是进出口可在同一时间传送货物。

提先生认为，他们的方案最大的优点是只需要一个通道，就可以支持两个方向的物流，节约通道资源（节约频率资源，提高频谱利用率）。进出口流量不对称的时候，可以调整相应的时间来满足。提先生驳斥佛先生进口物流和出口物流各占用一个通道的方案，指出通道资源利用率不大，真是“宰卖爷田不心疼”。

佛先生认为他们的方案最大的优点是两个方向的物流可以在同一时间进行，互不干扰，不存在交叉时隙干扰的影响。佛先生驳斥提先生的方案必须精确地安排进口物流、出口物流使用的时间（要求严格同步）；一旦进出口时间没有安排好，两个方向的物流在同一个通道上就会互相影响（交叉时隙干扰），属于“制造混乱没商量”。

大家争来争去，莫衷一是，不知如何是好。

国王吟诗一首：“梅须逊雪三分白，雪却输梅一段香”（见图 6-1）。

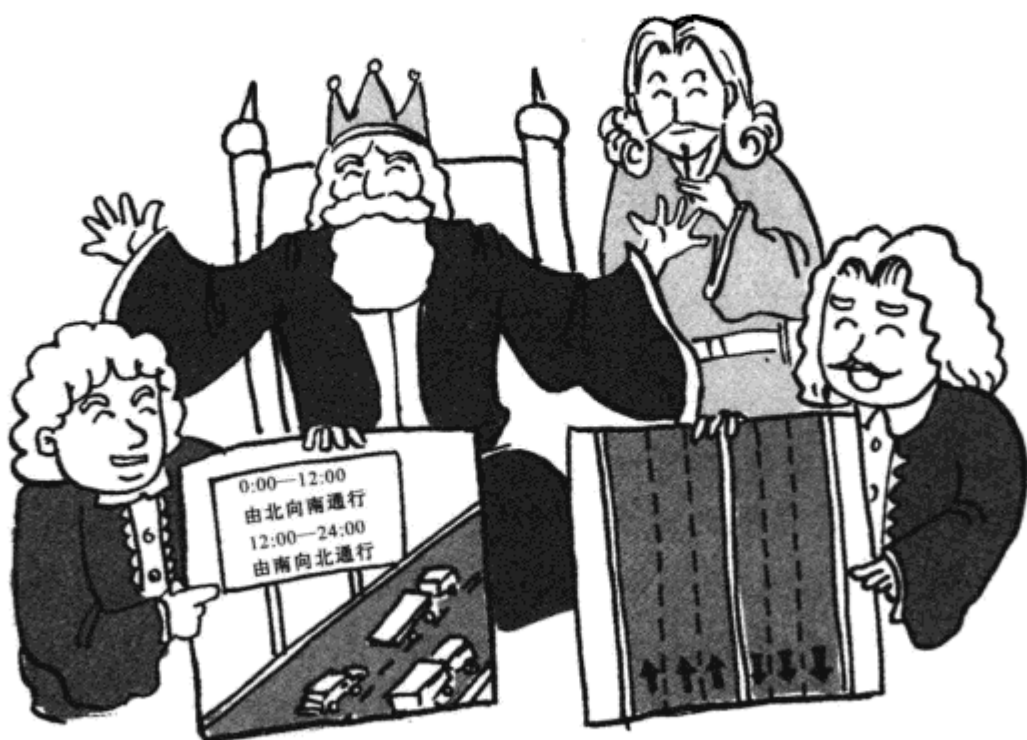


图 6-1 两种进出口物流模式

接班人奥先生明白了国王的意思，两种方案各有优劣，他宣布：“两种方案都采用！三吉皮皮国的长期演进目标是两种进出口物流模式都支持！”

但是如何支持呢？大家苦思冥想，终于有了下面的细节。

6.1 两种双工模式

LTE 标准支持两种双工模式：频分双工（Frequency Division Duplexing, FDD）和时分双工（Time Division Duplexing, TDD）。于是，LTE 定义了两种帧结构：FDD 帧结构（Frame structure type1）和 TDD 帧结构（Frame structure type 2）。

FDD 和 TDD 两种双工方式已分配的频段不同，大小不同。运营商已获得的 FDD 频段更多一些。由于各厂家利益的不同，取得的频段不同，产业链成熟状况不同，因而二者的发展有所不同。

在 3G 制式中，WCDMA 采用 FDD 双工技术，在全球范围内应用较广；而 TD-SCDMA 采用的是 TDD 的双工技术，在中国获得了比较成功的应用。受此影响，LTE FDD 标准化与产业化的程度领先于 LTE TDD，支持 LTE FDD 的阵营更加强大。2007 年年底，3GPP RAN1 会议通过了多家公司联署的 LTE TDD 统一帧结构。在 TD-SCDMA 的帧结构基础

上发展起来的 LTE TDD 帧结构，为 TD-SCDMA 向 LTE 的演进奠定了技术基础。

3GPP 在制定 3G 标准时，并没有考虑 FDD 和 TDD 在一个体系中实现。LTE 则不然，在整个标准的制定过程中充分考虑了 TDD 和 FDD 双工方式在实现过程的异同，增大二者实现共同点、减少二者的差异处。

LTE FDD 和 LTE TDD 帧结构设计的差别，会导致系统实现方面相应的不同。不过，主要的不同集中在物理层（PHY）的实现上，而在媒质接入控制（MAC）层、无线链路控制（RLC）层的差别不大，在更高层的设计上几乎没有不同。LTE 的标准如果比做一个人的话，FDD 和 TDD 则为两个不同的下肢，他们拥有共同的上体（见图 6-2）。



图 6-2 共同的上体，不同的下肢

从设备实现的角度来讲，LTE TDD 和 LTE FDD 相比，差别仅在于物理层软件和射频模块硬件（如滤波器），网络侧绝大多数网元可以共用，这就使得 TDD 的相关厂家可以共享 FDD 成熟的产业链带来的便利。

但终端射频模块存在差异，这样，终端的发展成熟度决定了 LTE TDD 和 LTE FDD 各自网络的竞争力。

WCDMA 网络逐渐同 LTE FDD 融合，TD-SCDMA 网络逐渐同 LTE TDD 融合。

6.1.1 FDD 与 TDD

FDD 的关键词是“共同的时间、不同的频率”。FDD 在两个分离的、对称的频率信道上分别进行接收和发送。FDD 必须采用成对的频率区分上行（UL, Uplink）、下行（DL, Downlink）链路，上、下行频率间须有保护频段。FDD 的上、下行在时间上是连续的，可以同时接收和发送数据。

TDD 的关键词是“共同的频率、不同的时间”。TDD 的接收和发送是使用同一频率的不同时隙来区分上、下行信道，在时间上是不连续的。一个时间段由移动台发送给基站（UL），另一个时间段由基站发送给移动台（DL）。因此，基站和移动台之间对时间同步的要求是比较苛刻的。

FDD 和 TDD 的上、下行复用原理如图 6-3 所示。

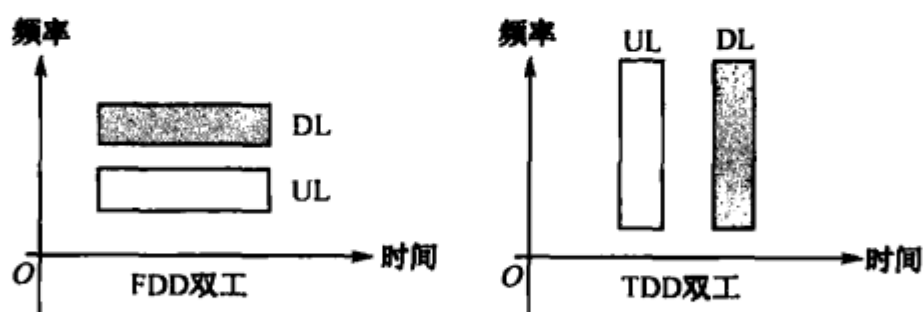


图 6-3 FDD 和 TDD

FDD 上、下行需要成对的频率，而 TDD 无须成对的频率，这就使得 TDD 可以灵活地配置频率，而使用 FDD 不能使用的零散频段。

TDD 的上、下时隙配比可以灵活调整，这使得 TDD 在支持非对称带宽的业务时，频谱效率有明显的优势。FDD 在支持对称业务时，能充分利用上、下行的频谱，但在支持非对称业务时，频谱利用率将大大降低。

TDD 上、下行的频率是一样的，这样上、下行无线传播特性是一样的，能够很好地支持联合检测、智能天线等关键技术。TDD 的基站的接收和发送可以共用部分射频单元，不需要收/发隔离器，只需要一个开关即可，因而降低了设备的复杂度，也降低了设备成本。

当然，TDD 双工方式和 FDD 相比，还存在明显的不足。

TDD 上、下行分配的时间资源是不连续的，分别给了上行和下行。TDD 的发射功率的时间大约只有 FDD 的一半。TDD 和 FDD 具有同样的峰值功率的情况下，TDD 的平均功率仅为 FDD 的一半。尤其在上行方向上，终端侧难以使用智能天线，所以 TDD 的上行覆盖会受限。因此，TDD 的覆盖范围也比 FDD 小一些，也就是说，同样的覆盖面积，同样的终端发射功率，TDD 需要更多的基站。如果 TDD 要覆盖和 FDD 同样大的范围，就要增大 TDD 的发送功率。

TDD 上、下行信道同频，无法进行干扰隔离，抗干扰性差。

和 TDD 相比，FDD 对移动性的支持能力较强，能够较好地对抗多普勒频移，而 TDD 则对频偏较敏感，对移动性的支持较差。

TDD 和 FDD 优缺点对比如表 6-1 所示。

表 6-1 TDD 和 FDD 优缺点对比

	FDD 缺点	TDD 优点
对频带的需求	上、下行成对的频率, 需要保护带宽	频率配置灵活, 无须成对频率
频谱效率	较低	较高
非对称业务的支持	非对称业务效率低	支持非对称业务
智能天线的支持	支持困难	很好的支持
	FDD 优点	TDD 缺点
抗干扰性	强	较差
覆盖性能	大范围	小范围
对同步的要求	不严格	较为严格
移动性的支持	高达 500 km/h	只有约 120 km/h

6.1.2 频段分配

LTE 不但支持 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz 等多种带宽配置, 还支持从 700 MHz 到 2.6 GHz 等多种频段。

根据协议规定, LTE 系统定义的工作频段有 40 个, 使用的频段考虑了对现有无线制式频段的再利用。每个频段都有一个编号和一定的范围, 部分工作频段之间会有重叠。编号 1~32 为 FDD 频段, 如表 6-2 所示; 编号 33~40 为 TDD 频段, 如表 6-3 所示。其中, FDD 的一些编号如 15、16、18 到 32, 还没有分配具体的频点。

表 6-2 FDD 模式支持频段

LTE FDD 频段	上行 (UL)	下行 (DL)
	$F_{UL_low} \sim F_{UL_high}$	$F_{DL_low} \sim F_{DL_high}$
1	1 920~1 980 MHz	2 110~2 170 MHz
2	1 850~1 910 MHz	1 930~1 990 MHz
3	1 710~1 785 MHz	1 805~1 880 MHz
4	1 710~1 755 MHz	2 110~2 155 MHz
5	824~849 MHz	869~894 MHz
6	83~840 MHz	875~885 MHz
7	2 500~2 570 MHz	2 620~2 690 MHz
8	880~915 MHz	925~960 MHz
9	1 749.9~1 784.9 MHz	1 844.9~1 879.9 MHz
10	1 710~1 770 MHz	2 110~2 170 MHz
11	1 427.9~1 452.9 MHz	1 475.9~1 500.9 MHz
12	698~716 MHz	728~746 MHz

续表

LTE FDD 频段	上行 (UL)	下行 (DL)
	$F_{UL_low} \sim F_{UL_high}$	$F_{DL_low} \sim F_{DL_high}$
13	777~787 MHz	746~756 MHz
14	788~798 MHz	758~768 MHz
...
17	704~716 MHz	734~746 MHz
...

表 6-3 TDD 模式支持频段

LTE TDD 频段	上行 (UL)	下行 (DL)
	$F_{UL_low} \sim F_{UL_high}$	$F_{DL_low} \sim F_{DL_high}$
33	1 900~1 920 MHz	1 900~1 920 MHz
34	2 010~2 025 MHz	2 010~2 025 MHz
35	1 850~1 910 MHz	1 850~1 910 MHz
36	1 930~1 990 MHz	1 930~1 990 MHz
37	1 910~1 930 MHz	1 910~1 930 MHz
38	2 570~2 620 MHz	2 570~2 620 MHz
39	1 880~1 920 MHz	1 880~1 920 MHz
40	2 300~2 400 MHz	2 300~2 400 MHz

6.2 LTE 帧结构

LTE 采用的是 OFDM 技术, 子载波间隔为 $\Delta f = 15 \text{ kHz}$, 每个子载波为 2048 阶 IFFT 采样, 则 LTE 采样周期 $T_s = 1 / (2\,048 \times 15\,000) = 0.033 \mu\text{s}$ 。在 LTE 中, 帧结构时间描述的最小单位就是采样周期 T_s 。

6.2.1 FDD 帧结构

LTE FDD 类型的无线帧长为 10 ms, 每帧含 10 个子帧、20 个时隙。每个子帧有两个时隙, 每个时隙为 0.5 ms, 如图 6-4 所示。LTE 的每个时隙又可以有若干个资源块 (PRB), 每个 RRB 含有多个子载波。

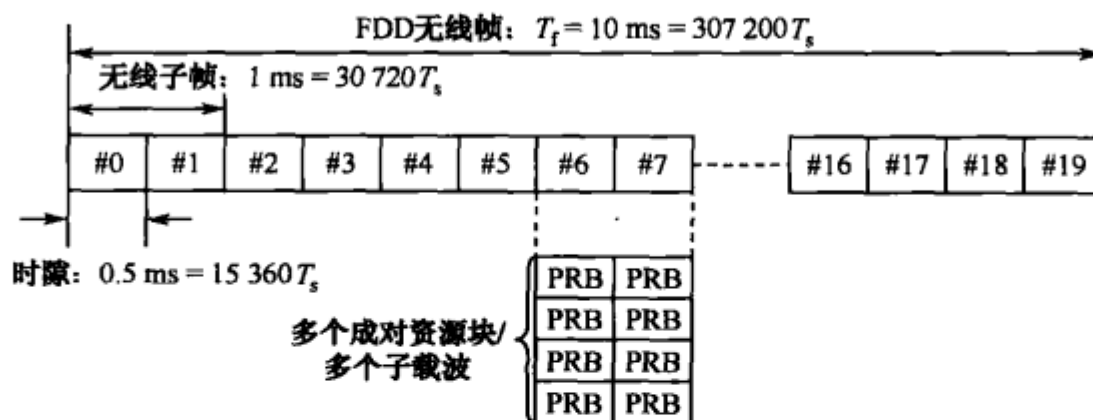


图 6-4 LTE FDD 帧结构

LTE 有很苛刻的时延要求，在负载较轻的情况下，用户面延迟小于 5 ms。为了满足这么苛刻的数据传输延迟要求，LTE 系统必须使用很短的交织长度（TTI）和自动重传请求（ARQ）周期。因此，LTE 的时隙颗粒度必须很细。

LTE 的时隙长度为 0.5 ms，但对 0.5 ms 这一个调度的话，信令面的开销太大，对器件的要求比较高。一般调度周期 TTI 设为一个子帧的长度（1 ms），包括两个资源块 RB 的时间长度。因此，一个调度周期内，资源块 RB 都是成对出现的。

FDD 帧结构不但支持半双工 FDD 技术，还支持全双工 FDD 技术。半双工（Half Duplex）技术就是指上、下行两个方向的数据传输可以在一个传输通道上进行，但是不能同时进行，如同一个窄马路，某一个时间段内只能有一辆车通过，对面的车辆只能在下一个时间段内通过。全双工（Full Duplex）技术是上、下行两个方向的数据传输，不但可以在一个传输通道上进行，而且可以同时进行的，如同可以双向通行的宽马路一样。

一个常规时隙包含 7 个连续的 OFDM 符号（Symbol）。为了克服符号间干扰（ISI），需要加入 CP。CP 的长度与覆盖半径有关，要求的覆盖范围越大，需要配置的 CP 长度就越长；但过长的 CP 配置也会导致系统开销过大。在一般覆盖要求下，配置普通长度的 CP（Normal CP）即可满足要求；但是需要广覆盖的场景则要配置增长的扩展 CP（Extended CP）。

在增强型 MBMS（Multimedia Broadcast Multicast Service，广播多播业务）应用的场景，由于需要多个同频小区同时进行数据发送，为了避免不同位置的基站多径时延的不同，需要采用扩展的 CP。

在下行方向，还有一种超长 CP 的配置，子载波的间隔不是 15 kHz，而是 7.5 kHz，仅仅应用于独立载波的 MBSFN（Multicast Broadcast over Single Frequency Network，多播广播同频网络）传输。在上行方向，没有子载波间隔为 7.5 kHz 的时隙结构。

上、下行普通 CP 配置下的时隙结构如图 6-5 所示。在一个时隙中，第 0 个 OFDM 符号的循环前缀 CP 长度和其他 OFDM 符号的 CP 长度是不一样的。第 0 个 OFDM 符号的 CP 长度为 $160 T_s$ ，约为 $5.2 \mu\text{s}$ ；而其他 6 个 OFDM 符号的 CP 长度为 $144 T_s$ ，约为

4.7 μs ; 每个 OFDM 周期内有用符号的长度为 $2\,048 T_s$, 约为 $66.7 \mu\text{s}$ 。7 个 OFDM 符号周期, 有用符号长度和 CP 长度之和正好为 $15\,360 T_s$, 约合 0.5 ms 。

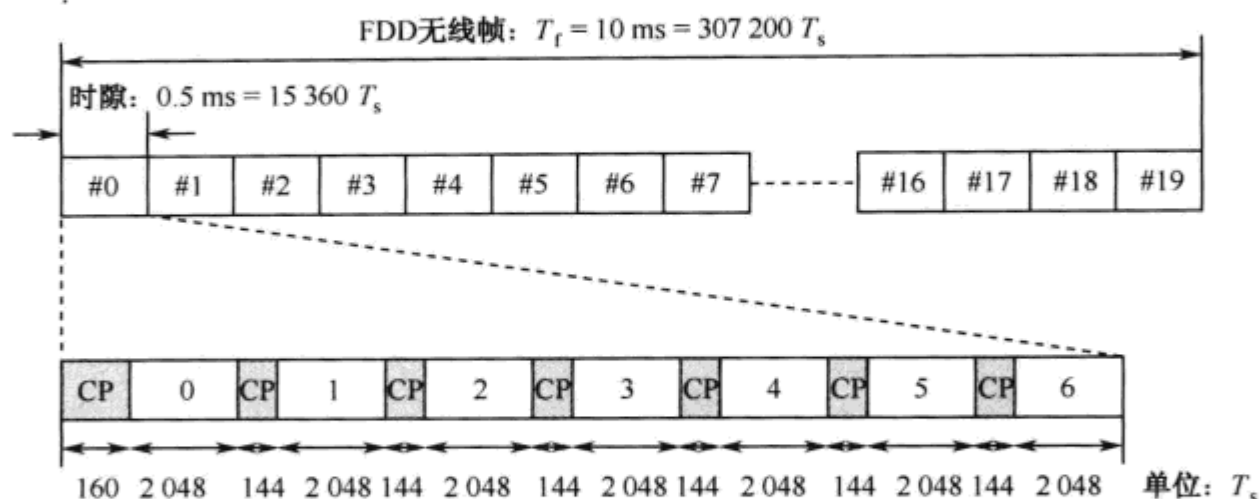


图 6-5 $\Delta f=15 \text{ kHz}$ 时, FDD 模式普通 CP 配置的时隙结构

上、下行扩展 CP 配置下的时隙结构如图 6-6 所示。扩展 CP 配置下, 每个时隙的 OFDM 符号数目不再是 7 个, 而是 6 个。和普通 CP 配置的时隙结构不同的是, 一个时隙内, 每个 OFDM 符号周期的长度是一样的。每个 OFDM 符号中有用符号的长度仍然是 $2\,048 T_s$, 约为 $66.7 \mu\text{s}$; 但 CP 的长度扩展为 $512 T_s$, 约合 $16.7 \mu\text{s}$ 。这样在扩展 CP 模式下, 比普通 CP 模式下的符号周期增加了约 $12 \mu\text{s}$, 因此 1 个时隙 0.5 ms 内的符号个数减少了 1 个。

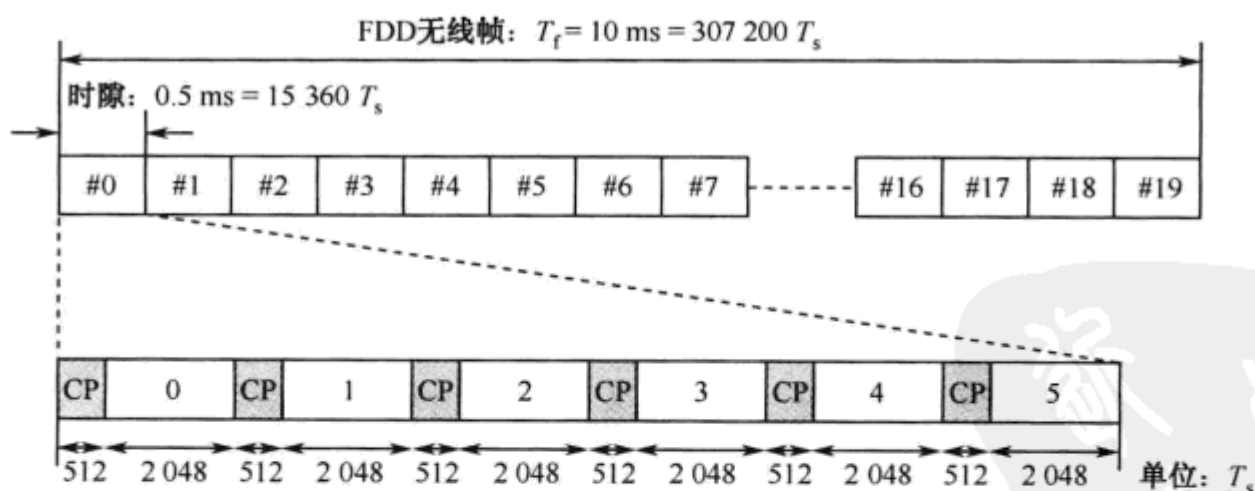


图 6-6 $\Delta f=15 \text{ kHz}$ 时, FDD 模式扩展 CP 配置的时隙结构

在下行方向 (且只有在下行方向), 为了支持独立载波的 MBSFN 传播, 增加了子载波间隔 $\Delta f=7.5 \text{ kHz}$ 情况下扩展 CP 配置的时隙结构, 如图 6-7 所示。

在这种时隙结构下, 每时隙 OFDM 符号个数降低为 3 个, OFDM 符号周期增长了很多, 能够支持较大覆盖范围的数据传送。在一个时隙内, 每个 OFDM 符号周期的长度由

扩展的 CP 和扩展的有用符号组成。每个 OFDM 符号中有用符号的长度增加为 $4\,096 T_s$ ，约为 $133.3\ \mu\text{s}$ ；扩展 CP 的长度为 $1\,024 T_s$ ，约合 $33.3\ \mu\text{s}$ 。因此， $\Delta f = 7.5\ \text{kHz}$ 的扩展 CP 的时隙结构，比 $\Delta f = 15\ \text{kHz}$ 的时隙结构的 OFDM 符号周期增加一倍。

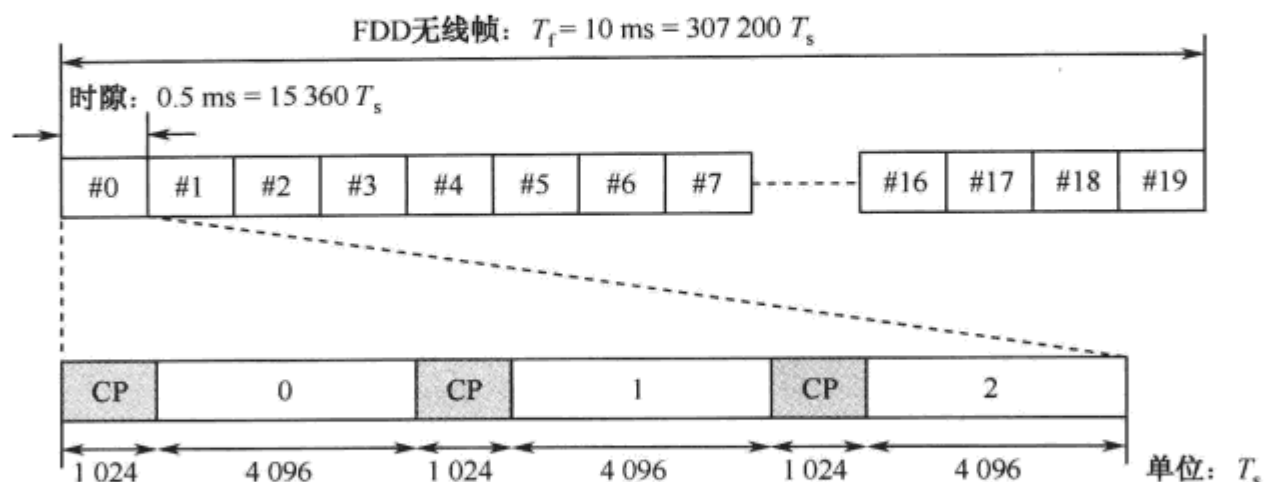


图 6-7 $\Delta f = 7.5\ \text{kHz}$ 时，FDD 模式扩展 CP 配置的时隙结构

在不同 CP 配置下，时隙结构对比如表 6-4 所示。

表 6-4 不同 CP 配置的时隙结构对比

CP 配置	子载波间隔	下行 OFDM CP 长度	上行 SC-FDMA CP 长度	有用符号长度	子载波 RB 数目	每时隙符号数目
普通 CP	$\Delta f = 15\ \text{kHz}$	符号 0 CP 长度为 160； 符号 1~6 CP 长度为 144	符号 0 CP 长度为 160； 符号 1~6 CP 长度为 144	2 048	12	7
扩展 CP		符号 0~5 CP 长度为 512	512 时隙 #0~#5	2 048		6
	$\Delta f = 7.5\ \text{kHz}$	符号 0~2 CP 长度为 1 024	无	4 096	24（仅限下行）	3（仅限下行）

6.2.2 TDD 帧结构

LTE TDD 帧格式的形成过程比较复杂。最初的提案中，有两个版本：一个是和 FDD 帧结构类似的帧格式 FS1（Frame Structure 1），另外一个兼容现有的 TD-SCDMA 帧格式 FS2（Frame Structure 2），如图 6-8 所示。

在标准形成过程中，各个利益集团的博弈、让步，最后形成了融合二者特色的帧结构：与 LTE FDD 帧长度一致，但保留了 TD-SCDMA 的一些特色元素，如图 6-9 所示。

当然，最终形成的帧结构不但兼容了 TDD 的两个版本，而且也完成了 TDD 和 FDD 的统一。这个统一促使 TD-LTE 成为国际认可的主流标准，促进了支持 TD-LTE 产业链的形成，降低了设备商进入 TD-LTE 市场的门槛。

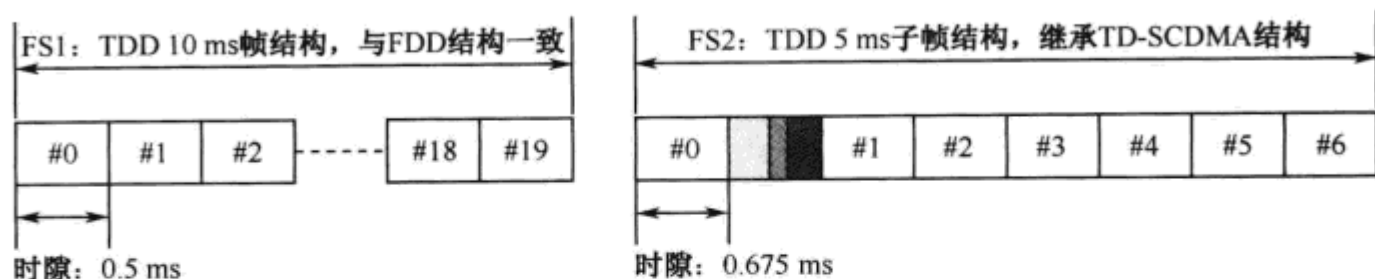


图 6-8 最初提案的 TDD 帧结构版本

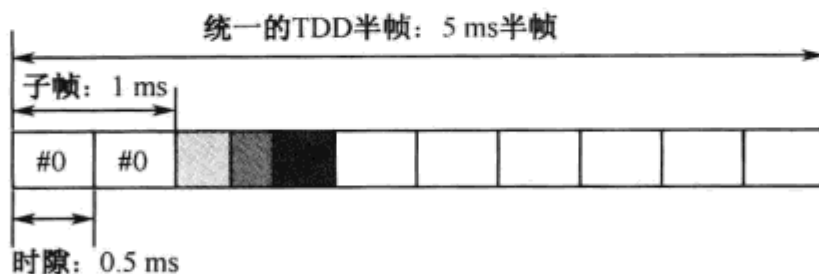


图 6-9 融合后的 TDD 帧结构

LTE TDD 也是采用 OFDM 技术, 子载波间隔和时间单位均与 FDD 相同, 帧结构与 FDD 类似, 如图 6-10 所示。每个 10 ms 帧由 10 个 1 ms 的子帧组成, 每个子帧包含 2 个 0.5 ms 的时隙。

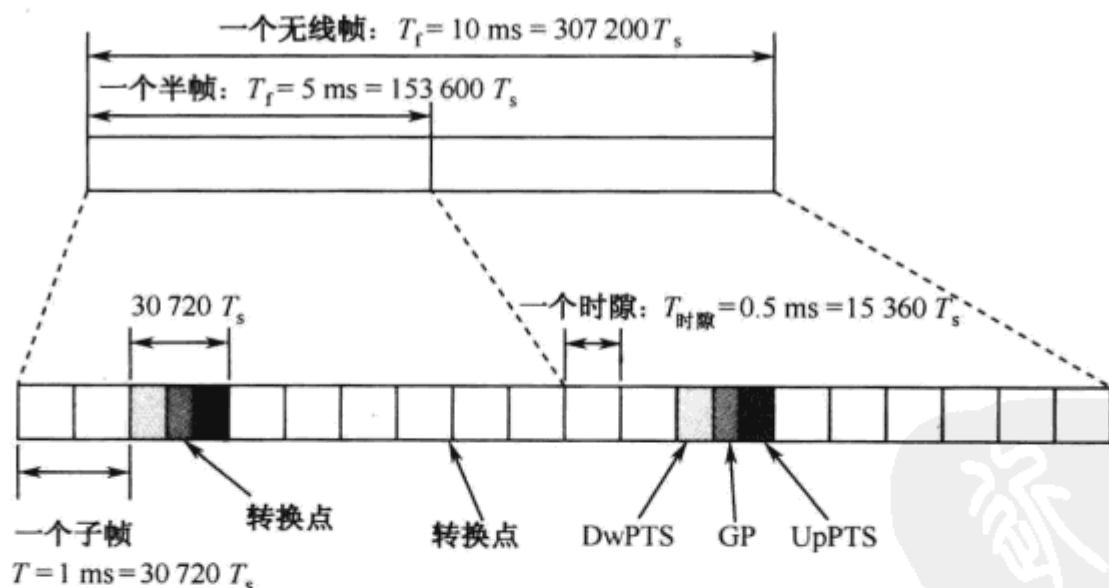


图 6-10 TDD 帧结构

LTE 的 TDD 帧结构和 FDD 不一样的地方有两个:

一是存在特殊子帧, 由 DwPTS、GP 以及 UpPTS 构成, 总长度为 1 ms; 二是存在上、下行转换点。

TD-LTE 和传统的 TD-SCDMA 的 TDD 帧结构相比, 相同的是: 每帧长度是 10 ms, 每半帧长度是 5 ms, 也分常规时隙和特殊时隙, 也存在上、下行时隙转换点, 上、下行

时隙转换点可调。但二者不同的是以下几点：

- 一是每半帧包含的时隙数目不同；
- 二是两者时隙的长度不一样；
- 三是 LTE 特殊时隙的长度是可调的。

TD-SCDMA 的 TDD 子帧有 7 个常规时隙(TS0~TS6),每个时隙的长度为 0.675 ms; TD-LTE 的 TDD 每个常规时隙长度为 0.5 ms,但每两个时隙组成一组进行调度。

TD-SCDMA 有 3 个特殊时隙: DwPTS (下行导频时隙,长为 75 μ s)、GP (保护间隔,长为 75 μ s)和 UpPTS (上行导频时隙,长为 125 μ s)。特殊时隙总长度为 0.275 ms。TD-LTE 的 TDD 也有三个特殊时隙,总长度为 1 ms,DwPTS/GP/UpPTS 的长度是可调的。

TD-LTE 的 TDD 帧结构可以通过两个途径来保证与已有 TD-SCDMA 的共存:

- 一是配置不同的上、下行时隙比例;
- 二是配置不同的特殊时隙 DwPTS、GP、UpPTS 的长度。

在 TD-LTE 的 10 ms 帧结构中,上、下行子帧的分配策略是可以设置的。

每个帧的第一个子帧固定地用做下行时隙来发送系统广播信息,第二个子帧固定地用做特殊时隙,第三个子帧固定地用做上行时隙;后半帧的各子帧的上、下行属性是可变的,常规时隙和特殊时隙的属性也是可调的。

协议规定了 0~6 共 7 种 TD-LTE 帧结构上、下行配置策略,如表 6-5 所示。

表 6-5 LTE TDD 帧结构上、下行配置参考表

上、下行配置	上、下行转换周期	上、下行配比 DL:UL	LTE 子帧号									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	2:3	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	3:2	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	4:1	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	7:3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	8:2	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	9:1	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	5:5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

在表 6-5 中,D 代表下行、S 代表特殊时隙(也算下行)、U 代表上行。

不同的特殊时隙 DwPTS、GP、UpPTS 的长度,在 LTE 的 TDD 帧中也是可配置的,如表 6-6 所示。TDD 的一个子帧长度包括 2 个时隙,普通 CP 配置的情况下,TDD 的一个子帧长度是 14 个 OFDM 符号周期;而在扩展 CP 配置的情况下,TDD 的一个子帧长度为 12 个 OFDM 符号周期。

表 6-6 特殊时隙长度配置

特殊时隙长度配置序号	普通 CP (OFDM 符号数, 共 14 个)			扩展 CP (OFDM 符号数, 共 12 个)		
	DwPTS	GP	UpPTS	DwPTS	GP	UpPTS
0	3	10	1	3	8	1
1	9	4	1	8	3	1
2	10	3	1	9	2	1
3	11	2	1	10	1	1
4	12	1	1	3	7	2
5	3	9	2	8	2	2
6	9	3	2	9	1	2
7	10	2	2			
8	11	1	2			

6.3 LTE 与 UMTS 帧结构对比

无线制式的物理信道分配的无线资源一般采用四层结构进行标识：系统帧号、无线帧、子帧（或短帧，或其他名称）、时隙×码道（CDMA）/资源块 RB（LTE：时隙×子载波），如图 6-11 所示。

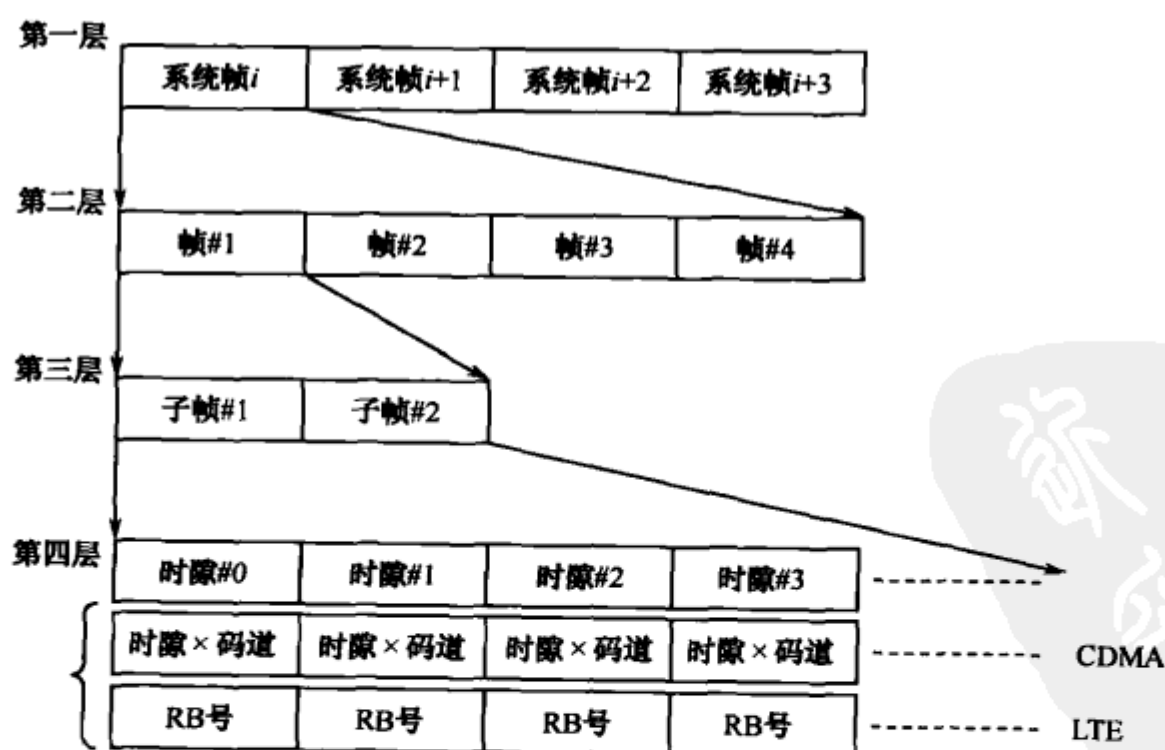


图 6-11 无线制式四层帧结构模型参考

在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中采用 CDMA 技术，资源调度除了指明时隙外，还需标明码道号。而在 LTE 中，资源调度除了给出时隙号，还需指出子载波号，也就是说，要

指明 RB 序号。

时隙的大小决定了资源调度的颗粒度。在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中, 时隙的长度单位除了用毫秒 (ms) 之外, 还可以用码片 (Chip) 来标识, 因为码片就对应着时间。而在 LTE 中, 不存在码片的概念, 但有 OFDM 符号周期的概念, 还可以用采样周期 T_s 的数目来表示时隙的长度。

WCDMA 中码片速率为 3.84 Mcps, 每 chip 的时间长度为 $T_{\text{chip}} = 1/3.84 \times 10^6 = 0.26 \mu\text{s}$ 。在 TD-SCDMA 中, 码片速率为 1.28 Mcps, 每个 chip 的时间长度为 $T_{\text{chip}} = 0.78 \mu\text{s}$ 。

LTE 采用的是 OFDM 技术, 子载波间隔为 $\Delta f = 15 \text{ kHz}$, 每个子载波用 2 048 阶 IFFT 采样, 则 LTE 采样周期 $T_s = 1/(2\,048 \times 15\,000) = 0.033 \mu\text{s}$ 。在 LTE 中, 帧结构时间描述的最小单位就是采样周期 T_s 。

WCDMA、TD-SCDMA、LTE 帧的时间长度 T_f 都为 10 ms。用它们各自的时间单位来表示: WCDMA 中, $T_f = 38\,400 T_{\text{chip}}$; TD-SCDMA 中, $T_f = 12\,800 T_{\text{chip}}$; LTE 中, $T_f = 307\,200 T_s$ 。

WCDMA 每个长 10 ms 的帧被分成 15 个时隙 (Slot), 每个时隙长为 $T_{\text{slot}} = 2\,560 \text{ chip}$, 对应于一个快速功率控制周期。在 WCDMA 的 R99 版本中, 资源调度的最小单位是 10 ms, 在 WCDMA 的 HSDPA 中, 资源调度的最小单位是短帧, 为 2 ms。

LTE 每帧分为 10 个子帧, 共 20 个时隙, 每个时隙的长度要短于 WCDMA 时隙, 资源调度的单位是子帧, 即两个时隙的时间长度为 1 ms。

TD-SCDMA 每个长为 10 ms 的帧被分成 2 个 5 ms 的子帧, 资源调度的时间单位就是子帧的长度 5 ms。每个子帧包括 7 个常规时隙和 3 个特殊时隙, 也就是说, 10 ms 的帧中特殊时隙会出现两次。

TD-LTE 每个长为 10 ms 的帧的特殊时隙可以出现 1 次, 也可以出现两次, 取决于上、下行转换周期的配置策略。3 个特殊时隙占用 1 ms 的子帧。每个半帧包括 5 个 1 ms 的子帧。

LTE、WCDMA、TD-SCDMA 时隙结构对比如表 6-7 所示。

表 6-7 时隙结构对比

帧格式	LTE		WCDMA	TD-SCDMA
	FDD	TDD	FDD	TDD
帧长度	10 ms			
时间的最小单位	采样周期 T_s		码片 Chip	
每帧最小单位个数	307 200		38 400	12 800
每帧时隙个数	20		15	NULL
每子帧时隙个数	2		HSDPA 短帧: 3	常规时隙: 7 特殊时隙: 3
每子帧长度	1 ms		2 ms	5 ms
每时隙长度	0.5 ms		0.667 ms	常规时隙: 0.675 ms 特殊时隙: 0.275 ms
资源调度周期	1 ms		HSDPA 短帧: 2 ms	5 ms

第 7 章

货物的多点装卸——MIMO 多天线技术

知识要点

不断提高空中接口吞吐率，是无线制式发展的动力和目标。MIMO 多天线技术是 LTE 大幅提升吞吐率的物理层关键技术。MIMO 技术和 OFDM 技术一起并称为 LTE 的两大最重要的物理层技术。

MIMO 技术的原理是什么？有哪些工作模式？MIMO 系统如何实现？如何根据实际的无线环境调整 MIMO 的工作模式？多用户条件下，MIMO 如何工作？这些问题是掌握 MIMO 技术的最基本问题。

随着三吉皮皮国的经济发展，对货物运输的需求量大增，每天有大量的无形货物（比特）要发送出去，还有大量的货物运送回来。在刚开始的时候，物流体系用一点装货和一点卸货的方式还可以应对。但随着货运量的增加，单点装和单点卸的方式不能满足需求，需要设立多个货物装点和卸点。但这个方案实现起来还有很多具体的细节需要考虑。

物流体系要把 A 仓库（发货端）的货物搬运到 B 仓库（收货端）里。这个运输系统只有一个装货点，也只有一个卸货点，如图 7-1 所示。由物流体系的员工将货物按次序放在装货点 A，运输公司的人负责装货，然后将货物运到仓库 B，卸到 B 点。这样一个单装点和单卸点的运输系统就是一个单入单出系统（Single Input Single Output, SISO）。

物流体系想把 A 仓库的货物快点清空，以便挪作他用。货物量很大，一个点装货显然不能满足要求，于是要求运输公司多几个装货点，别一个车皮装完了再装下一个车皮，要三个车皮同时开始装，如图 7-2 所示。这样装车的速度会快一些。把货运到仓库 B 后只堆在一处便可以了，不用着急把货物各就各位。这样一个多点装货和单点卸货系统就是多入单出系统（Multiple Input Single Output, MISO）。

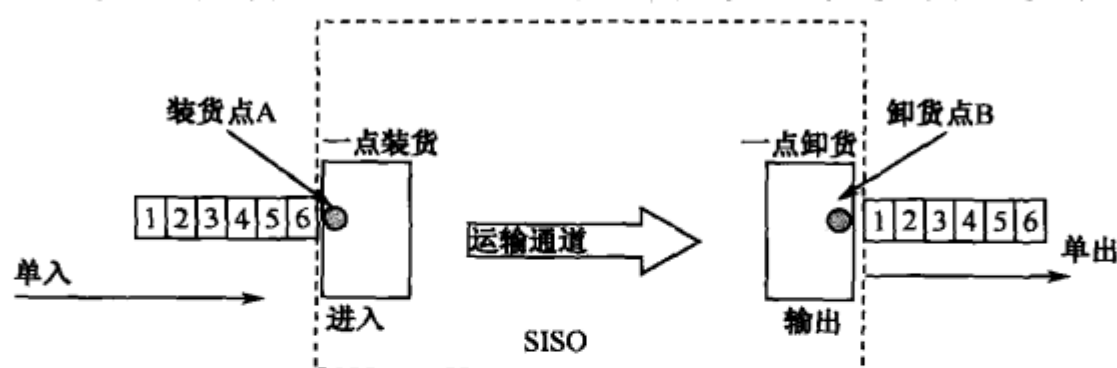


图 7-1 单装点和单卸点运输系统

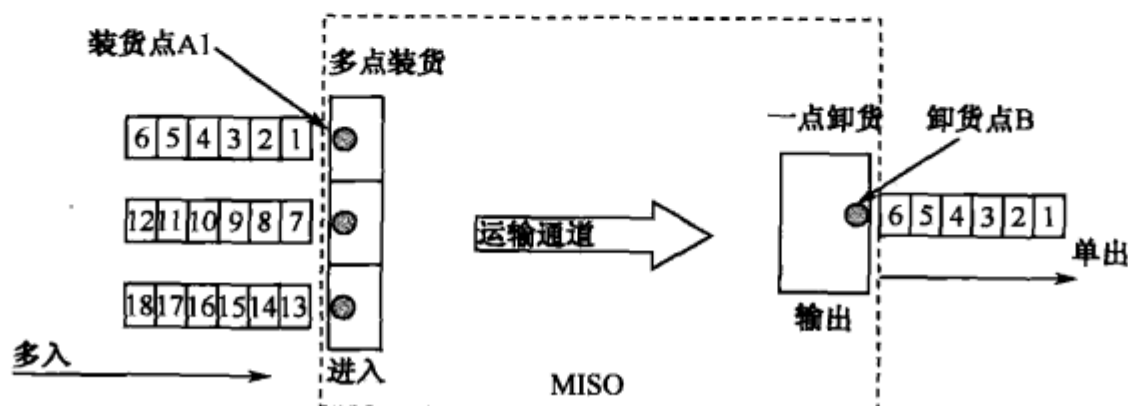


图 7-2 多点装货和单点卸货运输系统

情况有变，仓库A的货物已经不多了，但仓库B处有多个车皮等待卸货。

“几个车皮可以同时卸嘛！这不是很容易吗？”不知哪个领导，打着官腔说道。大家都想到了，但一致说：“领导英明”。

于是要求运输公司在仓库B处增加人力，多几个卸货点，快点把仓库B处的货物各就各位。而仓库A处无须那么多装货点了，只要一个就可以了。这样一个一点装货多点卸货的系统就是单入多出系统（Single Input Multiple Output, SIMO），如图7-3所示。

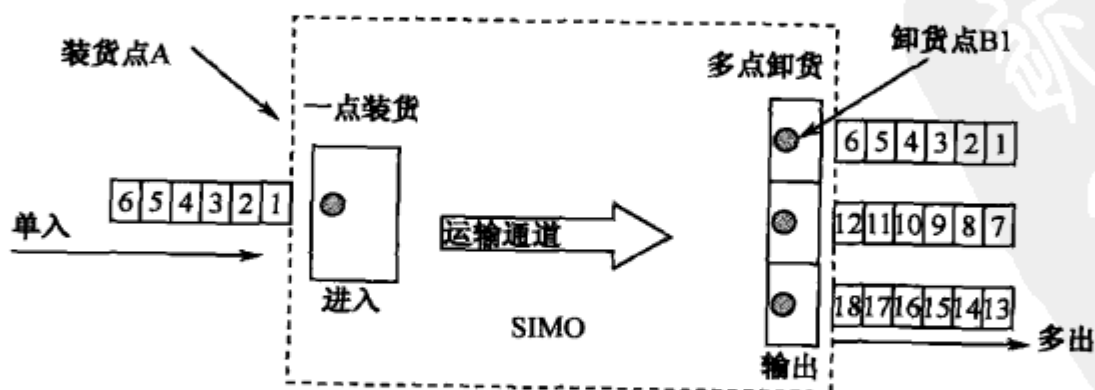


图 7-3 一点装货和多点卸货运输系统

接班人奥先生敏锐地认识到，未来的物流需求会很大，需要建立多装点、多卸

点的物流体系。想把仓库 A 快速清空, 仓库 B 快速布置好, 要求货物运送的进度加快, 就需要在仓库 A 处和 B 处同时增加人力, 同时增加装货点和卸货点, 也就是几个车皮并行装货、并行卸货 (见图 7-4)。



图 7-4 多点装货和多点卸货运输举例

这样一个多点装货、多点卸货的运输系统可以称为多入多出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统。其运输模型如图 7-5 所示。

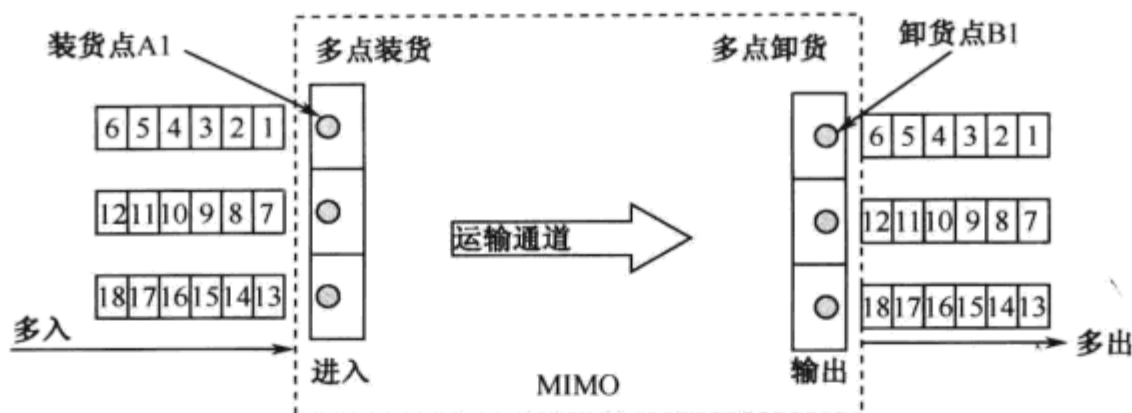


图 7-5 多点装货和多点卸货运输系统

接班人奥先生给大家描绘新物流体系的愿景: “物流没有最快, 只有更快。精卫无穷填海心! 大家一定要让我们的国家运转快起来!”

大家又一次受到了鼓舞。

7.1 MIMO 基本原理

在无线通信系统里, 在发货端装载的货物是数据信息, 在接收端接收的货物也是数据信息, 中间的运输通道就是无线信道。装货点就是发射天线, 卸货点就是接收天线。发射天线、无线通道、接收天线组成了数据信息发送、运输和接收的系统。进入这个系

统的信息就是要发送的信息，从这个系统发送出去的信息就是要接收下来的信息。

无线系统的多个发射天线和多个接收天线也可以组成一个多入多出（MIMO）系统，成为一个高效的信息运输系统。

最早的多天线技术是一种接收分集的技术。

多条接收通道同时处于深度衰落的可能性比单天线通道处于深度衰落的可能性小很多。所以，接收分集可以提高无线传输的可靠性。基站侧布置多个接收天线，实现上行接收分集较为容易；但是，在终端侧部署多个天线，提高了手机的复杂度和实现成本，实现起来比较困难。

能不能在基站侧实现发射分集（多个天线发射相同的数据流）来提高下行无线传输的可靠性呢？人们尝试这样的做法，但发现多天线发送相同的数据流，它们是相互干扰的，甚至会相互抵消，起不到发送分集的作用。要想实现发送分集，必须解决发送天线之间无线链路的正交性问题。

多天线正交性的问题最终被攻克，于是 MIMO 技术成熟了。

7.1.1 数学模型

由于数据流看不见、摸不着，因而用数学公式表示发射数据流和接收数据流的关系比较难理解。如果我们把数据流想象成要从仓库 A 搬运到仓库 B 的货物，它们的数量关系就好理解了，如图 7-6 所示。

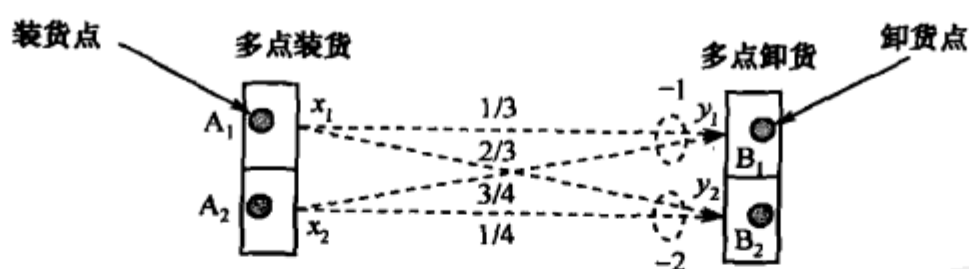


图 7-6 装货和卸货数量关系

装货点 A1 有 $1/3$ 的货物到了卸货点 B1，有 $2/3$ 的货物到了卸货点 B2；装货点 A2 有 $3/4$ 的货物到了卸货点 B1，有 $1/4$ 的货物到了卸货点 B2。在卸货点 B1，会有 1 个货物的损失；在卸货点 B2，有两个货物的损失。于是装货点的货物数量 x_1 、 x_2 和卸货点数量 y_1 、 y_2 的数量关系如下：

$$y_1 = \frac{1}{3}x_1 + \frac{3}{4}x_2 - 1$$

$$y_2 = \frac{2}{3}x_1 + \frac{1}{4}x_2 - 2$$

可以用矩阵关系表示上述数量关系：

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 3/4 \\ 2/3 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ -2 \end{bmatrix}$$

这个矩阵可以称为货物运输系统的数量关系模型。借鉴类似的思路，可以给 MIMO 系统建立数学模型。

MIMO 技术最早是由马可尼 (Marconi) 于 20 世纪初提出的抑制信道衰落的多天线信息传送技术。MIMO 技术利用了空间维度资源，发射端和接收端分别设置多个天线。如果说，MIMO 系统是一个信息运输系统，那么发射端相当于运输系统的数据装载点，接收端相当于运输系统的数据卸载点，如图 7-7 所示。

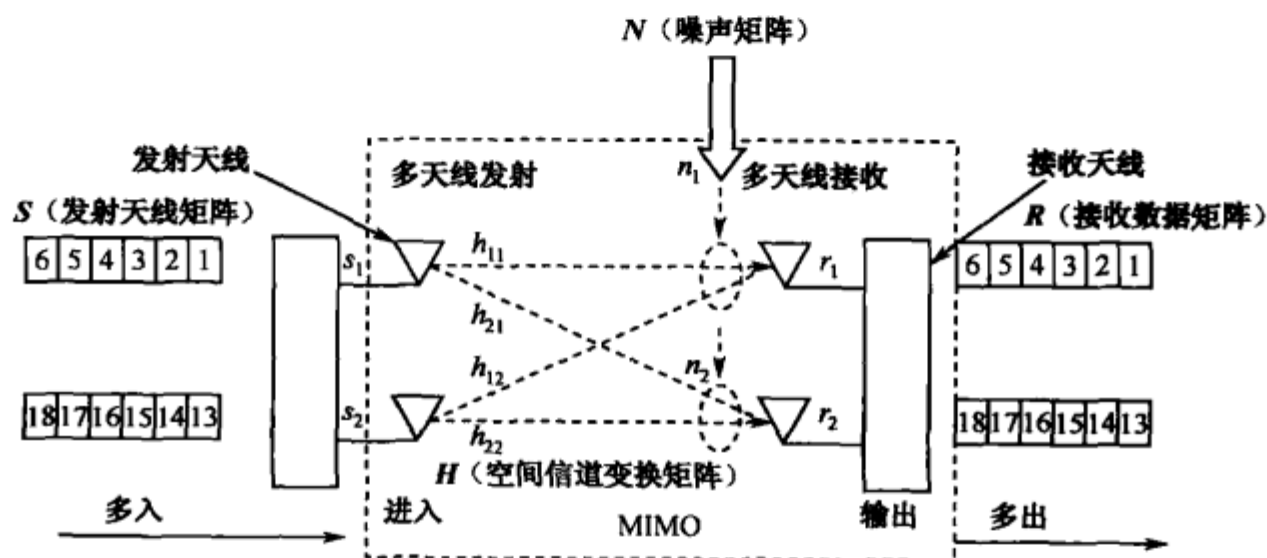


图 7-7 MIMO 系统

在发射端有两个天线，每个天线发射的数据流分别为 s_1 、 s_2 ，经过无线信道后到达接收端，接收端也有两个天线，每个天线接收到的数据流分别为 r_1 、 r_2 。任何一个天线接收到的数据流，都是两个天线的发射数据流经过空间无线信道传播后，在接收端叠加的结果，当然还要考虑白噪声 n_1 、 n_2 对系统的影响。于是有下式：

$$r_1 = h_{11}s_1 + h_{12}s_2 + n_1 \quad (7-1)$$

$$r_2 = h_{21}s_1 + h_{22}s_2 + n_2 \quad (7-2)$$

其中：

h_{11} 为从发射数据流 s_1 到接收端 r_1 无线信道的影响因子；

h_{12} 为从发射数据流 s_2 到接收端 r_1 无线信道的影响因子；

h_{21} 为从发射数据流 s_1 到接收端 r_2 无线信道的影响因子；

h_{22} 为从发射数据流 s_2 到接收端 r_2 无线信道的影响因子。

学过线性代数的人都知道：矩阵是一种有效的运算工具，它可以非常方便地表达很多数学关系。在 MIMO 技术的协议中，普遍地使用矩阵来表示各种映射和运算关系。上面 s_1 、 s_2 和 r_1 、 r_2 的关系可以用如下矩阵形式来表示：

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

定义 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$ 为发射数据流向量， $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix}$ 为接收数据流向量， $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$ 为噪声影响

向量（均值为零，方差为 1 的加性高斯噪声向量）， $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ 为空间信道变换矩阵。

于是接收数据流和发射数据流的关系为

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (7-4)$$

MIMO 是一种多天线技术，设 M_r 为接收天线数目， M_t 为发射天线数目，则天线配置可以表示为：接收天线数 \times 发射天线数，即 $M_r \times M_t$ 。

目前，常见的天线配置有 1×2 （1 个接收天线，2 个发射天线，以此类推）、 2×2 、 2×4 、 4×4 ，等等。

空间信道转换矩阵 \mathbf{H} 也是 $M_r \times M_t$ 维矩阵。不同的无线环境和不同的天线配置条件下，转换矩阵 \mathbf{H} 中的各组成元素就会不一样，于是信道模型就不一样了。信道模型变化了，相应地，信道容量也会有所变化。

MIMO 系统是在发射端和接收端同时采用多天线的技术。但是从广义上说，SISO（单进单出）、SIMO（单进多出）、MISO（多进单出）也是 MIMO 的一种特例，如图 7-8 所示。但狭义地讲，只有多个信号流在空中并行发送，多个接收端同时接收的系统才是 MIMO 系统。

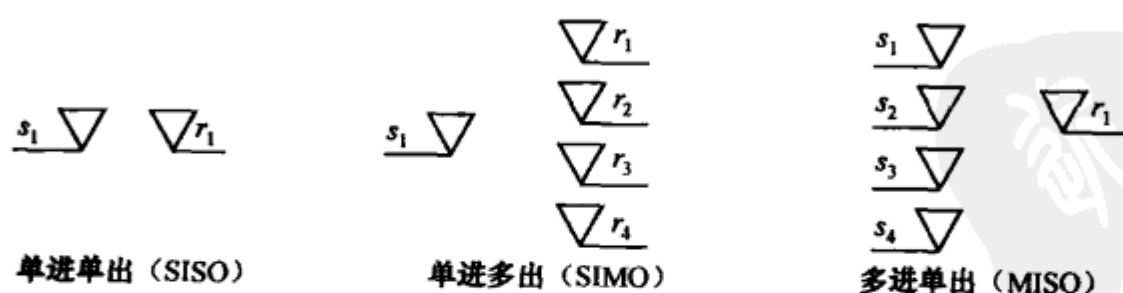


图 7-8 SISO、SIMO、MISO 天线系统

MIMO 模型常用的数学符号说明如下。

在 MIMO 系统的介绍中，使用了很多线性代数的知识，读者在大学时都学过。矩阵是一种很好的数学工具，不但能直观地描述多路数据的映射关系和转换关系，而且能够描述数据之间是彼此独立（正交）的，还是彼此相关（非满秩）的。这里简单回顾一下：

$\det()$ 表示对矩阵取行列式的值；

I_M 表示 M 阶单位矩阵；

H 为 $M_r \times M_t$ 阶的信道矩阵；

$\text{Rank}(A)$ ：矩阵 A 的秩。矩阵中互不相关、彼此独立的向量个数称为矩阵的秩。可逆矩阵称为满秩矩阵，即 $\det(A) \neq 0$ ；不满秩矩阵就是奇异矩阵，即 $\det(A)=0$ 。

共轭复数：两个实部相等且虚部互为相反数的复数。复数 z 的共轭复数记做 z^* ，即 $z=a+bi(a, b \in \mathbb{R})$ ，则 $z^*=a-bi(a, b \in \mathbb{R})$ 。共轭复数所对应的点关于实轴对称。

共轭矩阵：每一个第 i 行第 j 列的元素都与第 j 行第 i 列的元素的共轭相等。

酉矩阵：方阵 A 的共轭转置与 A 相乘等于单位阵，则 A 为酉矩阵。酉矩阵的逆矩阵与其共轭转置矩阵相等。酉矩阵的充分必要条件是，它的 n 个列向量是两两正交的单位向量。酉矩阵一定是满秩矩阵，其 $|\det(A)|=1$ 。

7.1.2 极限容量

任何道路的车辆吞吐能力都是有限的。道路档次的不同，车速的大小，同时所能通过的车量的多少都是受限的。无线通信系统的信道如同高速公路，上面传送的数据信息如同高速公路上运行的车辆。信息高速公路的承载能力也是有极限的。

早在 1948 年，香农给出了具有一个发射天线、一个接收天线的单入单出（SISO）无线信道的极限容量公式：

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (7-5)$$

其中， B 代表信道带宽， S/N 代表接收端的信噪比。

由香农公式可以得出：提高信噪比、增加带宽可以增加无线信道的容量。

在理论上，只要增加某个用户的发射功率 P ，就可以提高接收端的信号强度 S ，在噪声 N 不变的情况下，可以增加信噪比 S/N ，从而增加信道的容量。

但遗憾的是：发射功率不可能无限地提高，它不但受限于发射端的功放技术、无线电管委会的无线设备最大发射功率的规定，而且还受限于用户发射功率的增加导致的对其他用户干扰的增加。因此无线信道的 S/N 不可能通过增加发射功率无限地增加，于是信道容量也不可能无限地增加。

带宽的增加也会增加信道的容量，如同拓宽马路有助于提高车辆的通行数量和通行速度一样。但是无线制式的带宽不能无限地增加，拓展马路会增加成本，增加带宽也会增加无线制式的实现成本。

在一定的带宽条件下，单天线发射、单天线接收的情况下，无论什么样的编码和调制方式，都不能使系统容量超过香农公式的容量极限。现代无线制式广泛使用的 Turbo

编码以及 LDPC (Low Density Parity Check, 低密度奇偶校验) 编码, 使信道容量基本上逼近了香农的信道容量极限。

多天线条件下, 信道的极限容量会有什么变化呢? 换句话说, 信道的极限随着发射天线、接收天线数目的变化如何变化呢?

发射天线为 1, 接收天线为 2 的单进多出 (SIMO) 天线系统如图 7-9 所示。从发射天线到接收天线 1 的衰减系数为 h_1 , 从发射天线到接收天线 2 的衰减系数为 h_2 , n_1 、 n_2 分别是两个接收天线处的白噪声; 发射端发出的信号为 s , 在接收端接收到的信号强度分别为 r_1 、 r_2 , 可以表示为下式:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} s + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (7-6)$$

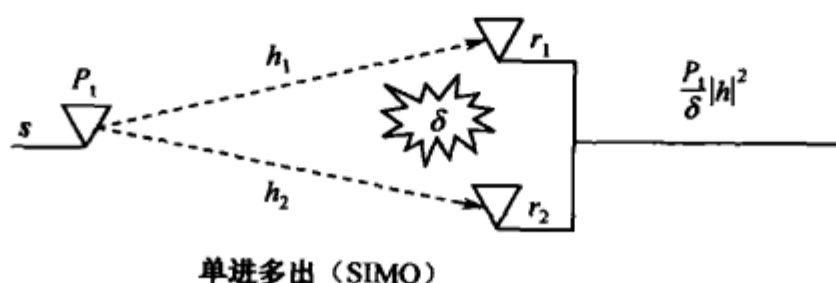


图 7-9 单进多出的天线系统

当发射天线的发射功率为 P_t 时, n_1 、 n_2 的幅度都服从方差为 δ 的高斯分布, h_1 、 h_2 的包络服从相同的瑞利分布 h ; 当接收端 r_1 和 r_2 进行最大比合并时, 合并后信噪比为 $\frac{P_t}{\delta}(|h_1|^2 + |h_2|^2) = \frac{2P_t}{\delta}|h|^2$ (r_1 和 r_2 的合并运算用到了概率统计和向量合并的相关知识, 比较复杂, 这里只需记住结论, 过程就不推导了)。

于是在发射天线为 1, 接收天线为 2 的无线系统的信道容量为

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_t}{\delta} (|h_1|^2 + |h_2|^2) \right) = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{2P_t}{\delta} |h|^2 \right)$$

这里需要说明的是, $\frac{2P_t}{\delta}|h|^2$ 实际上就是接收端的信噪比 $\frac{S}{N}$ 。只不过前者表达形式是从发射端功率 P_t , 在考虑空间信道衰减后的接收电平, 而后者就是接收端电平和噪声之比。

当接收天线增多至 M_r 时, 信道容量为

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{M_r P_t}{\delta} |h|^2 \right)$$

同理可知, 发射天线为 M_t , 接收天线为 1 的多进单出 (MISO) 天线系统如图 7-10 所示。信道容量可由下式表示:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{M_t P_t}{\delta} |h|^2 \right)$$

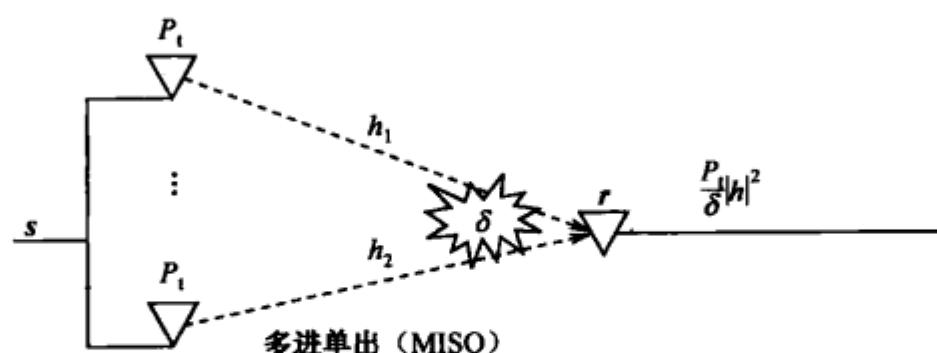


图 7-10 多进单出天线系统

从 SIMO 信道容量的公式可以看出，信道容量随着接收天线数量 M_r 的增加而增加，二者为对数关系；从 MISO 信道容量的公式可以看出，信道容量随着发射天线数量 M_t 的增加而增加，二者也为对数关系。

也就是说，发射分集和接收分集技术可以改善接收端的信噪比，从而提高信道容量和频谱效率。但对信道容量的提高是有限的，仅为对数关系。

如果在发送端和接收端都采用多天线，则成为一个多入多出 MIMO 系统。接收天线数目为 M_r 、发射天线数目为 M_t 的 MIMO 系统可以等效为多个 SIMO 系统，也可以等效为多个 MISO 系统。MIMO 系统相当于又并行又交叉的多个信道同时传送数据，如同甲、乙两地修了多条高速公路，高速公路之间还有辅路相连，如图 7-11 所示。

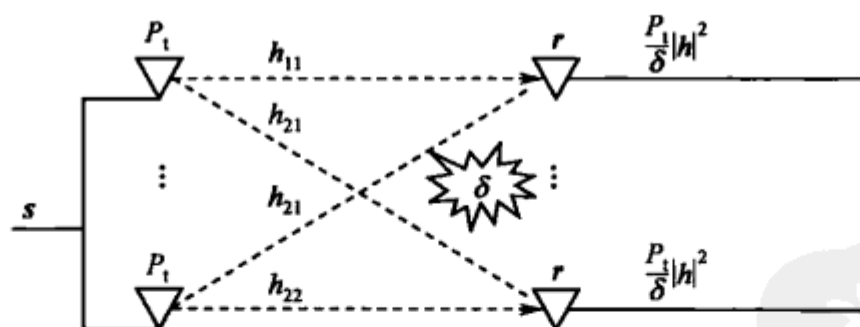


图 7-11 多进多出系统 (MIMO)

贝尔实验室给出了 MIMO 系统的信道极限容量公式。在信道转换矩阵 H 为正交矩阵的时候，也就是说，在天线之间相互独立、互不相关的情况下，MIMO 系统的信道容量公式如下：

$$C = \min(M_r, M_t) B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_t}{\delta} \lambda \right) \quad (7-7)$$

其中， λ 为空间信道转换矩阵 HH^H 的特征根。

MIMO 系统容量会随着发射端或接收端天线数中较小一方 $\min(M_t, M_r)$ 的增加而线性增加（不是对数增加，二者的关系曲线不弯曲）。如同通过一段路的交通流速度受限于进出口通道中最窄的路段，交通流速度随着最窄路段宽度的增加而增加。这里要求天线之间要相互独立，也就是说，从发射天线到接收天线的所有路径的无线衰落特性相互独立，互不相关。如果无线环境复杂，无线电波有充分的散射、反射，信号到达天线阵列的角度扩散尽可能大，则天线阵列之间的衰落特性就比较独立。如果天线之间不满足相互独立的要求，则 MIMO 系统的信道容量会降低。

举例来说，从 MIMO 系统的极限容量公式可以看出， 2×2 天线配置的 MIMO 系统和 2×4 天线配置的 MIMO 系统的极限容量是接近的。因为二者的最小天线数目是一样的，都是 2。但是发射天线数目翻倍，也并不是没有一点作用。发射天线数目翻倍，起到了分集的作用，改善了信道条件，提高了接收端的信噪比。对于 2×4 和 2×2 的天线配置方式，极限容量虽然一样，但是 2×4 的天线配置方式，下行的平均容量会提高。

目前的无线制式，无论是从 IEEE 而来的 WLAN、WiMAX，还是从 3GPP 而来的 HSPA+、LTE，为了提高空中接口的吞吐率，不约而同地选择了 MIMO 技术；而且随着芯片技术的发展，天线的配置数目将会越来越多。

7.1.3 多天线技术增益

所谓“增益”，就是增加的好处；有时候，减少了损失也是增加的好处。

LTE 采用多天线技术，会给系统的性能带来哪些好处呢？不外乎增加系统覆盖、提高系统容量、提高用户峰值速率、增加链路质量（可靠性）。这些好处是由下面各种类型的增益带来的。

首先是阵列增益。在单天线发射功率不变的情况下，增加天线个数，可以使接收端通过多路信号的相干合并，获得平均信噪比（SNR）的增加。阵列增益是和天线个数（ M ）的对数 $\lg(M)$ 强相关的，阵列增益可以改善系统的覆盖。

再次是功率增益。在覆盖范围保持不变的情况下，通过增加天线数目，可以降低单天线口的发射功率。减少天线口发射功率，可以降低对设备功放线性范围的要求，从而降低系统实现的成本。如果单天线发射功率不变，采用多个天线发射，相当于总的发射功率增加，从而增加覆盖范围。

还有分集增益。同一路信号经过不同路径到达接收端，可以有效地对抗多径衰落，从而减少接收端信噪比（SNR）的波动。独立衰落的分支数目越大，接收端的信噪比波动越小，分集增益越大。分集增益，可以改善系统的覆盖，增加链路的可靠性。

空间复用增益。在相同发射功率、相同带宽前提下，多个相互独立的天线并行地发送多路数据流，可以提高极限容量和改善峰值速率。从 MIMO 系统的极限容量公式可以

看出，在天线之间互不相关的前提下，MIMO 信道的容量可随着接收天线和发射天线二者的最小数目线性增长。这个容量的增长就是空间复用增益。

干扰抑制增益。在多天线收发系统中，空间存在的干扰有一定的统计规律性。利用信道估计的技术，通过选取不同的天线映射算法，选择合适的干扰抑制算法，可以降低接收端的干扰，提高信噪比。干扰抑制可以改善系统覆盖，提高系统容量，增加链路可靠性，但是对峰值速率没有贡献。

多天线技术的各种增益对系统性能都会有较明显的改善。增益和系统性能改善的关系如表 7-1 所示（表中打“√”部分为性能改善）。

表 7-1 多天线技术增益和系统性能改善的关系

	改善系统覆盖	提高链路可靠性	提高系统容量	提高用户峰值速率
阵列增益	√			
功率增益	√			
分集增益	√	√		
空间复用增益			√	√
干扰抑制增益	√	√	√	

7.2 MIMO 的工作模式

MIMO 系统的多个输入和多个输出实际上就是多个信号流在空中的并行传输。

想象一下，在繁忙的码头同时给几艘船装货，然后同时出发，在目的地又同时给多艘船卸货的情景。

多个数据流在发射端并行地被装载在多个空中飞船中，在接收端又被并行地卸载下来。也就是说，在发射端，输入的数据流变成几路并行的符号流，分别从 M_t 个天线同时发射出去；在接收端，从 M_r 个接收天线将信号接收下来，使用与发射端相逆的处理过程恢复出原始信息，如图 7-12 所示。

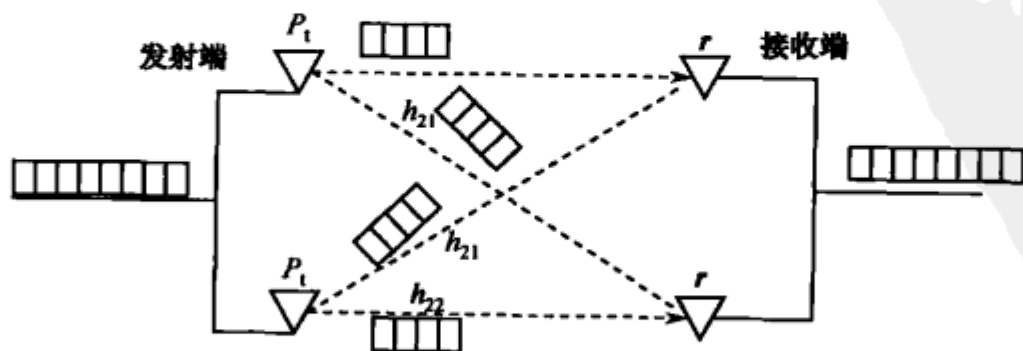


图 7-12 MIMO 系统多个数据流并行传输

多个信号流可以是不同的数据流，也可以是同一个数据流的不同版本。

不同的数据流就是不同的信息。不同的信息同时发射，意味着信息传送效率的提升，也就是提高了无线通信的效率。

同一个数据流的不同版本，就好比同样的信息，不同的表达方式，并行发射出去，如同一句话换着不同的方式说，不辞辛苦、不怕啰唆，何必呢？原来它想确保接收端听得清，记得对，不要产生“疑似”信息，提高信息传送的可靠性。

为了提高信息传送效率的工作模式，就是 MIMO 的复用模式；为了提高信息传送可靠性的工作模式，就是 MIMO 的分集模式。

7.2.1 空分复用模式

空分复用（Space Multiplexing, SM）的思想是把 1 个高速的数据流分割为几个速率较低的数据流，分别在不同的天线进行编码、调制，然后发送。天线之间相互独立，一个天线相当于一个独立的信道。接收机利用空间均衡器分离接收信号，然后解调、解码，将几个数据流合并，恢复出原始信号，如图 7-13 所示。

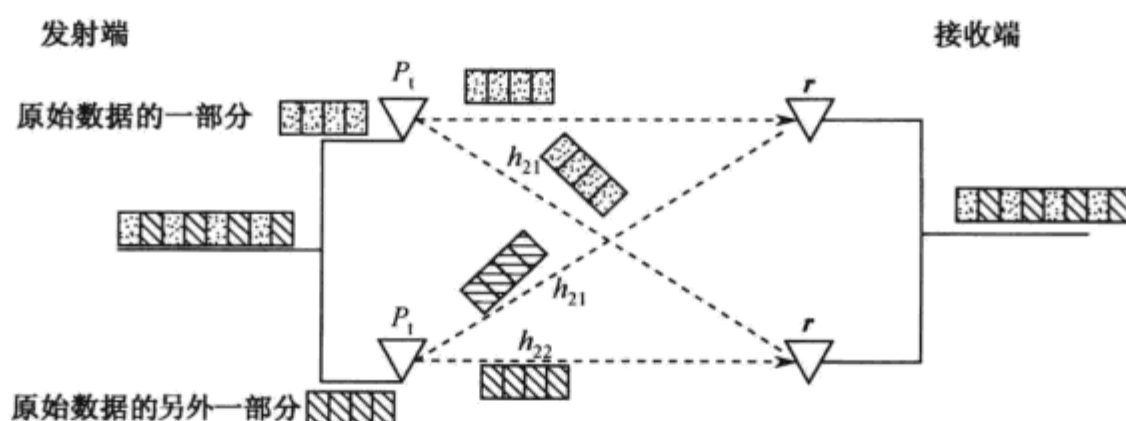


图 7-13 空分复用的思想

一路数据如何变成多路数据呢？

贝尔实验室提出了时空转移大法：空时编码（Space Time Coding, STC）技术，即 BLAST（Bell Labs Layered Space-Time）技术。

这一路数据就像待转运的货物，为了快速（复用）地运出去，可以把它安排在不同的地点（空间），也可以变换交货的时间。“不同的天线”就是空时编码中“空间”的概念；“不同的 OFDM 符号周期”就是空时编码中“时间”的概念。空时编码的最小单位是 TB 块（Transport Block, 传输块），TB 块是一个子帧内含有的编码前比特数，由很多个 RB 组成，时间长度是一个 TTI：1 ms。

空分复用（SM）常用的空时编码技术有两种：预编码（Precoding）、PARC（Per Antenna Rate Control，每天线速率控制）。

预编码技术把原始数据流两个符号分为一组进行变换，如某一组为“ s_1 、 s_2 ”，转换成并行数据流“ z_1 、 z_2 ”，然后分别由不同的天线发出去，如图 7-14 所示。二者的关系如下式所示：

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (7-8)$$

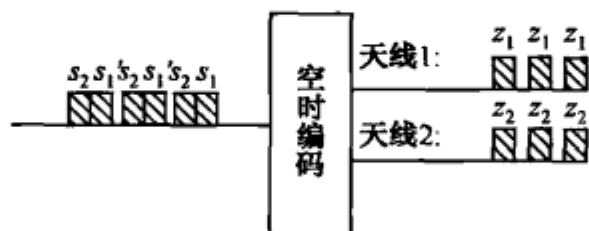


图 7-14 空时复用的预编码技术

其中， $\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix}$ 就是预编码矩阵，它就是负责把数据流转换到天线端口的数学变换公式。

注意：这个变化是符号向量在复平面上的变换，也就是说，包括向量幅值和角度的变换，如图 7-15 所示（补充一下数学知识：两个实部相等，虚部互为相反数的复数互为共轭复数，复数 s 的共轭复数记做 s^* ）。

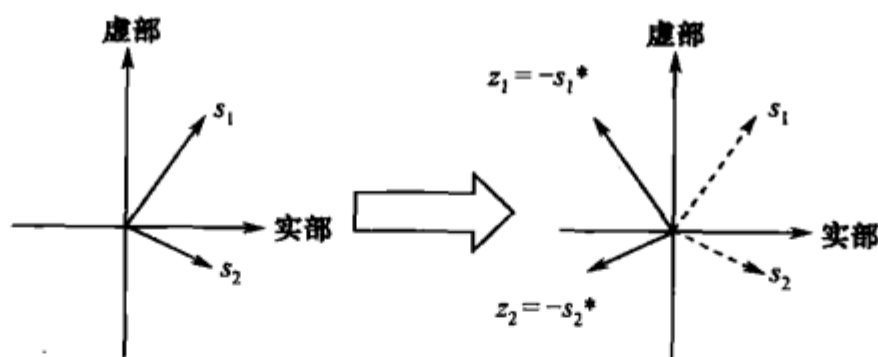


图 7-15 预编码技术数学变换示例

PARC 是不进行符号变换的，直接根据每个天线的信道条件调节其信息发送速度。天线信道条件好的，速率快一些；反之，速率慢一些，如图 7-16 所示。速率控制本身也是一种空时编码，只不过一路天线速度快一些，另一路慢一些而已。在天线口，PARC 的空时编码所做的工作就是直接把速率调节好的两列数据搬在天线口发射，可不作变换。所以空时编码矩阵为

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$$

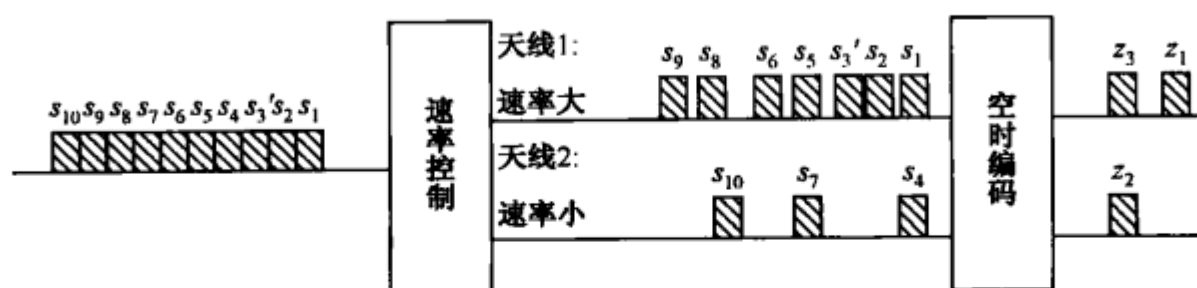


图 7-16 PARC 原理示例

7.2.2 空间分集模式

空间分集（Space Diversity, SD）的思想是制作同一个数据流的不同版本，分别在不同的天线进行编码、调制，然后发送，如图 7-17 所示。这个数据流可以是原来要发送的数据流，也可以是原始数据流经过一定的数学变换后形成的新数据流。同一个东西、不同的面貌。接收机利用空间均衡器分离接收信号，然后解调、解码，将同一数据流的不同接收信号合并，恢复出原始信号。空间分集可以起到可靠传送数据的作用。

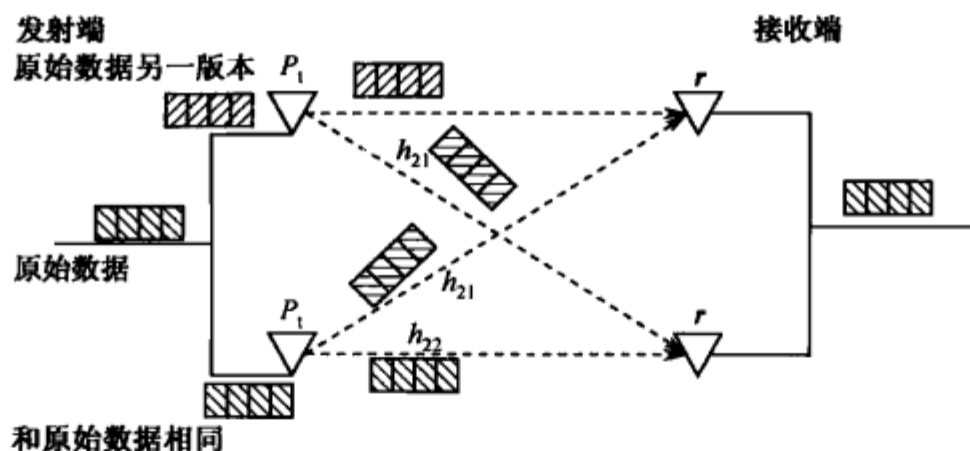


图 7-17 空间分集的思想

不管是复用技术，还是分集技术，都涉及把一路数据变成多路数据的技术，即都涉及空时编码的技术。

空间分集（SD）常用的技术有 STBC（Space Time Block Code，空时块编码）、SFBC（Space Frequency Block Code，空频块编码）、TSTD/FSTD（Time /Frequency Switch Transmit Diversity，时间/频率转换传送分集）、CDD（Cycle Delay Diversity，循环延时分集）。

STBC 的主要思想是在空间和时间两个维度上安排数据流的不同版本，可以有空间分集和时间分集的效果，从而降低信道误码率，提高信道可靠性。如图 7-18 所示，在天线 1 上，两个符号“ s_1 、 s_2 ”分别放在 1 个子帧两个时隙的第一个 OFDM 符号周期上；在天线 2 上，这两个符号调换一下时隙位置，把它们的另一个版本“ $-s_2^*$ 、 s_1^* ”分别放在这个子帧的两个时隙上。

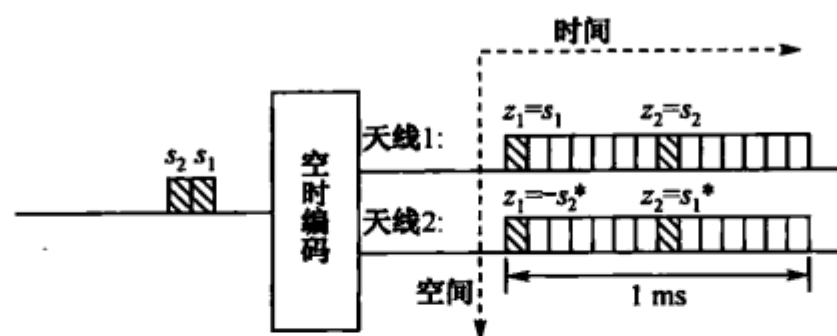


图 7-18 STBC 技术原理示意

STBC 技术的矩阵表示形式如图 7-19 所示。

SFBC 的主要思想是在空间和频率两个维度上安排数据流的不同版本，可以有空间分集和频率分集的效果。如图 7-20 所示，在天线 1 上，两个符号“ s_1 、 s_2 ”分别安排在两个相邻的子载波上；在天线 2 上，这两个符号调换一下子载波的位置，把它们的另一个版本“ $-s_2^*$ 、 s_1^* ”分别放在这两个子载波上。

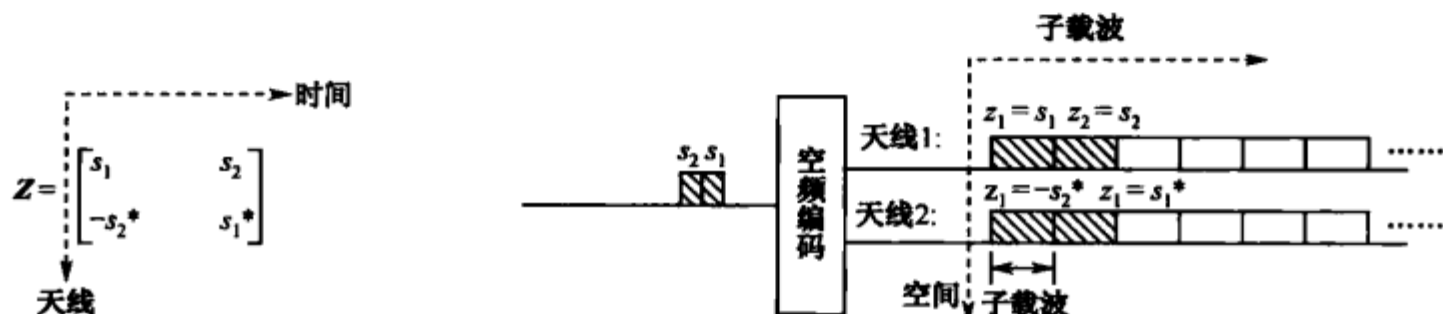


图 7-19 STBC 矩阵表示形式

图 7-20 SFBC 技术原理示意

SFBC 技术的矩阵表示形式如图 7-21 所示。

TSTD 也是在空间和时间两个维度上安排数据流的不同部分的，可以有空间分集和时间分集的效果，如图 7-22 所示。在天线 1 和天线 2 的时隙位置上，交叉安排符号流“ s_1 、 s_2 ”。符号排着队等待发射，在第一个符号周期，这个符号放在天线 1 上发射；在下一个符号周期，下一个符号则放在天线 2 上发射，依次类推。

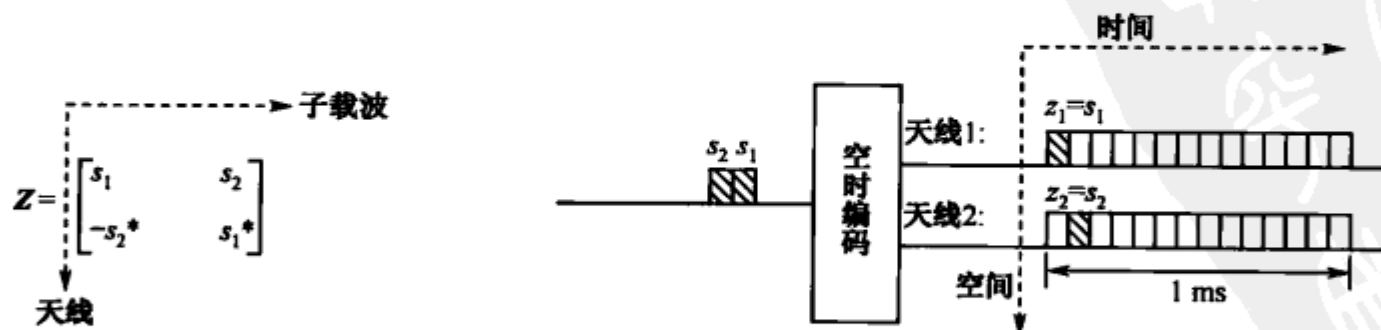


图 7-21 SFBC 矩阵表示形式

图 7-22 TSTD 技术原理示意

TSTD/FSTD 技术的矩阵表示形式如图 7-23 所示。

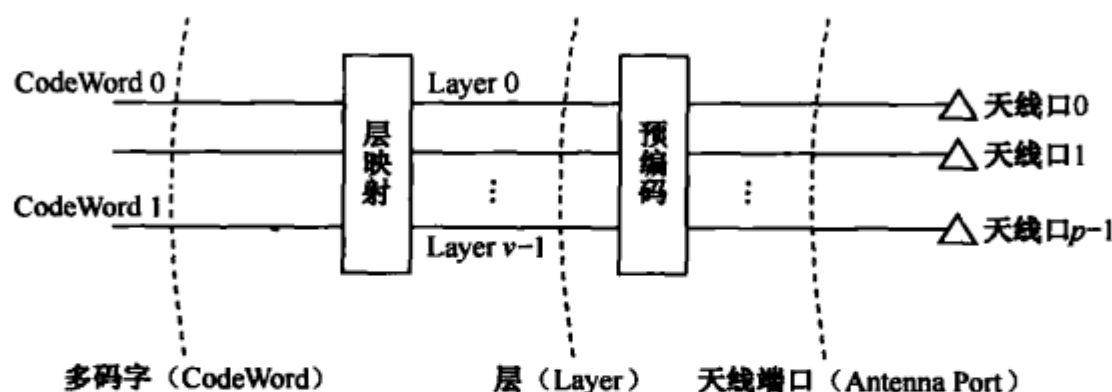


图 7-23 TSTD/FSTD 矩阵表示形式

CDD 也是在空间和时间两个维度上安排数据流的，可以有空间分集和时间分集的效果。如图 7-24 所示，在天线 1 上依次发送数据流的各个符号，延迟一段时间后，在天线 2 上再开始依次发送这个数据流。

CDD 技术的矩阵表示形式如图 7-25 所示。

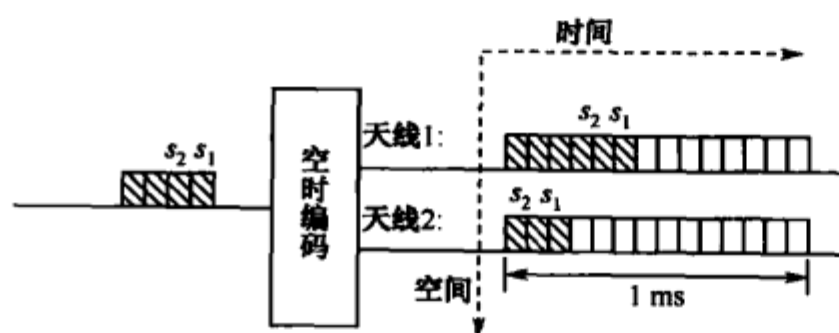


图 7-24 CDD 技术原理示意

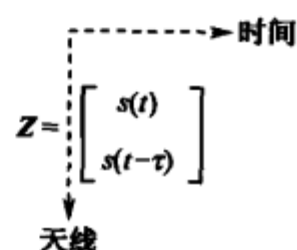


图 7-25 CDD 矩阵表示形式

7.2.3 多天线工作模式对比

多天线技术主要是指以下四种：空间复用、空间分集、空分多址（Space Dividing Multiple Address, SDMA）、波束赋型（Beamforming），如同多天线技术的四大门派的武功。下面比较一下这四种不同的多天线技术。

空间分集是利用天线之间的不相关性来实现的，这个不相关性要求天线间距在 10 个电磁波波长 λ 以上。空间分集可以是多个天线发射、一个天线接收（即发射分集，属于 MISO 方式），也可以是一个天线发射、多个天线接收（接收分集，属于 SIMO 方式），当然也可以是多个天线发射、多个天线接收（发射分集+接收分集，属于 MIMO 方式）。分集的目的不是提高链路容量，而是提高链路质量。

空间复用也是利用天线之间的不相关性来实现的。空间复用一般需要多个发射天线、多个接收天线，它是一种 MIMO 方式，也可以是智能天线方式。在复用时，并行发射和接收多个数据流，目的是提高链路的容量（峰值速率），而不是提高链路的质量。

天线之间彼此独立而且链路质量较好的情况，有助于提升复用的效率，可以使用复用度较高的数据传输方式；在天线相关性较高和链路质量较差的时候，复用度不能太高，需要降低复用数据流的数目，甚至不复用，只发送单个数据流。或者，将工作模式转换成空间分集和波束赋型。

空间多址是利用相同的时隙、相同的子载波，但不同的天线传送多个终端用户的数据。不同用户的数据如果要彼此相互区别，就要求天线之间具有不相关性。空间多址的主要目的是通过空间上区别用户，在链路上容纳更多的用户，提高用户的容量。

波束赋型利用电磁波之间的相干特性，将电磁波的能量（波束）集中于某个特定的方向上。如同多个武林高手将各自功力集中于一点上，对付共同的目标（见图 7-26）。波束赋型是利用天线阵元之间的相关性来实现的，不同于上述复用、分集、多址的方式。空间分集、复用、多址都是利用天线之间的不相关特性。因此，波束赋型要求天线之间的距离小一些，通常在 $\lambda/2$ 左右。



图 7-26 武林高手的波束赋型

波束赋型的主要目的是增强覆盖和抑制干扰。通过波束赋型，使波束主瓣对准有用信号的方向，增强了有效覆盖范围；同时使波束的零深对准干扰方向，抑制了干扰。

使用波束赋型的多天线系统，就是传统的智能天线（Smart Antenna, SA）技术，也叫 AAS（Adaptive Antenna System，自适应天线系统）。TD-SCDMA 系统的关键技术就是智能天线。在未来的无线制式中，智能天线的概念正在逐步弱化，MIMO 系统则被认为是实现频谱效率提升的优选技术。

MIMO 是一种多天线技术，我们熟悉的 TD-SCDMA 上的智能天线技术也是一种多天线技术。前面介绍 MIMO 技术的两种主要的工作模式是复用和分集，其实 MIMO

也可以有波束赋型和空分多址的使用方法。同样地,智能天线除了波束赋型的功能之外,也可以由空间复用和空分多址的使用方式。但是智能天线实现空间复用、空分多址的效果和用户位置分布有很大关系,当用户比较集中的时候,复用或多址的效果就比较差。而 MIMO 技术实现的空间复用和空分多址的效果和用户位置分布没有任何关系。

MIMO 技术要求利用天线之间的不相关性,而智能天线要利用天线之间的相关性。当天线之间存在较大的相关性的时候,MIMO 技术的空间复用、空分多址的效果就比较差;而在此条件下,智能天线的波束赋型效果却比较好。MIMO 技术利用天线之间相互独立性,可以有效地克服多径效应的影响,比较适合在密集城区或高新楼宇场景使用;而智能天线则利用的是天线之间的相关性,克服多径效应影响的能力有限,但对克服用户间的干扰有较好的效果。

多天线技术的比较如表 7-2 所示。

表 7-2 多天线技术对比

	空间分集	空间复用	空分多址	波束赋型
天线特征	天线之间不相关性、独立性			天线之间相关性、波束的相干特性
实现方式	MIMO 方式			智能天线方式 (AAS)
天线间距	10 λ			λ/2
原理	同一数据流的不同版本并行发送	多个数据流并行发送	不同用户的数据流共用相同的时频资源和不同的天线单元	波束主瓣方向对准有用信号, 波束零深对准干扰信号
功能目的	增加链路可靠性, 提高传输成功率	增加链路容量 (峰值吞吐率)	增加用户容量, 增加接入用户的数目	增加覆盖、抑制干扰
		可以提高系统总容量, 也可以提高单用户峰值速率		可以提高系统总容量, 不能提高单用户峰值速率
应用方式	接收分集 (多天线接收), 发射分集 (多天线发送)	天线相关性较高和链路质量较差的时候, 复用度不能太高, 需要降低复用数据流的数目。 天线相关性不大的时候, 复用效果与用户位置分布无关		支持有条件的空间复用和空间多址, 用户位置不同, 对复用和多址效果影响较大; 只有用户位置满足一定条件才能实现空间复用和空分多址

续表

	空间分集	空间复用	空分多址	波束赋型
应用场景	在多径效应明显的地方，如密集城区、高新区，使用效果较好			在农村和郊区使用效果较好；而在密集城区，算法比较复杂，对终端要求较高
技术实现难度	编码方式成熟，硬件要求不高，成本较低			算法复杂，硬件要求较高
终端实现	多天线终端实现较为困难			终端软件上需要增加相应的信道类型，无硬件上要求

7.2.4 MIMO 工作模式小结

MIMO 系统可以根据不同的系统条件、变化的无线环境，采用各种不同的工作模式。协议中定义了以下七种 MIMO 的工作模式：

模式 1：单天线工作模式

传统无线制式的天线工作模式。

模式 2：开环发射分集

利用复数共轭的数学方法，在多个天线上形成了彼此正交的空间信道，发送相同的数据流，提高传输可靠性。

模式 3：开环空间复用

在不同的天线上人为制造“多径效应”，一个天线正常发射，其他天线上引入相位偏移环节。多个天线的发射关系构成复矩阵，并行地发射不同的数据流。这个复矩阵在发射端随机选择，不依赖接收端的反馈结果，就是开环（Open Loop）空间复用。

模式 4：闭环空间复用

发射端在并行发射多个数据流的时候，根据反馈的信道估计的结果，选择制造“多径效应”的复矩阵，就是闭环（Close Loop）空间复用。

模式 5：MU-MIMO

并行传输的多个数据流是由多个 UE 组合实现的，就是多用户空间复用，即 MU-MIMO（Multi User MIMO）。

模式 6：Rank=1 的闭环发射分集

作为闭环空间复用的一个特例，只传输一个数据流，也就是说，空间信道的秩 Rank=1。这种工作模式起到的是提高传输可靠性的作用，实际上是一种发射分集的方式。

模式 7：波束赋型（Beamforming）

多个天线协同工作时，根据基站和 UE 的信道条件，实时计算不同的相位偏移方案，利用天线之间的相位干涉叠加原理，形成指向特定 UE 的波束。

7.3 MIMO 系统的实现

经济要发展，货物就得流动起来。尤其是对外贸易方面，如何快速提高进出口货物的运送效率，是各利益方都比较关切的问题。

当然了，多修建几个港口（多几个天线），可以增加出口货物的吞吐率（空中接口效率）。现在已经修建了 2 个港口，加上正在修建的港口，已有 4 个港口了，未来还有规划 8 个港口的方案。

现阶段的问题是货物有很多，货物的种类也有很多，如何把不同种类的货物送到港口（不同数据流到天线口的映射）？

如果要运送的是同一种打包方式的货物（编码方式相同），可以等量分到各个港口进行发送；但是如果货物类型有多种，又来自国内不同地方，一齐运到港口，就有些管理混乱，不便于货物有序发送和收取，还是提前进行规划比较好。

我们可以把货物运送到港口的过程分成三个步骤：

步骤一 打包方式的选择（类似传输块 TB 的形成）；

步骤二 根据货物的种类和去往的目的地进行初步的分类（类似层映射）；

步骤三 运输公司的选择（预编码矩阵的选择）。

运输公司确定好后，由运输公司选择港口，而发货方无须关心由哪个港口发送，如图 7-27 所示。

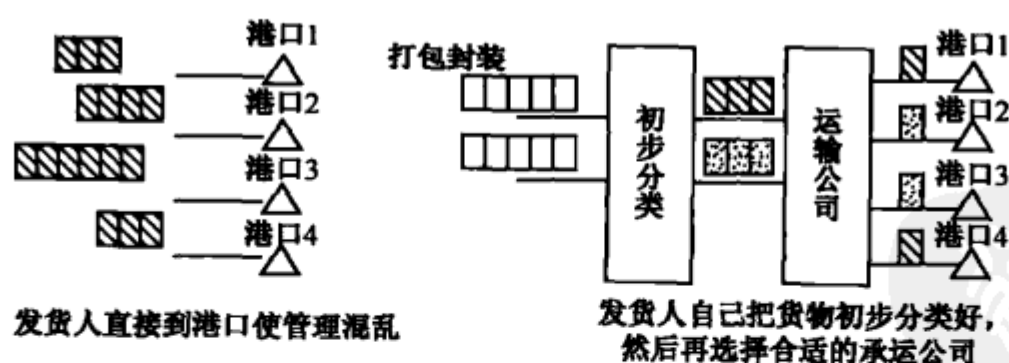


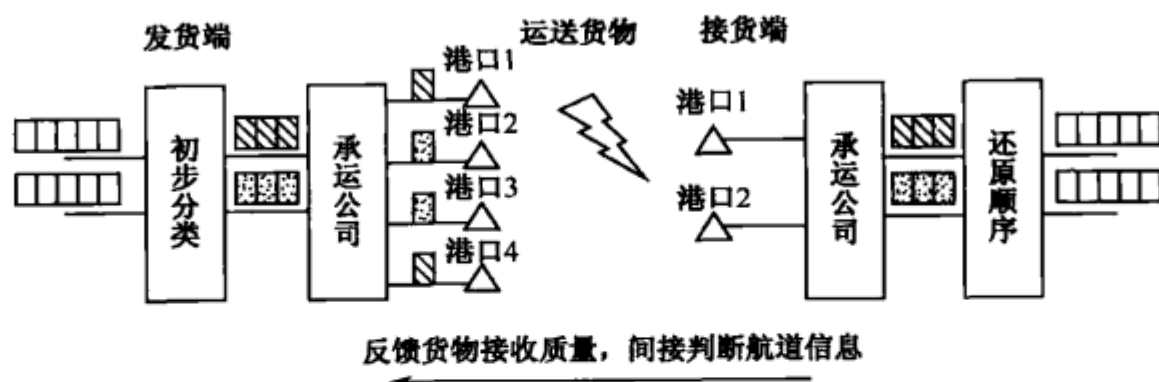
图 7-27 物流模式的秩序化

不同港口，对应着不同的运输公司和不同的航道。如何选择港口来发送货物呢？

有两种方式：开环方式和闭环方式。

开环方式就是根据自己对港口条件判断发货，无须等待接收货物方对发货质量的确认。

闭环方式则不然，如图 7-28 所示，要等待货物接收方对运送质量的反馈，来决定选择什么样的包装方式，什么样的运输公司。



7.3.1 信息处理过程

采花大盗痞子蔡要给自己心爱的女人芙蓉姐姐发送一个在洛阳拍摄的牡丹照片。从痞子蔡发送，由芙蓉姐姐接收，图片信息要经历哪些处理过程呢？

痞子蔡手机这一端就是发射端，经过高层对照片的处理，把照片变成了高速的比特流，这个过程就是信源编码的过程（见图 7-29）。

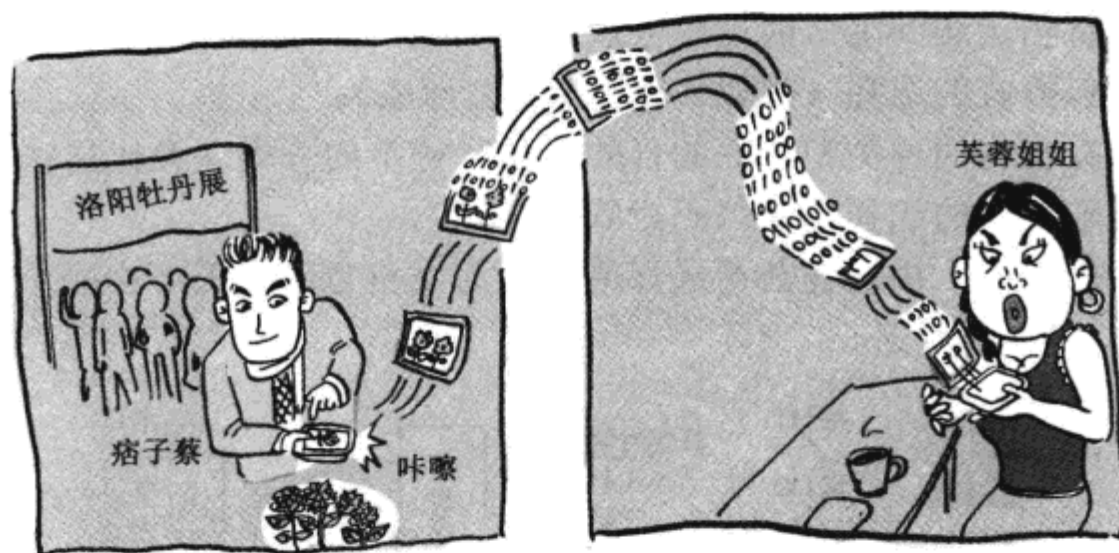


图 7-29 信息处理过程

这些高速的比特流要在 MAC 层按照一定方式进行打包封装, 形成传输块 (Transport Block, TB); TB 块就是 MAC 层传到物理层+(PHY)的货物。TB 是一个子帧内含有信道编码前的比特数据, 时间长度为 1 ms (一个 TTI)。一个 TB 块由很多个 RB 组成, 也就是说, TB 块有大有小, 取决于调度器 (Scheduler) 分配给某用户的资源数量、调制编码方式、天线映射模式, 等等。

一个牡丹照片变成的 TB 块被送到了物理层，开始了物理层之旅。LTE 的物理层之旅的全过程如图 7-30 所示。

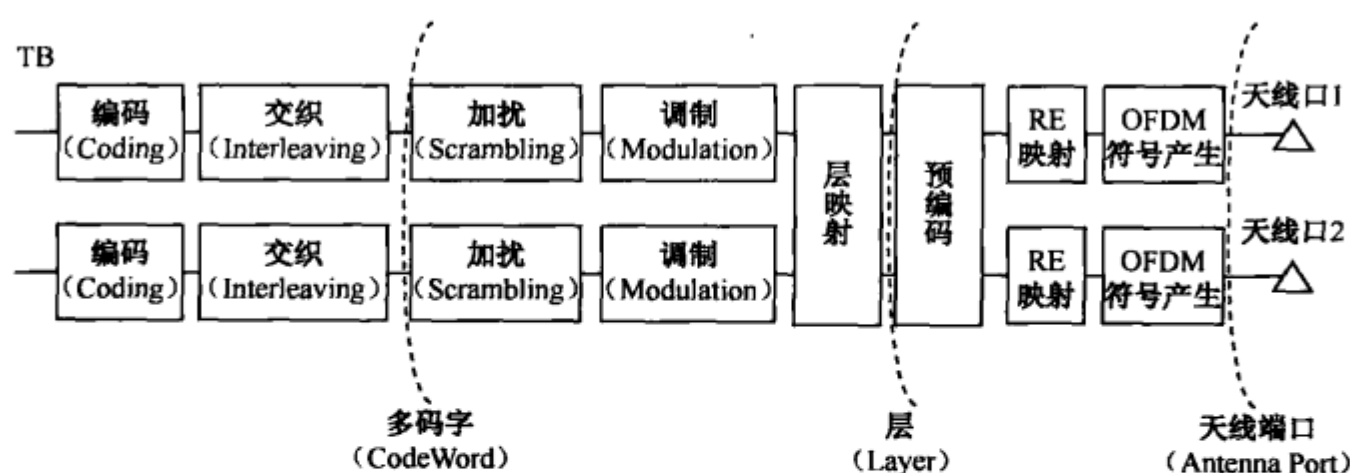


图 7-30 LTE 物理层信息处理过程

TB 块到了物理层，首先要进行信道编码。

信道编码的目的是使数据流具有纠错能力和抗干扰能力，提高了无线信道的免疫力，增加了信息传送的可靠性，使之能够应对无线环境的险恶变化，避免生病，可极大地避免码流传送中误码的发生。

信道编码是在源比特数据流中，按照一定规则，加入一些冗余比特，接收端可以用来判错或纠错。

目前常用的信道编码规则是 Turbo 编码。Turbo 编码接近了香农公式所揭示的信道极限容量。

但在大数据量的情况下，LDPC (Low Density Parity Check Code, 低密度奇偶校验码) 可获得比 Turbo 码更高的编码增益，同时还能降低接收端解码的复杂度，所以得到了很多公司的推崇。

信道编码的目的是增加无线通信的可靠性，但它增加了冗余比特，使有用的信息数据传输比例减少，增加了系统的开销。

接下来的过程是交织。交织的过程是打乱原来的比特流顺序。这样连续的深衰落对信息的影响实际是作用在打乱顺序的比特数据流上；在恢复原来的顺序后，这个影响就不是连续的，而变成离散的了，这样就可以方便地根据冗余比特恢复原始数据。

加扰是对编码后的数据逐比特地与扰码序列进行运算。扰码序列是一种 PN 序列 (Pseudo- Noise Sequence, 伪噪声序列)。PN 码可以将数据间的干扰随机化，可以对抗干扰；同时使用 PN 序列加扰，类似给数据上了一把锁，而这个 PN 序列就是钥匙。在接收端，有了这把钥匙，才能开启这把锁。也就是说，加扰起到了保密的作用，可以对抗窃听。

调制是将比特数据流映射到复平面上的过程，也叫做复数调制。QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 是幅度、相位联合调制的技术，它同时利用了载波的幅度和相位

来传递信息比特。

复平面这种数学工具非常适合用来表示这种既有幅值调制，又进行相位调制的变换关系。

如果说调制后的符号为 x ， x 可以用 I 和 Q 来表示，即 $x=I+jQ$ 。符号的 I 、 Q 分量，分别对应复平面的实部和虚部，也就是水平和垂直方向。

复数调制的输入是由 0,1 组成的比特流，输出是 I 和 Q 值。映射出来的 I 、 Q 分量，再采用幅度调制，分别调制在相互正交的两个载波（如 $\cos \omega t$ 和 $\sin \omega t$ ）上或相互正交的两个时隙上。

LTE 的复数调制有 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM。对比一下，在 3G 中的 HSDPA 中，最高阶的调制方式仅到 16QAM，而 LTE 中最高阶的调制方式可到 64QAM。

完成调制后，基带将进行 MIMO 相关的处理。将信道编码、调制后的比特数据流送到发送天线端口的过程有两个子过程：层映射和预编码。

数据流的数量和发送天线数量是不一致的，将数据流比特送到不同的发送天线、不同时隙、不同子载波上，是一个比较复杂的数学变换过程。这个过程使用层映射与预编码来完成。

为什么没有把多路数据流通过一步数学变换直接映射到天线口，而增加了一个中间层（Layer）呢？

中间层的增加就好比从海口坐火车到哈尔滨，在中间站北京换乘一下；换乘站的增加，使铁路交通系统的运输安排简单化了。

同样道理，增加层映射的目的就是为了将复杂的数学变换简单化。无线环境非常复杂，要根据无线环境选择 MIMO 的应用模式，有多种考虑，如复用还是分集？如何复用，如何分集？

层数（Layer）是由信道的秩（Rank）确定的，而信道的秩标识着在一定无线环境条件下，MIMO 系统彼此独立的通道数。层数一般小于等于信道矩阵的秩，当然也小于等于物理信道传输所使用的天线端口数量 P 。

层映射就是将编码调制后的数据流按一定规则重新排列，将彼此独立的码字映射到空间概念层上。这个空间概念层是到物理天线端口的中转站。通过这样的转换，原来串行的数据流就有了初步的空间概念。

预编码过程是将层数据映射到不同的天线端口，不同的子载波上，不同的时隙上，以便实现分集或复用的目的。预编码过程就是空时编码的过程。从编码调制后的数据发送到天线口的过程，犹如公司发货的过程，层映射就是将自己的货物初步分类，而预编码过程则是运输公司安排不同的发货方式。

预编码过程后的数据已经确定了天线端口，也就是说，确定了空间维度的资源；在

每个天线端口上,将预编码后的数据对应在子载波和时隙组成的二维物理资源(RE)上。接下来生成 OFDM 符号,插入 CP,然后从各个天线端口发送出去。

在接收端,通过多天线接收机,将接收下来的信号,从 OFDM 的时频资源读取相应的数据,经过预编码与层映射逆过程,然后解调、去扰、去交织、解码,最后恢复出原始信息比特。

层映射、预编码及其逆过程,如同求解线性方程组的未知数一样,只不过发送过程和接收过程要求解的未知数不一样而已。

到此时为止,芙蓉姐姐就会收到痞子蔡给她发的牡丹花照片了。

7.3.2 多码字

传输块(TB)经过一路信道编码、交织、加扰、调制等处理过程,就是一个码字(CodeWord)。也就是说,一个码字就是从传输信道到物理层的一个独立的编码数据流。同一码字的编码、调制方式是相同的,不同的码字对应着不同的编码、调制方式。

一个码字经过 MIMO 系统传输,可以实现空间分集和复用的效果,如图 7-31 所示。

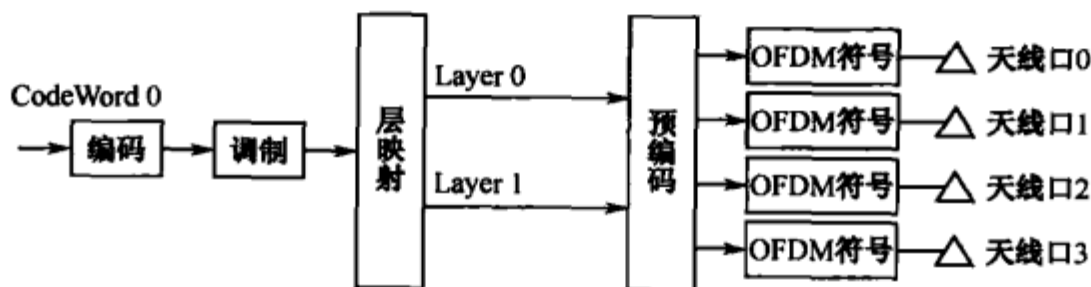


图 7-31 单码字传输

多码字经过 MIMO 系统传输,则可以分层调制,实现空间复用的效果,如图 7-32 所示。多码字比单码字有更大的吞吐量,但系统的开销和复杂度也增加了。

分层调制就是在应用层将一个逻辑业务分成两个数据流,一个是高优先级的基本层,另一个是低优先级的增强层;在物理层,这两个数据流分别映射到不同的编码方式和不同的信号星座图上。

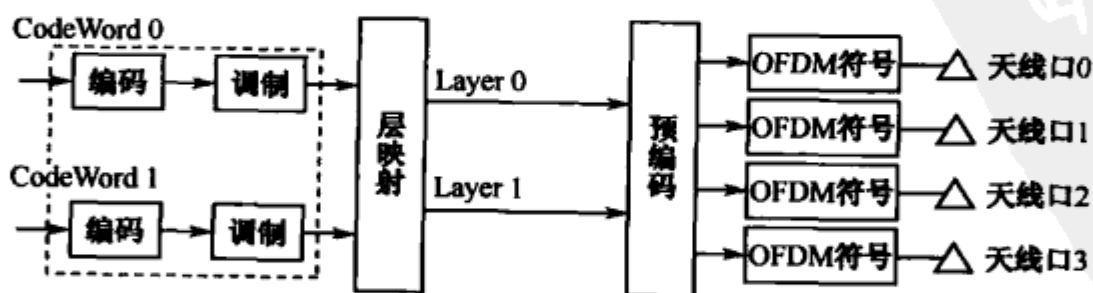


图 7-32 多码字传输

码字的数量受限于信道矩阵的秩,信道矩阵的秩取决于 UE 的天线数目、信道质量。

码字的数目是由信道矩阵秩的自适应过程来控制的。

当发送端天线只有一个时，实际能够支持的码流数量也只能为 1，所以码字数量最多也只能为 1。

当发送端和接收端都有两个接收天线，但两个天线在空间上相关度很大，如果发送端仍发送两组数据流（两个码字），接收端由于无法有效区别两组数据流，则无法正确解码两组数据。也就是说，在接收端空间信道强相关的情况下，码字数量也只能为 1。只有在空间信道彼此独立的情况下，码字数量才能大于 1。

目前，由于 LTE 系统接收端最多支持 2 天线，能够发送的相互独立的编码调制数据流的数量最多为 2，所以不管发送端天线数为 1、2 或者 4，还是将来的 8 天线，码字的数目最大值为 2。

这样，就出现了码字数目和天线数目不匹配的问题。于是，MIMO 系统经过层映射和预编码将码字数目和天线口数目匹配起来。

1 或 2 个码字的数据经过层映射变为 v 个层数据，然后经过预编码映射到 p 个天线端口上，如图 7-33 所示。

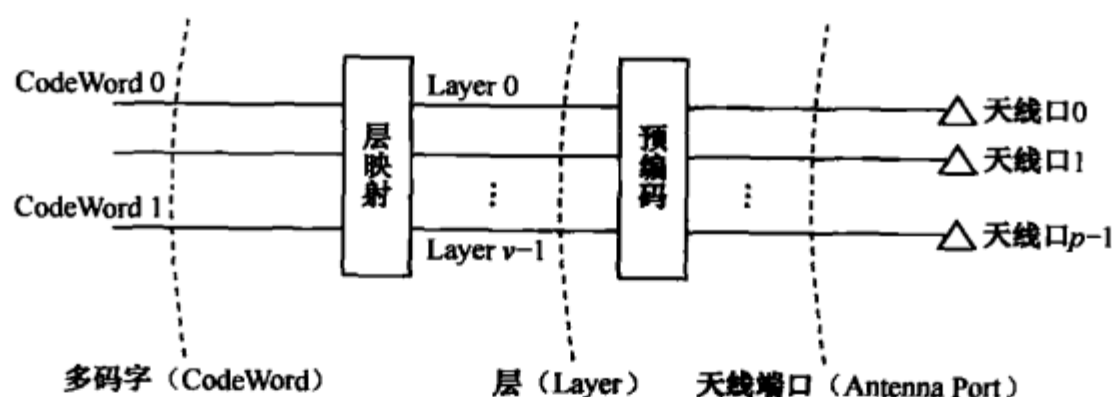


图 7-33 码字、层、天线端口的关系

7.3.3 层映射

层映射用于重排码字数据，即按照一定的规则将编码调制好的数据流（码字流）重新映射到多个层（新的数据流）。层数据流的峰值速率等于或低于天线传输的峰值速率。

不同的层可以传输相同或者不同的比特信息。不同的层传输相同的比特信息，是一种分集效果；不同的层传输不同的比特信息，是一种复用的效果。

层数目一定小于或等于天线端口数量，一定小于或等于信道矩阵秩的大小，一定大于或等于码字数目。这是因为层是码字和天线的中间过渡。在多数情况下，层数目等于秩的大小。

信道矩阵的秩 $\text{Rank}(A)$ ，是由无线环境条件制约的，是相互独立、彼此正交的空间信道个数。

打个比方来说, 10 个人有 10 个利益角度, 观点互不相关, 互不相关的观点个数(秩)为 10, 也就是说满秩; 假若 10 个人, 其中有 5 个人来自同一个利益集团, 这 5 个人只有 1 个利益角度, 观点相关度比较大, 那么这些人互不相关的观点数目(秩)最多为 6。

由于无线环境的复杂性, 相互独立的空间信道个数有时小于天线数目。

换一个角度说, 假若单天线的峰值速率为 R , 发送端可以达到的峰值速率就是 $\text{Rank}(A) \times R$ 。也就是说, 当秩小于天线数量的时候, 一定有天线和其他天线空间上相关, 也一定有天线口的速率没有发挥到峰值速率的大小。

层映射的“一定规则”不但和码字数目、层数目、天线数目、信道矩阵秩大小都有关系, 还与 MIMO 系统采用的是空间分集还是空间复用有关系。

对于确定的天线数目、确定的码字数目、确定的信道矩阵秩, 可能的层映射方式是固定的。

在单天线的情况下, 信道矩阵的秩为 1, 层数也为 1。1 个码字数据流 $d^{(0)}(i)$ 直接一次映射到 1 个层 $x^{(0)}(i)$ 上, 然后再到一个天线口上。这种方式类似于传统单天线无线系统的数据发送模式, 如图 7-34 所示。

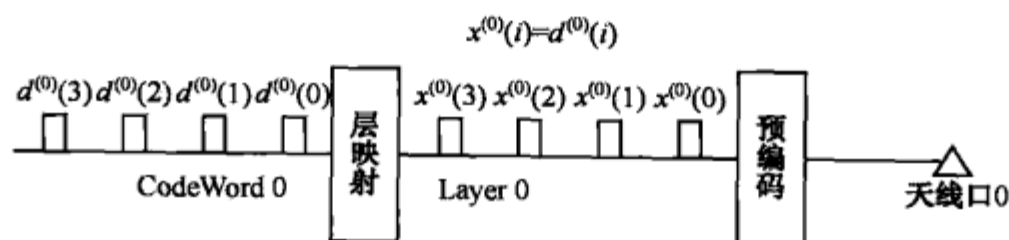


图 7-34 层映射: 单天线

多天线的時候, 情况比较复杂。分集模式, 采用单码字的层映射; 复用模式, 可以采用单码字的层映射, 也可以采用多码字的层映射。

在发射分集模式下, 由一个编码调制的数据流 $d^{(0)}(i)$ (一个码字) 逐比特依次转换到不同的层 $x^{(0)}(i)$ 、 $x^{(1)}(i)$ 、 $x^{(2)}(i) \cdots x^{(v-1)}(i)$ 上。其中 v 是层数目, 如表 7-3 所示。

表 7-3 发射分集层映射方式

天线数目	层数目(v)	码字数目	层映射(i 为各层的符号序号)
2、4	2	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(2i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(0)}(2i+1)$
4	4	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(4i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(0)}(4i+1)$ $x^{(2)}(i) = d^{(0)}(4i+2)$ $x^{(3)}(i) = d^{(0)}(4i+3)$

根据发送天线的不同，在目前，层数目可以是 2，也可以是 4。

“逐比特依次”意味着码数据流这一端每进入 ν 个比特，“层映射”的工作依次按顺序安排在 $0, 1, \dots, \nu-1$ 层上；又来了 ν 个比特，则依次从 0 层开始按顺序安排。

2 天线发射分集的层映射原理示意如图 7-35 所示，4 天线发射分集的层映射原理示意如图 7-36 所示。

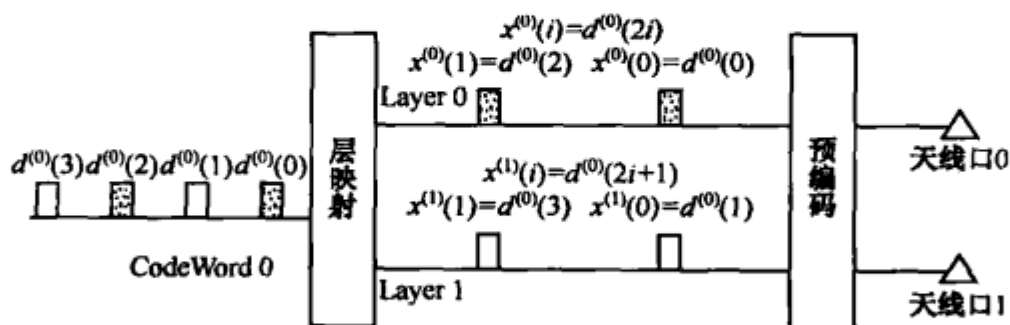


图 7-35 层映射：2 天线发射分集

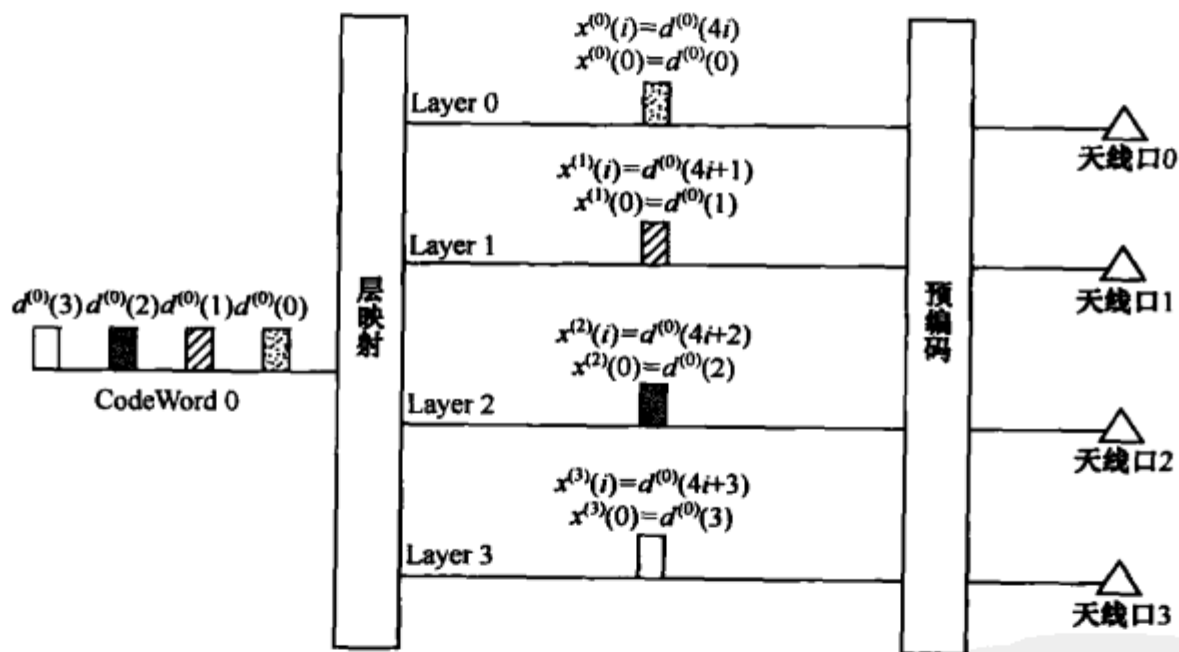


图 7-36 层映射：4 天线发射分集

在空间复用模式下，可以采用单码字的层映射方式，也可以采用多码字的层映射方式。映射关系如表 7-4 所示。

表 7-4 空间复用层映射方式

天线数目	层数目	码字数目	层映射 (i 为各层的符号序号)
2、4 (闭环 Rank=1)	1	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(i)$
4 (用于重传一个码字)	2	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(2i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(0)}(2i+1)$

续表

天线数目	层数目	码字数目	层映射 (i 为各层的符号序号)
2、4	2	2	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(i)$
			$x^{(1)}(i) = d^{(1)}(i)$
4	3	2	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(1)}(2i)$ $x^{(2)}(i) = d^{(1)}(2i+1)$
4	4	2	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(2i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(0)}(2i+1)$
			$x^{(2)}(i) = d^{(1)}(2i)$ $x^{(3)}(i) = d^{(1)}(2i+1)$

单码字映射为一层，只适用于闭环 Rank=1 的预编码；单码字映射为两层，只适用于四天线时，用于重传一个码字。复用模式单码字层映射的情况这里就不介绍了。

空间复用的工作模式一般采用多码字的层映射方式。这里介绍复用模式 2 码字的层映射方式。2 码字映射为 2 层的映射方式如图 7-37 所示；2 码字映射为 3 层的映射方式如图 7-38 所示；2 码字映射为 4 层的映射方式如图 7-39 所示。

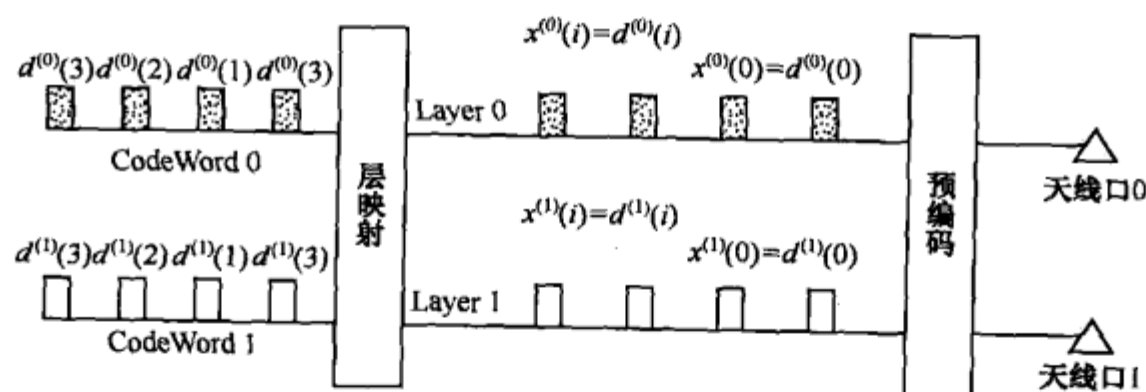


图 7-37 复用模式层映射：2 码字映射为 2 层

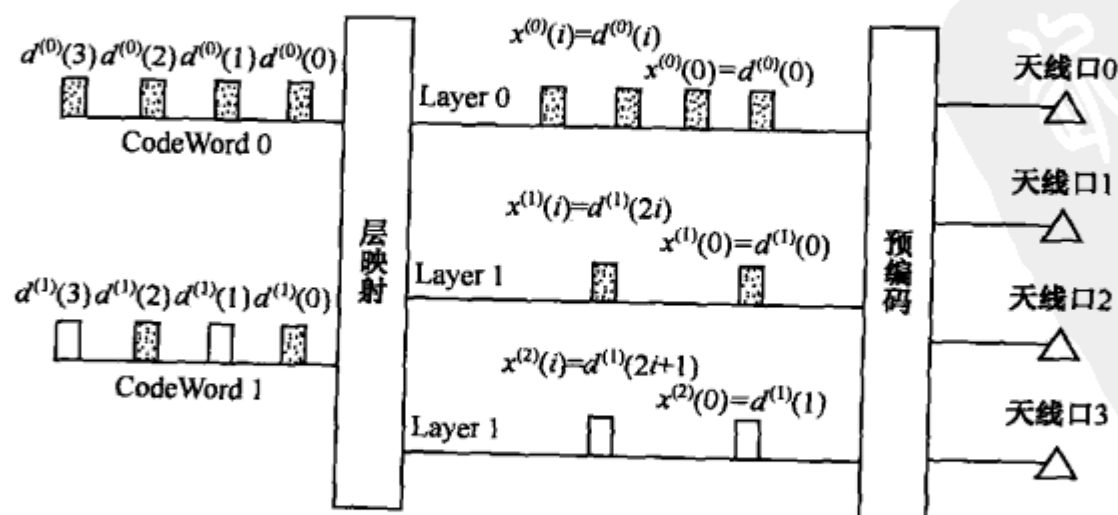


图 7-38 复用模式层映射：2 码字映射为 3 层

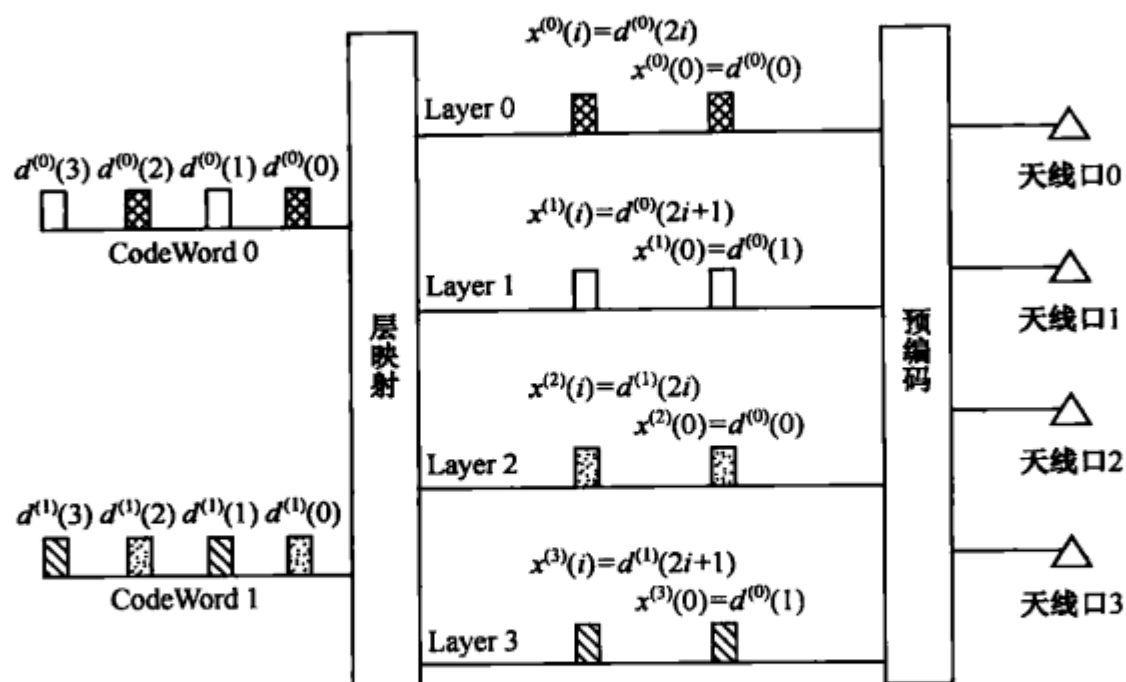


图 7-39 复用模式层映射：2 码字映射为 4 层

7.3.4 预编码

预编码过程是将层数据按照一定规则映射到不同的天线端口（或称天线口）上，如图 7-40 所示。这一过程如同货物运输公司根据不同的情况，将货物运到不同的港口一样。

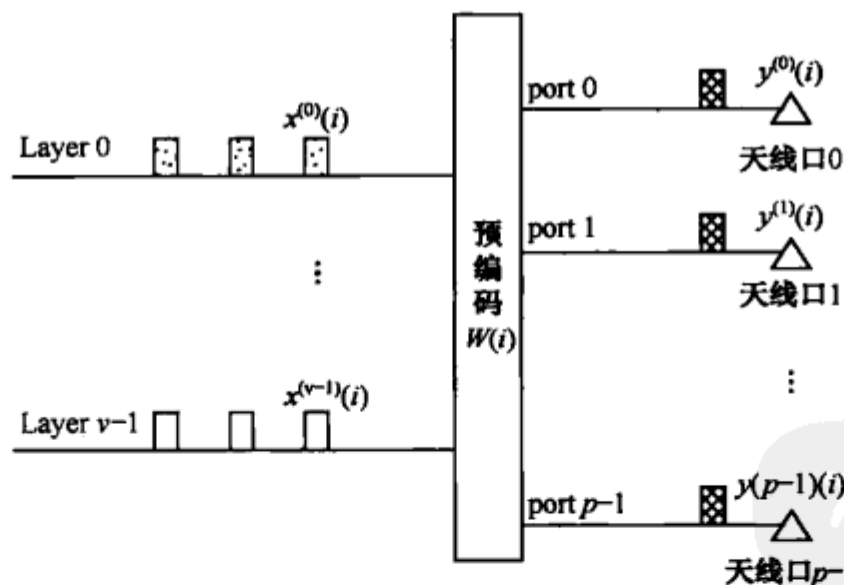


图 7-40 预编码过程

预编码模块在发送端完成由层数据 $x(i)$ 求天线端口数据 $y(i)$ 的过程，在接收端就完成由天线口数据 $y(i)$ 求解线性方程组，解出 $x(i)$ 的过程。

预编码过程同样有分集和复用的区别，也有开环和闭环的差别。这里开环和闭环的差别在于是否使用接收端反馈的信道状态信息（Channel State Information, CSI）。信道状态信息 CSI 是对无线环境瞬时衰落的估计，预编码过程使用接收端反馈的 CSI 信息来选择预编码的方式来消除数据流之间的干扰，就是闭环的；如果不使用 CSI，自行确定

预编码方式，就是开环的。

闭环空分复用一般采用基于码本（Codebook）的预编码矩阵选择机制。码本的集合就是预编码矩阵的选择资源池，在这个资源池中，每一个码本都有自己的序号，如同上学时学生使用的学号一样，非常便于使用。

假设层数目是 v ，物理天线的数目是 p ，一般层数总是小于等于物理天线的数目的，

即 $v \leq p$ 。层数据向量矩阵 $\begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ x^{(1)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix}$ 通过预编码过程的时空大转移，成为天线端口的发射信号的数据向量矩阵 $\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ \vdots \\ y^{(p-1)}(i) \end{bmatrix}$ 。层数据向量和发射信号的数据向量的关系如下式所示：

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ \vdots \\ y^{(p-1)}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{W}(i) \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ x^{(1)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix} \quad (7-9)$$

其中， $\mathbf{W}(i)$ 就是 $p \times v$ 阶的预编码矩阵。在闭环空分复用的模式下， $\mathbf{W}(i)$ 就要根据信道状态信息从码本资源池选取。

开环空分复用一般采用循环延迟分集（Cyclic Delay Diversity, CDD）技术来降低信道间衰落的相关性，增加传送的可靠性。循环延迟分集是指相同信息的不同层数据在不同时间发送（时延不同）。也就是说，在预编码过程中，加入了时延环节 $\mathbf{D}(i)$ 、 \mathbf{U} 。如下式所示：

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ \vdots \\ y^{(p-1)}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{W}(i) \mathbf{D}(i) \mathbf{U} \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{D}(i)$ 是 $v \times v$ 对角矩阵，实现不同层的时延； \mathbf{U} 也是 $v \times v$ 矩阵，实现符号间的时延。 $\mathbf{D}(i)\mathbf{U}$ 不仅增加了时延环节，而且引入了相位旋转。通过多个天线发送同一信号的不同相位旋转版本，可以获得较高的频率分集增益。

闭环发射分集模式有两种。一种是类似闭环空分复用模式，基于码本的预编码矩阵选择；另外一种为波束赋型的方式。这里不再赘述。

2 天线的开环发射分集一般采用 SFBC（Space Frequency Block Coding）映射方案；4 天线的开环发射分集采用 SFBC+FSTD（Frequency Switched Transmit Diversity）方案。

7.4 自适应 MIMO

如果某一系统能够根据航道条件的不同和运送质量的不同, 自适应地选择相应的包装方式和运输公司, 这个系统就可以称为自适应物流发送系统(如同自适应 MIMO 方式一样)。实现这样一个超强功能的自适应物流系统需要解决一些技术难题(见图 7-41)。



图 7-41 自适应物流体系的难题

首先，各个港口，各个运输公司是否彼此独立。如果各个港口、各个运输公司有千丝万缕的联系，彼此之间利益交错，相关性很大，那选择什么样的方式，其实是一样的，它们有相近的管理方式、相同的运输通道，对于客户来说，其实就是一家（天线之间的相关性问题的）。

其次，货物接收端的处理能力是否满足需要。接收端要处理大量货物，而且有不同的运输公司和不同的发货方。接收端及时地处理货物，避免货物损坏、货物送错，这是一项非常复杂的工作（接收机复杂性问题的）。

还有，不同航道运输效果的反馈机制问题。环境变，方式也变。这种自适应发货模式，需要一对火眼金睛，时刻关注航道内蛛丝马迹，关注可能对货物的损坏，避开索马里海盗。发货方需要时刻关注货物的发送质量，以便及时调整发货策略（信道估计问题的）。

7.4.1 实现难点

自适应 MIMO 系统的实现难点有三个方面：天线相关性问题的、接收机复杂性问题的、信道估计问题的。

MIMO 系统的性能如分集增益的大小、空分复用的效果如何，受天线之间的互不相关性的影响很大。天线互不相关性主要靠空间隔离来实现，也可以按照极化方式的不同来实现。

在基站侧布置几个互不相关的天线相对还容易实现一些，如何在有限的终端空间上放置多个互不相关的天线，还需进一步研究。尤其是 MIMO 系统的空中接口吞吐量随着发射天线和接收天线的最小值线性增长，终端侧的天线数目是 MIMO 空中接口吞吐量提升的受限因素。

发送端发送的数据，不管经过多少变换，都是确定的数据流，也就是说，它清清楚楚地知道自己想说什么；可是，发送的数据经过复杂的无线环境，到了接收端会存在很大的变数和很多的不确定性。

接收端要把这许多的“不确定性”变成“确定性”，一定需要一些本事。接收端如同一个会察言观色、察纳雅言的下属，时刻接受诸多领导的指令。这些指令有时候并没有直接表述，需要会意；而且指令经过很多环节，到了下属这里可能面目全非。

接收机需要对大量数据进行多道工序的处理，例如，滤波、迭代译码、迭代均衡、干扰消除、联合检测，等等，这样接收机的设计复杂性将大大提高。接收机设计时既要考虑发挥 MIMO 技术的优点，又要降低接收机实现的复杂性。这也是 MIMO 系统实现的技术关键所在。

在军事对峙中或在商业角逐中，正确的决策往往来源于对竞争对手的正确判断上。在无线通信系统中也是如此。发射端发射数据的方式来源于对接收端接收效果的正确估计。

发射端主要进行的工作是发射信道的配置工作，包括调制、编码方式，发射功率大小的问题。在 MIMO 系统中，发射端要决策的内容还包括：采用什么样的分集模式；什么样的复用模式；是否使用波束赋型；如何进行空分多址，等等。这些问题的正确决策来源于对信道条件的正确估计。

信道估计是无线通信系统的重要内容。在 MIMO 系统中，信道估计的准确性影响着 MIMO 系统的潜能发挥。

举例来说，假若信道条件不好，但是信道估计是好的，发射端采用了高阶的调制方式，同时也采用了高阶空分复用模式，对于接收端来说，是一场灾难，它无法正确理解传过来的数据，会产生大量的误码。相反地，信道条件很好，但信道估计不好，发射端采用了低阶的调制方式和空间分集的发射模式，接收端虽然能够正确接收传送的数据，但空中接口传送的信息量减少了很多，因而对空中接口资源造成了极大的浪费。

7.4.2 用户反馈

变色龙能够适应环境的变化，生成与环境相适应的保护色；机智灵敏的人能够根据场面的不同说出与场面适合的话。这些都可以称为自适应能力。

自适应的一般模型是客体的变化反映在主体那里，主体采用适合该变化的行为。变化有多快，主体的行为也要调整多快。

MIMO 系统自适应，说白了，也要根据无线环境的变化来调整自己的行为。无线环境的变化一般用信道状态信息（Channel State Information, CSI）来表示。

对于 MIMO 系统，可以调整的行为有编码方式、调制方式、层数目、预编码矩阵。MIMO 系统要想做出与适应无线环境的变化相适应的动作，需要用户端做一些反馈，如图 7-42 所示，包括 CQI（Channel Quality Indicator，信道质量指示）反馈、秩大小（Rank Indicator, RI）反馈、预编码反馈（Precoding Matrix Indicator, PMI），这些反馈都是和信道状态信息相关的内容。

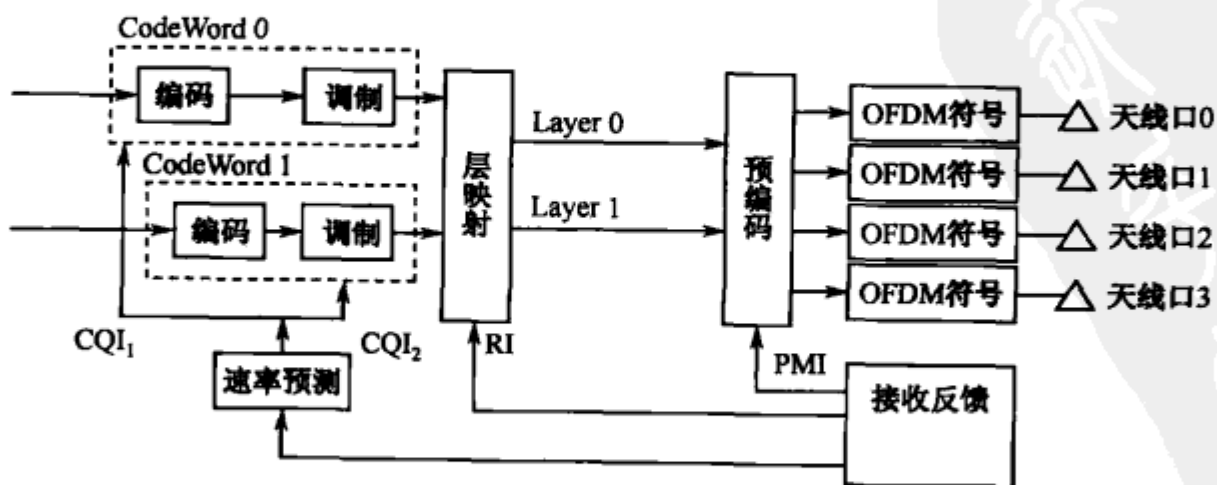


图 7-42 用户反馈

CQI 反馈决定了编码和调制的方式,通过判断 CQI 的大小,来实现自适应调制编码 (AMC、Adaptive Modulation Coding)。CQI 值可以由信道条件、噪声和干扰估计计算得到。

反馈的 CQI 值大了,选取高阶的调制方式 (如 64QAM),采用冗余度较小的编码方式 (3/4 编码),于是系统的吞吐量就大了;相反,反馈的 CQI 值小了,选取低阶的调制方式 (如 QPSK),采用冗余度较大的编码方式 (1/4 编码),于是系统的吞吐量就小了。

只有一个码字的时候,只需要反馈一个 CQI 值。但采用两个码字的 MIMO 系统,则需要反馈两个 CQI 值。

空间信道秩的大小描述了发送端和接收端空间信道的最大不相关的数据传送通道数目。空间信道的秩是不断变化的,秩的大小决定了层映射方式的选择空间,秩的自适应也就是层映射的自适应。用户的秩标识 (RI) 是通过上、下行链路的控制信息来反馈的。

预编码矩阵标识 (PMI) 决定了从层数据流到天线端口的对应关系。在基于码本的闭环空分复用和闭环发射分集模式下,层数目和天线端口数确定了,预编码的可选码本的集合就确定了。根据用户反馈的 PMI,选择性能最优的预编码矩阵。

预编码矩阵选取的判断准则有两个:信噪比最大化和码距最小化。

信噪比最大化就是将可选的码本代入发送和接收的信道变换关系中,计算等效的信噪比,选择使信噪比最大的码本,信噪比最大对应的是容量最大化。

码距最小化,就是用信道信息计算出的最优矩阵和可选的码本比较,选择最为接近的码本。码距最小化对应的是误比特率的最小化。

7.5 多用户 MIMO

MIMO 系统为多个用户提供上、下行资源调度的时候,需要为各个用户的数据传送安排恰当的空间 (天线)、恰当的时间 (时隙)、恰当的频率 (子载波)。

一边是待分配的无线资源,另外一边是需要资源的用户。多天线系统如何为多个用户服务,多个用户如何占用多天线的系统资源,这就是多用户多天线的技术。

7.5.1 下行 MU-MIMO

从下行方向上来看,MIMO 系统可以把不同天线上的时频资源安排给一个用户,也可以安排给不同的用户。

同一个用户使用不同天线的时频资源,享受着多个天线的无线资源,提高了该用户的数据传输速率,提高了频率利用效率,对于这个用户来说,得到了空间复用的效果,

如图 7-43 所示，这叫 SU-MIMO（Single User MIMO，单用户 MIMO）模式。

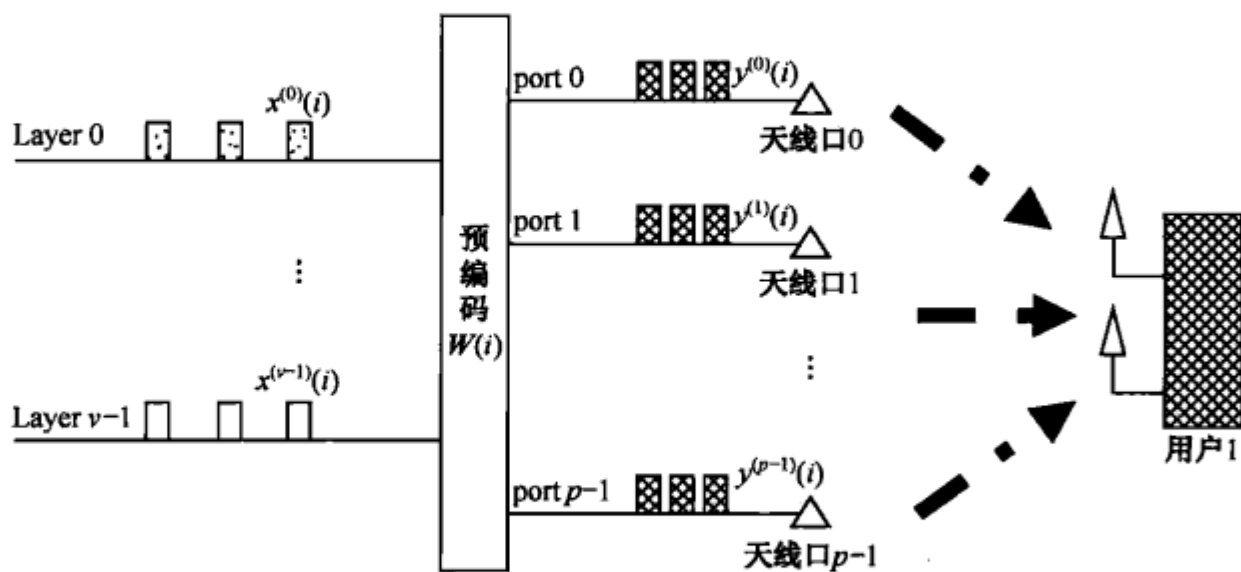


图 7-43 下行 SU-MIMO

但是 SU-MIMO 挤占了其他用户的资源占用。正所谓，“客大欺店”，一个财大气粗（优先级较高）的大客户（单用户）把 MIMO 这个店里的资源全部占用，楼上、楼下座位他全部占用，他一人感觉挺爽的，别人得不到服务。

财大气粗的大客户（单用户）走了，众多小户（多用户）来到这个 MIMO 的店里。这时“店大欺客”。多个小户占用这个店里的多个服务资源，什么时候占用（时间），用多少，在楼上还是楼下（空间），那得我店里说了算（调度）（见图 7-44）。

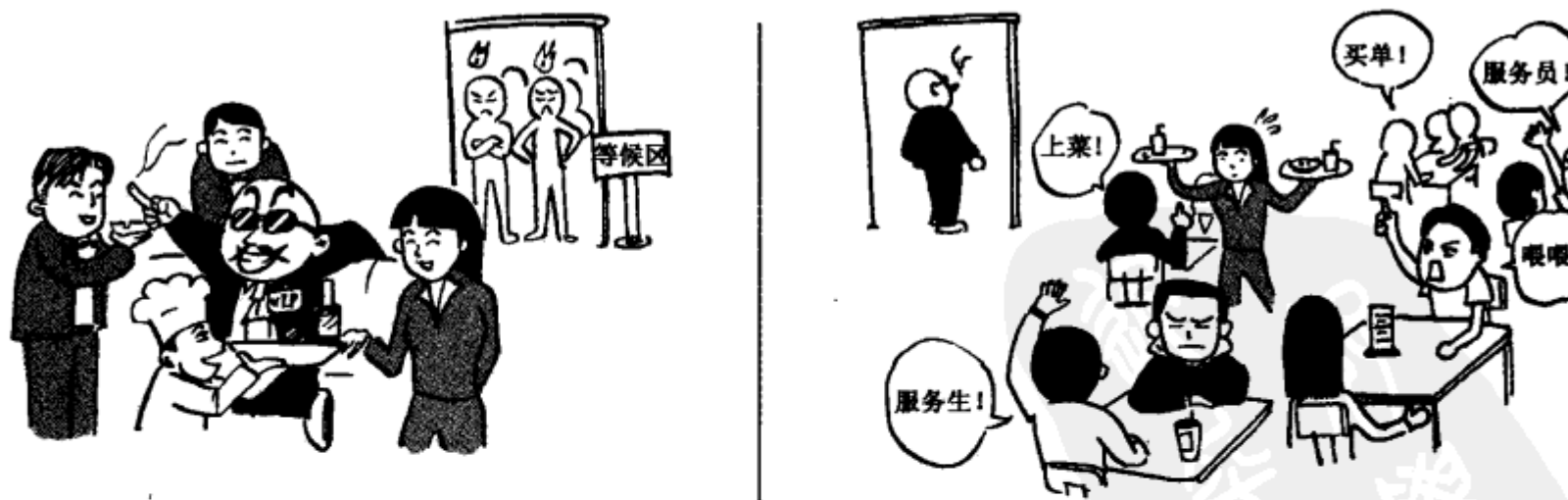


图 7-44 客大欺店与店大欺客

将 MIMO 系统中不同天线的时频资源安排给多个用户，多个用户共享空间复用的好处，提高了整体的调度效率，如图 7-45 所示，这就是 MU-MIMO（Multi-User MIMO，多用户 MIMO）。

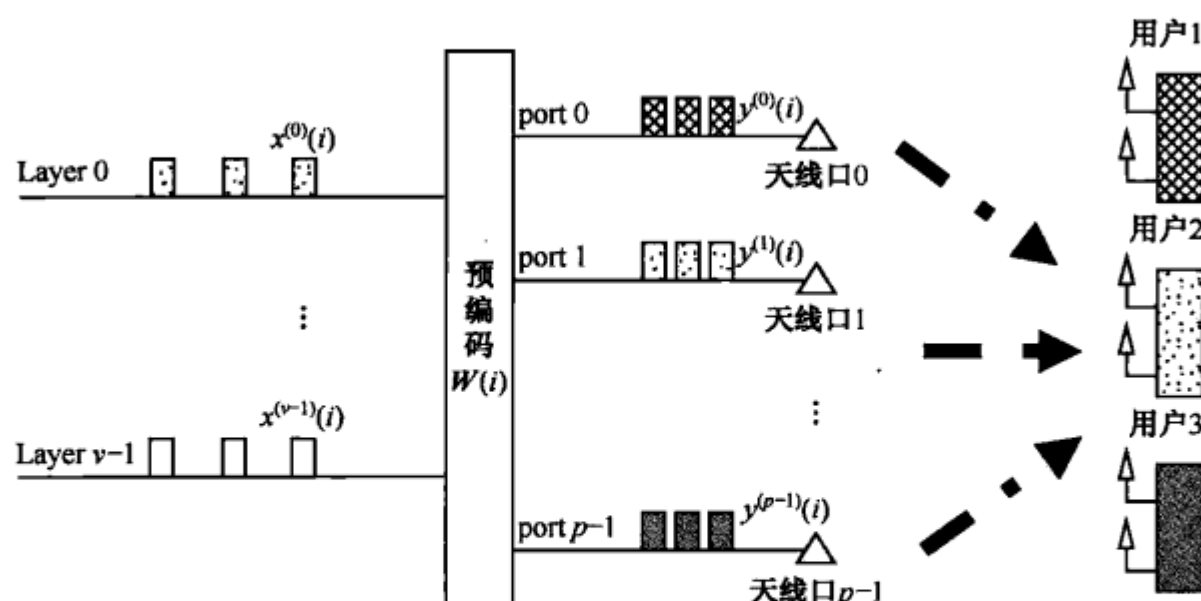


图 7-45 下行 MU-MIMO

不同的用户可以占用不同天线的相同时间、相同频率的单元，也就是说，空间上的拓展带来不同用户可以占用同样时频资源的好处。多个用户占用不同的天线端口，不同用户经历了相对独立的空间信道，起到了多用户分集的效果。

无论是单用户的 SU-MIMO，还是多用户的 MU-MIMO，都可以是自适应的 MIMO。用户反馈在自适应中是必不可少的。通过用户反馈的预编码矩阵标识 (PMI)，来动态地调整预编码矩阵，从而降低空间复用数据流之间的干扰，改善 MIMO 技术的性能。

7.5.2 上行 MU-MIMO

在多进多出的 MIMO 系统中，至少是两进两出才能发挥出吞吐量大幅提升的好处来。因为业务速率的峰值和“进、出”天线最小数目成正比，只要天线数目有一个方向是 1，峰值速率就不会提升。

基站侧实现多天线传输还比较容易，但终端侧实现多天线就比较困难了，涉及终端实现的复杂度问题，从而导致成本问题。而且，即使终端实现了多个天线，如果增大了终端的体积，增加了终端的耗电（多天线增加了功耗），从而导致了终端携带不方便和使用不方便的问题，也会制约 LTE 终端的广泛应用。也就是说，在未来的 LTE 使用场景中，虽然会有一些双天线的高端用户终端，但使用范围较大的，一定还是单天线的用户终端。

于是，在上行方向，终端为单天线的情况下，如何实现 MIMO，就是很多人要研究解决的问题。

两个或多个单天线用户终端组成一组，在相同的时频资源块上，传送上行数据的方法，称为虚拟 MIMO 技术 (Virtual-MIMO)。

调度器将相同的时频资源调度给若干个不同的用户，每个用户都采用单天线方式发

送数据；在基站的接收端，采用一定的 MIMO 解调方法进行多用户数据分离，如图 7-46 所示。

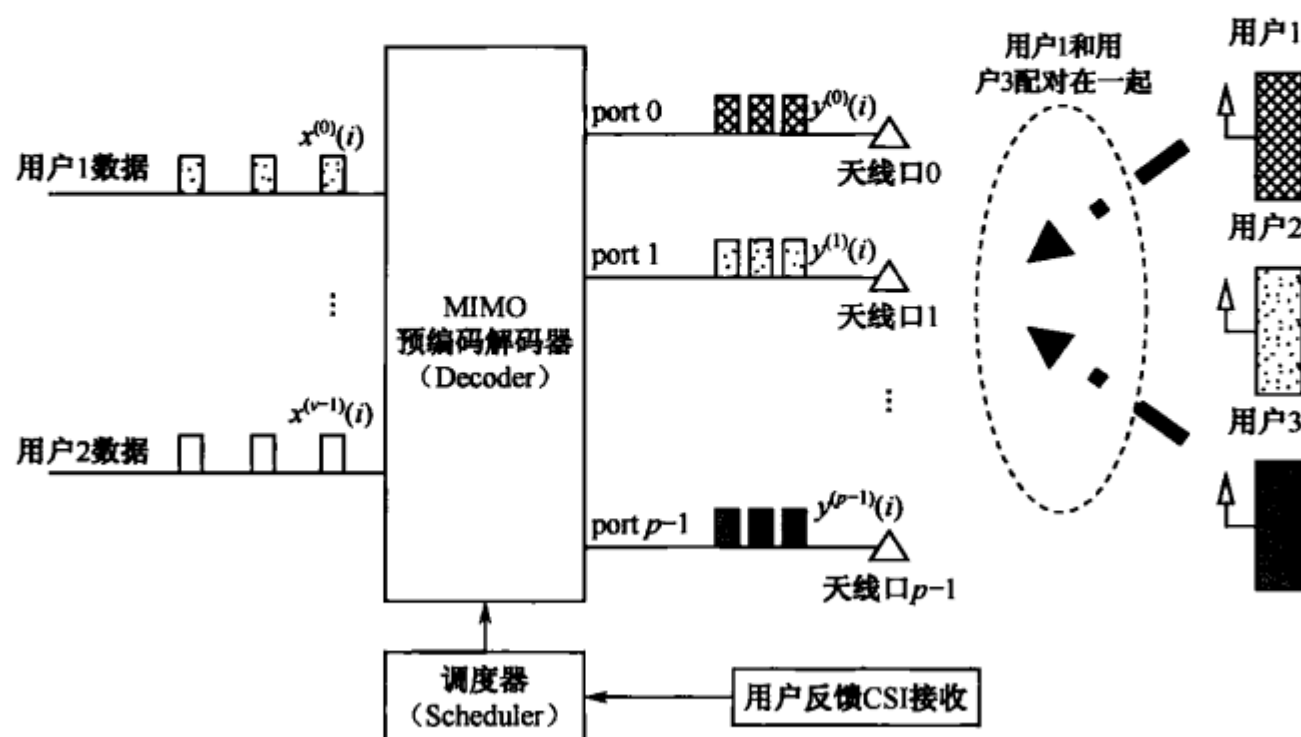


图 7-46 上行虚拟 MIMO

在上行方向，一组使用相同时频资源的不同终端的数据发射，就可以等效使用多个天线的工作，这样起到了提高上行吞吐量的效果。

但是，谁和谁组成一组就是比较复杂的问题，这个问题就是用户配对的问题。

用户配对难啊！如同男女找对象。大家都知道，男女搭伙过日子可以带来很多增益，但是谁和谁在一起，是个比较复杂的结合过程。

从男女结合的途径上，可以分为两类：

一类是自由恋爱；

另一类则是父母之命、媒妁之言（见图 7-47）。

所谓“自由恋爱”，就是两个终端间可以互相通信、互相协作，自愿结合组成一对。在 WSN（Wireless Sensor Network，无线传感网）系统和 UWB（Ultra Wide Band，超宽带）系统中，就是采用的这种终端用户自主协作式配对方式。

所谓“父母之命、媒妁之言”，就是终端和谁结合在一起、组成一对，终端用户之间不能互相通信，得基站（相当于父母的角度）说了算。这就是基站集中统一调度的用户配对方式。在 3GPP 的 LTE 中，就是采用的这种用户配对方式。

“父母之命”来决定男女的配对，总得图点什么。

有的父母是为了经济利益最大化，有的父母是为了政治利益最大化，也有的父母是看重身材、长相、漂亮程度。不管怎么样，总得有个判断准则。

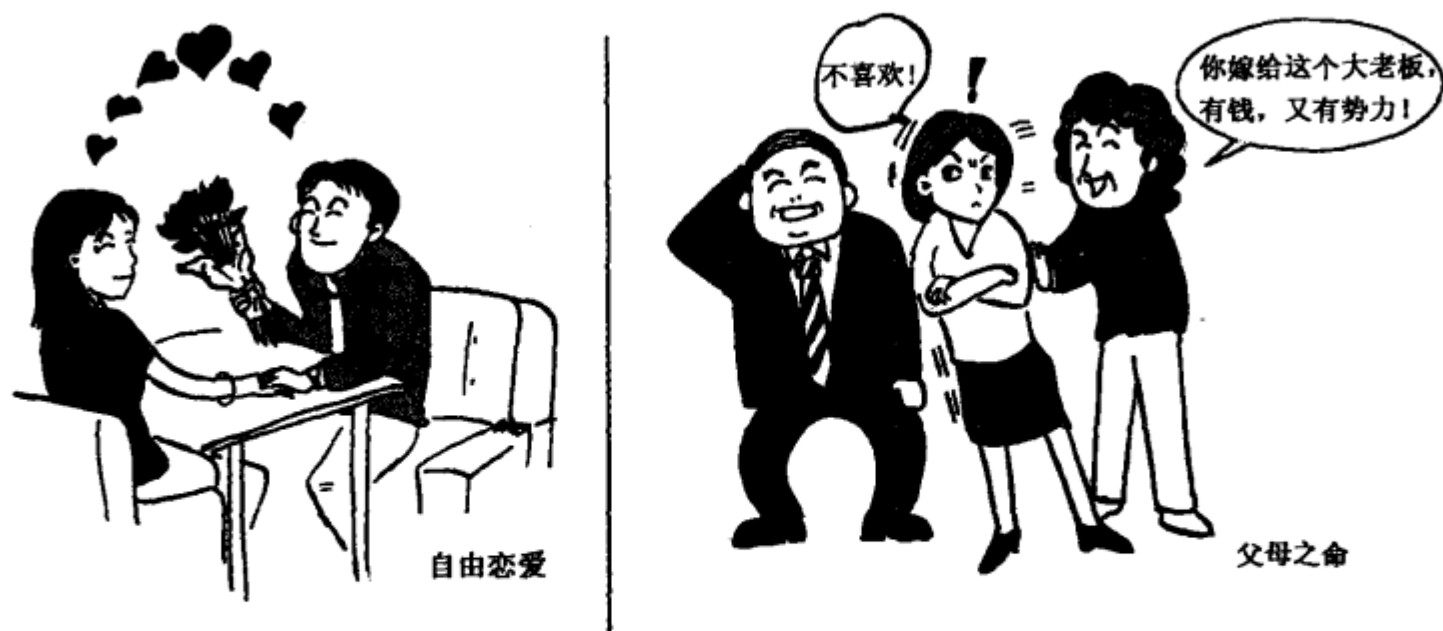


图 7-47 自由恋爱与父母之命

基站，这个“父母”如何安排“孩子们”（终端）的配对呢？有以下两种方式。

一是随机配对法。随机抽取两个终端组成一对的算法，显然不用动脑子，实现简单，但这样配对以后，“婚姻”不一定幸福（随机配对算法，存在互相干扰，没有带来多少好处）。

二是正交用户配对法。观察每个终端的本事 [用户反馈信道状态信息 (CSI)]，让用户间的干扰最小化，配对的几个用户占用同样的时频资源，而打不起架来。可以通过选择，获得多用户分集增益（类似通过认真的选择，为婚姻质量带来增益）。

第 8 章

渠道为王——LTE 的信道

知识要点

信道实际上就是信息前后衔接的不同处理过程，是不同类型的信息，按照不同传输格式、用不同的物理资源承载的信息通道。根据信息类型的不同、处理过程的不同，可以将信道分为多种类型。

本章重点介绍 LTE 的逻辑信道、传输信道、物理信道、物理信号等常见的信道类型，并和 3G 相应的信道类型做了比较，通过比较可以加深 LTE 信道结构的理解。最后给出 LTE 从逻辑信道到传输信道，再到物理信道的映射关系。

有句话称“渠道为王”。货物在传送过程中经过的所有环节就是渠道。三吉皮皮国在发展经济的过程中，认识到了“渠道”的重要性。

所谓“小鸡不尿尿、各有各的道”。依据不同的货物类型，采用不同的处理工艺，选择相应的运送过程，最后保证接收方及时、正确地接收货物（见图 8-1）。



图 8-1 货物的发送和接收

如何建立货物流通的渠道，使得不同的货物只要按照其类别放置在相应的通道入口，后面的事情不用管；在货物接收端的相应出口，就可把货物完好无缺地取出？

货物发送过程涉及三个主要的工作：货物分类受理、传送打包方式选择、运输工具选择，如图 8-2 所示。

货物分类受理，关注的是传送什么样的货物（类似逻辑信道的功能）。货物属于

什么样的种类，是粮食、机械（业务信息），还是文件、命令（控制信息）？不同种类的货物选择不同货物承运公司，属于不同的货物入口（类似逻辑信道的业务接入点 SAP）。

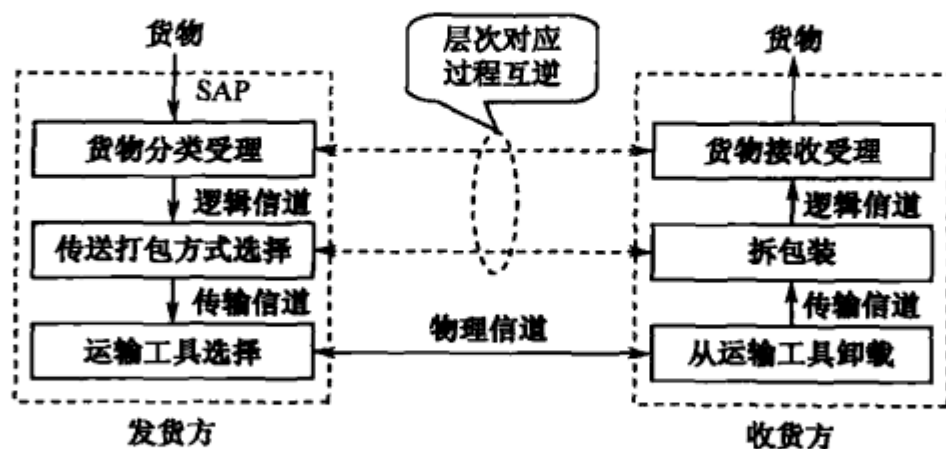


图 8-2 货物流通渠道

接下来的过程就是传送方式、打包方式选择。这个过程关注的是怎样传？这货物是和其他货物一起共享传送通道（类似共享信道），还是给这些货物建立专用的传送通道（类似专用信道）。用什么样的方式包装，用标准的集装箱、非标准的木头箱，还是一般的牛皮纸？最终交给运输公司的货物就是打包好的货物（TB）。

最后就是运输工具的选择，关注的是用什么运送？飞机、火车，还是轮船、汽车。这是货物运送的实际载体（类似物理信道）。货物的交运方根本无须关注承运方选择什么样的交通工具。

货物发送过程的不同工作由不同的部门负责，部门之间分工明确、配合默契。

“山路回转不见君，雪上空留马行处。”国王听了渠道设计的方案后说道。

接班人奥先生理解国王的意思：“对其他部门的工作细节不需清楚，但是对应关系要很明确。货物可以看不到，但到了哪个环节要心里有数。”

8.1 信道结构

8.1.1 信道的含义

信道，就是信息的通道。不同的信息类型需要经过不同的处理过程。

广义地讲，发射端的信源信息，经过层三、层二、物理层的处理，发射到无线环境中，然后接收端接收到无线信息，经过物理层、层二、层三的处理被用户高层所识别的

全部环节，就是信道。

信道就是信息处理的流水线。上一道工序和下一道工序是相互配合、相互支撑的关系。彼此必须有清晰的工作界面，避免相互推诿、互相扯皮，避免出现像人和人之间在协作过程中常犯的错误那样。

上一道工序把自己处理完的信息交给下一道工序时，要有一个双方都认可的标准，这个标准就是业务接入点（Service Access Point, SAP）。

协议的层与层之间要有许多这样的业务接入点，以便接收不同类别的信息。狭义地讲，不同协议层之间的业务接入点（SAP）就是信道。这时，信道的含义就是下一层向它的上层提供服务的标准接口，即业务接入点 SAP。

8.1.2 三类信道

LTE 采用和 UMTS 相同的三种信道：逻辑信道、传输信道与物理信道。从协议栈的角度来看，逻辑信道是 MAC 层和 RLC 层之间的，传输信道是物理层和 MAC 层之间的，物理信道是物理层的，如图 8-3 所示。

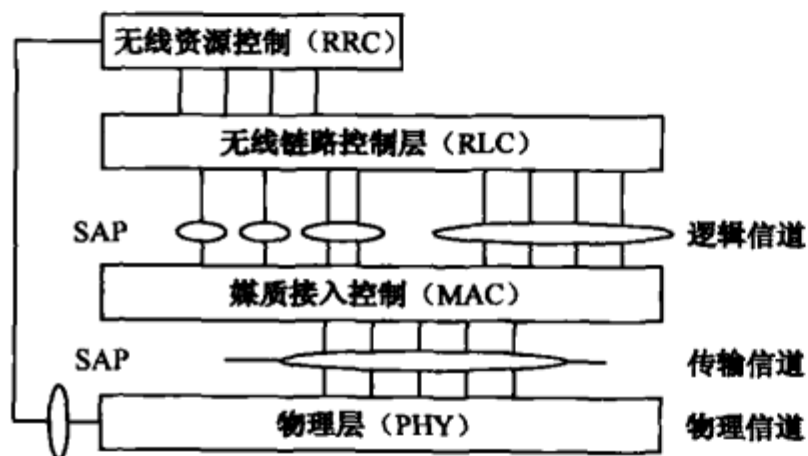


图 8-3 无线信道结构

逻辑信道关注的是传输什么内容，什么类别的信息。信息首先要被分为两种类型：控制消息（控制平面的信令，负责工作协调，如广播类消息、寻呼类消息）和业务消息（业务平面的消息，承载着高层传来的实际数据）。逻辑信道是高层信息传送到 MAC 层的服务接入点。

传输信道关注的是怎样传？形成什么样的传输块（TB）？不同类型的传输信道对应的是空中接口上不同信号的基带处理方式，如调制编码方式、交织方式、冗余校验的方式、空间复用方式，等等内容。

根据对资源占有的程度不同，传输信道还可以分为共享信道和专用信道。共享信道就是多个用户共同占用信道资源；而专用信道就是由某一个用户独自占用信道资源。

与 MAC 层强相关的信道有传输信道与逻辑信道。传输信道是物理层提供给 MAC 层的服务，MAC 可以利用传输信道向物理层发送与接收数据；而逻辑信道则是 MAC 层向 RLC 层提供的服务，RLC 层可以使用逻辑信道向 MAC 层发送与接收数据。

MAC 层一般包括很多功能模块，如传输调度模块、MBMS 功能模块、传输块（TB）产生模块等。经过 MAC 层处理的消息向上传给 RLC 层的业务接入点，要变成逻辑信道

的消息；向下传送到物理层的业务接入点（SAP），要变成传输信道的消息。

物理信道，就是信号在无线环境中传送的方式，即空中接口的承载媒体。物理信道对应的是实际的射频资源，如时隙（时间）、子载波（频率）、天线口（空间）。物理信道，就是确定好编码交织方式、调制方式，在特定的频域、时域、空域上发送数据的无线通道。根据物理信道所承载的上层信息的不同，定义了不同类型的物理信道。

8.1.3 LTE 与 UMTS 信道总体比较

和 UMTS 的信道结构相比，LTE 的信道结构做了很大的简化。传输信道将从原来的 9 个减为现在的 5 个，物理信道从 3GPP 的 R6 版本（支持 HSPA，包括 TDD、FDD）的接近 20 个物理信道，简化为 LTE 的上行 3 个，下行 6 个，再加上 2 个参考信号。后面会详细介绍。

这里需要注意的是：和 UMTS 的物理信道不一样的是，LTE 的物理信道没有码域（CDMA）的概念。

简单带来的是效率。无论从技术实现的角度、配置维护的角度、学习使用的角度，都节约了大家的时间。

8.2 逻辑信道

根据传送消息的不同类型，逻辑信道分为两类：控制信道、业务信道。

控制信道，只用于控制平面信息的传送，如协调、管理、控制类信息。

业务信道，只用于用户平面信息的传送，如高层交给底层传送的语音类、数据类的数据包。

8.2.1 五个控制信道

MAC 层提供的控制信道有以下五个：

广播控制信道（Broadcast Control Channel, BCCH）是广而告之的消息入口，面向辖区内的所有用户广播控制信息。BCCH 是网络到用户的一个下行信道，它传送的信息是在用户实际工作开始之前，做一些必要的通知工作。它是协调用户行为、控制用户行为、管理用户行为的重要信息。虽不干业务上的活，但没有它，业务信道就不知道如何开始工作，如何下手。

寻呼控制信道（Paging Control Channel, PCCH）是寻人启示类消息的入口。当不知道用户具体处在哪个小区的时候，用于发送寻呼信息。PCCH 也是一个网络到用户的下

行信道，一般用于被叫流程（主叫流程比被叫流程少一个寻呼消息）。

公共控制信道（Common Control Channel, CCCH）类似主管和员工之间协调工作时信息交互的入口，用于多人干活时，协调彼此动作的信息渠道。CCCH 是上、下行双向和点对多点的控制信息传送信道，在 UE 和网络没有建立 RRC 连接的时候使用。

专用控制信道（Dedicated Control Channel, DCCH）类似领导和某个亲信之间面授机宜的信息入口，是两个建立了亲密关系的人干活时，协调彼此动作的信息渠道。DCCH 是上、下行双向和点到点的控制信息传送信道，是在 UE 和网络建立了 RRC 连接以后使用。

多播控制信道（MultiCast Control Channel, MCCH）类似领导给多个下属下达搬运一批货物命令的入口，是领导指挥多个下属干某项重体力活时，协调彼此动作的信息渠道。MCCH 是点对多点的从网络到 UE 侧（下行）的 MBMS 控制信息的传送信道。

网络侧类似一个有节目源的电视台，UE 则是为了接收节目的电视机，而 MCCH 则是为了顺利发送节目，电视台给电视机发送的控制命令，让电视机做好相关的接收准备。一个 MCCH 可以支持一个或多个 MTCH（MBMS 业务信道）配置。

MCCH 信道在 UMTS 的信道结构中没有相应定义。

8.2.2 两个业务信道

MAC 层提供的业务信道有以下两个：

专用业务信道（Dedicated Traffic Channel, DTCH）是待搬运货物的入口，这个入口按照控制信道的命令或指示，把货物从这里搬到那里，或者从那里搬到这里。DTCH 是 UE 和网络之间的点对点 and 上、下行双向的业务数据传送渠道。

多播业务信道（Multicast Traffic Channel, MTCH）类似要搬运的大批货物，也类似一个电视台到电视机的节目传送入口。MTCH 是 LTE 中区别于以往制式的一个特色信道，是一个点对多点的从网络到 UE（下行）传送多播业务 MBMS 的数据传送渠道。

8.2.3 LTE 与 UMTS 逻辑信道的比较

LTE 逻辑信道和 UMTS 中定义的逻辑信道有相同的，也有不同的，如表 8-1 所示。对于 BCCH、PCCH、CCCH、DCCH 这四个控制信道，DTCH 业务信道是二者都有的；控制信道 MCCH、业务信道 MTCH 是 LTE 中为了支持 MBMS 而设立的逻辑信道，在 UMTS（3GPP R6 版本以前）中没有定义。

表 8-1 LTE 和 UMTS 逻辑信道对比

逻辑信道类型	LTE 逻辑信道	3GPP UMTS 主要逻辑信道	信息方向
控制信道	广播控制信道 (Broadcast Control Channel, BCCH)		下行
	寻呼控制信道 (Paging Control Channel, PCCH)		下行
	公共控制信道 (Common Control Channel, CCCH)		上行、下行
	专用控制信道 (Dedicated Control Channel, DCCH)		上行、下行
	—	共享控制信道 (Shared Control Channel, SHCCH; 仅为 TDD 模式)	上行、下行
	多播控制信道 (Multicast Control Channel, MCCH)	—	下行
业务信道	专用业务信道 (Dedicated Traffic Channel, DTCH)		上行、下行
	—	公共业务信道 (Common Traffic Channel, CTCH)	下行
	多播业务信道 (Multicast Traffic Channel, MTCH)	—	下行

8.3 传输信道

传输信道定义了空中接口中数据传输的方式和特性。传输信道可以配置物理层的很多实现细节，同时物理层可以通过传输信道为 MAC 层提供服务。很值得注意的是，传输信道关注的不是传什么，而是怎么传。

UMTS (3GPP R6 版本) 的传输信道分为两类：专用信道和公共信道。公共信道资源是小区内的所有用户或一组用户共同分配使用的；而专用信道则是由单个用户使用的资源。

LTE 的传输信道没有定义专用信道，都属于公共信道（强调大家都可以用）或者共享信道（强调大家可以同时用）。

LTE 传输信道就不宜分为专用和公共。可行的办法是将 LTE 传输信道分为上行信道和下行信道。但是 LTE 的共享信道 (SCH) 支持上、下行两个方向，为了区别，将 SCH 分为 DL-SCH (下行 SCH) 和 UL-SCH (上行 SCH)。

8.3.1 四个下行信道

LTE 下行传输信道有以下四个：

广播信道 (Broadcast Channel, BCH)，为广而告之消息规定了预先定义好的固定格式、固定发送周期、固定调制编码方式。不允许灵活机动，要唱样板戏。

BCH 是在整个小区内发射的、固定传输格式的下行传输信道，用于给小区内的所有用户广播特定的系统信息。

在 UMTS 里，逻辑信道 BCCH 有专门的传输信道 (BCH、FACH) 与之对应。在 LTE 中，只有广播信道中的 MIB (Master Information Block, 主系统信息块) 在专属的传输信道 (BCH) 上传输，其他的广播消息，如 SIB (System Information Block, 系统信息块) 都是在下行共享信道 (DL-SCH) 上传输的。

寻呼信道 (Paging Channel, PCH) 规定了寻人启示传输的格式，将寻人启示贴在公告栏之前 (映射到物理信道之前)，要确定寻人启示如何措辞，发布间隔等内容。

寻呼信道 PCH 是在整个小区内进行发送寻呼信息的一个下行传输信道。为了减少 UE 的耗电，UE 支持寻呼消息的非连续接收 (DRX)。为了支持终端的非连续接收，PCH 的发射与物理层产生的寻呼指示的发射是前后相随的。

下行共享信道 (Downlink Shared Channel, DL-SCH)，规定了待搬运货物的传送格式。DL-SCH 是传送业务数据的下行共享信道，支持自动混合重传 (HARQ)；支持编码调制方式的自适应调整 (AMC)；支持传输功率动态调整；支持动态、半静态的资源分配。

多播信道 (Multicast Channel, MCH) 规定了给多个用户传送节目的传送格式，是 LTE 的规定区别于以往无线制式的下行传送信道。在多小区发送时，支持 MBMS 的同频合并模式 MBSFN。MCH 支持半静态的无线资源分配，在物理层上对应的是长 CP 的时隙。

8.3.2 两个上行信道

LTE 上行传输信道有以下两个：

随机接入信道 (Random Access Channel, RACH) 规定了终端要接入网络时的初始协调信息格式，如同一个人要拜访领导，登他家门的时候，首先是确定要叩门，还是打电话，还是按门铃。

RACH 是一个上行传输信道，在终端接入网络开始业务之前使用。由于终端和网络还没有正式建立链接，RACH 信道使用开环功率控制。RACH 发射信息时是基于碰撞 (竞争) 的资源申请机制 (有一定的冒险精神)。

上行共享信道 (Uplink Shared Channel, UL-SCH) 和下行共享信道一样，也规定了待搬运货物的传送格式，只不过方向不同。UL-SCH 是传送业务数据的从终端到网络的上行共享信道，同样支持自动混合重传 (HARQ)；支持编码调制方式的自适应调整 (AMC)；支持传输功率动态调整；支持动态、半静态的资源分配。

以上传输信道所采用的编码方案如表 8-2 所示。

表 8-2 传输信道的编码方案

传输信道	编码方案	编码速率
UL-SCH	Turbo 编码	1/3
DL-SCH		
PCH		
MCH		
BCH	咬尾卷积码 (Tail Biting Convolutional Coding)	1/3
RACH	N/A	N/A

8.3.3 LTE 与 UMTS 传输信道的比较

LTE 的传输信道设计和 UMTS 相比，有很大的变化，二者的对比如表 8-3 所示。

LTE 的传输信道充分发挥了共享机制，取消了专用信道的机制，这样 LTE 的传输信道从 UMTS 的 9 种减为现在的 5 种，减少了很多，简化了很多。这里 DL-SCH 和 UL-SCH 作为一个种类，UMTS 的上行 DCH、下行 DCH 也算一种。

表 8-3 LTE 和 UMTS 传输信道对比

传输信道类型	LTE 传输信道	3GPP UMTS 传输信道
下行信道	广播信道 (Broadcast Channel, BCH)	
	寻呼信道 (Paging Channel, PCH)	
	下行共享信道 (Downlink Shared Channel, DL-SCH)	前向接入信道 (Forward Access Channel, FACH)
		下行共享信道 (Downlink Shared Channel, DSCH)
		专用信道 (Dedicated Channel, DCH)
		高速下行共享信道 (High Speed Downlink Shared Channel for HSDPA, HS-DSCH)
	多播信道 (Multicast Channel, MCH)	—
上行信道	随机接入信道 (Random Access Channel, RACH)	
	上行共享信道 (Uplink Shared Channel, UL-SCH)	公用分组信道 (Common Packet Channel, CPCH)
		专用信道 (Dedicated Channel, DCH)
		增强型专用信道 (Enhanced DCH for HSUPA, E-DCH)

在 UMTS 中，有六种公共传输信道：BCH，FACH，PCH，RACH，CPCH 和 DSCH。在 LTE 中，取消了 FACH、CPCH，二者并入了共享信道 (DL/UL-SCH)。

除了广播信道 BCH、寻呼信道 PCH 以及随机接入信道 RACH 为每个用户指定特定

的公共资源之外，其他的资源都是共享的。

针对业务数据，不再有专用的传输信道与专用的控制信道，取消了上、下行 DCH，取消了为 HSDPA 增加的 HS-DSCH，取消了为 HSUPA 增加的 E-DCH，都统一并入了共享信道（DL/UL-SCH），也就是说，增强了 UMTS 中的 DSCH 信道的功能。

所有用户都使用共享资源，就必须进行统一调度，这样和 WiMAX 对资源管理的方式非常相似。MAC 调度需要兼顾业务优先级、调度的效率、公平性，这就对 MAC 层的设计提出了较高的要求。

8.4 物理信道

物理信道是高层信息在无线环境中的实际承载，如同交给邮局的货物被装上了一种特定交通工具（火车、飞机、轮船、汽车）。

在 LTE 中，物理信道是由一个特定的子载波、时隙、天线口确定的，即在特定的天线口上，对应的是一系列无线时频资源（Resource Element, RE）。

一个物理信道是有开始时间、结束时间、持续时间的。物理信道在时域上可以是连续的，也可以是不连续的。连续的物理信道持续时间是从它的开始时刻到结束时刻这一段连续的时间，不连续的物理信道则须明确指示清楚由哪些时间片组成。

在 LTE 中，度量时间长度的单位是采样周期 T_s 。在 UMTS 中，度量时间长度的单位则是码片周期 T_{chip} 。

物理信道主要用来承载传输信道来数据，但还有一类物理信道无须传输信道的映射，直接承载物理层本身产生的控制信令或物理信令（下行：PDCCH、RS、SS；上行：PUCCH、RS）。这些物理信令和传输信道映射的物理信道一样，是有着相同的空中载体的，可以支持物理信道的功能。

8.4.1 两大处理过程

物理信道一般要进行两大处理过程：比特级处理和符号级处理。

从发送端的角度看，比特级的处理是物理信道数据处理的前端，主要是在二进制比特数字流上添加 CRC 校验；进行信道编码、交织、速率匹配以及加扰。

加扰之后进行的是符号级处理，包括调制、层映射、预编码、资源块映射、天线发送等过程。

在接收端，先进行的是符号级处理，然后是比特级处理，这与发送端处理的先后顺序不同。

上、下行物理信道采用的多址接入方式不同，MIMO 实现的方式也可能不同，所以二者的处理过程有所区别。下行信道的信息处理过程如图 8-4 所示，上行信道的信号处理过程如图 8-5 所示。

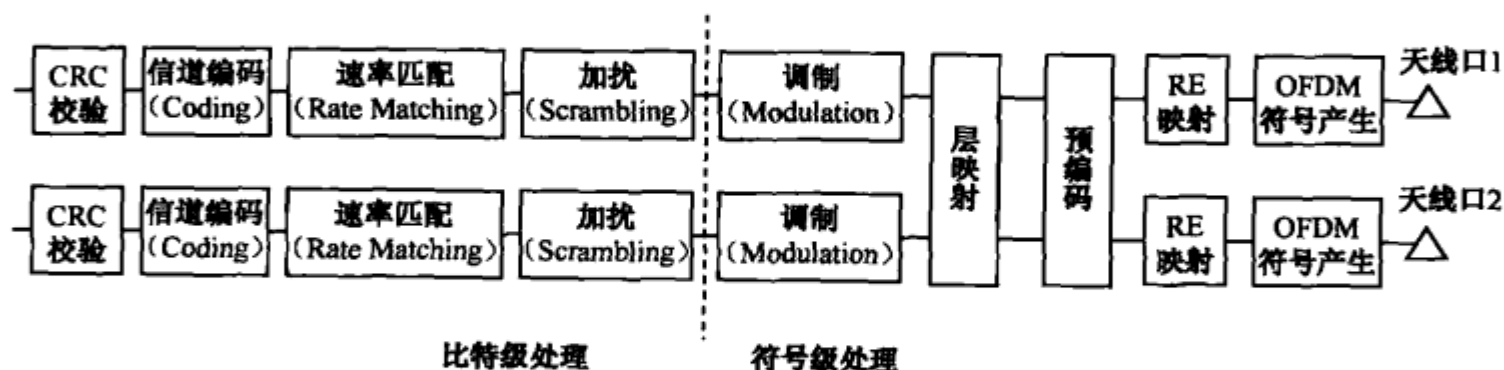


图 8-4 下行物理信道处理过程

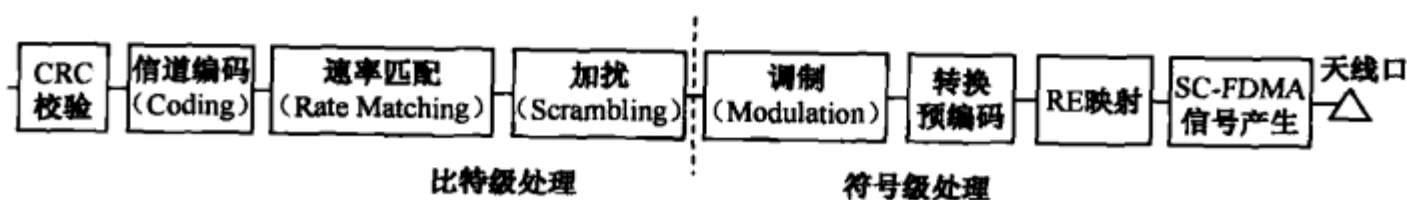


图 8-5 上行物理信道处理过程

8.4.2 六个下行物理信道

下行方向有以下六个物理信道：

物理广播信道 (Physical Broadcast Channel, PBCH)：是辖区内的喇叭，可并不是所有广告之消息都从这里广播（映射关系将在下一节介绍），部分广告之消息通过下行共享信道 (PDSCH) 通知大家的。PBCH 承载的是小区 ID 等系统信息，用于小区搜索过程。

物理下行共享信道 (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH)：是个踏踏实实干活的信道，而且是一种共享信道，为大家服务，一点不偷懒，只要略有闲暇，就接活干。PDSCH 承载的是下行用户的业务数据。

物理下行控制信道 (Physical Downlink Control Channel, PDCCH)：是发号施令的嘴巴，不干实事，但干实事的人 (PDSCH) 需要它的协调。

PDCCH 承载传送用户数据的资源分配的控制信息。举例来说，在 UMTS 中，UE 在预定时刻监听物理层寻呼指示信道 (PICH)，此信道指示 UE 是否去接收寻呼信息；在 LTE 中，因为 PDCCH 传输时间很短，引入 PICH 节省的能量很有限，所以没有物理层寻呼指示 AICH 信道，寻呼指示依靠 PDCCH。UE 依照特定的 DRX 周期在预定时刻监

听 PDCCH。同样，在 UMTS 中，有随机接入响应的信道（AICH），指示 UE 随机接入成功；在 LTE 中，也没有物理层的随机接入响应信道，随机接入响应同样依靠 PDCCH。

物理控制格式指示信道（Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH）：类似藏宝图，指明了宝物（控制信息）所在的位置。PCFICH 是 LTE 的 OFDM 特性强相关的信道，承载的是控制信道在 OFDM 符号中的位置信息。

物理 HARQ 指示信道（Physical Hybrid ARQ Indicator Channel, PHICH）：主要负责点头和摇头的工作，下属以此来判断上司对工作是否认可。PHICH 承载的混合自动重传（HARQ）的确认/非确认（ACK/NACK）信息。

物理多播信道（Physical Multicast Channel, PMCH）：类似可点播节目的电视广播塔，PMCH 承载多播信息，负责把高层来的节目信息或相关的控制命令传给终端。

这几个物理信道彼此协调工作，如同一个秩序井然的劳动场面（见图 8-6）。



图 8-6 下行物理信道的劳动场面

每一种物理信道根据其承载的信息不同，对应着不同的调制方式，如表 8-4 所示。

表 8-4 物理信道及其调制方式

物理信道	调制方式	物理信道	调制方式
PBCH	QPSK	PCFICH	QPSK
PDCCH	QPSK	PHICH	BPSK
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM	PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

PDSCH 和 PMCH 这两个信道可以根据无线环境的好坏，选择合适的调制方式。当信号质量好的时候，选择高阶的调制方式，如 64QAM；当信号质量不好的时候，选择低阶的调制方式，如 QPSK。除 PDSCH 和 PMCH 这种干实际活的信道可以变更调制方式之外，

其他协调控制类信道都采用固定的调制方式。其中，PBCH、PDCCH、PCFICH 采用 QPSK，PHICH 采用 BPSK。

8.4.3 三个上行物理信道

上行方向有以下三个物理信道：

物理随机接入信道（Physical Random Access Channel, PRACH）：干的是拜访领导时叩门的活，领导开了门，后面的事情才有门儿。如果叩门失败了，后面的事情没法说了。PRACH 承载 UE 想接入网络时的叩门信号——随机接入前导，网络一旦应答了，UE 便可进一步和网络沟通信息。

物理上行共享信道（Physical Uplink Shared Channel, PUSCH）：这是一个上行方向踏踏实实干活的信道。PUSCH 也采用共享的机制，承载上行用户数据。

物理上行控制信道（Physical Uplink Control Channel, PUCCH）：是上行方向发号施令的嘴巴，但干实事的人（PUSCH）需要它的协调。PUCCH 承载着 HARQ 的 ACK/NACK，调度请求（Scheduling Request），信道质量指示（Channel Quality Indicator）等信息。

上行物理信道的配合过程如图 8-7 所示。

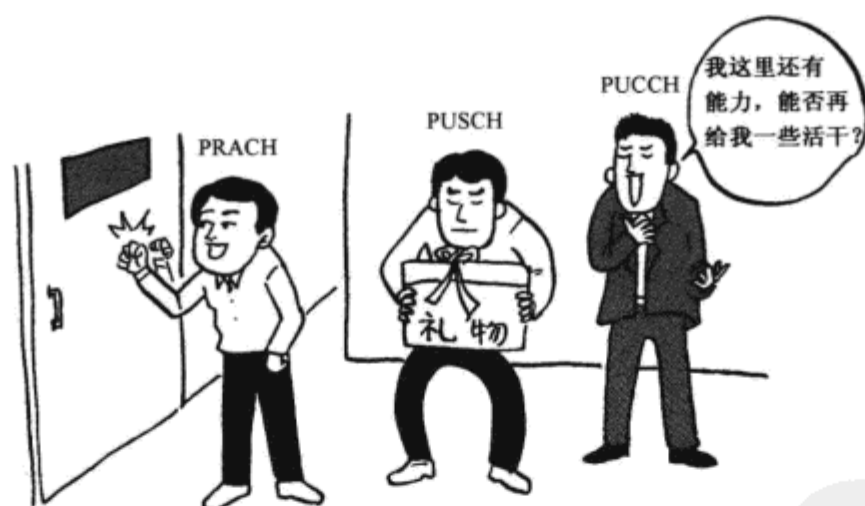


图 8-7 上行物理信道的劳动场面

上行物理信道的调制方式如表 8-5 所示。

表 8-5 上行物理信道的调制方式

物理信道	调制方式
PUCCH	BPSK, QPSK
PUSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PRACH	Zadoff-Chu 序列

PUSCH 信道可以根据无线环境的好坏,选择合适的调制方式。当信号质量好的时候,选择高阶的调制方式,如 64QAM;当信号质量不好的时候,选择低阶的调制方式,如 QPSK。

PUCCH 的调制方式有两种选择: BPSK、QPSK。

PRACH 采用 Zadoff-Chu 随机序列。Zadoff-Chu (ZC 序列) 是自相关特性较好的一种序列 (在一点处自相关值最大,在其他处自相关值为 0;具有恒定幅值的互相关特性,较低的峰均比特性)。在 LTE 中,发送端和接收端的子载波频率容易出现偏差,接收端需要对这个频偏进行估计,使用 ZC 序列可以进行频偏的粗略估计。

8.4.4 LTE 与 UMTS 物理信道的比较

LTE 有 6 个下行物理信道 (Channel)、3 个上行物理信道 (Channel)、2 个下行物理信号 (Signal)、1 个上行物理信号 (Signal)。物理信道的数目比 UMTS 少了很多,取消了专用物理信道,二者对比如表 8-6 所示。

表 8-6 LTE 与 UMTS 物理信道对比

物理信道类型	LTE 物理信道	3GPP UMTS 物理信道
下行信道	物理广播信道 (PBCH)	主公共控制物理信道 (P-CCPCH, 承载广播消息)
	物理下行控制信道 (PDCCH)	专用物理控制信道 (DPCCH)、E-AGCH、E-RGCH (为支持 HSUPA 功能增加的下行信道)
	物理下行共享信道 (PDSCH)	物理下行共享信道 (PDSCH)
		高速物理下行共享信道 (HS-PDSCH, 为支持 HSDPA 增加的下行共享信道)
		下行专用物理数据信道 (DPDCH)
		从公共控制物理信道 (S-CCPCH)
	物理控制格式指示信道 (PCFICH)	—
	物理混合 ARQ 指示信道 (PHICH)	E-HICH (为支持 HSUPA 功能增加的下行信道)
	物理多播信道 (PMCH)	—
	同步信号 (Synchronization Signal)	同步信道 (SCH)
	下行参考信号 RS (Reference Signal)	公共导频信道 (CPICH)
上行信道	物理随机接入信道 (PRACH)	物理随机接入信道 (PRACH) 增强型上行随机接入信道 (E-RUCCH, UE 通过 E-RUCCH 信道向 NODEB 请求 HSUPA 物理资源)
	物理上行共享信道 (PUSCH)	物理上行共享信道 (PUSCH) 增强型物理上行信道 (E-PUSCH for TDD HSUPA) 增强型专用物理数据信道 (E-DPDCH for FDD HSUPA)

续表

物理信道类型	LTE 物理信道	3GPP UMTS 物理信道
上行信道	物理上行控制信道 (PUCCH)	上行专用物理数据信道 (DPDCH)
		物理公共分组信道 (PCPCH)
		上行专用物理控制信道 (DPCCH)
	上行参考信号 RS(Reference Signal)	各种指示信道: PICH、AICH、AP-AICH、CD/CA-ICH、CSICH
		增强型上行控制信道 (E-UCCH, 用于承载 E-PUCH 译码的控制信息)
		高速专用控制信道 (HS-DPCCH)、高速共享控制信道 (HS-SCCH) (支持 HSDPA 设置上行协调信道)
		上行导频信道 (UpPCH)

8.5 物理信号

物理信号是物理层产生并使用的、有特定用途的一系列无线资源单元 (Resource Element)。物理信号并不携带从高层而来的任何信息, 类似没有高层背景的底层员工, 配合其他员工工作时, 彼此约定好使用的信号。它们对高层而言不是直接可见的, 即不存在高层信道的映射关系, 但从系统功能的观点来讲是必需的。

在下行方向上, 定义了两种物理信号:

参考信号 (Reference Signal, RS);

同步信号 (Synchronization signal, SS)。

在上行方向上, 只定义了一种物理信号:

参考信号 (Reference Signal, RS)。

下面具体介绍一下这些物理信号的特点和作用。

8.5.1 下行参考信号

下行参考信号 RS 本质上是一种伪随机序列, 不含任何实际信息。这个随机序列通过时间和频率组成的资源单元 (RE) 发送出去, 便于接收端进行信道估计, 也可以为接收端进行信号解调提供参考, 非常类似 CDMA 系统中的导频信道。

RS 信号如同潜藏在人群中的特务分子, 不断把一方的重要信息, 透露给另一方, 便于另一方对这一方的情况进行判断。

频偏、衰落、干扰等因素都会使得发射端的信号与接收端收到的信号存在一定的偏差。信道估计的目的就是使接收端找到这个偏差，以便正确地接收信息。

信道估计并不需要时时刻刻进行，只要在关键位置出现一下便可。也就是说，RS 离散地分布在时、频域上，它只是对信道的时、频域特性进行抽样而已。

为了保证 RS 能够充分且必要反映无线信道的时频特性，RS 在天线口的时、频单元上分布必须有一定规则。

RS 分布越密集，则信道估计越精确，但开销会增大很多，占用过多的无线资源，降低系统传递有用信号的容量。因此，RS 的分布不宜过密，也不宜过于分散。

RS 在时、频域的分布遵循以下规则：

(1) RS 在频域上的间隔为 6 个子载波。

(2) RS 在时域上的间隔为 7 个 OFDM 符号周期。

(3) 为了最大程度地降低信号传送过程中的相关性，不同天线口的 RS 出现的位置不宜相同。

以 2 个天线端口为例，RS 在时、频域上的分布如图 8-8 所示。

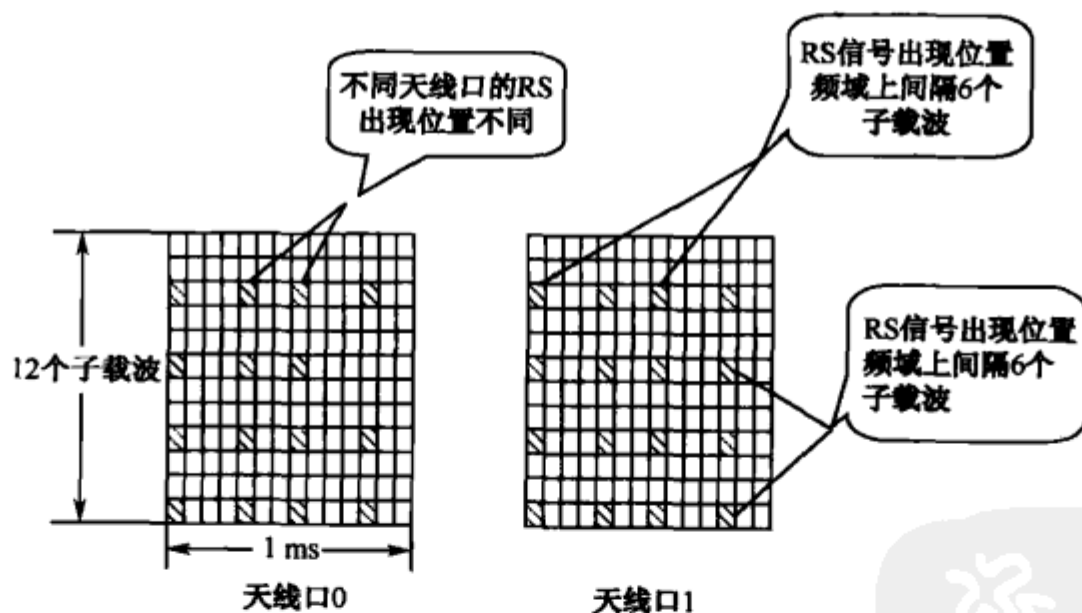


图 8-8 下行参考信号 RS 的分布

8.5.2 下行同步信号

同步信号 (Synchronization Signal, SS): 用于小区搜索过程中 UE 和 eUTRAN 的时、频同步。给空中战机加油，首先要让加油飞机与空中战机同步。同样道理，UE 和 E-UTRAN 做业务连接的必要前提就是时隙、频率的同步。

同步信号包含两部分：

主同步信号（Primary Synchronization Signal, PSS）：用于符号时间对准，频率同步以及部分小区的 ID 侦测；

从同步信号（Secondary Synchronization Signal, SSS）：用于帧时间对准，CP 长度侦测及小区组 ID 侦测。

这里补充说明一下。在 LTE 里，物理层小区 ID（Physical Cell ID, PCI）分为两部分：小区组 ID（Cell Group ID）和组内 ID（ID within Cell Group）。

LTE 物理层小区组有 168 个，每个小区组由 3 个 ID 组成。于是共有 504（168×3）个独立的小区 ID（Cell ID）。

$$\text{Cell ID} = \text{Cell Group ID} \times 3 + \text{ID within Cell Group} \quad (8-1)$$

其中，Cell Group ID，取值范围为 0~167；组内 ID，取值范围为 0~2。

在频域里，不管系统带宽是多少，主/辅同步信号总是位于系统带宽的中心（中间的 64 个子载波上，协议版本不同、数值不同），占据 1.25 MHz 的频带宽度。这样的好处是，即使 UE 在刚开机的情况下，还不知道系统带宽，也可以在相对固定子载波上找到同步信号，方便进行小区搜索，如图 8-9 所示。

在时域里，同步信号的发送也须遵循一定规则。为了便于 UE 寻找，要在固定的位置发送。无须过密，也不能过疏。

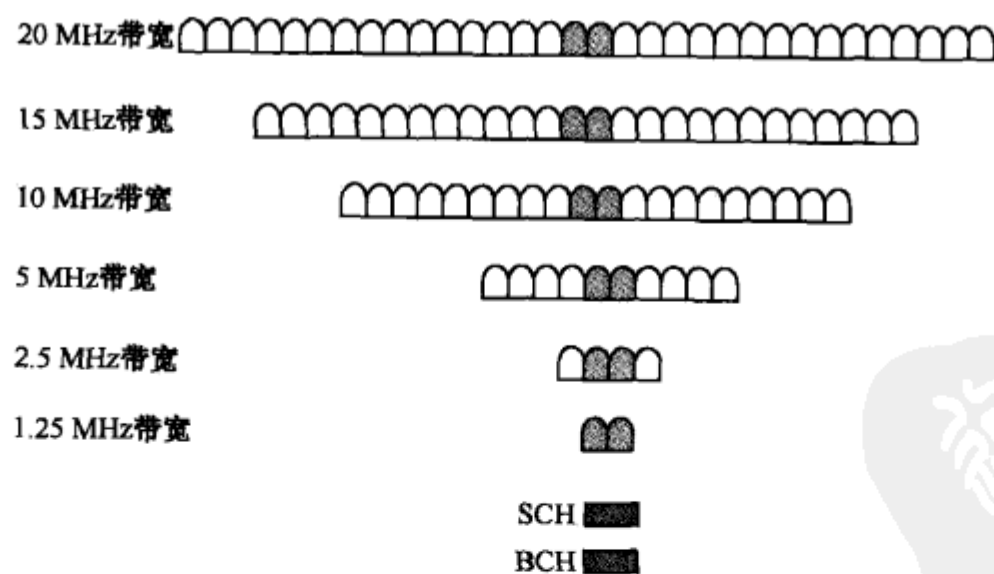


图 8-9 同步信道占用中心位置带宽

在时域里，同步信号在 FDD-LTE 和 TDD-LTE 的帧结构里的位置略有不同。

协议规定，FDD 帧结构传送的同步信号，位于每帧（10 ms）的第 0 个和第 5 个子帧的第一个时隙位置中；主同步信号位于传送时隙的最后一个 OFDM 符号里；次同步信号位于传送时隙的倒数第二个 OFDM 符号里，如图 8-10 所示。

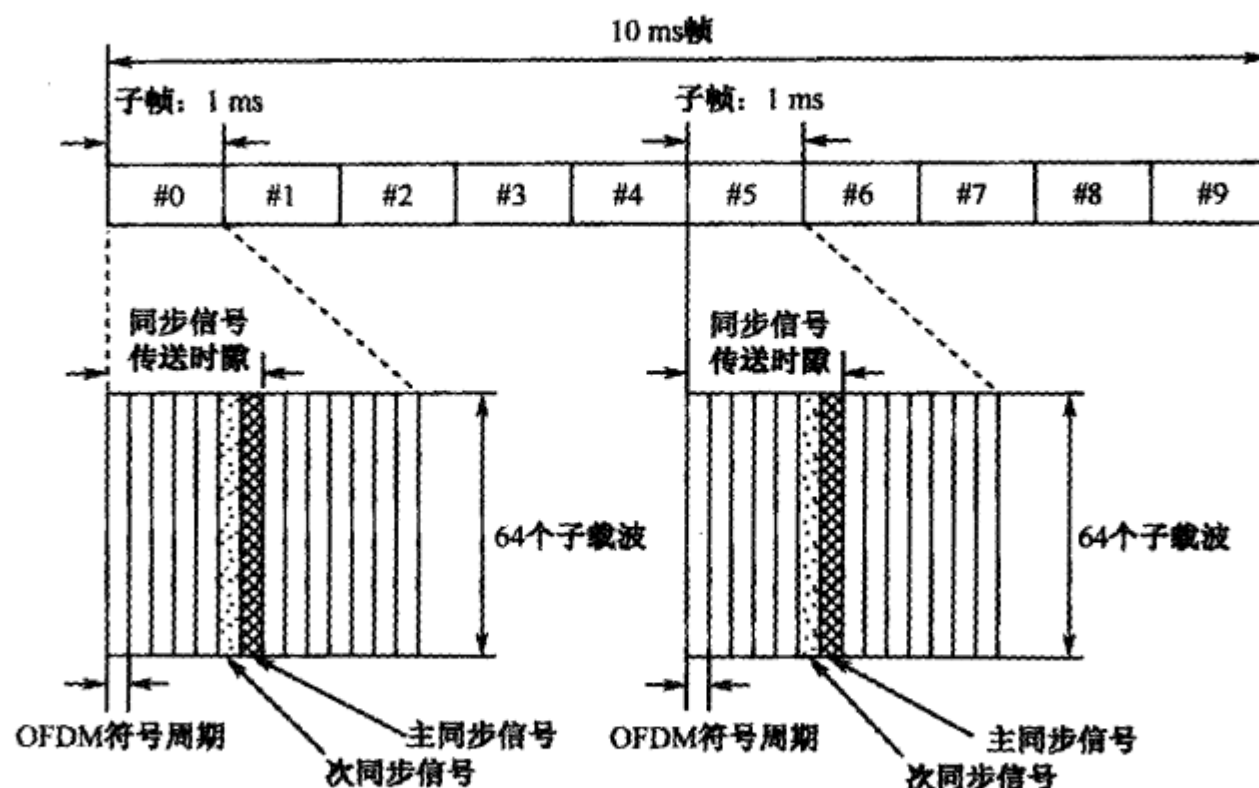


图 8-10 FDD 同步信号的发送位置

在时域里，同步信号在 TDD 帧结构的位置与 FDD 是不一样的。在 TDD 中，主同步信号位于特殊时隙 DwPTS 里，位置和特殊时隙的长度配置有一定关系；次同步信号位于 0 号子帧的 1#时隙的最后一个符号里，如图 8-11 所示。

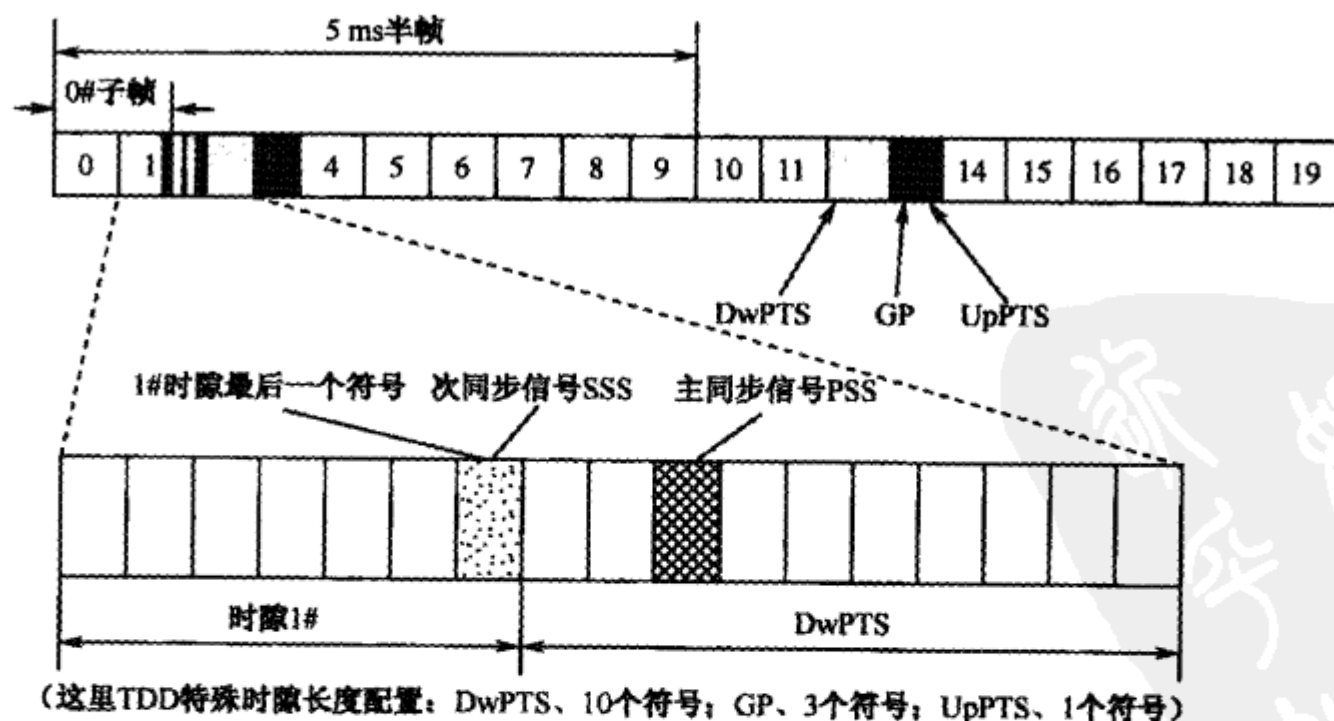


图 8-11 TDD 同步信号的发送位置

8.5.3 上行参考信号

上行参考信号 RS (Reference Signal) 类似下行参考信号的实现机理。也是在特定的时频单元中发送一串伪随机码, 类似 TD-SCDMA 里的上行导频信道 (UpPCH), 用于 eUTRAN 与 UE 的同步以及 eUTRAN 对上行信道进行估计。

上行参考信号包含两种情况:

(1) 一种是 UE 和 eUTRAN 已经建立的业务链接。

上行共享信道(PUSCH)和上行控制信道(PUCCH)传输时的导频信号, 是便于 eUTRAN 解调上行信息的参考信号。这种上行参考信号称为解调参考信号 (Demodulation Reference Signal, DM RS)。DM RS 可以伴随 PUSCH 传输, 也可以伴随 PUCCH 传输, 占用的时隙位置及数量和 PUSCH、PUCCH 的不同格式有关。这种参考信号类似一种寄生虫, 总是寄生在生物体上, 但它对生物体是有用的。

(2) 另外一种就是 UE 和 eUTRAN 还没有建立业务链接。

处于空闲态的 UE, 无 PUSCH 和 PUCCH 可以寄生。在这种情况下 UE 发出的 RS, 不是某个信道的参考信号, 而是无线环境的一种参考导频信号, 称做环境参考信号 (Sounding Reference Signal, SRS)。这时 UE 没有业务链接, 仍然给 eUTRAN 汇报一下信道环境信息, 它具有一种高尚的品质。

我们知道, 上行采用的是 SC-FDMA 多址方式, 每个 UE 只占用系统带宽的一部分。于是 DM RS (解调 RS) 只能占用部分系统带宽, 即伴随着 PUSCH 和 PUCCH 分配的带宽。而 SRS (环境 RS) 则不然, 它不受 PUSCH 和 PUCCH 可分配的带宽制约。比单个 UE 分配到的带宽要大, 它的宏伟而无私的目标是为 eNodeB 作全带宽的上行信道估计提供参考。

既然是参考信号, 就需要方便被参考。不要像有些东西的“温馨提示”一样, 那么不容易被参考。如果要做到容易被参考, 就需要在约定好的固定位置出现。

如图 8-12 所示。伴随 PUSCH 传输的 DM RS 约定好的出现位置是每个时隙的第 4 个符号。当 PUCCH 信道携带上行确认 (ACK) 信息的时候, 伴随的 DM RS 占用每个时隙的连续 3 个符号; 当 PUCCH 信道携带上行信道质量指示 (CQI) 信息的时候, 伴随的 DM RS 占用每个时隙的 2 个符号。环境参考信息 SRS 由多少个 UE 发送, 发送的周期、发送的带宽是多大可由系统调度配置。SRS 一般在每个子帧的最后一个符号发送。

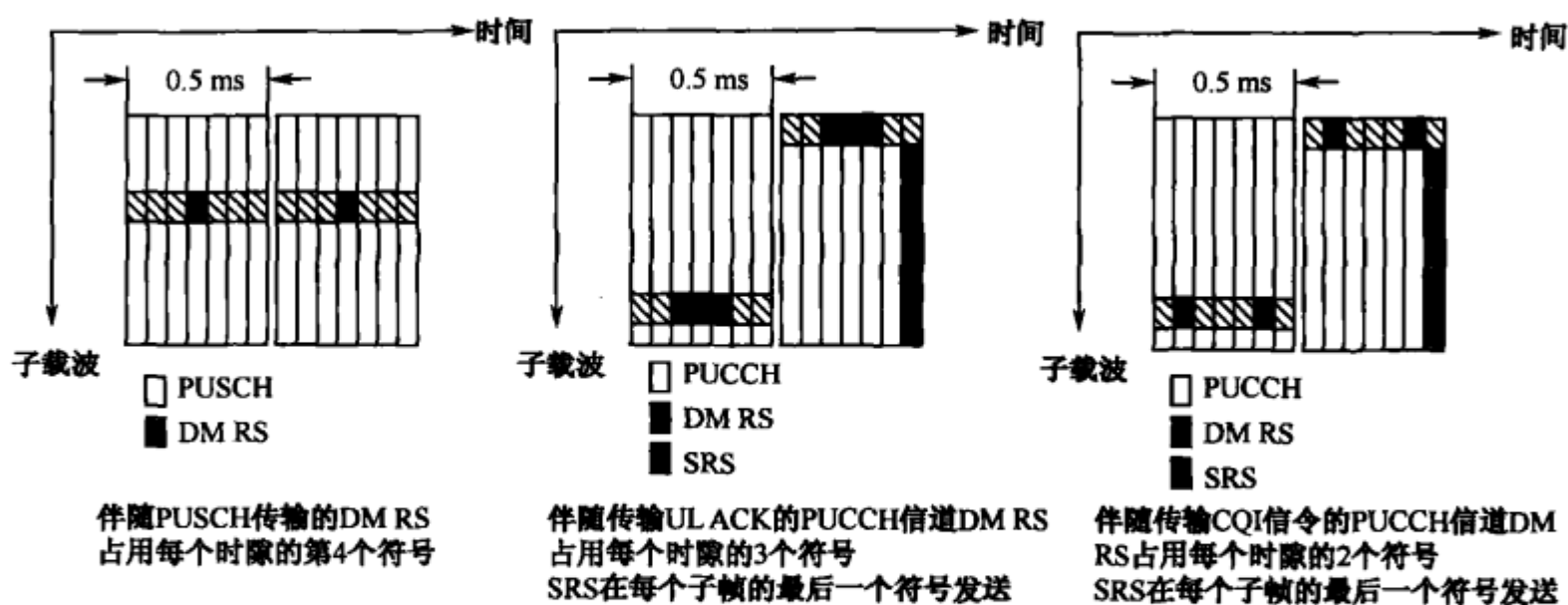


图 8-12 上行参考信号的发送位置

8.6 信道映射

信道映射就是指逻辑信道、传输信道、物理信道之间的对应关系，这种对应关系包括底层信道对高层信道的服务支撑关系及高层信道对底层信道的控制命令关系。

LTE 信道映射关系如图 8-13 所示。

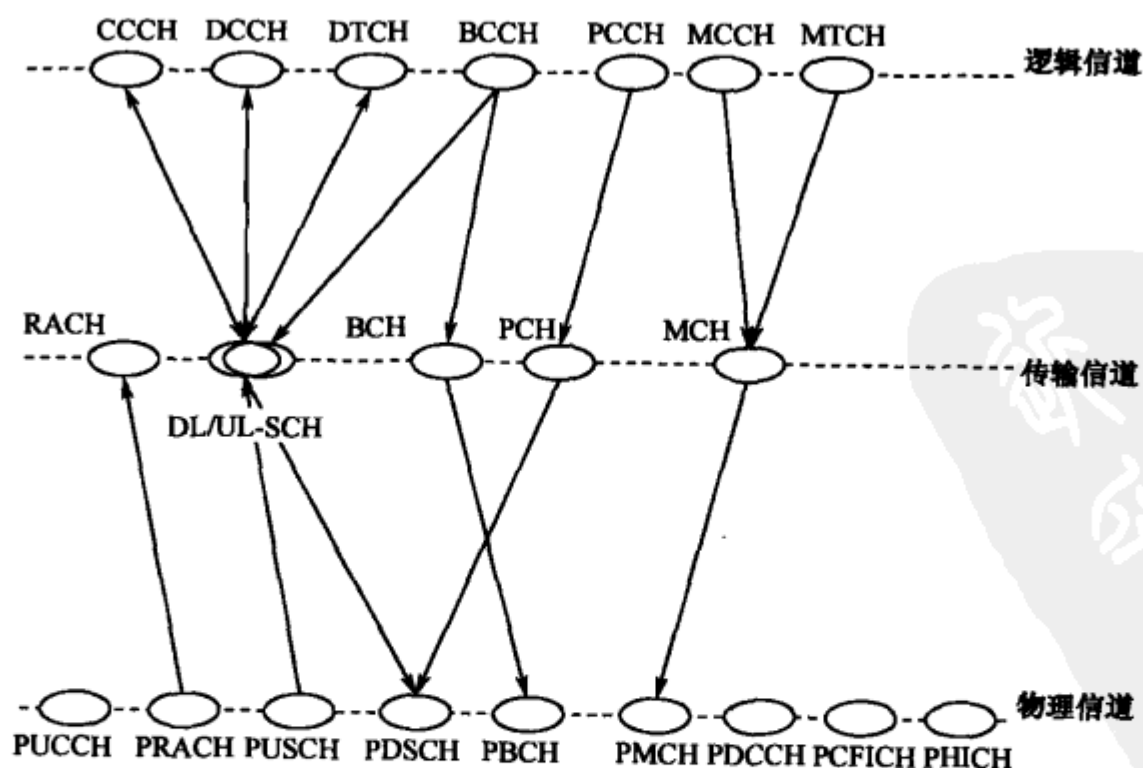


图 8-13 LTE 信道映射关系图

从图 8-13 中可以看出，LTE 信道映射的关系有以下几个规律：

(1) 高层一定需要底层的支撑，工作需要落地；

(2) 底层不一定和上面都有关系，只要干好自己份内的活，无须全部走上层路线；

(3) 无论是传输信道、还是物理信道，共享信道干的活，种类最杂，它可以包容很多。

与 UMTS 信道映射关系相比，LTE 的信道映射关系在以下几个方面向简单化、高效化、资源利用最大化的方向迈进了一步：

(1) 由于精兵简政，信道职能的增强，使映射关系变得更加简单清晰。

传输信道 DL/UL-SCH 的功能很强大，物理信道 PUSCH、PDSCH 比 UMTS 干活的信道增强了很多。

(2) 部分领导职能下移，降低了时延，提高了效率。

在 UMTS 中，传输信道 RACH 是有逻辑信道与之映射的；而到了 LTE 中，RACH 没有高层领导，全部自己拿主意，因而减少了处理环节，缩短了时延，意味着提高了效率。

(3) 以前配置专车的干部，现在一律使用公车，从而提高了公车资源使用效率。

例如 PCH，在 UMTS 里，它有专门的信道 S-CCPCH 为其提供工作支撑；LTE 机构一改革，它和业务数据一起，都使用 PDSCH 共享信道了。

以如下几个消息的处理过程为例。

(下行) 广而告之消息——主消息块 (MIB)：

BCCH 逻辑信道→BCH 传输信道→PBCH 物理信道。

(下行) 广而告之消息——系统消息块 (SIB)：

BCCH 逻辑信道→DL-SCH 传输信道→PDSCH 物理信道。

(下行) 寻人启示消息：

PCCH 逻辑信道→PCH 传输信道→PDSCH 物理信道。

(下行) 业务数据：

DTCH 逻辑信道→DL-SCH 传输信道→PDSCH 物理信道。

(下行) 控制信息：

DCCH (专用) 逻辑信道→DL-SCH 传输信道→PDSCH 物理信道；

CCCH (公用) 逻辑信道→DL-SCH 传输信道→PDSCH 物理信道。

(下行) 多播数据 (类似电视节目)：

MTCH (业务) 逻辑信道→MCH 传输信道→PMCH 物理信道；

MCCH (控制) 逻辑信道→MCH 传输信道→PMCH 物理信道。

(上行) 网络敲门 (随机接入) 消息:

PRACH 物理信道→RACH 传输信道。

(上行) 共享业务控制消息:

PDUSCH 物理信道→UL-SCH 传输信道→DCCH (专用) 逻辑信道;

PDUSCH 物理信道→UL-SCH 传输信道→CCCH (公用) 逻辑信道;

PDUSCH 物理信道→UL-SCH 传输信道→DTCH (业务) 逻辑信道。



办事的关键流程——物理层过程

知识要点

终端和网络需要建立密切的信息交互联系。手机和网络都要进行哪些物理层的交互呢？各种交互的特点是什么？这是无线侧工程师在工作中经常碰到的问题。

终端需要搜索到服务自己的网络，然后接入网络，这就涉及小区搜索过程和随机接入过程；在交互过程中，终端和网络都需将功率调节到合适的大小，以增强覆盖或抑制干扰，这就是功率控制过程；网络想找到某一个终端，以期与其建立业务连接，这就是寻呼过程；网络的自适应能力依赖于对无线环境的精确感知，测量过程为网络的自适应提供依据；终端和网络的有效信息的交互，依赖于共享信道的物理层过程。

物理层过程是无线工程师定位和解决无线侧问题时非常重要的知识。本章内容将助你在 LTE 的知识殿堂翩翩起舞。

三吉皮皮国服务百姓（终端）的基层干部队伍是基站，物理层又是政府的服务窗口，直接和百姓交互。如何为百姓服务好，提供标准化的服务，首先要明确一些办事流程和关键过程。

这不，三吉皮皮国的很多基层单位都发出了招聘一批负责运送货物的公务人员的通知。里面涉及的关键过程有：发布招聘广播通知、接收简历、对聘用人员的行为进行控制，有事时找到合适的人员，并且安排合适的工作（见图 9-1）。

另外，找工作的人也需要完成一些关键过程，以便能找到一个为政府基层单位工作的机会。

只身一人，来到一个陌生的城市，密密麻麻的高楼大厦，找不到自己的家。阿端（终端的化名）很是寂寞。没有工作，更没有心爱的人，怎么办？

第一步就是工作大搜索（如同物理层的小区搜索过程）。三吉皮皮国的很多基层单位通过网络、报纸、招聘会等公共渠道（公共信道，对每个人都可见）发布了各



图 9-1 招聘会的办事流程

种招聘信息（下行消息）。以参加招聘会为例，阿端要知道招聘会的时间，首先需要时间同步；招聘会召开的频率也要了解一下，这叫做频率同步。同步上就好办，就不会错过招聘会。然后接收招聘会上各单位的职位信息（是一种广播消息），把对自己有用的信息接收下来，看看职位是否匹配。

第二步就是随机投递简历（如同物理层的上行随机接入过程）。阿端要主动申请工作机会（申请资源），等待公司的回应（Response）。特别中意的单位，没有响应，它要反复申请，直到达到最大忍耐次数，才放弃。直到有一天一个公司约见了它。

第三步就是应聘公司的面试过程。阿端和该单位的负责人在交互信息的过程中类似于物理层的功率控制过程。阿端以一定的音量进行自我介绍的时候，这个公司的负责人听不清楚，于是提高声音；当发现声音太大时，就降低自己的声音；如果有其他组的声音太大，影响阿端的发挥，这个面试负责人就通知其他组把音量降下来（类似小区间干扰控制）。

接下来，阿端进入了一个基层单位，负责给该单位运输货物，处于随时待命的状态（这个过程类似寻呼过程）。大多数时候，阿端并不需要始终处于警戒状态，没有事情的时候可以略做休息（类似不连续接收 DRX）。当他的固定电话响的时候，有可能是给他派车的命令（类似寻呼指示等），他赶快拿起电话接听，把属于自己的派车信息接收下来。有时是另外一个司机的派车命令，他就不必关注了，因为另外一个司机也在并联的固定电话上接听该指示。

阿端在该单位工作了一段时间，单位要对他进行考核（类似基站对手机的上行测量），看它开车是否熟练、是否有眼力劲儿。阿端也在评估单位给他的待遇（类似手机对基站的下行测量），看单位是否按时发工资，待遇是否诱人。

单位组织了一个货运车队（类似共享信道，很多类型的信息可以承载），要运输出去大量的货物（在 PDSCH 信道上），也要拉回大量的原材料（在 PUSCH 信道上）。货物运送清单（类似 PDCCH）标示了货物的类型、装车信息、数量，可以帮助接收方正确地接收货物。往回运输的货物也是该单位在清单上（也是通过 PDCCH 信道）指定好的货物（见图 9-2）。

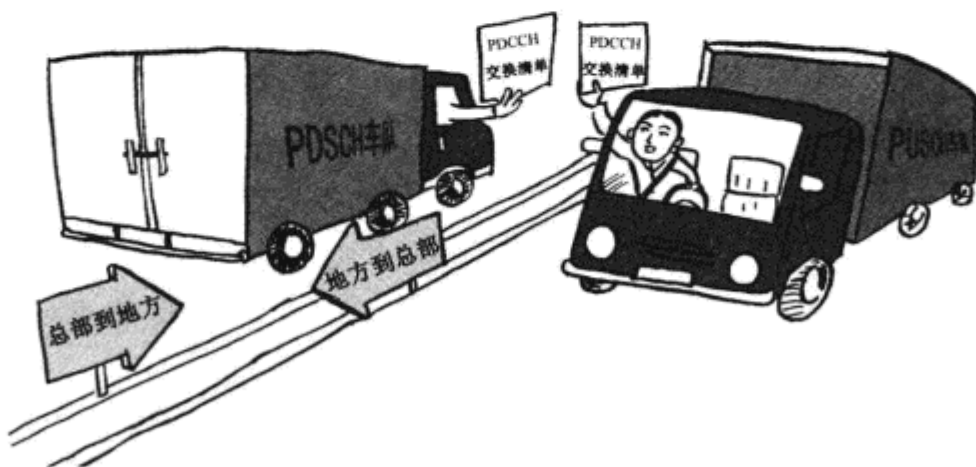


图 9-2 货运车队

在货物运输过程中，重要的事情就是把货物完好地运出去，避免货物损坏。万一出错还得重新发货。这个过程就是货物重传和合并的过程（类似 HARQ 过程）。

车队的货物运输还要根据道路的情况和市场需求的情况进行调整。道路有拥堵的时候，也有空闲的时候，发送货物的时间可以根据道路拥堵的情况灵活调整；市场需求有淡季、有旺季，发送货物的多少可以根据市场需求的情况灵活调整。这个过程就是货物运输的自适应过程（类似链路自适应过程）。

“采得百花成蜜后，为谁辛苦为谁甜。”货运车队的工作异常辛苦，国王早看在眼里。

9.1 物理层过程

LTE 无线系统的物理层过程非常复杂，但非常重要。无线信道环境不断变化，需要不断地调整系统参数；在终端开机、重新激活时，需要和系统握手；当终端移动时，需要实现切换和漫游；在终端和基站交互大量数据的时候，需要大量的协调配合工作，也需要进行各种自适应操作。这些都需要物理层过程的参与，从而完成各种配置的预设和重调。

在 LTE 中，下行物理层过程有：小区搜索过程、下行功率控制、寻呼过程、手机下

行测量过程、下行共享信道物理过程。

上行物理层过程有：随机接入过程、上行功率控制、基站上行测量过程、上行共享信道物理过程。

9.2 小区搜索过程

一个刚毕业的大学生想得到一份好的工作或者想更换一个好的工作，首先获取公司的相关信息，如公司的名称（类似小区 ID）、公司对人员素质技能的要求（需要与企业要求同步）、公司对员工工作的着装服饰、工作时间、操作规范等基本要求（类似网络的配置信息）。这就是工作搜索过程。

在无线通信制式中，终端和基站建立无线通信链路的前提是必须先进行小区搜索。

在以下两种情况下，必须进行小区搜索：

一是用户开机；

二是小区切换。

用户一开机，必须首先和组织取得联系，万一别人想找他，或者他想找别人，不和网络报个到肯定是不行的。

还有用户移动时，换了小区，相当于员工跳槽了，也必须和新的组织取得联系，获取新小区的必要信息。

在 LTE 中，用户终端开机或小区切换时，也需要和小区取得新的联系，和小区的节奏（时间和频率）保持同步，获取小区的必要信息。

也就是说，小区搜索过程中，用户 UE 要达到以下三个目的：

(1) 下行同步：符号定时、帧定时、频率同步。

(2) 小区的标识号（ID）获取。

(3) 广播信道（BCH）的解调信息获取。

广播信道广播的信息有：小区的传输带宽（LTE 中，各小区传输带宽不是固定的）、发射天线的配置信息（每个基站的天线数目可能不一样）、循环前缀（CP）的长度（单播和多播业务 CP 长度不一样），等等。

没有小区搜索过程，用户（UE）两眼一抹黑，对小区条件一点不知道，将不知所措、无所适从。小区搜索过程的作用还真是必不可少。

9.2.1 三个信道、四个步骤

LTE 的 UE 初来乍到，需要察言观色。察谁的言？观谁的色？这是必须要清楚的。

助力 UE 完成小区搜索过程的功臣是三个信道：

同步信道 (SS、SCH) 包括：主同步信道 (PSS、P-SCH) 和从同步信道 (SSS、S-SCH)；

参考信道 (RS)；

广播信道 (BCH)。

这三种下行的物理信道 (或信号) 对于 UE 来说，自然非常重要。他们说的话 UE 需要洗耳恭听，以便用来完成小区搜索。

我们想听某一广播节目的时候，必须先恰在恰当的时间 (时间同步) 去调整收音机旋钮 (频率同步)，然后才能收到广播节目。很多仪器的调节旋钮有两个：粗调和细调。小区搜索的同步也分粗调和细调。粗调用的是同步信道 (SS)，细调用的是参考信号 (RS)。

小区搜索过程遵循下面的先后顺序：

先同步，后听广播；

先粗调，后细调。

小区搜索过程分为四个步骤，如图 9-3 所示。

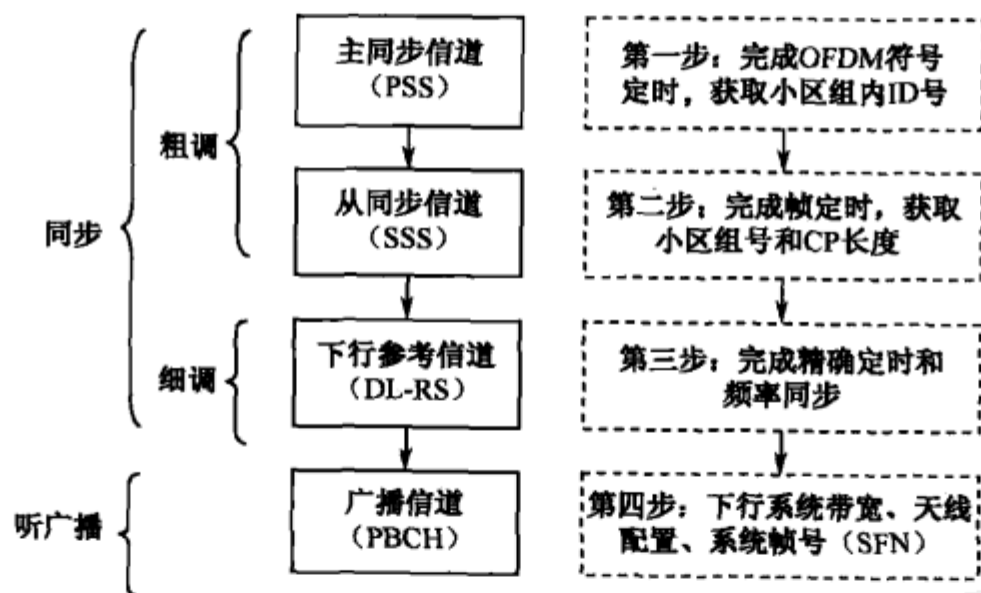


图 9-3 小区搜索四大步骤

第一步，从 PSS 信道上获取小区的组内 ID；

第二步，从 SSS 信道上获取小区组号，这里的小区组号多达 168 个。

协议规定了 3 个 PSS 信号，使用长度为 62 的频域 Zadoff-Chu (ZC 序列，有较好的自相关特性和较低的峰均比)，分别对应小区组内的 ID 号；SSS 信号则使用二进制 M 序列，有 168 种组合，与 168 个物理层小区标识组对应。所以 UE 把 PSS 和 SSS 接收下来后，就可以确定小区标识。

先获取组内的顺序号，再获取小区组的顺序号。这个顺序和我们日常生活中常见的

顺序感觉不一样。我们一般是先知道自己是哪个组的，然后再确认组内是什么位置。但小区搜索这两步的先后顺序，很像在小说《三国演义》的桃园三结义中，刘备、关羽、张飞先各自找着自己的组内位置，然后三人作为一组，再去社会上找小组的位置。社会上利益小组的位置很多，需要辛苦搜索过程。

第三步，UE 接收下行参考信号 (DL-RS)，用来进行精确的时频同步。

下行参考信号 (DL-RS) 是 UE 获取信道估计信息的指示灯。对于频率偏差、时间提前量、链路衰落情况，UE 从这里了解清楚，然后在时间和频率上紧跟基站的步伐。

第四步，UE 要接收小区广播信息。

完成了前三步，UE 就完成了和基站的时频同步，可以接收基站对广大手机的通告了。通告是面向小区内所有 UE 的，有需要的就去听一下。从这份通告上，可以看出下行系统带宽是多少，天线配置如何，本小区的系统帧号是多少。

大家要清楚，在以往的无线制式中，下行系统带宽和天线配置是不言而喻的，是定死的。在 LTE 中，得益于 OFDM 和 MIMO 的使用，下行系统带宽和天线配置可以非常灵活了，所以也增加了这部分信令开销。

9.2.2 在合适的位置寻找合适的信息

SS 信号和 BCH 信道是小区搜索时，用户最先捕获的物理信道。因此，必须保证用户在没有任何先验信息的情况下能够得到这些信息。

办法就是：在时域上和频域上安排固定位置。

首先我们复习一下第 8 章的内容。同步信道每个帧发送两次，PSS、SSS 在时域的位置 TDD 和 FDD 不一样。在 FDD 中，主同步信号 PSS 和从同步信号 SSS 分别在第 0 个和第 5 个子帧的第一个时隙的最后两个符号位置上。在 TDD 中，主同步信号 PSS 在 DwPTS 位置上，次同步信号 SSS 在第 0 个子帧的第 1 个时隙的最后一个符号上。

BCH 在 SS 之后被用户接收，因此二者须有一个固定的时间间隔 τ ，如图 9-4 所示。

在每个下行帧中，SS 和 BCH 可以发送一次或者多次，SS 和 BCH 的数目也可以不同，发送数目的选择，需要考虑检测性能、系统开销等多种因素。对于 BCH 出现的时间位置，终端需要知道，否则无法找到它。

不管小区的总体传输带宽多大，SCH 信道和 BCH 信道只在小区传输带宽的中心位置传输，而且 SCH 和 BCH 总是占用相同的带宽 (1.25 MHz)。其中有用于子载波数目是 64 个，中间有一个直流子载波 (DC)，UE 实际需要处理的是 63 个子载波。

在小区搜索的开始，检测系统的中心带宽为 1.25 MHz。利用同步信道进行下行同步，获取小区标识；然后还是在这 1.25 MHz 中心带宽上，接收 BCH 相关的解调信息。UE 从 BCH 的解调信息中获取了分配的系统带宽，然后将工作带宽偏移到指定的频带位置，

至此才可以进行数据传输，整个过程如图 9-5 所示。

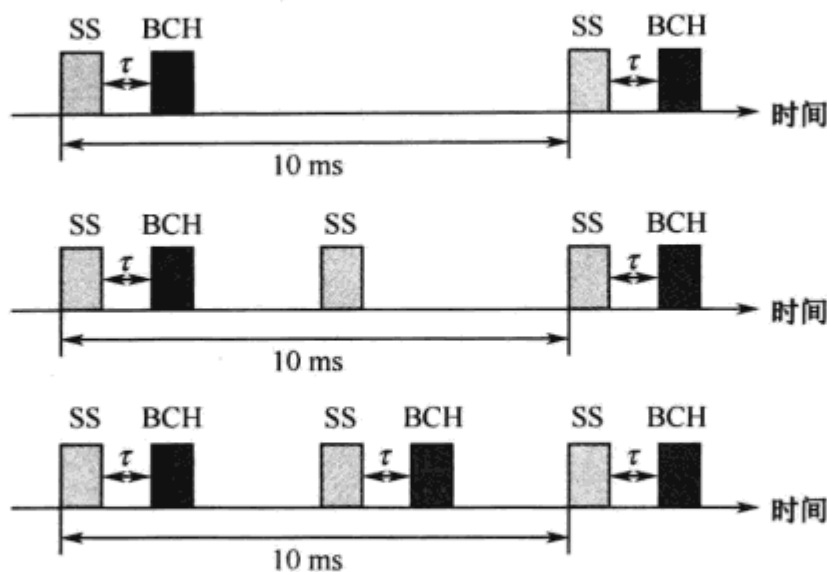


图 9-4 SCH 和 BCH 的时间位置关系

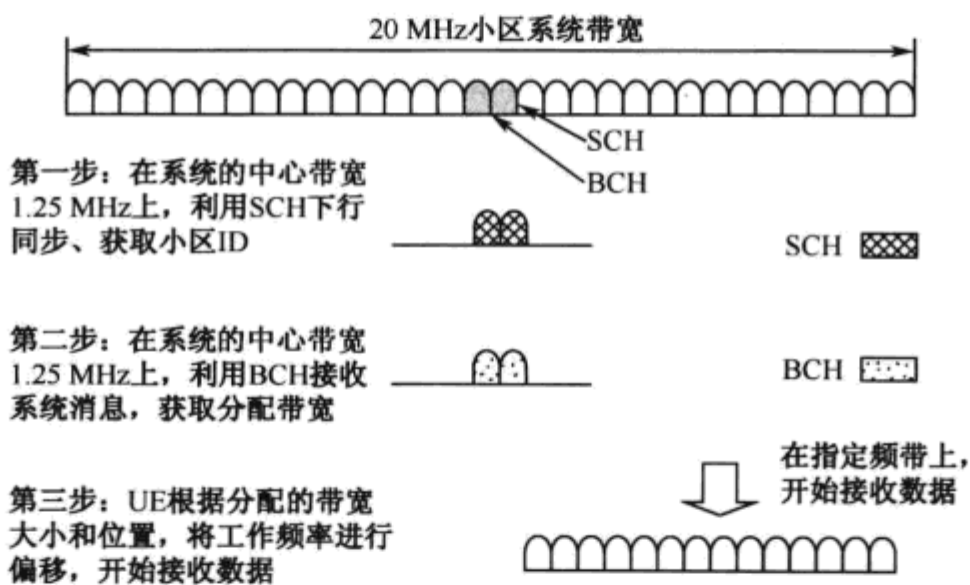


图 9-5 在中心带宽接收 SCH 和 BCH 信息

9.3 随机接入过程

随机接入过程主要完成用户信息在网络侧的初始注册。

通过小区搜索，用户知道了网络侧的信息；而通过随机接入过程，网络侧又知道了用户的必要信息。如果说一个居民看到公告栏上居委会发出困难补助的通知（广播消息）是一个小区搜索的过程，那么该居民主动联系居委会提出困难补助申请的过程就类似随

机接入过程（见图 9-6）。



图 9-6 随机接入与困难补助申领

和 UMTS 随机接入过程不同，LTE 的随机接入过程不仅完成用户信息的初始注册，还需要完成上行时频同步（Time Advanced, TA，时间提前量）与用户上行带宽资源的申请。

在 LTE 系统中，上行时频同步和重新申请上行带宽资源，都需要启动随机接入过程来完成。

大致说来，启动随机接入过程的场景有以下三种：

- (1) 开机。
- (2) UE 从空闲状态到连接状态。
- (3) 发生切换。

根据接入时终端的同步状态的不同，随机接入过程可分为同步的随机接入和非同步的随机接入。

同步的随机接入过程已经处于同步状态，没有上行同步的目的，主要的目的只是上行带宽资源的申请，而同步的随机接入过程较少使用。

我们这里主要介绍非同步的随机接入过程。

非同步随机接入是在用户 UE 没有上行同步，或者丧失上行同步时，需要和网络侧请求资源分配的时候所使用的接入过程。

9.3.1 Preamble 结构

在上行失步的情况下，终端和网络侧都不知道彼此之间的距离，容易导致基站的上行接收窗错位。这就要求时域采用特殊的 Preamble 结构（加 CP）来克服可能的时间窗错位，如图 9-7 所示。

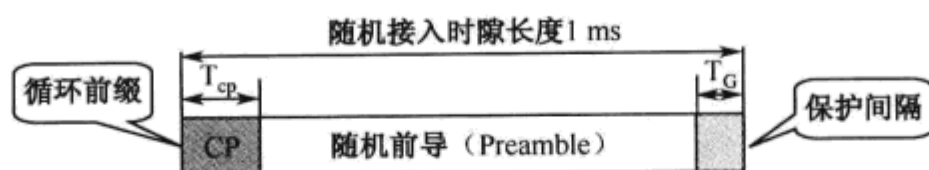


图 9-7 Preamble 的时隙结构

随机接入过程在系统负载较轻的时候具有很好的效果。但是在接入用户数目较多的时候，完全基于竞争的机制，就会发生比较严重的冲突碰撞，因而降低系统的容量。

一般采用基于资源预留的接入机制。在随机接入过程中，一定要选用冲突概率小、相关性较低的同步序列，做上行同步。ZC 序列（Zadoff-Chu 序列）满足这个要求。

随机接入前导消息 Preamble 的位置，在时域上是可配置的，在频域上，一般位于 PUCCH 信道的内侧，如图 9-8 所示。

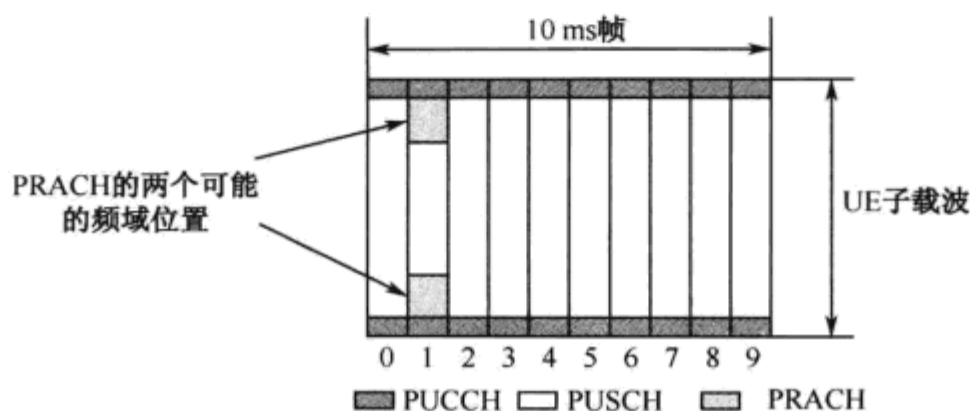


图 9-8 随机接入 Preamble 频率位置占用

9.3.2 LTE 与 UMTS 随机接入过程对比

对于物理层来讲，物理层的随机接入过程包含两个步骤：

发送：UE 发送随机接入 Preamble；

应答：eUTRAN 对随机接入的响应。

物理层首先要从高层（传输层的 RACH 信道）获取随机接入的 PRACH 信道参数，包括：

（1）PRACH 信道配置信息（时域、频域上的信道结构信息）。

（2）前导 Preamble 格式（前导用于上行时钟对齐和 UE 识别符，系统规定其由 Zadoff-Chu 序列产生）。

（3）前导发射功率。

（4）Preamble 根序列及其循环位移参数（小区用来解调前导消息）。

UMTS 随机接入信道（PRACH）包括前导消息（Preamble）、正文消息部分（Message），

如图 9-9 所示。

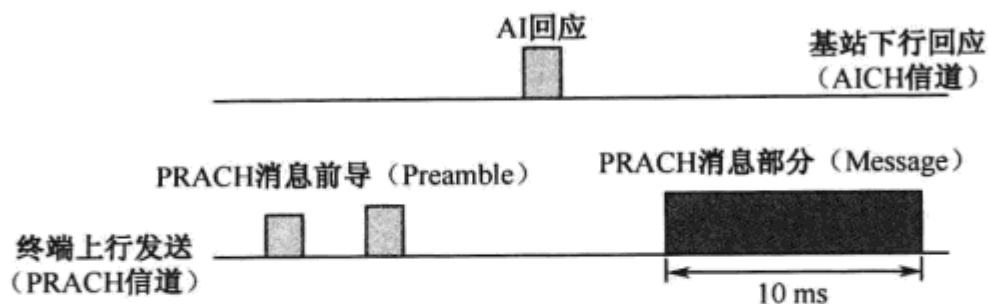


图 9-9 UMTS 随机接入过程

在 LTE 中，随机接入信道（PRACH）只包括前导消息（Preamble），但较 UMTS 的前导消息内涵更加丰富一些。正文消息部分是在共享信道 PUSCH 上进行传输，不属于 PRACH 的一部分。物理层随机接入过程不包括正文消息的发送过程。

LTE 基站给终端随机接入的应答，也不是像 UMTS 中简单地回应一个“AI”，而是有丰富内涵的一个回应，由 PDCCH（指示是否有回应）和 PDSCH（指示回应的具体内容），如图 9-10 所示。

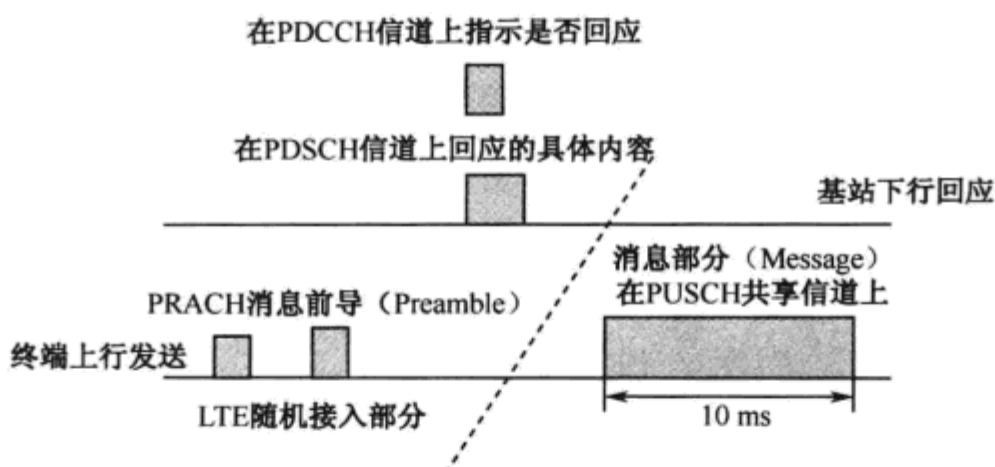


图 9-10 LTE 随机接入相关过程

基站通过 PDSCH 信道告知 UE 随机接入允许的内容（UL-SCH grant），这个内容需要传给 UE 的传输层在共享 SCH 信道上才能解析。随机接入响应准许（UL-SCH grant）包括：无线资源 RB 指派情况、调制编码信息、功率控制命令、是否请求 CQI 等信息。根据随机接入响应准许的要求，在上行 PUSCH 信道上发送随机接入的消息部分。

从上面的分析可以看出，LTE 本身的随机过程虽然简单，但是需要上、下行共享信道配合的事情还比较多，只不过涉及的消息在 LTE 中，不属于物理层的随机接入过程，而属于共享信道物理过程。而在 UMTS 中，随机过程略复杂一点，但需要其他共享信道配合的工作较少。

随机接入的具体过程如下：

(1) UE 高层请求触发物理层随机接入过程。

高层在请求中指示 Preamble index、Preamble 目标接收功率、相关的 RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary Identifier, 随机接入无线网络临时标识), 以及随机接入信道的资源情况等信息；

(2) UE 决定随机接入信道的发射功率。

由于随机接入过程是在还没有和网络侧建立联系之前的过程, 因而采用的是开环功率控制。

也就是说, 终端在 PRACH 信道发射随机接入的前导消息 (Preamble) 的时候, 自己根据高层指示计算一个发射功率, 如下式所示。

$$\text{发射功率} = \text{preamble 的目标接收功率} + \text{路径损耗} \quad (9-1)$$

这个发射功率一定小于终端最大发射功率, 路径损耗为 UE 通过下行链路估计的值。

当发现网络侧没有反应的时候, 再增加前导消息 (Preamble) 的发射功率 (还是要小于终端的最大发射功率)。直到终端收到了网络侧的响应, 开环功控的过程才算结束。

(3) UE 以计算出的发射功率, 选择 preamble 随机序列, 在指定的随机接入信道资源中发射单个 Preamble。

(4) 在传输层设置的时间窗内, UE 尝试侦测以其 RA-RNTI 标识的下行控制信道 PDCCH。如果侦测到, 把相应的下行共享信道 PDSCH 送往传输层。传输层从共享信道中解析出接入允许的响应信息。之后, 开始在 PUSCH 信道上给基站传送正文消息。

(5) 在规定时间内, 如果没有收到响应, 那么物理层反馈“未收到响应 NACK”给传输层, 并退出随机接入过程。

9.4 功率控制过程

9.4.1 LTE 与 CDMA 功率控制对比

功率控制 (Power Control, PC) 是 CDMA 系统中必不可少的技术, CDMA 系统是自干扰系统, 有比较明显的“远近效应”。没有功率控制, 在大话务量的时候, CDMA 系统自身的干扰将使系统失灵。因此, 功率控制是 CDMA 系统克服远近效应的利器。

LTE 采用的是正交频分多址 (OFDMA) 技术, 不属于自干扰系统, 没有明显的“远近效应”。这样, 对功率控制的依赖性大大降低。但是 LTE 中的功率控制对降低干扰 (尤其是小区间的干扰水平), 提高信噪比, 提升小区吞吐量, 有着非常明显的作用。因此,

功率控制在 LTE 中虽重要性下降，但也是必不可少的。

对 CDMA 系统来说，为避免远近效应及对抗快衰落，采用快速功控是必然的选择。

但 LTE 不存在远近效应，无须使用快速功率控制。在 LTE 中，频率复用因子可以是 1，但不同小区间的同频干扰制约着系统容量。在 LTE 中，使用慢速功率控制，能够补偿路损和阴影衰落的变化。

在 CDMA 系统中，每个用户的信号都会占用整个带宽，对小区内和小区外造成的干扰为宽带干扰。功率控制主要是小区内的干扰控制，重点抑制小区内的干扰。

而在 LTE 系统中，每个用户只会占用系统的一部分带宽（多个子载波），占用部分频率资源，而且每个用户占用的子载波数量和位置不一样。因此对小区内和小区间的干扰是窄带干扰，是一种频率选择性干扰。在 LTE 中，小区间的干扰对系统性能影响比较大，因此 LTE 不但要进行小区内功率控制，还要进行小区间的功率控制。

在 CDMA 系统中，功率控制控制的是整条链路的总发射功率。

在 LTE 中，有所不同。下行功率控制着每个 RE 上的能量 EPRE (Energy per Resource Element)；上行功控则控制着每个 SC-FDMA 符号上的能量。

LTE 功率控制与 CDMA 系统功率控制技术的比较如表 9-1 所示。

表 9-1 LTE 与 CDMA 功率控制技术比较

	CDMA	LTE
远近效应	明显	不明显
自干扰	明显	无
功控目的	对抗快衰落	补偿路损、阴影衰落的变化
功控周期	快速功控	慢速功控
主要抑制干扰类型	小区内宽带干扰	小区间窄带干扰
功控范围	小区内	小区间、小区内
控制什么功率	整条链路的总发射功率	下行：每个 RE 上的能量 EPRE 上行：每个 SC-FDMA 符号上的能量

9.4.2 LTE 功率控制

按照功率控制的执行方是否需要对方反馈控制信息，可分为开环功率控制（无须反馈）和闭环功率控制（必须反馈信息）。

开环功率控制是在无接收方反馈信息的情况下使用的。例如，在随机接入过程中，无须专门的反馈信令开销，但控制精度较差。当无线信道环境突然变化，会造成一定程度的不连续发射，甚至由同步状态变成了失步状态，无法获取反馈信息。这时就需要有效的开环功率控制。

闭环功率控制基于接收方的反馈信息进行控制，反映了实际的信道变化，但需要专门的反馈信令开销。闭环功率控制可以精确地控制功率并跟上信道环境的变化。在同步状况良好及数据连续发送的时候，为达到比较精确的功率控制目的，需要闭环功率控制，如上行共享信道和下行共享信道的功率控制过程。

闭环功率控制还可分为内环功率控制(以 SIR 为控制目标)和外环功率控制(以 BLER 为控制目标)。

功率控制按照功率控制的方向，可分为上行(反向)功率控制和下行(前向)功率控制。

在 LTE 中，上行功率控制对小区间的干扰控制起到比较大的作用，同时上行功率控制还可以最大程度地节省终端发射功率、延长电池的使用时间。因此，上行功率控制是 LTE 重点关注的部分。

小区内上行功率控制，分别控制上行共享信道 PUSCH、上行控制信道 PUCCH、随机接入信道 PRACH 和上行参考信号(Sounding RS)。PRACH 信道总是采用开环功率控制的方式。其他信道/信号的功率控制，是通过下行 PDCCH 信道的 TPC 信令进行闭环功率控制。

严格地说，LTE 的下行方向是一种功率分配机制，而不是功率控制。不同的物理信道和参考信号之间有不同的功率配比。在这种功率分配机制下对下行链路的可靠性、传输的有效性也有很大的作用。

下行 RS 一般以恒定功率发射。

下行共享信道功率控制的主要目的是补偿路损和慢衰落，保证下行数据链路的传输质量。下行共享信道 PDSCH 的发射功率是与 RS 发射功率成一定比例的。它的功率是根据 UE 反馈的 CQI 与目标 CQI 的对比来调整的，是一个闭环功率控制过程。

在基站侧，保存着 UE 反馈的上行 CQI 值和发射功率的对应关系表。这样，基站收到什么样的 CQI，就知道用多大的发射功率，可达到一定的信噪比(SINR)目标。

9.4.3 小区间功率控制

上行功率控制不但用来补偿路损和慢衰落，而且还有控制小区之间干扰的作用，如图 9-11 所示。

小区间功率控制有两种实现方式：一个是通过空中接口下发邻小区的干扰水平指示；另外一个是通过基站之间的 X2 接口交互干扰情况。

邻小区测量小区受到的干扰情况，将此干扰水平与可承受的干扰门限相比较。如果超过干扰门限，则干扰指示为“1”；如果没有超过，则干扰指示为“0”。

这里面又有两种实现方案：

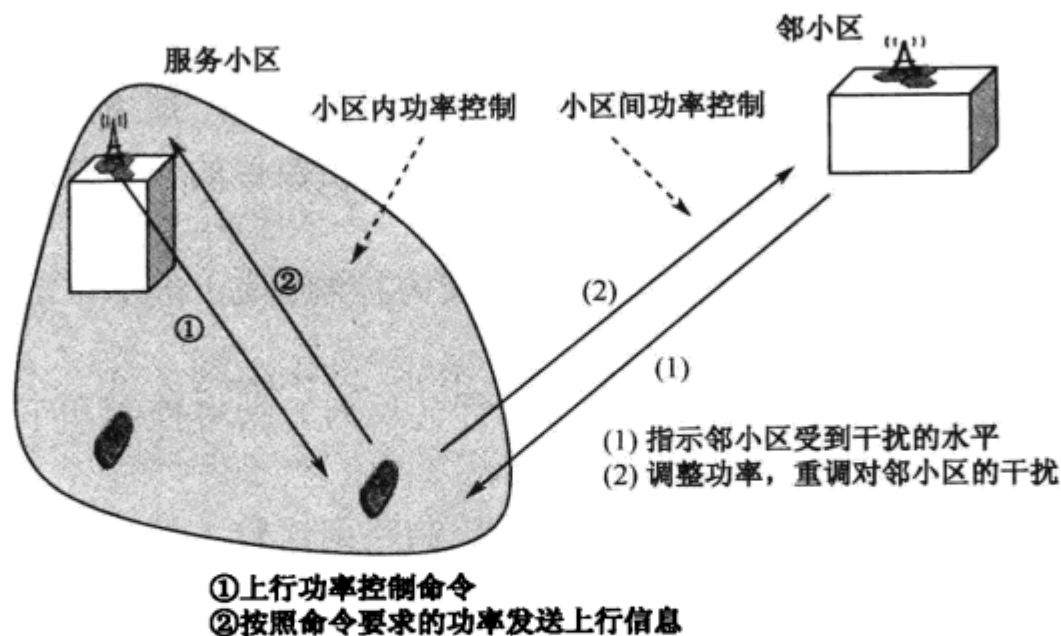


图 9-11 小区内和小区间功率控制

一种是受干扰小区对所有相邻小区发送相同的干扰水平指示；

另一种是受干扰小区对不同的相邻小区反馈不同的干扰水平指示。

给不同的邻区反馈不同的干扰水平指示，可以更精确地控制干扰源的发射功率。但需要分别测量不同的相邻小区引起的干扰，需要给不同的小区传送不同的指示，这就增加了系统的复杂度和下行信令开销。

每个用户根据自己对干扰指示的理解进行功率调整。当然也可以将干扰指示理解的结果反馈给基站，由基站集中控制。

通过基站间的 X2 接口，交换各小区的过载指示（Overload Indicator, OI），也可以实现小区间的集中式功率控制，可以抑制小区间的干扰，提升整个系统的性能。但由于基站之间的通信延迟较大，会导致干扰信息交互不及时。

LTE 系统定义了 RNTP（Relative Narrowband Tx Power，相关窄带发射功率），用以支持可能进行的下行功率协调，该消息通过 X2 接口在基站间交换。

9.5 寻呼过程

所谓寻呼，就是网络寻找某个特定 UE 的过程。用户做被呼叫的时候，网络侧发起的呼叫建立过程一定包括寻呼过程。这也是被叫流程和主叫流程不一样的地方。

寻呼流程并不是一个纯粹的物理层过程，它也需要高层的配置和指示。

9.5.1 不连续接收

如果一个 UE 在始终不停地查看是否有自己的寻呼信息，就会导致手机耗电增加。如同一个不停地查看自己的信箱中是否有信的人，活得太累。

在一个寻呼过程中，多数时间 UE 应该处于睡眠的状态，只在预定时间醒来监听一下是否有属于自己的来自网络的寻呼信息。一个有效的寻呼过程是多数时间 UE 能够得到较好休息的过程。多数时间休息，少数时间监听，是一种不连续接收 (Discontinuous Reception, DRX) 技术。

9.5.2 LTE 和 WCDMA 寻呼过程对比

LTE 和 WCDMA 的寻呼过程大致相同，但实现该过程所使用的信道类型略有不同。

在 WCDMA 中，UE 在大多数时间休息，只在预定时刻监听物理层寻呼指示信道 (PICH)，如图 9-12 所示。这个信道类似村委会通知谁家包裹寄到的公告栏。

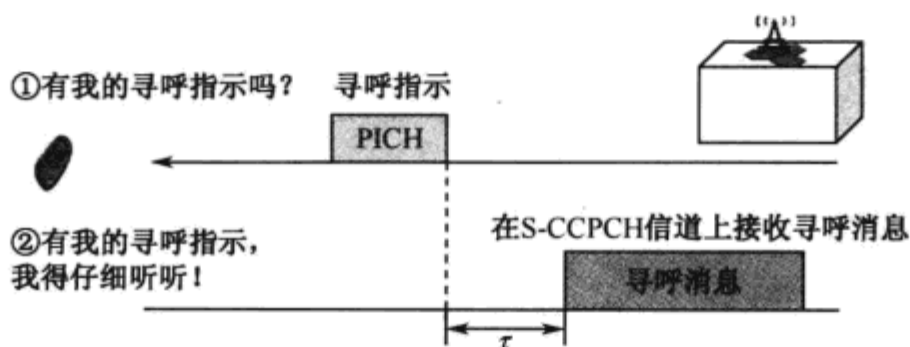


图 9-12 UMTS 寻呼过程

UE 在 PICH 这个公告栏上看是否有自己的包裹 (UE 看是否有我的寻呼信息)。一旦发现有属于本 UE 的通知，它立刻到指定位置 (S-CCPCH 信道上) 去找自己的包裹 (寻呼指示信息)。

先发送一个 UE 的寻呼指示，再发送一个 UE 的寻呼消息，这样一个机制可以使 UE 休息更长时间，节约手机耗电。这是因为寻呼指示的时长比寻呼信息时长小很多，且并不是每次寻呼指示里都有某一 UE 的通知。这样一安排，UE 无须在自己的监听时刻付出太多的精力。

在 LTE 中，如图 9-13 所示，物理层的寻呼过程依靠的寻呼信息指示信道是 PDCCH，寻呼消息发送的信道为共享信道 PDSCH。同样地，LTE 也是采用非连续接收 (DRX) 的技术。

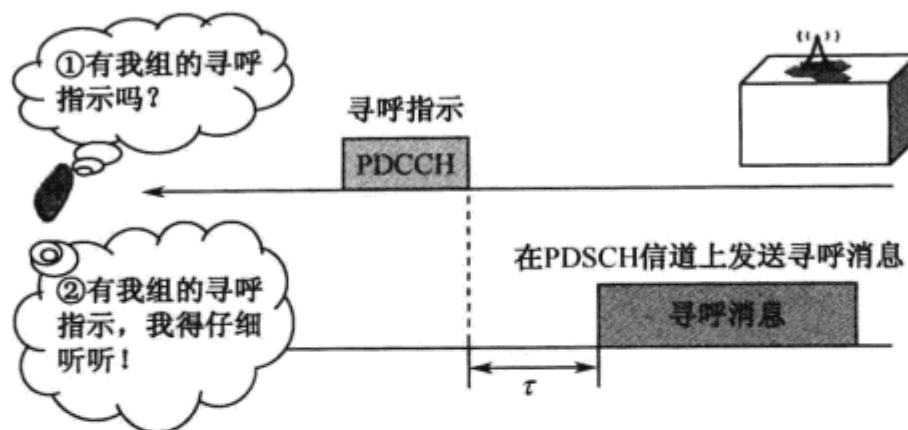


图 9-13 LTE 寻呼过程

UE 在属于自己的特定时刻中去监听 PDCCH 信道, 如果在 PDCCH 信道上检测到自己的寻呼组的标识, 该 UE 则需解读 PDSCH, 并将解码后的数据通过寻呼传输信道(PCH)传到 MAC 层。

在 PCH 传输块中, 包含被寻呼的 UE 的标识。如果该 UE 没有在 PCH 上找到自己的标识, 发现坏了, 拿错了, 于是丢弃这个信息, 重新进入休眠状态, 等待属于自己的下一个监听时刻的到来。

在 LTE 中, 没有专门的 PICH 寻呼消息指示信道, 而是和其他指示消息一样, 借用 PDCCH 信道来传送这些指示消息。这是因为 PDCCH 信道本身的传输时间很短, 引入一个专门的 PICH 信道, 节省的能量很有限, 却增加了复杂性。所以, LTE 中没有引入专门的物理层寻呼指示信道。

9.6 测量过程

物理层的测量过程一般是由高层配置和控制的, 物理层只是提供了测量的能力而已。

根据测量性质的不同, 测量可以分为同频测量、异频测量、异系统测量; 根据测量的物理量不同, 测量可以分为电平大小的测量、信道质量的测量、负荷大小的测量等; 根据测量报告的汇报方式, 测量可以分为周期性测量、事件测量等; 协议中一般根据测量的位置不同, 将测量分为 UE 侧的测量、eUTRAN 侧的测量。

9.6.1 手机侧测量

UE 侧测量有连接状态的测量和空闲状态的测量。

手机处于连接状态的时候, eUTRAN 给 UE 发送 RRC 连接重配置消息, 这个消息相当于 eUTRAN 对 UE 进行测量控制 (Measurement Control) 命令。

这个命令包含: 要求 UE 进行的测量类型及 ID, 建立、修改、还是释放一个测量的

命令，测量对象、测量数量、测量报告的数量和触发报告的方式（周期性报告、事件性汇报）等。

手机处于空闲状态的时候，eUTRAN 的测量控制命令是用系统消息（System Information）广播给 UE 的。

UE 侧测量的参考位置是在 UE 的天线连接口处。

UE 可以测量的物理量包括：

RSRP（Reference Signal Received Power，参考信号接收电平）：是在一定频带内，特定小区（Cell-Specific）参考信号（Reference Signal）的多个 RE（Resource Element）的有用信号的平均接收功率（同一个 RB 内的 RE 平均功率）。

这个测量值需要注意的是：

（1）如果 UE 使用接收分集，那么 RSRP 的汇报值不应低于分集支路 RSRP 的测量值。

（2）RSRP 测量值必须是在一定测量周期内的、一定测量频带的、一定数量 RE 的平均值，否则不能满足测量精度的要求。

（3）RSRP 的每 RE 功率是指各符号的有用信号部分，不包括循环前缀（CP）。

（4）手机空闲时同频、异频测量，连接状态时的同频、异频测量都可以上报 RSRP。

RSSI（Received Signal Strength Indicator，接收信号强度指示）：是系统在一定频带内，数个 RB 内的 OFDM 符号的总接收功率的平均值，包含有用信号、循环前缀、小区内干扰、邻小区内干扰、噪声等在内的所有功率。eUTRA 内的 RSSI 主要用于干扰测量。

RSRQ（Reference Signal Received Quality，参考信号接收质量）：是一种信噪比，即 RSRP 和 RSSI 的比值。但是由于 RSRP 和 RSSI 两者测量时使用的带宽可能不同，分子分母在同一个带宽内相比才有意义，所以须用一个系数 N 来调整。RSRP 一般是单个 RB 的功率，而 RSSI 可能是 N 个 RB 的功率，所以 RSSI 使用的带宽是 RSRP 带宽的 N 倍，所以有下式：

$$\text{RSRQ} = N \cdot \frac{\text{RSRP}}{\text{RSSI}} \quad (9-2)$$

RSRQ 测量用于基于信道质量的切换和重选判决。手机空闲时同频、异频测量，连接状态时的同频、异频测量都可以上报 RSRQ。

从定义来看，RSRP 相当于 WCDMA 中 CPICH 的 RSCP（Received Signal Code Power），只不过 RSCP 是每码片功率，RSRP 则是每 RB 功率。

RSRQ 则相当于 WCDMA 中 CPICH 的 E_c/N_0 ， E_c/N_0 是码片内有用信号功率和干扰信号功率的比值，RSRQ 则是数个 RB 内有用信号功率和干扰信号功率的比值。

UE 处于空闲状态时，进行小区选择或重选，一般使用 RSRP 就可以了；而 UE 在连

接态进行切换时,通常需要比较 RSRP 与 RSRQ。如果仅比较 RSRP,可能导致频繁切换;如果仅比较 RSRQ,虽可减少切换次数,却可能导致掉话。

LTE 的 UE 除了可以进行 eUTRAN 内的 RSRP、RSSI、RSRQ 测量外,还可以进行跨系统(inter-RAT, inter Radio Access Technology, 多无线接入技术间)的电平、干扰、信道质量的测试,如表 9-2 所示。

表 9-2 LTE UE 的测量能力(协议上暂定的测量值)

	有用信号电平	总 干 扰	信 道 质 量
LTE	RSRP	RSSI	RSRQ
WCDMA	UTRA FDD CPICH RSCP	UTRA FDD carrier RSSI	UTRA FDD CPICH E_c/N_0
TD-SCDMA	UTRA TDD P-CCPCH RSCP	UTRA TDD carrier RSSI	—
cdma2000	cdma2000 1x RTT 导频信号强度 cdma2000 HRPD 导频信号强度	—	—
GSM	—	GSM carrier RSSI	—

UE 还可以根据测量控制的要求测出 LTE 系统的特定时间差,如 RSTD、UE Rx-Tx 时间差。

RSTD (Reference Signal Time Difference, 参考信号时间差)是指 UE 接收到的两个相邻小区发送的、同一子帧的时间差。假若 UE 从本小区 i 接收到的某子帧的开始时刻为 $T_{\text{SubframeRxi}}$, UE 从邻小区 j 接收到的该子帧的开始时刻为 $T_{\text{SubframeRxj}}$, 则有

$$\text{RSTD} = T_{\text{SubframeRxj}} - T_{\text{SubframeRxi}} \quad (9-3)$$

UE 可以接收到的很多与本小区 i 邻接的小区信号,在接收到这些信号的时刻中,接收 j 小区的信号时刻和接收 i 小区的信号时刻最为接近,即 $T_{\text{SubframeRxj}}$ 是与 $T_{\text{SubframeRxi}}$ 最为接近的。RSTD 是在 UE 连接态时做的测量值。

手机接收与发送时间差(UE Rx-Tx 时间差),是指 UE 首次接收到某一下行无线帧的时刻与把该帧作为上行无线帧发出去的时刻之间的差值。假若 $T_{\text{UE-Rx}}$ 是 UE 从服务小区接收到的某一下行测试帧的时刻, $T_{\text{UE-Tx}}$ 是 UE 把该测试帧发给基站的时刻,则有以下式:

$$\text{UE Rx-Tx 时间差} = T_{\text{UE-Rx}} - T_{\text{UE-Tx}} \quad (9-4)$$

9.6.2 基站侧测量

基站侧测量的参考位置是在天线的接口处。一般的天线接口分发送天线接口和接收天线接口,当然有发送天线和接收天线合二为一的。协议中在定义测量值的参考位置时,会指明是发送天线,还是接收天线。

下行参考信号发射功率(DL RS Tx power)的测量参考位置是在基站的发送天线接

口处。下行参考信号发射功率是在一定系统工作频带内，基站发送的特定小区（Cell-Specific）参考信号（Reference Signal）在发送天线口处的平均发射功率。这个功率是携带特定小区下行参考信号（RS）的一组 RE（Resource Element）在一定测量周期内的平均功率值。

接收干扰功率（Received Interference Power）测量的参考位置是在基站的接收天线的接口处，是一个物理资源块（RB）包括热噪声在内的干扰功率总和。一组 RB 的测量值的集合可以作为接收干扰功率的报告值。在接收分集的情况下，报告值应该是分集分支的功率平均值。

上行热噪声功率（Thermal Noise Power）是上行系统带宽范围内的热噪声功率。热噪声功率是白噪声功率谱密度与上行带宽的乘积，如下式：

$$P_o = N_o \cdot W \quad (9-5)$$

其中， P_o 是热噪声功率， N_o 是白噪声功率谱密度， W 是上行系统带宽。

上行系统带宽 W 是由多组 RB 组成的，每一个 RB 又由若干子载波组成。子载波之间的间距为 $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ 。上行系统带宽 W 与 RB 数目 $N_{\text{RB}}^{\text{UL}}$ 、每 RB 的子载波数目 $N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$ 与子载波间距 Δf 之间的关系如下式：

$$W = N_{\text{RB}}^{\text{UL}} \cdot N_{\text{sc}}^{\text{RB}} \cdot \Delta f \quad (9-6)$$

接收热噪声功率（Thermal Noise Power）和接收干扰功率（Received Interference Power）是在同样的测量周期内的平均功率值。接收热噪声功率可以单独上报，也可以和接收干扰功率一起上报。在接收分集的情况下，报告值应该是分集分支的功率平均值。

基站接收与发送时间差（eNB Rx-Tx time difference）是指基站 eNodeB 首次接收到某一上行无线帧的时刻与把该帧作为下行无线帧发出去的时刻之间的差值。

假若 $T_{\text{eNB-Rx}}$ 是 eNodeB 首次接收到某一上行测试帧的时刻，测量参考位置点是在基站的接收天线接口处； $T_{\text{eNB-Tx}}$ 是 eNodeB 把该测试帧发给手机的时刻，测量参考位置点是在基站的发送天线接口处，则有以下式：

$$\text{eNB Rx-Tx 时间差} = T_{\text{eNB-Rx}} - T_{\text{eNB-Tx}} \quad (9-7)$$

时间提前量（Timing Advance） T_{ADV} 有两种定义：

T_{ADV} 类型 1 定义为手机接收发送时间差与基站接收发送时间差之和，如下式所示：

$$T_{\text{ADV}} = \text{UE Rx-Tx 时间差} + \text{eNB Rx-Tx 时间差} \quad (9-8)$$

这里，UE Rx-Tx 时间差和 eNB Rx-Tx 时间差的测量应该是针对同一个 UE 来测量的。

T_{ADV} 类型 2 定义为基站接收发送时间差（eNB Rx-Tx time difference），即

$$T_{\text{ADV}} = \text{eNB Rx-Tx 时间差} \quad (9-9)$$

这里的时刻可以是不同 UE 的上行 PRACH 对应的无线帧。

基站侧还要进行用于小区间干扰协调的测量：

HII (High Interference Indicator, 高干扰指示);

OI (Overload Indicator, 过载指示)。

HII 和 OI 是和本小区负载大小强相关的测量值, 通过相邻 eNodeB 之间的有线接口 X2 来传送 HII 和 OI。

HII 是用来指示在本小区当前负载量的情况下, 一些最容易受到干扰的敏感用户 (如位于小区边缘的 UE) 使用的载波资源的情况。

eNodeB 将本小区的 HII 传送给相邻小区。相邻小区根据传递来的 HII, 避免把可能增加干扰的子载波资源分配给它的小区边缘 UE。通过 HII 的信息传递, 可以避免相邻小区在各自的覆盖边缘使用相同的载波资源, 从而尽可能抑制小区间干扰。

OI 是本小区在某些频带受到严重干扰或者负荷过载的时候, 将这种严重干扰或者过载情况传递给相邻小区的指示。相邻小区可以根据这些指示来决定降低在某些频带内的发射功率, 或者来避免将某些频带的资源分配出去, 从而抑制小区间的干扰。

HII 和 OI 这两个指示的差别在于: HII 是在过载发生之前, 就对可能受到干扰的频带给周边邻区做出“预警”; 而 OI 则是在过载发生后, 把过载的频带给周边邻区进行通报。

9.6.3 测量小结

UE 侧可测量的物理量和基站侧 eNodeB 可测量的物理量是不一样的。终端侧进行的是和切换、重选相关的测量; 基站侧进行的是干扰、负荷等方面的测量, 如表 9-3 所示。后面分别介绍这些测量值。

表 9-3 LTE 的手机侧和基站侧测量

手机测量	手机下行测量	RSRP RSSI RSRQ 其他多系统间的测量
	手机时间差测量	RSTD 手机接收发送时间差 (UE Rx-Tx 时间差)
基站测量	基站发送功率测量	下行参考信号发射功率 (DL RS Tx Power)
	基站上行测量	接收干扰功率 (Received Interference Power) 热噪声功率 (Thermal Noise Power)
	基站时间差测量	基站接收发送时间差 (Rx-Tx Time Difference) 时间提前量 (T_{ADV})
	干扰负荷测量	HII OI

9.7 共享信道物理过程

在 LTE 中, 物理共享信道是业务数据承载的主体。它还顺便帮忙携带一些寻呼消息, 部分广播消息, 上、下行功控消息等。

物理共享信道主要是物理下行共享信道 PDSCH 和物理上行共享信道 PUSCH。这两个共享信道的物理层过程主要做的事有三个: 数据传输、HARQ 和链路自适应, 如图 9-14 所示。本节介绍的盲检测过程其实是数据传输过程的子过程。

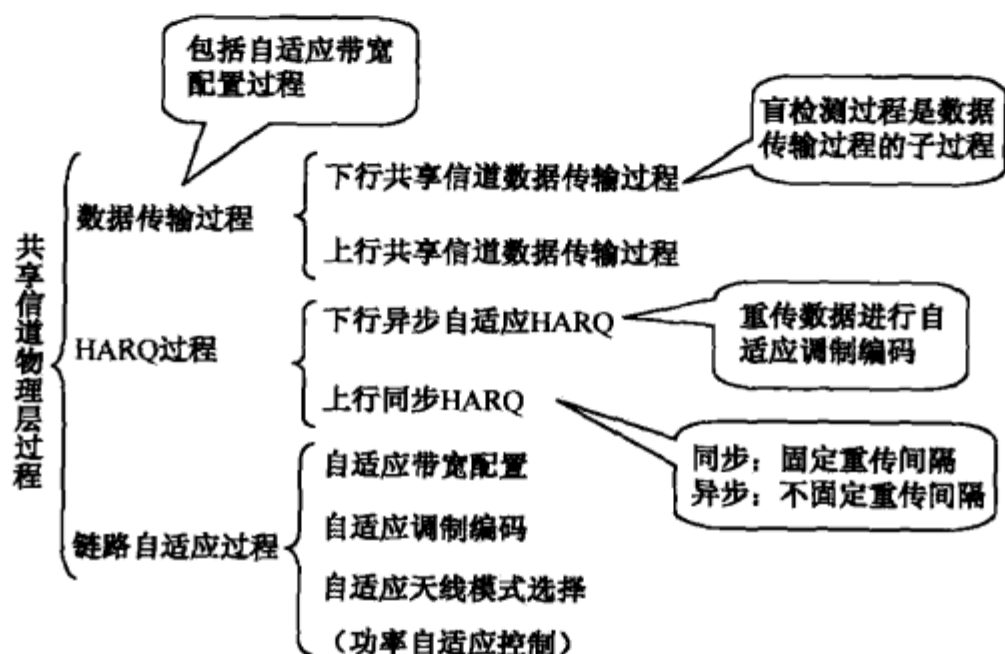


图 9-14 共享信道物理层过程的主要内容

不管是上行, 还是下行, 数据传输是共享信道的主要使命; 但是数据传输不是永远正确的, 它会出错, 出错了怎么办? 这就需要 HARQ 过程来解决; 数据传输过程并不是一根筋, 它要灵活机动地完成数据传输的使命, 它要根据无线环境的不同和信道条件的变化来调整数据传输的方式。

数据传输调度、HARQ 过程、链路自适应三者经常在一起配合工作, 关系非常密切。

9.7.1 数据传输过程

数据传输就是把将要传送的数据, 放在 LTE 的时、频资源上, 通过天线发射出去, 然后接收端在特定的时、频位置上, 将这些数据接收下来。

看似简单的过程, 其实涉及很多方面的问题。

首先, 发送端的时、频资源如何分配? 共享信道上承载的信息种类比较多、比较杂,

分配在什么位置？分配多少？然后是接收端如何正确接收这些数据？如何区别是什么类型的数据？在哪个时、频位置把信息取下来？

这里面涉及下行共享信道的数据信息（PDSCH）及协调调度信息（PDCCH）的发送和接收过程；上行共享信道的数据信息（PUSCH）及协调调度信息（PDCCH）的发送和接收过程。

不管是上行数据传输，还是下行数据传输，干活的人不一样（下行 PDSCH、上行 PUSCH），但负责协调调度的人是一样的，都是物理下行控制信道 PDCCH。

PDCCH 携带的信息有时、频资源的位置，编码调制方式，HARQ 的控制信息等。基站是上、下行资源调度的决策者，它通过 PDCCH 控制着让谁听话（下行数据传输），听谁说话（上行数据传输）。通过 PDCCH 的格式控制，PDSCH 和 PUSCH 可以传送多种类型的数据，从而避免了 3G 时代设计很多类型的物理信道的问题，减少了物理信道的种类。

系统需要配置 PDCCH 参数以决定如何分配和使用资源，主要依据以下因素：

- （1）QoS 参数。
- （2）在 E-NodeB 中准备调度的资源数据量。
- （3）UE 报告的信道质量指示（CQI）。
- （4）UE 能力。
- （5）系统带宽。
- （6）干扰水平。

在下行方向，在长度为 1ms 的子帧结构中，1~3 个符号传送协调调度信息（PDCCH），剩余的符号传送数据信息（PDSCH）。也就是说，调度信息和对应的数据信息可以位于同一个子帧内，如图 9-15 所示。

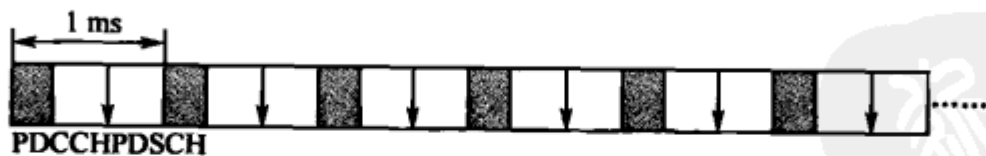


图 9-15 下行数据调度和传输

在下行数据接收的时候，终端不断检测 PDCCH 所携带的调度信息。发现某个协调调度信息属于自己的，则按照协调调度信息的指示，接收属于自己的 PDSCH 数据信息。

在上行方向，终端需要根据下行的 PDCCH 的调度信息，进行上行数据的发送。由于无线传输和设备处理都需要时间，因而下行的 PDCCH 和上行的 PUSCH 之间存在时延。对于 FDD 模式，这个时延固定为 4 ms，即 4 个子帧，如图 9-16 所示。对于 TDD 模式，时延和上、下行时隙的比例有关，但也必须大于等于 4 ms。

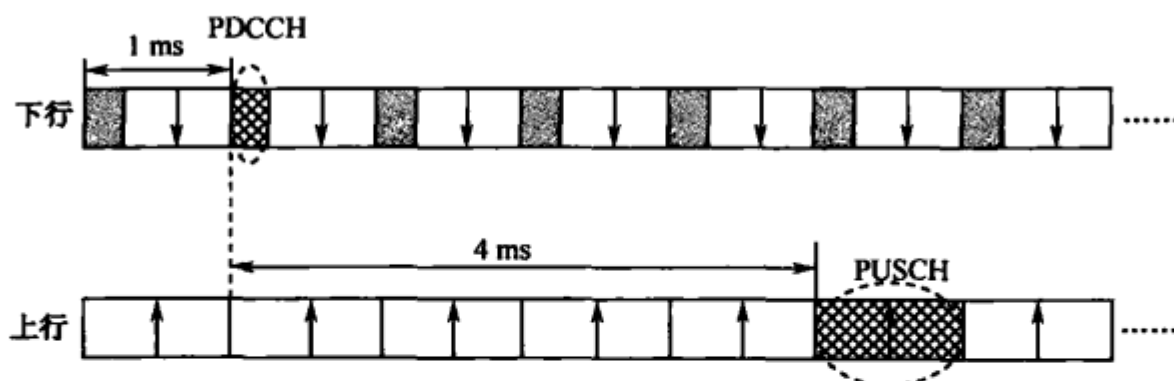


图 9-16 上行数据的调度和传输 (FDD)

上行数据在发送之前，终端需要等待基站给自己的下行协调调度信息，发现允许自己发送数据了，则在 PUSCH 上发送自己的数据。

动态实时的调度提供了灵活性，但也产生了较大的信令负荷。手把手教一个人干活很累，对于一些简单的、比较规律性的工作，没必要发出频繁的指令。在 LTE 中，对于一些较规律的低速业务，如 VoIP，为了降低 PDCCH 控制信令的开销，定义了半持续调度 (Semi-Persistent Scheduling, SPS) 的模式。

半持续调度的主要思想是对于较规则的低速业务，不需要每个子帧都进行动态资源调度。可以按照一次指令的方式，工作较长时间，从而节省信令开销。

9.7.2 盲检测过程

eNodeB 针对多个 UE 同时发送 PDCCH，终端如何保证接收到属于自己的控制信息，又不给系统带来过多的信令开销？

答案是，终端需要不断检测下行的 PDCCH 调度信息。但是在检测之前，终端并不清楚 PDCCH 传递什么样的信息，使用什么样的格式，但终端知道自己需要什么。有哪些我不知道，有哪些需要我知道，在这种情况下，只能采用盲检测的方式。

了解盲检测之前，需要先了解两个概念：RNTI 和 DCI。

RNTI (Radio Network Temporary Identifier, 无线网络临时标识) 是高层用来告诉物理层，需要接收或者发送什么样的控制信息。根据不同控制消息，RNTI 可以表示为 X-RNTI。

- (1) SI-RNTI (System Information RNTI): 基站发送系统消息的标识。
- (2) P-RNTI (Paging RNTI): 基站发送寻呼消息的标识。
- (3) RA-RNTI (Random Access RNTI): 基站发送随机接入响应的标识，用户用来发送随机接入的前导消息。
- (4) C-RNTI (Cell RNTI): 基站为终端分配的用于用户业务临时调度的标识。

(5) TPC-PUCCH—RNTI (Transmit Power Control PUCCH RNTI): PUCCH 上行功率控制信息标识。

(6) TPC-PUSCH—RNTI (Transmit Power Control PUSCH RNTI): PUSCH 上行功率控制信息标识。

(7) SPS C-RNTI (Semi-Persistent Scheduling RNTI): 半静态调度时, 基站为终端分配的用于用户业务临时调度的标识, 用法和 C-RNTI 一样。

(8) M-RNTI (MBMS RNTI): 基站为终端分配的用于 MBMS 业务临时调度的标识。

为了提高终端检测 RNTI 的效率, 根据 RNTI 属性的不同, 将其分在两个不同的搜索空间中: 公共搜索空间 (Common Search Space) 和 UE 特定的搜索空间 (UE Specific Search Space)。

公共搜索空间就像住宅楼宇的公告栏, 每个 UE 都可以在此查找相应的信息; 而 UE 特性的搜索空间就像住宅楼宇底层的分户私人邮箱, UE 只能在属于自己的空间中搜索控制信息。

SI-RNTI、P-RNTI、RA-RNTI 属于公共搜索空间的信息; 其他 RNTI 属于 UE 特定的搜索空间的信息。

终端 UE 使用 X-RNTI 对 PDCCH 进行盲检, X-RNTI 如同开启 PDCCH 的钥匙。UE 既要查看面向所有用户的公告栏 (Common Search Space), 也要查看自己家的私人邮箱 (UE-Specified Space)。

终端要使用 SI-RNTI、P-RNTI、RA-RNTI 等公共钥匙查看公告栏; 基站为终端配了以下几把私人钥匙: C-RNTI、TPC-PUCCH—RNTI、TPC-PUSCH—RNTI、SPS C-RNTI、M-RNTI, 用来开启自己不同的私人邮箱 (见图 9-17)。



图 9-17 盲检测过程

DCI (Downlink Control Information, 下行控制信息) 有上行资源调度信息、下行资源调度信息、上行功率控制信息。一个 DCI 对应一个 RNTI。每个 UE 在每一个子帧中只能看到一个下行控制信息 (DCI)。

PDCCH 信道会经历 CRC 校验、卷积编码、速率匹配、加扰等过程。DCI 信息是通过长度为 16 bit 的 CRC 校验附着上去的, 而 RNTI 是在加扰过程用 16 bit 的扰码加在传输信息上的。

针对不同的用途, 物理层设计了不同的 DCI 格式 (Format)。根据调度信息的方向 (上行还是下行)、调度信息的类型 (Type)、MIMO 传输模式 (Mode)、资源指示方式的不同, 定义了不同的 DCI 格式, 如表 9-4 所示。

表 9-4 DCI 格式定义

DCI 格式	被控制信息的方向	调度信息类型	天线传输模式	资源指示方式
DCI Format 0	上行	PUSCH 资源调度	—	Type 2
DCI Format 1	下行	单码字 PDSCH 调度信息	单天线、发送分集 (Mode 1、Mode 2)	Type 0/1
DCI Format 1A	下行	单码字 PDSCH 调度信息, 随机接入的触发信息	单天线、发送分集 (Mode 1、Mode 2)	Type 2
DCI Format 1B	下行	带预编码信息的单码字 PDSCH 调度信息	闭环空间复用 (Mode 4)	Type 2
DCI Format 1C	下行	小型单码字 PDSCH 调度信息, 如寻呼信息、随机接入响应、BCCH 调度信息等	单天线、发送分集 (Mode 1、Mode 2)	Type 2
DCI Format 1D	下行	带预编码信息和功率偏移量信息的单码字 PDSCH 调度信息	MU-MIMO (Mode 5)	Type 2
DCI Format 2	下行	资源调度信息	闭环空间复用 (Mode 4)	Type 0/1
DCI Format 2A	下行	资源调度信息	开环空间复用 (Mode 3)	Type 0/1
DCI Format 3	上行	PUSCH 和 PUCCH 的 2 bit 功率控制指令	—	—
DCI Format 3A	上行	PUSCH 和 PUCCH 的 1 bit 功率控制指令	—	—

上行资源调度信息用的是 DCI Format 0, 下行资源调度信息用的是 DCI Format 1/1A/1B/1C/1D 和 Format 2/2A, 上行功率控制信息用的是 Format 3/3A。

时、频资源指示是告诉终端, 信息被放在了什么位置。协议定义了 3 种时频资源的指示方式: Type 0、Type 1、Type 2。

DCI Format 1/2/2A 使用的是 Type 0/1 的资源指示方式。Type 0、Type 1 采用时、频资源分组, 位图 (Bitmap) 指示是否占用的方式, 指示物理资源的 RB 位置。可以支持不连续 VRB 的分配。Type 0、Type 1 二者位图指示时、频资源的对应算法不同而已。

DCI Format 0/1A/1B/1C/1D 使用 Type 2 的资源指示方式。Type 2 是以资源起始位置，加上连续时、频资源块的长度，来定义时、频资源占用的位置的。显然这种方式无须指示每个 RB 位置的占用情况，信令开销小于 Type 0/1，但是只能分配连续的 VRB。

X-RNTI 和 DCI 就是 PDCCH 通过加扰和 CRC 穿在身上的外衣，携带了很多标识自己特性的信息，可以让终端方便地识别出属于自己的、自己所需的控制信息（见图 9-18）。

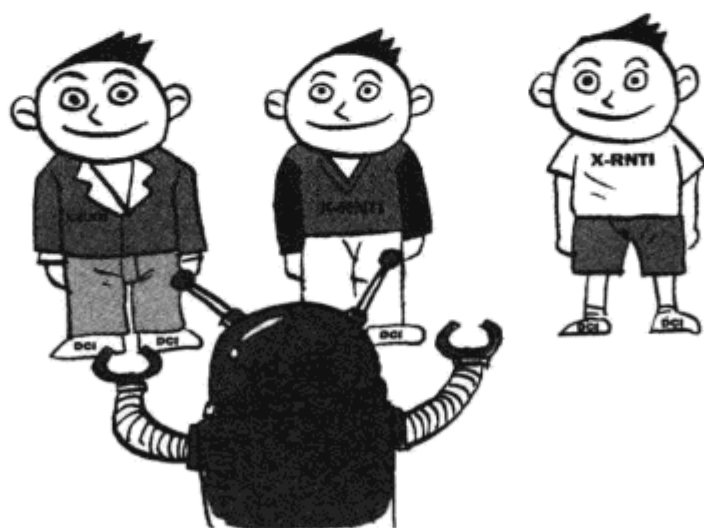


图 9-18 X-RNTI 和 DCI

终端就是根据这些控制信息的指示，在 PDSCH 信道上的特定时、频资源上，把属于自己的下行数据取下来；同时终端按照这些控制信息的要求，在 PUSCH 信道上的相应时、频资源上，用一定的功率把上行信息发送出去。

基站要寻呼 UE，就要通过 P-RNTI 标识 PDCCH，并指示 DCI。UE 会用 P-RNTI 解码 PDCCH，并根据 DCI 的信息，在 PDSCH 上找到下行寻呼数据。

在随机接入的过程中，UE 会在特定的时、频资源上发送一个前导码 Preamble；基站根据收到 PRACH 消息（包括前导 Preamble）的时、频资源位置推算 RA-RNTI，并用该 RA-RNTI 标识 PDCCH，然后发送随机接入响应，该响应中包含基站为终端分配的临时调度标识号 TC-RNTI（Temporal C-RNTI）。

当终端随机接入成功后，便将 TC-RNTI 转正为 C-RNTI。

基站与终端建立链接后（Connected），通过 C-RNTI 或 SPS-RNTI 对 PDCCH 进行标识。终端对 PDCCH 察言观色，进而获得上、下行调度信息。

9.7.3 HARQ 重传合并机制

无线环境随时随地在变化。所谓随时变化，就是信道的时变性；所谓随地变化，就是空间信道的多径效应。变化滋生错误。任何无线制式最重要的工作就是应对无线环境的变化，降低误码率，提高传输质量。

错误是不可避免的，如果错误了怎么办？知错就改！HARQ 出场了！

HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest, 混合自动重传请求) 技术是自动重传请求 (Automatic Repeat-reQuest, ARQ) 和前向纠错 (Forward Error Correction, FEC) 的两种技术的结合。所谓混合 (Hybrid)，即指重传和合并技术的混合。

HARQ 就是 LTE 知错就改的技术。怎么改？答案是重传与合并。

一次不对，重传一次；再不对，再次重传！这就是 ARQ 的精髓。但是系统对错误的忍耐是有限度的，于是定义了最大重传次数 (LTE 中最大重传次数为 4 次)。

不但要重传，而且收到两次或者多次重传的内容，还要比对起来看。合起来看，试图把正确的内容尽快找出来，以便降低重传次数。这就是 FEC 技术的要旨。

HARQ 的重传机制有三种：

- (1) 停止等待 (Stop-AND-Wait, SAW)；
- (2) 回退；
- (3) 选择重传。

HARQ 的重传机制，类似老师给学生上课知识点重讲的方法 (见图 9-19)。



图 9-19 老师讲课的过程

老师 (数据发送方) 每讲一个知识点，就要看一下学生是否领会，如果没有领会，就再讲一遍，直到学生正确领会后，才讲下一个知识点，这就是停止等待的重传机制。

老师不停地按顺序讲解每一个知识点，学生发现理解不了了，就告诉老师，刚才某个问题没有听明白，老师就从这个问题开始重讲一遍，这就是回退机制。

老师不停地按顺序讲解每一个知识点，如果发现讲过的某个问题学生不明白，则只重讲学生不明白的问题，这就是选择重传机制。

停止等待协议是发送每一帧数据后，等待接收方的反馈应答 ACK/NACK。一旦接收方反馈数据错误的 NACK，发送方就需要重发该数据，直到接收方反馈确认无误 (ACK) 后，才发送新数据，如图 9-20 所示。

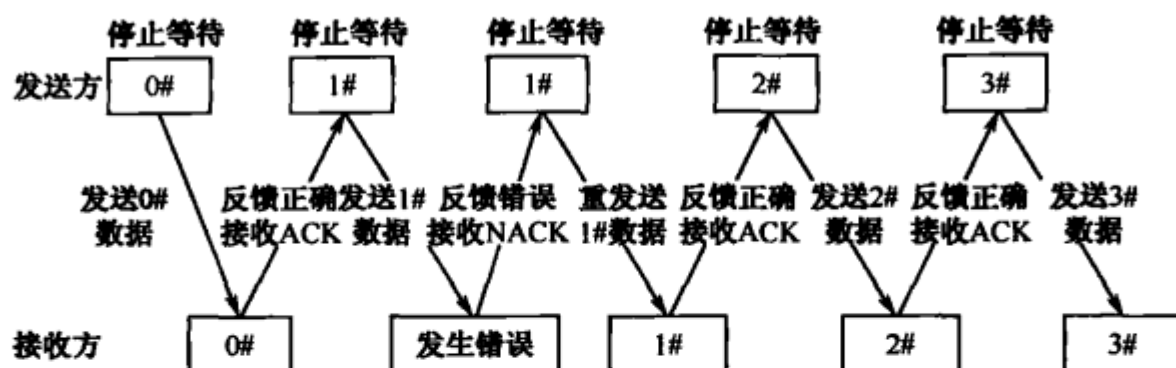


图 9-20 停止等待重传机制

回退机制是指按照数据帧的顺序不停地发送数据后，无须等待接收方的反馈，直到接收方反馈数据错误 NACK。发送方就重发出错数据帧和其后所有的数据帧，相当于回退了 N 帧，到出错帧处，然后继续顺序发送，如图 9-21 所示。

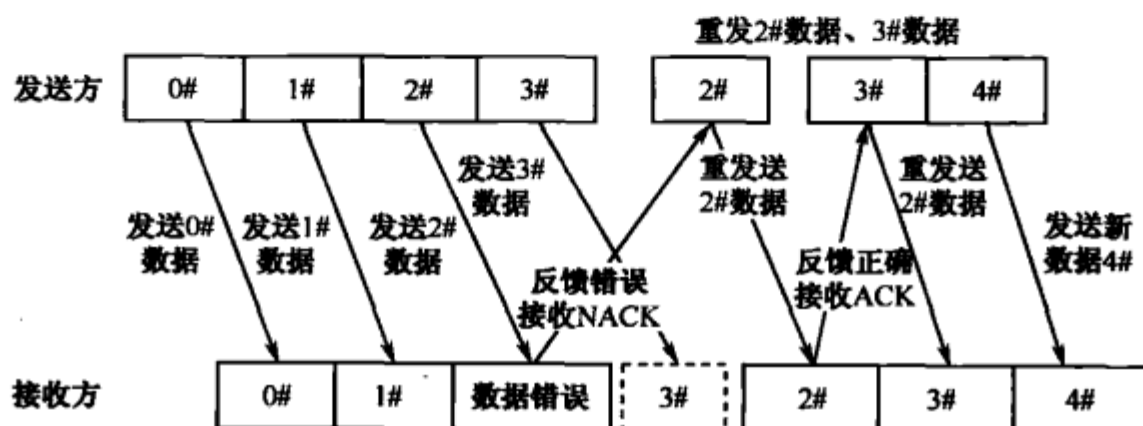


图 9-21 回退重发机制

选择重传是指发送方按照数据帧的顺序不停地发送数据，并将发送的数据存储下来，当接收方反馈数据错误 NACK，发送方就重发出错数据帧，如图 9-22 所示。

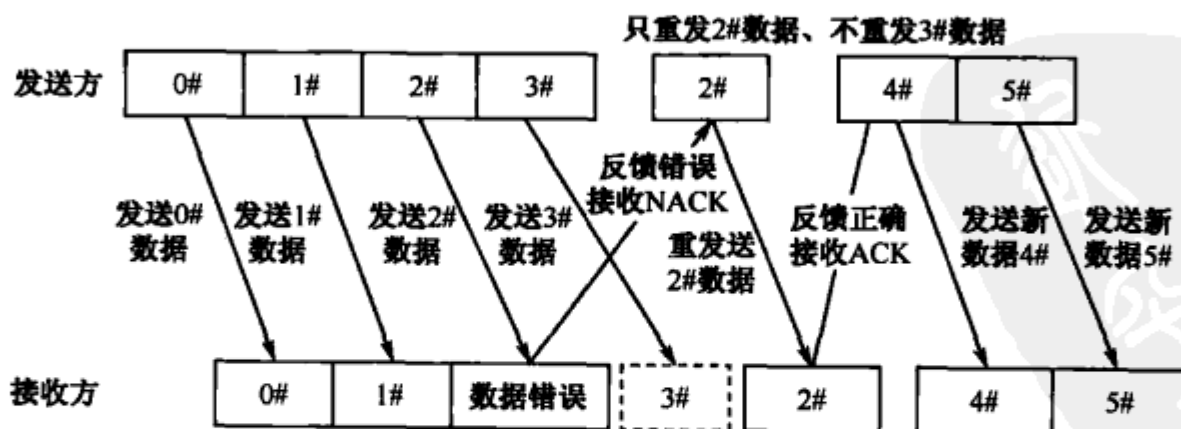


图 9-22 选择重传机制

LTE 中采用的重传机制是停止等待（SAW）协议。

HARQ 合并技术也有以下三类：

第一类 HARQ 就是接收到错误数据后，直接丢弃，然后请求重传，接收到重传数据后自然无法进行合并，直接译码。

第二类 HARQ 是一种完全增量冗余（Incremental Redundancy, IR）的 HARQ 合并技术，接收到的错误数据不丢弃，重传的完全是数据的编码冗余部分，而没有原始数据本身，也就是说重传的数据没有自解码功能，重传的冗余数据和错误数据合并以后进行再次解码。

第三类 HARQ 和第二类 HARQ 相同的是错误数据不丢弃，重传数据与错误数据合并；但不同的是第三类 HARQ 重传的数据具有自解码功能，有原始数据，也有冗余数据。

第三类 HARQ 又分两种情况：

第一种是每次重传的冗余版本完全一样，叫做 Chase 合并（Chase Combining, CC）技术；

第二种是每次重传的冗余版本不一样，叫做部分增量冗余（部分 IR）的合并技术。

LTE 中使用的 HARQ 合并技术有：Chase 合并（CC）和增量冗余（IR）。

Chase 合并技术，重发原始数据和相同版本的冗余编码数据，提高正确解码的概率；增量冗余（IR），逐步发送不同的冗余版本，降低信道编码速率（对应于低阶的冗余编码版本），提高编码增益。

当数据速率较高的时候，一般使用不能自解码的完全增量冗余技术（第二类 HARQ）；而当数据速率较低的时候，则可使用可以自解码的 Chase 合并或部分增量冗余技术。

9.7.4 LTE HARQ 过程

HARQ 技术并不是 LTE 的首创，它在 3GPP HSDPA 中已经使用了。但在 LTE 中，HARQ 技术有了进一步的发挥：

- （1）允许多个进程并行发送。
- （2）重传时可以应答（ACK/NACK）信息的复用和捆绑。
- （3）采用自适应的编码调制。

在 LTE 中，下行采用异步的自适应 HARQ；上行采用同步的 HARQ。这里面异步的含义是指重传时间间隔不固定，而同步是指预定义的固定重传时间间隔。

对于单个 HARQ 进程来说，采用的是停止等待重传机制，1 个数据包发送出去以后，等待 ACK/NACK（正确/错误）反馈，如果出错，则需要重传，直到数据包被正确接收或者超出最大重传次数被丢弃。

下行 HARQ 过程如图 9-23 所示。

在上行 HARQ 中，终端按照基站侧指示的上行资源调度方式，发送上行数据；基站

接收后，在 PHICH 中反馈 ACK/NACK 信息。如果反馈 ACK，基站继续给终端发送上行资源调度信息，终端继续发送新数据；如果反馈 NACK，终端则进行数据重传，整个过程如图 9-24 所示。

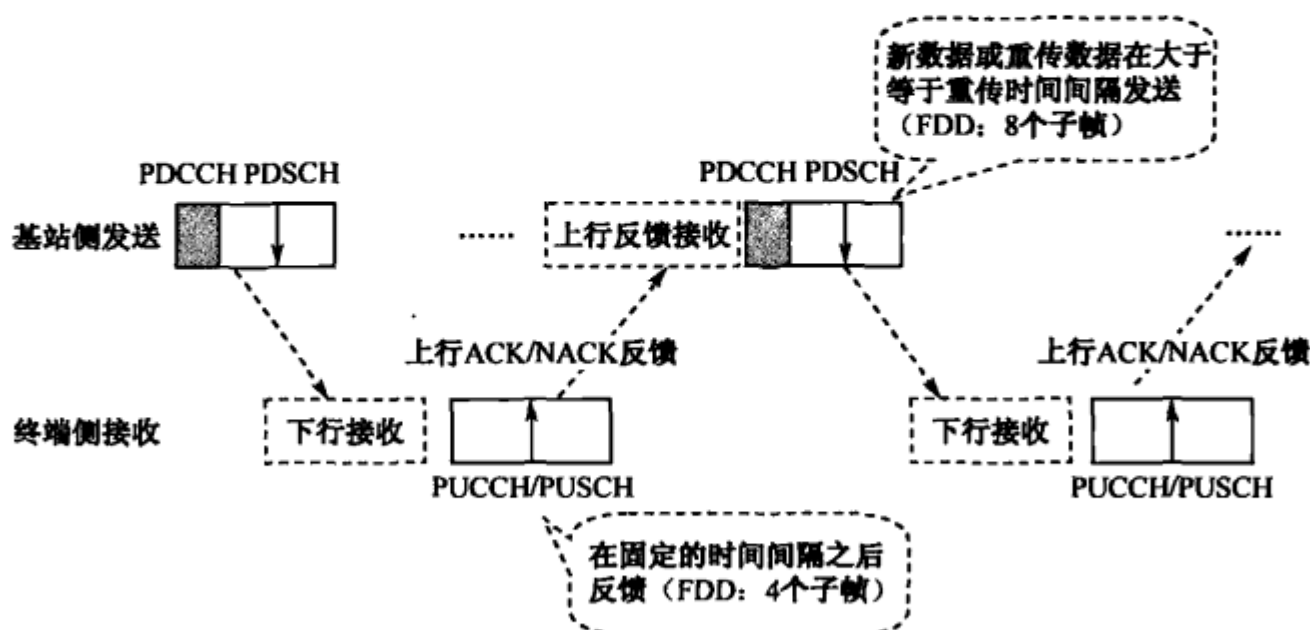


图 9-23 LTE 下行 HARQ 过程

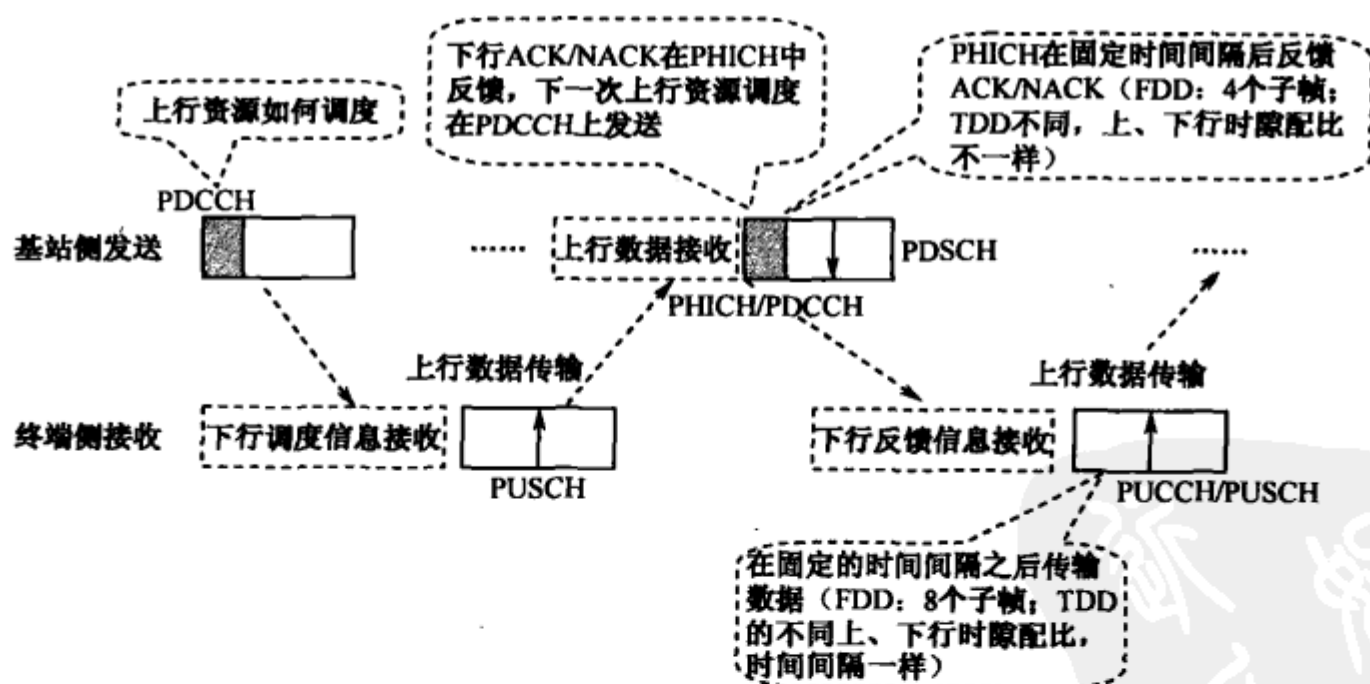


图 9-24 LTE 上行 HARQ 过程

在 LTE 中，允许多个 HARQ 进程并行发送。并行发送的 HARQ 进程数取决于一个 HARQ 进程的 RTT (Round-Trip Time, 往返时间)。对于 FDD 来说，服务小区最多有 8 个下行 HARQ 进程；对于 TDD 来说，服务小区的 HARQ 最多的进程数目取决于上、下行时隙 (UL/DL) 配比，如表 9-5 所示。

表 9-5 TDD 最大 HARQ 的进程数目

TDD UL/DL 配置	最大的 HARQ 进程数
0	4
1	7
2	10
3	9
4	12
5	15
6	6

LTE FDD 的多进程 HARQ 的下行时序控制如图 9-25 所示，上行时序控制如图 9-26 所示。

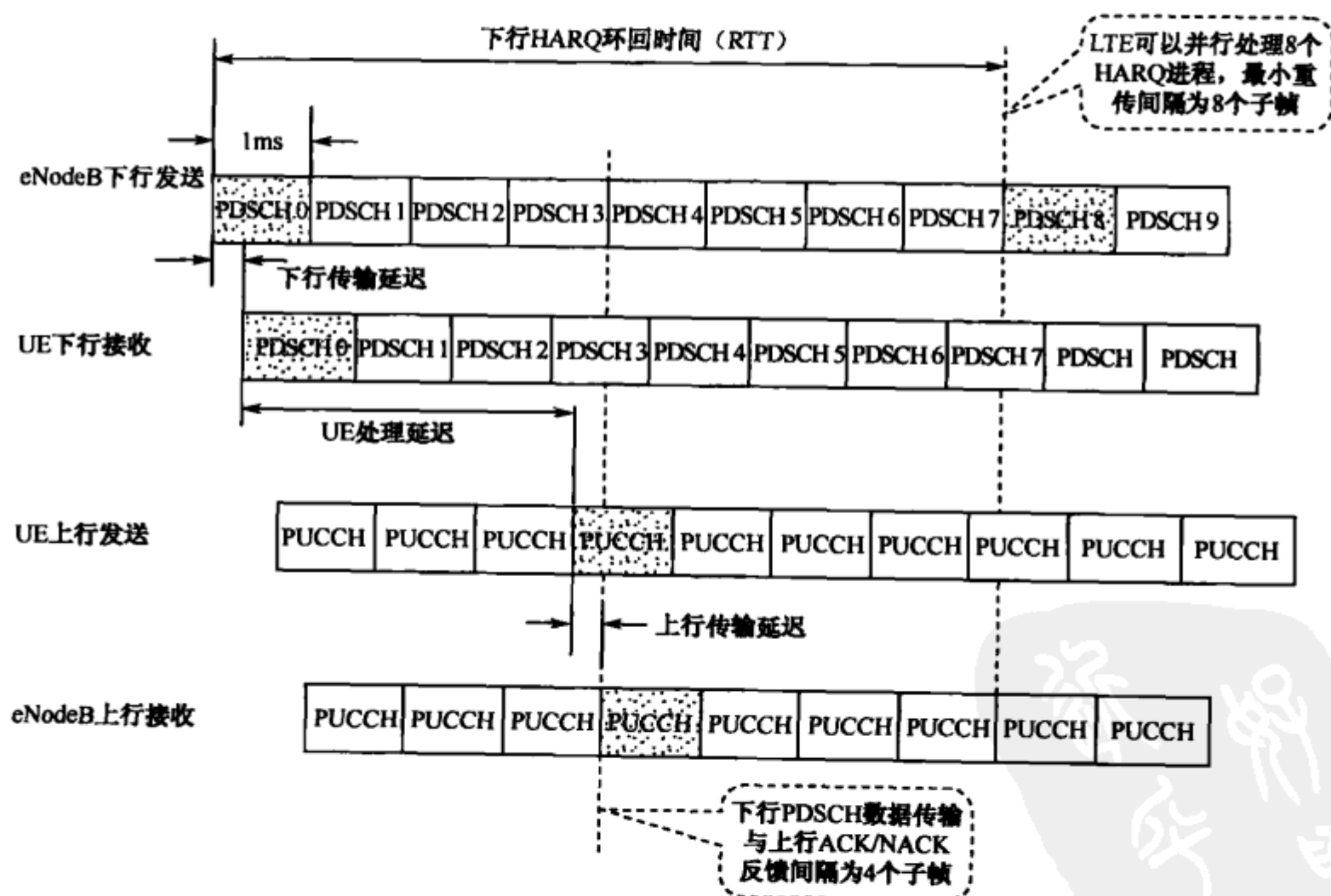


图 9-25 FDD 下行 HARQ 时序控制图

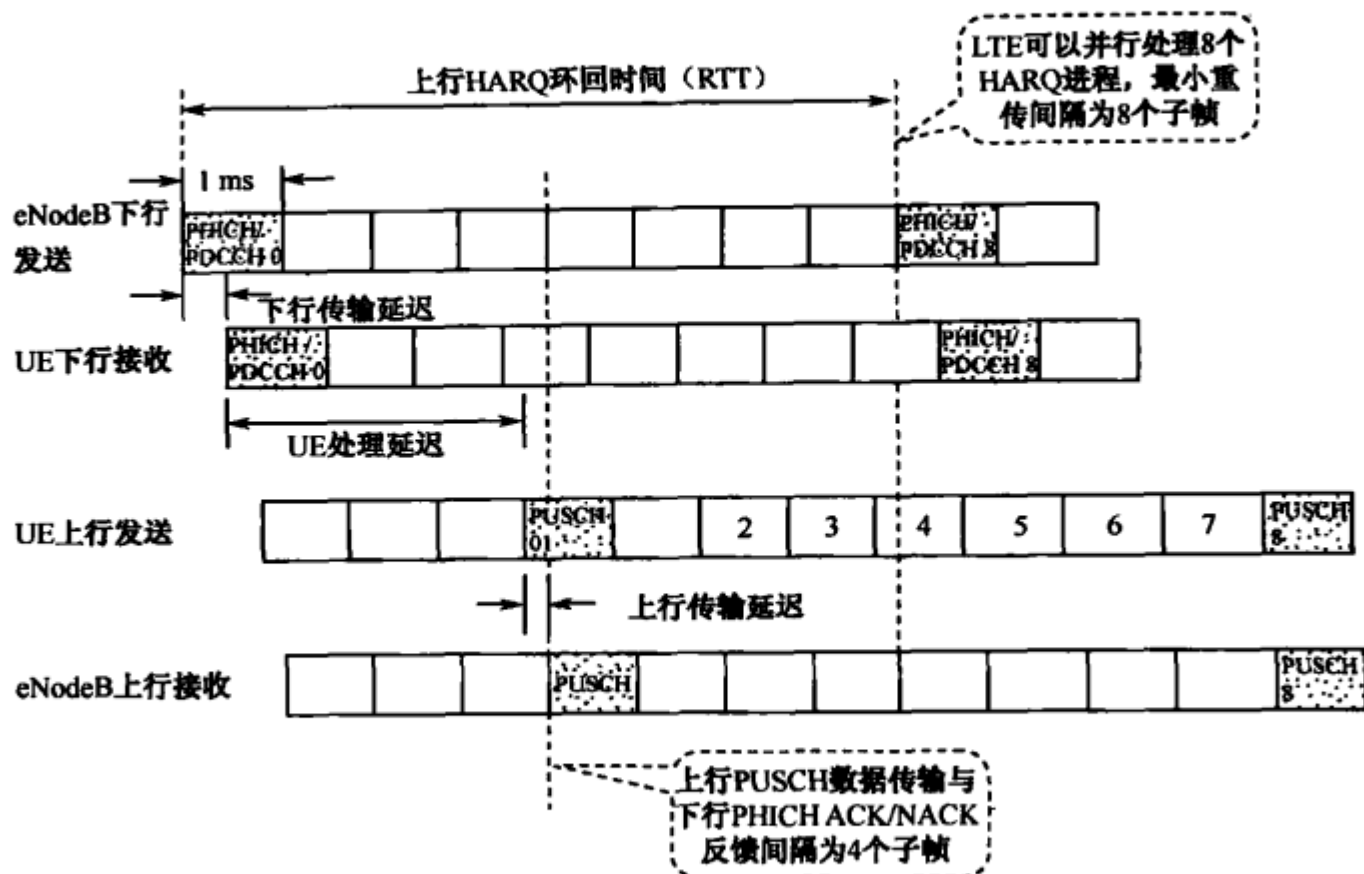


图 9-26 FDD 上行 HARQ 时序控制图

LTE TDD 模式采用了非对称的上、下行时隙配比。在上、下行 HARQ 进程中，各动作时序先后关系与 FDD 一致，但间隔时间依赖于不同的时隙配比。

“下行数据传输 (PDSCH)”与“上行 ACK/NACK 反馈 (PUCCH)”之间的时间间隔，“上行资源调度 (PDCCH)”与“上行数据传输 (PUSCH)”之间的时间间隔，“上行数据传输 (PUSCH)”与“下行 ACK/NACK (PHICH) 反馈”之间的时间间隔要满足以下两个原则：

(1) 在满足最小时间间隔为 4 个子帧的前提下，尽量缩短反馈和调度间隔，以缩短系统时延。

(2) 尽量将 ACK/NACK 的反馈信令分散在各个子帧(上行在 PUCCH、下行在 PHICH)上，以平衡负载。

在 TDD 模式中，存在 1 个上行子帧对应多个下行子帧的情况。如果这多个下行子帧的数据被调度给同一个用户终端，就出现需要用这 1 个上行子帧给多个下行子帧做反馈的情况。于是，就需要应对这种 1 个子帧多 ACK/NACK (Multiple ACK/NACK) 的问题。

TDD 系统中可以将多个下行子帧数据对应的 ACK/NACK 进行“捆绑 (Bundling)”或“复用 (Multiplexing)”，使多个 ACK/NACK 在一个子帧上同时发送。

ACK/NACK 捆绑是将多个 ACK/NACK 进行“与”的合并操作，形成一个反馈消息。多个下行数据包全部正确，就反馈 ACK 消息；其中有一个下行数据包错误，“与”操作

合并后，就反馈 NACK 消息。

ACK/NACK 复用是将多个下行数据包的反馈信息进行复用，合并在一个上行子帧中。其实，复用合并后的子帧中，针对多路下行数据包的每个反馈都能找到，只是占用的空间由多个子帧合在一个子帧上。

9.7.5 链路自适应过程

LTE 中的链路自适应，广义上应该包括功率控制技术、自适应带宽配置、自适应 MIMO 配置、自适应调制与编码 (Adaptive Modulation and Coding, AMC) 等技术。下行自适应 HARQ 技术本质上也是自适应调制编码技术。

这些自适应能力的实现，全依仗基站调度器的功能强大。

一般的工作配合过程是，终端汇报无线信道环境的状况，基站负责根据汇报的情况决策，包括功率控制、带宽配置、MIMO 工作模式、编码调制方式 (Modulation and Coding Scheme, MCS)，分别指示上、下行资源的动态调度。

功率控制技术，本质上就是链路功率的自适应过程，前面章节已经介绍过。这里重点介绍自适应带宽配置、自适应 MIMO 配置和自适应调制编码 (AMC) 过程。

自适应带宽配置，是一种频率自适应技术。本质上以 OFDM 技术为基础，结合共享信道数据传输的物理层过程完成的。

前面已经介绍过。LTE 上、下行都是由基站进行动态时、频资源的调度，通过 PDCCH 给终端作出时、频指示，共享信道来完成上、下行数据传输的。也就是说，自适应带宽配置实际上就是频率资源的动态调度，决定子载波配置的位置和数量。

带宽自适应可以抗频率选择性衰落，获得传输质量上的增益。

以往无线制式的自适应最多是空域、时域或码域上的自适应，如天线（空间）自适应、调制编码自适应 (AMC)、信道资源分配的自适应 (DCA 等 RRM)，都没有涉及频域。

跳频技术，本质上是一种干扰随机化的技术，不是频域自适应的技术。WCDMA、TD-SCDMA 使用的带宽是不做自适应的。在 WCDMA 里面，上行 5 MHz 带宽、下行 5 MHz 带宽是定死的，不能根据环境、用户需求动态变化。

但在 LTE 里面，完全可能出现下行 20 MHz 带宽，上行只用 1 MHz 带宽的情况。LTE 把自适应的概念进一步发挥了，推广到了频域。带宽的分配是以 RB 为单位的，一个 RB 里面包含多个正交的子载波。RB 数目的多少，可以根据无线信道的环境，用户的需求，自适应地分配。

LTE 可以支持较大的系统带宽 (10/15/20 MHz)，通常会面临频率选择性衰落的问题。某用户的子载波在相干带宽内的衰落特性可以认为是相同的，但更远的子载波上的衰落特性就不相同了。

如果知道各个用户在各个子载波上的衰落特性，则可以为不同的用户尽量选择条件比较好的子载波进行数据传输，从而使得绝大部分用户的传播条件比较好，实现多用户分集增益，提高频谱效率。

相干带宽内的子载波具有近似的衰落值，可以把相邻的一些子载波划分成一个子带 (Subband)，以子带为单位进行调度。接收方在一定的时间内针对每个子带反馈一个信号质量指示，而无须对每个子载波进行反馈，减少信令开销。

LTE 的调度周期可以为一个或多个 TTI 长度。

为了在频域调度中获得多用户分集增益，发射端必须知道所有用户在所有子载波上的瞬时衰落值。FDD 系统上、下行衰落不一致，必须通过反向链路将信道信息回传给发射端，这些信道质量指示均为额外开销，占用资源越少越好。

自适应 MIMO 配置和自适应调制编码 (AMC) 这两个自适应过程，都是终端上报链路质量信息 (RI/PMI/CQI)，由基站决定上、下行资源调度的方式。

在下行方向上，基站根据 UE 上行汇报的信道状况信息 (CSI)，决定下行数据传输的天线模式、编码调制方式，然后在 PDSCH 信道上按照决定好的方式进行数据发送，如图 9-27 所示。

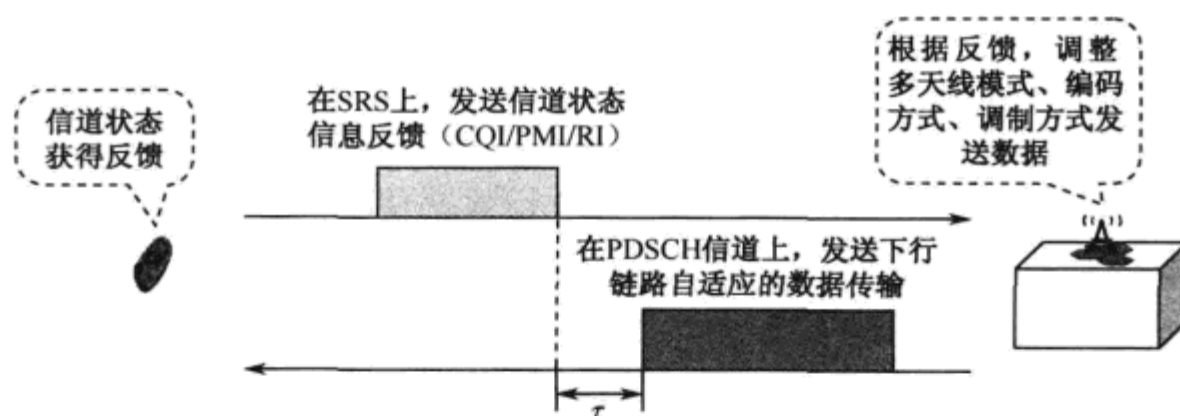


图 9-27 下行链路自适应传输

在上行方向上，基站依旧根据 UE 上行汇报的信道状况信息 (CSI)，决定给各个终端分配上行资源调度方式，用 PDCCH 将这个指示发送给各个终端。终端则按照基站的指示 (天线模式、编码调制模式) 在 PUSCH 上进行数据发送，如图 9-28 所示。

上行链路自适应灵活地组合自适应传输带宽、功率控制和自适应调制编码，可以根据无线信道环境、系统资源状况对频率资源、干扰水平和频谱效率三个性能指标做出合理调整。

对于 MIMO 配置的自适应，需要反馈的是 RI (Rank Indicator, 秩大小)、PMI (Precoding Matrix Indicator, 预编码反馈)。MIMO 有 7 种工作模式。在链路条件较差的时候，可以回退到 RI=1 的发射分集模式，这样数据传送的可靠性增强了，但吞吐率则降低了；在

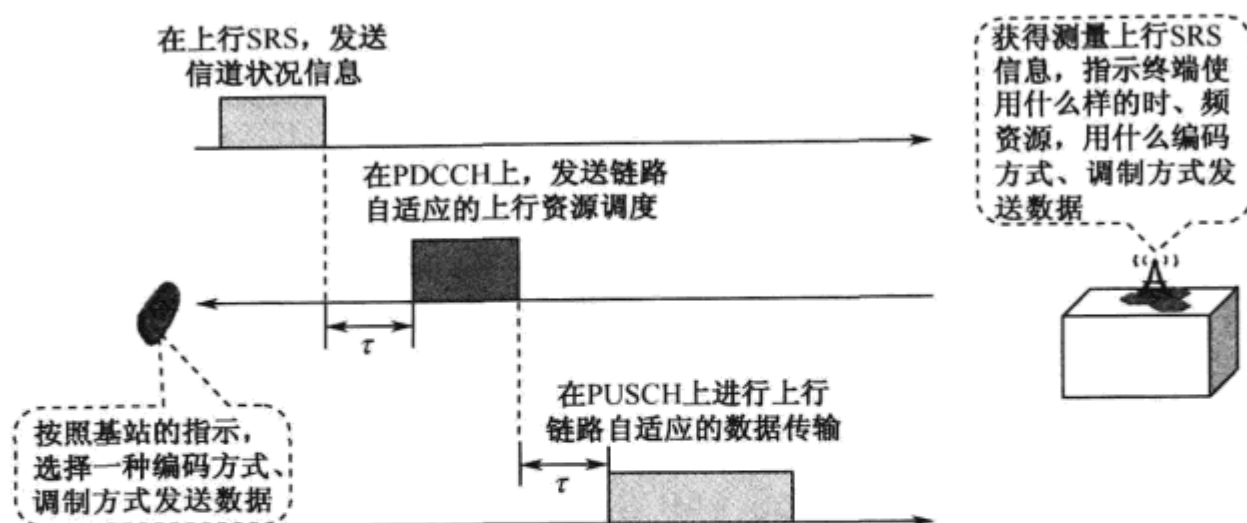


图 9-28 上行链路自适应过程

链路条件较好的时候，可以使用尽可能满秩的天线发射模式（RI），选择适应信道环境的预编码方式（PMI），用较大的吞吐率发送数据，但可靠性的保障降低了。

对于调制和编码方式的自适应，需要反馈 CQI（Channel Quality Indicator）值。和 CDMA 系统不同，OFDM 系统可以在不同频带，采用不同的调制编码方式，如图 9-29 所示。这就需要在不同频带上分别测量、反馈 CQI。

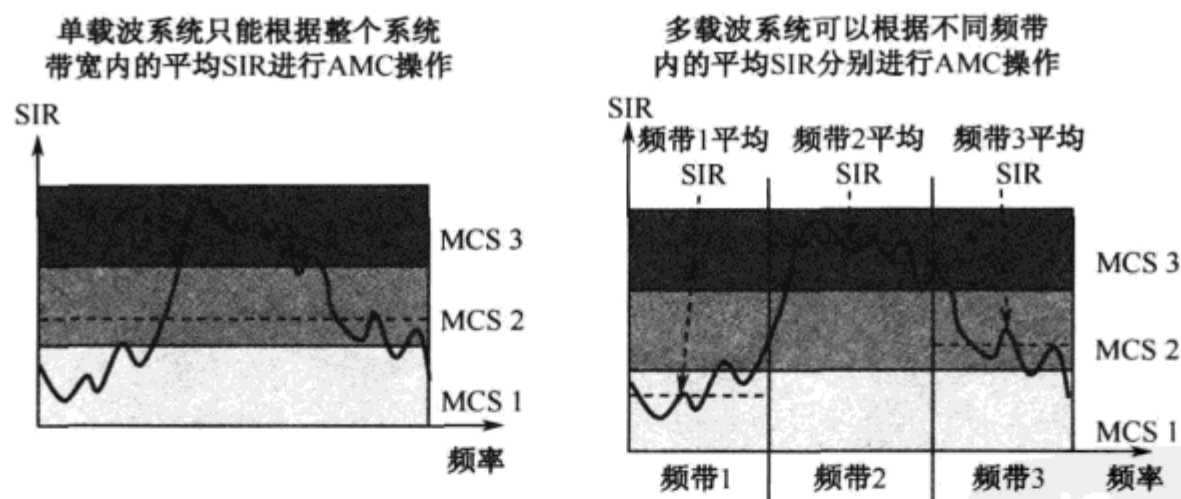


图 9-29 LTE 中 AMC 操作

RI/PMI/CQI 是通过基站对上行 Sounding RS 进行信道测量得到的，UE 用什么时频资源来给基站报告 PMI/RI/CQI 是由 eNodeB 控制的。报告方式有周期性和非周期性两种。UE 可以使用 PUCCH 进行周期性报告，使用 PUSCH 进行非周期性报告。

RI/PMI/CQI 这些信道信息反馈的频率粒度最小单位为子带（Subband）。子带是由 4、6、8 连续的 PRB 组成的。子带包含的 PRB 数量和系统带宽的大小有关系，如表 9-6 所示。若系统带宽小于 8 个 RB，则不再需要定义子带（Subband）。

表 9-6 系统带宽与子带大小的关系

系统带宽（下行 RB 数目）	子带（Subband）大小（连续 RB 数据）
6~7	不定义
8~10	4
11~26	4
27~63	6
64~110	8

LTE 中定义了 29 种调制编码格式（MCS），它们是三种调制方式与多种信道编码方式的组合。

三种调制方式主要是针对下行共享信道 PDSCH 和上行共享信道 PUSCH 的 QPSK、16QAM、64QAM 的调制方式。

编码效率的范围从 0.16~0.92；数据信道采用 Turbo 码，控制信道采用卷积码。与 29 种调制编码格式相对应的是 29 种传输块大小。调制编码格式确定了，传输块大小也就确定了。然后可以分配相应的时、频资源来自适应无线环境的变化。

听得见炮声的指挥所——无线资源管理 RRM

知识要点

无线资源的高效合理使用，是无线网络性能卓越的重要前提。LTE 的无线资源调度模块设置在基站侧，可以根据无线环境的变化更加灵活高效地完成无线资源调度任务。

LTE 无线资源管理包括无线准入控制、无线承载控制、动态资源分配、小区间干扰协调、负载均衡、连接移动性控制、小区间和系统间 RRM 等多个模块。这些模块相互配合，在变化的无线环境中，共同完成不同的终端状态和网络条件下的无线资源调度任务。

三吉皮皮国正在进行一场激烈的争论，争论的焦点是贸易战的指挥权放在什么地方（见图 10-1）。

“资源总是有限的，对资源的需求却是无限的”。军师阿阿母（RRM 化名）分析道：“如果把资源管理权放在的底层，恐怕会……”他卖了一个关子。

但接班人奥先生有些不耐烦，“恐怕会什么，快说！”

“恐怕会浪费资源，而且彼此之间各自为阵，彼此协调困难，混乱不堪（小区间干扰难以抑制）”，军师慢条斯理地说。谁拥有了资源的分配和管理权，谁就掌握了话语权，从心底上说，他不想失去这个权力。

“资源的分配和管理讲究的是高效率和高效益。有限的资源最大程度地满足无限的需求，这就对资源调度的快速、合理提出较高的要求。”一线代表姬占（基站化名）说出了他的道理：“把指挥所建在听得见炮声的地方，离敌人最近，对战况最为熟悉，对物资的调度更加快速高效，更加符合贸易战的需要。”

接班人奥先生现在意识到了：资源的分配权给了谁，关系到资源分配的效率和效益。



图 10-1 资源分配权力下放

一场贸易战，对战略物资的管理权如果放置在总部，物资使用会更加关注整体和长远的战略利益，但由于资源调度工作量大，从总部到一线距离较远，有可能不能快速有效地响应局部作战单元对物资的需求。

如果把战略物资的管理权下放到基层的具体作战单元上，对物资的调度更加快速高效。但是资源分配权下放到一线，则容易忽略整体资源的使用效益，同时一线作战单元之间需要进行大量的配合协调工作。

接班人奥先生沉默了一会儿，大家安静下来。“我只问两个问题：一、姬占，你有没有调度好本辖区的能力？二、姬占，你和其他作战单位如何协调？”

姬占发现接班人奥先生言语之间有倾向自己观点的地方，理直气壮地说：“现代科技的发展，信息化办公、技术基础你大可放心。我计划建设多个资源管理(Resource Management)模块，既职责清晰，又相互配合！至于第二个问题，领导，您尽管放心，我们已经建立了叫做 X2 的站长热线，而且有个专门的多区域资源协调管理模块负责这项工作。”

接班人奥先生随即宣布改组命令：“为了提高作战的快速反应能力，一线作战单元设置资源管理部(RM)(类似无线资源管理模块的作用)，姬占作为管理组组长；一线设立物质配给处(类似无线通信中的物理层的作用)，负责执行资源管理部的命令。资源管理部和物质配给处中间设立物质分类、打包传输部(类似层二和层三的功能)。取消从中央到地方的中间资源管理部(取消了在 RNC 上部署 RRM 的计划)。”

国王欣慰地点头：“早已森严壁垒，更加众志成城。黄洋界上炮声隆，报道敌军宵遁。”

接班人奥先生笑着对姬占说：“国王比较赞赏我们这个大胆的想法。”

10.1 LTE 的无线资源管理 RRM

无线资源管理（Radio Resource Management, RRM）通过对无线通信系统中有限的无线资源进行分配调度和控制管理，以确保覆盖和提升容量，高质量地满足用户的业务使用需求，最终使系统的性能潜质发挥到极致。

在 LTE 中的 RRM 对无线资源的管理使用过程中，要考虑单小区和多小区两种情况。

覆盖、容量、质量（QoS）是无线网络性能的三个支柱，既相互影响，又相互作用，如图 10-2 所示。无线资源管理的目的就是在保证服务质量的同时，最大限度地增强覆盖和提高频谱利用效率，寻求覆盖、容量、质量三者之间的最佳工作平衡点。

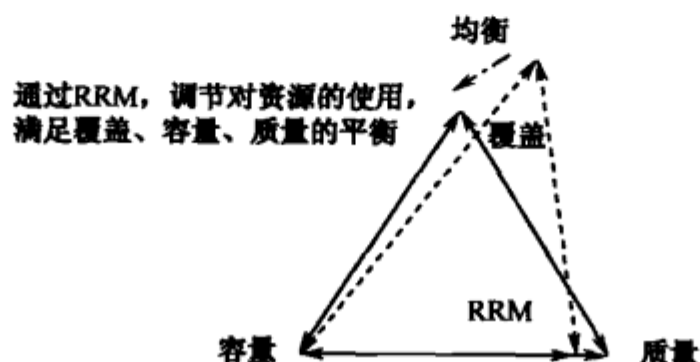


图 10-2 RRM 调度的作用

无线资源管理 RRM 管理的是什么资源呢？当然是物理层负责接入用户、保障业务正常进行的无线资源，如时间、频率、码道、空间、功率，如表 10-1 所示。

表 10-1 LTE 和 UMTS 可调度无线资源的比较

RRM 调度		UMTS	LTE
资源	时间	WCDMA HSDPA: 一个 10 ms 的帧、5 个 2 ms 的短帧 TD-SCDMA: 一个 10 ms 帧、2 个 5 ms 的子帧 码片（Chip）数目可以度量时间	一个 10 ms 的帧、10 个 1 ms 子帧 一个 1 ms 子帧，2 个 0.5 ms 的时隙 OFDM 符号长度度量时间
	频率	固定带宽的载波 WCDMA: 单载波上、下行各 5 MHz TD-SCDMA: 单载波上、下行共 1.6 MHz	可灵活调度的子载波，子载波间隔 $\Delta f = 15$ kHz 支持的系统带宽: 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz
	码道	正交码分多址（CDMA），码道是一种资源	—
	空间	TD-SCDMA: 波束赋型的智能天线	MIMO 系统，7 种天线工作模式
	功率	主要为了克服远近效应	主要为了抑制干扰
调度周期		WCDMA HSDPA: 2 ms; TD-SCDMA: 5 ms	1 ms

时间资源是有特定时间长度的无线帧、无线子帧或时隙。不同无线制式，时隙的长度不同，无线帧的结构也有一定的差别。在 UMTS 中，时间的长度可以用码片（Chip）的数量来描述；而在 LTE 中，时间的长度是用 OFDM 的符号长度来度量的。

在以往无线制式里，频率资源指的是固定带宽的载波资源；而在 LTE 里，频率资源指的是可以灵活调度的子载波。

在 UMTS 无线制式中，有码道资源的概念；而在 LTE 里面，没有使用 CDMA，也就没有了码道资源的概念。

TD-SCDMA 使用智能天线，它的空间概念指的是使用波束赋型的各个天线通道；而在 LTE 中，空间的概念扩展为 MIMO 系统的多天线通路，其中波束赋型只是它的一种工作模式。

在 UMTS 中，功率控制是为了克服远近效应；在 LTE 中，功率控制是干扰协调控制的一种手段。

此外，不同无线制式的无线资源调度的最小周期是不一样的。在 WCDMA 的 HSDPA 中，最小的调度周期是一个短帧的长度为 2 ms；在 TD-SCDMA 中，最小的调度周期是一个子帧的长度为 5 ms；而在 LTE 中，最小的调度周期是一个子帧、两个时隙的长度为 1 ms。

调度周期从以前的 5 ms 或 2 ms 缩短到 1 ms，以前每个用户至少分配 5 ms 或 2 ms 的无线资源，现在 LTE 资源的分配粒度变为 1 ms。如果需要重传，LTE 也只需要重传这 1 ms 的数据块。调度资源的时间粒度缩短，极大地提高了空口资源利用率和资源调度灵活性，但缺点是信令开销也随之增加。

10.1.1 分布式 RRM

权力集中，有利于统筹兼顾；权力分散，有利于灵活机动。

集中式 RRM，如图 10-3 所示。管理权力高度集中，将无线资源管理的功能模块集中放置在一个网元中（如 GSM 中的 BTS、UMTS 中的 RNC），控制多个基站设备的无线资源调度，是一种计划经济时代的资源分配方式。集中式 RRM 有利于基站间的无线资源的协调控制，但会带来复杂的信令流程和较大的时延。

分布式 RRM，管理权力下放，分散在基层组织中，无线资源管理的功能模块分散地放置在每个基站上，是一种市场经济时代的资源配置方式；这时候不需要一个集中的管理网元，如图 10-4 所示。基站内某小区的无线资源由小区内的 RRM 直接调度。RRM 和无线资源之间成为基站内部的信令交互，而不是基站和上层设备之间的信令交互。分布式 RRM，可以灵活和快速地完成无线资源的调度，降低了时延，节约了设备间的信令交互流程。

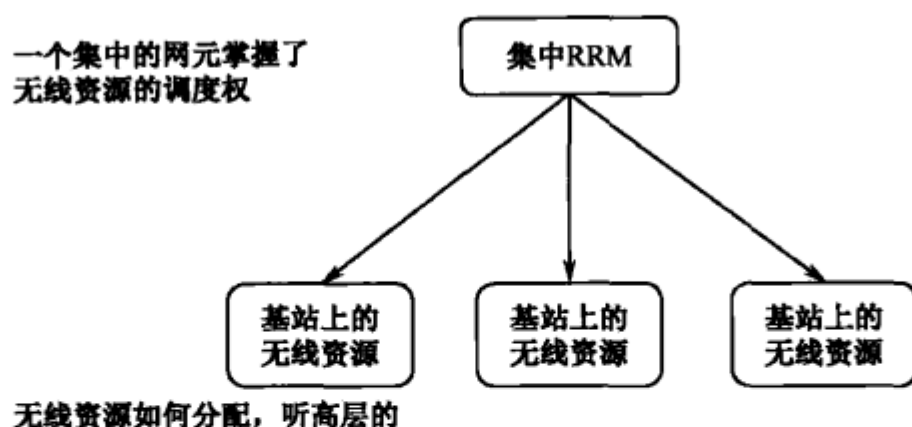


图 10-3 集中式 RRM

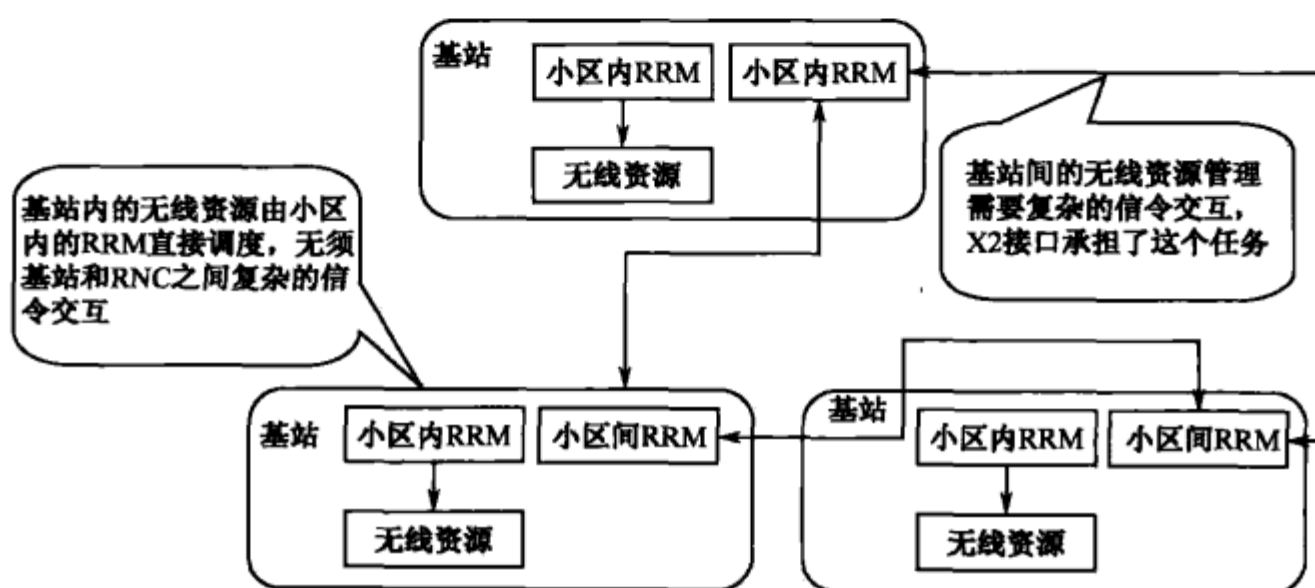


图 10-4 分布式 RRM

但是，没有集中控制的网元，基站之间会不会出现各自为阵、无法协作的问题呢？为了避免基站间无线资源控制的混乱，每个基站都增加了用于彼此协调的小区间 RRM 控制模块。对于需要多小区协作的工作，如小区间干扰控制、准入控制，等等，就可以利用基站间的无线资源管理模块来协调处理了。也就是说，分布式 RRM，在基站间的协调配合方面，比集中式的 RRM 更加复杂。

分布式的 RRM 一定包括以下两部分：

(1) 基站内部的 RRM。

基站内部的 RRM 只对一个基站下的多个小区进行无线资源管理，不需要直接通过 X2 接口获取其他基站的信息。

(2) 基站之间的 RRM。

基站之间的 RRM 则不然，对多个 eNodeB 下的各个小区的无线资源进行管理，需通过 X2 接口和其他基站交互信息。

UMTS 发展的初期 (3GPP R99、R4 版本) 都是采用集中式的 RRM, 即在 RNC 这个网元中进行无线资源的调度管理, 在 NodeB 上按照 RNC 的资源调度指示进行无线资源的使用。

在 HSDPA (3GPP R5) 出现后, 将一部分 RRM 功能 (动态资源分配、快速调度) 放在了 NodeB 的 MAC 层, 实现了部分分布式 RRM, 但主要还是集中式 RRM。

在 LTE 系统中, 主要采用的是分布式 RRM, 将大多数 RRM 功能终结在 eNodeB 中, 无须高层设备的指示。资源调度算法终结在协议栈的 MAC 层, 接纳控制、切换算法、干扰协调等则安排在协议栈的 RRC 层。这样可以避免复杂的设备间的信令流程, eUTRAN 可以获得较低的时延和更高的 QoS。

但由于 MBMS 本身的业务特点, 也有可能采用集中式 RRM 处理, 由 AGW 或者其他的额外设备承担部分集中式 RRM 的功能。跨系统的 RRM 功能需要位于连接异系统的网关节点上, 也是一种集中式的 RRM 方式。这是一种市场经济和计划经济相结合的资源配置方式, 但主要是市场经济方式。

10.1.2 RRM 的影响要素

无线资源管理 (RRM) 是所有移动制式中必有的模块。但是, 不同的无线制式, RRM 的实现有很大的不同。

在 LTE 中, 网络结构的变化、无线资源的内容和性质的不同, 使得管理模块和无线资源池之间调度的流程、调度复杂度、调度所需的时间都不同。也就是说, LTE 很多设计上的变化, 使得 RRM 模块在实现的时候要有一些特殊的考虑, 如图 10-5 所示。

LTE 的无线网络架构的扁平化, 减少了多个基站的集中控制节点。网络结构的这一点变化, 必然使得 LTE 的 RRM 模块从集中化走向分布式, RRM 功能只能分布在 eNodeB 这一种无线侧的网络节点上。扁平化后, 在 eNodeB 中实现的多小区间 RRM 功能, 势必要比以往无线制式复杂一些。

所有用户平面的无线接入层面的处理都位于 eNodeB, eNodeB 本身具有定时信息 (使用连接帧序号 CFN)。而在传统的 UMTS 中, 定时信息是基站通过 Iub 帧协议的同步过程从 RNC 中获得的。

LTE 取消了 CS 域, 仅支持 PS 域。以往 CS 域承载的业务, 现在用 PS 域承载, 使得业务特征变化更大。RRM 算法要适应这种全 PS 域的设计。不同业务的吞吐量要求、实时性要求、QoS 要求、突发性要求就是各种 RRM 模块的输入。RRM 根据这些输入作出灵活的无线资源安排。

在 UMTS 系统中, 采用固定带宽, RRM 模块无须考虑带宽灵活调度问题。LTE 支持多种系统带宽灵活配置。带宽的灵活配置给 RRM 增加了两类工作:

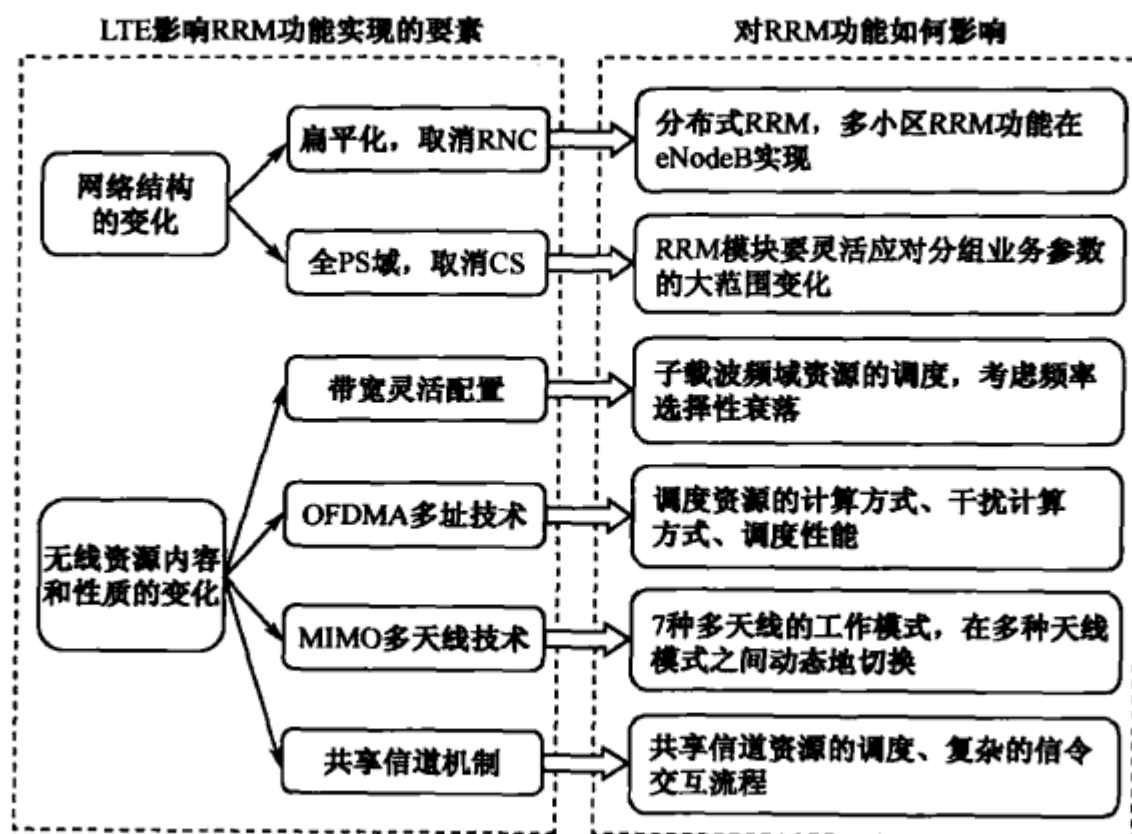


图 10-5 LTE 影响 RRM 功能的要素

(1) 子载波频域资源的调度。

(2) 考虑频率选择性衰落（不同的子载波，信道衰落特性是不一样的）的调度。

也就是说，频率资源的多少和不同频率的调度性能是 LTE RRM 模块需要重新考虑的。

LTE 摒弃了 CDMA，引入了 OFDMA 的多址接入技术。RRM 模块在实现的时候需要考虑所调度资源的计算方式的变化，即小区间和小区内干扰计算方法的变化以及由此带来的对调度性能的影响。

LTE 采用了 MIMO 的多天线技术，引入了无线资源的“空间维度”。同单天线的情况相比，改变了物理资源的组织形式。同 TD-SCDMA 的智能天线相比，LTE 支持多达 7 种多天线的模式。在 RRM 的实现过程中，不但要考虑这 7 种多天线空间资源的组织形式，而且要考虑随着无线信道环境的变化，在多种天线工作模式之间动态的切换，以提高系统空间资源的调度性能。

LTE 摒弃了以往无线制式的专用信道机制，而采用了多业务多用户共享同样的信道资源，通过分组调度的方式，在业务之间进行分配的机制。RRM 模块要适应这种共享信道机制的动态性、灵活性、快速性，就要改变以往专用信道机制的刻板。eNodeB 通过控制信令为每一个传输块（TB）动态地分配所对应的无线资源，用完后，立即收回，继续为其他调度服务。这就必然给 RRM 模块的资源调度带来更复杂的信令交互过程。

10.2 RRM 模块之间的关系

10.2.1 部门职能分工

无线资源管理(RRM)的功能类似于一个城市的人口流动和经济资源的管理职能(见图 10-6)。

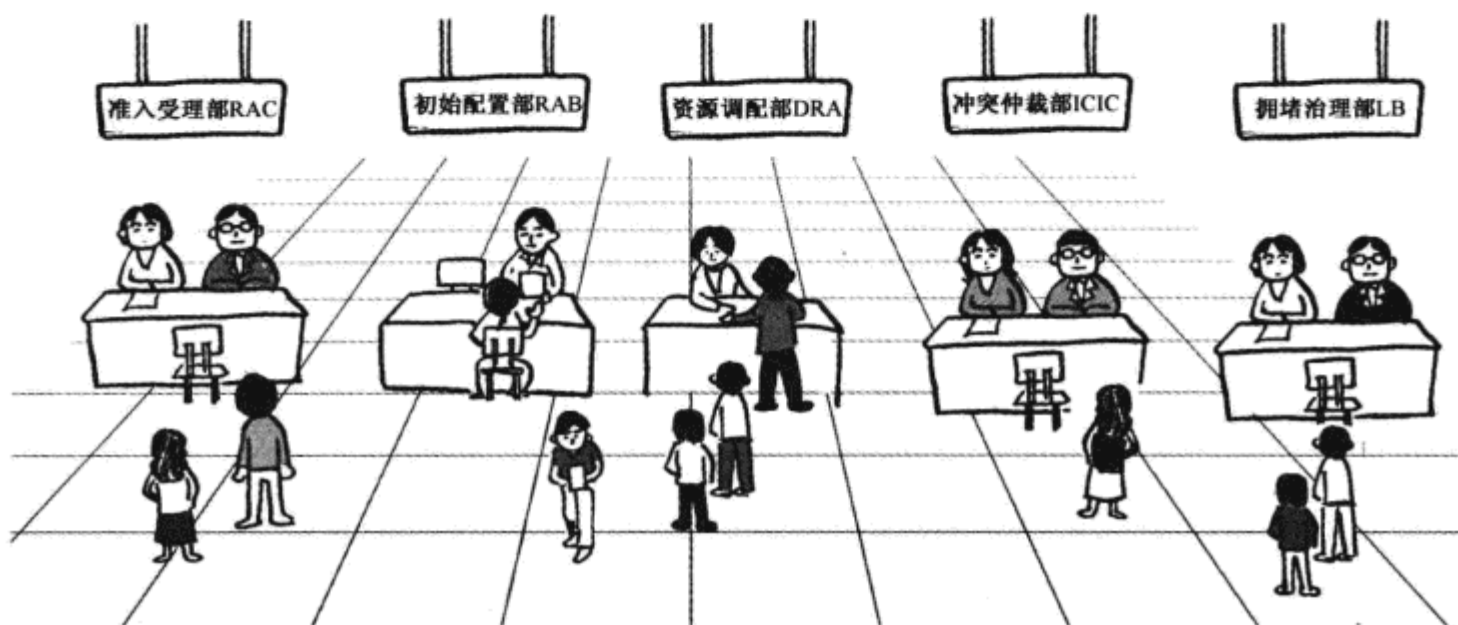


图 10-6 城市资源管理部门

首先,有些人员要申请入驻一个城市 A,城市 A 的相关管理部门就会受理这个申请,并作出准入或拒绝的决定,这就是准入控制的过程(类似无线准入控制)。

根据人员的条件不同,对住房、交通、生活资料的要求也不同。新调入 A 城市的人员获得许可后,按照城市的常驻或者暂住人口的经济政策(经济适用房政策、买车政策等),来初步配置正常生活所需的物质资源。这就是承载控制过程(类似无线承载控制)。

在 A 城市的人员,日常生活和工作的情况不同,需要的物质资源不同。有人需要大量购买蔬菜,有人需要大量购买肉食,还有的人则大量购买茅台酒。这就需要城市的经济部门对这些物质进行动态的调度(类似动态资源调度分配),以适应经济生活的需求。

城市内部的经济交往、城市与城市间的经济往来,不可避免地产生一些经济摩擦,需要设立一些仲裁协调部门,以解决经济矛盾(无线制式中的干扰协调,类似城市内部的经济矛盾协调功能;无线制式中的小区间干扰协调,则类似城市间的经济矛盾协调功能)。

随着经济的发展,城市住房、交通资源日益紧张,污染越来越严重,很难承受越来越

越沉重的人口负担，这个时候需要进行负载控制了。

由于工作或者学习的需要，很多人要在城市间流动。这就涉及从一个城市迁出，在另一个城市迁入的过程，也就是流动人口的管理问题（类似连接移动性控制）。

还有一些人，腰包鼓了，想到国外走一走，看一看，于是就需要去相关部门办理护照和签证（类似系统间无线资源管理）。

管理的学问是相通的。管理一个城市的人口流动和物质资源的道理同样适用于无线资源管理 RRM。

是否允许一个呼叫接入？接入后需要如何承载？无线环境条件变化，如何动态调整资源？产生小区间的干扰该怎么办？小区负荷过高该怎么办？用户移动到了别的小区该怎么办？用户跑到了其他无线制式的势力范围内该怎么办？这些都是无线资源管理 RRM 的职能范围，具体职能包括：

- (1) 无线准入控制 (Radio Admission Control, RAC);
- (2) 无线承载控制 (Radio Bearer Control, RBC);
- (3) 动态资源调度分配 (Dynamic Resource Allocation, DRA);
- (4) 小区间干扰协调 (Inter Cell Interference Coordination, ICIC);
- (5) 负载均衡 (Load Balance, LB);
- (6) 连接移动性控制 (Connection Mobility Control, CMC);
- (7) 系统间无线资源管理 (Inter-RAT RRM)。

10.2.2 工作配合关系

这些 RRM 的功能模块是一个有机的整体，相互配合、相互依存。没有任何一个 RRM 过程是孤立存在和独立发挥作用的。

RRM 功能模块之间的管理关系大致分为以下三类：

- (1) 调用和被调用关系。
- (2) 触发和被触发关系。
- (3) 信息需求与信息提供关系。

第一类：一个功能需要调用另外一个功能才能正常工作，如图 10-7 所示。

是否准入，是使用无线资源的第一个门槛，所以有些 RRM 模块需要调用准入控制模块 (RAC)。

无线承载控制 (RBC) 在给一个接入请求分配资源之前，先调用一下无线准入控制 (RAC) 功能；酒店给一个旅客登记住宿（承载控制）之前，也得先查验一下旅客的身份证，查看一下酒店未预定出去的空房资源（准入控制）。

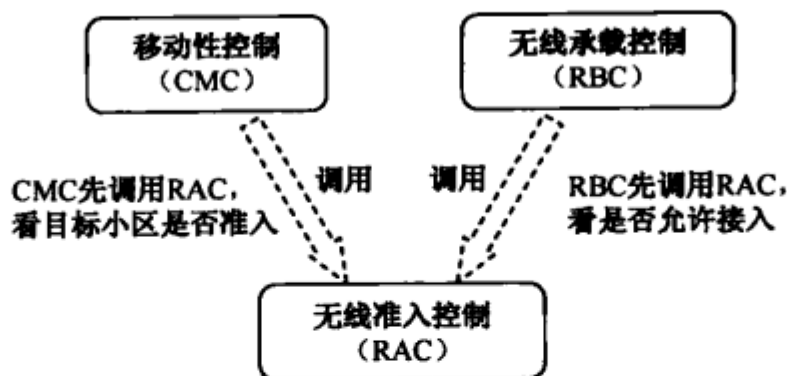


图 10-7 RRM 模块的调用关系

移动性控制 (CMC) 在将一个用户切换出去的过程中，先要调用一下无线准入控制 (RAC) 功能，看一下可以把这个用户切换到哪个小区；单位里内部轮岗的时候，也须看一看接收部门是否接纳想调入的人员。

第二类：一个功能触发另外一个功能，如图 10-8 所示。

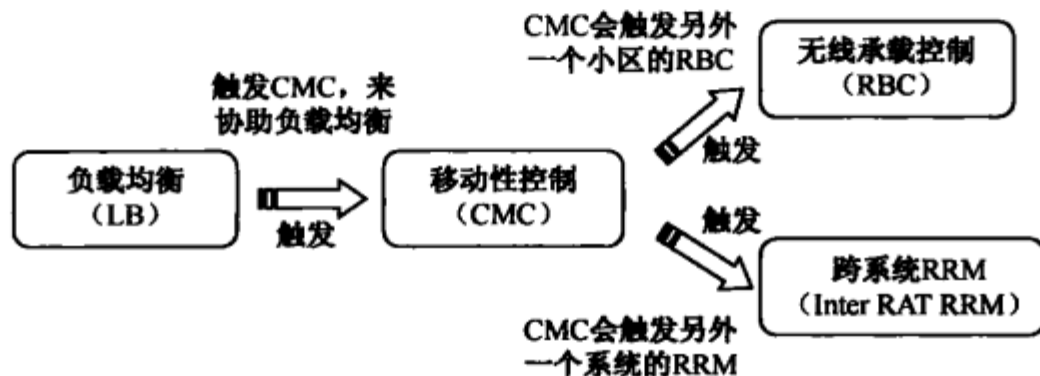


图 10-8 RRM 模块的触发关系

移动性控制 (CMC) 会触发无线承载控制 (RBC)，如同一个人想换工作必须申请好下一个工作；也有可能触发 Inter-RAT RRM，好比想去国外的人要办理很多涉外手续一样。负载均衡 (LB) 需要触发移动性控制 (CMC)，一个地方人满为患了（需要负荷控制），就需要让人动一动了（需要流动性管理）。

第三类：一个功能为另外一个功能提供信息。模块之间的信息提供关系有两种：单向和双向，如图 10-9 所示。

单向信息提供关系：无线准入控制 (RAC) 根据负载均衡 (LB) 模块为其提供的负载信息，以及动态资源调度分配 (DRA) 和为其提供的剩余可分配的资源信息来判断是否允许接入某一业务请求；连锁酒店是否为一个旅客登记入住，需要知道当前酒店是否满员（负载）、哪些酒店有空余房源等信息。

双向信息提供关系：动态资源调度分配 (DRA) 可以为无线承载控制 (RBC)、小区间干扰协调 (ICIC)、负载均衡 (LB) 提供资源调度的信息；反过来，无线承载控制 (RBC)

给动态资源调度分配 (DRA) 提供业务初始接入资源占用情况；小区间干扰协调 (ICIC) 给动态资源调度分配 (DRA) 提供目前小区间干扰情况及如何抑制；负载均衡 (LB) 给动态资源调度分配 (DRA) 提供小区负载情况及如何均衡负载。

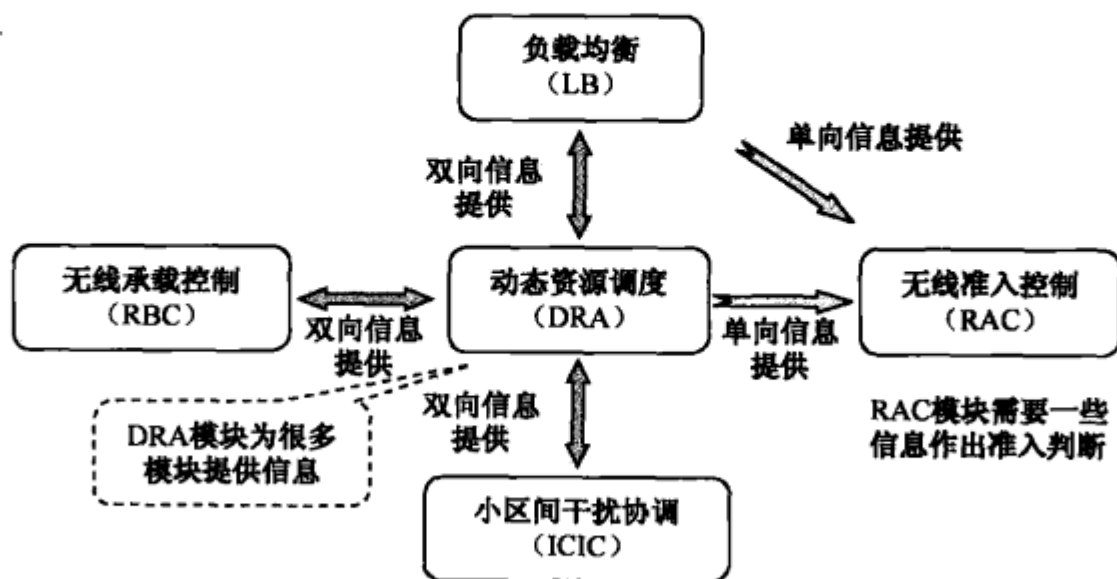


图 10-9 信息提供关系

10.3 无线准入控制 (RAC)

RAC (Radio Admission Control, 无线接入控制), 有的文献上也叫做 CAC (Cell Admission Control, 小区接入控制), 该功能位于 eNodeB 中, 主要工作就是判断接收还是拒绝一个新建立无线承载 (RB) 的申请。

当然, 它只是作出是否允许的判断, 而被允许后, 真正建立 RB 仍是 RBC 的工作。和如下过程类似: 小孩 (类似 RBC 功能) 和父亲 (类似 RAC 模块的功能) 说, 我要爬树 (建立 RB); 父亲看了一下, 树不算高, 不危险 (根据情况作出判决), 说 “可以”, 于是小孩爬上了树 (建立了 RB) (见图 10-10)。

RAC 功能的目标就是尽量提高无线资源的利用率, 同时保证已有会话的业务质量 (QoS)。只要有可用的、能够满足申请要求的无线资源, 就要接纳新 RB 的建立申请, 以提高无线资源的利用效率; 假若新申请建立的 RB 的 QoS 无法保证, 或者没有可用无线资源, 则拒绝 RB 建立申请, 以尽可能确保已有会话的 QoS。

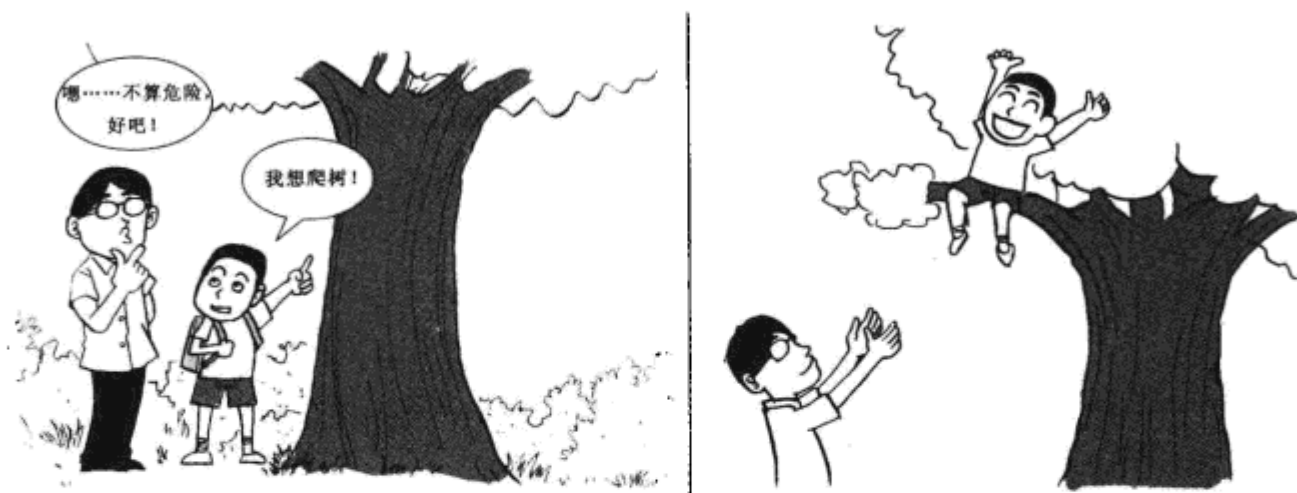


图 10-10 允许上树

10.3.1 RAC 工作配合关系

RAC 模块输入的是资源利用状况、QoS 现状和新要求，输出的是“Yes”（接收）或者“No”（拒绝）。

DRA 模块、LB 模块都可以给 RAC 输入资源利用的一些信息；而 RAC 的输出又可以指导 RBC 是否建立 RB，或者指导 CMC 是否切入该小区。RAC 和其他模块的工作配合关系如图 10-11 所示。

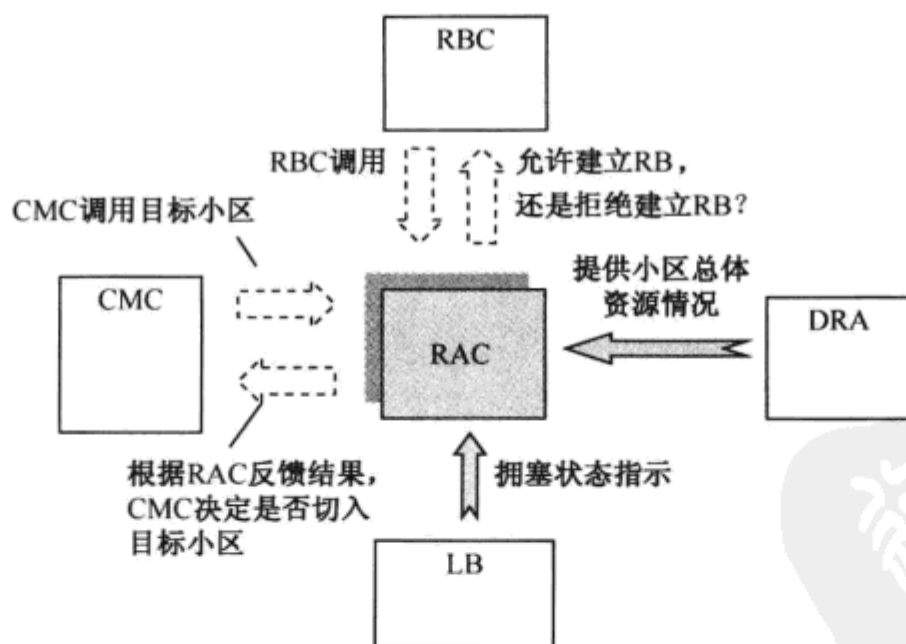


图 10-11 RAC 与其他模块的关系

10.3.2 QoS 保证

一个用户使用某一业务，涉及从 UE 到 eNodeB，再从 eNodeB 到 SGW，最后到 PDN（PGW、分组网关）的业务承载过程。整个 EPS 业务承载如图 10-12 所示，包括无线承载（RB）、S1 承载、S5/S8 承载。在业务承载建立的过程中，要建立无线承载与 S1 承

载之间的一一映射、S1 承载与 S5/S8 承载之间的一一映射，实现 UE 与 PDN 之间的业务连接。

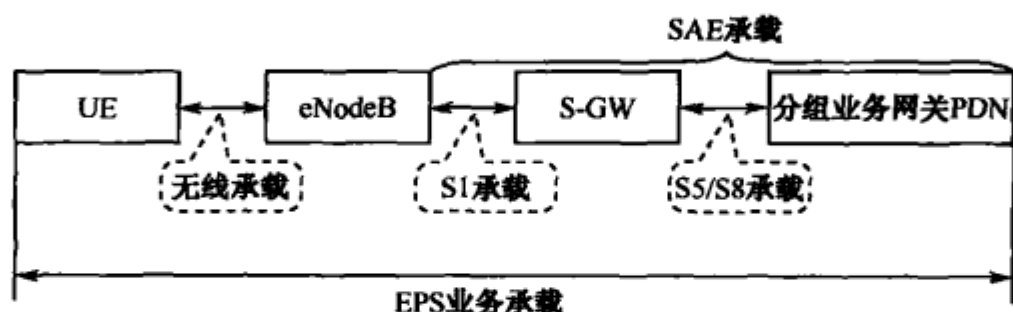


图 10-12 业务承载

在 LTE 中，由核心网 EPC 的控制单元 MME，给无线侧下发 QoS 控制消息，如图 10-13 所示，指示 QoS 保障的目标，最终使业务承载按照要求建立在业务单元上。

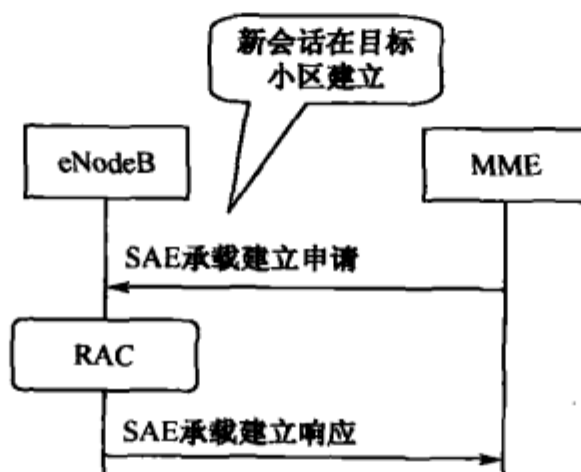


图 10-13 QoS 控制消息下发流程

MME 进行 QoS 控制的基本粒度是一个 EPS 业务承载 (Bearer)，同一业务承载上的所有数据流只能使用相同的 QoS 配置 (调度策略、缓冲队列管理、链路层配置等)，不同的业务承载 QoS 配置可以不相同。

注：这里 EPS 业务承载取代了 UMTS 网络中的分组数据协议上下文 (PDP Context) 的概念。

无线承载的 QoS 是核心网 MME 指示的，由 eNodeB 的 RBC 在 RAC 准入允许后进行 QoS 控制的。

每个无线承载都对应应有 QoS 参数，包括：

- (1) ARP (Allocation and Retention Priority, 分配保留优先级)；
- (2) QCI (QoS Class Identifier, QoS 等级指示)；

- (3) GBR (Guaranteed Bit Rate, 保证比特速率);
- (4) MBR (Maximum Bit Rate, 最大比特速率);
- (5) AMBR (Aggregated Maximum Bit Rate, 组合最大比特速率)。

分配保留优先级 ARP 主要用于在资源受限的条件下, 系统按照该优先级所指定的先后顺序决定是否接受相应的承载建立请求, 是否抢占已经存在承载的资源。也就是说, 一个承载的 ARP 仅在承载建立之前对承载的建立产生影响, 在建立之后对系统没有影响。

承载建立之后对承载有影响的是 QCI 值、GBR、MBR、AMBR 等 QoS 特性参数。

一个 QCI 值对应着相应的 QoS 属性, 这个属性包含优先级 (Priority, 值越小优先级越高)、包延迟 (Packet Delay Budget)、可接受的误包率 (Packet Loss Rate) 等指标。协议中定义了 9 种不同的 QCI 值, 如表 10-2 所示。

表 10-2 QCI 值及其对应的 QoS 属性

QCI	QoS 保证类型	优先级	包延迟	误包率	业务类型示例
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	会话类语音业务
2		4	150 ms	10^{-3}	会话类视频 (实时流业务)
3		5	300 ms	10^{-6}	非会话类视频 (缓冲流业务)
4		3	50 ms	10^{-3}	实时游戏类业务
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	IMS (IP 多媒体系统) 信令
6		7	100 ms	10^{-3}	语音、视频 (实时流业务)、交互类游戏
7		6	300 ms	10^{-6}	视频 (缓冲流业务)、基于 TCP 的业务 (如 WWW、E-mail、chat、ftp、P2P 文件共享等)
8		8			
9		9			

在 S1 接口上只须传输 QCI 值, eNodeB 就知道其对应的 QoS 属性; 也就是说, QCI 值决定了 eNodeB 的处理策略。举例来说, 对于误包率要求比较严格 (值很小) 的业务承载 (Bearer), eNodeB 将 RLC 配置成 AM (确认) 模式来提高空中接口传输的准确率。

QoS 的承载类型分为以下两种类型:

- (1) 默认承载 (Default Bearer);
- (2) 专用承载 (Dedicated Bear)。

默认承载是用户“永远在线”的实现机制, 是一种 Non-GBR (非保证比特速率) 承载。用户开机后, 进行网络附着的同时, 为该用户建立一定数据速率的默认承载, 以保

证其基本的业务需求，减小业务建立的时延。

专用承载是一系列系统定义好的、有特定 QoS 保证的承载策略。不同的业务数据流可以映射到不同的专用承载上，采用不同的 QoS 保证机制。于是，可以为同一 UE 提供不同 QoS 保障的多种业务，如视频通话、移动电视等。

专有承载可以是 GBR 承载，也可以是 Non-GBR 承载。专有承载的创建或修改只能由网络侧来发起，其 QoS 参数值也是由 EPC 来分配的。

根据 QoS 保证类型的不同，业务承载可以划分为两大类：

- (1) GBR（保证比特速率）；
- (2) Non-GBR（非保证比特速率）。

GBR 是指业务承载要求无线网络“永久”恒定分配的比特速率。不管无线网络资源是否紧张，要求的比特速率必须保持。

当 QoS 保证类型是 GBR 的时候，在无线资源充足的情况下，定义所能达到的速率上限为 MBR（最大比特速率）。也就是说，MBR 的值一定大于或等于 GBR 的值。

Non-GBR 是指没有比特速率保证的业务承载，不需要占用固定的网络资源。在无线资源利用率较高及发生拥塞的情况下，可以要求一些业务承载降低速率，不必考虑保证速率。

GBR 承载只有在需要时才建立，但由于 Non-GBR 的资源占用较少，可以长时间地建立。

为了提高系统的带宽利用率，防止多个 Non-GBR 承载占用过多的无线资源，定义 AMBR（Aggregated Maximum Bit Rate，组合最大速率），可以用来限制签约用户所有业务承载的总速率。

AMBR 不是针对一个承载（Bearer），而是针对一组 Non-GBR 的承载（Bearer）。系统可以分别定义上行和下行的 AMBR。

3GPP 定义了两种不同的 AMBR 参数：

- (1) UE-AMBR。

UE-AMBR 定义了每个签约用户的 AMBR。

- (2) APN-AMBR。

APN-AMBR 是定义了同一个 APN 中的所有 EPS 业务承载总的比特速率上限。

QoS 承载类型、保证类型及其对应参数关系如图 10-14 所示。

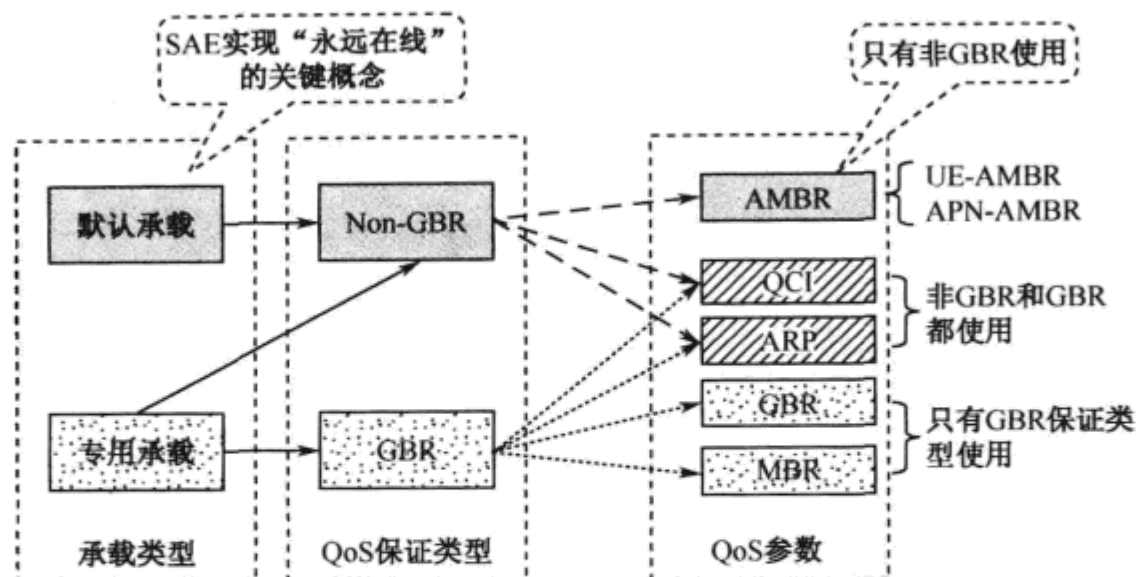


图 10-14 QoS 承载类型、保证类型及其对应参数

10.3.3 准入控制法则

一个无线承载申请来了，RAC 靠什么来判断允许还是拒绝呢？

如果说 eNodeB 是一家公司，那么 RAC 是公司的人力资源部门。人力资源部门根据公司现有的人力资源政策、现有员工对薪酬待遇（类似 QoS）的满意程度、新申请职位员工的薪酬待遇要求，来决定是否允许接受这份新申请。

RAC 根据 eNodeB 现有无线资源的利用情况及可用情况，各网元的负荷情况，已有会话的 QoS 服务情况，新申请无线资源的 QoS 要求，来确定一个 RB 申请是否允许建立。

（1）无线资源利用率的 RAC 判决。

RAC 可以基于现有无线资源利用率来决定允许或拒绝一个 RB 建立申请。设立一定的资源利用率门限。当接纳一个 RB 建立申请时可能导致无线资源利用率高于该门限，则拒绝该申请；当接纳一个 RB 申请时，无线资源利用率仍低于该门限，则接纳该申请，如图 10-15 所示。拒绝一个申请的目的是确保已有会话的 QoS；接收一个申请的目的是提高系统资源利用率。

RAC 准入控制的对象有信令 RB（Signalling RB，SRB，如 RRC 连接建立）和业务数据 RB（Data RB，DRB）。先申请信令 RB，信令 RB 成功建立后，再申请业务数据 RB。

在 LTE 系统中，SRB 的准入控制不但要依据无线资源的利用状况（小区负荷状况、无线接口负荷），还需要根据核心网 MME 的负荷状况（与 S1 接口负荷状况直接相关）。当小区拥塞或 MME 过载时，会拒绝一些 SRB 建立请求，也就没有后续的业务数据 RB（DRB）建立请求了。

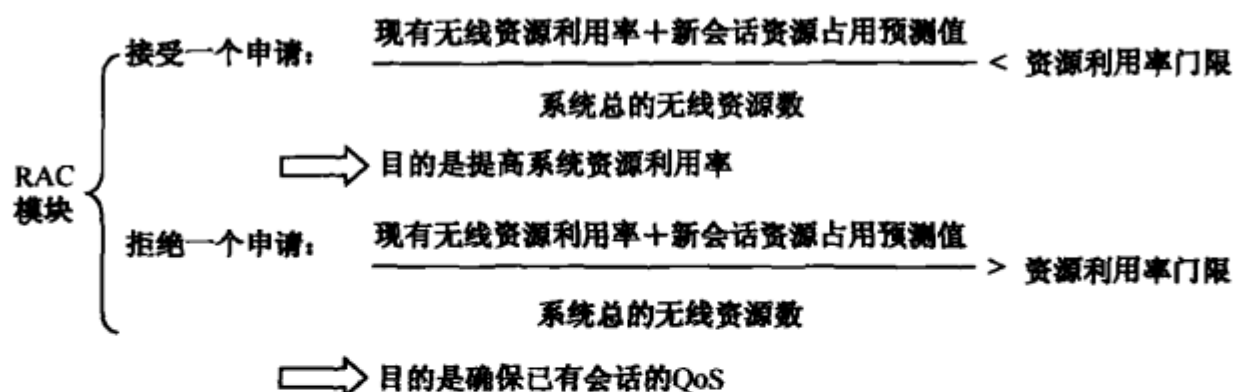


图 10-15 基于无线资源利用率的 RAC 判决

DRB 准入控制的主要依据是无线资源利用的状况。LTE 的无线资源利用率是时间和子载波组成的二维资源的利用率。和 LTE 不同，在 WCDMA 里，无线资源主要是功率资源、码道资源；在 TD-SCDMA 里，无线资源则主要是时隙资源、码道资源等。

(2) QoS 水平的 RAC 判决。

当无线资源利用率过高，发生拥塞的时候，或者无线环境恶劣，空中接口速率下降的时候，QoS 水平会恶化，对新的业务承载请求，其 QoS 要求无法保证。当实际 QoS 水平低于系统配置的 QoS 水平，就是一次 QoS 水平不达标。当 QoS 水平不达标的比例过高的时候，新申请承载的 QoS 要求就可能不能满足。

基于 QoS 水平的准入控制算法思想：设置一个系统不过载时 QoS 水平不达标的比例门限。当新申请承载准入后，QoS 水平不达标的比例低于该门限，则接受该申请；当新申请承载准入后，QoS 水平不达标的比例高于该门限，则拒绝该申请，如图 10-16 所示。

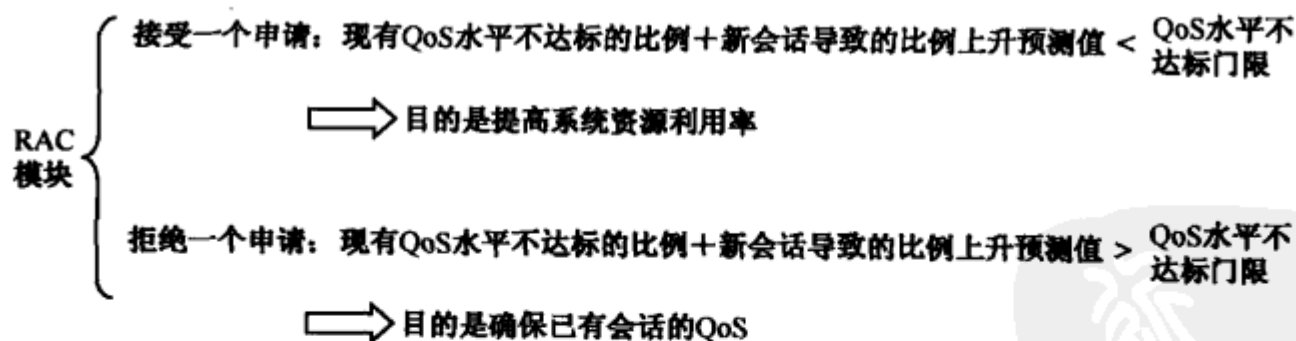


图 10-16 基于 QoS 达标水平的 RAC 判决

基于 QoS 的 RAC 判决准则，是把已有业务的 QoS 水平和新的业务请求的 QoS 需求，作为资源请求的允许或拒绝的判断依据。

需要特别说明的是：信令链接（SRB）请求不做判断，一律准入；SRB 建立失败，不执行抢占，因为此时抢占会导致别的用户业务中断；对于紧急业务呼叫，只要资源不受限，则始终准入；如果资源受限，则触发抢占。

当系统过载及 QoS 水平恶化严重的时候，除信令连接 SRB 和紧急呼叫外的所有新业务和切换业务都拒绝接入。

10.4 无线承载控制 (RBC)

10.4.1 RBC 功能

控制单元 RBC 和底层操作单元 (RLC/MAC/PHY) 位于同一个网元 eNodeB 中，如图 10-17 所示。

RBC 功能位于 eNodeB 中，配置信令可以直接从 eNodeB 发给 UE，方便实现同步方式的 RB 配置或重配置。相对于 UMTS 的 RBC 位于 RNC 设备上及底层操作单元位于 NodeB 的方式，LTE 的方式可以有效地减少相关信令交互的复杂性及降低信令交互的时延。

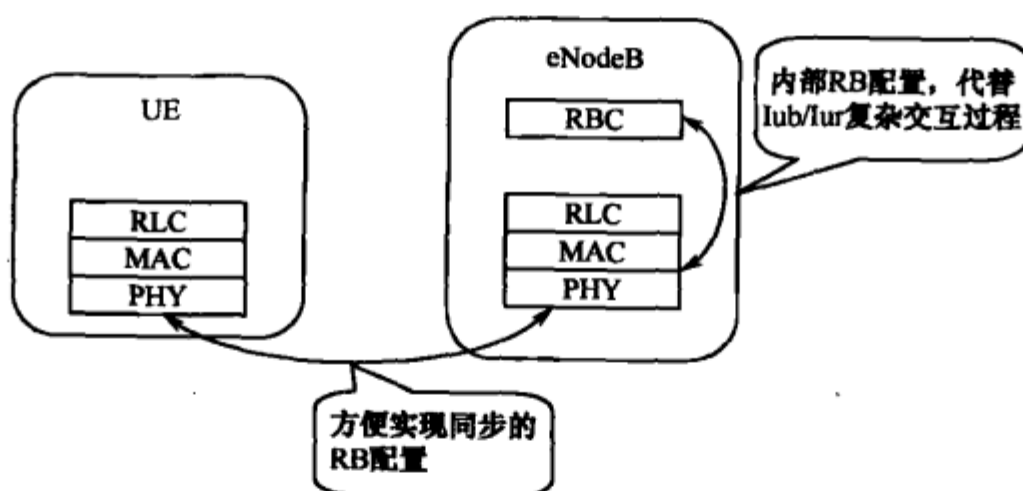


图 10-17 RBC 位于 eNodeB

建立新的 RB 之前，RRC (Radio Resource Connection, 无线资源连接) 必须建立，终端和核心网的一些 NAS (Non-Access Stratum, 非接入层) 协商已经完成。(注：NAS 是从终端直接到核心网的信令，eUTRAN 无须处理，直接透明传输即可。)

RBC 负责无线承载 (Radio Bearer, RB) 的建立、维护和释放，如图 10-18 所示。



图 10-18 RB 的建立、维护和释放

当为一个业务建立 RB 时，无线承载控制（RBC）则要考虑整个 eUTRAN 内所有资源的状态、正在进行的所有会话的 QoS 需求以及新业务的 QoS 需求。如同一个新聘用人员到公司报到（相当于要建立 RB），要求的工资待遇是每月 10 000 元（类似 QoS 要求），人力资源的领导（类似 RBC 的角色）考虑到公司中已经工作多年的职工工资才 7 000 元（已有会话的 QoS 水平），于是给新聘用人员说：“工资先按每月 7 000 元计算，以后根据业绩再涨。”于是，新聘用人员办理了入职手续（见图 10-19）。



图 10-19 初始工作关系的建立

当无线资源状态发生变化，如终端移动的时候，RBC 还负责维护正在进行的所有会话。在会话结束，或者会话切换到另外一个小区时，RBC 负责释放与原 RB 相关的无线资源。

建立、维护和释放无线承载就是 RB 资源的配置或重配置过程。无线承载 RB 的配置或重配置消息，包含新的 MAC 层复用（Multiplexing）参数、RB 使用的传输信道配置参数。

10.4.2 RBC 工作配合关系

RBC 在建立、维护和释放 RB 的时候，涉及资源配置的过程，需要和其他 RRM 模块进行配合，如图 10-20 所示。

新产生的会话，或者从原小区切换过来的会话，需要在目标小区建立 RB，RBC 则调用 RAC 决定该 RB 是否允许建立。RAC 给 RBC 输出允许 RB 建立还是拒绝 RB 建立的指示，指导 RBC 进行后续的操作。

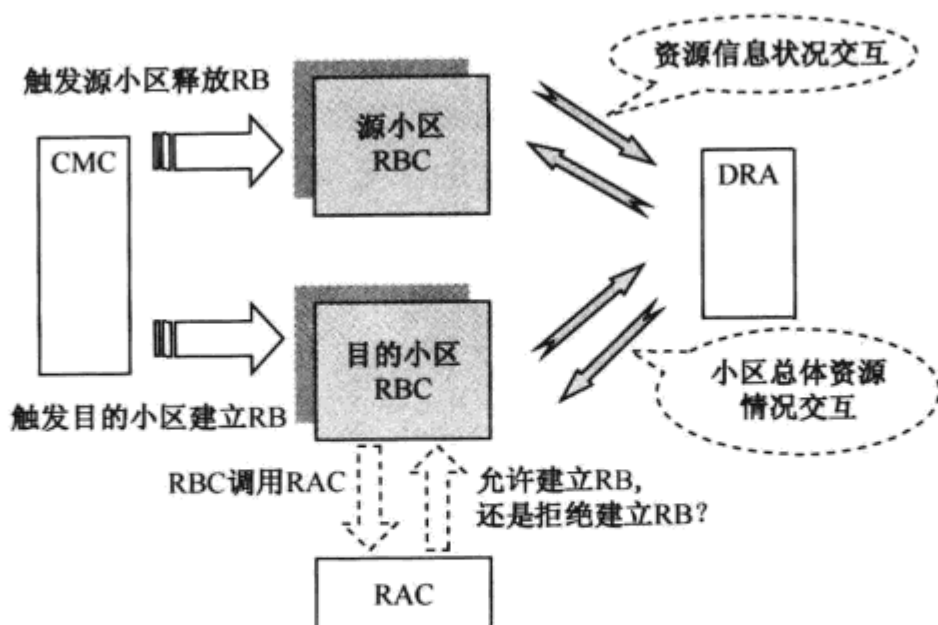


图 10-20 RBC 与其他模块的关系

CMC 成功完成切换过程后，将在源小区触发 RBC 过程，指示源小区 RBC 释放相关的无线资源；也会在目标小区触发 RBC 过程，指示目标小区 RBC 进行 RB 资源的相关配置。

RBC 在 RB 资源配置前，要和 DRA 模块交互信息。DRA 将为 RBC 提供小区资源的总体情况，而 RBC 根据 RB 的 QoS 需求向 DRA 提出资源调度要求。RBC 在 RB 资源释放后，要通知 DRA 资源已经释放。

10.5 动态资源分配（DRA）

调度，就是无线资源的分配方式，也就是在什么时间、哪些子载波上，用什么样的天线传输方式，以多大功率、用什么样的调制解调方式为一些用户发送业务数据。

根据资源分配方式调整频繁程度的不同，可以将调度分为动态调度（Dynamic Scheduling, DS）、持续调度（Persistent Scheduling, PS）、半持续调度（Semi-Persistent Scheduling, SPS）。

动态调度，也就是动态资源分配，是最基本、最灵活的调度方式。在动态调度下，无线资源分配采用按需分配方式，用户和网络在每个调度时刻都需要交互层 1、层 2 的调度信令。

持续调度方式，就是指在一定的周期内，持续按照一定的资源分配方式，为用户分配无线资源，无须层 1、层 2 控制信道调度信令的交互，直接发送或者接收数据。有点“一旦为吏、终身为吏”的意思。

动态调度可以提高频率分集和多用户分集增益，比较适合数据类业务，但层 1 和层

2 调度信令开销较大。对于持续调度资源的分配方式，有效期长，通常持续多个 TTI，可以大幅减少层 1 和层 2 调度信令开销，比较适合语音类业务，但是资源利用率较低、实时性较差。

为了克服动态调度信令开销较大、持续调度资源利用率低的缺点，提出了半持续调度。

半持续调度结合了动态调度和持续调度的优点，采取动静结合的方式来调度资源，主要应用于 VoIP 业务。

VoIP 半持续调度方案的核心思想是：需要时一定确保，不需要时则要动态调整。可谓：“静若处女、动若脱兔”。对于处于激活（Active）状态的数据包，采用持续调度的方式，确保有足够的无线资源；处于静默（Silent）状态的数据包，采用动态调度的方式，以便灵活处理空闲的无线资源；对于重传的数据包，无论是静默期，还是激活期，均采用动态调度的方式。

10.5.1 DRA 及其关系网

动态资源分配（Dynamic Resource Allocation, DRA），或者叫分组调度（Packet Scheduling, PS, LTE 里只有分组域），是系统用来给用户平面或者控制平面分配无线资源，以及回收无线资源的功能模块。这些资源包括缓冲的资源 and 正在处理的资源。

DRA 模块如同一个负责调拨物资资源的官员，依据目前资源的状况，还有业务部门的资源需求，要快速而高效地给出资源调度使用的方案（见图 10-21）。



图 10-21 动态资源调度

DRA（动态资源调度）一般会包括若干个子任务，如决定给哪个无线承载（RB）的数据包调度资源，管理功率资源，管理时、频资源等。

LTE 中动态资源调度的最小时间单位（时间粒度）是一个 TTI，即 1 ms。当然一次

资源调度也可以间隔多个 TTI；LTE 动态资源调度的最小频率单位（频率粒度）为一个 PRB 的带宽（180 kHz），当然一次资源调度也可以分配多个 PRB。

DRA 与 ICIC、RAC、RBC、LB 等其他 RRM 模块的关系如前面图 10-9 所示的相互提供信息的关系。DRA 可以为 ICIC、RAC、RBC、LB 提供小区资源使用的整体情况，同时通过 RBC、LB、ICIC、RAC 提供的信息，也可以让 DRA 选择不同的调度机制和调度策略。

需要特别说明的是，在一些 RRM 实现技术中，ICIC 与 DRA 的关系不只是信息提供的关系，还是相互配合工作的关系。ICIC 为了降低小区间的干扰，需要 DRA 采用特殊的调度策略；DRA 也需要 ICIC 根据资源和干扰情况，采用特殊的干扰协调机制，来提高资源的使用效率。

10.5.2 动态调度三要素

所谓“动态”，就是根据变化了的情况快速地调整相应的措施。动态的目的其实就是自适应，如图 10-22 所示。所以 DRA 的三要素是：

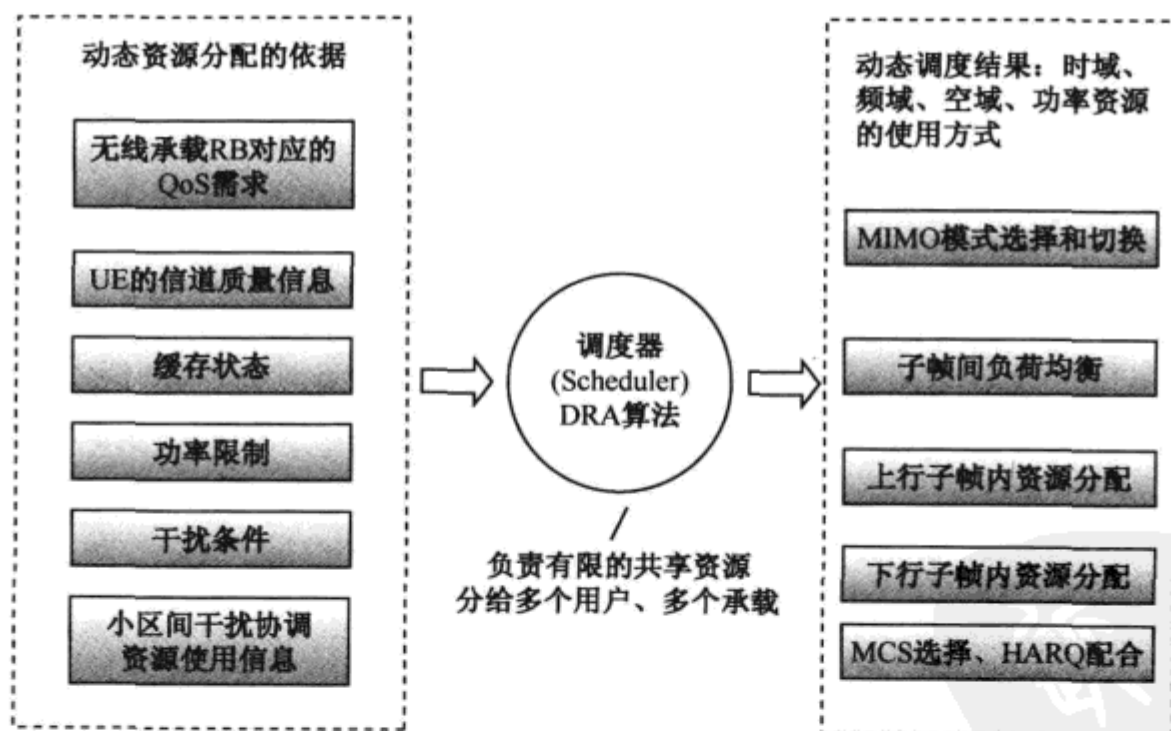


图 10-22 DRA 三要素

- (1) 动态调度的依据。
- (2) 动态调度的算法。
- (3) 动态调度的结果。

变化了的情况就是 DRA 动态资源分配的依据，包括：无线承载（RB）对应的 QoS

需求、UE 的信道质量信息、缓存状态、功率限制、干扰条件，以及小区间干扰协调所限制使用或倾向使用的资源块信息。

动态调度算法就是按照一定规则，将有限的共享资源分配给多个用户、多个无线承载，在保证用户 QoS 需求、兼顾用户及业务之间的差异性、公平性的前提下，最大化系统吞吐率。

动态调度算法可给 LTE 系统带来频率分集增益、多用户分集增益，能够基于信道条件、业务优先级充分发挥 AMC 和 HARQ 的潜力，是提升系统性能的关键技术。动态调度算法由 MAC 层的调度器（Scheduler）完成。

在 3GPP 中 HSDPA 和 HSUPA 引入时，将动态资源调度的功能从 RNC 挪到了 NodeB 的 MAC 层上实现，为快速调度的实现奠定了基础。

在 LTE 中，DRA 仍然放在了 eNodeB 的 MAC 层上，资源调度的颗粒度更小，进一步缩短了资源调度的时延。有所不同的是，在 LTE 中，一个小区中 DRA 会影响其他相邻小区的容量，对其他小区造成干扰，这就需要 DRA 和小区间 RRM 功能配合，进行 eNodeB 之间的协作。

3GPP HSDPA 中有一些调度算法（第 2 章已介绍过），如轮询算法、最大载干比算法、部分公平算法，在 LTE 中也同样可以使用。只不过，在 LTE 中可调度的资源没有码域资源；有的是时间资源、频率资源、空域资源、功率资源。

LTE 动态资源调度的主要内容是：

- （1）下行子帧内资源分配（时域资源、频率资源、功率资源）；
- （2）上行子帧内资源分配（时域资源、频率资源、功率资源）；
- （3）子帧间负荷均衡（时域资源、功率资源）；
- （4）MIMO 模式选择和切换（空域资源调度）；
- （5）配合 AMC 完成调制编码方案（MCS）的选择；
- （6）配合 HARQ 完成数据重传。

下行子帧内资源分配是指基站侧动态资源调度器对下行共享信道（PDSCH）资源的使用分配。下行调度器根据缓存（Buffer）状态、业务承载的 QoS 等级（共 9 个，在介绍 RAC 小节中有定义）、信道测量报告等信息进行下行资源的分配。由于 eNodeB 可以准确知道每个无线承载（RB）的缓存（Buffer）状态，下行调度器可以基于无线承载（RB）进行无线资源调度。

上行子帧内资源分配是指基站侧的上行资源调度器对上行共享信道（PUSCH）资源的使用分配。每个 UE 可能同时进行多种业务，即一个用户同时存在多个无线承载的时候，由于缓冲区状态报告（Buffer Status Report, BSR）的最小汇报单元是 RBG（RB Group），eNodeB 不可能准确知道一个 UE 的每个 RB 的具体信息。所以，上行资源调度是基于每

个用户进行无线资源分配，即每次调度时，调度器给一个用户发一个调度命令，并不做业务上的区别，这一点和下行资源调度不同。上行一个用户内多业务之间的资源分配可以按照潜规则（默认的原则）进行。

子帧间负荷均衡是在 TDD 工作模式下，尽量避免瞬时同频干扰而采取的一种时域干扰协调机制。由于 TDD-LTE 帧结构的特殊性，可能存在多个连续同向子帧。由于各小区是同步的，若不进行子帧间负荷均衡，则可能导致小区间瞬时出现较强的同频干扰。子帧间负荷均衡就是尽量降低连续子帧的资源利用率，使各子帧间的业务量尽量均衡，降低瞬时强干扰的概率。

协议确定了 MIMO 有七种工作模式，可以根据当前的信道条件、UE 的速度变化选择 MIMO 的工作模式以及在 MIMO 工作模式之间切换。

MIMO 的默认工作模式是发射分集，它是一种首先保证可靠性、鲁棒性的工作模式。在信号较差、UE 速度较高的场景下使用，可以克服无线环境的复杂性，减少传送误差。

当无线信道的质量好起来以后，可以选用开环复用；当 UE 的速度降下来后，可选用低阶（Rank=1）闭环复用；而 UE 速度不高及信道质量也较好的时候，可以选用高阶（Rank 较大）闭环复用模式。

根据反馈的信道质量条件，DRA 可以决定每一个调度周期内无线资源所采用的调制编码方式（即 AMC）及混合自动重传（HARQ）方式，它是一种链路自适应的过程，在第 9 章中有相应的介绍。

10.5.3 下行资源调度

下行动态资源调度的指挥所是 MAC 层的下行调度器，执行单位是下行共享信道的物理层过程。下行调度器要给调度协调单位（PDCCH）和数据承载单位（PDSCH）下指令；假若工作有误，需要重做（HARQ）的话，会指示如何重做；无线状态如果发生变化，就需要启动自适应过程，如带宽自适应、MIMO 工作模式的自适应、编码调制方式的自适应。

下行资源调度如同领导给员工发奖金的过程。

今年业绩不错，有很多要发的奖金。给谁发，发多少，那得由领导说了算。每个员工要把自己的业绩报上来，领导根据他们的业绩、公司业务发展的导向确定分配方案，然后话送到耳（如何分配的指示、勉励的话语）、钱送到手（真东西）。至此，奖金分配到此结束，如图 10-23 所示。

eNodeB 作为领导，也有一些待传数据（类似奖金）要发下去。识趣的员工 UE 赶快汇报了一下自己的业绩[信道质量指示（CQI）]。eNodeB 的下行调度器既要考虑员工 UE 的汇报，也要考虑业务要求的 QoS，另外还要考虑员工之间公平性等具体情况。下行资源分

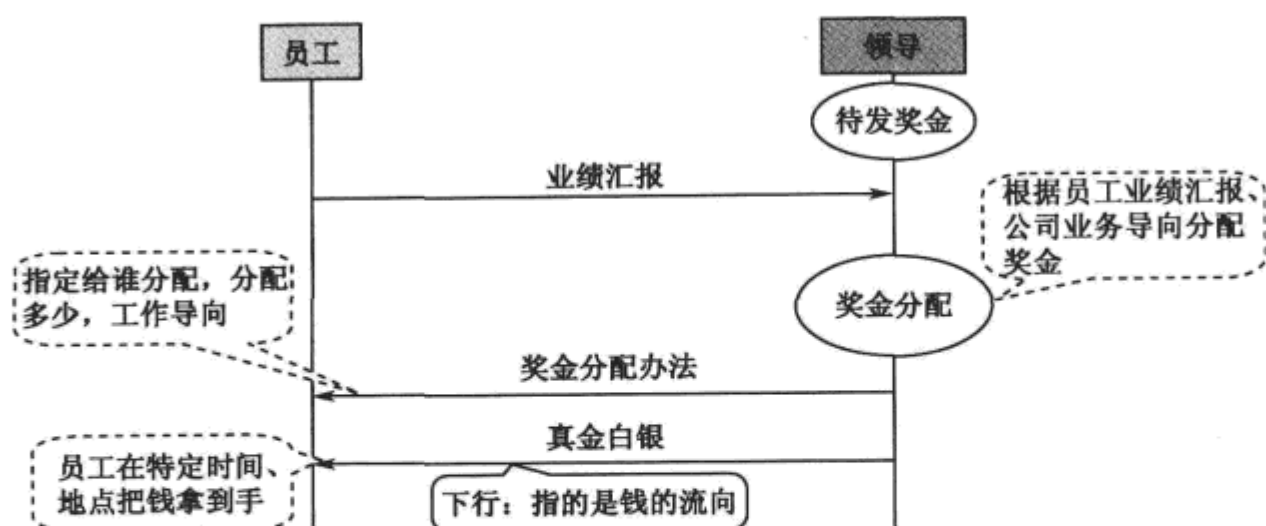


图 10-23 下行奖金分配流程

配的方案通过 PDCCH 信道发下去，指明了某个用户在什么样的时、频资源块，以什么样的调制编码方案、什么样的 MIMO 工作模式发送下行数据；下行数据则通过 PDSCH 信道发给某个员工 UE，员工 UE 需要按照 PDCCH 发来的指示找到领导 eNodeB 发给自己的数据，如图 10-24 所示。

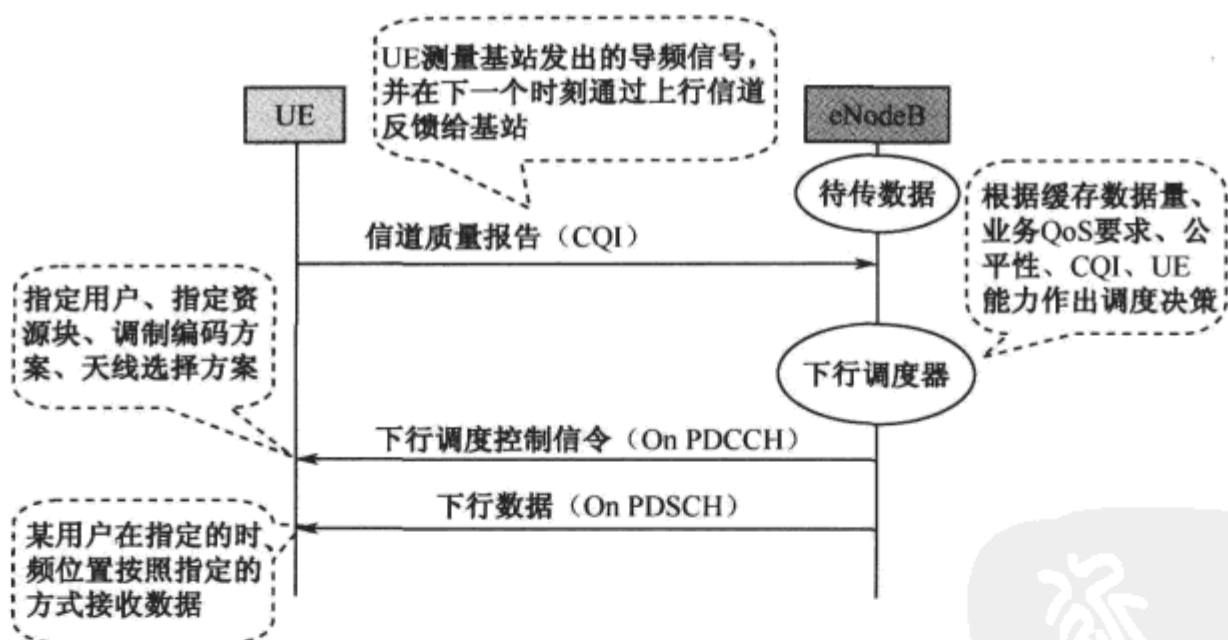


图 10-24 下行资源调度

下行资源调度相关的信令是上行的信道质量信息 (CQI) 报告、下行调度控制信令。UE 的 CQI 报告是下行资源调度的依据之一，不是唯一的依据，基站侧还有其他的考虑，如业务 QoS 要求、UE 能力、公平性等。

当然 CQI 信息很重要，还可以用于 AMC、干扰管理、功率控制等重要过程。CQI 报告是由 UE 测量基站的导频信号，得到不同频域上的各资源块上的信噪比。CQI 反馈的周期可以动态调整，反馈过于频繁，反馈开销就大；相反地，反馈过少，下行调度器

就得不到整个带宽范围内全面的信道质量信息。

下行调度控制信令如表 10-3 所示，指导 UE 对下行发送信号进行接收处理，包括以下三种指示：

(1) 资源分配信息。

资源分配信息包括 UE 标识、分配的时频资源位置、占用资源的时长。

(2) 传输格式。

传输格式包括多天线信息、调制方式。

(3) HARQ 信令。

HARQ 信令，包括异步 HARQ、同步 HARQ。异步 HARQ 信令包括 HARQ 流程编号、IR（增量冗余）HARQ 的冗余版本、新数据制式等。同步 HARQ 信令还需包括重传序列号。

表 10-3 下行调度控制信令格式

	字 段		作 用
资源分配信息	UE 标识		区别用户，给哪个用户分配调度资源
	资源块分配		可以使用哪些时、频资源块
	分配时长		占用资源的有效持续时间
传输格式	多天线信息		自适应 MIMO 决定的天线工作模式
	调制方式		AMC 决定的调制方式：QPSK、16QAM、64QAM 三选一（PDSCH 信道）
HARQ 信令	异步 HARQ	HARQ 进程号	HARQ 进程号
		冗余版本	IR 方式的版本
		新数据包指示	指示是否新数据，用来清空缓存
	同步 HARQ	重传序列号	同步 HARQ 的重传版本、序号

10.5.4 上行资源调度

在上行方向，UE 并不是可以随时随地地发送自己的数据，那得看领导 eNodeB 的脸色，服从 eNodeB 的安排。上行资源调度的指挥所是基站 MAC 层的上行调度器，执行单位是上行共享信道的物理层过程。

上行资源调度，如同某下属要给其领导送礼（发送上行数据）。给他的领导送礼的人何其多，并不是随时随地想送就送的，那得看他的领导的安排。首先下属给这个领导打电话说：“有些事情需要请教一下，不知什么时候有空。”（上行调度申请）这个领导当然明白他的意思，根据自己的安排，告诉他什么时候过来（上行调度指示）。于是，下属按

照要求在指定时间、指定地点提着礼品(上行数据)去恭候这位领导。整个过程如图 10-25 所示。

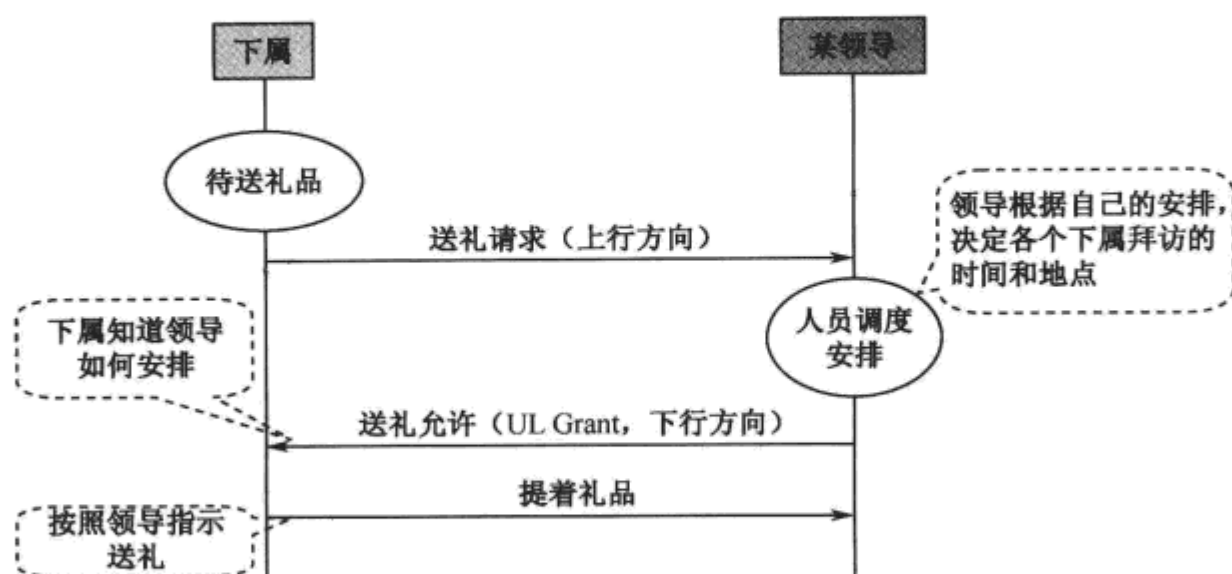


图 10-25 上行送礼过程

UE 想要发送数据的时候，先把自己要发送的数据放入缓存中；然后给领导 eNodeB 提交自己的缓存状态报告（Buffer State Report、BSR），同时递交上行调度请求。基站的上行调度器根据 UE 的缓存状态报告及其上行调度请求、上行信道状况决定给该 UE 调度什么样的无线资源，把调度结果通过 PDCCH 信道的上行调度准许（UL Grant）告知 UE；UE 按照领导 eNodeB 的指示，在上行数据承载的信道 PUSCH 发送业务数据，如图 10-26 所示。

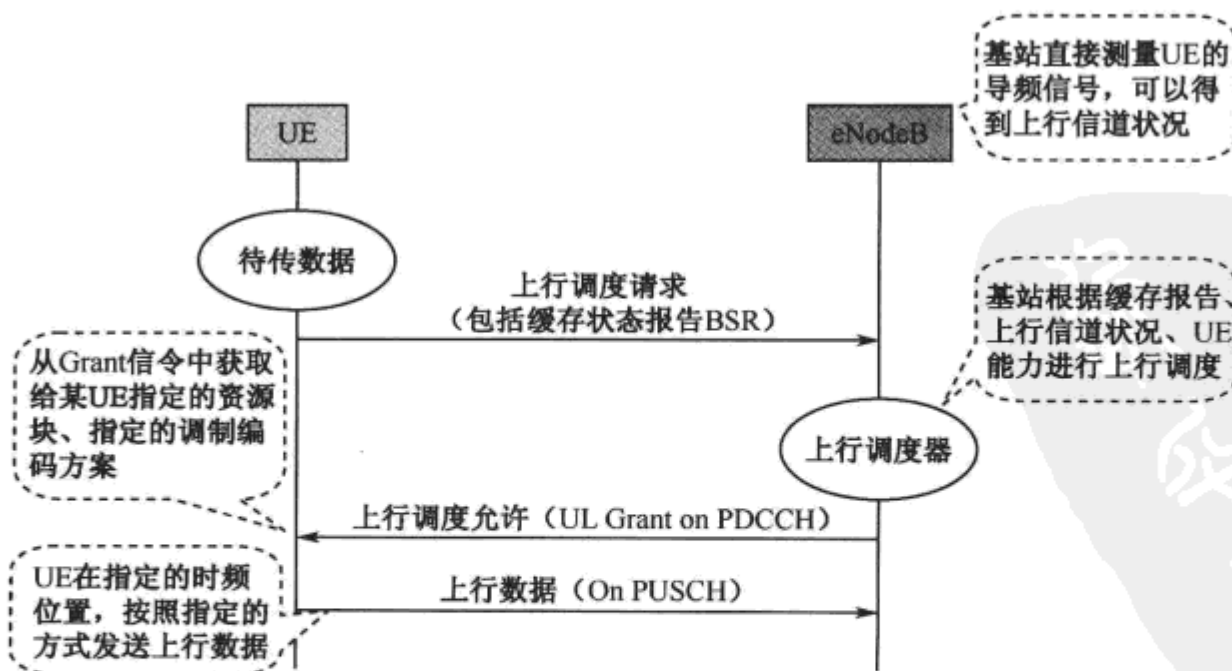


图 10-26 上行资源调度

与上行无线资源调度相关的信令包括上行资源调度申请（包括缓存状态报告）、上行调度允许。

上行调度允许用于确定 UE 的上行发送信号格式，如表 10-4 所示，包括：

- (1) 资源分配信息。
- (2) 传输格式。

表 10-4 上行调度允许信息

	字 段	作 用
资源分配信息	UE 标识	区别用户，给哪个用户分配上行调度资源
	资源块分配	上行用户可以使用哪些时、频资源块
	分配时长	分配的有效持续时间
传输格式	用户传输参数	用户使用的传输格式：调制方案、负载大小、多天线信息。传输格式决定了用户的发送速率

10.6 小区间干扰协调 (ICIC)

在 LTE 的上、下行采用 OFDMA (DL) /SC-FDMA (UL) 的多址接入技术，采用正交子载波区分不同的用户，小区内多用户间的干扰就可以基本消除。但 LTE 在同频组网的情况下，邻小区的用户之间不可避免地存在干扰，称为小区间干扰 (Inter Carrier Interference, ICI)。

处于服务小区边缘的用户，在给服务小区发送上行数据的时候，使用的子载波频段与相邻小区的某用户相同，就会引起对相邻小区间某用户的上行干扰，如图 10-27 所示。

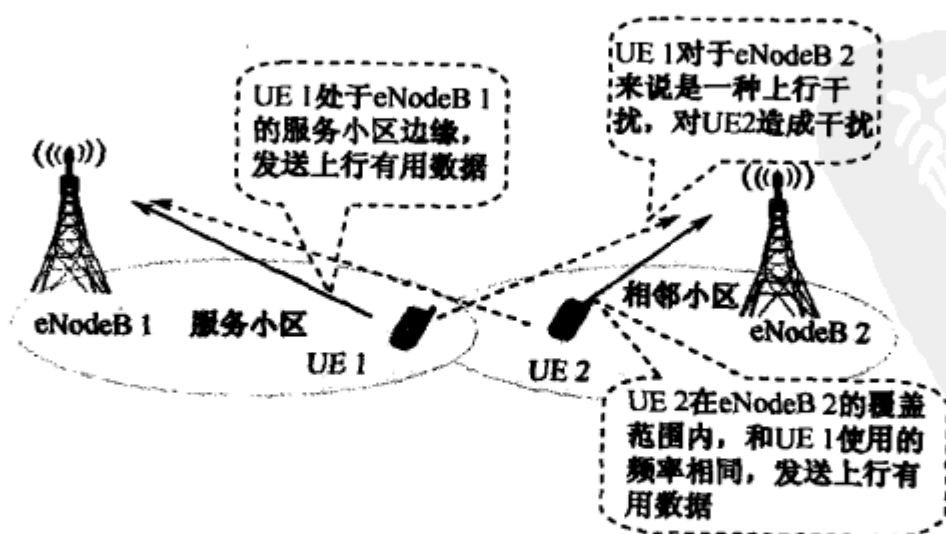


图 10-27 上行小区间干扰

处于服务小区边缘的用户在接收下行数据的时候，使用了与相邻小区某 UE 相同的频率资源，则会引起相邻小区间用户的下行干扰，如图 10-28 所示。

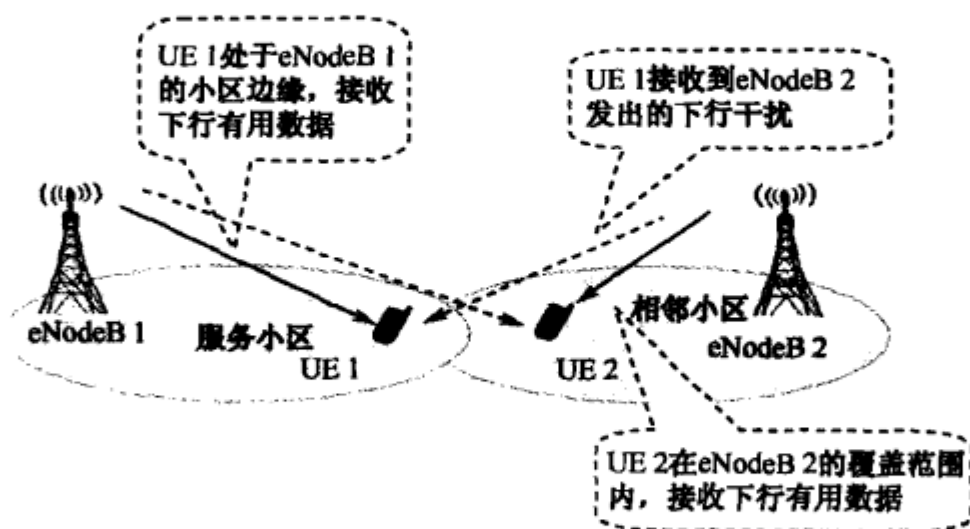


图 10-28 下行小区间干扰

在 TDD-LTE 系统中，上、下行时隙切换点可以灵活变化。如果在一定范围内上、下行时隙切换点不一致，则可能导致小区间的交叉时隙干扰，也是小区间干扰的一种类型。

在 LTE 中，小区间干扰对系统性能的影响比小区内的干扰严重得多，主要表现在以下几点：

(1) 小区间干扰是导致无线链路信噪比 (SIR) 降低的主要因素，SIR 降低后，LTE 自适应技术就会选择比较低阶的调制方式和效率较低的编码方式，这样时、频资源承载的业务比特数就会减少。

(2) 同频干扰引起的功率控制，使一个子帧中可以使用的 PRB 也会相应减少，用户速率会进一步降低。

(3) 当干扰严重的时候，会导致数据传输过程中出现较多的错误比特，需要频繁的 HARQ 重传，这势必占用较多的系统资源，进一步降低用户速率。

10.6.1 小区间干扰控制技术

为了提高 LTE 用户在小区边缘的数据传输速率，支持 LTE 同频组网，必须引入小区间干扰控制技术。小区间干扰控制技术主要有：

(1) 干扰随机化技术。

(2) 干扰消除技术。

(3) 小区间干扰协调 (Inter-Cell Interference Coordination, ICIC) 技术。

当然，智能天线技术和功率控制技术也可作为小区间干扰抑制技术的补充。

干扰随机化技术并不是消除干扰，而是将干扰白化 (白噪声化)，或者叫做干扰随机

化，即处处有干扰，处处无强干扰。如同办公室地板有一小堆尘土，领导来视察，没有来得及处理，只好用扫帚轻轻一扫，使尘土分布在地板各处。尘土并没有消失，而是分散开了，不影响领导的感觉了。干扰随机化的方法包括：加扰（Scrambling）、交织多址（Interleaving Division Multiple Address, IDMA）和跳频（Frequency Hopping）等。

干扰消除（Interference Cancelation, IC）技术就是将服务小区、同频邻区的信号都进行解调、解码，利用小区间干扰的相关性，将各自的干扰信号、有用信号分离开来。干扰消除技术如同小米和大米混在一起，A 想要小米，B 想要大米。于是 A 把小米留下，把大米分离出去；B 把大米留下，把小米分离出去。小区间干扰消除技术是一种小区间多用户检测技术，允许相邻小区的用户使用同样的时、频资源，可以支撑同频组网。

小区间干扰协调（ICIC）是通过协调服务小区、邻小区选用不同的时频资源、限制发射功率大小，来避免产生较大的小区间干扰。如同开车时，通过接听实时的路况播报，绕开拥堵路段，避免互相影响（见图 10-29）。

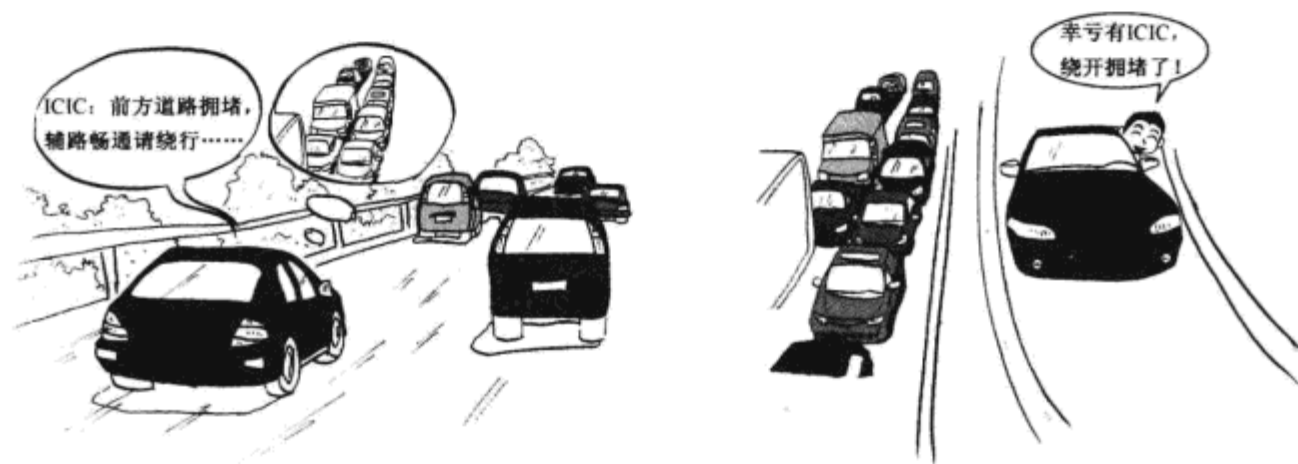


图 10-29 车辆避免拥堵

干扰随机化技术并没有减少小区间的相互干扰，而是把干扰抛向了每个用户，所以带来的整体信噪比的改善程度是有限的。

干扰消除技术是 UE 侧通过小区间多用户检测来消除比较强的干扰，对一些幅度较小的干扰效果有限，而且实现复杂。

干扰协调技术（ICIC）既不是平均化干扰，也不是消除干扰；而是根据多个小区的无线资源（PRB）使用情况和业务负荷状况，来决定如何使用和调度无线资源，来尽量避免产生较大的干扰，提高小区边缘的数据速率和覆盖。这里的无线资源指的是时域资源、频域资源、发射功率。这种技术实现比较简单，效果较好，成为 LTE 抑制小区间干扰的主流技术。

ICIC 的主要缺点是小区边缘的频率资源有限，对小区边缘的峰值速率和系统整体容量有所影响。

10.6.2 ICIC 模块的关系网

ICIC 模块和 DRA 模块是相互提供信息的关系，如图 10-30 所示。ICIC 模块把小区边缘用户、小区中心用户的资源使用信息、资源调度的优先级等信息提供给 DRA，供其进行资源调度；DRA 模块将时、频资源的调度结果反馈给 ICIC 模块。ICIC 模块还指示功率控制模块，为了避免小区间干扰，那些子载波的功率需要调整。

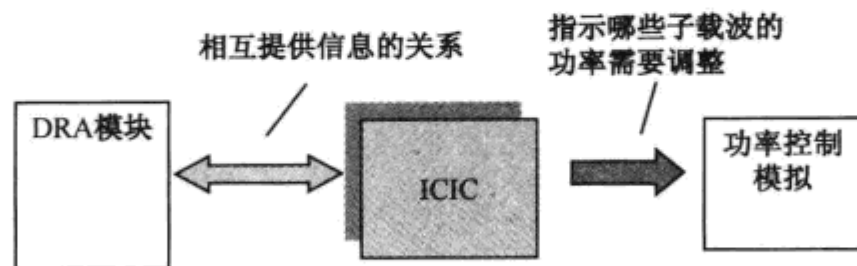


图 10-30 ICIC 模块与其他 RRM 模块的关系

10.6.3 ICIC 的事前事后

小区间干扰协调技术的本质是通过对小区边缘用户无线资源的调度，降低小区间干扰的影响。本质上是一种时间、频率、功率资源的调度和控制策略。

也就是说，处于服务小区边缘的用户在一个调度周期内，选择小区间干扰较低的时、频资源，限制使用干扰较大的时、频资源，控制干扰较大时、频资源的发射功率，以达到降低干扰和保证边缘覆盖速率的目的。

这里面有以下两种情况：

- (1) 事前规避、过载发生之前，尽量控制干扰，减少过载发生的概率。
- (2) 事后控制、过载发生之后，快速降低干扰，使之恢复正常工作的范围。

事前规避的方式是提前规划好每个小区边缘用户可用的时、频资源，在哪些 PRB 上以大功率发送。

服务小区把边缘用户的资源分配情况，事前通知可能产生干扰的邻区。邻区自然不愿意多事，或者不再使用这些给友邦带来麻烦的时、频资源，或者降低相应的时、频资源的发射功率。事先规避的方式是通过不同小区边缘用户使用资源的不同，来达到干扰协调的目的。事先规避的方式能够减轻小区间干扰，但仅适用于小区边缘中低负荷的场景。

当小区边缘负荷较高的时候，各小区边缘用户占用的资源较多，基本没有空闲的、可供灵活调度的时、频资源，这使事前规避的方式不可能改善小区间的干扰状态。也就是说，小区边缘在高负荷的情况下，事前规避的方式已经不再适用了。

事后控制的 ICIC 通过在基站间交互负载信息，了解邻区的资源使用以及干扰情况；在调度本小区的 UE 时，或者避开邻区已经利用的或者干扰比较大的 PRB，或者在这些 PRB 上降低功率发送；同时把自己的资源利用情况告诉邻区，尽量避免邻区间的资源碰撞，来达到干扰协调的目的。

10.6.4 频率软复用 (SFR)

频率软复用 (Soft Frequency Reuse, SFR) 和部分频率复用 (Fractional Frequency Reuse, FFR) 是 LTE 系统中事前资源规划的干扰协调机制，主要目的是提高小区边缘的频率复用因子，改善小区边缘的性能，降低小区间的干扰。FFR 与 SFR 的区别在于参与复用的频率范围和数量不一样。FFR 只拿出一部分频率在小区边缘进行复用，思路与 SFR 类似。

下面以 SFR 为例说明干扰协调机制的基本思路，如图 10-31 所示。

软频率复用 SFR 是频率复用与功率控制相结合的干扰协调方法，核心思想是：中心区域用户可以使用全部资源块，但只能以低功率使用部分资源块；边界区域用户以全功率使用部分资源块。

UE 是否是小区边缘用户，系统根据对服务小区和邻区的 RSRP 测量来判断。

软频率复用 SFR 将频率资源分为若干个频率复用集。其中一个频率集作为主频，用于边缘区域的用户；其余一个频率集作为副频，用于小区中心的用户。

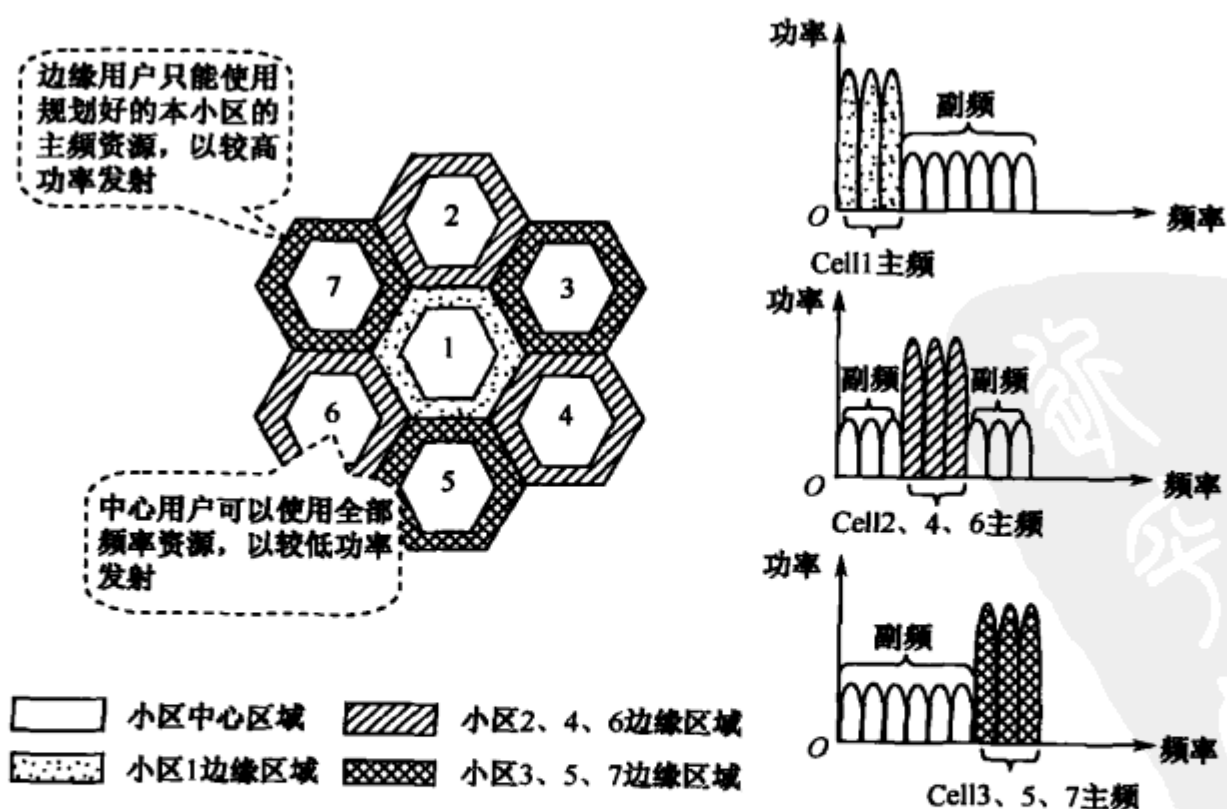


图 10-31 频率软复用 SFR 主要思路

小区的中心区域和边缘区域使用不同的频率和发射功率，尽可能控制小区边缘用户间的干扰。

服务小区中心的用户采用较低的发射功率，相邻小区中心的用户即使占用相同的频率也不会造成较强的小区干扰；小区边缘区域的用户由于信号电平较低，需要采用较高的功率发送信号，由此可能造成较强的小区干扰，所以需要尽量避免使用相同的频率。也就是说，小区中心区域的频率复用系数为 1，小区边缘区域的频率复用系数可以为 n （图 10-31 中频率复用系数为 3）。

频率软复用 SFR 通过子载波频率资源划分、频率资源空间隔离分配，确保相邻小区边缘区域的子载波互不重叠、互不干扰；通过对中心区域用户的发射功率进行限制的方法，在控制小区干扰的同时，提高中心区域的频率复用效果。

进一步提高小区边缘的频率复用系数（比如，从 3 增加到 9），这样频率复用距离会增加，可以进一步降低小区干扰；但频率复用系数的增加，会导致频谱利用率的降低。

根据频率复用方案是否随时间变化、随时间变化的频次，可以将软频率复用 SFR 方法分为三种：静态干扰协调、半静态干扰协调、动态干扰协调。

（1）静态干扰协调。

静态干扰协调指频率资源划分方案不随时间变化（或变化的周期较长）、空间隔离分配方案也不随时间变化，完全使用初始阶段确定的方案。

也就是说，对于静态干扰协调方法，小区边缘用户固定使用预留的部分带宽资源，小区中心可使用整个带宽资源，在整个时间轴上分配的频率资源是固定不变的，如图 10-32 所示。

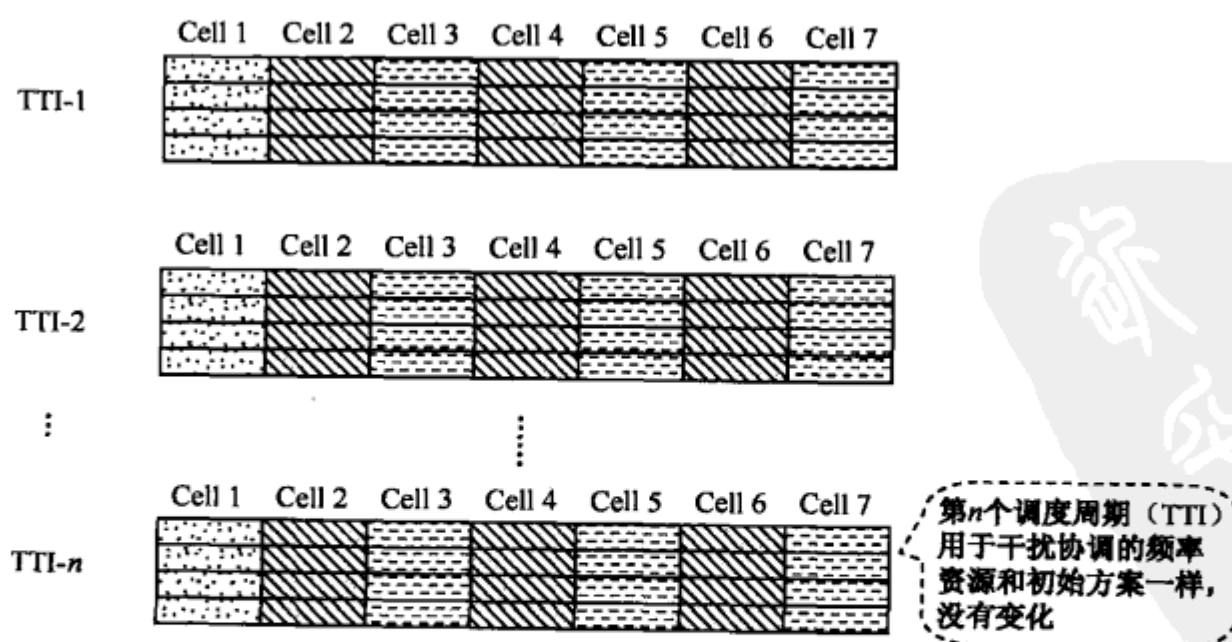


图 10-32 静态干扰协调

静态干扰协调的优点是简单易行，信令开销较少，使用效率高。在系统初始化阶段，UE 和网络侧一次性将频率资源划分方案和空间分配方案协调好，以后不需额外的信令开销。但静态干扰协调的缺点是在 LTE 系统负荷剧烈变化的时候，无法适应小区间干扰情况的变化，缺乏灵活机动性；尤其是在小区边缘处于高负荷状态，小区中央处于低负荷状态时，难以有效地提高小区边缘性能。

(2) 动态干扰协调。

动态干扰协调方法是指频率资源的划分方案和空间分配方案，每调度周期 (TTI) 都会随干扰分布和负荷状态的变化而变化，即每个小区用于干扰协调的资源都会随着时间的变化而增加或者减少，如图 10-33 所示。

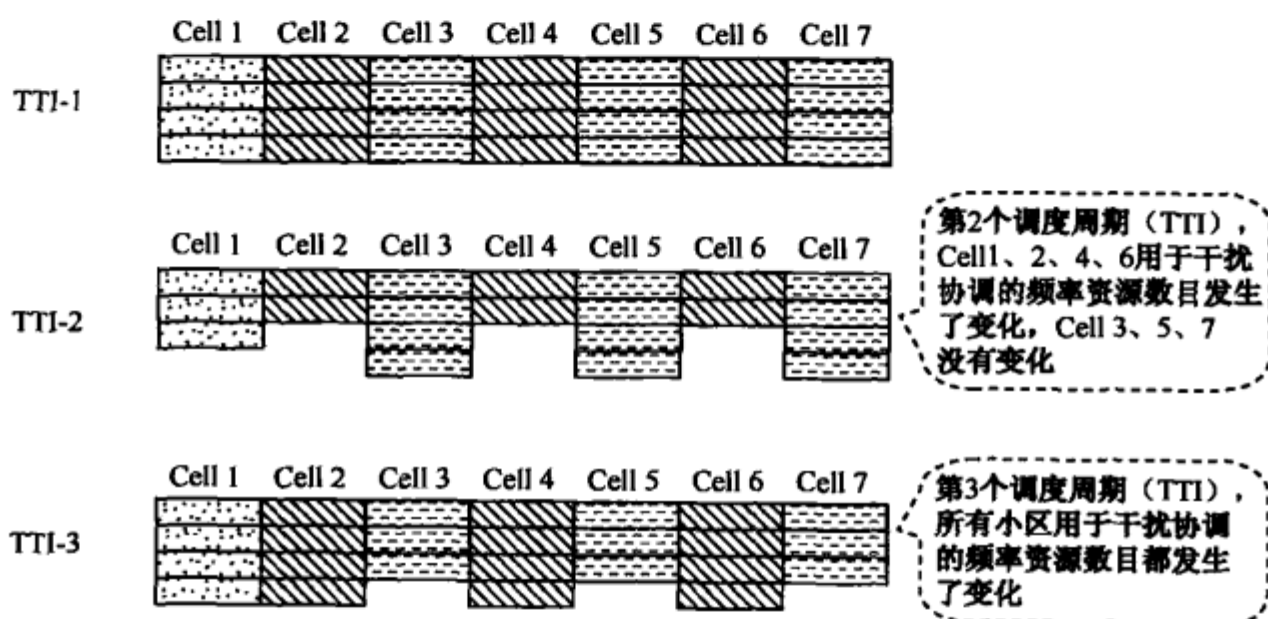


图 10-33 动态干扰协调

动态干扰协调方法可以动态 (每 TTI) 调整频率资源的划分，能够很好地适应小区间干扰分布和负荷状态的变化。但是在每个 TTI 调整一次频率资源使用方案，就会产生过多的信令开销，导致系统效率的严重降低，增加系统的处理时延，对系统性能的提高作用有限。

(3) 半静态干扰协调。

对于半静态干扰协调方法，频率资源的划分方案和空间分配方案可以随时间的变化而变化，但并不是时刻变化，而是根据干扰协调的需要，经过多个 TTI 才会变化一次，如图 10-34 所示。

半静态干扰协调方法试图在减少信令开销的同时，适应小区间干扰变化。也就是说，并不是每个调度周期都调整频率资源的划分和空间分配方案，而只有在干扰分布和负荷大小变化较大的时候，才进行动态资源协调。这种方法是静态干扰协调和动态干扰协调的一个折中，在略微增加一些信令的情况下，提高了小区边缘的性能。

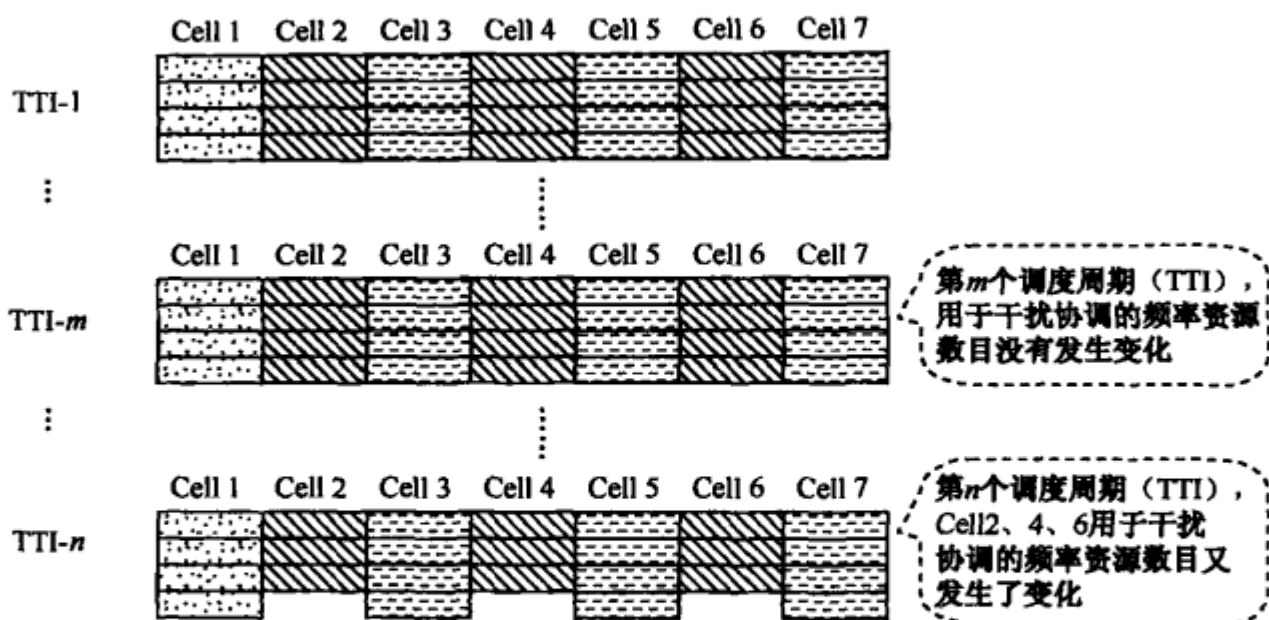


图 10-34 半静态干扰协调

10.6.5 干扰协调员——HII、RNTP、OI

高干扰指示 (High Interference Indication, HII) 是相邻小区进行干扰及负荷状态交互的信令指示。HII 指示本小区在未来一段时间将分配哪些 PRB 给边缘用户, 相邻小区使用这些资源可能产生较高的干扰, 所以在调度边缘用户的时候, 邻小区尽量避免使用这些 PRB。

对于 TD-LTE 系统的交叉时隙干扰, 不区分相应时隙是上行还是下行, 只要时隙和频域资源相同, 这些 PRB 对邻区就是高干扰区。对于 TD-LTE 系统, 收到 HII 指示的小区, 不但可使用不同频域资源, 也可以分配在不同的时隙上。

RNTP (Relative Narrowband TX Power Indicator, 相对窄带发射功率指示) 是本小区 PRB 上的下行发送功率等级的指示, 用于通知邻小区哪些 PRB 以高功率发送; 邻小区在给边缘 UE 调度无线资源时, 尽量避开这些 PRB。

在小区边缘高负荷的情况下, 服务小区将会检测到较强的上行干扰。当基站测量的 PRB 上行干扰 (Interference Over Thermal Noise, IOT) 超过一定门限时, 即满足了 OI (Overload Indicator, 过载指示) 的触发条件, 产生干扰的小区将确定干扰等级, 向邻区发送过载指示, 通知邻区, 服务小区哪些资源受到上行干扰。邻区收到 OI 后, 确认是否是由自己引起的干扰, 若是则进行降干扰处理。

降干扰措施有:

- (1) 在相应的 PRB 上降低发送功率;
- (2) 不使用干扰过大的 PRB, 让 UE 使用性能好的时、频资源。

高干扰指示 HII 是在中低负荷的时候, 对干扰较大的 PRB 进行标识的, 是过载前的

干扰协调机制。

负荷过载指示 (OI) 是在系统负荷较大的时候, 对已经产生的上行干扰的指示。在系统过载、半静态干扰机制无法奏效的时候, OI 提供额外的保护机制。所以, 它是一种事后处理策略。

HII、RNTP、OI 信息都是通过 eNodeB 之间的 X2 接口传送的。

HII 和 OI 的更新周期不能太大, 也不能太小。太大, 对小区间干扰的变化反映不及时; 太小, X2 接口的交互信令负荷过重。HII 和 OI 的最小更新周期为 20 ms, 在半静态干扰协调方式下, HII 的更新的时间间隔要比这个值大一些。

HII 和 OI 周期性传送可能带来较大的 X2 信令开销。为了减小这个开销, LTE 采用事件触发的方式, 发送 HII 和 OI。也就是说, 只有满足条件的时候才发送指示。

LTE 会对每一个 PRB 发送一个 HII 和 OI 指示, 这样可以精确地给邻小区指示不同子载波的受干扰情况。也就是说, 干扰指示要区别频率。相对于不区别频率的 HII 和 OI 反馈机制来说, 区别频率的反馈机制, X2 接口的信令开销较大, 但带来了精确控制干扰的好处。

OI 是由多比特构成的 (如 2~5 bit), 可以区别干扰等级, 可以指示 UE 发射功率进行较精确的调节。如果由单个比特构成, OI 只能表示在频带内是否出现了过载, 却无法表示过载的程度。OI 分为三个等级, 分别表示低、中、高干扰水平。

HII 只是预报那些敏感的 PRB, 不分等级, 只须 1 bit 表示某 PRB 是否需要额外的保护便可。

由于本小区和不同的相邻小区, 在某一个时频资源上的干扰可能大不相同, 因此需要对不同的相邻小区发送不同的 HII。如果不加区别, HII 的指示意义就不大了。

10.7 负载均衡 (LB)

由于不同场景用户行为的不确定性, 话务迁移、话务突发现象频繁, 导致了网络中可能同时存在超忙小区、超闲小区。超忙小区导致拥塞率上升、业务质量下降; 超闲小区使得资源利用率过低, 资源浪费严重。

负载均衡 (Load Balance, LB), 有的文献上也称为负载控制 (Load Control, LC), 本质上是一种话务分流技术, 功能模块位于 eNodeB 中。

负载均衡是指多小区间的负荷分布不均衡, 甚至已经出现了较大比例的超忙小区或者超闲小区, 通过一定的协调, 降低超忙小区的利用率、提高超闲小区的利用率, 使得小区间负荷分担更加均衡, 在小区资源利用率和业务质量 (QoS、掉话率) 之间寻找到

一个合适的平衡点。

根据参与话务分流的小区范围不同，负荷均衡可以分为：

- (1) 基站内小区之间的负荷均衡；
- (2) 基站间的负荷均衡；
- (3) MME 之间的负荷均衡；
- (4) 跨系统间的负荷均衡。

系统间的负荷均衡的效果除了受话务分布的影响之外，还受系统的覆盖水平、UE 的能力、市场牵引策略等多个因素影响。

10.7.1 LB 工作配合关系

LB 功能模块的主要功能是牵引负荷高的小区话务流向利用率较低的小区。LB 需要借助其他 RRM 模块的力量。

通过 CMC 模块调整小区重选门限，引导空闲状态 UE 驻留利用率相对较低的小区。这样一旦发起呼叫，UE 直接使用利用率较低的小区资源；通过 CMC 模块调整小区切换门限，引导连接状态 UE 切换到利用率较低的小区。

在发生小区拥塞的情况下，LB 模块还须给 RAC 模块发送拥塞指示，用于准入控制决策，这样可以尽量不在拥塞小区上建立 RB。

LB 模块和 DRA 模块须互通信息：DRA 给 LB 提供资源使用状况、业务 QoS 满足情况；LB 给 DRA 提供小区拥塞状态的指示，以便进行合理的动态资源调度。

LB 与其他 RRM 模块之间的关系如图 10-35 所示。

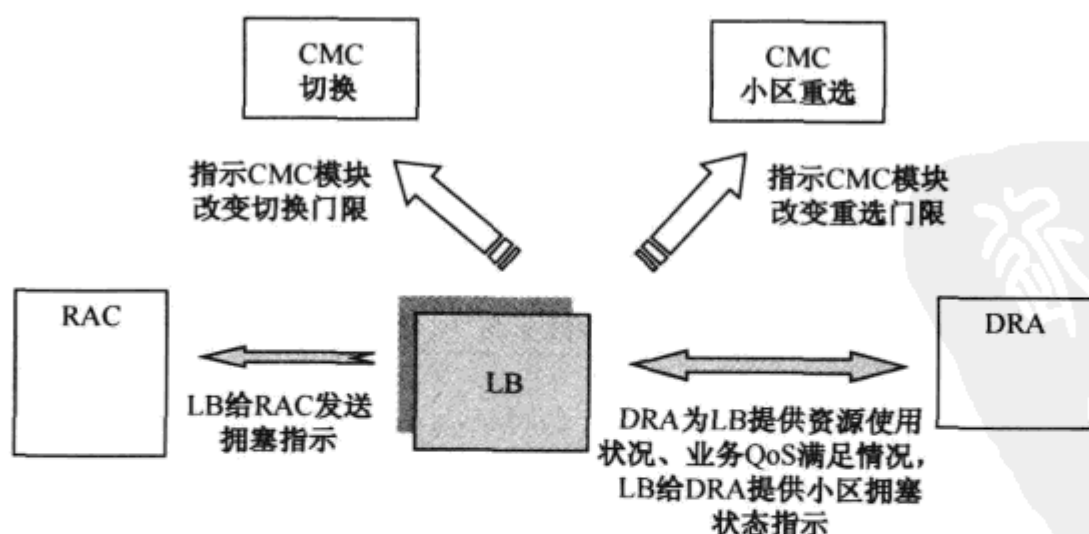


图 10-35 LB 与其他 RRM 模块之间的关系

10.7.2 负载均衡算法

评估负载均衡算法的好坏有三个维度：

- (1) 资源利用率；
- (2) 业务 QoS 满意率；
- (3) 掉话率。

系统资源利用率越高，业务 QoS 满意率越高，掉话率越低，则负载均衡的算法越有效。

负载均衡算法包括两个重要工作：过载判断、负载均衡控制。

满足下面两个条件的时候，负载均衡算法判断为过载：

- (1) 业务 QoS 满意率低于一个门限，RB 利用率高于一个门限；
- (2) 业务 QoS 满意率低于一个门限，下行功率受限。

小区负荷过载后，系统就需要启动负载均衡的控制动作，包括以下内容：

- (1) 业务保证速率 GBR 降速。

将业务保证速率下降一定的百分比，本质上是让所有的业务承载都承担一些负荷过载的消极影响，换来整体 QoS 满意率的提升。这种方法是一种过载消极影响大家分担的策略。

- (2) 释放一些优先级太高、占用资源太多业务。

当系统过载时，部分业务的 ARP (Allocation and Retention Priority, 分配保留优先级) 大于过载控制的 ARP 门限，占用过多系统资源。释放这些业务是一种过载消极影响个别人分担的策略。

- (3) 要求其他 RRM 配合。

通知 CMC 变更小区重选门限、小区切换门限，让多余话务到别处去吧；通知 RAC，本小区的接入控制严厉一些，新增话务非请莫入；通知 DRA，考虑一下吧，我身负重担，请找别的资源吧。

10.8 连接移动性控制 (CMC)

移动通信是移动起来的无线通信，支持移动性是移动通信典型的特性。移动性管理 (Mobility Management, MM) 是移动通信重要的无线资源管理功能。

CMC (Connection Mobility Control, 连接移动性控制) 模块位于 LTE 的 eNodeB 中，负责处理 UE 移动时，驻留小区或服务小区发生变化的情况下，无线资源如何使用。

10.8.1 CMC 工作配合关系

CMC 模块和其他 RRM 模块的关系如图 10-36 所示。LB 模块可以触发基于负载的切换，CMC 又需要调用 RAC 决定是否切入目标小区；当允许切入目标小区的时候，需要触发源小区的 RB 释放过程和目标小区的 RB 释放过程。当需要切换到异系统的时候，又会触发跨系统的 RRM。

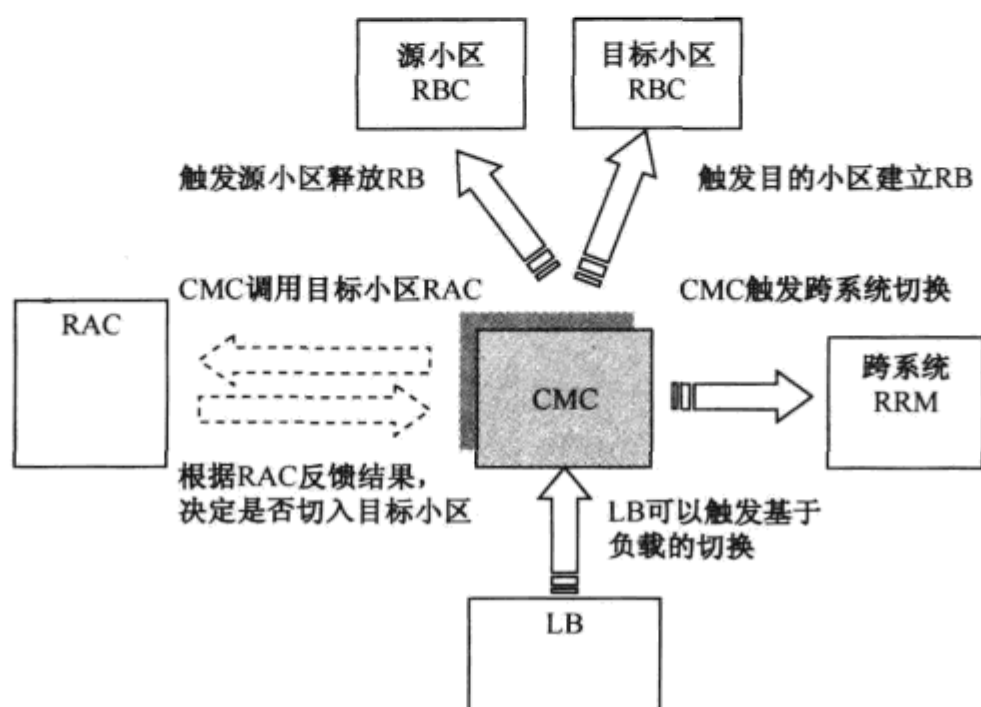


图 10-36 CMC 和其他 RRM 模块之间的关系

10.8.2 CMC 功能模块的组成

根据 UE 和网络是否进行业务连接，可以把 UE 的状态分为以下两种。

- (1) 空闲状态 (Idle)；
- (2) 连接状态 (Connected)。

在空闲状态下，UE 的移动性处理有 PLMN 选择（开机时选择网络）、小区选择 (Cell Selection) 或者小区重选 (Cell Reselection)。

在空闲状态下，网络侧并不知道 UE 具体在哪个小区，只知道它的一个寻呼范围。此时 UE 移动性的管理主要是 UE 的行为。它首先需要接收系统的广播消息，获取测量配置信息和小区选择、重选的门限 (Threshold)、迟滞 (Hysteresis)、时延 (Delay) 等移动性参数。

LTE 小区选择、重选的过程和 UMTS 网络类似，目标是始终让空闲状态的 UE 驻留在最好的小区，这样可以保证 UE 能够正确接收系统消息、寻呼消息，并提高随机接入的成功率。

在连接状态下，UE 需要改变服务小区的时候，所进行的移动性操作叫做切换。LTE 的切换和 UMTS 有一些不同，下面重点介绍与切换相关的移动性管理。

LTE 的切换操作，一般是由 eNodeB 控制和 UE 执行的。在连接状态下，移动性管理的目标是在覆盖范围内提供连续的不中断的通信服务，保证业务的通信质量 (QoS)，同时保证系统性能最优。

由于测量上报的内容不同，小区切换算法与 UMTS 稍有不同。切换判决的依据不仅是 UE 或 eNodeB 的测量结果，还须考虑很多其他因素，如邻小区负荷、话务分布、传输资源、硬件资源以及运营商策略。

根据发生切换的网络场景不同，分为系统内切换、跨系统切换；系统内切换又可分为同频切换、异频切换。

从切换触发的原因上分，切换可以分为基于覆盖的切换、基于负荷的切换、基于业务的切换等。

CMC 模块的主要内容如图 10-37 所示。

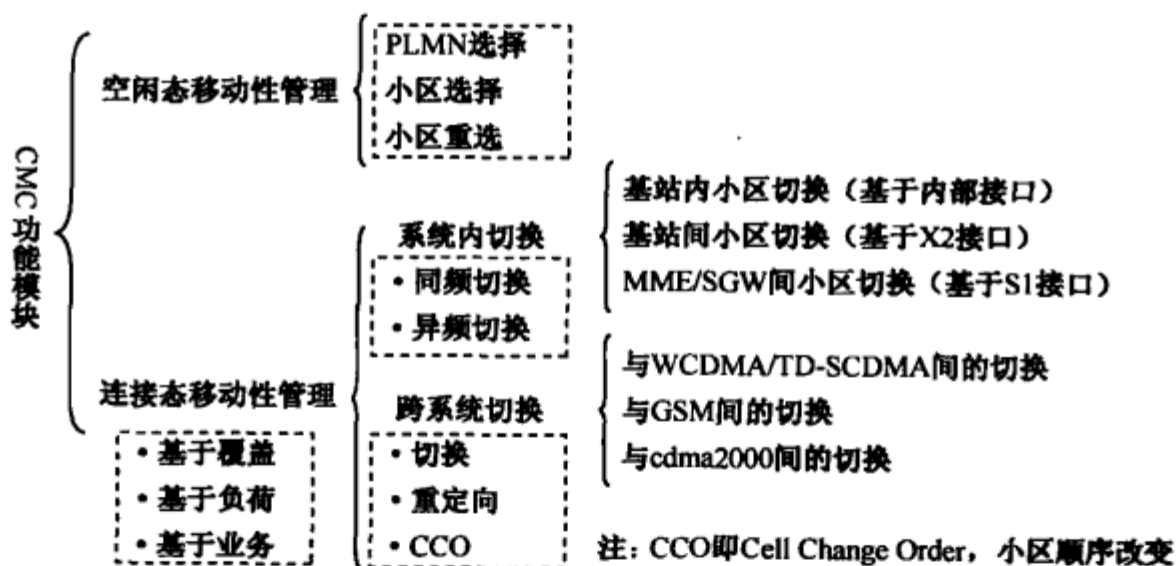


图 10-37 CMC 功能模块的组成

在 LTE 网络建设初期，连接态 UE 的移动性管理主要是基于覆盖的切换，如图 10-38 所示。

10.8.3 切换三步走

俗话说：“谋定而后动”。“谋定”的过程就是根据收集实际情况作出判断，实际上包括收集实际信息、判断决策两个过程；“后动”就是根据决策的结果执行落实的过程。

“切换”过程也遵循谋定而后动的策略，实际上是测量（搜集实际信息）、判决（根据一些准则进行判断）、执行（根据决策结果落实具体动作）的三步走策略，如图 10-39 所示。

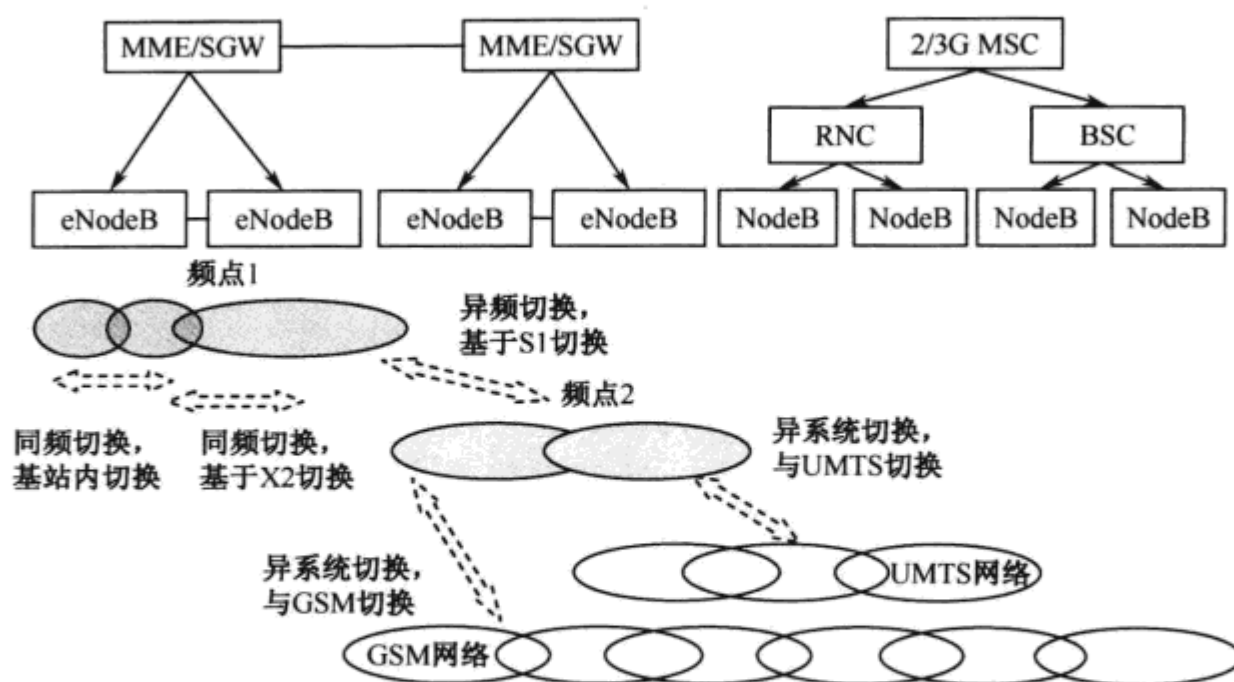


图 10-38 基于覆盖的切换分类

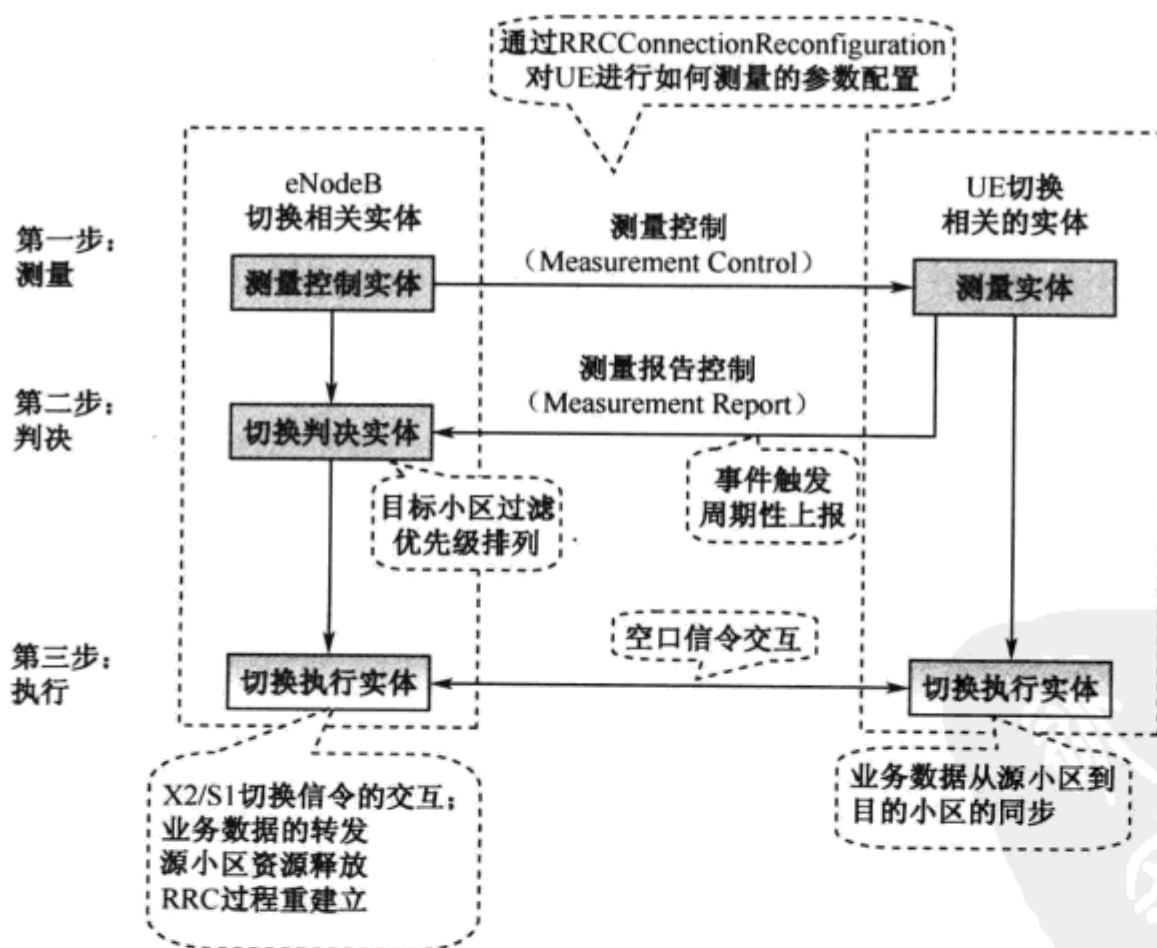


图 10-39 切换过程三步走

切换的第一步是测量。

“切换”的测量由 eNodeB 控制（RRC 层），UE 进行测量（物理层）。eNodeB 的 RRC

层控制 UE 的物理层进行一系列测量，然后 UE 的物理层将这些测量结果报告给自己的 RRC 层。UE 的 RRC 层将这些测量报告，按照要求组装成数据包发给 eNodeB 的 RRC 对等实体。

测量控制的消息是 eNodeB 通过 RRCConnectionReconfiguration 消息下发给 UE 的。这个测量控制消息有测量 ID、测量对象、测量报告方式、测量的物理量、测量 Gap（在进行异频测量、异系统测量时，接收机需要一段没有业务数据传输和专门进行测量的时间间隔，类似 WCDMA 的压缩模式）等内容。

每一个测量 ID 对应一个测量对象、一个测量报告方式、一个服务小区（主服务小区 Pcell, Primary Cell 或者从服务小区 Scell, Secondary Cell）。

测量对象就是要求 UE 进行什么样的测量？是同频测量、异频测量，还是不同无线制式（其他 RAT，如 UMTS、GSM、cdma2000）之间的测量？测量报告方式指的是 UE 测量完成后，如何给 eNodeB 汇报工作？是周期性报告（Periodical Report）还是事件触发（Event Triggered）？

测量过程中，需要区别小区类型：服务小区（Server Cell，和 UE 正在进行业务链接的小区）、列表内小区（Listed Cell，测量对象中列出须测量的小区）、监测小区（Detected Cell，在测量对象中没有列出，但 UE 可以监测的小区）。

UE 可进行测量的物理量分为 eUTRAN 内的测量量、跨系统的测量量。eUTRAN 内的测量量有：RSRP、RSSI、RSRQ。跨系统（inter-RAT）的测量量有：WCDMA 的 CPICH RSCP、CPICH Ec/No；GSM 的 GSM Carrier RSSI；cdma2000 的 PilotStrength 等。

UE 接受 eNodeB 的测量任务，按照要求给 eNodeB 汇报工作。员工给领导汇报工作，有两种方式：按时提供日报、周报（周期性汇报），也可以重要事件随时禀告（事件触发型）。

UE 给 eNodeB 汇报工作，也有两种方式：周期性汇报、事件触发型。多长时间汇报一次，满足什么样的条件上报事件？这些可以由 eNodeB 进行配置。在一般情况下，上报触发事件一次后，就会转成针对该事件的周期性汇报，直到不满足事件触发条件为止。如同员工给领导汇报一个紧急事件后，领导要求每隔一小时汇报一下该事件的进展，称之为事件触发转周期汇报，直到事件平息。

切换的第二步是判决。

eNodeB 收到了 UE 的测量报告，但触发 UE 上报某些事件的小区不止一个，事件也不止一个，这样的测量报告也不止一个。eNodeB 如何选择切换的目标小区呢？eNodeB 要把上报事件的所有小区集合起来生成切换目标小区列表（HO_Candidate_List）。按照配置的规则，进行目标小区列表的过滤，经过过滤以后留下的目标小区进行优先级的排列，选择最合适的目标小区切换过去。

切换的第三步是执行。

切换的执行是在 eNodeB 控制下，eNodeB 和 UE 共同完成业务数据转发路径，由源小区到目的小区的变更；eNodeB 完成相应接口 X2/S1 信令的交互；切换成功后，要完成源小区的资源释放。切换失败，UE 要重新选择小区，重新建立 RRC 链接。

10.8.4 事件及触发条件

在 UE 测量的过程中，满足一定条件，就会触发一些事件；当触发条件不复存在时，就应该停止该事件的汇报，离开该事件。

影响 LTE 某一具体事件触发的三剑客：

- (1) 门限 (Threshold、Thresh)；
- (2) 迟滞 (Hysteresis、Hys)；
- (3) 触发延迟时间 (Time To Trigger)。

门限，在某个值之上或之下一律开始考虑触发某个事件。有绝对门限、相对门限的区别，如图 10-40 所示。绝对门限，就是“一刀切”策略，如同年龄小于 18 岁一律算未成年人一样。在无线通信里，接入电平、驻留电平一般都是绝对门限。相对门限，只要比一个人年龄大，就是他的哥哥。在无线通信里，切换有时须考虑相对的电平大小。

由于无线信号随时随地的变化，导致某个测量值剧烈波动：一会儿大于某一门限，就触发了某事件；一会儿小于某一门限，就离开了某事件。这样会导致频繁的测量报告。迟滞 (Hys) 是为了减少频繁信令交互，防止切换频繁发生，而增加的延缓触发事件的量。

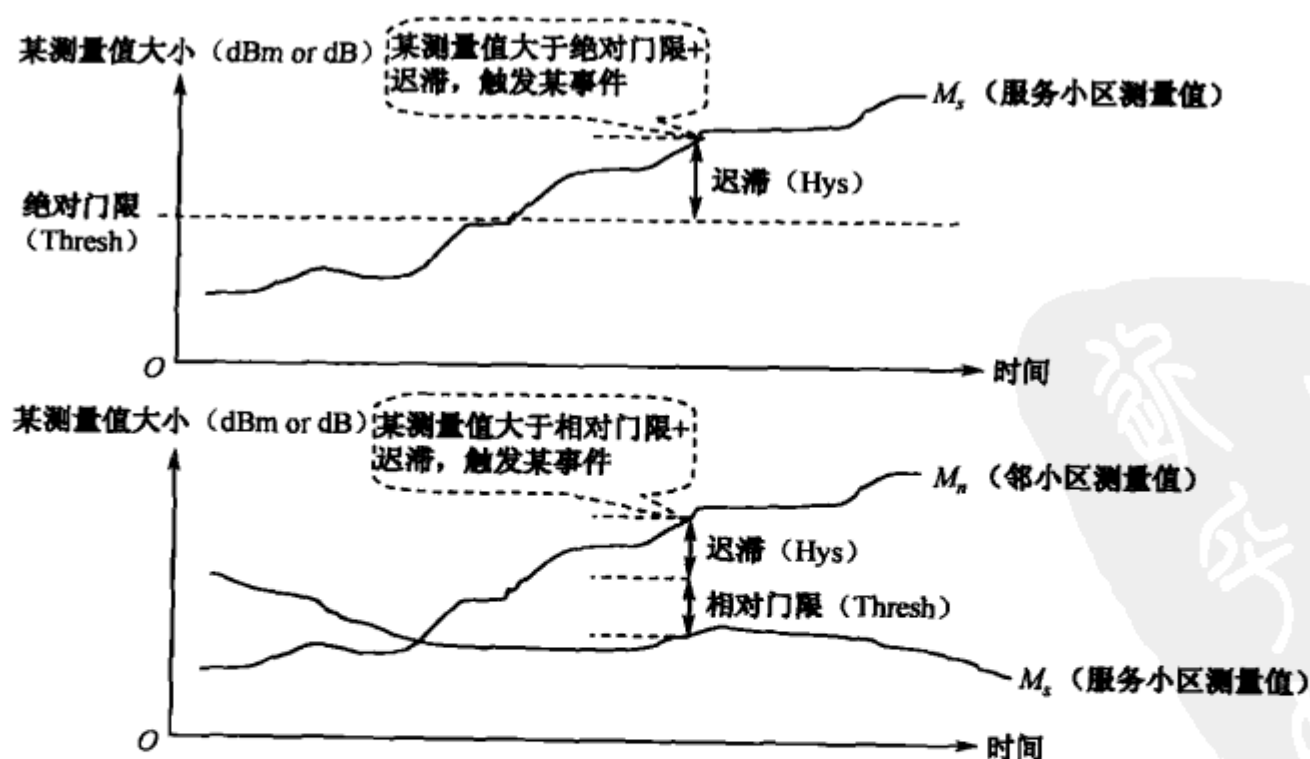


图 10-40 门限+迟滞触发条件

无线环境剧烈波动，会导致频繁切换，降低了业务接续质量，可能导致掉话。为了防止某些事件的误判，减少切换次数，定义了触发延迟时间（Time To Trigger）。只有一个触发事件的条件，在一定的期间都满足的时候，才会上报该事件，如图 10-41 所示。

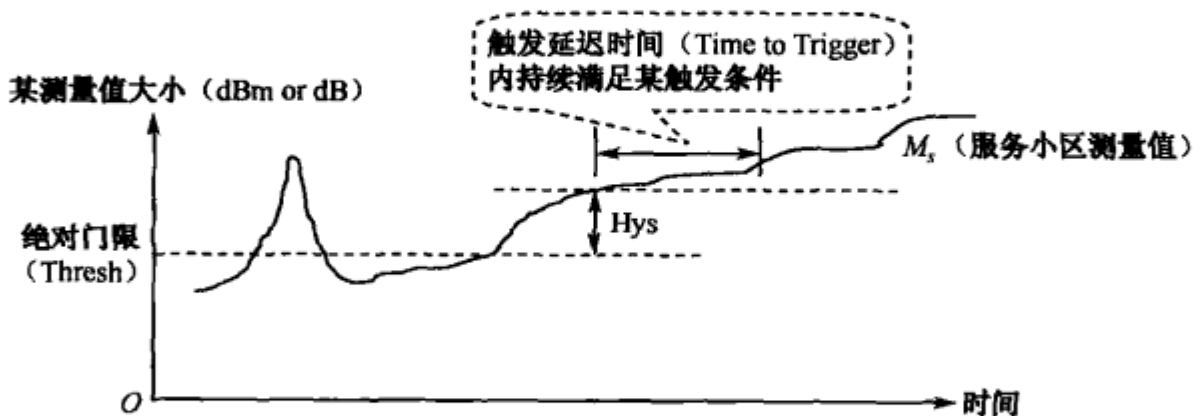


图 10-41 事件的触发延迟时间

除了上面调节切换难易程度的参量外，LTE 定义了偏置值 (Offset)，它是一种针对某一事件的测量值所额外考虑的。

除了针对某一事件的偏置之外,还有两种特殊的偏置:小区特定偏置(Cell Individual Offset, CIO)、频率特定偏置(Frequency Specific Offset, FSO)。门限、迟滞、延迟触发时间都是针对某一具体事件的调节参数;这两种特殊偏置值(Offset)则是针对一定范围、一定类型的事件进行切换条件偏置的,可正可负,起到移动相对门限大小、提前或延后一类事件上报的作用,如图 10-42 所示。

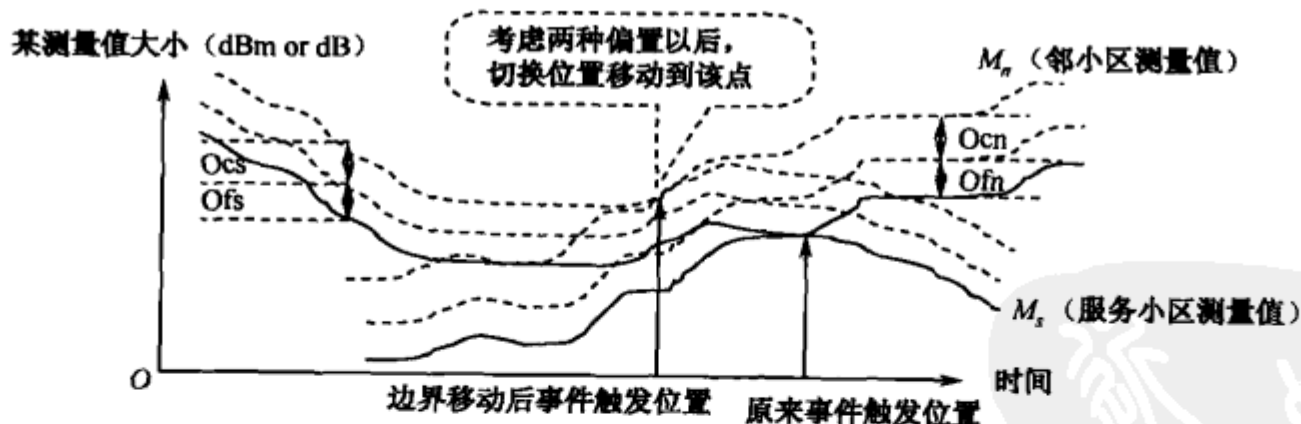


图 10-42 偏置对事件触发位置的影响

小区特定偏置是小区级参数,用 Ocp 表示主服务小区 PCell 偏置值;用 Ocs 表示(从)服务小区 Scell 的偏置值(一个终端可能有一个服务小区,称为 Scell;也可能同时有两个服务小区,分主从,一个为 PCell,另外一个为 SCell);用 Ocn 表示邻小区的偏置值。这些偏置值起到移动小区切换边界的作用。设置这些偏置值必须指明是从哪个小区到哪个小区的偏置。

频率特定偏置是频点级参数， O_{fp} 是主服务小区的频率特定偏置，用 O_{fs} 表示（从）

服务小区某频点的偏置值；用 O_{fn} 表示邻小区某频点的偏置值。它对特定频点之间的所有 UE 起作用，同时起到移动某频点切换边界的作用。设置这些偏置值需要指明是从哪个频点到哪个频点的偏置。

目前，LTE 定义的与切换相关的事件有 8 个，系统内切换事件有 6 个，系统外切换相关事件有 2 个，如表 10-5 所示。

表 10-5 LTE 定义的与切换相关的事件

事件	含义	进入条件	离开条件
系统内	A1 服务小区比门限好	$M_s - Hys > Thresh$	$M_s + Hys < Thresh$
	A2 服务小区比门限差	$M_s + Hys < Thresh$	$M_s - Hys > Thresh$
	A3 邻小区比主服务小区 (PCell) 好	$M_n + O_{fn} + O_{cn} - Hys > M_p + O_{fp} + O_{cp} + Off$	$M_n + O_{fn} + O_{cn} + Hys < M_p + O_{fp} + O_{cp} + Off$
	A4 邻小区比门限好	$M_n + O_{fn} + O_{cn} - Hys > Thresh$	$M_n + O_{fn} + O_{cn} + Hys < Thresh$
	A5 服务小区比门限 1 差，邻小区比门限 2 好	$M_p + Hys < Thresh1$ $M_n + O_{fn} + O_{cn} - Hys > Thresh2$	$M_p - Hys > Thresh1$ $M_n + O_{fn} + O_{cn} + Hys < Thresh2$
	A6 邻小区比服务小区 (Scell) 好	$M_n + O_{cn} - Hys > M_s + O_{cs} + Off$	$M_n + O_{cn} + Hys < M_s + O_{cs} + Off$
异系统	B1 异系统 (Inter RAT) 邻区比门限好	$M_n + O_{fn} - Hys > Thresh$	$M_n + O_{fn} + Hys < Thresh$
	B2 主服务小区 (PCell) 比门限 1 差，异系统 (inter RAT) 邻区比门限 2 好	$M_p + Hys < Thresh1$ $M_n + O_{fn} - Hys > Thresh2$	$M_p - Hys > Thresh1$ $M_n + O_{fn} + Hys < Thresh2$

其中：

M_s 是不考虑任何偏置的服务小区测量值 (RSRP 单位是 dBm, RSRQ 的单位是 dB)；
 M_p 是不考虑任何偏置的主服务小区测量值 (RSRP 单位是 dBm, RSRQ 的单位是 dB)；
 M_n 是不考虑任何偏置的邻小区测量值 (RSRP 单位是 dBm, RSRQ 的单位是 dB)；
 Hys 是一个事件的迟滞参数 (单位：dB)；

$Thresh$ 是一个事件开始考虑触发的门限 (RSRP 单位是 dBm, RSRQ 的单位是 dB)
(注：不同的事件有不同的门限，不要混淆)；

$Thresh1$ 是主服务小区的事件触发门限 (RSRP 单位是 dBm, RSRQ 的单位是 dB)；

$Thresh2$ 是邻小区的事件触发门限 (RSRP 单位是 dBm, RSRQ 的单位是 dB)；

O_{cp} 是主服务小区的小区特定偏置，没有偏置则设为 0 (单位：dB)；

O_{cn} 是邻小区的小区特定偏置，没有偏置则设为 0 (单位：dB)；

O_{fp} 是主服务小区的频率特定偏置，没有偏置则设为 0 (单位：dB)；

O_{fn} 是邻小区的频率特定偏置，没有偏置则设为 0 (单位：dB)；

Off 是某一事件的偏置，没有偏置则设为 0 (单位：dB)。

下面我们具体阐述一下 LTE 的事件。

(1) A1 事件。

A1 事件，即服务小区比门限好的事件，如图 10-43 所示。当服务小区信号质量较差的时候，有可能需要启动异频或异系统的测量。当 A1 事件触发后，可以停止正在进行的异频、异系统测量。在异频、异系统测量的时候，测量 Gap 起作用；当 A1 事件触发后，在 RRC 的控制下，去激活测量 Gap。

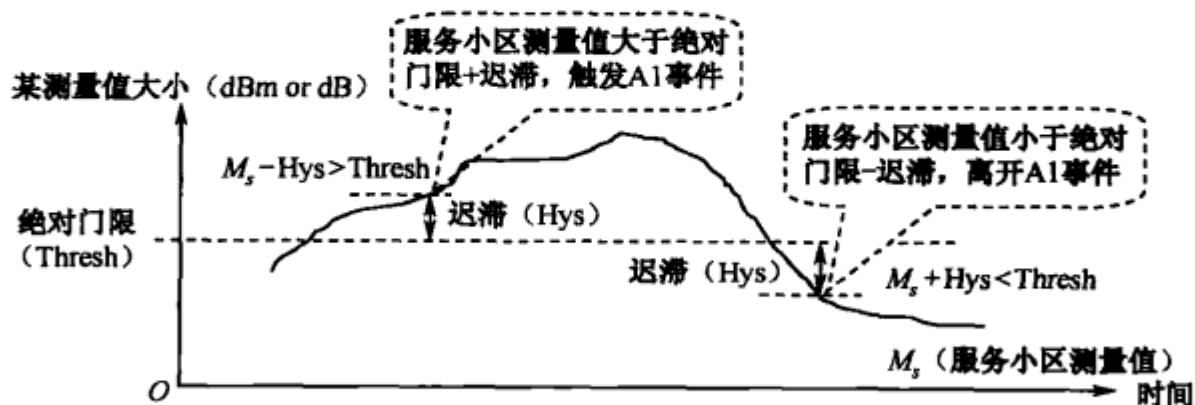


图 10-43 A1 事件

(2) A2 事件。

A2 事件，即服务小区比门限差的事件，如图 10-44 所示。当服务小区信号质量从好变差的时候，需要激活测量 Gap，启动异频或异系统的测量。

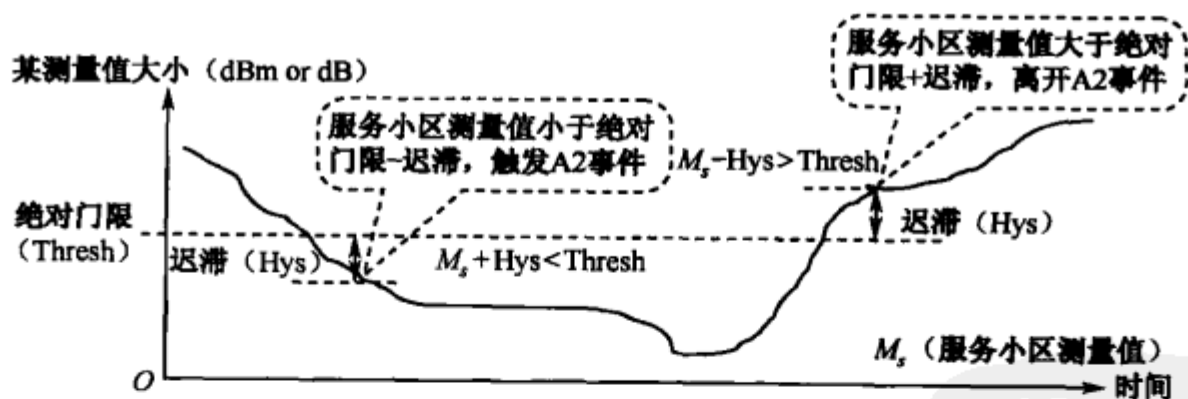


图 10-44 A2 事件

(3) A3 事件。

在考虑适当的偏置的情况下，当邻小区的测量质量好于当前服务小区的测量质量时，触发 A3 事件，如图 10-45 所示。A3 事件是 LTE 同频小区基于覆盖切换时的一个主要事件。

(4) A4 事件。

考虑一定的偏置，邻小区的质量比门限好，触发 A4 事件，如图 10-46 所示。A4 事件可以用于负载平衡，将 UE 移动到高优先级的小区。

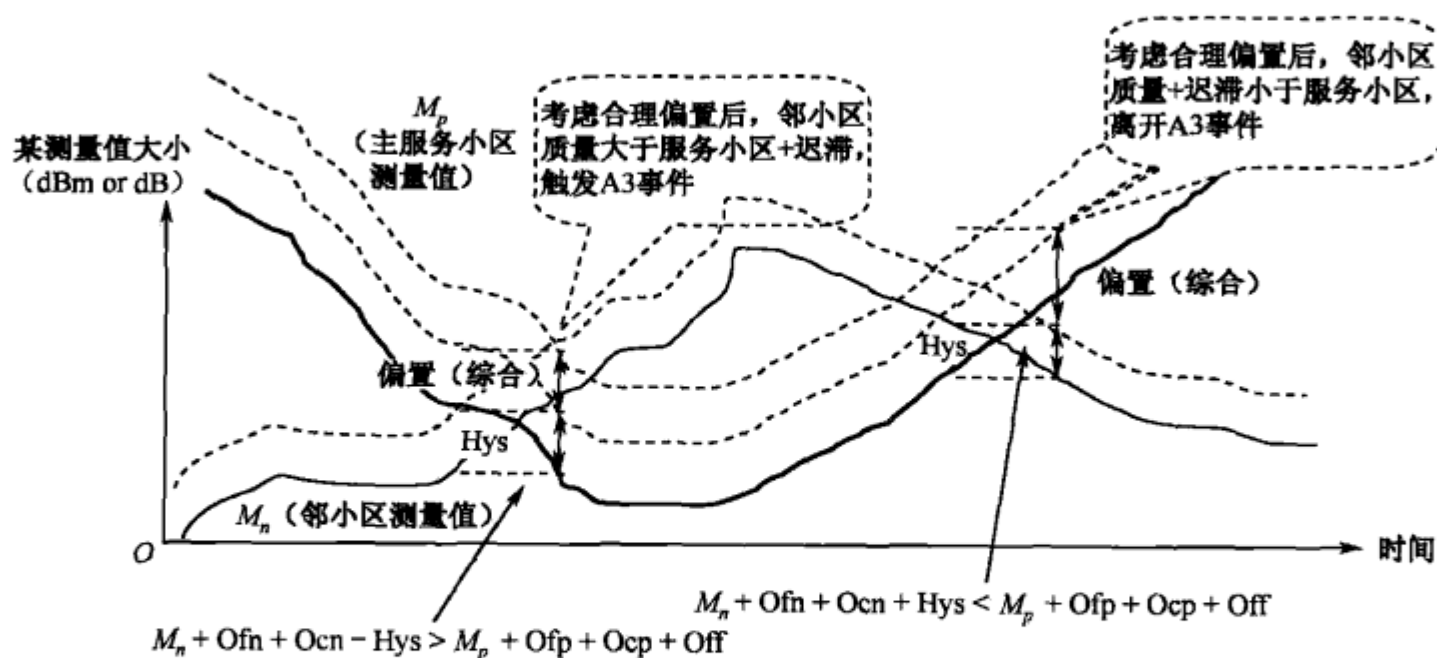


图 10-45 A3 事件

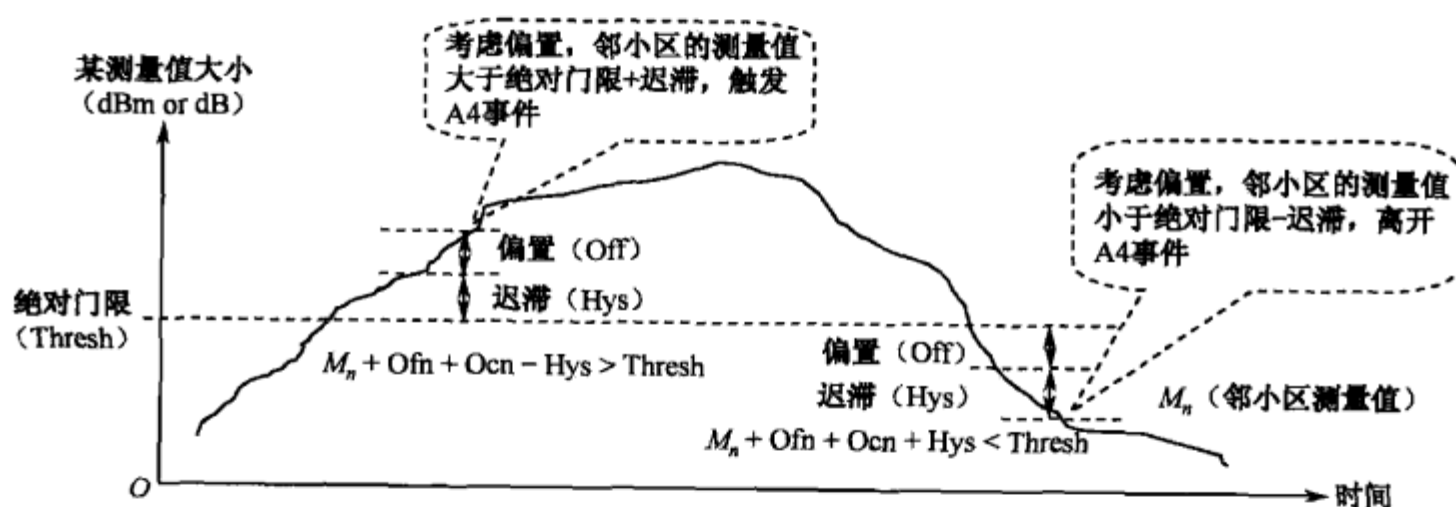


图 10-46 A4 事件

(5) A5 事件。

适当考虑偏置后，服务小区的质量比门限 1 差，邻小区的质量比门限 2 好，触发 A5 事件，如图 10-47 所示。A5 事件用于负载平衡，与移动到低优先级的小区重选类似。

(6) A6 事件。

考虑一定的偏置后，邻小区质量比从服务小区质量好，触发 A6 事件，如图 10-48 所示。

(7) B1 事件。

考虑一定的偏置后，异系统 (Inter RAT) 邻区的测量值比门限好，触发 B1 事件，如图 10-49 所示。B1 事件一般用于测量高优先级的异系统 RAT。

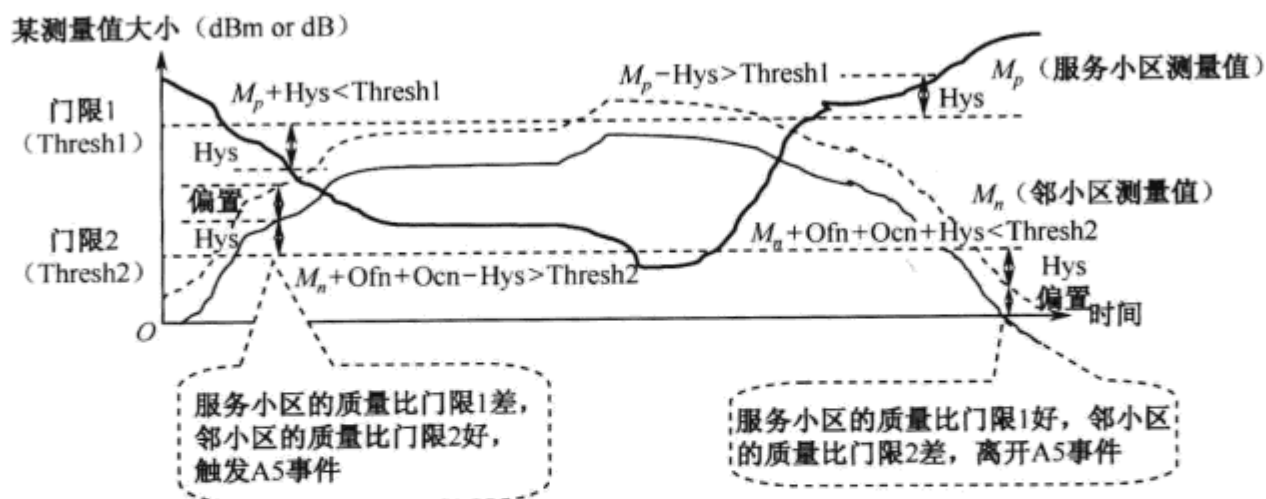


图 10-47 A5 事件

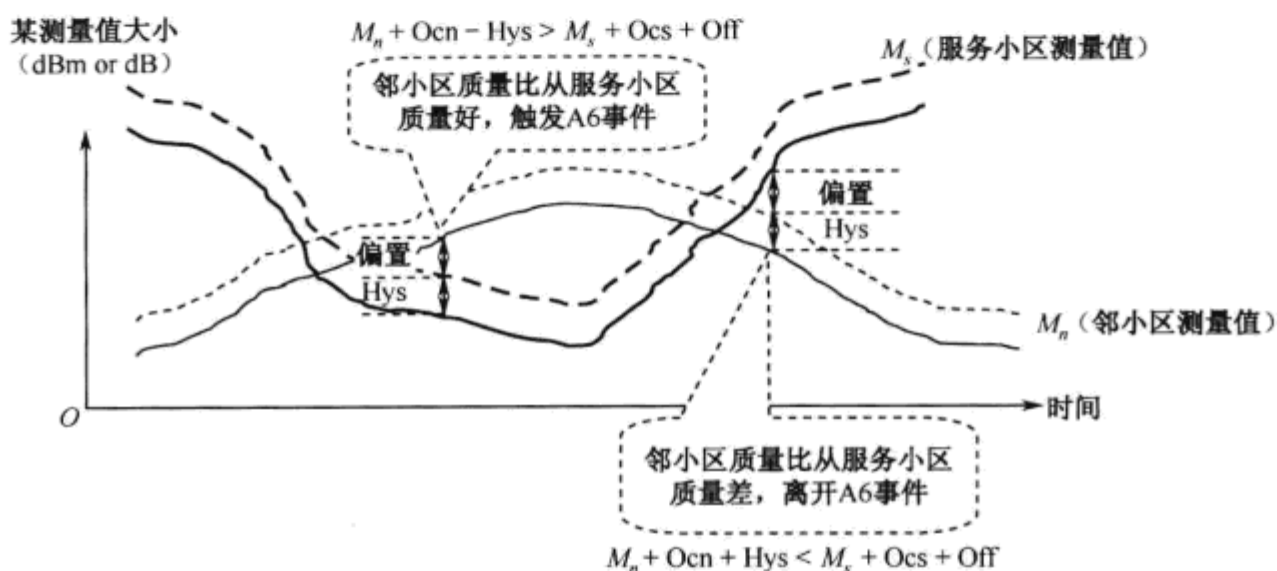


图 10-48 A6 事件

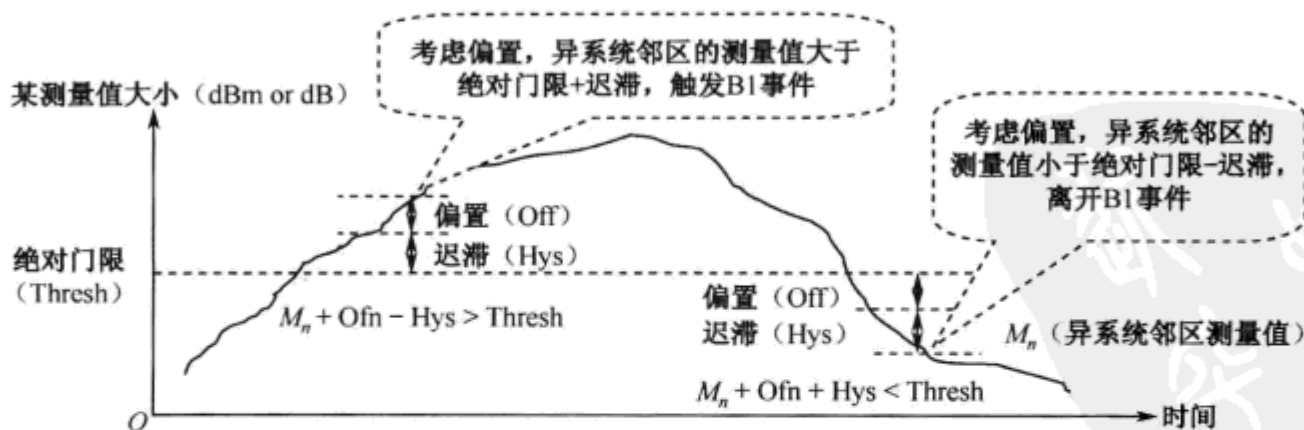


图 10-49 B1 事件

(8) B2 事件。

进行适当考虑偏置后, 服务小区的质量比门限 1 差, 异系统邻区的质量比门限 2 好, 触发 B2 事件, 如图 10-50 所示。B2 用于测量低优先级的异系统 RAT。

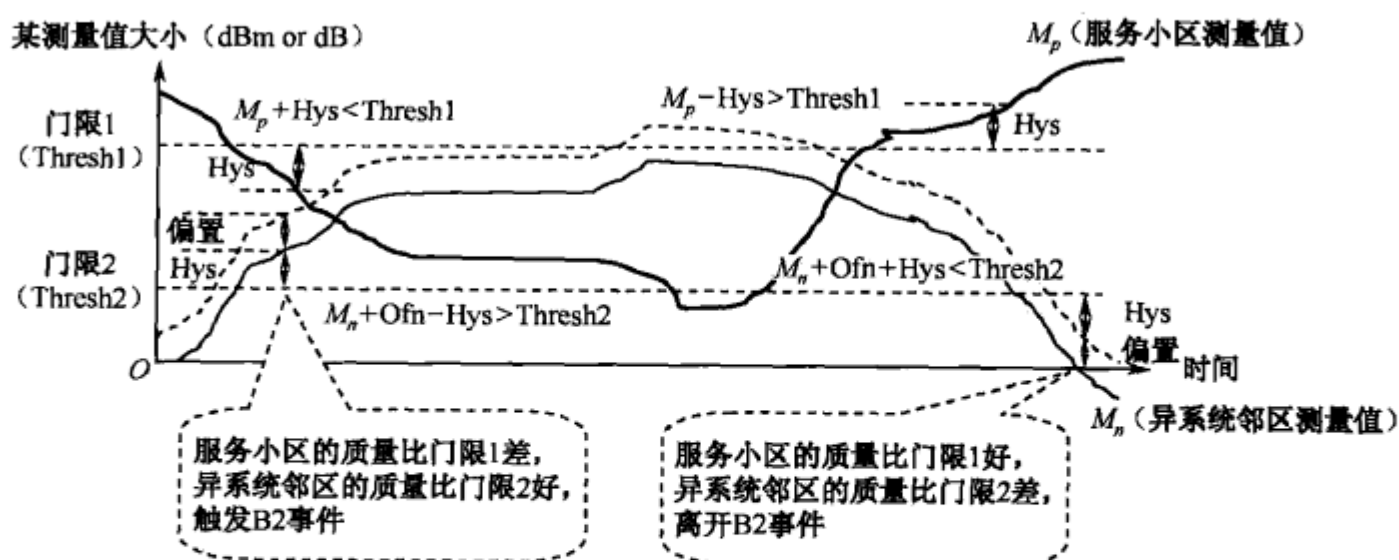


图 10-50 B2 事件

10.8.5 切换流程

从技术实现上来看，切换可分为硬切换、软切换。

硬切换：手机先释放和源小区的业务连接，然后再和新小区建立连接，是一个“释放-建立”的过程；源小区和目的小区之间是一种竞争关系，有你没我。

软切换：手机将会同时和两个或更多的小区建立业务连接，然后比较这些连接的质量好坏，选用一个最好的小区继续保持连接，其余小区释放，是一个“建立—比较—释放”的过程；源小区和目的小区之间是可以共存一段时间的。

在 CDMA 系统中，切换可以是软切换也可以是硬切换；而在 FDMA 和 TDMA 系统中，所有的切换都是硬切换。

LTE 是一种频分多址系统，因此 LTE 的切换也是硬切换：先释放和源小区的连接，再建立和目的小区的连接。

在切换流程之前，是触发切换的流程。前面已经进行了简单的介绍。eNodeB 给 UE 下发了测量控制，UE 给 eNodeB 上报了测量报告。

基于覆盖的同频切换上报的是 A3 事件；基于覆盖的异频切换上报的是 A4 事件；基于覆盖的异系统切换上报的是 B1 事件。

A4、B1 事件上报前，须先触发 A2 事件；当服务小区质量低于一个门限后，触发 A2 事件，UE 开始异频或异系统测量；异频邻区的质量高于一个门限后，上报 A4 事件；异系统邻区的质量高于一个门限后，上报 B1 事件。事件上报后，eNodeB 进行切换判决，根据判决结果，进入相应的切换流程。

切换流程可以简单地分为切换准备 (HandOver Preparation)、切换执行 (HandOver Execution)、切换完成 (HandOver Completion) 三个过程。

(1) 切换准备。

在切换准备过程中，源小区向目的小区申请切换，告知业务信息；目的小区所在的基站进行准入控制（RAC），将准入控制结果告知源小区，源小区通知 UE 切换。如同大学之间推荐博士后一样，源大学向目的大学提出博士后申请，目的大学审核通过后，告知源大学可以报到。

在基站内的两个小区间切换，无须源小区发送切换申请，直接告知源小区切换，如图 10-51 所示。在基站间的两个小区切换，流程交互需要通过基站间的 X2 接口，如图 10-52 所示；在不同 MME 所属的基站的小区切换，流程交互则需要通过基站与 MME 之间的 S1 接口，如图 10-53 所示。

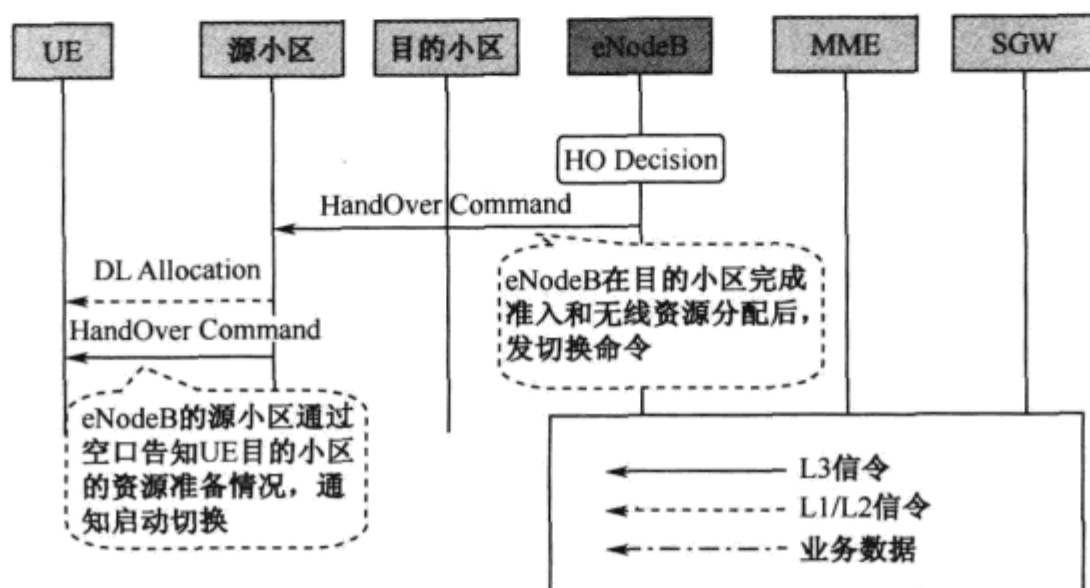


图 10-51 基站内小区间切换准备流程

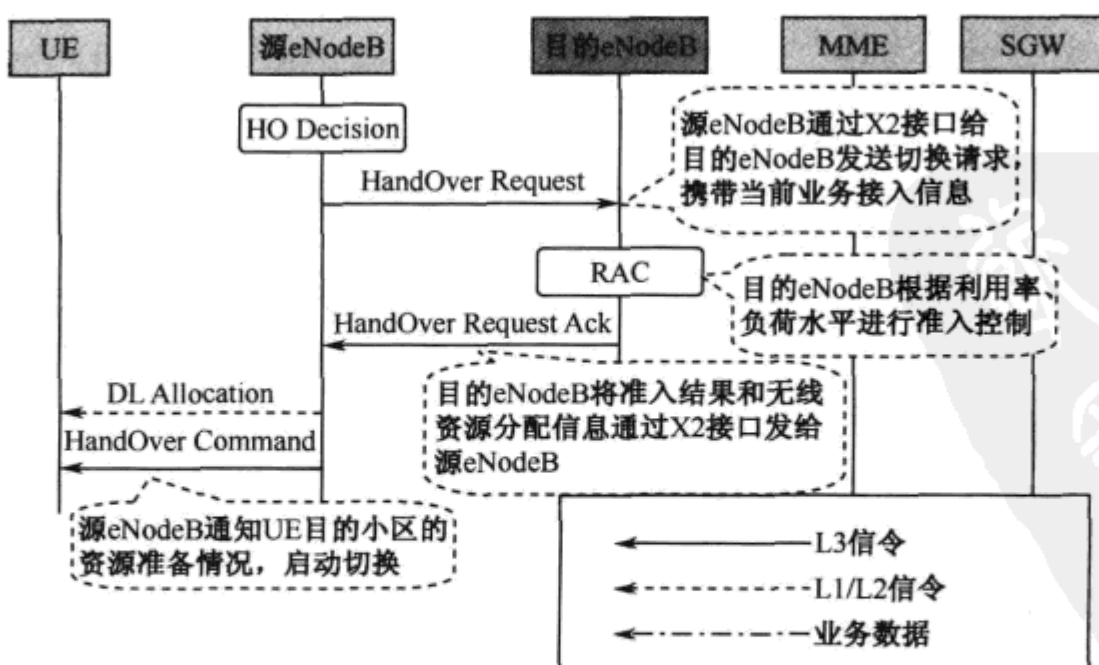


图 10-52 基站间基于 X2 接口的切换准备流程

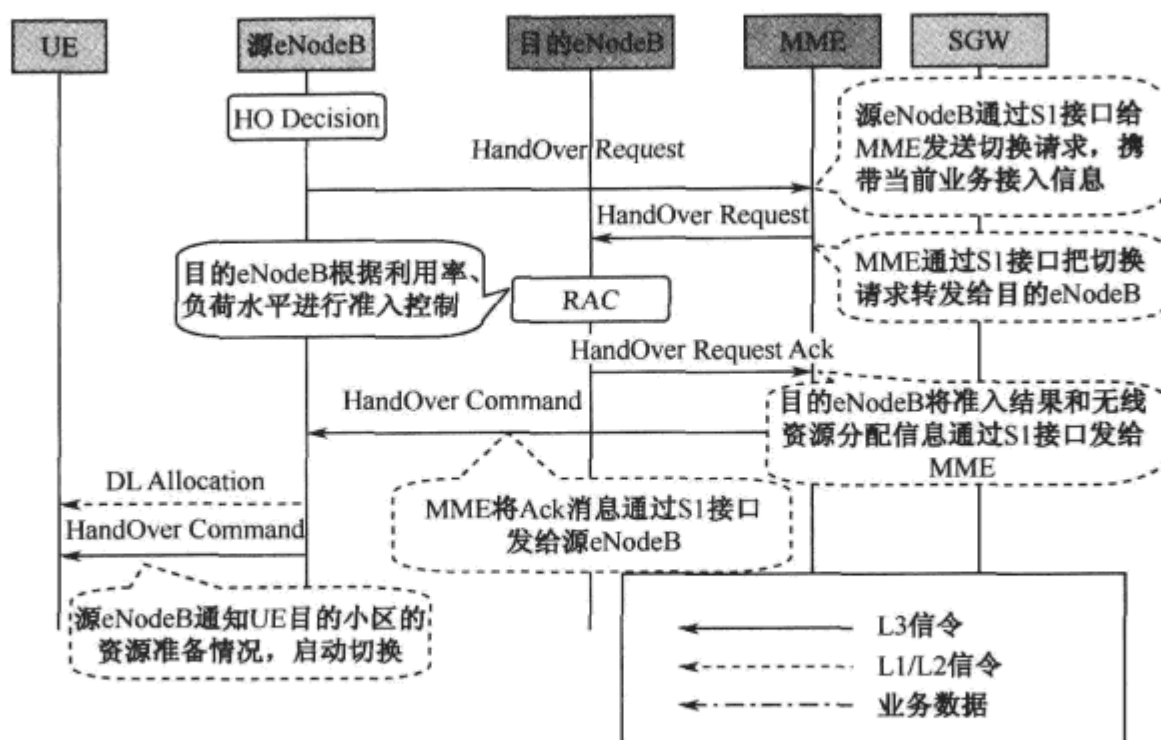


图 10-53 基站间基于 S1 接口的切换准备流程

(2) 切换执行。

在切换执行过程中，主要完成 UE 与源小区断开业务连接，与目的小区建立业务连接。在切换执行过程中，也需要源小区将缓冲数据、数据的系统顺序号（SN）转发给目的小区。

在基站内的两个小区间的切换执行如图 10-54 所示。在基站间的两个小区切换，流程交互需要通过基站间的 X2 接口，如图 10-55 所示；在不同 MME 所属的基站的小区切换，流程交互则需要通过基站与 MME 之间的 S1 接口，如图 10-56 所示。

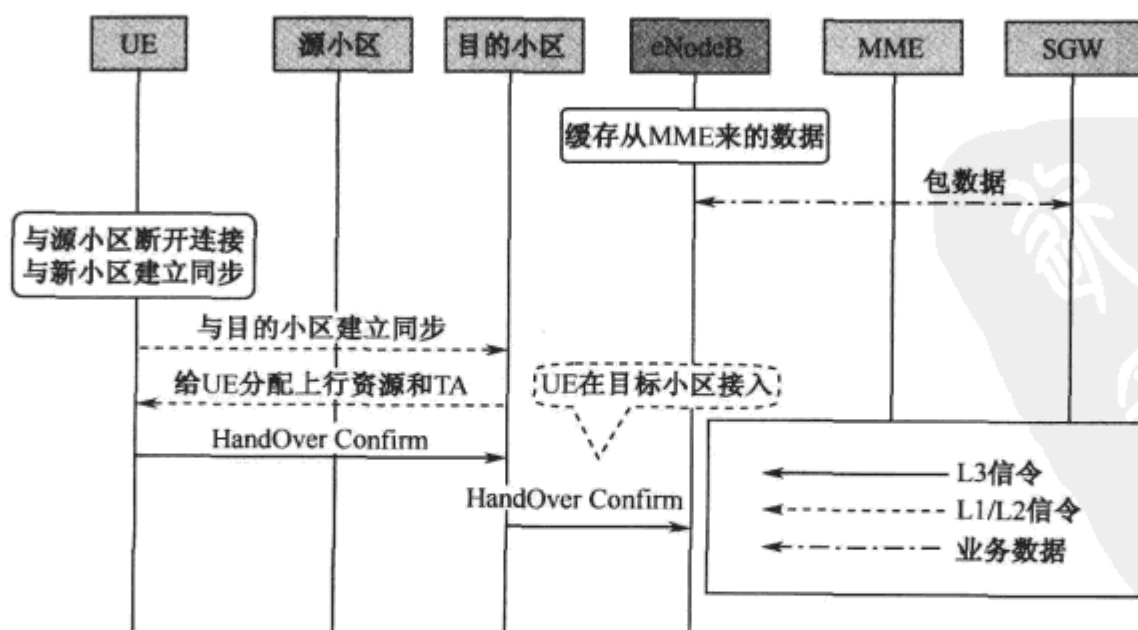


图 10-54 基站内小区切换执行流程

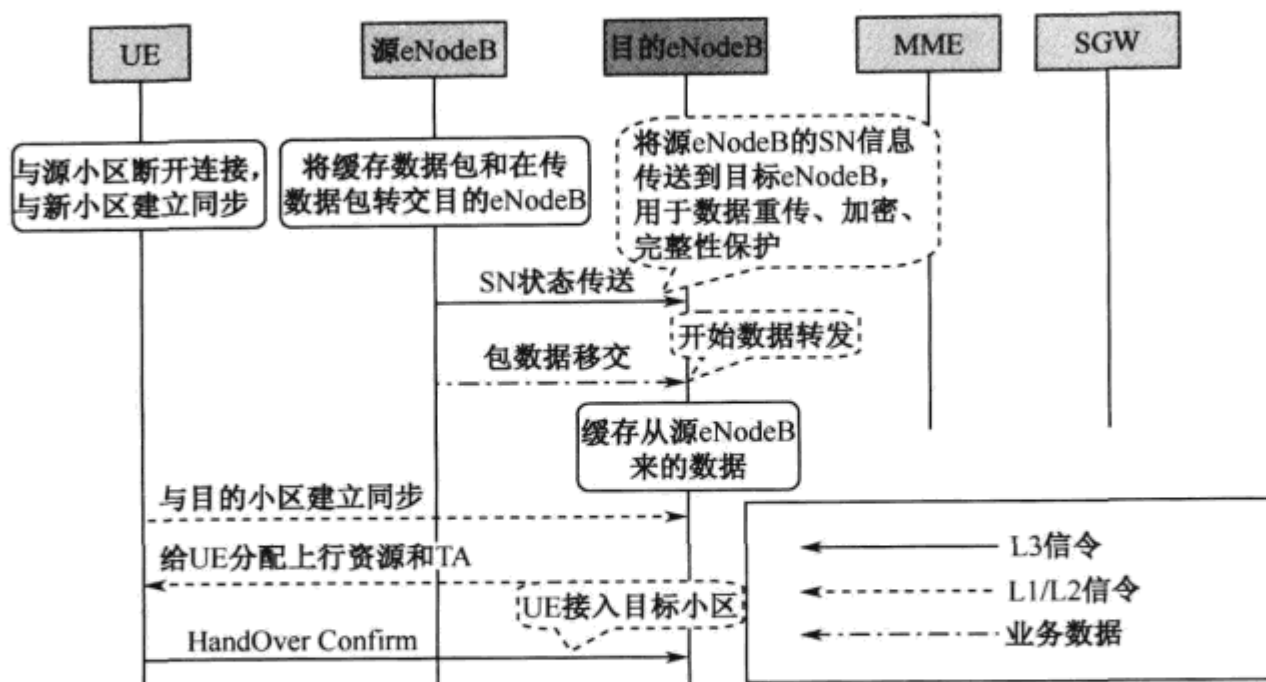


图 10-55 基站间基于 X2 接口的小区切换执行流程

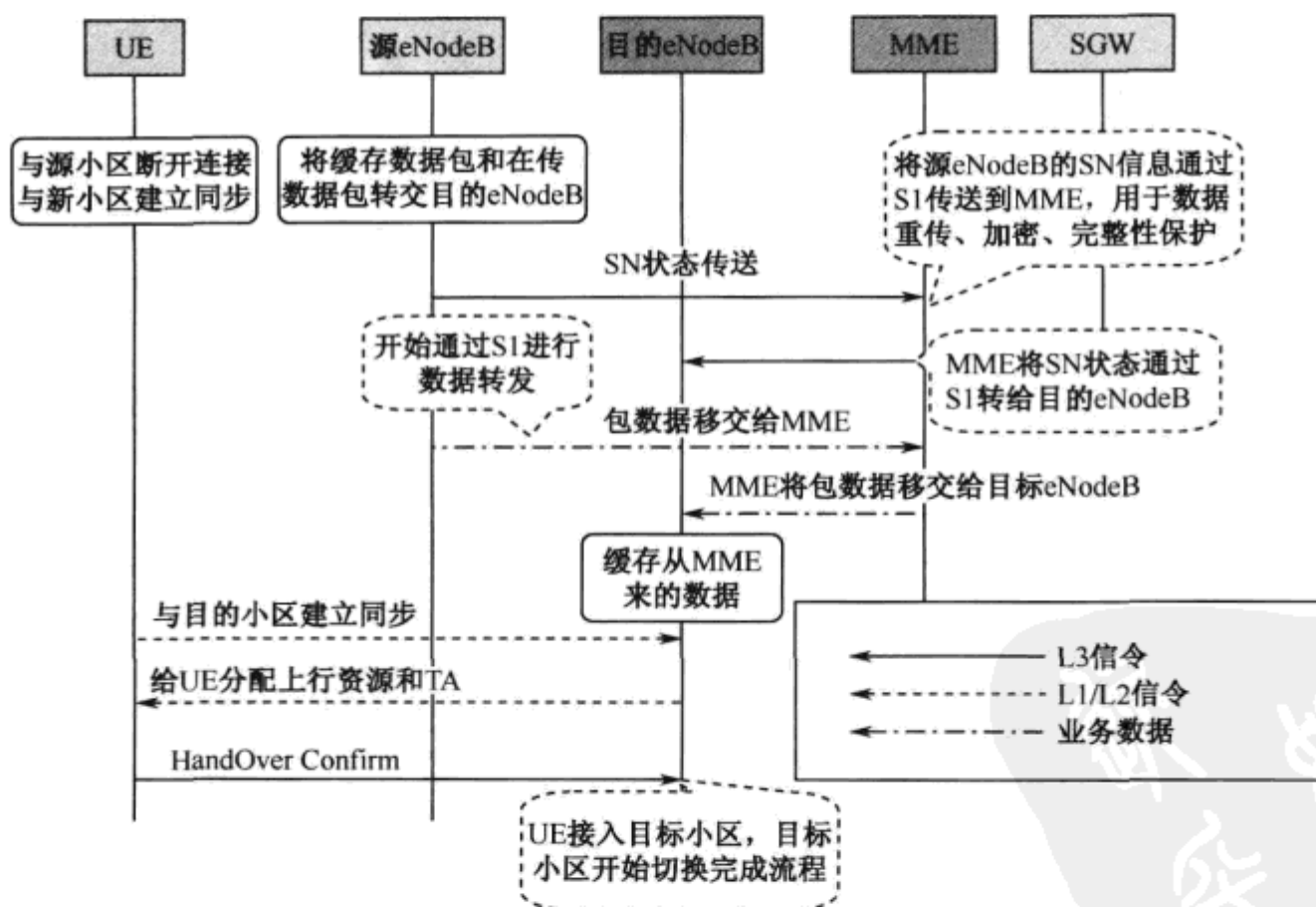


图 10-56 基站间基于 S1 接口的小区切换执行流程

(3) 切换完成。

在切换完成阶段，主要完成目标小区与 SGW 用户平面的切换以及源小区无线资源的彻底释放。

在基站内的两个小区间的切换完成阶段，SGW 与 eNodeB 的路由不变，没有用户平面的切换过程，如图 10-57 所示。在基站间的两个小区切换完成之后，UE 需要重新建立经目标 eNodeB 到 SGW 的数据路由，信令流程交互需要通过基站间的 X2 接口，如图 10-58 所示；在不同 MME 所属的基站的小区切换完成，信令流程交互则需要通过基站与 MME 之间的 S1 接口，如图 10-59 所示。

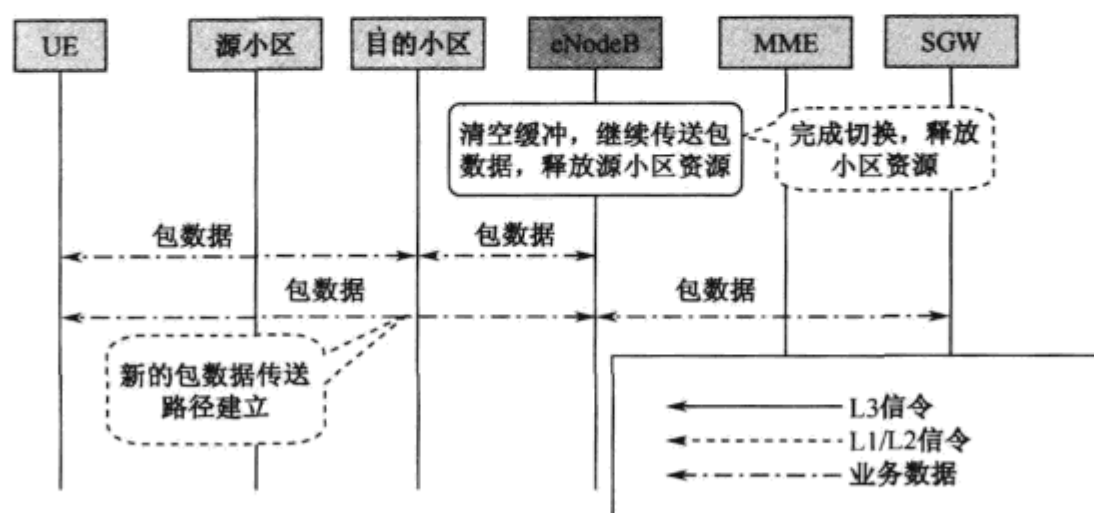


图 10-57 基站内小区切换完成流程

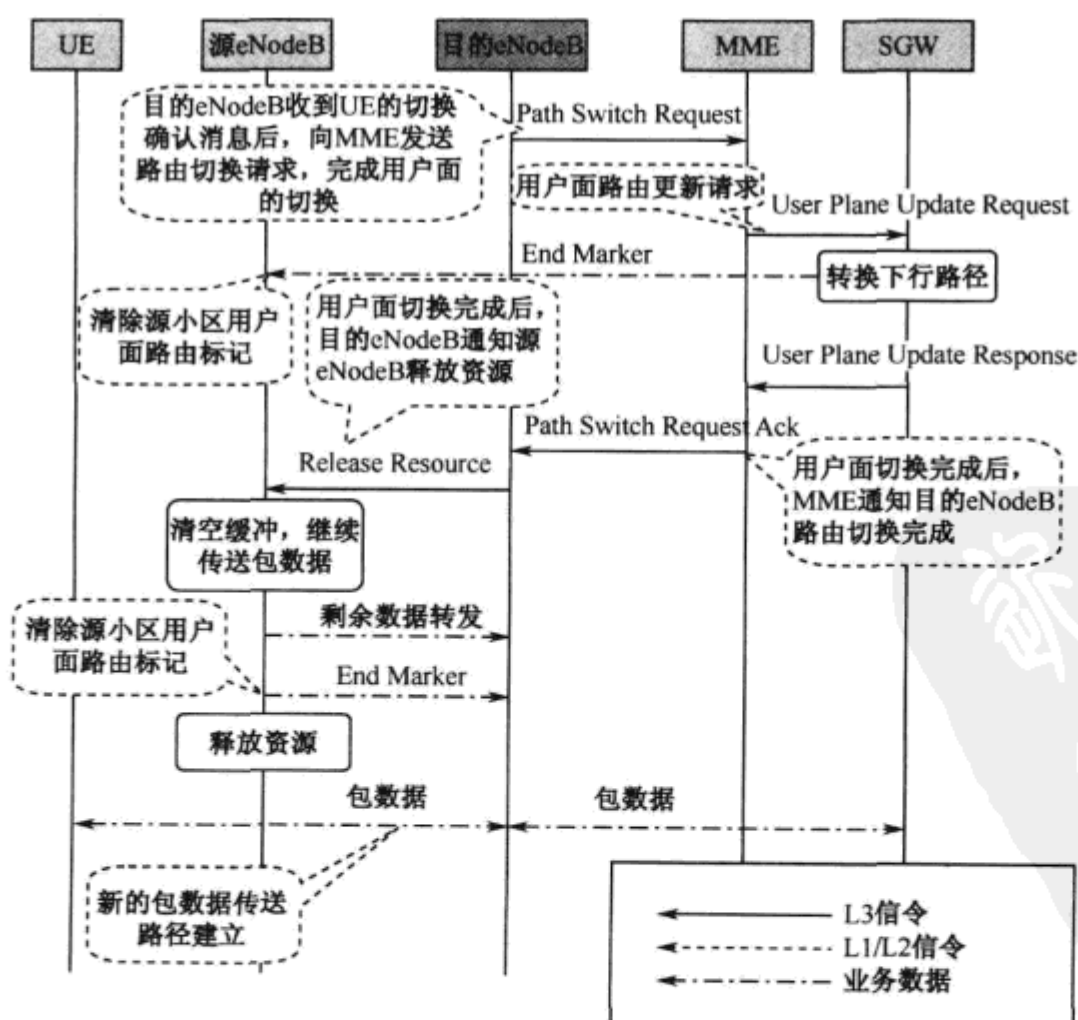


图 10-58 基站间基于 X2 的小区切换完成流程

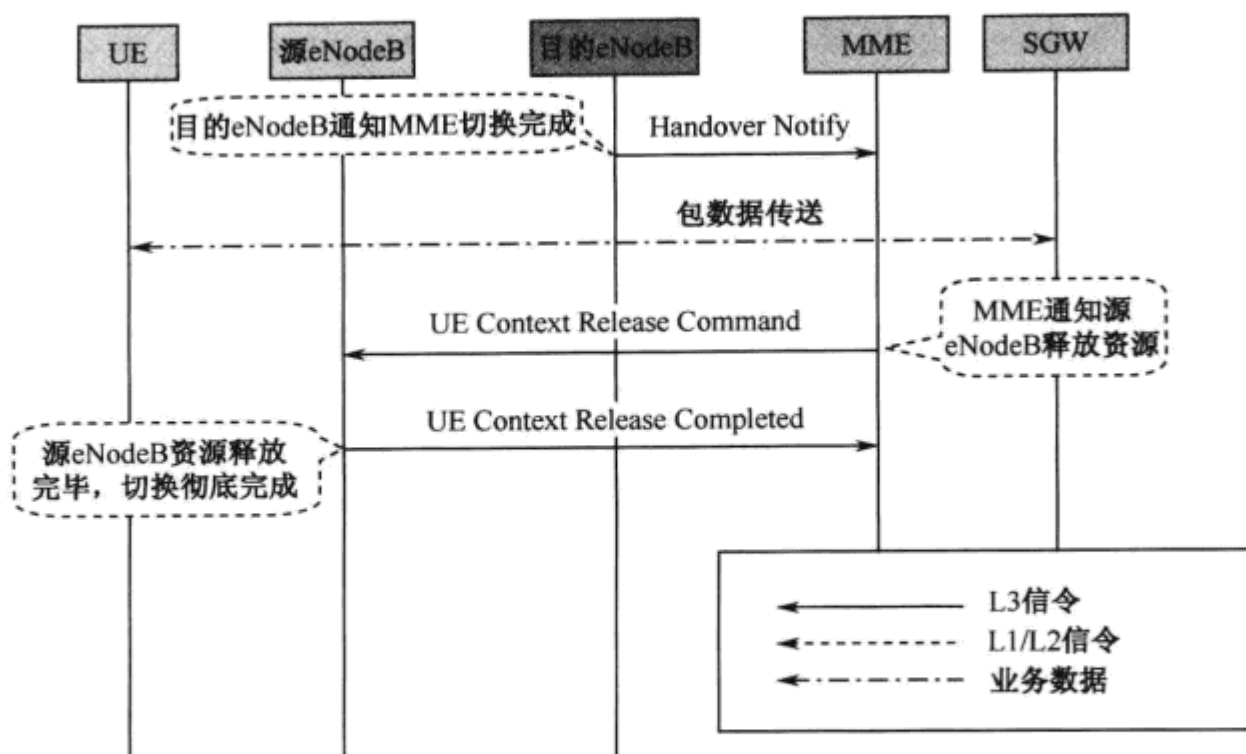


图 10-59 基站间基于 S1 接口小区切换完成流程

10.9 小区间及系统间 RRM (ICR & inter-RAT RRM)

LTE 取消了多基站的控制节点 RNC，采用了网状网的组网结构。由于无线环境的复杂性，小区间的互相干扰不可避免；由于话务分布的不均衡性，小区间的负荷必然大小不一。这就需要多个小区间进行干扰协调和负荷分担。

前面提到的 ICIC、LB 不只是一个小区的事情，需要多小区互相协作处理。也就是说，ICIC、LB 就是小区间 RRM (Inter Cell RRM, ICR) 的重要内容。

LTE/SAE 是支持多制式融合的组网架构。这个融合包括：SAE 支持不同无线制式的接入，实现业务内容共享，以及无线制式之间的互操作。

无线接入技术间的无线资源管理 (inter-RAT RRM) 主要是处理 UE 在不同无线接入技术间移动时所涉及的事务，特别是连接态 UE 在不同 RAT 间切换的支撑。系统间 RRM，实际上是跨系统的 CMC，需要综合考虑不同无线系统的无线资源状况和 UE 的能力，还需要考虑运营商的运营策略。

在 LTE 网络覆盖较差的时候，或小区负荷较重的时候，CMC 模块可能触发 inter-RRM 模块，以便进行基于覆盖和基于负荷的系统之间的切换或重选。

第
三
篇

IT 规划与优化

新华书店
PDC

第 11 章

家园的宏伟规划——LTE 网络规划

知识要点

一个网络需要多少个基站，各基站都放在什么位置，放在这样的位置上网络的性能如何？如何调整工程参数和无线参数，以进一步提升组网性能？答案是，通过覆盖和容量估算确定好网络规模，然后在仿真环境中进一步调整工程参数和无线参数，从而使网络性能达到规划的目标。

以上这些都是无线网络规划的重要工作，当然 LTE 网络规划也不能例外。但由于 LTE 使用了区别于 3G 制式的无线关键技术，使得在规划过程中有一些特殊考虑。

小区参数的规划也是 LTE 网络规划的重要内容，是网络和终端默契配合的重要基础。

“功盖三分国，名成八阵图。”国王非常欣赏诸葛孔明“未出茅庐、已定天下三分”杰出的社会规划才能，勉励接班人奥先生拥有诸葛孔明一样的才能，把三吉皮皮国重新规划好。

三吉皮皮国计划在物流效率方面不但要超越以前的水平，而且要大幅超越爱三易国宣称的水平。为了提高物流效率，三吉皮皮国启动了宏伟的家园重建规划。

家园重建规划的制定有以下四大步骤：

(1) 确定重建目标。

城区可供建设的地方集中在多大的范围内（覆盖需求）？能满足多少居民对新住房的需求（容量需求）？各种房型的比例有多大（业务类型需求）？抗震级别多大（质量需求）？需要什么特殊的政策考虑？根据这些需求，确定合理的目标，在满足人们各种需求的前提下，降低建设成本。

(2) 确定建设规模。

根据确定好的建设目标，确定具体住房的建设数目和标准。

(3) 确定具体位置（工程参数）。

确定每家每户住宅的具体位置、房型。

(4) 确定组织关系 (参数规划)。

确定每家每户属于哪个居委会管理,彼此如何配合。

四大步骤完成后,标识着重建规划的完成,可以开始施工建设了,如图 11-1 所示。每个步骤的确定,并不是简单的数学公式、逻辑推理,而是在多个约束条件下,考虑了诸多现实因素,寻找最优的方案,类似数学里的多目标规划。

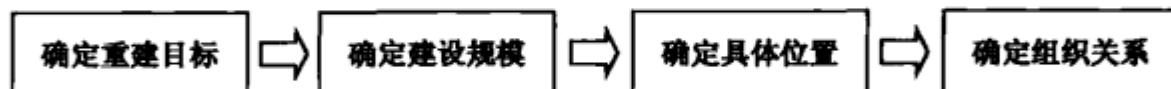


图 11-1 家园重建四大步骤

11.1 LTE 规划的特殊性

无线网络规划就是根据建网目标,确定基站数目及配置;确定站址位置及天线挂高、方向角、下倾角等工程参数;确定信道配置、邻区、频率等无线参数的过程。所有无线制式的规划概莫能外,如图 11-2 所示。有所不同的是,各种无线制式在规划过程中,由于关键技术不同,有不同的特殊考虑而已。

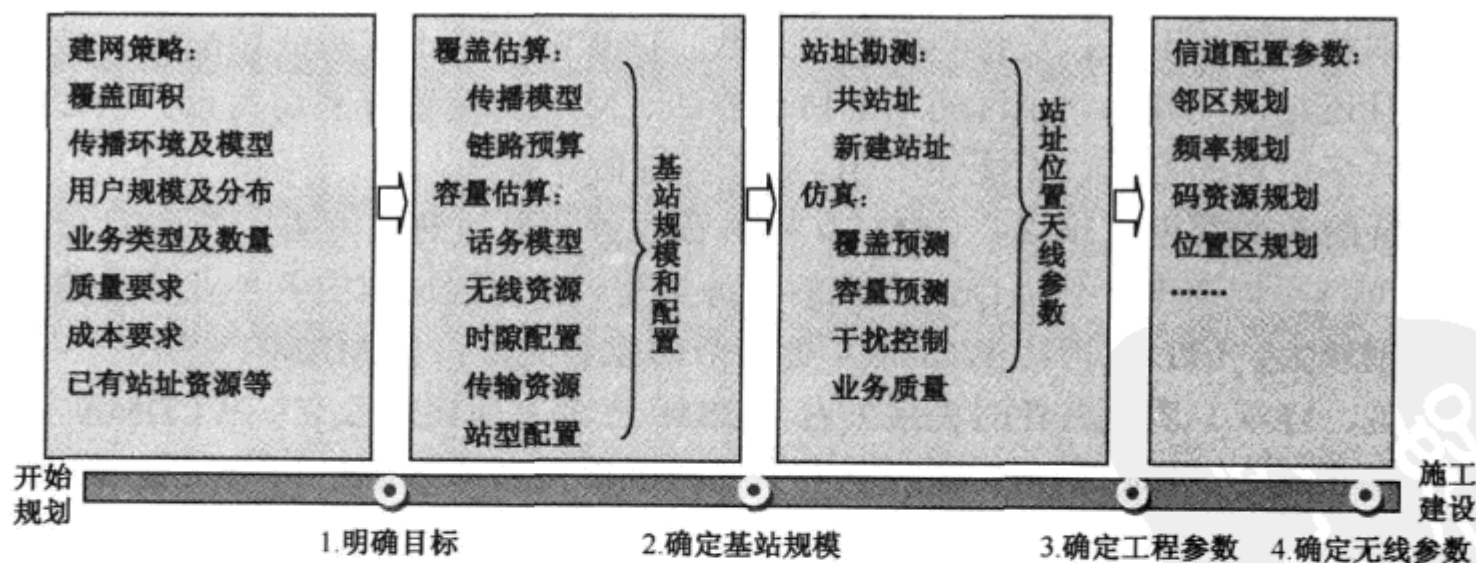


图 11-2 无线网络规划的流程

LTE 的网络规划也遵循着无线网络规划流程的各个步骤。相对于以往的无线制式来说, LTE 在物理层技术、网络结构、调度算法等技术上有很多变革,因此在规划的过程中,也有一些特殊的考虑。

和以往无线制式相比, LTE 更注重高速、大流量的用户需求。一般首选大中城市热

点区域（如密集城区、高新开发区、校园区）、热点场景（如酒店、写字楼、大型场馆）进行覆盖。为了保证用户体验的连续性，应该保证 LTE 在一定区域范围内的连续覆盖。为了保证用户在 LTE 无覆盖区域的业务要求，应该注重 LTE 与其他系统之间的互操作性，避免频繁互操作。

从覆盖规划的角度上分析，GSM、WCDMA 和 LTE 之间也有差别。

GSM 的覆盖能力仅取决于发射端的发射功率和接收端的解调门限。WCDMA 和 LTE 的覆盖能力不仅取决于发射端的发射功率、接收端的解调门限，还取决于系统的负荷状态。系统的负荷越大，覆盖的范围越小，这就是所谓的呼吸效应。LTE 的呼吸效应不如 WCDMA 明显。

LTE 的覆盖能力还取决于对业务边缘速率的要求，边缘速率要求越低，覆盖范围越大。LTE 业务边缘速率和覆盖范围的关系类似 3G HSDPA 的特点。LTE 的覆盖还与 MIMO 配置、CP 配置、子载波数目相关，在进行链路预算的时候，需要考虑这些因素。

从容量规划的角度上来说，GSM 是“硬容量”特性，而 WCDMA 和 LTE 是“软容量”特性。

GSM 在干扰控制满足要求的情况下，系统所支持的用户数可以由时隙数和载频数确定，而 WCDMA 每载波的容量和所处的无线环境、小区内和小区间的干扰情况有很大的关系。

LTE 的每 RB 的容量主要和小区间的干扰情况有关，但系统整体带宽比 WCDMA 增加很多，同时带宽可以灵活配置，使得 LTE 比 WCDMA 支持更大的小区吞吐率，或者是在吞吐率相同的情况下，支持更多的用户数。LTE 的容量不仅与载频配置、带宽配置有关，而且还与调度算法、小区间干扰协调算法、MIMO 配置有密切关系。LTE 的业务信道均为共享信道的方式，不能使用 3G 业务容量估算方法。

从支持的业务类型上来说，GSM 支持语音业务和低速速率业务，质量目标确定；WCDMA 支持不同速率、不同 QoS 要求的业务类型，在规划过程中各种业务的覆盖和容量特性差别较大；LTE 支持比 WCDMA 更复杂的业务类型，如 MBMS 业务。

从覆盖、容量、质量三者的关系来看，GSM 三者之间比较独立；WCDMA 和 LTE 三者之间相互制约、相互影响。覆盖和容量的关系就是呼吸效应，如果负载增加、容量增加、干扰严重，那么覆盖就会缩小；通过功率控制降低业务连接的质量要求，可以增加系统的容量，这就是牺牲质量可换取容量的关系；通过降低边缘区域的业务质量可以增加业务的覆盖。但和 WCDMA 相比，LTE 仅存在小区间干扰，小区内干扰的影响基本可以忽略，这样使得 LTE 三者的关系不如 WCDMA 的密切。

LTE 的规划仿真的输入参数体现了 LTE 的技术特点，如 OFDM 参数配置、MIMO 参数配置、RB 承载参数配置、ICIC 和 DRA 算法的设置等内容。

采用蜂窝组网技术的无线制式都存在是否支持同频组网的问题。GSM 同频干扰对系

统影响较大,不支持同频组网,需通过频率规划确保频率复用距离。WCDMA 采用 CDMA 扩频技术,支持同频组网,不需要频率规划。TD-SCDMA 对同频组网的支持能力较弱,需要频率规划。

LTE 也支持同频组网,频率复用系数为 1。但由于小区间干扰较为严重,LTE 的 1×1 频率复用模式只适合小区中心,不适合小区边缘。小区边缘需要保证同频复用距离,以避免小区间同频干扰。也就是 LTE 的频率规划是中心区域的同频组网和边缘区域的异频组网相结合的方式。鉴于 LTE 是一个同频干扰受限的宽带系统,为保证小区边缘的同频载干比,建议给室内覆盖预留单独的频率资源。

综上所述,和 GSM、WCDMA、TD-SCDMA 相比,LTE 在建网目标、覆盖规划、容量规划、网络仿真、频率规划、参数规划等方面存在较大差异,如表 11-1 所示。

表 11-1 LTE 规划与其他制式的比较

比较项	GSM	WCDMA	TD-SCDMA	LTE
建网目标	广域连续覆盖	连续覆盖	连续覆盖	热点区域连续覆盖
覆盖规划	仅取决于发射端的发射功率和接收端的解调门限	覆盖能力还取决于系统的负荷状态,存在明显的呼吸效应	覆盖能力还取决于系统的负荷状态,和 WCDMA 相比,呼吸效应不明显	LTE 的覆盖能力还取决于负荷的状态,但呼吸效应不明显;覆盖能力还和对业务边缘速率的要求、MIMO 配置、CP 配置、子载波数目相关
容量规划	系统所支持的用户数可以由时隙数和载频数确定,具有“硬容量”特性	自干扰软容量特性,容量受干扰影响较大,包括小区内和小区间的干扰	自干扰软容量特性,容量受时隙配置、干扰影响较大,主要是小区间的干扰	每 RB 的容量主要和小区间的干扰情况有关;系统整体带宽最大为 20MHz,可灵活配置。LTE 的容量不仅与载频配置、带宽配置有关,而且还与调度算法、小区间干扰协调算法、MIMO 配置有密切关系。LTE 的业务信道均为共享信道的方式,不能使用 3G 业务容量估算的方法
业务类型	支持语音业务和低速速率业务,质量目标确定	支持不同速率、不同 QoS 要求的业务类型;在规划过程中,各种业务的覆盖和容量特性差别较大	支持不同速率、不同 QoS 要求的业务类型。在规划过程中各种业务的覆盖和容量特性差别较大	LTE 支持比 WCDMA 更复杂的业务类型,如 MBMS 业务
规划仿真	体现覆盖、容量、质量三者相互独立的特性	体现覆盖、容量、质量三者相互影响的特性	体现覆盖、容量、质量三者相互影响的特性。同时体现了 TD-SCDMA 智能天线,上、下行时隙灵活配比,多用户检测等特点	输入参数体现了 LTE 的技术特点,OFDM 参数配置、MIMO 参数配置、RB 承载参数配置、ICIC 和 DRA 算法的设置

续表

比较项	GSM	WCDMA	TD-SCDMA	LTE
建网目标	广域连续覆盖	连续覆盖	连续覆盖	热点区域连续覆盖
频率规划	异频组网, 需要根据网络现状进行频率规划; 当网络结构变化时, 需要进行频率重整	支持同频组网, 不需要频率规划	同频组网性能较低, 需要频率规划	中心区域的同频组网、边缘区域的异频组网; 中心区域不需要频率规划, 边缘区域需要频率规划

11.2 LTE 覆盖估算

覆盖估算的目的是从覆盖的角度计算所需基站的数目。最根本的计算思路是规划覆盖面积与单基站的覆盖面积之比, 如下式所示:

$$\text{基站数目} = \frac{\text{规划覆盖面积}}{\text{单基站的覆盖面积}} \quad (11-1)$$

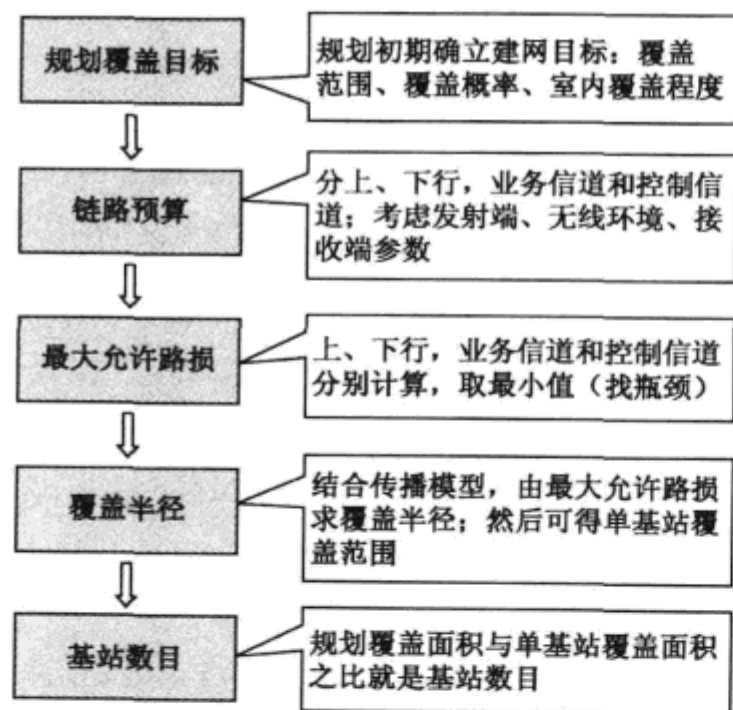


图 11-3 覆盖估算的基本流程

由于业务信道、共享信道的调制方式、编码方式、资源占用数目等因素的不同, 也有可能

导致覆盖范围的不同, 也需要分别进行链路预算。

根据链路预算, 选择最大允许路损计算结果中的最小值, 就是计算基站覆盖半径的输入。

覆盖估算的基本流程如图 11-3 所示。

在规划初期确立建网目标时, 规划覆盖目标是热点区域覆盖, 还是城区范围内连续覆盖, 规划覆盖面积是多少就已经确定。现在的问题是单基站覆盖面积如何确定。

链路预算就是根据发射端天线口功率、接收端最小接收电平, 来考虑无线环境的各种影响因素并计算最大允许路损的过程。

覆盖估算讲究两个平衡:

- (1) 上、下行覆盖的平衡;
- (2) 业务信道和控制信道覆盖的平衡。

由于基站和手机的发射功率不同, 最小接收电平也不同, 上、下行的覆盖能力可能有较大的差别, 需要分别进行链路预算, 找出覆盖受限的短板。

传播模型描述了路损和距离的关系。也就是说，最大允许路损（MAPL）对应的就是最大覆盖距离。在实际的无线环境中，传播模型要进行必要的系数校正，使其更加符合实际的传播环境。现在常用的传播模型为 COST231-Hata 模型。

最大覆盖距离相当于基站的覆盖半径。按照标准的蜂窝结构（正六边形），可以计算出单基站的覆盖面积。

根据规划面积与单基站覆盖面积之比，便可以求出满足覆盖要求的基站数目。

11.2.1 LTE 覆盖能力的影响因素

在 WCDMA 和 TD-SCDMA 的 3GPP R4 版本之前，不同的业务通过功率控制，尽量维持其额定的速率，即“动态的功率、额定的速率”。当小区边缘的覆盖电平太低，使得信噪比低于一定程度，且不满足该业务的解调门限时，该业务则无法继续。也就是说，不同的业务有不同的覆盖范围。

在 LTE 里，由于采用 AMC（自适应编码调制）技术，功率可以不变，业务速率是可变的；当覆盖电平不足以支撑较高的业务速率时，通过降低速率，业务还可以继续，即不同的速率有不同的解调门限要求。降低速率要求，可以增加覆盖范围。其实，这一点和 3GPP R5 版本的 HSDPA 技术是相同的。

LTE 的覆盖能力应该是满足一定业务速率要求的最大覆盖范围。也就是说，要说 LTE 的一个小区覆盖多大范围，必须指出满足多大的边缘速率要求。

在一定业务速率要求下，LTE 的覆盖能力还和基站的发射功率、选用的载波频率及带宽、多天线方式、RB 资源占用情况、RRM 算法的选用、帧结构等因素有关，如图 11-4 所示。发射功率由每个 RE 进行均分，可以应对灵活的资源分配和发射。

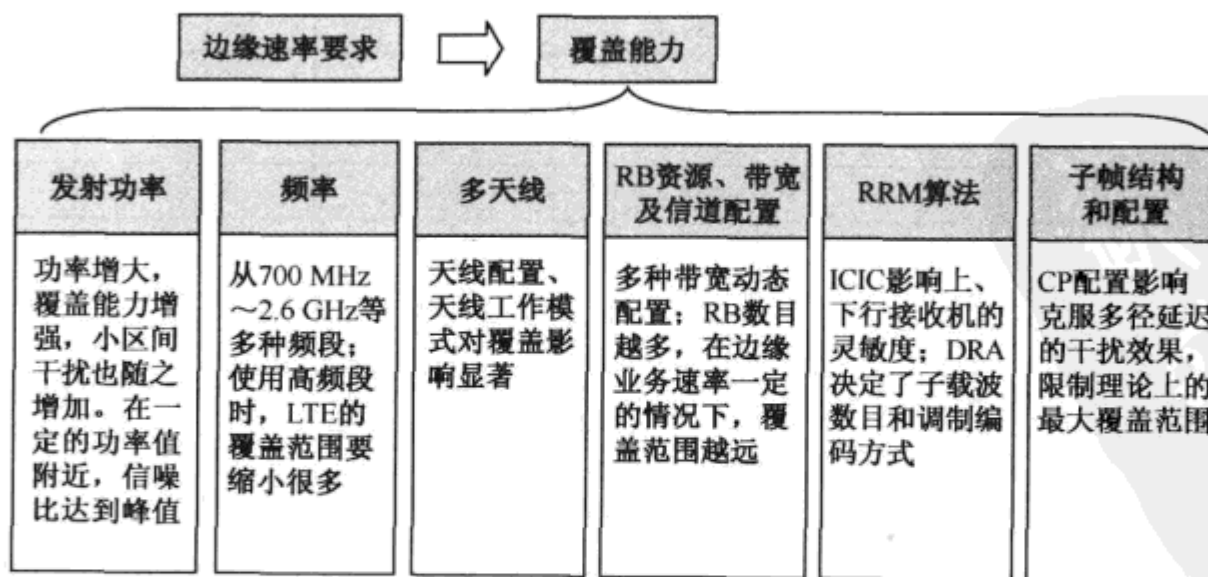


图 11-4 LTE 覆盖能力的影响因素

发送功率对覆盖的影响是一把“双刃剑”。一方面，基站发射功率的增大，会使覆盖能力增强；另一方面，基站发射功率的增大，会导致小区间干扰的迅速增加。

也就是说，功率不是越大越好，要看功率的增加，信噪比是否相应增加。功率大到一定程度，干扰的增加会导致信噪比的恶化，于是频谱效率开始下降，如图 11-5 所示。在一定功率值附近，信噪比和频谱效率达到峰值。

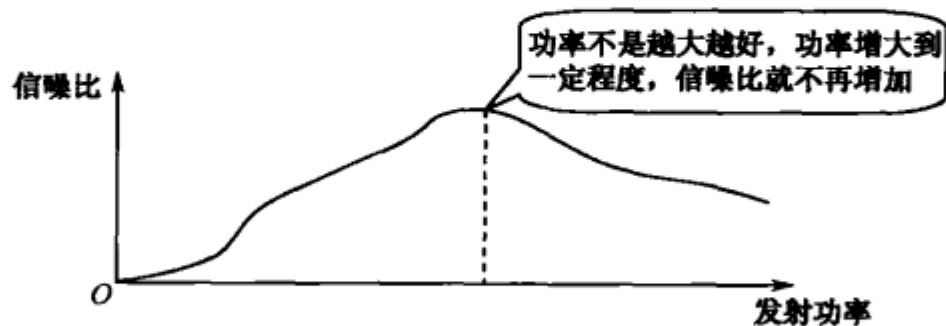


图 11-5 发射功率和信噪比的关系

实际设备功率取值一定要在覆盖能力、频谱效率、设备成本与体积方面综合权衡。

基站的下行发射功率和 UE 的上行覆盖能力是不一样的，因此上、下行的覆盖水平可能不一致。

LTE 支持从 700 MHz~2.6 GHz 等多种频段。高频段的传播损耗、穿透损耗比低频段的要大 10 dB 左右。所以使用高频段时，LTE 的覆盖范围要缩小很多。表 11-2 是自由空间传播模型下，不同频率的路径损耗的对比。

表 11-2 不同频率的自由空间损耗 (dB)

f (MHz)	1 (m)	10 (m)	100 (m)	200 (m)	400 (m)	1 000 (m)
700	29.37	49.37	69.37	75.37	81.37	89.37
900	31.55	51.55	71.55	77.55	83.55	91.55
1 800	37.55	57.55	77.55	83.55	89.55	97.55
2 000	38.45	58.45	78.45	84.45	90.45	98.45
2 400	40.05	60.05	80.05	86.05	92.05	100.05
2 600	40.75	60.75	80.75	86.75	92.75	100.75

多天线技术如何选用、是否开启对覆盖有比较大的影响。通常来说，天线数目配置越多，覆盖范围越大，分集模式比复用模式覆盖范围大。也就是说，天线配置、天线工作模式对覆盖影响显著。

对于上行链路来说，基站侧天线数增加，体现为接收分集增益能力的提升。

对于下行链路来说，发射分集时，4 天线、8 天线比 2 天线的增益稍高；采用波束赋

型时，8天线比2天线高6 dB左右的增益。采用波束赋型后，小区边缘频谱效率比采用发射分集时有明显提升。基于波束赋型的天线工作方式，在下行方向，既提供了赋型增益，又提供了分集增益。而在发射分集模式的时候，没有赋型增益的效果。

LTE支持1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz等多种带宽的动态配置。

一方面，用户占用的载波资源越多，接收机底噪越大，对覆盖有收缩效果；另一方面，业务信道占用的子载波数目越多，在边缘业务速率要求一定的情况下，支持的覆盖距离就越大。

业务信道由专用信道变为共享信道后，不同用户的RB资源占用不同，覆盖范围也不一样。资源占用越多，意味着带宽增大，覆盖范围的变化需分析噪声上升和解调门限要求降低两个趋势中那个占据优势。

LTE需根据信道环境、业务速率需求及QoS要求来选择合适的业务信道资源配置方式。单用户带宽过大，接入用户数就会减少，所以单用户子载波数目的调度需要兼顾总体接入用户的规模。LTE增加了64QAM高阶调制方式，高阶调制的解调门限也增加了，因此高阶调制的覆盖范围相对其他方式来说会有所缩小。降低业务速率需求、降低调制/解调等级，降低信噪比、降低QoS要求，可提高覆盖范围。

控制信道（PDCCH、PUCCH、PRACH等）的资源配置的方式不同，覆盖能力也就不同。如PDCCH的DCI格式等效编码率不同，PUCCH的CQI的反馈模式、PRACH的不同格式配置、不同循环移位参数配置都影响其能够获得的解调门限。解调门限要求过高，覆盖范围则相应缩小。

对覆盖有影响的RRM算法主要是ICIC模块、DRA模块。小区间干扰的存在会导致接收机底噪的抬升，从而降低接收机灵敏度。因此ICIC模块的使用效果通过影响上、下行接收机的灵敏度，而影响了覆盖范围。动态资源调度DRA决定了用户使用的子载波数目和调制编码方式，从而影响了覆盖范围。

CP配置影响克服多径延迟带来的干扰效果，限制了理论上最大的覆盖范围，和实际覆盖能力没有太直接的关系。在密集城区，多径环境比较复杂的条件下，常规CP（Normal CP）配置适用于1.5 km以内的覆盖范围，扩展CP（Extend CP）适用于5 km以内的覆盖范围。

11.2.2 链路预算

从11.2.1节的内容分析可知，和3G的主要制式相比，LTE链路预算的考虑因素复杂了很多，主要差别在于信道带宽可灵活配置，但计算思路并没有根本的变化。

影响LTE链路预算结果的特殊因素包括：业务边缘速率需求（边缘MCS）、系统带

宽资源配置（边缘 RB 配置）、TD-LTE 的上、下行时隙配比、天线配置、不同信道的接收机解调门限、不同 ICIC 算法对应的干扰余量等，这些因素都是 LTE 链路预算工具的输入参数，在链路预算开始须结合实际情况确定下来。

在上、下行链路预算过程中，涉及的相关参数如图 11-6 所示。

LTE 链路预算的关键步骤如图 11-7 所示。在实际工作中，链路预算是通过相关工具一步一步完成的，我们只需要关注每个步骤的相应的输入和输出便可。

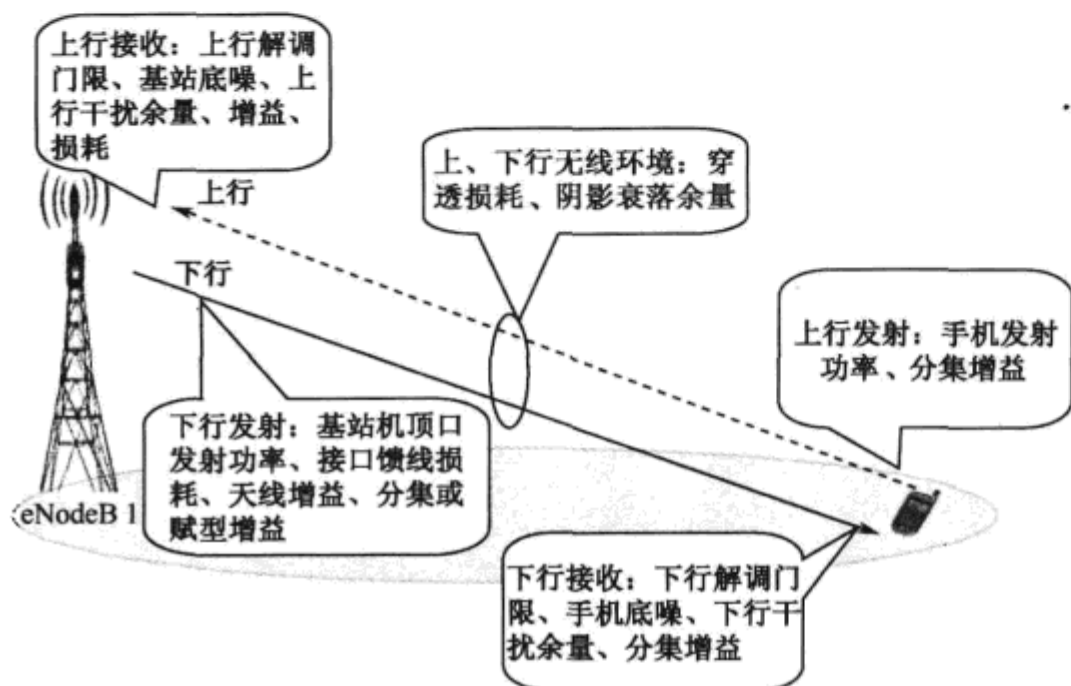


图 11-6 LTE 链路预算简图

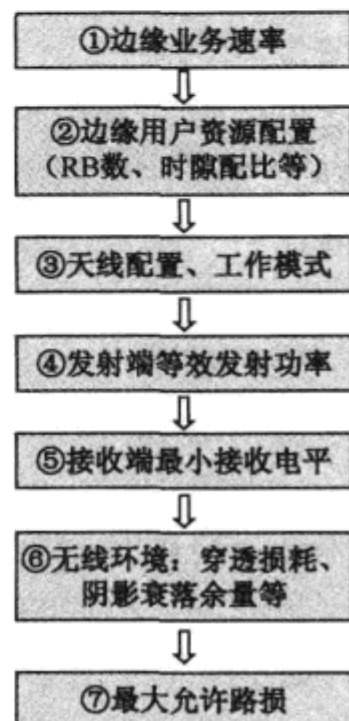


图 11-7 LTE 链路预算的关键步骤

第一步：输入边缘业务速率。

3GPP 协议定义了会话类、交互类、流类、背景类四类业务，并且规定了各类业务的典型应用及 QoS 要求。LTE 网络首先应该满足这些需求。随着移动互联网业务的迅猛发展，传统有线宽带业务和移动网络呈现快速结合的态势，LTE 网络预计在 3GPP 定义上述业务之外还会承载更多的高带宽业务，如视频监控业务、手机电视、高速上网等业务。LTE 的边缘覆盖业务速率，在空载时，链路预算的参考输入值可为下行 1 Mbps 左右，上行 250 kbps 左右。

第二步：配置边缘用户资源，包括 RB 资源，上、下行时隙配比。

边缘用户带宽配置和动态调度算法直接相关，也和小区支撑的用户总数有关。在 10 MHz 带宽的 LTE 系统中，采用部分公平的调度算法，每小区用户数为 10 个的情况下，用户占用的 RB 数为 5~10（参考值）个。

TD-LTE 中支持上、下行时隙灵活配置。对于同频组网，由于交叉时隙干扰问题，

一般采用全网统一上、下行时隙配置；对于异频组网，在邻频干扰较低的情况下，不同小区之间可实现不同的上、下行时隙配置。

链路预算时，上、下行时隙配置应该根据不同的应用场景和上、下行业务流量配比需求确定。常用的时隙配比 DL:UL 取值为 3:2。不同的特殊时隙 DwPTS、GP、UpPTS 的长度采用序号为 7 的配置，即为 10:2:2。

第三步：确定天线配置、天线工作模式。

在链路预算中，在现有的技术条件下，天线的配置可以是 1×2、2×2、2×4、4×4 等。选择天线的工作模式，对于边缘用户来说，一般选取发射分集或波束赋型。选定了天线配置和天线的工作模式，一般的链路预算工具就会关联出相应的天线增益。

第四步：计算发射端 EIRP。

发射端的等效发射功率（Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP）是机顶口发射功率减去相关损耗并加上天线增益。在 LTE 里，由于是多用户共享载波资源，因而单用户天线口功率还须考虑用户功率的分配损耗。

在下行方向，在系统带宽为 20 MHz 情况下，单天线机顶口发射功率参考取值为 43 dBm。每个 UE 分配的具体功率是和 UE 分配的 RB 数目相关。UE 分配的功率比例就是该 UE RB 数目和总 RB 数目之比。假若有 10 个用户，用户的功率分配损耗为 10 dB。在上行方向，终端发射总功率可取 23 dBm。

在下行方向，主要的损耗为接头和馈线损耗，对于 BBU+RRU，这个损耗参考取值为 0.5~1 dB 之间。上行方向主要考虑的是人体损耗，对于语音业务，损耗值为 3 dB；对于数据业务移动台，可以不考虑人体损耗影响，即取 0 dB。

对于下行天线增益，不同的天线类型取值不同。室外高增益天线参考取值是 15~20 dBi；室内分布式天线的天线增益参考取值为 3~6 dBi。边缘用户的天线工作模式不同，带来的额外增益也不同，需要考虑相应的多天线分集增益、波束赋型增益。天线配置为 2×2 时，对于分集增益或波束赋型增益，一般取 2~3 dB 即可。TD-LTE 边缘一般采用波束赋型的天线工作模式，在下行方向，基站为 8 天线，取 7 dB；在上行方向，终端为 2 天线时，取 3 dB；单天线时，取 0 dB。

发射端等效发射功率计算如表 11-3 所示。具体规划时，取值与 LTE 的相关配置及无线环境相关，可能会有很大差别，但计算方法相似。

第五步：计算接收端最小接收电平。

接收端最小接收电平（dBm）是接收端解调门限加系统底噪、干扰余量、相关损耗，然后减去相关增益所得的值。

表 11-3 发射端等效发射功率计算示例

方 向	机顶口发射功率 (dBm)	损耗 (dB)	天线增益 (dBi)	分集增益或赋型增益 (dB)	功率分配损耗 (dB) (10 个用户)	EIRP (dBm)
下行	43	0.5	15	2	10	49.5
上行	23	0	0	2	0	25

接收端的解调门限，即接收端的信噪比最低要求，与边缘用户的业务速率要求（调制编码 MCS 要求、RB 数目）强相关。根据边缘速率，推导出传输块数量（TB）。在协议 TS36.213 中，由于 TB 块数量和 RB 数量、调制/解调方式 MCS 存在对应的关系，于是边缘速率要求就变为对 MCS 的要求。

根据链路仿真可以得出 MCS 和最低信噪比要求的对应关系，于是接收端的解调门限（dB）也就确定了。

系统底噪是热噪声功率谱密度与 UE 所分配带宽的乘积，再加上接收机的噪声系数。基站侧的接收机噪声系数，其参考取值为 2~3 dB；终端侧的接收机噪声系数，其参考取值为 7~9 dB。

热噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz，假若系统宽带为 10 MHz，每用户分配 1 MHz，那么下行手机侧接收端的底噪为

$$-174 \text{ dBm/Hz} + 10\lg(10^6) + 7 = -107(\text{dBm})$$

上行基站侧接收端的底噪为

$$-174 \text{ dBm/Hz} + 10\lg(10^6) + 2 = -112(\text{dBm})$$

干扰余量可分为上行干扰余量和下行干扰余量。不同的无线环境，不同的组网结构，不同的负载状态，不同的干扰抑制算法，差别较大，需要通过仿真平台确定。

接收端最小接收电平的计算如表 11-4 所示。具体规划工作时，取值与 LTE 的相关配置及无线环境相关，可能有很大差别，但计算方法相似。

表 11-4 接收端最小接收电平的计算

方 向	系统底噪 (dBm)	最小信噪比要求 (dB)	干扰余量 (dB)	损耗 (dB)	增益 (dB)	天线口最小接收电平 (dBm)
下行	-107	-6	8	0	2	-107
上行	-112	-6	8	0.5	18	-127.5

第六步：考虑无线环境，主要是穿透损耗和阴影衰落余量。

无线环境千差万别，穿透损耗和阴影衰落余量的取值差别也较大。在城区条件下，建筑物穿透损耗的典型值可取为 15~20 dB；考虑到 8 dB 的阴影衰落标准差，95%的区

域覆盖率对应的阴影余量为 8.3 dB。

第七步：计算最大允许路损。

最大允许路损是发射端天线口等效功率减去接收端最小接收电平，再减去穿透损耗和阴影衰落余量。计算过程如表 11-5 所示，这是一个上行覆盖受限的例子。

表 11-5 最大允许路损计算

方 向	发射端等效发射功率 (dBm)	接收端最小接收电平 (dBm)	穿透损耗 (dB)	阴影衰落余量 (dB)	最大允许路损 (dB)
下行	49.5	-107	15	8.3	133.2
上行	25	-127.5	15	8.3	129.2

11.3 LTE 容量估算

容量估算是通过计算满足一定话务需求所需要的无线资源数目，进而计算出所需要的载波配置、基站数目。

容量估算和覆盖估算的目标有些区别：容量估算是从话务需求得出载波配置、基站数目；覆盖估算仅从覆盖需求得出基站数目，得不出载波配置。

容量受限满足覆盖需求绰绰有余，满足容量需求紧紧巴巴，最终估算结果以容量估算所得的基站数目为准；覆盖受限则相反，满足容量需求绰绰有余，满足覆盖需求紧紧巴巴，最终估算结果以覆盖估算所得的基站数目为准。

话务需求，即话务模型，包括以下两个方面：

(1) 用户行为。

用户行为是指用户数量、用户的地理分布、用户的业务使用习惯。

(2) 业务特征。

业务特征指的是单位业务占用的上、下行无线资源的大小、时间，业务的 QoS 服务要求等内容。

业务占用无线资源的方式有专用制和共享制两种模式。

在专用方式的情况下，用户使用某一业务占用的无线资源数量是固定的，不随无线环境的变化而变化；GSM、3GPP R4 的业务资源占用就是采用这种方式。

在共享方式下，多用户的业务共同占用无线资源。一个业务占用的无线资源数目可以随无线环境的变化而变化。一个用户占用的资源少了，其他用户就可以多申请一些。无线资源的动态调度可最大程度地提高资源的利用效率。HSDPA、LTE 的业务资源占用就是这种方式。

容量估算的三要素：话务模型、无线资源、资源占用方式，如图 11-8 所示。也就是说，容量估算是在一定的话务模型下，按照一定的资源占用方式，求取无线资源占用数量的过程，以满足一定的容量能力指标。

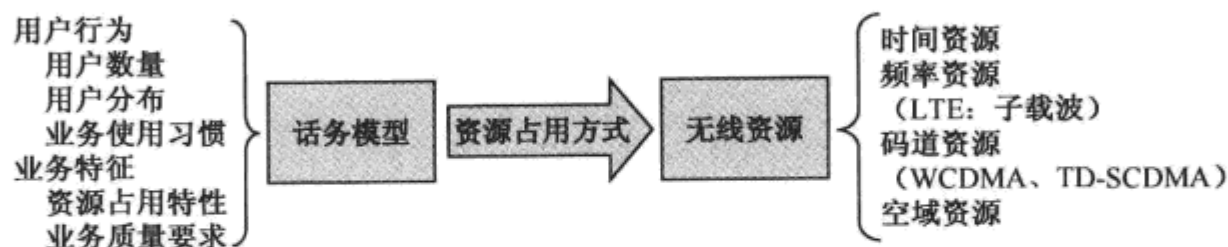


图 11-8 容量估算三要素

11.3.1 LTE 容量能力的影响因素

衡量无线系统的容量能力有两个维度：吞吐率和用户数，如图 11-9 所示。这二者之间相互影响、相互制约。

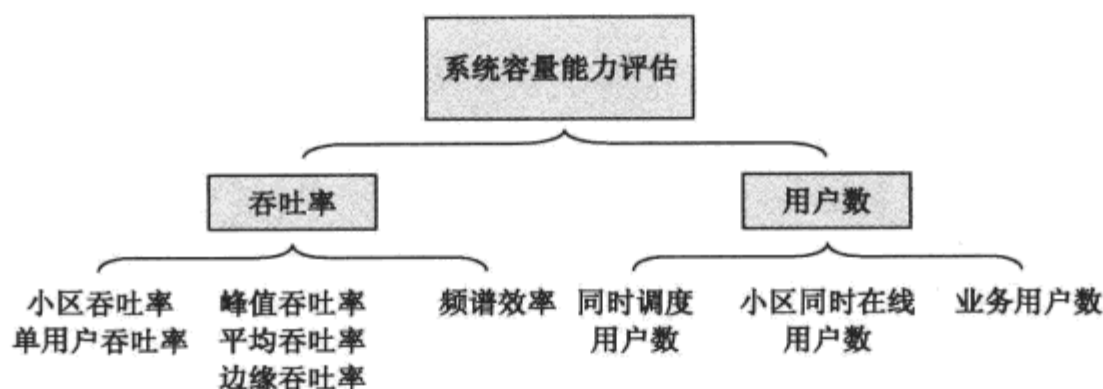


图 11-9 容量能力评估

吞吐率有多种：小区吞吐率、单用户吞吐率、峰值吞吐率、平均吞吐率、边缘吞吐率、理论峰值速率、实测峰值速率等。频谱效率指的是单位频率的吞吐率大小，也可以表征系统的容量能力。

用户数也有多种：支持某种业务的最大用户数、小区同时在线用户数（激活状态，但不一定传数据的用户）、同时调度用户数（某一时刻参与资源分配的用户）。

吞吐率和用户数是对系统的容量能力两个不同方面的度量。吞吐率是受业务信道资源的影响，标识着系统业务面的容量能力；用户数是受控制信道资源的影响，标识着系统控制面的容量能力。

LTE 的容量能力也表现为吞吐率和用户数两个维度。

理论峰值速率体现了 LTE 系统空中接口承载的数据。在 20 MHz 的带宽内，对于 LTE 理论峰值速率，下行可达 100 Mbps，上行可达 50 Mbps。

在实际应用场景中,我们更关注业务数据的实测峰值速率,即除去控制面开销的净荷峰值速率。对于 20 MHz 的带宽,天线配置为 2×2 的时候,LTE 下行峰值速率约为 80 Mbps,上行约为 20 Mbps。

在一般规划设计中,还需要考虑边缘小区的吞吐率;天线配置为 2×2 的时候,参考要求是下行不低于 0.6 Mbps,上行不低于 0.3 Mbps。

LTE 同时调度的用户数主要取决于上、下行控制信道的配置。

上行调度用户数主要受限于 PRACH (物理随机接入信道)、PUCCH (物理上行控制信道)、SRS (探测用参考信号);下行调度用户数受限于 PCFICH 信道、PHICH 信道和 PDCCH 信道容量。

对于采用半静态调度和保证一定质量的 VoIP 用户来说,不考虑控制信道限制。LTE 在 20 MHz 带宽下,支持的最大 VoIP 用户数为 300~600 个;对于保证一定速率的数据业务,最大可支持的调度用户数为 80~100 个;如果单用户速率需求较高,实际调度的用户数也可能为 20 个左右。

“同时在线并发用户数”和“同时调度的用户数”的概念不同。

由于 LTE 的全 IP 结构,数据业务具有突发性,并不是持续进行业务传送的,有时只须 eNodeB 保持用户的“在线”状态,而不需要每子帧都对该用户进行调度。这样用户的规模大小就是同时在线的用户数。最大同时在线并发用户数与系统同时可调度的用户数没有直接关系。最大同时在线并发用户数取决于 LTE 协议字段的设计和和设备能力。LTE 在 20 MHz 带宽内,单小区提供超过 1 200 个“最大同时在线用户数”的能力。

WCDMA/TD-SCDMA 的容量能力与信道配置强相关;LTE 的容量能力不仅与信道配置强相关,而且和 RB 参数配置、多天线配置和工作模式,资源调度算法、小区间干扰协调算法等有很大关系,如图 11-10 所示。带宽自适应、编码调制自适应、天线模式自适应、资源的动态调度、多小区干扰抑制等使得 LTE 的容量也具有“自适应”的特性。

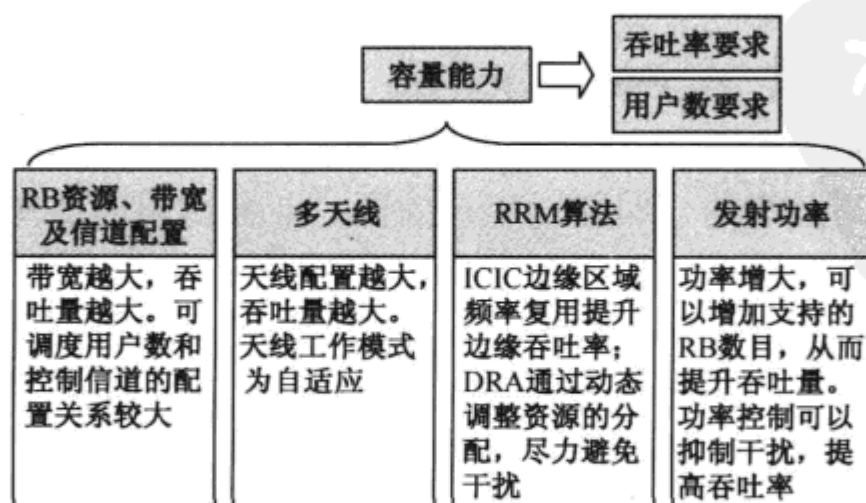


图 11-10 LTE 容量能力的影响因素

LTE 的带宽可灵活配置。带宽越大，小区吞吐量越大。LTE 的容量与可用 RB 资源数有关，覆盖也与可用 RB 资源数有关。下行 PDCCH 为提高覆盖，需要多配 RB 资源，这样便会挤占业务信道的资源，从而影响系统容量。

LTE 采用自适应调制编码 (AMC) 方式，可以根据信道质量的实时检测反馈，动态地调整占用资源。单用户所占资源和小区总体所占的资源，随无线环境变化得比较大，并不能像 WCDMA/TD-SCDMA 那样，给定一个业务信噪比门限，就能估算出系统的整体容量。

天线的配置越大，支持的容量越大，如天线配置为 4×4 比 2×2 的容量能力要大很多， 2×2 也比 2×1 的容量大一些。天线的自适应工作模式在一定程度上实现用户容量的环境自适应能力。

LTE 采用 ICIC 算法，通过边缘区域的频率复用及降低小区间干扰，可以提高边缘用户吞吐量。LTE 采用 DRA 调度算法，根据用户的信道质量动态地调整无线资源分配，分配资源时，尽力避免产生干扰，从而改善用户的信噪比，提升系统的容量。

发射功率的增大，可以增加支持 RB 资源的数目，从而增加小区吞吐率或者增加接入的用户数。功率控制可以减少小区间的同频干扰，也可以提升系统的容量。

11.3.2 LTE 容量估算

容量规划的追求目标是最大的吞吐率（小区吞吐率、单用户吞吐率）、最大的接入用户数，但这些追求有时候是互相掣肘和相互制约的。支撑的用户数过多，每用户的吞吐率会降低，小区的平均吞吐率也会受到影响。在容量规划时，需要根据建网目标来综合平衡。

LTE 容量估算思路与以往无线制式容量估算的不同点主要体现在 LTE 业务资源占用的“共享性”上。这一点和 HSDPA 的资源占用方式一致。

并发用户数越多，或者并发业务数越多，单用户和单业务所能分到的无线资源就越少，单用户吞吐率也可能越少。

对于资源占用的“专用”方式，同样业务占用的无线资源数量是固定的，只是用户使用业务的行为是随机的，如 PS64k、PS128k、PS384k 的业务，可以使用排队论里的 Erlang 法进行所需资源的估算。

LTE 的业务信道是共享的，即同一用户的同一业务占用的资源数是动态变化的。也就是说，除了用户使用业务的行为是随机的之外，业务占用资源数目的多少也是随机的，都随着无线环境的变化而变化。这样，使用 Erlang 法进行容量估算就比较粗糙了。

LTE 业务信道的共享性和容量对无线环境自适应性决定了容量估算的复杂性，手工计算是不现实的，也是不精确的，所以要借助工具来完成这个比较复杂的工作。LTE 容量估算可以考虑使用蒙特卡洛仿真法。

根据不同用户、不同业务的话务量的大小规律，系统随机地产生话务。每次随机产

生的多个话务，作为一次蒙特卡洛“Drop”，然后由工具模拟 LTE 资源调度和自适应能力，给这些话务进行资源调度。每次计算都考虑了无线环境和 LTE 的特殊情况。每一次“Drop”就是一次快照。经过多次“Drop”（见图 11-11），来模拟网络的实际场景，最后能够输出小区级的接入用户数和吞吐率指标。小区整体吞吐率的大小和用户在小区内的位置分布、小区的覆盖电平、终端等级、调度算法、干扰水平等很多因素相关。小区整体吞吐率就是单用户吞吐率和小区内服务用户总数的综合效果。



图 11-11 蒙特卡洛“Drop”

在规划之前，确定整个区域总接入用户数和总吞吐率需求的容量目标。整个区域的容量目标和单个小区的容量能力之比，就是从容量角度上计算出的小区数目，从小区数目就可以规划出基站数和载频配置数。

LTE 的蒙特卡洛仿真法进行容量估算的基本思路如图 11-12 所示。

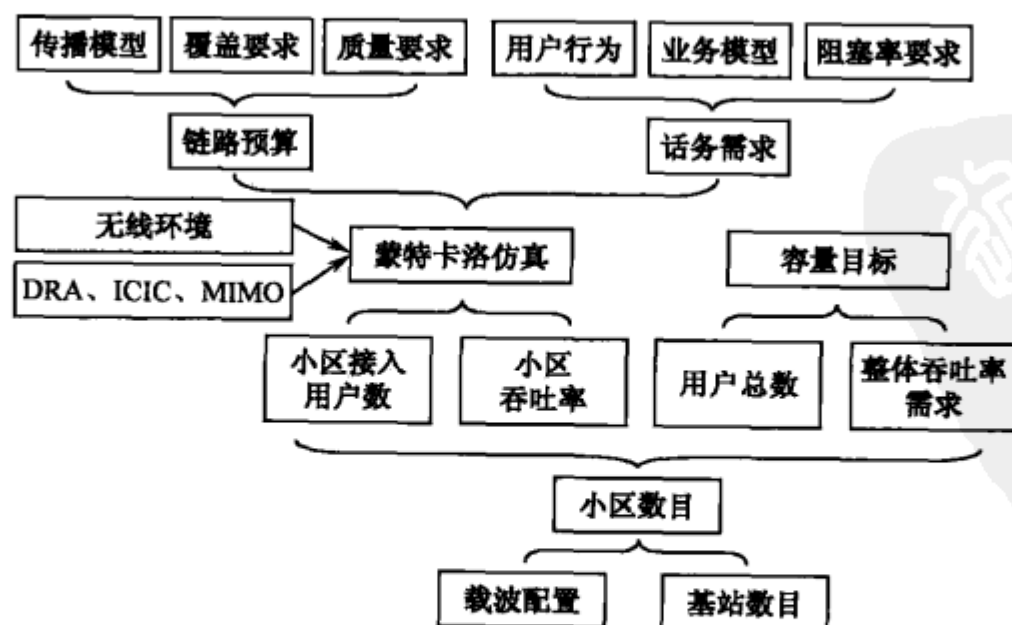


图 11-12 LTE 蒙特卡洛容量估算思路

11.4 LTE 规划仿真

网络估算完成后，只是确定了目标区域内基站的数目，但是这些基站放在什么位置，还需要进行站址选择。

站址选择有两种情况：

- (1) 存在可利用的旧站址；
- (2) 完全新建站址。

在 LTE 建设的时候，存在大量 2G、3G 的可利用的旧站址，应该尽量实现 LTE 与 2G、3G 的共站址，这样可以大幅节约基础建设的成本；但是，在一些新建生活小区和新增的 CBD 区域，没有合适的已有站址，需要选择新的站址。

站址勘测是站址选择过程的重要工作。传输配电、走线安装、站址高度、站间距、周边无线环境、干扰情况、共站情况、天线参数配置等，都要在站址勘测过程中摸清楚。在站址勘测过程中，LTE 的思路和方法与 2G、3G 没有什么不同，这里就不单独介绍了。

现在的问题是：这些基站按照勘站时选定的站点位置进行布置，按照勘站时选定的天线工程参数进行设置，网络性能如何？能否满足所设定的要求？信道功率设置是否合适？

这就需要应用相关的工具进行规划仿真，评估一下这些工程参数的应用效果。如果仿真结果不符合指标要求，就需要调整天线参数，甚至需要重新勘站以选择更合适的位置。

仿真，即模拟现网的真实情况。

对于无线网络规划仿真（见图 11-13），一般包括：

- (1) 无线环境的仿真；
- (2) 网络设备的仿真；
- (3) 用户业务过程的仿真。

在规划仿真工具中，与无线环境设置相关的动作有：坐标系选取、数字地图的导入、传播模型的校正、地物参数（阴影衰落、穿透损耗）的敲定。

与网络设备仿真相关的动作有：天线参数（RF 参数、天线配置、工作模式）的输入、基站扇区相关参数的设置、终端性能参数的设置、信道参数配置、无线资源管理 RRM 功能的选取、覆盖预测。

对于用户业务过程的仿真，包括：话务模型（用户行为、业务特性）的设置、话务地图的创立、蒙特卡罗仿真等。

综上所述，无线网络规划仿真工具使用的主要步骤如图 11-14 所示。

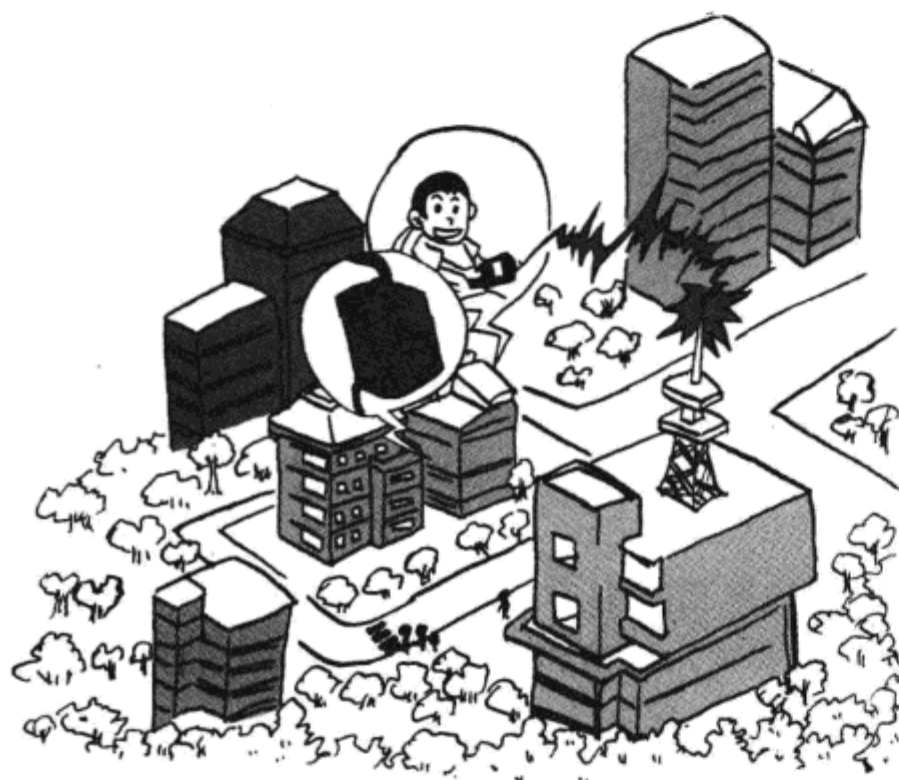


图 11-13 无线网络规划仿真示例

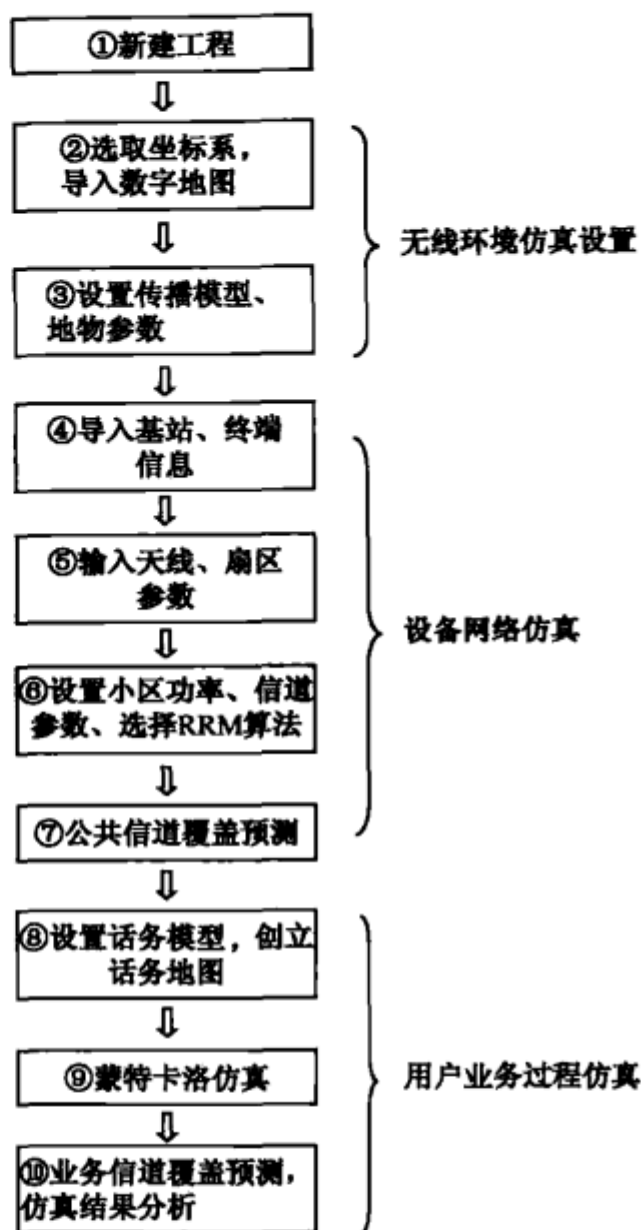


图 11-14 无线网络规划仿真工具使用的主要步骤

从上面的规划仿真的主要步骤可知，在开始这项工作前需要做好以下一些准备工作：

- (1) 仿真规划软件、服务器，工作正常；
- (2) 选取合适精度的数字地图；
- (3) 获取天线文件、明确天线工程参数、天线 MIMO 配置、工作模式；
- (4) 确定传播模型、确定穿透损耗、阴影衰落余量；
- (5) 确定基站、终端、RRM 参数、功率参数、信道配置；
- (6) 确定话务模型；
- (7) 明确规划指标要求。

11.4.1 LTE 规划仿真的指标要求

仿真的目的就是在已有的站点规模、参数配置的条件下,判断网络性能是否满足规划目标。

如果不满足,需要对工程参数、无线参数进行相关的调整,直到满足规划要求。这个规划目标,就是仿真规划的指标要求。

LTE 和其他无线制式一样,在规划仿真过程中,在覆盖、容量、网络质量方面,都有相应的指标要求。但是,由于 LTE 技术的特殊性,规划指标的具体要求也有一些变化。我们可以给出一些指标要求的参考数值。在具体的工程应用过程中,还需要考虑运营商的具体要求。

从覆盖的角度上来说,LTE 一般要求热点区域连续覆盖;覆盖区域内,用户在 90% 的位置、99% 的时间里可以接入网络。在室外宏站覆盖区域,覆盖率满足 $RSRP > -110$ dBm 的概率大于 90%;在室内分布系统的覆盖区域,覆盖率满足 $RSRP > -105$ dBm 的概率大于 90%。

LTE 的容量指标,一般从小区吞吐量和边缘吞吐率两个角度来要求。在同频组网、用户占用 50% 网络资源的条件下,小区吞吐量达到下行为 20 Mbps、上行为 5 Mbps。轻载时,边缘速率达到下行为 1 Mbps,上行为 250 kbps;负载占 50% 时,边缘速率达到下行为 500 kbps,上行为 150 kbps。

从业务质量的角度上来说,数据业务的误块率指标为 10%;语音业务的误块率指标为 1%。忙时阻塞概率小于 2%。网络 KPI 指标要求:用户占用 50% 网络资源的条件下,无线接通率 $> 95\%$;掉线率 $< 2\%$;系统内切换成功率 $> 97\%$ 。

LTE 在仿真规划时,典型指标的参考目标值如表 11-6 所示。

表 11-6 LTE 仿真规划典型指标的参考目标值

指标分类	具体指标	条件	指标要求
覆盖	覆盖概率	连续覆盖区域	90%位置、99%的时间里可以接入网络
		宏站	$RSRP > -110$ dBm 的概率大于 90%
		室内分布	$RSRP > -105$ dBm 的概率大于 90%
容量	小区吞吐量	50%负载	下行 20 Mbps、上行 5 Mbps
	边缘吞吐率	轻载	下行 1 Mbps, 上行 250 kbps
		50%负载	下行 500 kbps, 上行 150 kbps
网络质量	误块率	数据业务	10%
		语音业务	1%

续表

指标分类	具体指标	条 件	指 标 要 求
网络质量	阻塞概率	忙时	2%
	无线接通率	50%负载	>95%
	掉线率	50%负载	<2%
	系统内切换成功率	50%负载	>97%

11.4.2 LTE 规划仿真的主要输入参数

规划仿真工具要模拟无线环境、模拟网络设备、模拟用户业务过程，就需要在工具中输入实际无线环境、实际网络设备、实际用户业务过程的相应参数。

与无线环境相关的输入参数主要包括：传播模型、阴影衰落标准差、穿透损耗，以及信道类型，如表 11-7 所示。

表 11-7 与无线环境相关的输入参数

无线环境分类	阴影衰落标准差 (dB)	信道类型	穿透损耗 (dB)					
			700 MHz	900 MHz	1 500 MHz	1 800 MHz	2.1 GHz	2.6 GHz
密集城区	11	TU3	15	15	19	19	20	22
普通城区	8	TU20	12	12	15	16	16	18
郊区	5	TU50	8	8	10	10	12	12
高速干道	5	RA120	6	6	8	8	10	10

传播模型对于规划工具的覆盖预测结果影响非常大；阴影衰落标准差在计算受地物影响的非视距覆盖范围的信号强度时起作用；穿透损耗在计算建筑内的覆盖强度起作用，不同的建筑物，不同的频率，穿透损耗差别比较大。LTE 定义的工作频率有 40 个，即使建筑物相同，不同频率的穿透损耗差别也比较大。信道类型实际是指不同无线环境、不同速度的信道条件；信道类型影响接收机的解调门限，进而影响接收机的灵敏度。

与网络设备相关的仿真规划输入参数有基站设备参数、手机参数及 RF 相关的工程参数。基站、手机的输入参数主要是发射功率、噪声系数、支持的频点和带宽等。工程参数包括站点名称、站点经纬度、天线类型、天线波瓣宽度、天线增益、天线方位角、下倾角、各小区载频数、邻区关系、发射功率等数据。

表征用户业务过程的参数有话务模型参数、小区相关参数等。小区参数主要包括信道功率参数、多天线配置参数、算法参数、信道格式或与帧格式相关的参数，与 LTE 强相关的小区参数如表 11-8 所示。

表 11-8 与 LTE 强相关的小区参数

分 类	仿真工具输入参数	含 义
功率参数	小区下行总功率	小区下行多天线发射功率总和, 参考取值为 40 W
	EPRE	参考信号单 RE 功率; 总的下行发射功率与 RE 个数之比 发射总功率为 40 W、带宽为 20 MHz 条件下: 参考取值为 10~15 dBm
	PBCH/PDSCH/ PDCCH 功率偏移	PBCH/PDSCH/PDCCH EPRE 相对于参考信号 EPRE 的功率偏移量。用于计算 PBCH、PDSCH 与 PDCCH 的发射功率
多天线相关参数	多天线配置	接收天线和发射天线的数目, $M_r \times M_t$
	多天线工作模式	MIMO 的工作模式设置, 参考选项为自适应 MIMO 模式 (分集和复用的自适应) 或波束赋型
	容量增益因子	相对于分集模式, MIMO 复用模式可以接入更多的用户, 支撑更大的吞吐量, 从而获得容量增益
ICIC 算法相关	ICIC 启动门限	判断多小区干扰协调算法开启的门限值。若 RSRP 最大值和次强值小于该门限, 则启动 ICIC 模块
	ICIC 子组号	小区边缘区域采用频率复用方式克服同频干扰。该参数规定了小区边缘使用的频率子组号, 可由软件系统自动分配
	ICIC 功率配置	小区内部单 RE 功率与小区边缘单 RE 功率之比, 参考取值为 0.5
	ICIC 小区边界偏置	可以使用 RSRP 功率差来判断小区边界。当接收到的两个小区的 RSRP 差值小于该值的时候, 说明用户处于小区边缘。参考取值为 4 dB
	频率资源	系统可用的带宽资源和频率资源集合
	ICIC 频率规划	小区边缘区域占用频率资源与总频率资源比例为 1/3
动态调度算法相关	调度算法	确定哪个用户获得动态资源的算法, 参考取值有 RR、PF、Max C/I, 主要用 PF
	MCS 格式	LTE 有 29 种 MCS 等级。系统应根据用户的信噪比来自适应地选择 MCS 等级
无线帧格式	CP 长度配置	有两种配置方式: Normal CP、Extend CP。通常取 Normal CP
	CFI 配置	CFI, 是指控制信道格式指示 (Control Format Indicator)。控制信道和业务信道在同一个 RB 的时候, 控制信道占用的 OFDM 符号数可以是 0、1、2、3。参考配置为 2, 即控制信道 PDCCH 占用 2 个 OFDM 符号
	时隙配比 (TDD-LTE 参数)	TDD-LTE 上、下行时隙可配, 不同的时隙配比, 对应着不同的上、下行吞吐量。常见的时隙配置为 DL:UL=3:2
	特殊子帧配比 (TDD-LTE 参数)	TDD-LTE 普通 CP 模式下, 有 9 种特殊时隙配置方式, 参考特殊时隙配置方式为 10:2:2

11.4.3 LTE 仿真分析

规划仿真工具，有“输入”，也会有“输出”。从“输入”到“输出”的过程就是“仿真过程”；“输出”和“建网目标”的比较，就是“仿真分析”。

在规划软件中，输入了无线环境相关的参数；基站手机设备的性能参数、工程参数，用户行为、业务特性等话务模型参数；与 LTE 特性相关的小区参数，经过如图 11-15 所示的仿真过程，最终要输出与覆盖、容量、质量相关的性能指标。

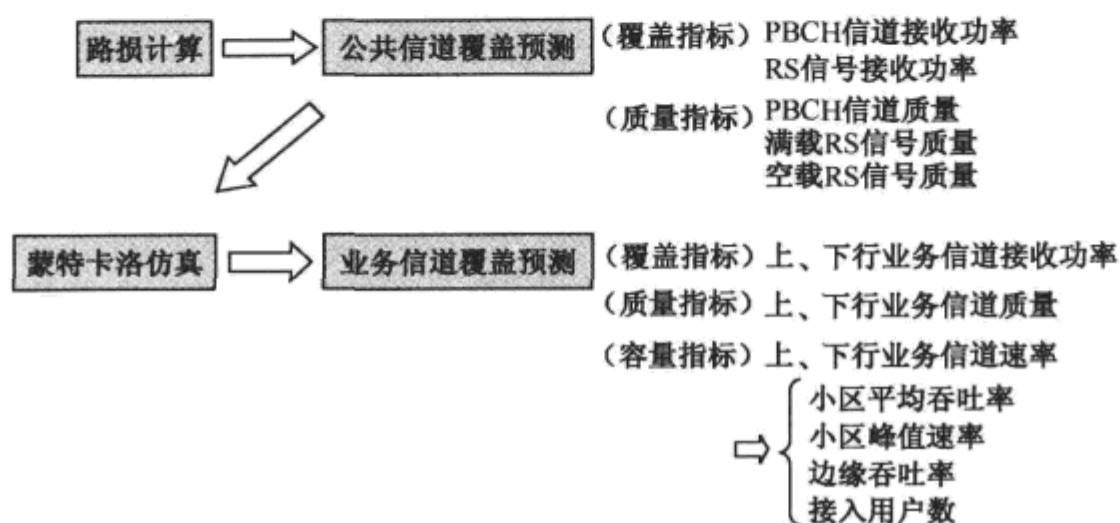


图 11-15 LTE 仿真关键动作及输出结果

如果公共信道、业务信道的覆盖电平 RSRP、信道质量 SIR、小区平均吞吐率及边缘吞吐率等仿真结果不满足规划目标，需要找出问题区域，通过调整工程参数来提升网络指标，直到满足规划目标。

按照工程实施难度和成本从低到高，去排列工程参数调整的优先级顺序，从高到低为：天线下倾角、天线方向角、天线挂高、天线的位置、站点的高度、站点的位置、新增站点。

覆盖预测细分为公共信道覆盖预测及业务信道覆盖预测两部分。

路径损耗计算则是覆盖预测的前提。公共信道覆盖预测包括 RS 信号、PBCH 信道的覆盖和质量的预测，在容量仿真之前便可以计算出来。

公共信道覆盖水平满足要求是业务信道接入成功的前提。在业务信道覆盖预测之前，仿真软件必须完成公共信道覆盖预测和蒙特卡洛仿真。也就是说，公共信道覆盖预测和蒙特卡洛仿真是业务信道覆盖和质量预测的前提。在业务信道覆盖和质量预测完成后，才可以进行容量指标的预测。

公共信道覆盖预测可以输出以下结果：

- (1) 公共信道覆盖 (PBCH 信道接收功率): PBCH RxLevel 地理化显示。
- (2) 公共信道质量 (PBCH 信道质量): PBCH SIR 地理化显示。
- (3) 公共信道覆盖 (RS 信号接收功率): RS RSRP 地理化显示。

注: RS 信号接收功率的门限不仅要满足 RS 信号的解调要求, 还要考虑小区边缘最低保障业务速率。最佳服务小区分布地理化显示, 就是某小区 RS 信号作为最强接收功率的地理化范围。

- (4) 公共信道质量 (RS 信号质量): 分别预测空载、(邻区) 满载时 RS SIR。

在公共信道覆盖预测和 Monte Carlo 仿真完成之后, 可以进行一定负载条件下的业务信道 (DL: PDSCH; UL: PUSCH) 覆盖和质量预测。

业务信道覆盖预测可以输出以下结果:

- (1) 下行业务信道覆盖 (PDSCH 接收功率): PDSCH RxLevel 地理化显示;
- (2) 下行业务信道质量 (PDSCH 信道质量): PDSCH SIR 地理化显示;
- (3) 上行业务信道覆盖 (PUSCH 接收功率): PUSCH RxLevel 地理化显示;
- (4) 上行业务信道质量 (PUSCH 信道质量): PUSCH SIR 地理化显示。

业务信道覆盖和质量预测完成之后, 系统可以计算出业务信道支持的速率, 从而进一步计算, 最后输出以下指标:

- (1) 小区下行平均吞吐率地理化显示;
- (2) 小区上行平均吞吐率地理化显示;
- (3) 小区下行峰值吞吐率地理化显示;
- (4) 小区上行峰值吞吐率地理化显示;
- (5) 小区平均边缘吞吐率;
- (6) 小区接入用户数。

11.5 小区参数规划

GSM	WCDMA	TD-SCDM	LTE
小区ID规划			
邻区规划			
频率规划	不必要	频率规划	
无	不必要	扰码规划	PCI规划
位置区 (LAC) 规划			跟踪区 (TA) 规划
不必要			PRACH ZC序列

图 11-16 不同无线制式小区参数规划对比

小区参数是小区正常工作必需的, 它是决定小区间工作配合关系的无线参数, 如小区 ID 规划、邻区规划、频率规划、扰码规划, 位置区规划等参数。

如图 11-16 所示, LTE 和其他无线制式一样, 包括小区 ID 规划、邻区规划、频率规划。LTE 的这些小区参数规划和其他无线制

式的思路和方法非常类似。但由于 LTE 技术的特殊性, 包含了一些新的内容, 需要一些新的考虑。与 LTE 强相关的小区参数还包括: 物理小区 ID (Physical Cell ID, PCI)、跟踪区 (Tracking Area, TA)、随机接入的 ZC 序列规划。

11.5.1 小区 CGI 规划

CGI (Cell Global Identifier, 小区全球标识) 是全球范围内无线网络小区的唯一标识, 不同运营商的不同网络可以有不同的 CGI 编号规则。

一般来说, 有以下三种不同的编号规则:

(1) 位置区号+小区识别号 (LAI+Cell ID)。

这里, 位置区号 LAI (Location Area Identifier) 是由 PLMN 号和 LAC 号组成的, 全球唯一。小区识别号 (Cell ID) 在某位置区内唯一。GSM 网络中的 CGI 编号可以采用这种规则。

(2) RNC 编号+小区识别号 (RNC ID+Cell ID)。

这里, RNC 编号是由 PLMN 号和 RNC ID 号组成的, 全球唯一。小区识别号在某 RNC 区域内唯一。TD、WCDMA 网络中的 CGI 编号可以采用这种规则。

(3) 基站编号+小区识别号 (eNodeB ID+Cell ID)。

LTE 中的小区网内标识号 (Cell ID) 由两部分组成: 20 bit 的基站 ID (eNodeB ID) 和 8 bit 的小区 ID (Cell ID)。基站的编号 eNodeB ID 在 LTE 网内是唯一的, 因此由基站编号和小区 ID 号组成的 CELL ID 在 LTE 全网内也是唯一的。这样的 CELL ID 再加上网络号 (PLMN ID) 就可以保证全球唯一, 如图 11-17 所示。LTE 的小区全球标识记为 ECGI (eUTRAN Cell Global Identifier)。

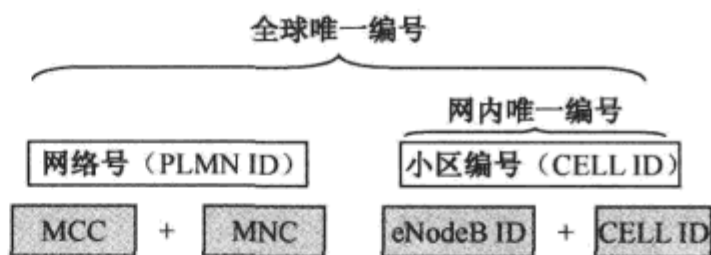


图 11-17 LTE 的小区全球标识号

其中, 网络号 (PLMN ID) 是由移动国家编码号 (Mobile Country Code, MCC) 和移动网络编码号 (Mobile Network Code, MNC) 组成的, 即用来在全球范围内唯一标识一个网络。移动国家码 MCC 用于区别不同国家的无线网络, 由 3 位数字组成, 如中国的移动国家码为 460; 移动网络标识 MNC 用于识别不同运营商的网络, 由 2 位数字组成, 如中国移动的 GSM 网络号为 00, 中国移动的 TD 网络号为 07, 中国联通的 GSM 网络号为 01。

在上面的小区标识号中, 有的运营商在编号时还在末尾加入一位载频数量的信息。如在 LTE 中, 网内的小区标识号 CELL ID 可以标识如下:

CELL ID=NodeB ID+第几小区+载频数量

举例来说, CELL ID 为 “12132” 表示某小区是 NodeB ID 为 121 的基站, 处在第 3

小区，该小区只配置了两个载频。

修改小区 ID（包括基站 ID 和小区 ID）参数的时候，需要去激活所属基站下的所有小区，同时删除有以该小区为邻区的所有邻接关系。先修改基站 ID，再修改该基站下的小区 ID。小区 ID 修改完成后，需要重新启动相关基站，才能起作用。

11.5.2 邻区规划

邻区规划是无线网络规划中非常重要的一环，关系到终端在移动过程中重选或切换的成功与否。邻区规划的基本原则是覆盖交叠程度较大，有较多用户发生移动的相邻小区间相互配置邻区。

LTE 与 WCDMA、TD-SCDMA 的邻区规划原理和方法基本一致。

邻区关系分为双向邻区、单向邻区。

一般场景下，地理位置上直接相邻的小区，或者覆盖范围交叠面积较大的小区，都要互为邻区，即如把 B 配为 A 小区的邻区，那么把 A 也配为 B 的邻区。

但在一些特殊的场景下，如高速单向链型覆盖场景和室内高层覆盖场景，可能需要配置单向邻区，即希望 A 小区切换到 B 小区，却不希望 B 小区切换回 A 小区。

但是配置单向邻区要谨慎，配置不当，有可能由于邻区漏配导致掉话。如室内高层小区信号泄漏比较严重的时候，室外用户使用了室内小区泄漏出来的信号，由于室外小区把室内小区作为邻区，而室内小区没有配置室外小区为邻区，这样该用户在从室内小区移动到室外小区的时候，必然产生掉话。

邻区关系可以分为同频邻区、异频邻区、异系统邻区。在一般的无线系统中，同频、异频和异系统的最大邻区数目是有限制的，不支持过多的邻区配置。对于常见的 LTE 系统，同频、异频和异系统最大的邻区配置数目分别为 32 个。

邻区规划的时候，要避免覆盖上互不相关的小区配为邻区，占用了系统的邻区配额。对于密集城区和普通城区，由于站间距比较近（300~800 m），应配置较多的邻区；对于市郊和郊县的基站，站间距很大，邻区数目较少，但一定要避免漏配。

在建网初期，优先做同频小区的邻区规划。完成初始化后，系统会根据 UE 对同频邻区的检测情况，对同频邻区关系优化。

在后期 LTE 的扩容过程中，在网络中可能采用不同频点，则需要考虑异频邻区规划。在话务热点区域，在宏小区的基础上叠加了异频的微小区或微微小区。在这种情况下，需要将宏小区配置为微小区的异频邻区。

LTE 和以往无线制式邻区规划不同的地方有三点：

（1）跨系统邻区规划更加复杂。

在 LTE 建网初期或者建网过程中，LTE 网络可能只是热点覆盖或者局部区域连续覆

盖,必然要和多个无线制式共存。在一些场景中,如室内或者地铁中,需要考虑与 WCDMA 或 TD-SCDMA、GSM、cdma2000 等多个异系统间进行邻区规划。一般 WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000 邻区不会同时出现,所以一个 LTE 小区通常不需要配置 3 个以上的异系统邻区。一般需要将 LTE 小区附近的异系统小区配置为异系统邻区。通过设置不同的切换参数,保证覆盖连续性的同时,灵活控制切换的发生。

(2) 支持网络自动邻区配置。

标准协议规定了 LTE 具备自组织网络 (Self Organization Network, SON) 功能。自动邻区配置 (Auto Neighbor Relation, ANR) 功能也是自组织网络的重要功能,已成为标准协议中的内容。新建网络的邻区初始配置,仍需要现场工程师规划完成。但处于优化维护期的网络,则完全可以依赖网络自动邻区配置功能。

(3) 切换测量基于频点而不是基于邻区列表,邻区多配不影响终端测量。

LTE 终端在切换测量过程中,根据配置所指示的频点完成测量任务;UE 高层对测量结果进行处理,找到满足切换要求的频点所对应的候选小区列表(一个频点可对应多个小区),然后将该候选小区列表发给网络;由网络根据移动性参数设置的判决条件,选择小区发起切换。

在 LTE 里,邻区列表存在的主要作用是提供必要的详细信息(如 CGI、PCI),而不是让终端进行顺序测量。因此,对于 LTE 系统来说,邻区不需要严格按照信号强度来排序;邻区检测周期非常短;邻区数目过多,并不影响测量时间和精度,主要担心遗漏邻区。

邻区关系由网络工程参数(网络拓扑结构、RF 参数)和无线环境共同决定,在做邻区规划的时候,需要考虑这两个要素的决定作用。规划依据的数据源不同,邻区规划可分为如图 11-18 所示的四种方法。

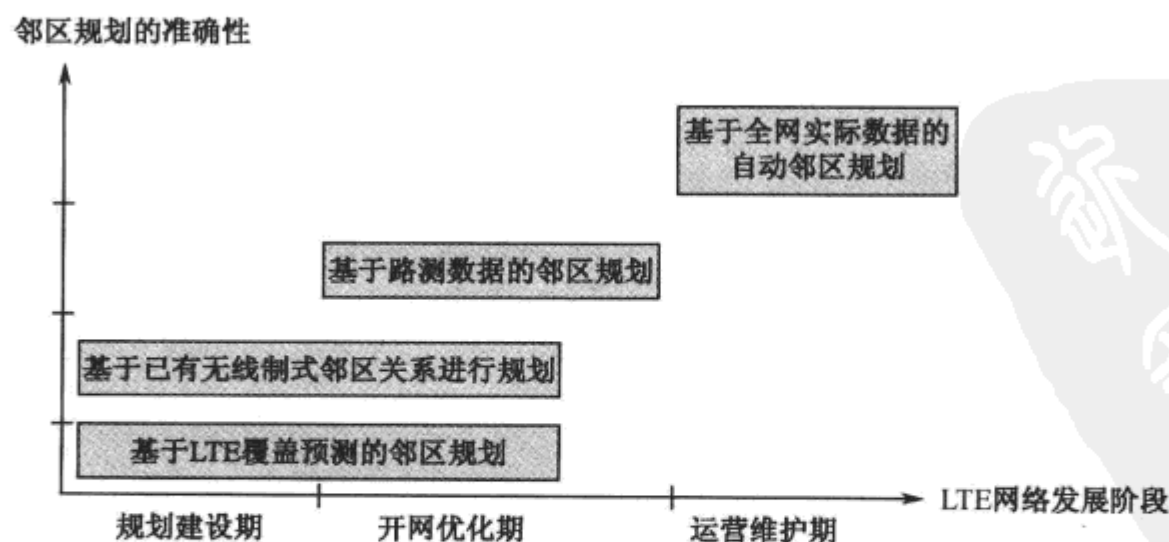


图 11-18 LTE 邻区规划方法

(1) 基于已有无线制式邻区关系进行规划。

由于已有无线制式的邻区关系是在运营维护过程中长期优化的结果，所以这种方法简单高效、快速方便，但并不完全准确。

这个方法适用于两种场景：

一是共站场景，在 LTE 规划建设过程中为了节约投资，尽量共用已有的 2G、3G 站址；

二是搬迁替换场景，已有无线设备或器件老化破旧，缺乏支持新特性的能力，需要把老的设备搬迁，用全新的 LTE 设备替换。

(2) 基于 LTE 覆盖预测的邻区规划。

新建 LTE 网络，没有可用的邻区关系信息，或者已有的邻区关系没有实际价值，这时需要利用 LTE 规划工具进行覆盖预测，在覆盖预测的基础上进行邻区规划。

基于覆盖预测的邻区规划，并不是来源于实际网络的数据，而是软件预测的数据。这样的邻区规划结果在实际网络应用的时候，还需要进行较多的优化调整工作。

(3) 基于路测数据的邻区规划。

在 LTE 网络建设完成初期，从规划工具中输出的邻区关系并不完全适应实际网络。由于网上实际用户数量不足，因而需要进行路测以优化网络。实际网络的路测数据含有城市主要干道的覆盖电平数据、切换关系数据，可以作为主要干道邻区规划的重要参考数据。但路测数据并不能代表全网数据，所以基于路测数据的邻区规划有一定的片面性，只是在网络初期用户数不多的时候采用。

(4) 基于全网实际数据的邻区规划。

在 LTE 网络商用一段时间以后，网上用户数足够多，在网用户的分布范围和业务行为可以客观地反应实际网络的运行需要。此时，可以把每个用户在接入网络或者发生重选、切换时和网络交互的覆盖电平数据、切换关系数据跟踪下来，作为邻区关系调整优化的依据。

基于全网实际数据的邻区规划更加符合网络运行的实际需要，无须人工参与，是 LTE 自组织网络（SON）的一个基本功能 ANR（自动邻区规划）。

11.5.3 PCI 规划

物理层小区 ID（Physical Cell ID, PCI）的作用是在小区搜索过程中，方便终端区分不同小区的无线信号，类似于 WCDMA/TD-SCDMA 中扰码的作用。

终端接收到的多个小区的无线信号中，不能有相同的物理小区标识 PCI，否则会形成干扰。同一 PCI 可以在不同小区使用，但必须间隔足够的距离，这个距离就是 PCI 的复用距离。

一个小区 PCI 和 CGI 的关系，如同一个人的姓名和身份证号码的关系一样。二者的作用，使用的场合不同，包含的信息也不同。有很多人同名同姓，但是他们的身份证号码一定是相互区别的（见图 11-19）。

PCI 与 CGI 首先是作用不同，CGI 的作用是网络侧区别不同基站的小区，而 PCI 则主要用于手机和无线接入网之间区别不同的小区。

再次，代表内容和含义不同，CGI 是代表一定范围的几组数字编号，按照从大到小（先国家、网络，后基站、小区）的顺序合成的；PCI 对应的是同步过程使用的不同序列，组内 ID 对应的是长度为 62 的频域 Zadoff-Chu（ZC 序列），小区组 ID 对应了二进制 M 序列。

其次，从数量上来看，CGI 可以认为有无数多个，足够区别全球的不同无线小区；PCI 小区组有 168 个，每个小区组由 3 个 ID 组成，总数共有 504（168×3）个。

最后，一个小区的 CGI 是全球唯一的小区标识；而一个小区的 PCI 则可能和一定距离外的其他小区的 PCI 相同。

PCI 与 CGI 的区别如表 11-9 所示。



图 11-19 PCI 和 CGI 的关系类比

表 11-9 PCI 与 CGI 的区别

对比项	物理层小区 ID (PCI)	小区全球标识 (CGI)
作用	手机和无线接入网之间区别不同小区	网络侧区别不同基站的小区
含义和内容	同步过程使用的不同序列	先国家、网络，后基站、小区
数量	504	认为有无数多个
是否复用	间隔一定距离，可以复用	全球唯一，不能复用

PCI 规划的目的就是在 LTE 组网中为每个小区分配一个物理小区标识 PCI，尽可能多地复用有限数量的 PCI，同时避免 PCI 复用距离过小而产生同 PCI 之间的相互干扰。

如果终端同时接收到两个 PCI 相同的小区的导频信号，而且信号强度足够大，对于终端来说就是一种强干扰，可能导致同步或解码正常服务小区的导频信道过程失败。

LTE 的 PCI 规划与 3G 的扰码规划原则和流程相似。

LTE 的 PCI 数目有 504 个，TD-SCDMA 的扰码数量仅有 128 个。LTE 的 PCI 资源比 TD-SCDMA 的扰码资源多很多，所以 LTE 的 PCI 规划比 TD-SCDMA 的扰码规划要容

易得多。WCDMA 扰码资源更加丰富，无须扰码规划；LTE 的 PCI 资源比 WCDMA 的扰码资源要少很多，与 WCDMA 相比，LTE 的 PCI 规划困难一些。

PCI 规划的总目标是降低相同 PCI 的干扰。如何实现这一目标呢？保证相同 PCI 一定的复用距离，或者说相同 PCI 间隔若干个小区数目。但复用距离多大，或者说间隔多少小区与实际的无线环境、网络环境强相关，需要区别对待。

PCI 规划工具在实现过程中需遵循以下原则。

(1) 避免冲突：尽量避免给存在覆盖交叠的相邻小区分配相关性较高的 PCI。

两个相邻的小区分配相同的 PCI，如果存在覆盖重叠区域，如图 11-20 所示，这样就会使 UE 在初始小区搜索时，同步到不合适的小区上，难以解调导频信道的信息。这就是所谓的 PCI 冲突。

在 PCI 工具实现的过程中，覆盖有重叠的小区避免分配相同的 PCI。实际操作的时候，一般要确保相同 PCI 的小区复用距离至少间隔 4 层站点或者大于 5 倍的小区覆盖半径。

(2) 避免混淆：避免和某一个小区相邻的两个小区分配相同的 PCI。

如图 11-21 所示，一个小区 B 的两个相邻小区具有相同的 PCI。如果某一终端要从 PCI 为 B 的小区切换到 PCI 为 A 的小区，该终端就会迷惑，混淆了两个不同的小区，搞不清楚究竟哪个小区为目标小区。

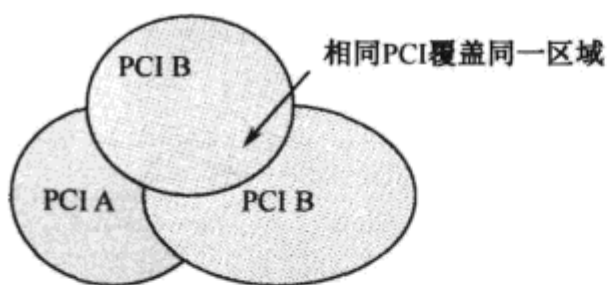


图 11-20 相同 PCI 小区覆盖同一区域

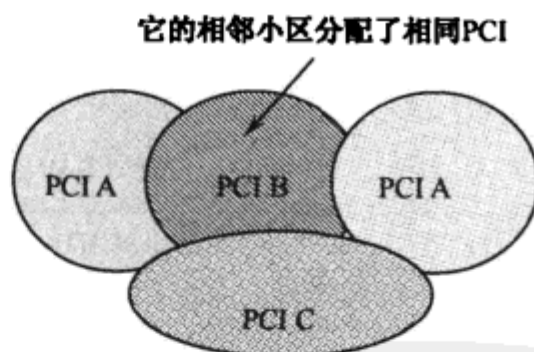


图 11-21 某小区的两个相邻小区分配了相同的 PCI

为了避免终端在切换过程中产生与 PCI 相同的目标小区，在 PCI 规划工具的实现过程中，除了相同 PCI 小区保证足够的复用距离外，还需要保证每个小区的邻区列表中的所有小区 PCI 不能相同，尽量保证一个小区的邻区的邻区（二层邻区）的 PCI 也不要相同。

(3) 导频符号频域位置错开：尽量避免组内 ID 相同的 PCI 分配在相对、相邻的小区上。

LTE 导频符号在频域上出现的位置与该小区分配 PCI 的组内 ID 直接相关。组内 ID 的值决定了导频符号的频率位置。组内 ID 号有三种取值：0,1,2；PCI 编号与 3 相除取余（PCI

MOD 3) 的值就是组内 ID。组内 ID 号相同, 那么 LTE 导频符号在频域上出现的位置就相同, 互相干扰的可能性就增大。邻近小区的导频符号在频域上的位置尽可能地错开, 可以降低导频符号的相互干扰, 提升导频符号的信噪比。这就要求组内 ID 相同的 PCI 不能分配在相邻、相对的两个小区上, 如图 11-22 所示。

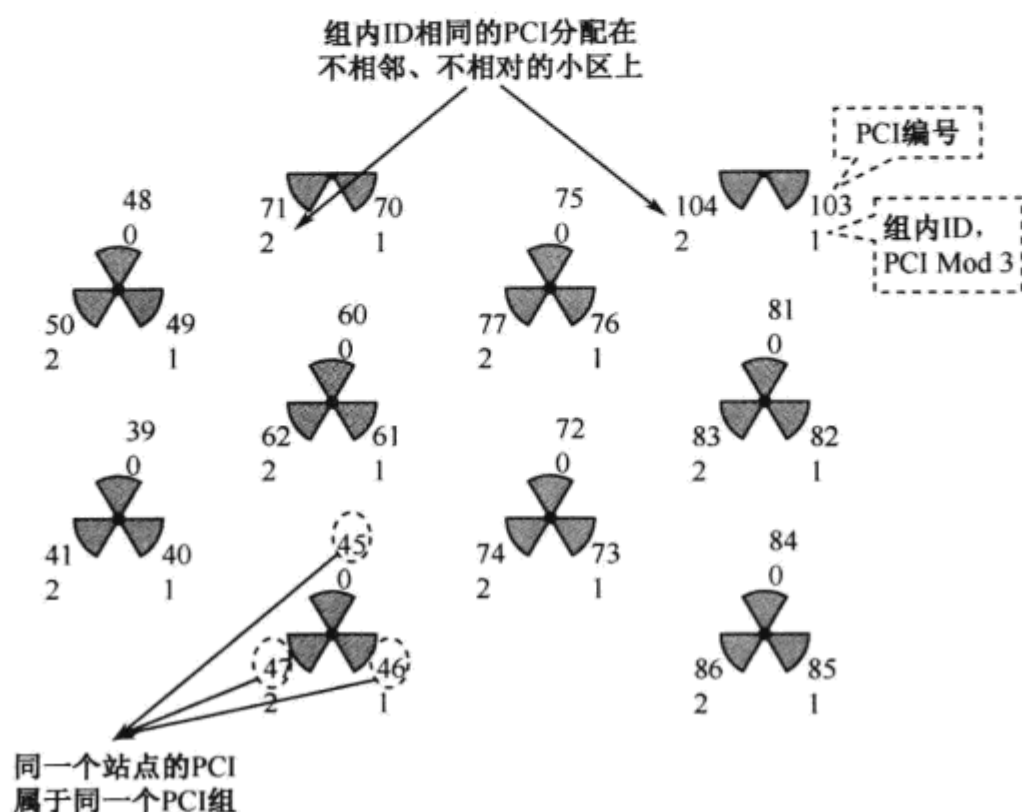


图 11-22 导频符号的频域位置错开

为了便于规划, 同一站点分配的 PCI 应该属于同一个 PCI 组, 相邻站点的 PCI 分配在不同的 PCI 组内。在一般情况下, LTE 站点为标准 3 扇区配置, 一个 PCI 分组正好也有三个 PCI 号可供分配。但在一些特殊场景下, 存在一些非标准配置站点, 如一个站点有 4~6 个扇区。这样, 一个 PCI 分组的 PCI 号数目就不够了, 这需要两个 PCI 分组, 多余的 PCI 码会自动作为预留码。

一般的 PCI 规划工具有两种规划方法:

- (1) 基于网络拓补结构的 PCI 规划法;
- (2) 基于覆盖预测的 PCI 规划法。

基于网络拓补结构的 PCI 规划, 只须明确站点的相对位置、站型配置、小区的经纬度这些简单的网络拓补信息, 无须 RF 工程参数和描述无线环境的数字地图, 就可以进行 PCI 规划。这种规划方法简单快速, 但是没有考虑无线环境对覆盖、干扰的影响, 可能导致规划的 PCI 过度复用或者复用不足。过度复用导致导频信道干扰增加; 复用不足会使 PCI 码资源不足, 对于复杂场景没有足够可用的 PCI。

基于覆盖预测的 PCI 规划法，网络参数和无线环境都要考虑。网络参数包括网络的拓补结构、RF 工程参数；无线环境包括数字地图、室内穿透损耗、地物阴影衰落等。如果当前的网络拓补结构和 RF 工程参数比较合理，使用基于覆盖预测的方法进行 PCI 规划更加准确合理。但如果当前的 RF 参数存在很大的优化空间，随着 RF 参数的变化，规划好的 PCI 也可能变得不太准确，也须进行相应的调整。

PCI 规划讲究三步走：

- (1) 依照不同场景划分簇；
- (2) 为特殊场景预留 PCI 码资源；
- (3) 分簇进行 PCI 分配。

新建网络进行 PCI 规划的时候，要考虑是否为未来网络扩容预留 PCI 码。网络扩容时，PCI 规划有两种思路：使用预留 PCI 码或者重新进行整网 PCI 规划。

使用预留 PCI 码适用于局部网络结构的变更，不影响整体网络已有的 PCI 规划。

当大范围扩容时，网络结构变化较大时，使用预留 PCI 码的方式，PCI 的复用效率和干扰抑制效果就会大打折扣，就需要考虑整网的 PCI 重整。

进行室内覆盖的 PCI 规划时，需要考虑是否将室内和室外分开进行规划。

在网络发展初期，以宏基站提供的面覆盖为主，仅有少量室内覆盖，没有必要对室内小区进行单独规划，此时可以将室内和室外站点统一进行规划。

当存在大量室内覆盖时，由于室内外立体覆盖、点面渗透、犬牙交互，切换关系错综、干扰状况复杂，很难有室内外统一的仿真环境，所以 PCI 统一规划的效果不会很好。将 PCI 码资源分为两份，对室内点覆盖和室外面覆盖分开进行 PCI 规划，最大程度地抑制室内外 PCI 码的相互影响，同时尽量提高 PCI 码资源的利用效率。

11.5.4 频率规划

无线制式的频率规划的目的有两个：

- (1) 降低同频干扰；
- (2) 提升频谱使用效率。

若频点相同的几路无线信号被同一接收机接收，则只有一路有用信号，其他同频信号只能成为干扰，这势必导致无线信号的信噪比降低，覆盖性能降低，甚至低于信道的解调门限，因而网络质量受到比较严重的影响。

通过频率规划，让使用相同频点的小区离开一定的距离，以降低同频信号的相互干扰，提升网络质量。频率规划后同频小区间隔的距离就是频率复用距离。在频率复用距离范围以内，需要使用不同频点。

在同一无线制式下，同频复用距离越大，同频干扰越小。但是频点的资源往往是有

限的，不允许无限制地增大同频复用距离。频率复用距离之外，可以使用相同的频点，目的就是提升频谱使用效率。在一定的覆盖范围内，频率复用距离越小，可以复用更多的相同频点，频谱使用效率越高。

降低同频干扰、提升频谱效率是频率使用的两个方向的要求，频率规划就是对这两个方向的要求进行一定的折中。

在一个无线网络内，重复使用的频点数目就是频率复用系数。

在整网内使用同一个频率，频率复用系数就是 1，WCDMA、cdma2000 都支持同频组网，即频率复用系数是 1；如果无线网络内 3 个频点不断重复使用，频率复用系数就是 3，以此类推。频率复用方式还可以用基站数目和频点数目相乘的形式来表示，其乘积的结果就是频率复用系数。频率复用系数越小，表示频率复用越紧密，如图 11-23 所示。

这里的基站数目本质上就是不能使用相同频点的范围，频点数目则是每个基站使用的不同频点个数。频率复用方式为 1×3 ，频

频率复用方式				
基站数目	\times	频点数目	=	频率复用系数
1	\times	3	=	3
4	\times	3	=	12

图 11-23 频率复用方式与频率复用系数的关系

率复用系数为 3，表示不能使用相同频点的基站数目是 1，每个基站有 3 个不同频点。频率复用方式为 4×3 ，频率复用系数为 12，表示不能使用相同频点的基站数目是 4，每个基站有 3 个不同频点。至少需要 3 个频点资源才能允许 1×3 的频率组网方式，至少需要 12 个频点资源才能允许 4×3 的频率组网方式（见图 11-24）。

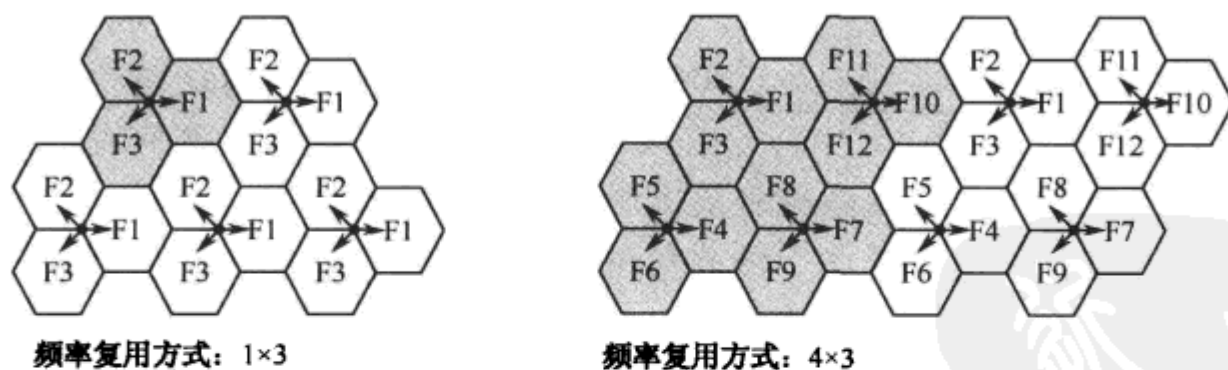


图 11-24 频率复用方式图例

决定 LTE 频率规划特点和原则的技术根因主要是 OFDM 和 ICIC 两大技术。

LTE 以 OFDM 技术为基础的无线系统，通过构造正交子载波的技术保证各信道之间互不影响，由于频率偏移或者相位偏移造成的各信道间子载波间的干扰也通过加 CP 降到最低，小区内干扰可以忽略不计。所以 LTE 支持频率复用因子为 1 的同频组网方式，也就是网络覆盖范围内所有的小区使用相同的频率工作。

另一方面，位于 LTE 小区边缘的用户，很容易受到其他小区的干扰，导致吞吐率降低，业务质量受到影响。LTE 致力于改善小区边缘用户的体验，增强 LTE 小区边缘的覆盖性能，为此引入小区间干扰协调技术（ICIC）。

与其他无线系统相比，LTE 的频率规划具备以下两个特点：

（1）带宽可变。

GSM、WCDMA、TD-SCDMA 的信道带宽是固定的，在频率资源一定的情况下，频点个数也是固定的。LTE 可以支持 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz 等可变的信道带宽，可用频点个数不仅依赖于总的频率资源，而且依赖于信道带宽大小的选择。

（2）数量有限。

GSM 的信道带宽窄，可用频点数多；WCDMA、TD-SCDMA 使用的带宽较大，频点数目少了很多；但在 LTE，最大可支持 20 MHz 带宽，同样频率资源的情况下，频点数目更少。

表 11-10 信道带宽与频点个数的关系

信道带宽 (MHz)	频 道 号	频 点 数
1.4	1~50	50
3	1~23	23
5	1~14	14
10	1~7	7
15	1~4	4
20	1~3	3

LTE 信道带宽可变，频点数量有限。在频率资源一定的情况下，频点个数与所选的信道带宽有关。假设某运营商拥有 70 MHz TD-LTE 的频率资源，频点个数与所选信道带宽的关系如表 11-10 所示。信道带宽的选择主要是运营商在考虑自己的频率资源的前提下，根据用户的业务量需求来确定。

目前，LTE 典型的频率复用方式有 1×1、1×3、SFR（Soft Frequency Reuse，频率软复用，即 1×1 加 ICIC）。三种方式的优、劣势对比如下。

1×1 的频率复用方式，就是覆盖范围内的所有小区使用一个相同的频点组网，频率复用系数为 1。这种方式的优点是频谱利用率高，但缺点是小区间干扰最大，边缘用户速率较低。这种方式适用于信道带宽较大、频率资源比较紧张、载波配置较大的场景。在建网初期，城市的局部热点区域可以采用这种频率复用方式组网。

1×3 的频率复用方式，是以一个基站为频率复用单位。一个基站分为 3 个小区，每个小区使用不同的频点。在单载波配置的情况下，全网使用 3 个频点。这种方式的优点是小区间干扰最小，覆盖能力最强，边缘用户速率也可以得到保证，对调度算法的复杂度要求较低，实现简单；但缺点是频谱利用率低，在基站载波配置增多时，频点资源可能不足。这种方式适用于频点资源丰富、基站载波配置较低的场景，或频带不连续而不能使用单频点组网的情况。在建网初期，在一些业务需求量不大的普通城区、郊区场景，为降低建网成本，可使用较小的信道带宽，于是增加了较多的频点资源。

SFR方式就是在 1×1 的频率复用方式上加上了干扰协调技术 ICIC, 在中心区域的频率复用系数为1, 在边缘区域的复用系数大于1, 保证相邻小区的边缘频率不同。这种方式的优点是, 既保证了比较高的频谱利用率, 同时又降低了边缘的干扰, 保证了边缘用户的速率。SFR方式结合了 1×1 和 1×3 频率复用方式的优点。对于城区LTE的中高话务的连续覆盖场景, 优先选用这种频率复用方式。

在室外场景, 应该避免同频小区天线对打, 尽量利用小区之间的地形、地貌、建筑的阻挡, 使同频小区从空间上进行隔离。

在LTE建网初期, 高速数据业务需求较大的室内话务热点为主要覆盖场景。为了保证室内业务的边缘速率, 室内室外异频组网的方式, 虽牺牲一定的频谱效率, 但提升了边缘业务的性能。

室内覆盖同一水平层面如须设置多个小区时, 相邻小区间建议采用异频组网。在局部盲点和局部热点, 可以使用带宽较小(如10 MHz, 而不是20 MHz)的频点进行补盲、补热。

11.5.5 TA规划

TA (Tracking Area, 跟踪区) 是LTE的核心网发送寻呼消息的区域, 属于移动性管理的概念。TAC (Tracking Area Code, 跟踪区码) 是小区归属的跟踪区域编号。TA的作用和规划思路非常类似于2G/3G的LA (Location Area, 位置区, 即电路域寻呼区域) 和RA (Routing Area, 分组区, 即分组域寻呼区域)。

跟踪区TA的大小取决于两点: 寻呼负荷、位置更新的信令开销。

寻呼负荷就是指在TA范围内, 核心网发送的寻呼消息的数量。MME所能承受的最大寻呼负荷确定了跟踪区的最大范围。跟踪区域TA越大, 区域内的用户数就越多, 寻呼负荷就越大。如果寻呼负荷超过了MME的最大负荷能力, 就会导致很多寻呼失败的问题发生, 这就是所谓的寻呼拥塞问题。正如在首都机场里安装的广播找人的喇叭, 每个喇叭的广播通知范围不能太大, 太大就会导致广播通知量增加, 到一定程度发生拥塞, 喇叭忙不过来了。

区域边缘用户的位置更新 (Tracking Area Update, TAU) 信令开销决定了跟踪区的最小范围。终端在移动过程中, 发生所属跟踪区的变化, 就会通过位置更新消息给网络报告自己的位置。跟踪区域TA太小的话, 终端就需要频繁地发出位置更新消息, 不断告知网络新的位置在哪里, 导致了过多的位置更新信令开销。如同一个调皮的小孩, 不断地告诉母亲“我把座位换在这啦。”这个母亲只好告诉他: “只要不出这个院子, 就不用告诉我你的位置了”, 这相当于把寻呼区域扩大, 减少了位置更新的信令开销。

TA区域的规划, 与网络的寻呼性能密切相关。规划的基本原则就是均衡寻呼负荷及

降低信令开销。一方面确保寻呼信道容量不受限，避免发生寻呼拥塞；另一方面降低位置更新信令开销，避免产生信令风暴。

从实际 TA 规划的经验来看，基站数目在 100 个左右的小城市只规划一个 TA 就足够了；但是很多大中城市，基站数目多达数百或数千个，这时需要根据寻呼容量需求和信令开销情况进行权衡，100~200 个基站划分为一个 TA。

TA 边界的划分要遵循以下原则：

(1) 区域连续、避免插花。

同一跟踪区边界内的封闭区域应该是一块地理上连续覆盖的区域；不连续覆盖的区域应该避免使用同一个跟踪区号 TAC；尽量避免跟踪区的插花分布。

(2) 利用地物、巧妙分割。

不同跟踪区，可以利用市区中山体、河流等地物作为边界。这种地物分布的用户数目有限，产生的位置更新信令开销少。尽量避免跟踪区之间以话务量很高的街道、商场为边界。跟踪区边界禁止与街道平行或垂直，一定要与街道斜交。在城乡结合部，将跟踪区的边界放在话务密度低的外围，远离交通干道的地方，而不是放在话务密集的生活小区和交通干道上。

(3) 不跨 MME、归属唯一。

寻呼区域避免跨 MME 区划分。也就是说，一个 TA 只属于一个 MME，不能属于多个，避免产生跨 MME 的寻呼操作，以此带来不必要的信令开销。

(4) 多个频段、两个思路。

LTE 在后期扩容后，可能引入多个频段。如果寻呼容量允许时，划分一个 TA 便可。如果一定要划分两个以上的跟踪区，可以按频段来区别不同的 TA，如图 11-25 所示。同时通过重选和切换参数的设置，使终端尽量只停留在一个频段的小区内，避免过多的双频段间的信令开销。按频段划分 TA，无须更改初期建设规划好的 TA，扩容方便快捷。

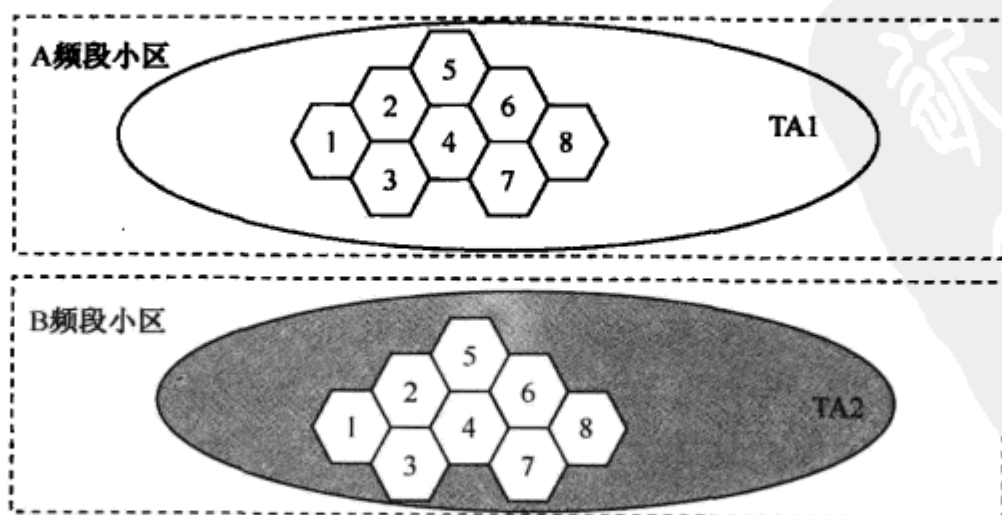


图 11-25 多频段组网，按频段划分 TA 边界

但是随着话务量的增加，频段间的切换、重选导致的位置更新越来越频繁。按照频段划分跟踪区的方式，缺点就越来越明显。重新按地理位置，利用地物隔离的方法划分跟踪区，如图 11-26 所示，可以减少位置更新的信令开销，但需要修改扩容前的跟踪区划分。

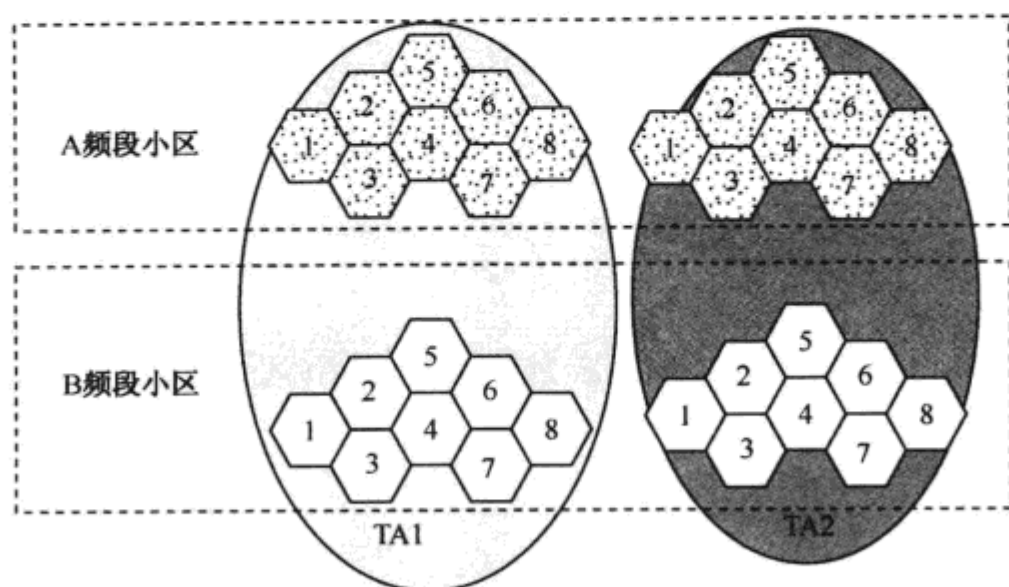


图 11-26 多频段组网，按地理位置划分 TA 边界

11.5.6 ZC 根序列规划

随机接入是用户在初始连接、连接重建、切换等过程中，重新恢复上行同步的必要过程。系统的随机接入过程需要尽量控制接入过程的不确定性，提高随机接入的成功率。

随机接入过程与业务连接建立后的动态调度的不同在于“随机”二字，含义包括两层：

- (1) 随机地选择前导序列；
- (2) 随机地获取无线资源。

随机接入前导是把 ZC 序列作为根序列，通过循环移位 (Cyclic Shift) 生成的。在 FDD-LTE 的模式下，可供分配的 ZC 根序列的索引号为 0~837，共 838 个；循环移位参数取值共有 16 种。每个小区分配的前导根序列索引最多为 64 个，小区内的 UE 使用的前导序列可以是随机选择，也可以由 eNodeB 分配。

随机接入 ZC 根序列规划目的是通过给小区合理地分配 ZC 根序列索引和循环移位参数，以确保相邻小区按照这些索引生成的前导序列不同，降低相邻小区使用相同前导序列的概率，减少在随机接入过程中可能产生的小区间的上行干扰。

由于可分配的 ZC 根序列的总数 (838 个) 是一定的，而且每个小区需要分配一组

ZC 序列索引（可以有 64 个），所以在一个较大型的网络中，ZC 根序列索引必须是复用的。相同 ZC 根序列小区之间的距离就是 ZC 根序列复用距离。在复用距离之内的小区，使用不同的 ZC 根序列；在复用距离之外，ZC 根序列可以重复使用。

在 ZC 根序列规划时，首先预留一部分索引号（如 800~837），以便给一些特殊场景，如高速小区，补盲、补热小区等分配；其余索引号（如 0~799）可以使用规划软件自动分配。

11.6 S1、X2 接口规划

S1 接口位于 eNodeB 和 SGW/MME 之间，物理实体是连接 eNodeB 和 SGW/MME 的光纤。S1 接口规划主要是流量规划，规划的思路类似于 TD-SCDMA/WCDMA 的 Iub 接口流量规划，如图 11-27 所示。

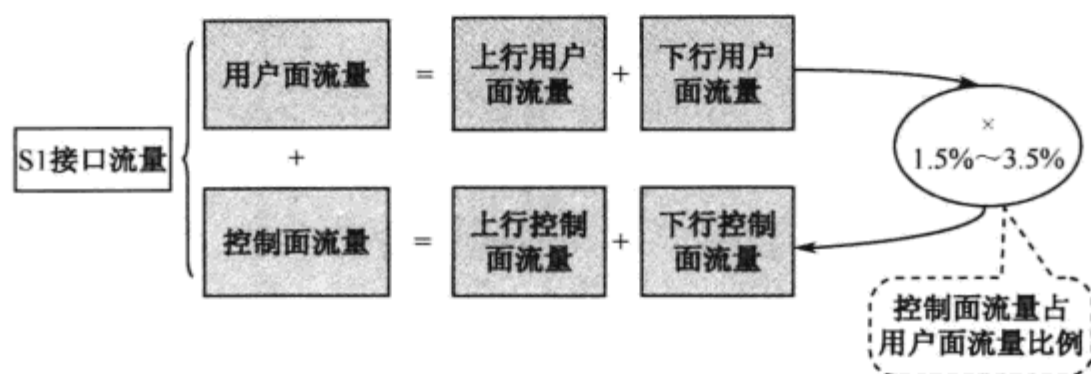


图 11-27 S1 流量规划基本思路

所有空中接口的业务量（用户面）都要经过 S1 口在 eNodeB 和 SGW/MME 之间传输。为了保证空中接口业务量的正确和及时地传输，在 S1 接口上还要产生相应的控制面信令流量。也就是说，S1 接口的流量包含用户面流量和控制面流量，如下式所示。

$$\text{S1接口流量} = \text{用户面流量} + \text{控制面流量} \quad (11-2)$$

S1 接口不仅要传送上行流量，还要传送下行流量，用户面流量和控制面流量分别有上下行之分，如下式所示。

$$\text{用户面流量} = \text{上行用户面流量} + \text{下行用户面流量} \quad (11-3)$$

$$\text{控制面流量} = \text{上行控制面流量} + \text{下行控制面流量} \quad (11-4)$$

控制面流量比用户面流量小很多。一般来说，控制面流量是用户面流量的 1.5%~3.5%。这个比例就是控制面流量占用户面流量的比例，可以用 p 来表示。这个比例与业务类型、网络环境有关，需要通过规划仿真来确定。于是，S1 接口流量可以用下式表示为

$$\text{S1接口流量} = (1 + p) \text{用户面流量} \quad (11-5)$$

用户面流量的大小取决于基站忙时用户数的多少及每用户忙时吞吐率,如图11-28所示。一般情况下,我们获取到的吞吐率都是忙时平均吞吐率,要考虑瞬时峰值的流量,就要考虑峰均比PAR (Peak to Average Ratio, 峰值流量与均值流量的比值),一般的S1接口的峰均比参考取值可为1.25~1.35。

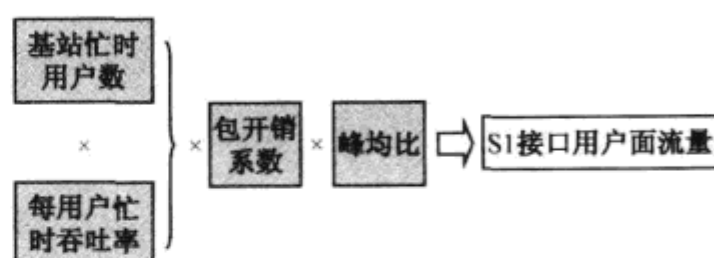
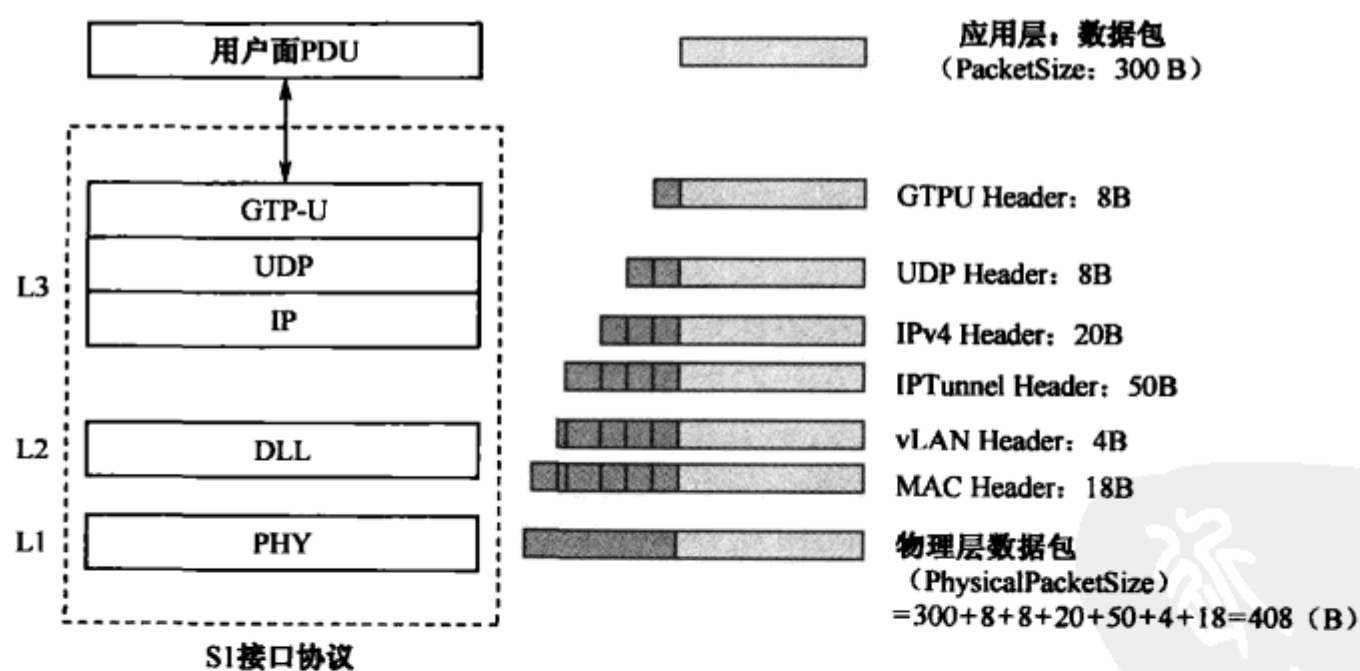


图 11-28 用户面流量决定因素

我们知道,应用层业务速率和物理层速率不一样。应用层的数据包经过层层打包,到了物理层,数据包增大了很多,如图11-29所示。正如我们要运送一批糖果,每个糖果要包糖纸,多个糖果放在一个袋子里,多个袋子又放在一个箱子里,最后放在车上运走。糖果本身叫做“净荷”,增加的这些包装就是“开销”。应用层要通过S1传送的数据包就是净荷,经过GTP-U、UDP、IP、MAC层会增加很多包头,这些包头就是开销。如下式所示。

$$\text{PhysicalPacketSize} = \text{PacketSize} + \text{GTPU Header} + \text{UDP Header} + \text{IPv4 Header} + \text{IPTunnelHeader} + \text{vLAN Header} + \text{MACHeader} \quad (11-6)$$



$$\text{包开销系数} = \text{物理层数据包} / \text{应用层数据包} = 408 / 300 = 1.36$$

图 11-29 S1 用户面数据包开销

物理层数据包大小与应用层数据包大小之比就是S1接口的用户面包开销系数K,如下式所示。

$$\text{包开销系数} K = \frac{\text{物理层数据包大小}}{\text{应用层数据包大小}} \quad (11-7)$$

包开销系数 K 的取值可以在 1.3~1.4 之间。

于是, 根据峰均比 PAR 和包开销系数 K , 物理层用户面流量可以表示为

$$\begin{aligned}\text{物理层用户面流量} &= K \cdot \text{应用层流量} = K \cdot \text{PAR} \cdot \text{应用层吞吐率} \\ &= K \cdot \text{PAR} \cdot \text{基站规划用户数} \cdot \text{单用户平均吞吐率}\end{aligned}\quad (11-8)$$

于是, 上、下行物理层流量分别可以表示为

$$\begin{aligned}\text{上行物理层流量} &= (1+p) \cdot \text{上行物理层用户面流量} \\ &= (1+p) \cdot K \cdot \text{PAR} \cdot \text{基站规划用户数} \cdot \text{单用户上行平均吞吐率}\end{aligned}\quad (11-9)$$

$$\begin{aligned}\text{下行物理层流量} &= (1+p) \cdot \text{下行物理层用户面流量} \\ &= (1+p) \cdot K \cdot \text{PAR} \cdot \text{基站规划用户数} \cdot \text{单用户下行平均吞吐率}\end{aligned}\quad (11-10)$$

综上所述, S1 接口流量规划就是给定基站规划用户数; 上下行单用户平均吞吐率; 峰均比 PAR; 包开销系数 K ; 控制面流量占用户面流量比例 p ; 分别求出上、下行物理层流量, 进而求出 S1 接口的总流量, 以此来确定 S1 接口间的光纤传输容量的需求, 如图 11-30 所示。

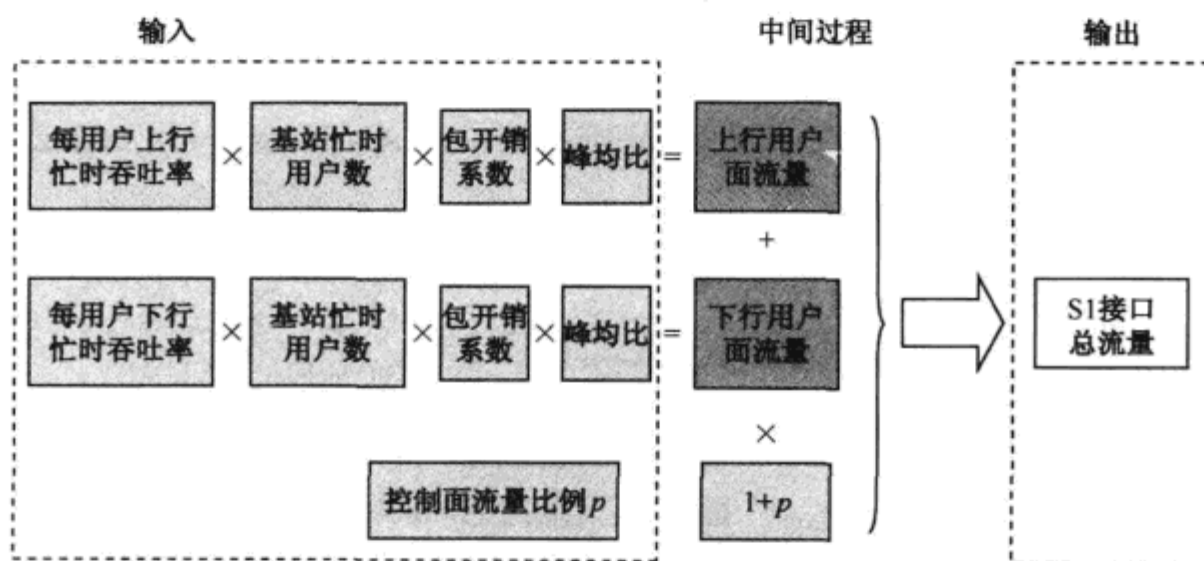


图 11-30 S1 接口流量规划的总思路

X2 接口是在切换时 eNodeB 之间转发业务数据的接口, 非常类似于 WCDMA/TD-SCDMA 中的 Iur 接口。

X2 接口的规划包括如图 11-31 所示的两个方面:

(1) X2 接口关系规划 (哪些 eNodeB 之间规划 X2 接口)。

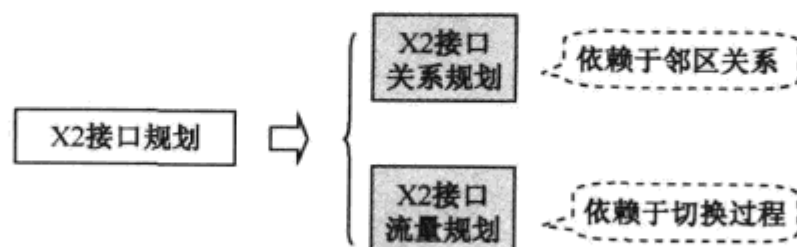


图 11-31 X2 接口规划的主要内容

(2) X2 接口流量规划 (传输容量需求是多少)。

X2 接口关系规划取决于可能直接发生切换关系的相邻基站,本质上是邻站关系。相邻基站可以通过邻区关系来寻找。因此,X2 接口关系依赖于 LTE 系统内邻区规划的结果,即必须在邻区规划完成后进行 X2 接口关系的规划。

已知邻区关系如何找到邻站关系呢?

要把小区归属的基站找出来,就可以确定基站之间的 X2 接口关系了。

一个基站可能有多个小区,对一个基站中的所有小区的邻区列表进行分析,找出这些邻区列表中小区归属的不同基站。

但协议中规定,每个 eNodeB 最多对应 16 个 X2 接口。按照邻区关系找到的 X2 接口关系,在密集城区、普通城区等场景可能多于 16 个,这就需要按照基站之间的距离、覆盖重叠程度排列优先级,删除优先级较低的接口关系。

X2 接口的流量取决于切换过程中转发的切换数据包的大小,切换的持续时间,切换次数的多少,以及伴随切换产生的控制面信令开销。

但是从切换角度分析 X2 接口的流量需求比较复杂,在实际工作中一般基于仿真或者经验来估算。X2 接口的流量相对于 S1 的流量来说小很多,一般为 2%~4%,误差不会太大,不会影响 X2 接口传输资源规划的结果。

第 12 章

共存与隔离——LTE 共站址建设

知识要点

由于站址资源的稀缺性，LTE 必然会考虑和已有无线制式的共站建设问题。多个无线制式共站，必然存在系统间干扰，系统间干扰都有哪些，如何规避必然是 LTE 共站址建设时首先要考虑的实际问题。

三吉皮皮国出现了一场风波，闹得举国震动。国王和接班人奥先生正在下棋，突然有两人报告：“有人影响我们办公，发生口角，打了起来！”接班人说：“新体系的办公人员应该和老体系的办公人员共享办公资源（共站址要求），以节约成本，加快进度，怎么能打起来呢？”

一人说道：“老体系的人说空间不足、电力不够，容不下我们！”（共站工程问题）

另一人说道：“进度是加快了，但是老体系的人员说话声音太大（发射功率大），和我们使用相同的扩音设备（同频），我们就没有话语权了，我们的话百姓听不清楚（共站干扰问题）。”

其实，对这两人说的的问题，接班人奥先生考虑了很久。新旧体系要共存，以节约成本。如果说办公资源不足，那么需要查实（工程勘测）后报批扩容方案。现在的问题是两个体系共享以后互相干扰的问题。

“‘亲密’但不能‘无间’啊！”国王感叹地说。

接班人奥先生，虽然新旧体系下两批人要共享资源，非常亲密，但是需要注意各自的私密空间，即两个体系内的人须保证一定的隔离度，避免相互影响。

于是，接班人奥先生开始推行“私密空间”保护法，要求认真核实每个人所需的“私密空间”，登记在册，要求“共享公共资源的时候，不得侵入对方的私密空间”（见图 12-1）。

“度尽劫波兄弟在，相逢一笑泯恩仇。”从此，两个体系的人又开始和谐共处了。

国王认为，促进两个体系共存协作，抑制相互影响，接班人奥先生的工作还是比较到位的。



图 12-1 共存与隔离

12.1 系统间干扰

随着无线制式的演进、发展，全球大多数无线运营商都面临着 2G、3G 等多个无线制式同时存在的复杂局面。很多运营商在 2G、3G 网络的建设上已经投入大量的资金，已有的用户规模已经非常庞大。多制式共存的局面将长期存在。

引入 LTE 网络后，同样需要耗费数以百亿元的巨大投入，尤其是机房、电源、传输、抱杆、天线等基础资源占用一半以上的建设成本。

由于很多运营商需要新建站址，站址资源稀缺是这些运营商面临的共同问题，理想站址是很多运营商都想争夺的制高点。

如果能够充分利用 2G、3G 网络的现有资源，实现 LTE 与以往无线制式的共站址建设，就可以节约大量的建设成本，同时可以加快建网进度。在两个无线制式网络拓补结构接近、覆盖水平均衡的前提下，可以考虑共站址。

LTE 与其他制式共站址要关注的主要问题有两个：

- (1) 共站工程问题；
- (2) 共站干扰问题。

共站工程问题，主要涉及机房、电源、接地、传输、铁架、抱杆等基础建设资源的共用和改造问题。其中，机房供电、传输容量、天馈共用三个因素是 LTE 共站址建设的关键。

在 LTE 与以往无线制式共站址建设之前，须先进行相应的工程勘测和工程改造，清晰而明确地回答下面的“LTE 共站工程六问”：

- (1) 机房是否有足够的剩余空间、足够的承重能力，满足新增 LTE 设备的要求？
- (2) 机房空调是否能满足新增设备的制冷要求？
- (3) 已有的电源及其配套设备是否与新增 LTE 设备兼容，蓄电池容量是否满足新设备入网？
- (4) 接地端子是否有空余，是否有接触不良的端子需要整改？
- (5) 传输容量是否足够？

LTE 支持 20 MHz 带宽的高速数据业务，对传输容量的需求远远超过现有 2G/3G 制式，所以 LTE 与以往无线制式共站址后，传输容量需要重新规划，传输网可能需要较大的改造。

- (6) 天馈系统是否可共用？

天馈系统除了天线、馈线之外，还有用来安装天线、馈线路由的铁塔、楼顶的增高架等配套设备。天馈本身的共用需要满足 LTE 所在频段的要求，多数场景可以共用，但是必须考虑不同无线制式之间的天线隔离度问题。如果不满足天线之间的隔离度要求，需要进行相应的工程改造，如更换天线，增加抱杆或者增高架等。

共站干扰问题是 LTE 与其他无线制式共站址建设的关键问题。

协议规定，LTE 支持的频谱资源范围较大，有 700 MHz、900 MHz、1 800 MHz、2 100 MHz 和 2 600 MHz 等诸多频段，这些频段与现有 2G/3G 频谱非常接近。LTE 与 2G/3G 共站址，也不可避免地存在共站址干扰。随着频谱资源越来越紧张，多种无线制式频谱资源再分配、再利用的情况很多，这样会导致共站址干扰问题更加突出。

当多个基站天线共用一个天面平台时，天线之间产生的干扰是 LTE 与以往无线制式共站时，影响网络质量的一个重要因素。共站干扰抑制技术是 LTE 共站址建设的关键问题。对于可能出现共站址干扰的场景，在规划设计时需要提出预警，制订相应的防范措施。

12.1.1 干扰三要素

干扰的英文名称为“Interference”，有冲突、妨碍的意思。既然是冲突、妨碍，就是双方的事情；单方面的纠结是自身的问题，不是干扰。

干扰的双方一个是产生干扰的干扰源，一个是易被干扰的敏感电子器件。干扰源产生的干扰通过某一传播途径，到达接收方，对其敏感电子器件形成干扰。

因此，干扰发生影响的基本要素有三个：干扰源、传播途径、被干扰源，如图 12-2 所示。有些类似传染病发生的三个要素：传染源、传播途径、易感人群。

干扰源，指产生干扰的元件、设备。产生干扰信号的干扰源可能对其他电子系统的工作性能造成严重影响，类似传染源产生的传染病菌对他人的健康造成影响。

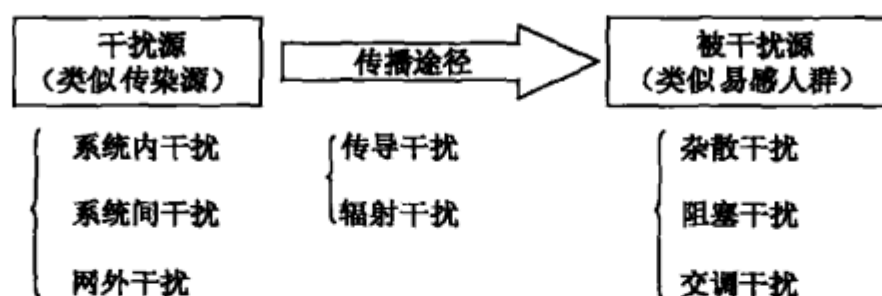


图 12-2 干扰三要素

从干扰源所在的位置，可以将干扰分为系统内干扰、系统间干扰、网外干扰。

系统内干扰是指同一无线制式内部基站之间、基站和终端之间、终端之间发生的干扰。

系统间干扰是指不同无线制式设备间的干扰，多制式共站址干扰就是属于系统间干扰。

网外干扰就是指非无线制式的电子设备、无线电波产生的干扰，如军队政府的干扰源、雷电、宇宙射线等。

传播途径，是指从干扰源到被干扰源的干扰传播通路或媒介。

从干扰的传播途径上，干扰可分为：传导干扰、辐射干扰。传导干扰是指通过导线传播的干扰，辐射干扰是通过空间辐射传播的干扰。

被干扰源，是指容易被干扰的电子元件，如同身体免疫能力差、易受传染病毒侵扰的易感人群。被干扰源也是由于线性特性不好，易受电磁干扰影响的电子设备，如放大器、模/数和数/模转换器等。

从被干扰源受干扰的性质，可将干扰分为杂散干扰、阻塞干扰、交调干扰等。

杂散干扰，属于一种加性噪声干扰，干扰设备发射的带外信号没有经过足够的衰减，在接收机工作频段内形成对有用信号的同频干扰，导致接收机的信噪比恶化，灵敏度下降，如图 12-3 所示。

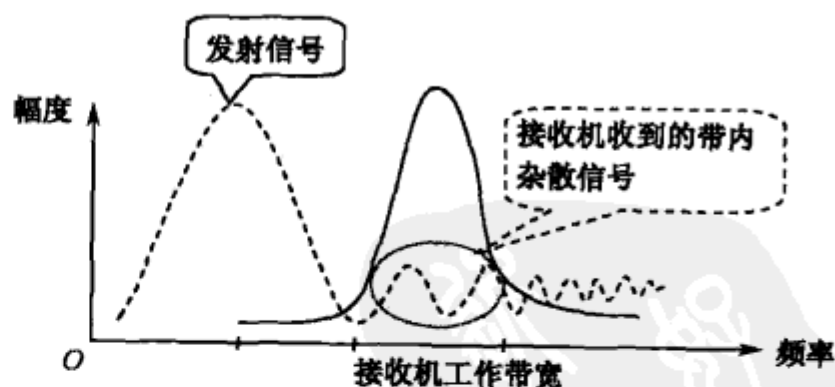


图 12-3 杂散干扰

阻塞干扰，当强干扰信号进入接收机，接收机的功率超过允许的最大功率电平，导致接收机内的有源器件（如功放）饱和；进入非线性区，引起的接收机饱和失真，难以正确接收有用信号。产生阻塞的主要原因是接收机器件的非线性，如图 12-4 所示。

交调干扰是指两个以上的单频信号，通过某个非线性设备或器件时，在时域上产生了失真，在频域上产生了输入端所没有的新的频率分量，这个新的频率分量是输入频率

分量的线性组合。也就是说，交调干扰使非线性系统的输入信号的能量转移到一些新的频率分量上，如图 12-5 所示。

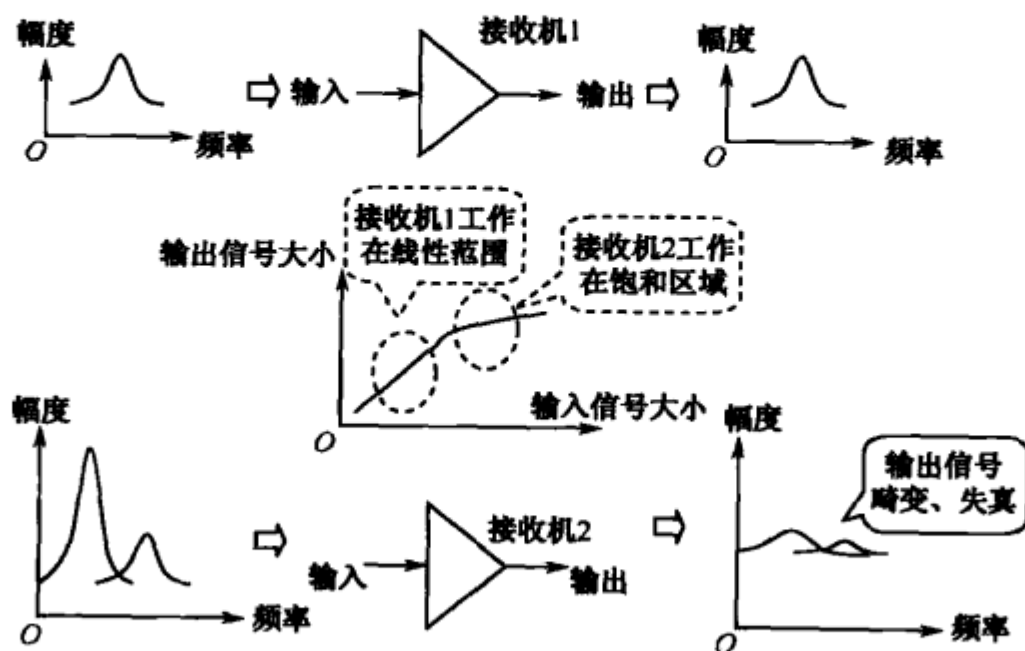


图 12-4 阻塞干扰导致饱和失真



图 12-5 交调干扰

12.1.2 共站干扰模型

在多制式共存的组网环境中，一个系统的发射机发送的信号对于另外一个系统的接收机来说全是干扰。发射机在设计的时候，尽量避免发射工作带宽之外的信号；在网络性能允许的时候，工作带宽范围内的信号也要以尽量少的功率发射，以免对其他系统的接收机造成影响，即发射机要具有不发射超过某一限度的电磁干扰的能力。

另外一方面，接收机性能不好的时候，会接收到很多影响性能的其他系统的信号，极端情况下，会导致系统无法正常工作。因此接收机要具有抵抗给定的共站址电磁干扰的能力。

一个无线系统的发射机对其他系统接收机的干扰模型如图 12-6 所示。干扰分析要关注的是发射机工作频带内外的发射性能指标及接收机工作频带内外的接收性能指标。

协议上一般规定了这些性能指标的基本要求。

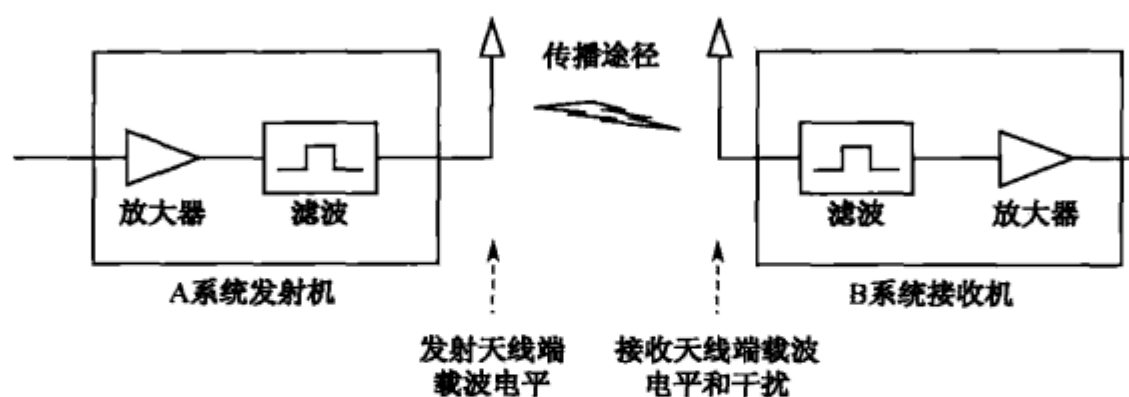


图 12-6 系统间干扰分析模型

发射机发射的某一频率信号，经过空间传播，到接收后形成的杂散、阻塞、互调干扰信号，如果小于协议上规定的接收机允许接收的信号指标，就可以认为 A 系统发射机对 B 系统接收机不构成干扰。

无线系统是双向交互系统，由终端和基站组成。终端和基站都是既有发射机，又有接收机。LTE 和其他无线系统间共站址时，有 LTE 对其他无线制式的干扰，如图 12-7 所示；也有其他无线制式对 LTE 的干扰，如图 12-8 所示。

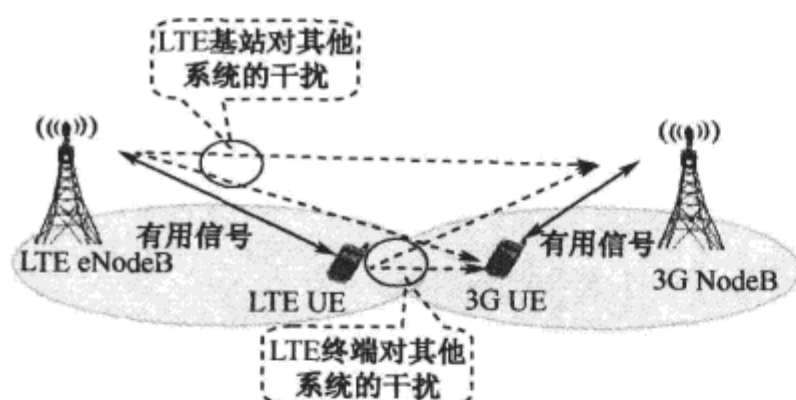


图 12-7 LTE 对其他无线制式的干扰

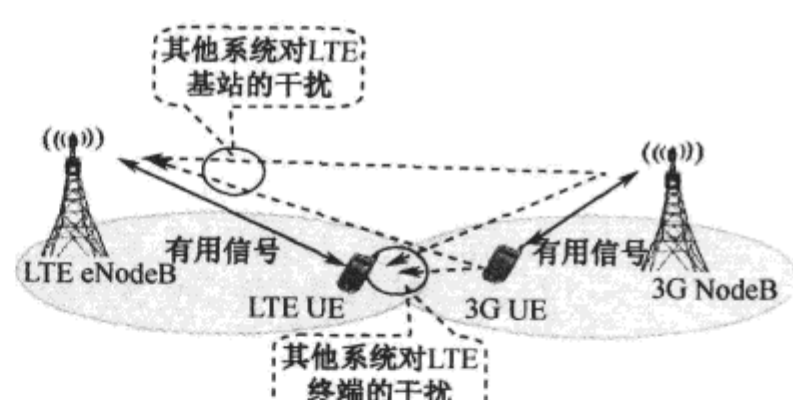


图 12-8 其他无线制式对 LTE 的干扰

LTE 和其他无线制式间共站址干扰，从产生干扰的设备来看，主要有基站与终端间干扰、终端之间干扰、基站之间的干扰，如表 12-1 所示。基站和终端之间、终端之间的共站址干扰程度低，发生概率低，因此在分析 LTE 共站址干扰的时候，基站间的干扰是共站址干扰分析的主要内容。

12.1.3 LTE 共站干扰

LTE 系统可能在很长一段时间，将与 GSM、UMTS、CDMA 等其他无线制式共存。因此，在 LTE 建网初期，需要分析所用频段的 LTE 与异系统共存时的干扰情况。

表 12-1 LTE 共站址干扰的主要形式

干扰形式		基站和终端之间	终端之间	基站之间
干扰方向	LTE 对其他无线系统的干扰	LTE 基站对其他系统终端; LTE 终端对其他系统基站	LTE 终端对其他系统终端	LTE 基站对其他系统基站
	其他无线系统对 LTE 的干扰	其他系统基站对 LTE 终端; 其他系统终端对 LTE 基站	其他系统终端对 LTE 终端	其他系统基站对 LTE 基站
干扰性质	干扰特点	距离较远;地面障碍物较多	终端的发射功率较低,位置的随机性很大;如果两个终端靠得过近,干扰就比较严重,需在网络侧采用资源调度和功率控制的方法来抑制干扰	基站间的位置固定,天线有一定的挂高,发射功率高,空间传播环境好,干扰程度较大
	干扰大小	干扰较小	相隔较远的终端之间干扰较小	基站间的干扰是共站址干扰分析的主要矛盾

与其他无线制式相比, LTE 可使用的频点较为分散, 所以面临的共站环境要比其他无线制式复杂。不同无线制式可能与不同频段的 LTE 产生较大的共站干扰的无线系统如表 12-2 所示。

国内无线系统可能使用的频点和国际上划分的频点略有差异。

举例来说, 中国移动建设 TD-LTE 系统, 室内使用的频点为 2 350~2 370 MHz; 室外使用的频点为 2 570~2 620 MHz 频段。可能与 TD-LTE 共存的无线系统如表 12-3 所示。

表 12-2 与 LTE 共存时可能产生较大干扰的无线系统

LTE 所用频点	LTE 共存干扰较大系统	重点分析频段 (MHz)
700 MHz	GSM	850
	CDMA	800
	UMTS	850
900 MHz	GSM	900、850
	UMTS	900、850
	CDMA	800
1800 MHz	GSM	1 800、1 900
	UMTS	1 800、1 900
	CDMA	1 900
	DAMPS	1 900
2 100 MHz	GSM	1 900
	UMTS	1 900、2 100

续表

LTE 所用频点	LTE 共存干扰较大系统	重点分析频段 (MHz)
2 100 MHz	CDMA	1 900
	DAMPS	1 900
2 300 MHz	UMTS (WCDMA、TD-SCDMA)	1 900、2 100、2 300
	WLAN	2 400
2 600 MHz	UMTS (WCDMA、TD-SCDMA)	2 100、2 300
	WLAN	2 400

表 12-3 可能与 TD-LTE 共存的无线系统

运 营 商	无 线 制 式	工 作 频 段
中国移动	GSM900	890~909 MHz, 935~954 MHz
	DCS1800	1 710~1 730 MHz, 1 805~1 825 MHz
	TD-SCDMA	1 880~1 900 MHz (F 频段); 2 010~2 025 MHz (A 频段); 2 320~2 350 MHz (E 频段)
中国联通	GSM900	909~915 MHz, 954~960 MHz
	DCS1800	1 745~1 755 MHz, 1 840~1 850 MHz
	WCDMA	1 940~1 955 MHz, 2 130~2 145 MHz
中国电信	CDMA 1x	825~835 MHz, 870~880 MHz
	CDMA EV-DO	1 920~1 935 MHz, 2 110~2 125 MHz
各运营商	WLAN	开放频段, 2 400~2 483.5 MHz

对这个频段的 TD-LTE 系统影响较大的无线系统是 TD-SCDMA、WCDMA、CDMA EV-DO、WLAN。其中, WLAN 和 TD-LTE 共站干扰尤为严重。

12.2 共站干扰规避

12.2.1 干扰规避手段

控制传染病蔓延态势的思路是什么? 不外乎从控制传染病的三个要素上寻找思路: 控制传染源, 切断传播途径, 提高易感人群的免疫力。

同样道理, 控制共站干扰影响的基本思路也是抑制干扰发生作用的三要素: 抑制干扰源, 切断干扰传播路径, 提高被干扰源敏感器件的抗干扰性能。

抑制干扰源的手段有：提高发射机的性能，增加发射端滤波器；切断干扰传播途径的手段有：调整频点、设置保护带宽、增加隔离度；提高被干扰源敏感器件的抗干扰性能的主要手段：提高接收机的性能。下面分别介绍。

（1）提高发射机、接收机性能。

提高发射机的性能，就是要求发射机只发送工作带宽内的有用信号，而不产生那些影响网络性能的杂散信号、交调信号等。接收机性能不好，对带外的杂散信号、交调信号抑制度不够，同时又很容易被其他系统的电平较高的信号阻塞，从而失去工作能力。在设计发射机和接收机的时候，选用线性度较高的射频器件，如滤波器、放大器；在安装的时候，确保器件接口之间稳定可靠，避免附近的金属物体对发射机、接收机的射频性能造成影响。

（2）调整频点、设置保护带宽。

两个相邻、相近频率的信号容易产生较大程度的相互影响，调整系统的工作频点，在不同系统的工作频点间设置保护带宽，可以降低多系统的共站干扰，提高各系统的网络性能。但是设置保护带，也会导致一定程度的频率资源浪费。

（3）发射端、接收端增加滤波器。

发射端增加滤波器，尽量避免发射端产生带外杂散、互调信号；接收端增加滤波器，减少对带外阻塞干扰、带外交调干扰、带外杂散信号的接收，相当于提高了系统的免疫力和抗干扰能力。

（4）增加共站系统的隔离度。

“距离产生美”，两个人离开一定的距离，可以减少彼此的影响，增加彼此的思念。共站系统之间保证一定的隔离度，可以降低共站干扰，增加共站系统的性能。隔离度有两种：射频器件的端口隔离度、无线系统天线的空间隔离度。

在室内分布系统中多个系统共用天馈的情况下，会用到很多合路器，一定要选择端口隔离度符合要求的射频器件，避免产生传导干扰。

对于室外共站的无线系统来说，通过增加天线之间的空间隔离度来抑制共站干扰。全向天线，增加空间隔离度只能通过调整天线的挂高和位置；定向天线，增加系统间的空间隔离度，除了可以调整天线的挂高和位置，还可以调整定向天线的方向角和下倾角。

在实际工作中，不同运营商的无线系统的共站干扰，很难通过提高发射机性能、调整发射频点，增加发射滤波的手段来降低，增加异系统间的隔离度，尤其是空间隔离度，往往是可实施的方法。

12.2.2 空间隔离需求

在 LTE 建设期间，增加天线之间的空间隔离度是抑制共站址干扰的可实施方法。问题的关键是：隔离度需求有多大？天线之间距离多远？

隔离度需求由两个因素决定：

- (1) 发射端发送干扰大小；
- (2) 接收机允许接收的最小干扰。

隔离度需求的计算思路如下式所示：

$$\text{隔离度需求 (dB)} = \text{发射端发出干扰 (dBm)} - \text{接收机允许的最小干扰 (dBm)} \quad (12-1)$$

这里的干扰种类包括杂散、阻塞、交调等多种，协议中不同种类的干扰所涉及的指标都有规定。实际厂家实现的设备性能一般都宣称会优于协议中规定的指标。

杂散干扰、阻塞干扰、交调干扰都有隔离度的要求，在实际工程中，选择隔离度要求最大的值作为工程参考值。

接收机允许的最小干扰，往往与灵敏度的允许下降值相关。灵敏度允许下降得越多，可以接收的最小干扰就越大。

协议中规定的发射机性能指标及接收机性能指标往往是某一频点、某一带宽的数值；在计算隔离度的时候，需要注意发射机对接收机在什么频率位置进行干扰，单位带宽干扰的大小是多少。

LTE 就是频点分散、带宽可变的系统。LTE 的不同频点、不同带宽，与其他系统的共站干扰隔离度需求是不一样的。在计算 LTE 共站隔离度需求的时候，需要明确工作的频点和带宽。

异系统的隔离度需求有了以后，异系统天线之间的空间隔离度就可以确定了。系统隔离度与空间隔离度的区别如图 12-9 所示。系统隔离度要求减去射频器件损耗，就是空间隔离度要求。空间隔离度要求考虑了天线增益的影响。

空间隔离度有了，天线之间的距离也就可以确定了。天线隔离有三种方法：水平隔离、垂直隔离、倾斜隔离。

距离保证以后，再调整天线方向角、下倾角，可以进一步增大空间隔离度，降低系统干扰。

水平隔离如图 12-10 所示。

天线水平间隔距离与隔离度之间的关系如下式所示：

$$D_H = 22 + 20 \lg \left(\frac{d}{\lambda} \right) - (G_t + G_r) \quad (12-2)$$

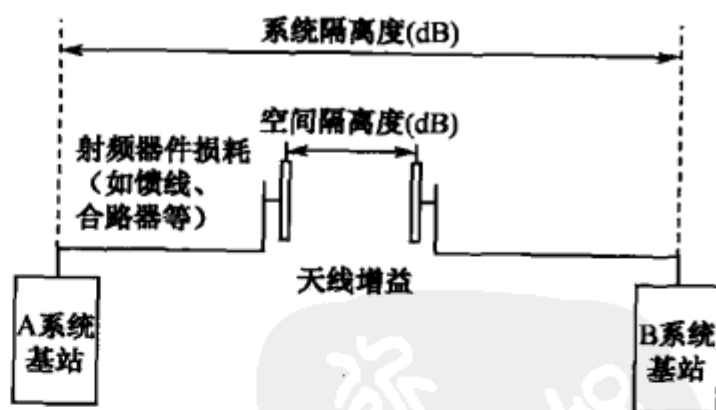


图 12-9 系统隔离度与空间隔离度

其中, D_H 为水平空间隔离度要求; d 为天线水平方向的间距; λ 为载波中心频点波长; G_t 为发射天线在辐射方向上的增益; G_r 为接收天线在辐射方向上的增益。

垂直隔离如图 12-11 所示。

天线垂直间隔距离与隔离度之间的关系如下式所示:

$$D_V = 28 + 40 \lg \left(\frac{d}{\lambda} \right) \quad (12-3)$$

其中, D_V 为垂直空间隔离度要求; d 为天线垂直方向的间距; λ 为载波中心频点波长。

由于一个楼宇的天面面积有限, 往往水平隔离不能满足隔离度要求。垂直隔离又要求抱杆的长度太长, 有时也无法满足隔离度要求。在多数场景, 需要综合利用天面水平范围和抱杆或增高架的垂直距离, 实现倾斜隔离, 如图 12-12 所示。

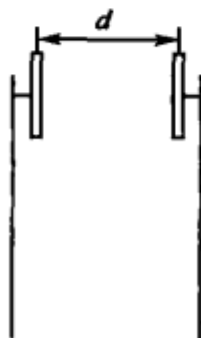


图 12-10 水平隔离



图 12-11 垂直隔离

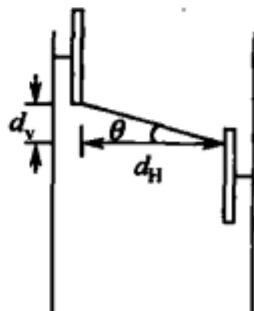


图 12-12 倾斜隔离

天线倾斜隔离时, 隔离度是水平隔离、垂直隔离的综合效果, 如下式所示:

$$D_s = D_H + (D_V - D_H) \times (\theta/90^\circ) \quad (12-4)$$

其中, D_s 为倾斜空间隔离度, D_H 为水平空间隔离度, D_V 为垂直空间隔离度。 θ 为天线之间的斜线与水平线的夹角。

12.2.3 TD-LTE 共站址建设

未来的 LTE 与 2G、3G 共站址建设, 是在站址资源日趋紧张、建站成本日益增高条件下的必然选择。

但从网络性能上讲, LTE 与 2G、3G 能够共站址的两个前提是:

- (1) 规划的覆盖范围相同;
- (2) 系统间的干扰可控制。

在实际工程中, 并不是每个站址都满足这两个条件, 共站址比例能够达到 90% 就很不错了。

以 TD-LTE 与 GSM (2G)、TD-SCDMA (3G) 共站址为例简述如下。

TD-LTE 可能使用的频段是室内为 2 350~2 370 MHz, 室外为 2 570~2 620 MHz,

这个频段比 GSM、TD-SCDMA 目前所使用的频段都要高；也就是说，在同样的无线环境下，LTE 的路径损耗会大一些。于是，在同样的上行发射功率或下行发射功率下，LTE 的覆盖范围会小一些，站点密度会大一些。

随着 GSM 网络发展不断成熟，话务需求不断增加，数据业务的爆发式增长，使 GSM 网络越来越重载。在不断增站扩容的情况下，GSM 网络的小区半径进一步缩小；尤其是在密集地区或城市话务热点，GSM 的小区半径非常小，已经接近了 TD-LTE 在网络初期的覆盖半径要求。

TD-SCDMA 的 CS64k 业务是小区半径最小的业务，只要满足 CS64k 业务的覆盖要求，TD-SCDMA 的其他业务的覆盖是没有问题的。在密集城区或城市话务热点，TD-SCDMA 的 CS64k 业务覆盖良好的区域，TD-LTE 直接以叠加方式实现共站址，在初期也是可行的。

综上所述，在 TD-LTE 发展的初期，在密集地区或城市话务热点，TD-LTE 与 GSM、TD-SCDMA 实现共站址建设，从覆盖性能方面来讲，是完全可能的。随着 TD-LTE 的进一步发展，可以根据需要增加部分 TD-LTE 站址。

对 TD-LTE 系统影响最大的无线系统是 TD-SCDMA、WCDMA、CDMA EV-DO 和 WLAN。

我们首先分析 TD-LTE 系统与异系统的共站隔离度需求，然后确定天线之间的空间隔离需求。

系统的频带越宽，越容易受到其他系统的干扰影响。由于 TD-LTE 的带宽比其他系统的带宽大很多，因而 TD-LTE 与其他异系统共站时，其他系统对 TD-LTE 的干扰程度要远远高于 TD-LTE 对其他异系统的干扰程度。

经过分析，在其他系统对 TD-LTE 的共站干扰中，杂散干扰在多数场景下是主要方面。也就是说，TD-LTE 与异系统的干扰隔离度的需求，主要取决于异系统对 TD-LTE 的杂散干扰影响。

TD-LTE 与异系统的干扰隔离度参考取值如表 12-4 所示。这里的隔离度需求是室外场景下，在 TD-LTE 带宽取 20 MHz，灵敏度允许下降 0.1 dB 的条件时，按照某厂家宣称的技术指标（非协议指标，设备实际指标和协议规定指标存在差异）分析出来的。在实际工程中仅供估算参考，精确的隔离度需求值还须结合实际情况进一步计算。

表 12-4 TD-LTE 与异系统共存的干扰隔离度需求（仅供参考）

	DCS1800	WCDMA	CDMA EV-DO	TD-SCDMA (A 频段)	WLAN
隔离度需求 (dB)	46	31	87	31	87

考虑一定的射频器件、馈线损耗，将系统间隔离度转变为对天线空间隔离度的要求。

由于完全依赖天线水平隔离，会对天面的长度要求过于苛刻，使得站址选择困难，所以采用水平+垂直的倾斜隔离方法。采用 65° 定向天线，平行放置，天线增益为 18 dBi 时，TD-LTE 与异系统共存的天线空间距离要求如表 12-5 所示。

表 12-5 TD-LTE 与异系统共存的空间距离要求（仅供参考）

空间隔离	DCS1800	WCDMA	CDMA EV-DO	TD-SCDMA (A 频段)	WLAN
水平距离 (m)	116	8.3	203	0.4	54
垂直距离 (m)	2.7	0.74	3.6	0.17	2.3

在不同的天线增益、天线方向角、不同的馈线损耗、不同的无线环境，空间距离的需求会有所不同，这里的数值仅供参考。

可以通过增加滤波器及增加馈线损耗等办法，来降低对水平、垂直距离的天线空间隔离需求。

举例来说，如在 DCS1800 发射端增加 30 dB 的滤波器，TD-LTE 与 DCS1800 的水平隔离距离可以从 116 m 减少到 3.7 m，垂直隔离距离可以从 2.7 m 减少到 0.5 m，这样就大大减少了对共站址天面大小的需求，也减少了对天线抱杆或增高架高度的需求，便于工程的实施。

新华书店
PDC

防腐与养生——LTE 网络优化维护

知识要点

LTE 网络建成以后，一定会出现很多设备故障类的问题和网络性能类的问题。保证 LTE 网络持续地、健康高效地运行，是 LTE 网络优化的重要工作。

如何看待 LTE 网络优化工作？LTE 如何实现自组织自优化功能？如何提升 LTE 网络业务质量？如何保证 LTE 网络与其他网络的协同配合？

以上这些内容是无綫工程师在 LTE 网络优化维护过程中常见的重要问题。

新物流体系的高速运转，并没有冲昏三吉皮皮国领导层的头脑。面对组织内官僚主义滋生，局部范围内发生的不作为（无覆盖）、办事效率低下（业务速率低）、互相扯皮、相互推诿（干扰）、百姓满意度下降的这些问题，接班人奥先生非常重视，亲自组织“反腐倡廉的工作”（见图 13-1）。



图 13-1 组织反腐

有谋士称：“组织反腐，如同看病。治病讲究透过现象看本质，分三步走：摸清症状、分析病情、对症下药。只要是吃五谷杂粮的，没有不生病的。同样的病，不同的医生有不同的视角。同样是不想吃饭，中医诊断为脾虚，西医诊断为胃炎，心理学专家说是抑郁。几个视角综合起来分析，就可能找到病因，给出正确的解决方案。”

有谋士称：“组织反腐，有四个层次，需要从底层到高层进行核查和处理。最基本的是，组织内每个人作风是否正派；在这之上，部门之间的协作是否存在问题；再上一个层次，就是各种政务处理流程是否合理；最高境界就是老百姓是否满意的问题。”

还有谋士称：“组织反腐，如同个人养生，首先增强自身的免疫力。人的健康包括生理健康、心理健康，生理健康的基础是机体的免疫力；心理健康的基础是良好的心态。免疫力强的人，即使偶感风寒，也无须看病，病可以不治而愈；心态良好的人，即使碰到痛心的人和事，也无须劝慰，心情可以逐渐平和。这就是生理和心理的自愈能力。”

接班人奥先生宣布：“千淘万漉虽辛苦，吹尽狂沙始到金。我们一定不辞辛苦，增强组织自身的防腐抗腐能力，找到组织腐败产生的根源，提升老百姓的满意程度，最终让我们的物流体系成为世界上最优秀的物流体系。”

13.1 LTE 网络优化的总体思路

LTE 在很多优化思路、优化流程、优化手段上与以往无线制式“大同小异”。

“大同”的地方包括但不限于以下几点：同样也会碰到覆盖空洞、容量不足、干扰难以抑制、切换失败等问题，同样也会碰到不同场景的规划优化问题；

但“小异”的地方首先是 LTE 的“免疫力”更强，即在网络发生问题的时候，自愈能力很强；再次与其他制式相比，LTE 在业务质量提升、多网互操作等问题的优化非常重要，而且有其特殊的考虑。本章不介绍所有的无线网络优化知识，只介绍 LTE 优化的总体思路以及重点工作。

13.1.1 三个步骤

无线网络也是多个网元协同工作的系统，也有“生老病死”，我们称为生命周期。无线网络也会经历诞生、成熟、故障、退服的全部过程。网络有问题，就需要给网络看病，技术上称为“优化”。无线网络优化需要透过现象看到本质，解决问题的过程也

分如图 13-2 所示的三步：

(1) 收集网络运行数据。

网络运行数据包括：路测数据、话统数据、测量报告数据、单用户跟踪数据、计费数据，等等。

(2) 分析网络问题。

分析网络问题的方法有：地理化显示法、最典型问题法、分段定界法，等等。

把弱覆盖问题、干扰问题、掉话事件等问题进行地理化显示，可以分析出频繁发生问题的区域；

关注最典型问题，优先解决覆盖最差的几个小区；问题最多的几个用户或终端；导致网络问题产生的最典型的几个原因，逐渐完成网络性能的提升。

分段定界法，根据网络问题发生的范围不同，初步判断问题发生的网络位置，然后逐段排除，最后锁定目标。整个过程如同搜捕嫌疑犯一样。

(3) 制定方案解决网络问题。

解决网络问题有两个途径：调整工程参数、优化无线参数。

工程参数，又称射频（Radio Frequency，RF）参数，包括天线工程参数和站点工程参数。RF 参数调整的优先级从高到低分别是：天线倾角、天线方向角、天线挂高、天线位置、站点位置、新增站点。

无线参数，是指控制信道、业务信道的发射功率、切换门限、迟滞、时延等与移动性相关的参数，以及小区边缘频率复用模式、ICIC 算法等与无线资源管理相关的参数。

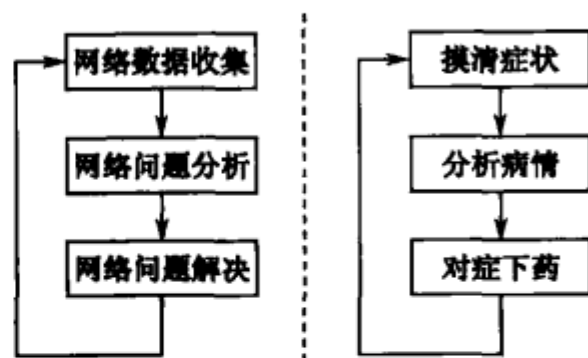


图 13-2 无线网络优化的三步走策略

13.1.2 三个视角

看无线网络有不同的视角。

有三个同事为了一个网络优化问题，争得不可开交、面红耳赤。甲说：“你说得不对，这是 TD-SCDMA 的问题！”乙说：“你说得才不对呢，这是室内覆盖的问题！不信，你问一下丙！”丙说：“你们俩都不对，这是语音业务的问题！”（见图 13-3）。

哎，人类出现的很多矛盾就是由于看问题的不同角度所造成的。

其实，这三个人对这个网络优化问题的看法都对，但都不全面。甲是把网络问题按照无线制式的不同进行区分的；乙则是把网络问题按照使用场景进行划分；丙则是从业务性能的角度来看网络问题的，如图 13-4 所示。

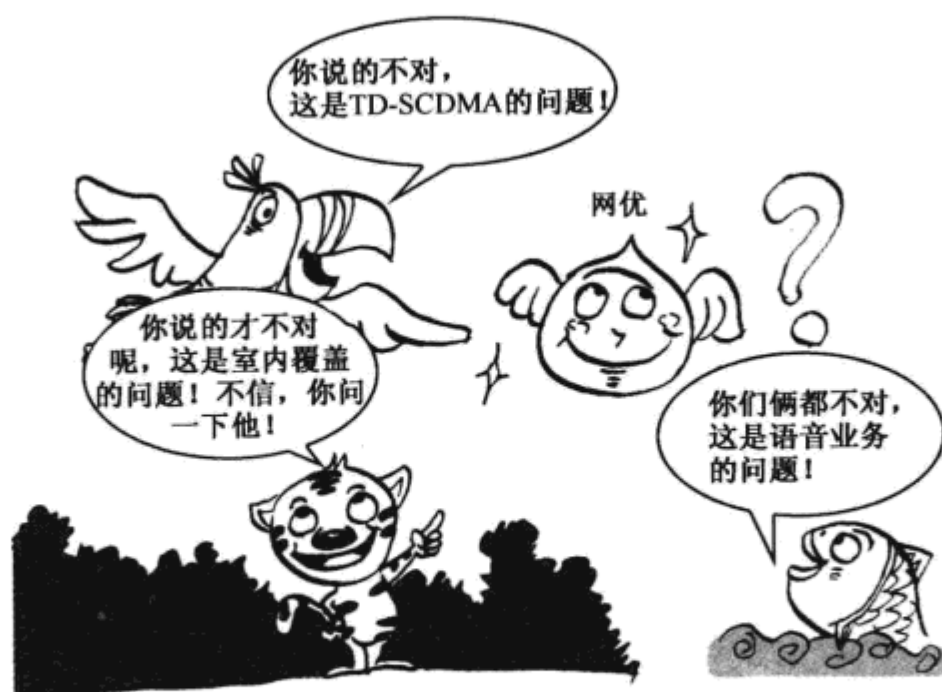


图 13-3 看网络优化问题的不同角度

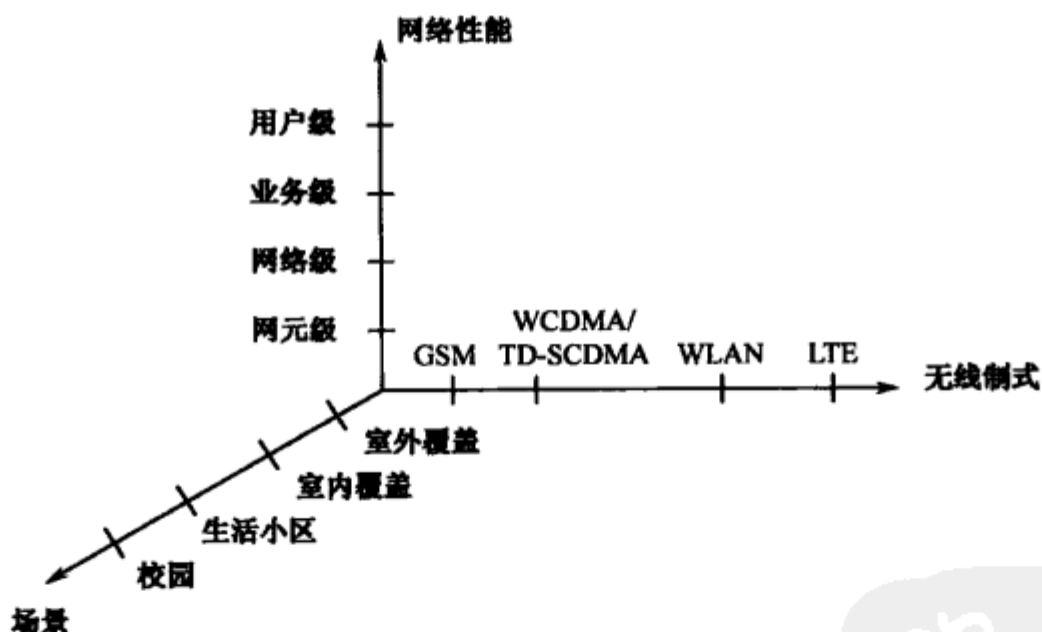


图 13-4 无线网优技能的三个视角

从无线制式的角度来看，无线网优的问题可以分为 GSM、WCDMA/TD-SCDMA、WLAN、LTE 等。不同无线制式，在现阶段面临着不同的重点网络优化问题。

随着 GSM 网络的成熟，用户数不断增长，现在的 GSM 无线利用率不断升高，越来越成为重载网，面临着频点不足、干扰上升的问题。

WCDMA/TD-SCDMA 还处于网络发展的初级阶段，连续覆盖困难、深度覆盖不足，这是现阶段网络优化主要应该关注的问题。

WLAN 适用于话务热点场景，负责低价值大流量的数据业务的话务吸收工作。现阶

段主要面临着如何精确选择话务热点的问题。

LTE 网络一定是在多种无线制式的环境下建设，必然涉及多制式协同规划、协同优化的问题。LTE 网络如何与其他无线制式在覆盖、容量、干扰、互操作方面协同考虑，是我们在建设这个网络之前，就应该首先考虑的问题。

从无线网络建设的场景上来看，无线网络优化可以分为室内覆盖、室外覆盖、室内外协同覆盖。

具体来说，室内覆盖场景包括：酒店、写字楼、商场、高层住宅、地铁、隧道等；室外覆盖场景包括：密集城区、普通城区、高速铁路/公路、山区、郊区、农村、海面、沙漠等；室内外协同场景包括：校园、生活小区等。

在 LTE 的建网初期，数据业务的话务热点是优先建设的场景，如酒店、写字楼、城市密集城区、校园等地方。

无线网络优化的第三个视角就是网络整体性能的角度，这个角度又可分为四个层次，下面加以介绍。

13.1.3 四个层次

从无线网络性能的角度上来看，无线网络优化可以分为如表 13-1 所示的四个层次。

表 13-1 无线网络优化的四个层次

用 户 级	VIP 用户、投诉用户、普通用户
业务级	语音业务优化、数据业务优化
网络级	接入成功率、接入时延、掉话率、切换成功率、误块率
	覆盖、容量、干扰、切换
网元级	天线、馈线、射频器件、RRU、BBU、RNC/BSC

最低一个层次是网元级。天线、馈线、射频器件、RRU、BBU、RNC/BSC 的故障都属于网元级的网络优化问题。网元级网络问题的解决是无线网络优化的首要工作，是网络优化的基础工作。

在网元级之上，就是网络级的网络优化问题。网络级优化又分两个层次：覆盖、容量、干扰、切换；在此之上则是 KPI 优化：接入成功率、接入时延、掉话率、切换成功率、误块率等。网络级优化工作是无线网络优化的重点工作。

在此基础上，才开始业务级的优化，可分为两大方面：语音业务优化、数据业务优化。

在业务级优化之上，才是针对用户体验的优化。用户也可以从不同的角度进行分类，如 VIP 用户、投诉用户、普通用户。

LTE 网络整体优化思路也遵循从低到高，由点及面的优化顺序，先做好网元级故障排查、网络级指标优化，然后进行业务级、用户级的体验提升。

13.2 SON

在 2G、3G 无线网络中，操作维护中心（Operation & Maintenance Center, OMC）是无线网络管理工作人员对网络进行优化、监控、维护的重要工具。OMC 维护的无线参数多、网元之间的关系复杂；对工程师的操作技能要求高；需要投入大量的人力物力；运营商的运维成本高昂。

LTE 在网络结构上，大大做了简化：减少了 RNC 节点，取消了 CS 域，实现了用户面、业务面的分离。虽然网元的种类减少了，但是无线侧需要配置的参数增多了。

LTE 将与 GSM、WCDMA、TD-SCDMA、WLAN 等多种网络共存，网络之间的覆盖及容量的配合关系复杂。

另外，LTE 从初期的热点覆盖，逐步实现城区连续覆盖，最终向广域覆盖过渡；面临不断增加的基站数目，不断改变网络拓补结构的局面，于是，相应的小区参数也在频繁的变化中。

以上这些原因，都使得 LTE 的操作维护难度提高、维护量增大。采用传统的 OMC 系统，将给运营商带来巨大的成本负担，无法对最终用户提供高性价比的服务。

为了减少 LTE 网络操作维护工作的复杂性，降低运营商的投资成本（Capital Expenditure, CAPEX）和运营维护成本（Operation Expenditure, OPEX），LTE 引入了网络自组织的机制，即 SON (Self Organizing Networks, 自组织网络)。

从网络生命周期的作用来看，SON 的功能包括：自规划（Self-Planning）、自部署（Self-Deployment）、自优化（Self-Optimization）、自维护（Self-Maintenance）等多方面的能力，分别对应着网络规划阶段、部署阶段、优化阶段、维护阶段的参数配置和优化工作，如图 13-5 所示。

从 SON 对参数的管理作用来看，SON 包括两项大的工作：网络参数的自配置（Self Configuration）和网络参数的自优化（Self Optimization）。

在基站 eNodeB 没有进入运行状态之前，初始启动安装和初始参数配置都属于自配置的过程；LTE 的自配置功能可以节约网络的投资成本（CAPEX）。

当基站 eNodeB 进入运行状态后，网络参数的自动调整属于自优化过程，LTE 的自优化功能可以节约网络的运维成本（OPEX）。

SON 的自配置与自优化的关系如图 13-6 所示。

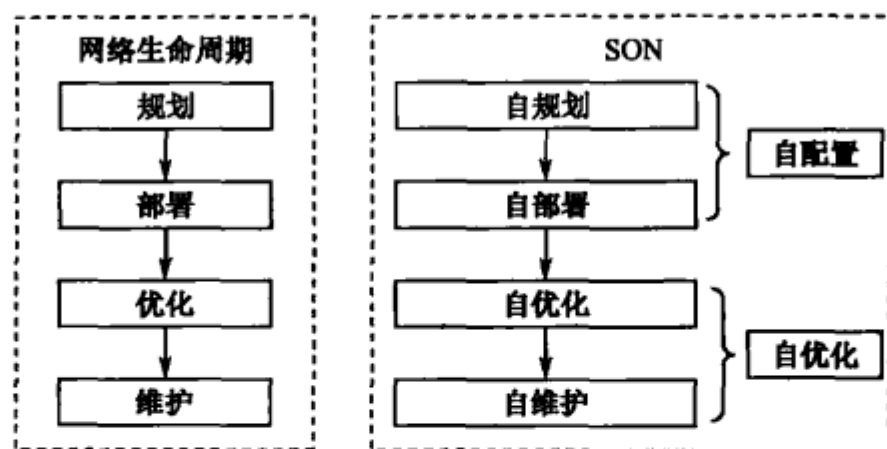


图 13-5 网络生命周期与 SON

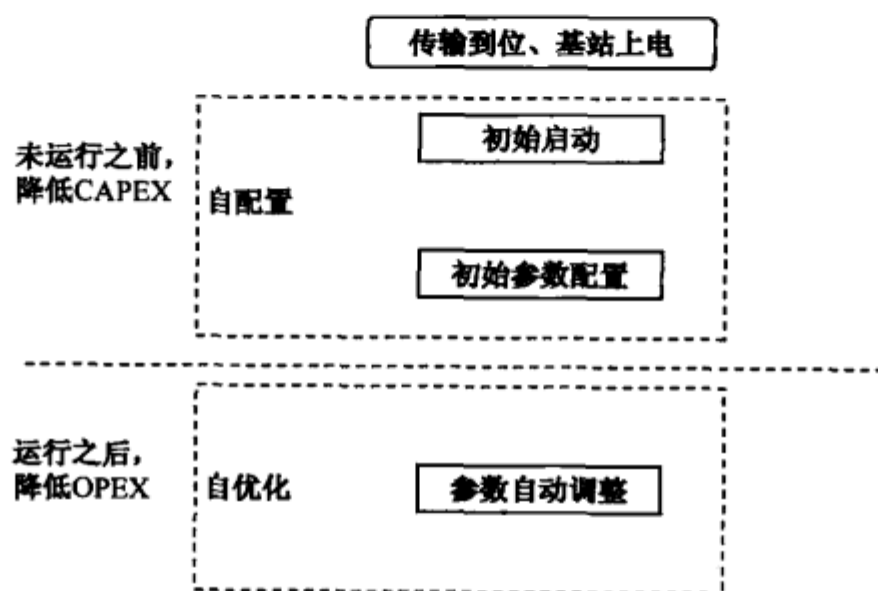


图 13-6 自配置与自优化

13.2.1 自配置

在基站 eNodeB 的硬件安装完毕、传输链接建立以后，LTE 系统启动自配置过程。自配置是指新入网的网元节点在上电启动以后，通过自安装、自检测和自发现等步骤获得入网运行所需的基本配置参数，也可以在基站断电、重新恢复供电后，自动启动、自动纠错，快速返回正常工作状态。

一个新毕业的大学生进入公司，需要为适应工作要求而调整自己的角色，准备好包括交通、居住、饮食、学习、心态在内的诸多事情。这是人自我配置以适应社会的过程，而不是让社会去适应人。

同样道理，新入网基站和相邻基站自配置以适应网络，而不是让整个网络主动去适应新入网基站，这样可以提高网络的运行效率，降低运行成本。

新入网基地的自配置主要包括两个过程：

- (1) 初始启动安装；
- (2) 无线参数自动配置。

以往的无线制式新基站入网需要二次进站，如图 13-7 所示。一次是硬件工程师进站，一次是软调工程师进站。LTE 的新入网基站自配置功能，可以使基站入网从二次进站变为一次进站。当基站硬件安装到位后，初始启动安装功能、无线参数自动配置功能，可以避免软调工程师二次进站，如图 13-8 所示。

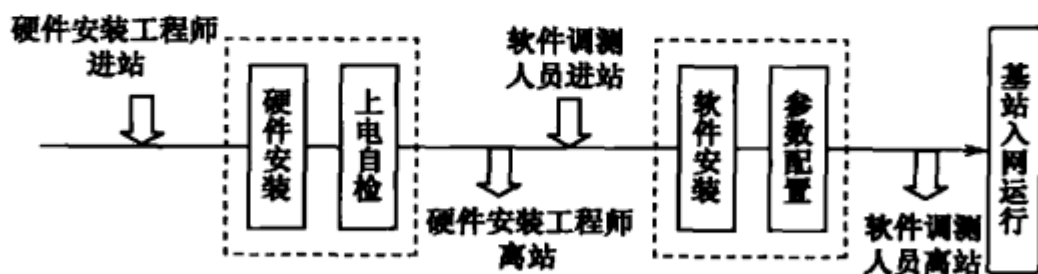


图 13-7 基站入网的二次进站问题

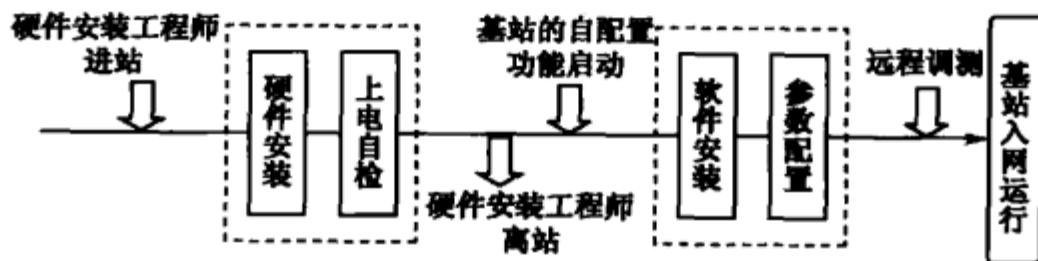


图 13-8 一次进站解决基站入网问题

初始启动安装包含以下 4 个步骤：

- (1) IP 地址配置，与操作维护服务器建立链接。

新入网的网元，首先应该建立与周边网元的逻辑链路，建立协调工作的通道，尤其要建立从新入网基站到操作维护服务器（OAM）之间的链路。

这就要求新入网基站首先获取自己 IP 地址，并且配置从自身节点到 OAM 服务器之间所有网元的 IP 地址和路由。涉及的网元包括服务网关、MME 和 DHCP/DNS 服务器。IP 地址和路由自动配置功能由 DHCP 协议支持。

IP 地址的配置过程，类似一个人的社会关系网建立的过程。你要想托人办事，必须有从自身到受托人之间的关系路由，即由能说上话的人组成一个关系链。

- (2) 基站 eNodeB 和网络的双向鉴权认证。

网络是不允许一个网元随便接入网络的，否则，网络没有安全性可言。新入网基站要检验网络的适配性，同时也要经过网络的合法性检验，才能接入网络。

新入网基站，如同新加入公司的员工，公司与员工之间要相互鉴权认证。员工要确认公司是否能够兑现招聘承诺，公司要看员工学习和工作背景是否属实。

(3) 与核心网的节点建立链接。

一个 MME/SGW 节点可以链接多个基站 eNodeB，一个基站 eNodeB 也可以属于不同的 MME/SGW 节点。这样 eNodeB 和核心网节点之间的关系就比较复杂。eNodeB 应该具备自动发现最适合自己的核心网节点的能力，并且能够与之建立安全的 S1 通道。

新员工进入一个实行矩阵式管理的公司，自己上面有很多领导。每个领导都会对自己有影响。人际关系敏感的新员工很快能够发现对自己最有影响的领导，并建立与之密切合作的关系。类似新入网基站与核心网节点之间建立链接的过程。

(4) eNodeB 软件、无线参数下载及安装配置。

网络要更新基站软件，并不需要派工程师到现场支持。eNodeB 有能力自动发现要更新的软件，或无线参数，然后从远程的操作维护服务器上下载下来，软件自动安装，参数自动配置。

所谓“响鼓不用重锤敲”。自动下载软件及安装配置的功能，类似聪明的新员工能够主动从领导那里获取自己工作所需的资源，而无须实时监督指导。

无线参数自动配置包括：

(1) 邻区列表配置。

网络的初始邻区配置一般通过规划工具完成。在系统上电以后，各小区已经配置了初始的邻区关系。但是在初期，新入网基站或者基站位置变更频繁，邻区关系也需要相应的变更。eNodeB 能够自动通过 UE 的测量报告来确定相邻小区关系，找到漏配邻区和冗余邻区，并对邻区列表实时更新和调整。

(2) 小区 PCI 配置。

小区 PCI（物理小区 ID）的分配，类似 3G 系统的扰码分配，要避免相关性较大或者完全相同的 PCI，分配到地理位置相邻的小区或者是覆盖范围有重叠的小区。

基站 eNodeB 通过收集 UE 的测量报告，并且与相邻基站协商，利用相关算法调整 PCI 的分配。如果发现两个小区 PCI 相关性大，而且有重叠覆盖范围，则通过 PCI 自动调整算法进行调优。

(3) 覆盖和容量相关的参数配置。

基站 eNodeB 通过一定时间的 UE 测量报告收集，可以自动地为新入网的基站配置覆盖和容量相关参数。与覆盖相关的参数包括天线方向角、下倾角等 RF 参数，公共信道、业务信道等功率参数；与容量相关的参数包括带宽配置、调制编码、多小区干扰协调等参数。

13.2.2 自优化

自优化过程是指在网络正常运行时，无须人工参与的情况下，系统通过对终端 UE、基站 eNodeB 测量的数据进行分析，对网络参数进行自动调整，以使网络的覆盖、容量、质量等性能逐渐提高。

自优化对于网络的作用，如同免疫力对于人体的作用，无须外力作用，就可以保证系统正常运行，提高系统性能。

以往无线制式的网络优化，都是依靠工程师对路测数据、话统数据进行分析，需要手工对工程参数、无线参数进行调整。一次参数调优，如果没有解决问题，还须重新测试，重新进行参数调优。这样的过程往往需要反复进行，费时费力。

自优化功能可以完成部分传统网络优化的工作，减少人工操作的工作量，从而节约优化和维护成本。无线参数多数可以自动调优，但工程参数除了天线的电子下倾角之外，都必须在人工参与下进行调优。

通过自优化功能系统可以完成以下工作：

(1) 自动邻区优化 ANR。

自动发现新的相邻小区，删除冗余的相邻小区。

在网络建设初期，由于站点新增、站点搬迁等原因导致网络结构不断变化，原来配置的邻区关系不再适应新的网络。在以往的无线制式初始网络优化过程中，邻区漏配是切换掉话最主要的原因。邻区关系的梳理是费时费力的工作。

LTE 网络有了 ANR (Automatic Neighbor Relation, 自动邻区关系) 功能，邻区关系可以方便地适应网络拓补结构的变化，获得比人工邻区优化更好的效果。

自动邻区关系 ANR 功能主要的数据源是 UE 对相邻小区的测量报告。

从 UE 和小区的工作关系上，UE 测量的小区可以分为以下三个类型：服务小区、邻区列表小区、非邻区列表检测小区。

不在邻区列表，但 UE 可以检测的小区是同频、异频，甚至是异系统的小区。要检测异系统的小区，UE 需要 eUTRAN 指定测量频率。

自动邻区关系 ANR 功能的关键过程如图 13-9 所示。

自动邻区关系过程如同公司（基站）维持自己的客户关系系统（邻区）。ANR 类似服务公司 A（eNodeB 1）要求自己的员工时刻注意市场上相关公司的业务动态，把发现的市场情况及时汇报给公司，以便更新自己的客户关系系统。

具体步骤分为以下九步。

第一步：测量（搜集市场信息）。UE 根据 eUTRAN 的测量控制指令进行测量，检测到了 eNodeB 2 的物理小区 ID PCI=B 的小区（服务公司要求员工搜集市场信息，员工

UE发现某B公司可能与自己所在的A公司发生业务往来)。

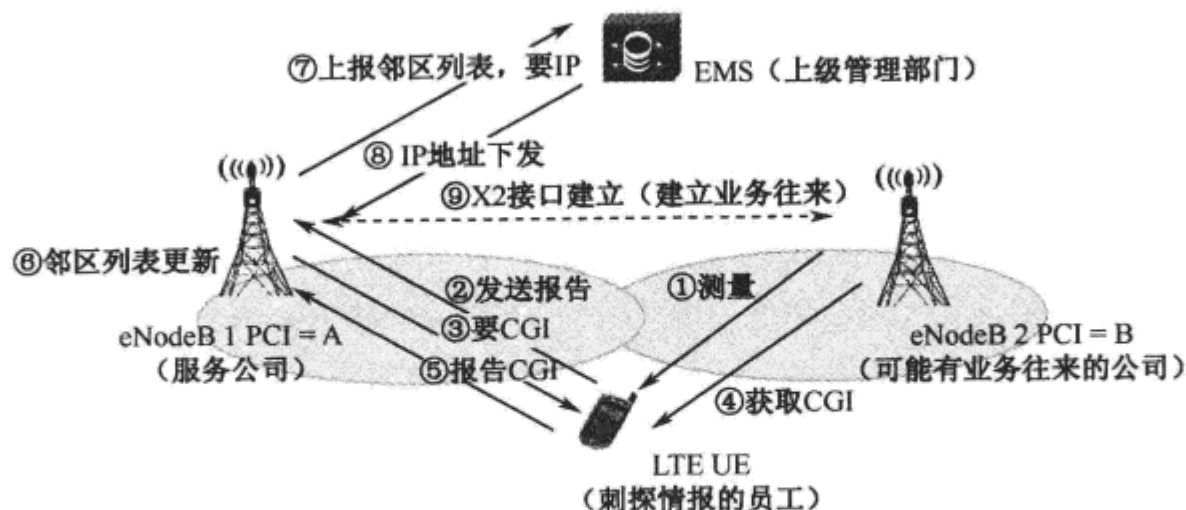


图 13-9 ANR 过程

第二步：发送测量报告（给领导汇报）。UE向eNodeB1的服务小区发送测量报告，报告的内容是UE对PCI=B的小区的测量状况（员工把自己搜集的B公司情况给A公司领导汇报）。

第三步：指示获取CGI（指示员工进一步了解B公司）。服务小区A接收到UE的测量报告，初步判断，符合作为邻区的条件，指示UE获取PCI=B的小区的全球小区ID（CGI）（公司A的领导认为B公司符合自己业务往来的条件，让员工进一步了解B公司的背景、市场业绩、全球品牌情况）。

第四步：获取CGI（员工搜集B公司品牌及口碑）。UE接收PCI=B的小区的广播控制信道（BCCH），获得其全球小区ID（员工通过B公司在公开场合发布的消息、了解它的品牌拓展策略）。

第五步：报告CGI（员工将B公司的品牌拓展策略报告给领导）。UE向PCI=A的服务小区报告PCI=B的小区的全球小区ID（CGI）。

第六步：服务小区A对邻区列表进行更新（A公司对自己的客户关系系统进行更新）。

第七步：服务小区A向网元管理系统（network Element Management System, EMS）发送小区更新列表，并从EMS索取新检测到的小区B的IP地址（A公司和上级市场管理部门联系，获取与B公司建立业务往来的政策）。

第八步：EMS给服务小区A下发B小区的IP地址（上级管理部门给出指导）。

第九步：根据需要，建立eNodeB1与目标小区B所在的基站eNodeB2的一个新的X2接口（公司A与公司B建立业务往来关系）。

（2）切换性能自动优化。

在2G/3G系统中，依据实际网络数据，人工设置切换相关参数，不仅费时费力，更

新成本高，而且准确性较低，不正确地切换参数设置，会导致乒乓效应，引起掉话，或业务质量降低，影响用户体验。

切换性能自动优化的主要目标是减少不必要的切换次数；提高切换成功率；提高用户体验；降低优化成本。

对系统内、系统外多个目标小区的接收信号强度、信噪比进行比较判决，自动优化功能给出切换参数配置。不断监测与移动性相关的 KPI (Key Performance Indicator, 关键性能指标)，判断相应的切换参数调整是否提升了网络的 KPI。

如果 KPI 没有达到最终要求，还需要进一步调整切换的相关无线参数，然后再比较调整前后的 KPI 性能。这是一个反复迭代的过程，最终找到系统内、系统间切换的最优参数配置。

(3) 负荷均衡优化。

数据业务发展迅猛，但是并不均衡。话务浪涌，突发次数多，话务迁移规律性差，业务需求量随时随地变化，都具有不可预测性。地理上热点分布不均，导致在一个网络里超忙小区、超闲小区同时存在。网络中普遍存在无线资源利用不足，或者无线资源利用率超标的情况。

提前规划好的静态无线资源分布，不能很好地适应负荷的变化，由此降低了资源使用效率，提高了系统的拥塞概率。

负荷均衡优化的主要目的是将高负荷小区中的部分业务转移到无线资源利用率相对较低的小区，使得各小区的负荷均衡，避免出现超忙小区、超闲小区，即提高了无线资源利用效率，又降低了拥塞概率。

(4) 干扰自动降低。

对无线系统的性能影响最大的就是系统内、系统外的干扰。同频干扰是无线系统中比较普遍的系统内干扰。

LTE 的干扰自动降低，可以通过小区间干扰协调功能 (ICIC)，来降低小区边缘区域同频干扰的概率，提高小区边缘用户的业务质量。

有重叠覆盖范围的小区，PCI 不能相同，相关性也不能太高，否则的话，可能造成小区间同 PCI 干扰。LTE 的自优化功能可以根据现网 PCI 冲突的情况，自动优化小区的 PCI 配置，降低可能的干扰概率。

(5) 随机接入参数自动优化。

在终端随机接入过程中，随机接入信道 RACH 参数配置是影响呼叫建立时延、切换时延、呼叫建立成功率、切换成功率的重要因素。

RACH 参数的运行效果依赖很多因素：PUSCH 的上行小区间干扰；RACH 信道的负荷和碰撞概率；PUSCH 负荷大小；为 RACH 预留资源的数量、终端的移动速度等。

这些网络运行状态的任何变化，都会影响 RACH 的参数配置。RACH 信道接入参数的自动优化就是监测 RACH 负荷的改变、PUSCH 的上行干扰等因素，更新随机接入参数，减少随机接入尝试的次数，减少所有终端的接入延迟和上行干扰。

(6) 自动节能。

话务量随时随地变化，网络并不需要总是开足马力来应对热点区域的高峰话务。在话务量较低的时间和地点，自动启动节能模式，可以节约能源开支，起到环保作用。当话务量增加到一定程度后，再停止节能模式。

节能有三个途径：动态地关闭小区；动态地关闭天线；动态地降低载波功率。

在一些地方，基站的某些小区仅在忙时有一些话务。自动节能功能根据业务量大小，自动地去激活小区，达到“物尽其用、不用关闭”的效果。

LTE 采用多天线 MIMO 的工作模式，在话务量低的时候，可以关闭几路天线，工作模式从 MIMO 变成 SIMO，达到降低功耗的效果。

在话务量较少的时候，适当地减少载波发射功率，可以降低小区间干扰，不会影响网络的容量，同时起到了节能的作用。

13.3 业务质量提升

LTE 完全由分组域（PS）组成，取消了电路域；同时，LTE 物理层的业务信道完全是共享信道，取消了专用信道。

以上两点决定了 LTE 业务质量提升的思路和方法类似于 WCDMA/TD-SCDMA 里的 HSPA（包括 HSDPA、HSUPA），而与 WCDMA/TD-SCDMA 里的 CS 域优化区别较大。

在 2G、3G 的无线制式中，已经能够满足最终用户对传统语音业务的应用需求。LTE 引入以后，虽然也能支持 VoIP 类的语音业务，但它主要会承载多种类型的数据业务，满足人们对业务多样性的需求。

各种业务虽然对资源占用的需求不同，业务质量 QoS 的要求也不同，但是都占用共享的有限资源，这对 LTE 的无线资源调度提出了很高的要求。LTE 无线资源调度的效果不仅依赖于资源调度算法的有效性，还依赖于无线环境的覆盖、容量、干扰的条件。

现在以北京周一早晨小张开车上班的体验和无线上网的体验（见图 13-10），说明一下使用 LTE 业务可能碰到的问题。

老板：小张，你怎么还不来上班？有个急事找你！

小张：西直门这里车辆太多，我上不了主路（问题：业务接入困难、时延长）。

老板：你就不能早起几分钟吗？非得赶这个点！

小张：我早起了 1 个多小时呢，车启动不了了（问题：终端故障）。

老板：路口没有交警指挥吗？

小张：有个交警，好像是新手，手忙脚乱的（问题：调度算法性能不好）！

老板：现在上了主路吗？

小张：上了，就是开不快。公交车、三轮车和我的车在一起跑，能不慢吗（业务速率低，没有分层管理）？

小张到了单位后，已经迟到了 1 个小时了。

老板：你快上网下载一个文件！

小张用无线网卡上网。

过十分钟后，老板：怎么样，发出去没有？

小张：还没有，页面刷新太慢，一直在等待中（业务接入难，接入时延长）。

老板：你不能换一个快一点的上网卡（老板认为是终端问题）？

小张：平时还问题不大，每天就这个点慢（小张认为是网络忙时调度性能差）！

老板：现在开始下载了吗？

小张：开始下载了，下载速率慢（业务速率低）。

老板：你同时下载着电影，能不慢吗（老板认为：多业务并行的问题）？



图 13-10 上班体验

公路交通流量的调度和无线上网流量的调度有很多共同点：共享的资源、不同资源占用需求。

用户能够感觉到的问题就是接入时延长、业务速率低的问题。但是造成用户接入时延长、业务速率低的原因可能是终端问题，也可能是系统里其他网元的问题。在网元级没有问题的情况下，有可能是网络上覆盖差、容量不足、干扰难以抑制的问题；这个层次的问题排查完后，可能是资源调度算法的问题、参数管理的问题、多业务 QoS 质量管理的问题。

13.3.1 业务质量基础——信噪比

LTE 支持很多自适应技术，如自适应 MIMO、自适应调制编码 AMC、自适应信道分配、自适应带宽大小等。由于自适应技术的使用，LTE 网络性能受无线信号质量即信噪比的影响较大。

在信噪比高的情况下，网络在高阶 MIMO 工作模式的占比高、高阶调制编码的比例也相应增高，使用的带宽大（RB 数目多）；相应地，吞吐率变大，时延缩短，用户体验变好。相反，在信噪比低的情况下，MIMO 只能工作在分集模式下，调制编码阶数降低，业务分配的带宽变小（RB 数目少）；于是，吞吐率降低、时延增长，用户体验变差。

看来，信噪比是 LTE 业务质量的基础，尤其是在小区的边缘区域。为了让边缘用户的业务体验不至于降得太低，需要保证小区边缘的信噪比不能降低太多。

信噪比其实包括两个方面的内容：覆盖、干扰。弱覆盖，强干扰，必然带来信噪比的恶化；提升信噪比，实际上就是要求增强覆盖、抑制干扰。

增强覆盖、抑制干扰的手段，包括：RF 参数调整、无线参数调优，如图 13-11 所示。

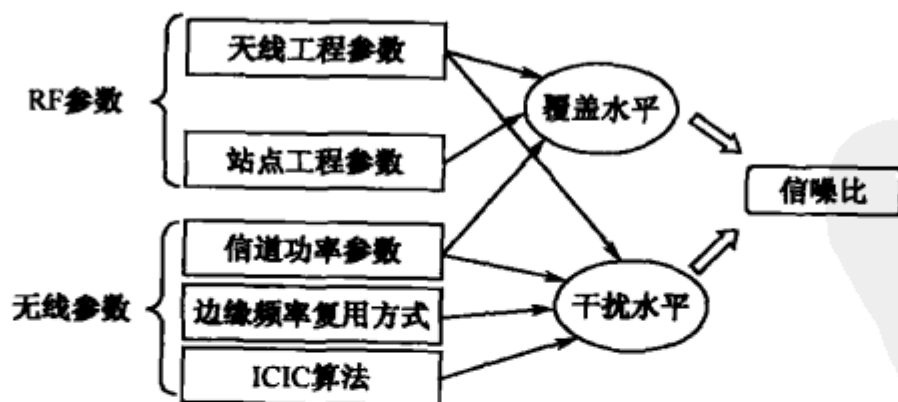


图 13-11 信噪比提升手段

覆盖和干扰在参数调优的过程中，可能互相牵制，需要丰富的现场经验才能找到最佳平衡点。

比如，某小区减少下倾角，增强业务信道功率，可能扩大了该小区的覆盖范围，但

同时增加了对其他同频小区的干扰影响。

随着覆盖水平提升，干扰也相应增大。边缘区域信噪比是否提升，提升多少，都需要实测，然后找到一个覆盖增强而信噪比却不能增强的参数调整平衡点。

有时候，更换站址位置及增加新的站点，能够增加网络的覆盖水平。但是由于站址获取困难，站点建设成本高昂，是最后考虑的优化手段。

增加小区边缘的频点，增大小区边缘的频率复用系数，选择性能良好的 ICIC 算法，设置合适的 ICIC 参数，可以降低小区边缘的干扰，提高小区边缘的信噪比。

参数调整一定要遵循由点及面、由小到大的优化过程，如图 13-12 所示。不能只着眼于某个小区的信噪比提升，还要逐步拓展优化视野，看优化手段对其他小区、整网有多大影响。

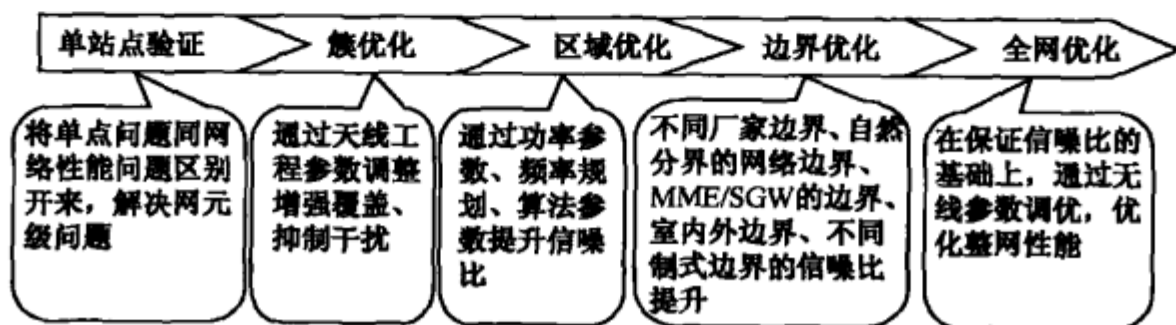


图 13-12 由点及面的信噪比提升过程

精于参数调整的工程师，如同一个技术高超、经验丰富的中医大夫，对于用什么药，剂量多大，对身体的好处及不良影响得心应手，药到病除。

13.3.2 业务级优化的三多一少问题

增强覆盖、抑制干扰是网络性能良好的基础。不管在什么地方，使用什么样的业务，这个基础是不能动摇的。

不同场景有不同的优化特点，不同业务有不同的质量需求，这就是 LTE 业务质量提升的多场景、多业务问题。

用户的任何 LTE 业务的使用体验好坏，虽然主要取决于空口质量的好坏，但不仅仅取决于空口质量，还包括终端、基站、核心网、传送网、业务平台等很多网元的性能和相互之间的配合。

随着用户数的日益增多，业务量需求的不断增长，网络资源利用率不断升高。一方面，网络拥塞拒绝的用户数增多，接入用户数受限、接入时延增长；另一方面，网络过载、系统干扰的增大、业务质量降低、吞吐率减少，都会影响用户体验。

这里的资源受限，不仅是空中接口无线资源的稀缺，传输网资源、核心网处理单元、

业务平台的接入能力都可能受限。在业务需求爆发式增长的情况下,网络资源可能是影响业务质量的“瓶颈”。

多场景、多业务、多网元、资源少,就是LTE业务级优化在提升信噪比基础上需要考虑的关键问题。

(1) 多场景规划优化。

场景的划分主要取决于无线环境的覆盖特征和话务特征,制约了各场景的覆盖、容量、质量的需求特点,从而制约了该场景无线网络规划优化的着眼点和着手点。根据场景覆盖范围,可以将无线场景划分为点、线、面三种大的场景,如表13-2所示。

表 13-2 点、线、面场景的LTE规划优化特点

场 景 名 称		规划优化特点
面覆盖	密集城区、一般城区	控制干扰、满足容量需求
	农村、郊区	满足覆盖电平要求
线覆盖	高速铁路、公路,城市交通干线	克服多普勒频移;克服车体的穿透损耗;降低切换和重选次数;提高切换、重选成功率
点覆盖	室内覆盖	建设和优化LTE的室内分布系统,重点提高数据业务的吞吐率
	热点小区	采用室内分布、室外分布、室外宏覆盖相结合的方式;在优化过程中,注重室内外的覆盖、容量能力的相互配合

面覆盖场景,包括密集城区、一般城区、郊区、农村等。

密集城区和一般城区场景的楼宇分布较密集,楼层相对较高,穿透损耗很大,用户分布密集,业务量大。LTE建设和优化以控制干扰、满足数据业务速率、接入用户数等容量需求为主。

在农村和郊区场景,其楼宇分布稀疏、低矮,楼层相对较低,穿透损耗很小,用户分布分散,业务量小。LTE建设和优化要以满足覆盖电平要求为主。

线覆盖场景,包括高速铁路、公路,城市交通干线等。这些场景的用户沿线比较集中,移动速度较快;规划优化需要考虑克服多普勒频移、克服车体的穿透损耗、降低切换和重选次数,提高切换、重选成功率。

点覆盖有两类:室内覆盖场景和热点小区场景。

室内场景,如写字楼、高级酒店、高层住宅、中等楼宇、购物场所、超市、大型场馆等,需要建设和优化LTE的室内分布系统,重点提高数据业务的吞吐率。

热点小区,如别墅、生活小区、高校、车站、机场等场景,采用室内分布、室外分布、室外宏覆盖相结合的方式。在优化过程中,注重室内外的覆盖和容量能力的相互配合。

(2) 多业务的敏感指标。

不同的终端类型、不同的业务类型、不同的无线环境,对LTE网络的服务质量(QoS)

要求存在较大差异。

举例来说，下载类业务重点关注传输带宽，而对实时性基本没有要求；准实时交互类业务，如网络游戏，则对传输时延十分敏感。

在网络优化过程中，需要根据用户使用业务的不同需求特征，重点优化其最为敏感的指标。

将 LTE 无线侧承载的业务划分为如表 13-3 所示的六大类。不同类型的业务对网络指标的要求不同，在优化过程中，应根据业务承载的不同类型，来优化相应的指标。表中灰色区域是对相应指标有要求的区域。

表 13-3 不同业务承载的指标要求

业务类型	典型业务	业务特点描述			
		实时性	数据带宽需求	业务量对称性	质量要求
会话类业务	VoIP	实时，要求从用户发出信息到收到反馈信息的环回时延短，时延抖动小	对数据带宽要求较低，但承诺数据速率（GBR）应高于信源数据速率（SBR）	上、下行数据速率对称	严格要求数据传输误码率低、丢包率低
交互类业务	网络游戏、远程控制、即时消息	准实时，从用户发出信息到收到反馈信息的环回时延短，对时延抖动不敏感	对数据带宽要求变化较大，承诺数据速率（GBR）应高于信源数据速率		要求数据传输误码率和丢包率尽量低
突发类业务	网页访问、网页浏览	非实时，对环回时延和时延抖动不敏感	页面打开时间内希望数据带宽较大，平均数据速率（ABR）越高越好，以加快页面打开速度；在阅读时间内数据传输速率很低	上、下行数据速率不对称，要求下行传输带宽较高	无要求
流类业务	网络电视、视频监控	非实时，对环回时延和时延抖动不敏感	对数据传输带宽要求较高，要求一段时间内的平均数据速率（ABR）应高于信源数据速率（SBR）	上、下行数据速率不对称，不同下载软件对于上下行带宽的要求不同，HTTP 下载和部分 P2P 软件（如迅雷）对上行带宽无要求	要求数据传输误码率和丢包率尽量低
不对称背景类业务	HTTP、FTP、P2P 下载等业务	非实时，对环回时延和时延抖动不敏感	数据传输带宽不会影响业务可用性，因此没有承诺比特速率（GBR）的要求；但会影响业务质量，即平均数据速率（ABR）越高越好	上、下行数据速率较为对称，对上、下行传输带宽都有要求	无要求
对称背景类业务	P2P 下载、电子邮件				

(3) 多网元分段定界优化。

着眼全局、着手细节。网络优化也一样，要有全网元端到端的视野，最终解决问题还需找准着力点，从细节上入手。

对于业务质量的优化，各个网元的性能是基础，但不能割裂地考虑某一个网元的性能，还需要综合考虑各网元之间的接口配合关系，如图 13-13 所示。也就是说，网优工具能够监测终端、接入网、传输网、核心网、业务平台等业务通道上所有网元的性能，以及网元间接口的性能，为业务质量问题定位提供依据。这就是着眼全局的优化思路。

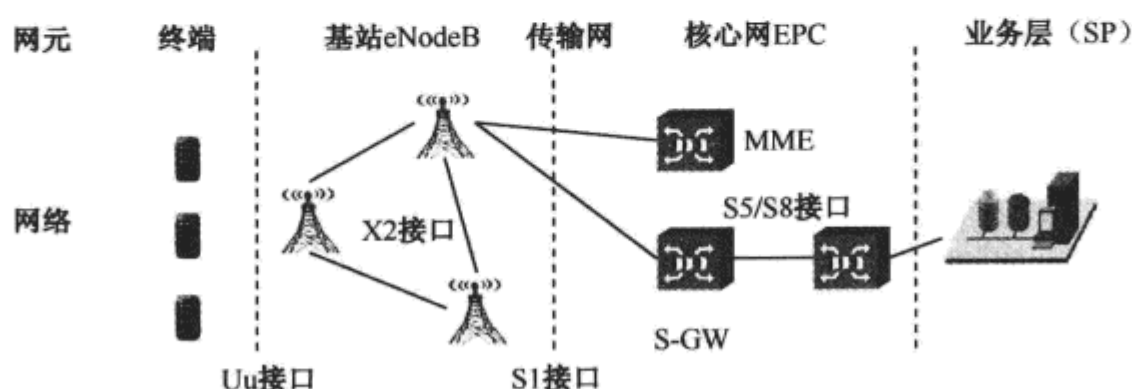


图 13-13 多网元多接口分段定界优化

具体的问题必然发生在终端、无线网、核心网、传输网、业务平台的某一个节点上。分段定界是定位网络问题的主要思路。把整个无线网络进行“分段”，从终端、空中接口、接入侧，到传输网、核心网、业务平台逐段进行分析；“定界”就是把问题锁定在某个范围内。

看问题发生的范围，是定界的一个主要方法。

如果在一个小区的覆盖范围内，并不是所有终端都有相同的问题，那么问题可能发生在某一型号的终端上。问题发生在一小片区域内，而并不是在某个核心网网元（如MME）的范围内都有这样的问题，那可能是无线侧的问题。如果范围再大一些，就有可能是核心网的问题。而传输网的问题往往是业务总在某一个通道上发生问题。当然这只是初步的判断，还要结合信令跟踪、用户跟踪的数据具体分析。

从业务质量问题的统计结果来看，统计表明，空口问题发生的概率很大。解决了空中接口问题，就解决了70%以上的网络问题。所以无线侧的优化是业务质量提升的首要工作。

在空中接口问题解决的前提下，业务质量问题的解决还要依赖于核心网优化、传输网优化、业务网优化、终端问题定位等工作。

(4) 资源受限处理。

随着业务需求的增长，保障网络稳定运行，就需要对各种网络资源进行监控、均衡，

解决影响业务传输速率和时延的资源瓶颈问题。这里面的资源包括无线资源、传输资源、核心网资源、业务平台资源。

无线资源是最可能受限的资源。解决无线资源受限的主要方法有负荷分担、业务或用户的分层分级、准入控制、拥塞控制。

负荷分担就是网络通过动态信道分配自动地将业务调整在负荷较轻的信道上，或者通过调整网络空闲态时的重选参数、连接态时的切换参数，将业务调整到负荷较轻的小区上。

在话务量增大到一定程度，可以启动基于业务或用户优先级的资源调度，将资源优先调度给小流量、高价值业务，优先保证重点用户的业务使用，控制大流量、低价值下载业务对于网络资源的疯狂攫取。

业务或用户的分层、分级的主要思想是在大话务量时保证价值业务、价值用户。

话务量继续增大，为了避免网络过载，要启用准入控制机制，拒绝新的业务接入申请。

如果网络已经发生过载，则启动拥塞控制机制，将已接入网络的业务降速，以减少其对资源的占用，或者直接将某些用户的业务使用关闭掉。这些都是在网络过载的情况下，为了保证网络的稳定运行，牺牲了个别用户的业务体验。

总地来说，在 LTE 业务质量提升过程中，要结合场景和业务特征，实现多网元联合的质量监测，通过负荷分担、业务或用户的分层分级策略，尽量避免大话务量冲击导致的资源受限问题。“三多一少”问题的解决可以大幅提升业务质量，改善用户体验。

13.4 多网互操作问题

LTE 在支持高速数据业务、高用户容量方面具备优势，但也面临着目前可用频谱资源频段过高、路径损耗较大的缺点。

在 LTE 发展的初期，不可能实现所有场景的全覆盖，最有可能在城市热点区域实现连续覆盖，而 GSM 实现的是广域覆盖，3G 实现的是城市和乡镇的面覆盖，WLAN 实现个别热点的不连续覆盖。各种制式的网络业务承载的定位不同，需要相互补充、相互配合，共同服务于最终用户。这四种制式的网络覆盖关系如图 13-14 所示。

2G 网络虽已步入老年，但对语音和短消息业务的承载能力优势无可辩驳。在相当一段时间内，GSM 网络仍然是语音业务承载的主体。

3G 网络年轻力壮，可以应对从语音到数据业务的多数场景。随着 WCDMA、TD-SCDMA HSDPA 建设的逐渐完善，GSM 数据业务承载主体的地位将逐步让位于 HSDPA。

但对高速和高吞吐率的业务却心有余而力不足。为了分流一些大流量、低价值用户的业务流量，在一些数据业务热点如校园、机场等场所逐步部署 WLAN 的 AP。

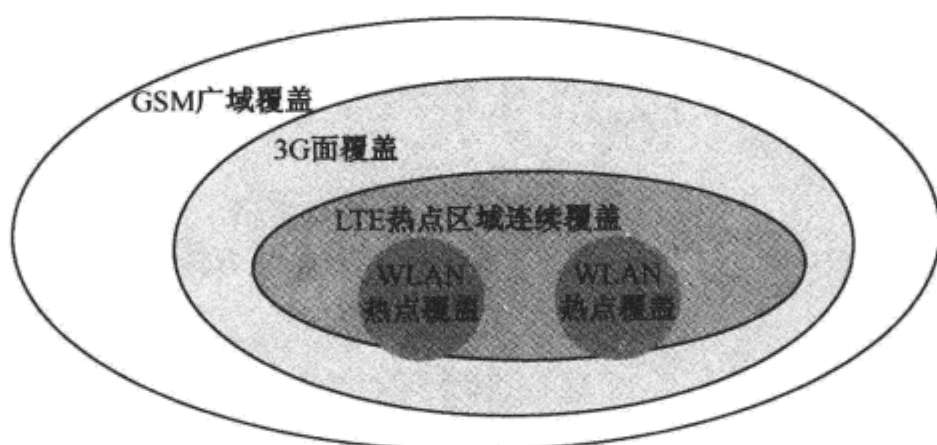


图 13-14 GSM、3G、WLAN、LTE 覆盖关系图

LTE 网络正在茁壮成长，是高速数据业务乘坐的磁悬浮列车，但从建网成本上考虑，还不能取代传统网络。随着 LTE 网络的成熟，大流量、高价值用户首先转移到 LTE 这张网络上，直到最后取代 3G 成为业务承载的主体。

2G、3G、WLAN、LTE 在较长的时间内四世同堂，已成为业界共识。最终用户必然会在 2G、3G、LTE 及热点的 WLAN 网络的覆盖范围间来回移动，多网之间的互操作就是相当重要的问题了。

13.4.1 多网覆盖协同优化

在 LTE 建网初期，目标是在城市热点区域实现连续覆盖，以外的区域由现在比较成熟的 GERAN（GSM EDGE 无线侧）或 UTRAN（UMTS RAN、WCDMA/TD-SCDMA 无线侧）支撑。

即使在 LTE 连续覆盖区域的内部，由于深度覆盖不足，也会存在大量的盲区、盲点，使得 LTE 与其他系统的互操作频繁。

异系统互操作包括：

- （1）终端空闲态时的小区重选；
- （2）连接态时的切换过程。

异系统互操作频繁有两个弊端：

- （1）互操作失败的概率增加；
- （2）互操作过程中用户体验降低。

所以，最好互操作策略是没有互操作。很像老子说的“小国寡民、老死不相往来”的状态，是一种没有矛盾、自得其乐的状态。但这只是理想，不是现实。

在规划优化的实际工程中，首先要加强 LTE 在热点区域的连续覆盖和深度覆盖，尽量降低互操作的次数，减少互操作问题发生的频繁程度。



图 13-15 LTE 热点区域互操作策略

在 LTE 覆盖区域仍然有如图 13-15 所示的三种覆盖情况：

- (1) 连续覆盖区域；
- (2) 覆盖空洞区域（盲区、盲点集中的地方）；
- (3) 覆盖边缘区域。

这三种覆盖情况对应着三种不同的基于覆盖的互

操作策略。

在 LTE 连续覆盖区域，终端优先驻留 LTE 网络；异系统互操作采用“慢出快进”的策略，通过调整重选或切换的相关参数，使得终端离开 LTE 网络的难度大一些，但从其他网络回来的时候容易一些。这样可以避免在 LTE 连续覆盖区域频繁互操作，同时保证终端用户能够享受 LTE 网络的服务。

在 LTE 连续覆盖区域内，也会存在大量的 LTE 覆盖空洞，如密集城区的高层楼宇内部，城市生活小区等地点。由于暂时没有 LTE 网络，这些空洞区域需要依赖 GERAN、UTRAN 来覆盖。随着这些小区 LTE 网络的部署，这些空洞会逐渐减少。

在 LTE 连续覆盖区域中的覆盖空洞，异系统互操作采用“慢出慢进”的策略。在这些区域中的数据业务用户，移动性不会很大，大多数属于游牧式移动，但要求业务质量有所保证。此时不宜频繁互操作，只有终端用户的移动趋势非常明显，才考虑异系统互操作。也就是说，在可以判断出用户一定从 LTE 连续覆盖区域移动到空洞区域，或者一定从空洞区域移动到 LTE 连续覆盖区域，才考虑互操作。

在 LTE 覆盖的边缘区域，用户的业务速率越来越低，为了保证用户的业务体验，应该使用户在体验没有降到最坏的时候，就选择其他网络。而回来的时候，要等终端用户移动趋势明显之后，再进行异系统互操作。这就是 LTE 覆盖边缘的“快出慢进”的互操作策略。

13.4.2 多网话务分流

LTE 和其他制式的网络不仅要进行基于覆盖的互操作，在容量能力的配合上，也需要实现多制式之间的协同，即多网话务分流问题。

LTE 建网初期，由于只在数据业务热点区域实现了连续覆盖，LTE 网络在很大范围内，还不适合语音业务的承载；再加上 LTE 的终端类型主要还是数据卡，手机形式的终端协议上的支撑刚刚完成，所以语音业务在一段时间内仍然要以 GERAN、UTRAN 网络

为主来承载。

当LTE用户发起语音业务时，可以将其自动切换至3G或2G网络的CS域。也就是说，此时LTE网络不但要实现基于覆盖的异系统切换，还要实现基于业务的异系统切换。

随着LTE网络覆盖范围的增加，随着承载业务量的迅猛增加，LTE网络的资源利用率逐渐上升，部分小区可能出现过载现象。但同覆盖区域的3G或2G网络负荷水平比较低，LTE有必要支撑基于负荷的跨系统切换，使得用户话务在多个网络间合理地进行分流。

LTE网络进一步成熟以后，为了充分地发挥2G、3G、WLAN、LTE各自网络的优点，LTE网络应该具备根据业务或用户的优先级进行异系统切换的能力。

高价值、大数据量的业务或用户优先由LTE的资源来承载；低价值、大流量的业务或用户由WLAN的资源来承载；高价值、小数据量及语音业务由3G或2G网络来承载。到一定阶段，可以根据高、中、低端用户的不同属性，来分配不同的网络资源。

针对LTE的不同发展阶段，话务分流的策略如图13-16所示。

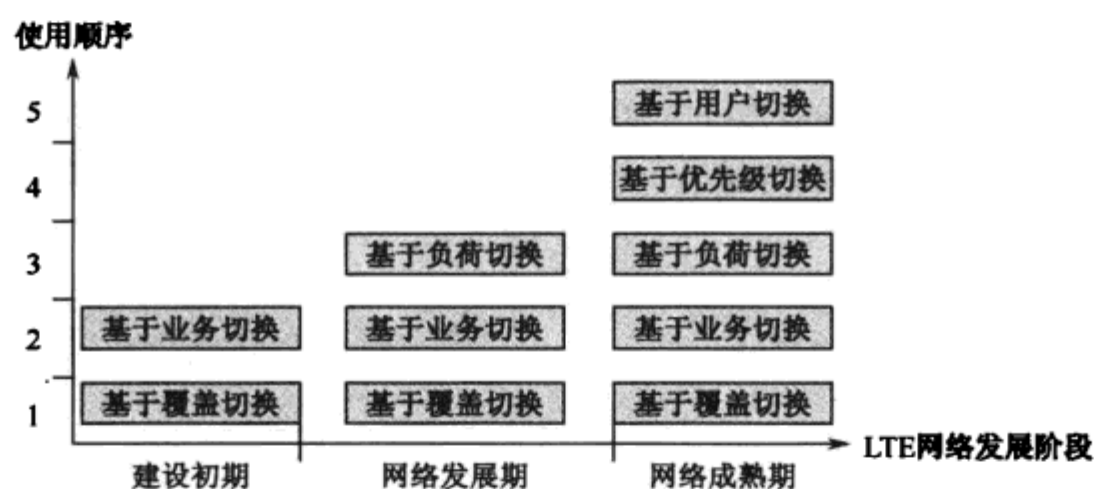


图 13-16 LTE 的不同发展阶段的话务分流策略

LTE网络发展到一定阶段，就会发生超忙小区和超闲小区同时存在的现象，这种负荷不均衡的现象可能在LTE网内出现，也可能在不同制式的网络之间出现。

LTE用户发展到一定程度，由于覆盖原因、容量能力原因，可能会有一些话务回流到2G或3G网络，造成2G或3G网络的局部区域负荷超标，甚至出现严重过载的现象。在这种情况下，我们需要增强LTE或者WLAN的话务分流能力。

如何增加网络的话务分流能力呢？分四步走，如图13-17所示。

第一步，对每种无线网络的分流潜力进行评估，目的是决定话务分流的源小区和目的小区，即决定把某个网络的某个小区的一部分话务分流到另外网络的某个小区。

确定话务分流的方向和目标，前提是监控和评估各个网络的负荷水平，评估一下哪个小区负荷过大，哪个小区负荷过小。接下来要分业务、分用户地评估话务的流向，分

析这些话务分别由哪些网络承载，网络间发生互操作的原因是什么。触发系统间互操作有两大类原因：一是无覆盖；二是互操作参数不合理。

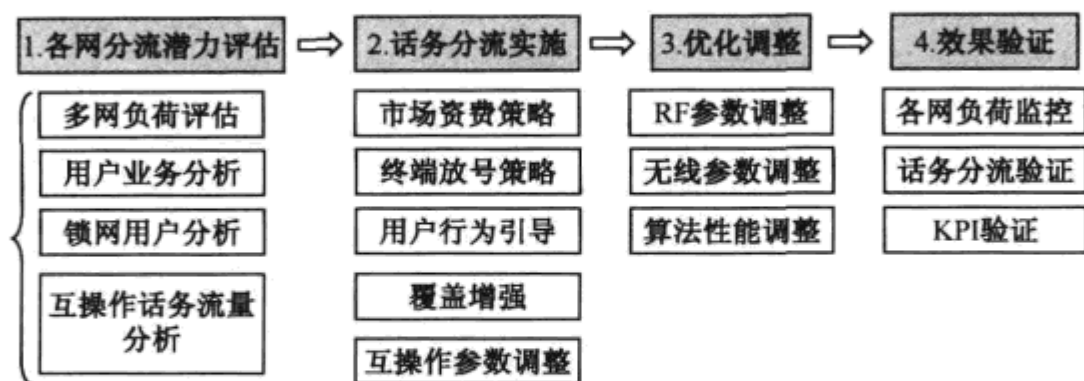


图 13-17 多网话务分流基本思路

将锁网用户和非锁网用户的流量区别开来。锁网用户是指把自己的终端始终定在某个网络上的用户。非锁网用户的话务流动通常是由于触发了系统间互操作造成的。

第二步，分析评估结果，确定分流措施，进行分流操作。

锁网用户的话务流量是非技术原因导致的，需要通过市场营销策略和终端放号策略引导用户，把这部分话务引导在相对空闲的网络资源上。

对于 LTE 无覆盖导致的话务流向不合理，应该增强 LTE 的覆盖，增强 LTE 的话务承载能力。

系统间互操作参数不合理导致的 LTE 话务承载不力，要调整切换或重选的参数。LTE 小区过载的，要使话务更容易互操作到异系统；LTE 小区轻载的，要使话务更容易留在 LTE 小区。

第三步，对网络进行优化调整，确保网络指标。

经过市场策略或终端策略对话务引导后，不同网络的负荷水平发生变化；LTE 覆盖能力的变化、互操作参数的调整，也可能使网络的 KPI 水平发生波动。这时候可以通过 RF 参数调整、无线参数调整、性能算法的调整，使网络 KPI 水平保持在一定水平之上。

最后，进行效果的验证。

不仅包括话务分流的效果验证，还要包括网络的负荷水平、KPI 水平的验证。在各小区的负荷、KPI 水平正常的情况下，验证话务分流是否达到了预期目标。

LTE 常用术语

1x RTT	CDMA 1X Radio Transmission Technology	CDMA 1x 无线传送技术
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划, 第三代无线接口技术规范
AAL2	ATM Adaptation Layer Type 2	ATM 自适应层类型 2
AAS	Adaptive Antenna System	自适应天线系统
AC	Access Control	WLAN 的接入控制点
ACK	Acknowledgement	确认
AGW	Access Gateway	接入网关, 包括服务网关 SGW 和分组网关 PGW
AM	Acknowledgement Mode	确认模式
AMBR	Aggregated Maximum Bit Rate	组合最大比特速率
AMC	Adaptive Moderation and Coding	自适应调制编码
AMR	Adaptive MultiRate	自适应多速率
ANR	Automatic Neighbor Relation	自动邻区关系
AP	Access Point	WLAN 接入点
APN	Access Point Name	接入点名称, 分组网络接入标识
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses	日本无线工业及商贸联合会
ARP	Allocation And Retention Priority	分配保留优先级
AS	Access Stratum	接入层
ATIS	Alliance for Telecommunication Industry Solutions	美国世界无线通信解决方案联盟
ATM	Asynchronous Transfer Mode	异步传输模式
BCCH	Broadcast Control Channel	广播控制信道, 逻辑信道
BCH	Broadcast Channel	广播信道, 传输信道
BLAST	Bell Labs Layered Space-Time	贝尔实验室多天线系统空时分层方案
BMC	Broadcast Multicast Control	广播组播控制
BPSK	Binary Phase Shift Keying	二相移相键控
BSC	Base Station Controller	GSM 基站控制器
BSR	Buffer Status Report	缓冲区状态报告
BTS	Base Transceiver Station	基站收发台, GSM 基站
CAPEX	Capital Expenditure	投资成本

续表

CC	Chase Combining	Chase 合并技术, 重传冗余版本一样的合并技术
CCCH	Common Control Channel	公共控制信道, 逻辑信道
CCE	Control Channel Element	控制信道单元, LTE UE 进行盲检时的搜索空间
CCH	Control Channel	控制信道
CCO	Cell Change Order	小区改变命令
CCSA	China Communications Standards Association	中国通信标准化协会
CDD	Cycle Delay Diversity	循环延时分集
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CFI	Control Format Indicator	控制信道格式指示
CGI	Cell Global Identifier	小区全球标识, 用于网络范围内区别小区
CIO	Cell Individual Offset	小区特定偏置
CMC	Connection Mobility Control	连接移动性控制
CN	Core Network	核心网
CP	Cyclic Prefix	循环前缀
CPE	Customer Premise Equipment	用户端设备
CPE_X	Customer Premise Equipment for E-UTRA operating band X	LTE 不同频段的终端设备
CPICH	Common Pilot Channel	公共导频信道
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余校验
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier	基站为终端分配的无线网络临时调度的标识
CS	Circuit Switch	电路域交换
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	载波侦听多路访问
CT	Communication Technology	通信技术
CTCH	Common Traffic Channel	公共业务信道
DAB	Digital Audio Broadcast	数字音频广播
DCA	Dynamic Channel Allocation	动态信道分配
DCCH	Dedicated Control Channel	专用控制信道, 逻辑信道
DCH	Dedicated Channel	专用信道
DCI	Downlink Control Information	下行控制信息
DFT-S-OFDM	Discrete Fourier Transform Spread OFDM	离散傅里叶变换扩展 OFDM
DL	Downlink	下行

续表

DLL	Data Link Layer	数据链路层
DL-SCH	Downlink Shared Channel	下行共享信道
DM	Division Multiplexing	复用
DM RS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
DMA	Division Multiple Access	多址
DRA	Dynamic Resource Allocation	动态资源调度分配
DRB	Data Radio Bearer	业务数据承载
DRX	Discontinuous Reception	不连续接收
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理
DTCH	Dedicated Traffic Channel	专用业务信道, 逻辑信道
DTX	Discontinuous Transmission	不连续发送
DVB	Digital Video Broadcast	数字视频广播
DwPTS	downlink pilot timeslot	TD-SCDMA、TDD-LTE 下行导频时隙
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution	增强型数据速率 GSM 演进技术
eHSPA	evolved High Speed Packet Access	演进型高速分组接入
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power	等效全向发射功率
EMS	network Element Management System	网元管理系统
eNodeB	Evolved NodeB	演进型 NodeB, LTE 基站
EPC	evolved Packet Core	演进型分组网, LTE 核心网
EPRE	Energy Per Resource Element	LTE 无线资源每 RE 能量
EPS	evolved Packet System	演进型分组系统, LTE 核心网系统
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准化协会
eUTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access	演进型通用陆地无线接入, LTE 无线接入技术
eUTRAN	Evolved UTRAN	演进型通用陆地无线接入网, LTE 无线接入网
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FDM	Frequency Division Multiplexing	频分复用系统
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址
FFR	Fractional Frequency Reuse	部分频率复用
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
FS	Frame Structure	帧格式
FSTD	Frequency Switched Transmit Diversity	频率转换传送分集
GBR	Guaranteed Bit Rate	保证比特速率
GERAN	GSM、EDGE Radio Access Network	GSM、EDGE 无线接入网

续表

GGSN	Gateway GPRS Support Node	网关 GPRS 支持节点
GMSK	Gaussian Filtered Minimum Shift Keying	高斯滤波最小频移键控
GP	Guard Period	保护时隙
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GSM	Global System for Mobile communication	全球移动通信系统, 第二代移动通信, 欧洲标准
GTP-U	GPRS Tunneling Protocol for User Plane	GPRS 用户平面隧道协议
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
HII	High Interference Indication	高干扰指示
HRPD	CDMA2000 High Rate Packet Data	cdma2000 高速分组数据, cdma2000 的无线接入网
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access	高速下行分组接入
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel	高速下行链路共享信道
HSPA	High Speed Packet Access	高速分组接入, 包括上、下行
HSS	Home Subscriber Server	归属用户服务器
HS-SCCH	High Speed Shared Control Channel	高速共享控制信道, 下行
HS-SICH	High Speed Shared Information Channel	高速共享信息信道, 上行
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access	高速上行分组接入
Hys	Hysteresis	迟滞, 用于抑制乒乓切换或重选
IC	Interference Cancelation	干扰消除
ICI	Inter Carrier Interference	多载波间干扰
ICIC	Inter-Cell Interference Indication	小区间干扰协调
IDMA	Interleaving Division Multiple Address	交织多址, 干扰随机化技术
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	美国电气和电子工程师协会
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	逆快速傅里叶变换
IMT	International Mobile Telecom System	国际移动电话系统
IoT	Interference Over Thermal Noise	上行干扰
IP	Internet Protocol	互联网协议, 三层
IPTV	Internet Protocol Television	IP 电视
IR	Incremental Redundancy	完全增量冗余的 HARQ 合并技术
ISI	Inter Symbol Interference	符号间干扰, 多径时延引起
IT	Internet Technology	互联网技术
LAC	Location Area Code	位置区编号, 电路域寻呼区域
LB	Load Balance	负载均衡
LC	Load Control	负载控制

续表

LDPC	Low Density Parity Check Code	低密度奇偶校验码
LTE	Long Term Evolution	3GPP 长期演进项目
MAC	Medium Access Control	媒体接入控制
MAPL	Maximal Allowed Path Loss	最大允许路损
MBMS	Multimedia Broadcast and Multicast Service	多媒体广播和组播业务
MBR	Maximum Bit Rate	最大比特速率
MBSFN	Multicast Broadcast over Single Frequency Network	多播广播同频网络
MCCH	MultiCast Control Channel	多播控制信道, 逻辑信道
MCH	Multicast Channel	多播信道, 传输信道
MCM	Multi-Carrier Modulation	多载波调制
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制编码方案
MIB	Master Information Block	主系统信息块
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出天线系统
MISO	Multiple Input Single Output	多入单出系统
MM	Mobility Management	移动性管理
MME	Mobility Management Entity	移动性管理实体
M-RNTI	MBMS Radio Network Temporary Identifier	基站为终端分配, MBMS 业务无线网络临时调度的标识
MTCH	Multicast Traffic Channel	多播业务信道, 逻辑信道
MU-MIMO	Multi User MIMO	多用户 MIMO
NACK	Negative Acknowledgement	不确认
NAS	Non-Access Stratum	非接入层
NGMN	Next Generation Mobile Networks	下一代移动网络
NL	Network Layer	网络层
OAM	Operation Administration and Maintenance	操作、管理、维护
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分多址
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access	正交频分多址接入
Off	Offset	偏置值, 用于移动边界
OI	Overload Indication	过载指示
OMC	Operation & Maintenance Center	操作维护中心
OPEX	Operation Expenditure	运营维护成本
P/S	Parallel to Serial	并/串转换
PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰均比
PARC	Per Antenna Rate Control	每天线速率控制

续表

PBCH	Physical Broadcast Channel	物理广播信道
PC	Power Control	功率控制
PCCH	Paging Control Channel	寻呼控制信道, 逻辑信道
PCCPCH	Primary Common Control Physical Channel	主公共控制物理信道
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel	物理控制格式指示信道
PCH	Paging Channel	寻呼信道, 传输信道
PCI	Physical Cell ID	物理小区 ID, 用于终端区别小区
PCRF	Policing and Charging Rules Function	策略和计费规则功能
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	物理下行控制信道
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PDG	Packet Data Gateway	分组数据网关
PDN	Packet Data Network	LTE 以外的数据网络, 如 Internet, 企业专用数据网等
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	物理下行共享信道
PDSN	Packet Data Serving Node	分组数据服务节点
PDU	Packet Data Unit	分组数据单元
PF	Partional Fair	部分公平, 调度算法
PGW	PDN Gateway	分组数据网关
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	物理 HARQ 指示信道
PHY	Physical layer	物理层
PMCH	Physical Multicast Channel	物理多播信道
PMI	Precoding Matrix Indicator	预编码矩阵指示
PMM	PS Mobility Management	核心网 PS 域移动性管理
PN	Pseudo-Noise Sequence	伪噪声序列
PRACH	Physical Random Access Channel	物理随机接入信道
PRB	Physical Resource Block	物理资源块
P-RNTI	Paging Radio Network Temporary Identifier	基站发送寻呼消息的网络临时标识
PS	Packet Switched	分组交换
PSS	Primary Synchronization Signal	主同步信号, 用于符号时间对准, 频率同步及小区 ID 侦测
PTT	Push-To-Talk	一键通话
PUCCH	Physical Uplink Control Channel	物理上行控制信道
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	物理上行共享信道
PVS	Precoding Vector Switch	预编码矢量转换
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
QCI	QoS Class Identifier	QoS 等级指示

续表

QoS	Quality of Service	服务质量
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	四相相移键控
RAC	Radio Admission Control	无线准入控制
RAC	Routing Area Code	分组区编号, 分组域寻呼区域
RACH	Random Access Channel	随机接入信道, 传输信道
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RA-RNTI	Random Access Radio Network Temporary Identifier	基站发送随机接入响应的标识
RAT	Radio Access Technology	无线接入技术
RB	Radio Bearer	无线承载
RB	Resource Block	资源块
RBC	Radio Bearer Control	无线承载控制
RBG	Resource Block Group	资源块组
RE	Resource Element	资源单元
RF	Radio Frequency	射频参数, 包括天线工程参数和站点工程参数
RI	Rank Indicator	多天线系统秩大小指示
RLC	Radio Link Control	无线链路控制
RN	Relay Node	中继节点
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RNTI	Radio Network Temporary Identifier	无线网络临时标识
RNTP	Relative Narrowband TX Power Indicator	相对窄带发射功率
RR	Round Robin	轮询调度算法
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理
RS	Reference Signal	参考信号
RSCP	Received Signal Code Power	接收信号码功率
RSRP	Reference Signal Received Power	参考信号接收电平
RSRQ	Reference Signal Received Quality	参考信号接收质量
RSSI	Received Signal Strength Indicator	接收信号强度指示
RSTD	Reference Signal Time Difference	参考信号时间差
RTT	Round-Trip Time	往返时间
S/P	Serial to Parallel	串并转换
SA	Smart Antenna	智能天线
SAE	System Architecture Evolution	系统架构演进, LTE 的核心网架构
SAP	Service Access Point	业务接入点

续表

SAW	Stop-AND-Wait	停止等待
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access	单载波频分多址
SCH	Shared Channel	共享信道
SCTP	Streaming Control Transport Protocol	流控制传输协议
SD	Space Diversity	空间分集
SDMA	Space Division Multiple Access	空分多址
SFBC	Space Frequency Block Coding	空频块编码
SFR	Soft Frequency Reuse	频率软复用
SGSN	Serving GPRS Support Node	服务 GPRS 支撑节点
SGW	Serving Gateway	服务网关
SI	Study Item Stage	标准研究阶段
SIB	System Information Block	系统信息块
SIMO	Single Input Multiple Output	单入多出系统
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信号与干扰噪声之比
SIR	Signal to Interference Ratio	信干比
SI-RNTI	System Information Radio Network Temporary Identifier	系统消息的无线网络临时标识
SISO	Single Input Single Output	单入单出系统
SM	Space Multiplexing	空分复用
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SON	Self Organization Network	自组织网络
SPS	Semi-Persistent Scheduling	半持续调度
SPS C-RNTI	Semi-Persistent Scheduling Cell Radio Network Temporary Identifier	半静态调度时, 基站为终端分配的无线网络临时调度的标识
SR	Scheduling Request	调度申请
SRB	Signaling Radio Bearer	RRC 信令承载
SRS	Sounding Reference Symbol	环境参考信号
SS	Synchronization Signal	同步信号
SSS	Secondary Synchronization Signal	从同步信号, 用于帧时间对准, CP 长度检测及小区组 ID 检测
STBC	Space Time Block Code	空时块编码
STC	Space Time Coding	空时编码
SU-MIMO	Single User MIMO	单用户 MIMO
TA	Time Advance	时间提前量
TA	Tracking Area	LTE 的跟踪区, 作用类似位置区

续表

TAC	Tracking Area Code	LTE 中小区归属的跟踪区域编号
TAU	Tracking Area Update	跟踪区更新
TB	Transport Block	传输块
TCH	Traffic Channel	控制信道
TC-RNTI	Temporary Cell RNTI	小区临时 RNTI
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TD-SCDMA	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access	时分同步码分多址系统, 一种第三代无线通信的技术标准
Thresh	Threshold	门限
TPC-PUCCH-RNTI	Transmit Power Control PUCCH RNTI	PUCCH 上行功控信息无线网络临时调度标识
TS	Technical Specification	技术细则
TSTD	Time Switch Transmit Diversity	时间转换传送分集
TTI	Transmission Time Interval	传送时间间隔, 调度时间间隔
TX Diversity	Transmit Diversity	发射分集
UE	User Equipment	用户设备
UL	Uplink	上行
UL-SCH	Uplink Shared Channel	上行共享信道, 传输信道
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	通用移动通信系统, 3GPP 制定的全球 3G 标准, 包括 WCDMA、TD-SCDMA
UPE	User Plane Entity	用户面实体
UpPTS	UpLink Pilot Timeslot	TD-SCDMA、TDD-LTE 上行导频时隙
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access	通用陆地无线接入技术
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network	通用陆地无线接入网
UWB	Utra Wide Band	超宽带系统
VoIP	Voice Over IP	IP 语音电话
VP	Video Phone	视频电话
VRB	Virtual Resource Block	虚拟资源块
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	宽带码分多址系统, 3G 标准之一
WI	Work Item Stage	标准制定阶段
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access	全球微波互联接入, 见 IEEE 802.16 协议
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网, 见 IEEE 802.11 协议
WSN	Wireless Sensor Network	无线传感网
ZC	Zadoff-Chu	自相关特性较好的一种序列

后 记

写这篇后记的时候，我正乘坐在回北京的动车组上。经过几小时的风驰电掣，就要回到阔别数周的北京。闭眼小憩，梦到了自己驾驶着飞驰的列车，驶向 LTE 的殿堂，车上坐着的是求知和求职欲望强烈的诸位朋友。

在这本书的写作过程中，我体会了完成一件事情，兑现一个承诺的苦与乐，为以后的工作和生活储备了宝贵的精神财富。

我梳理了很多移动通信知识，总结了诸多实战经验，为新入行的人提供了一个快速行驶的便道。LTE 和其他无线制式一样，都需要进行射频收/发、调制/解调、编码/解码等过程，也需要解决抑制干扰、对抗衰落等疑难问题；LTE 和其他无线制式不一样，它追求频谱效率的大幅提升，资源调度的高效灵活，使用了很多独特的关键技术。

在回京的路上，我突然想起了一个小故事：一个炒股老师告诉学员，炒股很简单，就是四个字：“高抛低吸”。

学员听明白了，觉得老师说的太有道理了。可是实际操作后，发现还是“低抛高吸”。回来找老师。

老师训斥道：“不是让你们高抛低吸吗？你们怎么这么笨呢！”

学员请求老师给示范一下。结果老师炒股也是低抛高吸。

这个故事告诉我们，原则和道理固然重要，但更重要的是这些原则和道理在实际工作中的应用。而这个应用的过程，才是理解原理，加深认识的必由之路。

这本书给朋友深入浅出地介绍了 LTE 的基本原理和技术关键，虽然也有一些实战经验的总结，但这些实战经验的真正掌握离不开实际操作这一环节。希望读者读完本书后，积极地投入到 LTE 的实际工作中来。

最后，用一首郑板桥的诗与大家共勉：“咬定青山不放松，立根原在破岩中。千磨万击还坚劲，任尔东西南北风。”祝愿大家在以后的工作和生活中，排除万难，心想事成。

元 泉
2012 年 3 月

参 考 文 献

- [1] <http://www.3gpp.org/>.
- [2] 3GPP TR 21. 905. Vocabulary for 3GPP Specifications.
- [3] 3GPP TR 25. 913. Feasibility Study of Evolved UTRA and UTRAN.
- [4] 3GPP TS 25. 104. Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD).
- [5] 3GPP TS 25. 105. Base Station (BS) radio transmission and reception (TDD).
- [6] 3GPP TS 36. 101. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.
- [7] 3GPP TS 36. 104. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception.
- [8] 3GPP TS 36. 133. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management.
- [9] 3GPP TS 36. 201. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description.
- [10] 3GPP TS 36. 211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation.
- [11] 3GPP TS 36. 212. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding.
- [12] 3GPP TS 36. 213. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures.
- [13] 3GPP TS 36. 214. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer – Measurements.
- [14] 3GPP TS 36. 300. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (eUTRAN); Overall description; Stage 2.
- [15] 3GPP TS 36. 302. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Services provided by the physical layer.
- [16] 3GPP TS 36. 304. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode.
- [17] 3GPP TS 36. 306. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities.
- [18] 3GPP TS 36. 314. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Layer 2 - Measurements.
- [19] 3GPP TS 36. 321. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification.

- [20] 3GPP TS 36. 322. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification.
- [21] 3GPP TS 36. 323. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification.
- [22] 3GPP TS 36. 331. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification.
- [23] 3GPP TS 36. 401. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Architecture description.
- [24] 3GPP TS 36. 410. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); S1 layer 1 general aspects and principles.
- [25] 3GPP TS 36. 411. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); S1 layer 1.
- [26] 3GPP TS 36. 412. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); S1 signalling transport.
- [27] 3GPP TS 36. 413. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; S1 Application Protocol (S1AP).
- [28] 3GPP TS 36. 414. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); S1 data transport.
- [29] 3GPP TS 36. 420. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); X2 general aspects and principles.
- [30] 3GPP TS 36. 421. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); X2 layer 1.
- [31] 3GPP TS 36. 422. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); X2 signalling transport.
- [32] 3GPP TS 36. 423. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); X2 Application Protocol (X2AP).
- [33] 3GPP TS 36. 424. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); X2 data transport.
- [34] 3GPP TS 36. 440. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); General aspects and principles for interfaces supporting Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) within eUTRAN.
- [35] 3GPP TS 36. 441. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Layer 1 for interfaces supporting Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) within eUTRAN.
- [36] 3GPP TS 36. 442. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Signalling Transport for interfaces supporting Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) within eUTRAN.
- [37] 3GPP TS 36. 508. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Common test environments for User Equipment (UE) conformance testing.
- [38] 3GPP TS 36. 509. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Terminal logical test interface; Special conformance testing functions.

- [39] 3GPP TR 36. 801. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Measurement Requirements.
- [40] 3GPP TR 36. 803. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.
- [41] 3GPP TR 36. 804. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception.
- [42] 3GPP TR 25. 813. Radio interface protocol aspects.
- [43] 3GPP TR 25. 814. Physical Layer Aspects for Evolved UTRA.
- [44] 3GPP TR 36. 902. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions.
- [45] 3GPP TR 36. 913. Requirements for further advancements for E-UTRA (LTE-Advanced).
- [46] 3GPP TR 36. 942. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios.
- [47] Dahlman, Parkvall, Skold and Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, Academic Press, Oxford, UK, 2007.
- [48] <http://www.anywlan.com>.
- [49] Louis litwin. An introduction to multicarrier modulation. IEEE Potentials. 2000.
- [50] Ashish Pandharipande, "Principles of OFDM", IEEE Potentials, 2002.
- [51] K. H. Chang, 等. An OFDM Wireless Transmission Technique for Systems Beyond IMT2000.
- [52] 百度百科 <http://baike.baidu.com/>.
- [53] 通信人家园网 <http://bbs.c114.net/>.
- [54] 沈嘉, 等. 3GPP 长期演进技术原理 (LTE) 与系统设计. 北京: 人民邮电出版社.
- [55] 沈嘉. 3GPP LTE 核心技术及标准化进展. 移动通信, 2006.
- [56] 胡宏林, 徐景. 3GPP LTE 无线链路关键技术. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [57] 赵训威, 林辉等. 3GPP 长期演进 (LTE) 系统架构与技术规范. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [58] 龙紫薇. LTE TDD 与 LTE FDD 技术比较. 人民邮电报, 2008. 11. 21.
- [59] 曲嘉杰. 龙紫薇. TD-LTE 容量特性及影响因素. 电信科学, 2009. 1.
- [60] 汪勇刚. 3G LTE 简介. 现代通信, 2006. 6.
- [61] 孙天伟. 3GPP LTE/SAE 网络体系结构和标准化进展. 广东通信技术, 2007. 2.
- [62] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [63] 黎海涛, 张靖. 无线 OFDM 技术. 电信科学, 2002. 4.
- [64] 单志龙, 史景伦, 熊尚坤. MIMO 技术原理及其在移动通信中的应用. 移动通信, 2009. 6.
- [65] 张长钢, 孙保红, 等. WCDMA 无线网络规划原理与实践. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [66] 梅琼, 吴晓峰. TD-SCDMA/WCDMA 无线网规要点对比解析. 电信工程技术与标准化, 2007. 3.

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

