

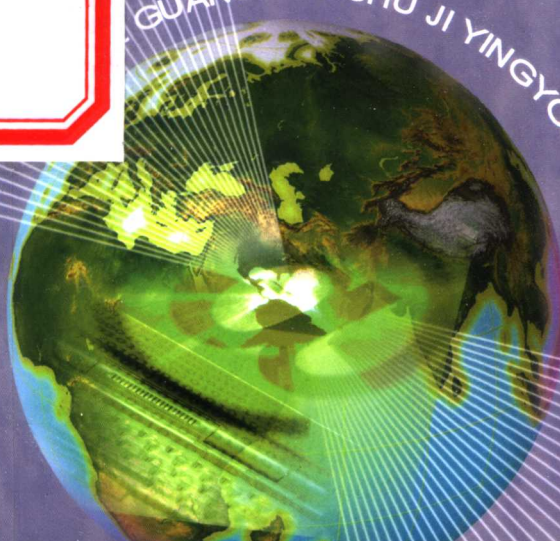


OFDM

的关键技术及应用

谭泽富 聂祥飞 王海宝 编著

OFDM DE GUANJIAN
JISHU JI YINGYONG



GUANJIAN JISHU JI YINGYONG



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

OFDM 的关键技术及应用

谭泽富 聂祥飞 王海宝 编著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内 容 提 要

本书介绍正交频分复用 (OFDM) 技术的关键技术及其在无线通信中的应用。全书共分八章: 第一章简要介绍无线通信的发展历史和 OFDM 通信系统; 第二章介绍 OFDM 的基本原理; 第三章介绍 OFDM 技术中 OFDM 峰平比问题; 第四章介绍 OFDM 系统同步技术; 第五章介绍信道估计方法; 第六章介绍交织器与编码技术; 第七章介绍多址接入法; 第八章介绍 OFDM 的应用。

本书可作为通信工程技术人员和通信专业本科生、研究生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

OFDM 的关键技术及应用 / 谭泽富, 聂祥飞, 王海宝编
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2005.7
ISBN 7-81104-067-0

I. O... II. ①谭...②聂...③王... III. 无线电通信 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 039512 号

OFDM 的关键技术及应用

谭泽富 聂祥飞 王海宝 编著

*

责任编辑 万 方

特邀编辑 赖颖昕

责任校对 韩松云

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 9.875

字数: 246 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-81104-067-0/TN · 009

定价: 20.00 元

图书如有印装问题, 本社负责退换

版权所有, 盗版必究, 举报电话 028-87600562

前 言

随着信息化的进一步发展，未来移动通信系统需要能够用有限的频谱资源来提供更多的通信业务、更高的通信速率和更好的通信质量。为了满足这一需求，移动通信系统中所采用的无线通信技术必须能够进行宽带数据传输且保持一定的通信质量，也就是要能对抗宽带移动信道的种种不利特性，如多径衰落和多普勒频移。

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用) 技术通常也被称为 (正交) 多载波调制技术，它可以在无线信道中实现高速数据传输。其特有的性能使得它在近几年里得到了广泛地研究与应用，其基本思想是将所给信道在频域内分为若干个正交的窄带子信道，然后数据就可以在这些窄带子信道上并行传输且没有码间干扰 (ISI)。这种并行传输的思想早在 1957 年就已经提出，当时采用这种思想的是一个叫 “Kineplex” 的 MODEM 系统，它用于电话线或者 HF 无线信道。之后出现了各种基于 OFDM 的并行传输系统，以及相应的对这些系统的理论研究和基于 DFT 的 OFDM 系统原理。实际上，用 DFT 来代替 OFDM 传统的 MODEM 是 OFDM 发展史上的一个重要里程碑。此后大多数研究都是基于 DFT 的 OFDM 系统的关键技术。这些关键技术包括：OFDM 系统频偏估计技术、适于 OFDM 系统的子载波调制/信道编码技术和相应的自适应技术、减小 OFDM 信号峰平比 (PAPR) 技术、相干 OFDM 系统信道估计技术、OFDM/CDMA 接入技术等。

由于作者学识水平有限，本书的疏漏之处在所难免，望广大读者批评指正。

编 者

2005. 6

目 录

第一章 概 述	1
第一节 引 言	1
第二节 通信概述	2
第三节 无线通信	3
第四节 OFDM 通信系统	10
第二章 OFDM 的原理	13
第一节 OFDM 的基本原理	13
第二节 OFDM 的系统模型	20
第三章 OFDM 峰平比研究	31
第一节 OFDM 峰平比及其分布	31
第二节 减小 OFDM 系统峰平比的方法	33
第三节 用分组编码法减小 OFDM 峰平比	39
第四节 采用限幅的方法减小 OFDM 符号峰平比	53
第四章 OFDM 系统同步分析	56
第一节 时频同步误差对 OFDM 系统性能的影响	56
第二节 帧同步算法	61
第三节 利用导频实现载波同步的方法	75
第四节 最大似然方法联合实现符号定时同步和载波同步的方法	78
第五章 信道估计	88
第一节 OFDM 系统中的相干与差分检测	88
第二节 OFDM 信道估计算法	90
第六章 交织器与编码技术	109
第一节 交织器	109
第二节 编码技术	112
第七章 多址接入法	122
第一节 OFDM/CDMA 接入方案	122
第二节 多载波 CDMA (MC-CDMA)	126

第三节 MC-CDMA (OFDM-CDMA) 系统分析及关键技术 129
 第四节 MC-CDMA 系统的发射机与接收机模型 135
 第五节 MC-CDMA 用户接收机检测技术 139
 第八章 OFDM 的应用 144
 第一节 OFDM 的广泛应用 144
 第二节 OFDM 在下一代移动通信中的应用 149
 参考文献 152

第一章 概 述

第一节 引 言

现代社会已步入了信息时代，在各种信息技术中，信息的传输即通信起着支撑作用。Internet 的兴起，让我们通过计算机就能同地球上任何一个国家、任何一个人、在任何时候进行联系，实现天涯若比邻的地球村；通过网络我们可以和更多的人进行交流、互通信息，如收发 E-mail、电子商务、网上交易，等等。但是，目前为开发 Internet 应用而出现的绝大多数技术，一般只适用于台式计算机或大型计算机，通常是基于可靠的数据网络，采用中等以上带宽。而对于使用便携式电脑和需要经常流动的人们来说，就不可能实现在任何地方、任何时候、与任何人进行交流获取信息的真正个人通信方式的要求。这个局限让人们感到很多不便，无法满足人们在移动中获取信息的需求。

移动通信的发展打破了通信与地点之间的固定连接，它采用无线技术解决了 Internet 所不能解决的移动性，使人们可以在移动中进行信息的获取和交互。由于人类社会生活对通信的需求越来越高，世界各国都在致力于现代通信技术的研究与开发以及现代通信网的建设。

移动通信是现代通信系统中不可或缺的组成部分。移动通信就是指通信双方至少有一方在运动状态中进行信息传输。例如，移动台（车辆、船舶、飞机或者行人）与固定点之间，或者移动台之间的通信都属于移动通信的范畴。另外，还有一种可移动的概念，即通信用户的位置是可变的，但通信过程中用户可能并不处于运动状态。这类通信也可称为移动通信，但与严格意义上的移动通信相比，两者的无线信道特性有较大的差别。

现代移动通信是一门复杂的高新技术，不但集中了无线通信和有线通信的最新技术成就，而且集中了网络技术和计算机技术的许多成果。目前，移动通信已从模拟通信发展到了数字移动通信阶段，并且正朝着个人通信这一更高级阶段发展。未来的无线通讯系统必然会朝着宽带多媒体方向发展，要想实现这样的系统，需要选择合适的调制技术，以实现高速传输并能有效地对抗频率选择性衰落信道和解决由多径引起的码间干扰问题。近些年来，一种多载波技术受到了广泛的关注：正交频分复用技术（OFDM），它能够很好地解决无线信道中由多径引起的码间干扰问题，故被认为是下一代无线通信系统的首选调制技术。

第二节 通信概述

一、通信发展历史

第一阶段：1838年，摩尔斯发明有线电报，开始了电通信阶段。1843年，亚历山大·本取得电传打字电报的专利。1864年，麦克斯韦创立了电磁辐射理论，并被当时的赫兹证明，促使了后来无线通信的出现。1876年，贝尔利用电磁感应原理发明了电话。1879年，第一个专用人工电话交换系统投入运行。1880年，第一个付费电话系统运营。1892年，加拿大政府开始规定电话速率。1896年，马可尼发明无线电报。1907年，电子管问世，通信进入电子信息时代。1915年，横贯大陆电话开通，实现越洋语音连接。1918年，调幅无线电广播、超外差式接收机问世。1925年，开通三路明线载波电话，开始多路通信。1936年，调频无线电广播开播。1937年，雷沃斯发明脉冲编码调制，奠定了数字通信基础。1938年，电视广播开播。20世纪40年代二战期间，雷达与微波通信得到发展。1946年，第一台数字电子计算机问世。1947年，晶体管在贝尔实验室问世，为通信器件的发展创造了条件。

第二阶段：1948年，香农提出了信息论，建立了通信统计理论。1950年，时分多路通信应用于电话系统。1951年，直拨长途电话开通。1956年，敷设越洋通信电缆。1957年，发射第一颗人造地球卫星。1958年，发射第一颗通信卫星。1962年，发射第一颗同步通信卫星，开通国际卫星电话；脉冲编码调制进入实用阶段。20世纪60年代，彩色电视机问世，阿波罗宇宙飞船登月，数字传输理论与技术得到迅速发展，计算机网络开始出现。1969年，电视电话业务开通。20世纪70年代，商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统投入使用，一些公司制定计算机网络体系结构。

第三阶段：20世纪80年代，开通数字网络的公用业务，个人计算机和计算机局域网出现，网络体系结构国际标准陆续制定。20世纪90年代，蜂窝电话系统开通，各种无线通信技术不断涌现，光纤通信得到迅速普遍的应用，国际互联网得到极大的发展。1997年，68个国家签订国际协定，互相开放电信市场。

二、通信系统的分类和通信方式

1. 通信系统的分类

通信系统有不同分类方法。下面从通信系统模型的角度讨论分类。

(1) 按消息的物理特征分类。根据消息的物理特征的不同，通信系统可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。由于电话通信网最为发达普及，因而其他消息常常通过公共的电话通信网传送。例如，电报常通过电话信道传送。又如，随着电子计算机发展而迅速增长起来的数据通信，在远距离传输数据时也常常利用电话信道传送。在综合业务通信网中，各种类型的消息都在统一的通信网中传送。

(2) 按调制方式分类。根据是否采用调制，可将通信系统分为基带传输和频带（调制）

传输。基带传输是将未经频带调制的信号直接传送，如音频市内电话；频带传输是对各种信号调制后传输的总称。

(3) 按信号特征分类。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分成模拟通信系统与数字通信系统两类。

(4) 按传输媒介分类。按传输媒介可将通信系统分为有线（包括光纤）和无线两类。

(5) 按信号复用方式分类。传送多路信号有三种复用方式，即频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围；时分复用是用抽样或脉冲调制方法使不同信号占据不同的时间区间；码分复用则是用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号。

传统的模拟通信中大都采用频分复用。随着数字通信的发展，时分复用通信系统的应用越来越广泛。码分复用多用于空间扩频通信系统中，目前又开始用于移动通信系统中。

2. 通信方式

对于点与点之间的通信，按消息传送的方向与时间关系，通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种。所谓单工通信，是指消息只能单方向传输的工作方式。例如，遥测、遥控，就是单工通信方式。所谓半双工通信，是指通信双方都能收发消息，但不能同时进行收发的工作方式。例如，使用同一载频工作的无线电对讲机，就是按这种通信方式工作的。所谓全双工通信，就是指通信双方可同时进行收发消息的工作。例如，普通电话就是一种最常见的全双工通信方式。

在数字通信中，按照数字信号码元排列方法不同，有串行传输与并行传输之分。所谓串行传输，是将数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输。如果将数字信号码元序列分割成两路或两路以上的数字信号码元序列并同时在信道中传输，则称为并行传输。

一般的远距离数字通信大都采用串行传输方式，因为这种方式只需占用一条通路。并行传输在近距离数字通信中有时也会遇到，它需要占用两条或两条以上的通路，比如使用多条导线传输。

实际的通信系统分为专线和通信网两类。专门为两点之间设立传输线的通信，称之为专线通信，有时简称为点与点通信。多点间的通信属于网通信。显然，网通信的基础仍是点与点的通信。

第三节 无线通信

一、无线通信概述

人类采用无线通信的历史可以追溯到遥远的古代。但直到 19 世纪末，人们都是采用十分直观的方式实现简单的信息传输。古代战争中的烽火台、金鼓和旌旗都是直观无线通信的例子。1864 年，英国物理学家 J. C. Maxwell 创造性地总结了人们已用的电磁学知识，预言了电磁波的存在。1886 年，德国物理学家 H. Hertz 用实验产生出电磁波，证明了 J. C. Maxwell

的预言。1897 年，意大利科学家 G. Marconi 首次使用无线电波进行信息传输并获得成功。当时他完成的无线通信实验就是在固定站与一艘轮船之间进行的，两者的距离为 18 海里。在后来一个多世纪的时间里，在飞速发展的计算机和半导体技术的推动下，无线移动通信的理论和技術不断取得进步。今天，无线移动通信已经发展到大规模商用并逐渐成为人们日常生活中不可缺少的重要通信方式之一。

现代移动通信技术的发展始于 20 世纪 20 年代，但是一直到 20 世纪 70 年代中期，才迎来了移动通信的蓬勃发展。1978 年底，美国贝尔实验室研制成功先进移动电话系统工程（AMPS），建成了蜂窝状模拟移动通信网，大大提高了系统容量。与此同时，其他发达国家也相继开发出蜂窝式公用移动通信网。这一阶段的特点是蜂窝移动通信网成为实用系统，并在世界各地迅速发展。移动通信得到迅猛发展的原因，除了用户需求迅速增加这一主要推动力之外，还有几方面技术进展所提供的条件。首先，微电子技术在这一时期得到迅速发展，使得通信设备能够实现小型化、微型化。其次，移动通信新体制的提出并且形成，即贝尔实验室在 20 世纪 70 年代提出的蜂窝网的概念。蜂窝网，即所谓的小区制，由于实现了频率再用，大大提高了系统容量。第三方面进展是随着大规模集成电路的发展而出现的微处理器技术日趋成熟以及计算机技术的迅猛发展，从而为大型通信网的管理与控制提供了技术手段。这一阶段所诞生的移动通信系统一般被当做是第一代移动通信系统。第一代蜂窝移动通信系统出现于 20 世纪 80 年代早期，采用频分多址和模拟技术，包括模拟蜂窝和无绳电话系统。典型的系统有美国的 AMPS、英国的 TACS、前西德的 C-450 等。模拟系统的缺点主要有频谱利用率低、抗干扰能力差、系统保密性差等，但由于模拟技术十分成熟，因而在发展初期也得到了较为广泛的应用。模拟蜂窝技术由于不适合未来多媒体通信业务的需求，必将在日益激烈的市场竞争中逐步被淘汰。

从 20 世纪 80 年代中期开始，数字移动通信系统进入到发展和成熟时期。蜂窝模拟网的容量已不能满足日益增长的移动用户的需求。80 年代中期，欧洲首先推出了全球移动通信系统（GSM）。随后美国和日本也相继指定了各自的数字移动通信体制。20 世纪 90 年代初，美国 Qualcomm 公司推出了窄带码分多址（CDMA）蜂窝移动通信系统，这是移动通信系统中具有重要意义的事件。从此，码分多址这种新的无线接入技术在移动通信领域占有了越来越重要的地位。除此之外，还有欧洲的 DCS-1900，美国的 IS-54 等。这些目前正在广泛使用的数字移动通信系统是第二代移动通信系统。

第二代移动通信系统主要是为支持语音和低速率的数据业务而设计的。但随着人们对通信业务范围和业务速率要求的不断提高，已有的第二代移动通信网将很难满足新的业务需求。为了适应新的市场需求，人类正在制定第三代（3G）移动通信系统。尽管目前关于第三代移动通信系统的研究和标准化工作十分引人注目，但通信界也存在不同的观点。这种观点认为，目前第三代移动通信的方案实际只能是第二代移动通信方案的改进，算不上真正意义上的宽带接入网络，并且由于 3G 系统的核心网还没有完全脱离第二代移动通信系统的核心网结构，所以有理由认为第三代系统仅仅是一个从窄带向未来移动通信系统过渡的阶段。目前，人们已经把目光越来越多地投向三代以后（beyond 3G）移动通信系统中，使其可以容纳庞大的用户数、改善现有的通信品质，以及达到高速数据传输的要求。若以技术层面来看，第三代移动通信系统主要是以 CDMA 为核心技术，三代以后的移动通信系统则以正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）最受瞩目，特别是有不少

专家学者针对 OFDM 技术在移动通信技术上的应用，提出相关的理论基础，例如，无线本地环路（WLL）、数字音讯广播（DAB）等，都将在未来采用 OFDM 技术。

二、无线衰弱信道的传播特征

要想知道无线通信系统经历上述发展阶段的原因，首先需要对无线衰弱信道的特征有一定的了解，本节将简单介绍无线通信的几种基本传播特征。与其他通信信道相比，移动信道是最为复杂的一种。电波传播的主要方式是空间波，即直射波、折射波、散射波以及它们的合成波。再加之移动台本身的运动，使得移动台与基站之间的无线信道多变并且难以控制。信号通过无线信道时，会受到各种衰落的影响，一般来说接收信号的功率可以表达为

$$P(\vec{d}) = |\vec{d}|^{-n} S(\vec{d}) R(\vec{d})$$

式中， $\vec{d}$ 表示移动台与基站的距离向量； $|\vec{d}|$ 表示移动台与基站的距离。根据上式，无线信道对信号的影响可以分为三种：

- ① 电波在自由空间内的传播损耗 $|\vec{d}|^{-n}$ ，也被称作大尺度衰落，其中 n 一般为 3~4；
- ② 阴影衰落 $S(\vec{d})$ ：由于传播环境中起伏的地形、建筑物和其他障碍物对电波的阻塞或遮蔽而引发的衰落，被称作中等尺度衰落；
- ③ 多径衰落 $R(\vec{d})$ ：由于无线电波在空间传播会存在反射、绕射、衍射等，因此造成信号可以经过多条路径到达接收端，而每个信号分量的时延、衰落和相位都不相同，因此在接收端对多个信号分量叠加时，会造成同相增加，异相减小的现象，这也被称作小尺度衰落。

图 1.1 清楚地说明了以上三种衰落，此外，由于移动台的运动，还会使得无线信道呈现出时变性，其中一种具体表现就是会出现多普勒频移。自由空间的传播损耗和阴影衰落主要影响到无线区域的覆盖，通过合理的设计就可以消除这种不利影响。本节主要针对无线信道的多径衰落和时变性加以讨论，对大尺度衰落和阴影衰落只作简单介绍。

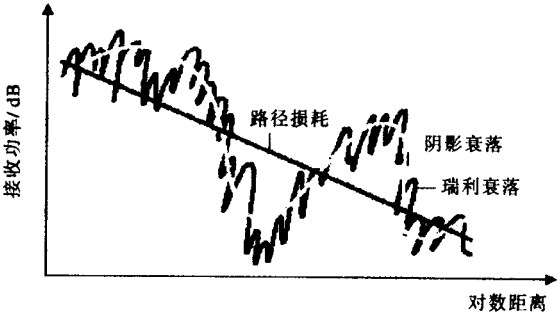


图 1.1 信号在无线信道中的传播特性

1. 无线信道的大尺度衰落

无线电波在自由空间内传输，其信号功率会随着传播距离的增加而减小，这会对数据速率以及系统的性能带来不利影响。最简单的大尺度路径损耗的模型可以表示为

$$L = \frac{\bar{P}_r}{P_t} = K \frac{1}{d^\gamma}$$

式中, P_t 表示本地平均发射信号功率; $\bar{P}_r$ 表示接收功率; d 是发射机与接收机之间的距离。对于典型环境来说, 路径损耗指数 γ 一般在 $2 \sim 4$ 中选择。由此可以得到平均信号噪声比 (SNR) 为

$$SNR = \frac{\bar{P}_r}{P_n} = K \frac{P_t}{d^\gamma} \cdot \frac{1}{N_0 B}$$

式中, N_0 是单边噪声功率谱密度; B 是信号带宽; K 是独立于距离、功率和带宽的常数。如果为保证可靠接收, 要求 $SNR \geq SNR_0$, 其中 SNR_0 表示信噪比门限, 则路径损耗会为比特率带来限制:

$$B \leq \frac{K P_t}{d^\gamma N_0 SNR_0}$$

以及对信号的覆盖范围也会带来限制:

$$d \leq \left(\frac{K P_t}{N_0 B SNR_0} \right)^{1/\gamma}$$

可见, 如果不采用其他特殊的技术, 则数据的符号速率以及电波的传播范围都会受到很大的限制。但是在一般的蜂窝系统中, 由于小区的规模相对较小, 所以这种大尺度衰落对移动通信系统的影响并不需要单独加以考虑。

2. 阴影衰落

当电磁波在空间传播受到地形起伏、高大建筑物的阻挡时, 在这些障碍物后面会产生电磁场的阴影, 造成场强中值的变化, 从而引起衰落, 被称作阴影衰落, 参见图 1.1 中空缺曲线。与多径衰落相比, 阴影衰落是一种宏观衰落, 是以较大的空间尺度来衡量的, 其衰落特征符合对数正态分布。其中接收信号的局部场强中值变化的幅度取决于信号频率和障碍物状况。频率较高的信号比低频信号更加容易穿透障碍物, 而低频信号较高频率信号具备更强的绕射能力。

3. 无线信道的多径衰落

无线移动信道的主要特征就是多径传播, 即接收机所接收到的信号是通过不同的直射、反射、折射等路径到达接收机的。由于电波通过各个路径的距离不同, 因而各条路径中发射波的到达时间、相位都不同。不同相位的多个信号在接收端叠加, 同相叠加会使信号幅度增加, 而反相叠加则会削弱信号幅度。这样, 接收信号的幅度将会发生急剧变化, 产生衰落。

例如, 发射端发送一个窄脉冲信号, 则在接收端可以收到多个窄脉冲, 每一个窄脉冲的衰落和时延以及窄脉冲的个数都是不同的。对应一个发送脉冲信号, 接收端将显示所接收到的信号情况。这样就造成了信道的时间弥散性 (time dispersion), 其中 $\tau_{\max}$ 被定义为最大时延扩展。

在传输过程中, 由于时延扩展, 接收信号中的一个符号的波形会扩展到其他符号当中, 造成符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI)。为了避免产生 ISI, 应该令符号宽度远远大于无线信道的最大时延扩展, 或者符号速率小于最大时延扩展的倒数。由于移动环境十分

复杂，不同地理位置，不同时间所测量到的时延扩展都可能是不同的，因此需要采用大量测量数据的统计平均值。表 1.1 给出了两种不同信道环境下的时延扩展值。

表 1.1 不同信道环境下的时延扩展值

环 境	最大时延扩展	最大到达路径差
室 内	40 ~ 200 ns	12 ~ 60 m
室 外	1 ~ 20 μ s	300 ~ 6 km

在频域内，与时延扩展相关的另一个重要概念是相干带宽，实际应用中通常用最大时延扩展的倒数来定义相干带宽，即

$$(\Delta B)_c \approx \frac{1}{\tau_{\max}}$$

从频域角度观察，多径信号的时延扩展可以导致频率选择性衰落（frequency-selective fading），即针对信号中不同的频率成分，无线传输信道呈现不同的随机响应，由于信号中不同频率分量的衰落是不一致的，所以经过衰落之后，信号波形就会发生畸变。由此可以看到，当信号的速率较高，信号带宽超过无线信道的相干带宽时，信号通过无线信道后各频率分量的变化是不一样的，引起信号波形的失真，造成符号间干扰，此时就认为发生了频率选择性衰落；反之，当信号的传输速率较低，信道带宽小于相干带宽时，信号通过无线信道后各频率分量都受到相同的衰落，因而衰落波形不会失真，没有符号间干扰，则认为信号只是经历了平衰落，即非频率选择性衰落。相干带宽是无线信道的一个特征，至于信号通过无线信道时，是出现频率选择性衰落还是平衰落，这要取决于信号本身的带宽。

4. 无线信道的时变性以及多普勒频移

当移动台在运动中进行通信时，接收信号的频率会发生变化，称为多普勒效应，这是任何波动过程都具有的特征。以可见光为例，假设一个发光物体在远处以固定的频率发出光波，我们可以接收到的频率应该是与物体发出的频率相同的。现在假设该物体开始向我们运动，但当光源发出第二个波峰时，它距我们的距离应该要比发出第一个波峰时要近，这样第二个波峰达到我们的时间要小于第一个波峰到达我们的时间，因此这两个波峰到达我们的时间间隔变小了，与此相应我们接收到的频率就会增加。相反，当发光物体远离我们而去的时候，我们接收到的频率就要减小，这就是多普勒效应的原理。在天体物理学中，天文学家利用多普勒效应可以判断出其他星系的恒星都在远离我们而去，从而得出宇宙是不断膨胀的结论。这种称为多普勒效应的频率和速度的关系是我们日常熟悉的，例如我们在路边听汽车汽笛的声音：当汽车驶近我们时，其汽笛音调变高（对应频率增加）；而当它驶离我们时，汽笛音调又会变低（对应频率减小）。

信道的时变性是指信道的传递函数是随时间变化而变化的，即在不同的时刻发送相同的信号，在接收端收到的信号是不同的。时变性在移动通信系统中的具体体现之一就是多普勒频移（Doppler shift），即单一频率信号经过时变衰落信道之后会呈现为具有一定带宽和频率包络的信号。这又可以称为信道的频率弥散性（frequency dispersion）。

多普勒效应所引起的附加频率偏移可以称为多普勒频移（Doppler Shift），可以用下式表示

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos \theta = \frac{vf_c}{c} \cos \theta = f_m \cos \theta$$

式中, f_c 表示载波频率; c 表示光速; f_m 表示最大多普勒频移; v 表示移动台运动速度。可以看到, 多普勒频移与载波频率和移动台运动速度成正比。

当移动台向入射波方向移动时, 多普勒频移为正, 即移动台接收到的信号频率会增加; 背向入射波方向运动时, 则多普勒频移为负, 即移动台接收到的信号频率会减小。由于存在多普勒频移, 单一频率信号 f_0 到达接收端的时候, 其频谱不再是位于频率轴 $\pm f_0$ 处的单纯 δ 函数, 而是分布在 $(f_0 - f_m, f_0 + f_m)$ 内的、存在一定宽度的频谱。表 1.2 给出两种载波情况下 (900 MHz, 2 GHz) 不同移动速度时的最大多普勒频移数值。

表 1.2 最大多普勒频移

	100 km/h	75 km/h	50 km/h	25 km/h
900 MHz	83	62	42	21
2 GHz	185	139	93	46

从时域来看, 与多普勒频移相关的另一个概念就是相干时间, 即

$$(\Delta T)_c \approx \frac{1}{f_m}$$

相干时间是信道冲激响应维持不变的时间间隔的统计平均值。换句话说, 相干时间就是指一段时间间隔, 在此间隔内, 两个到达信号有很强的幅度相关性。如果基带信号带宽的倒数 (一般指符号宽度), 大于无线信道的相干时间, 那么信号的波形就可能会发生变化, 造成信号的畸变, 产生时间选择性衰落, 也称为快衰落; 反之, 如果符号的宽度小于相干时间, 则认为是非时间选择性衰落, 即慢衰落。

三、单载波与多载波通信系统

1. 单载波传输系统

通常我们采用的通信系统是单载波方案, 如图 1.2。其中 $g(t)$ 是匹配滤波器, 这种系统在数据传输速率不太高的情况下, 多径效应对信号符号之间造成的干扰不是特别严重, 可以通过使用合适的均衡算法使得系统能够正常工作。但是对于宽带业务来说, 由于数据传输的速率较高, 时延扩展造成数据符号之间的相互交叠, 从而产生了符号之间的串扰 (ISI), 这对均衡提出了更高的要求, 需要引入复杂的均衡算法, 还要考虑到算法的可实现性和收敛速度。从另一个角度看, 当信号的带宽超过和接近信道的相干带宽时, 信道的时间弥散将会造成频率选择性衰落, 使得同一个信号中不同的频率成分体现出不同的衰落特性, 这是我们不希望看到的。



图 1.2 单载波系统基本结构

2. 多载波传输系统

多载波传输通过把数据流分解为若干个子比特流，这样每个子数据将具有低得多的比特速率，用这样的低比特率形成的低速率多状态符号再去调制相应的子载波，从而构成多个低速率符号并行发送的传输系统。在单载波系统中，一次衰落或者干扰就可以导致整个链路失效，但是在多载波系统中，某一时刻只会有少部分的子信道会受到深衰落的影响。图 1.3 中给出了多载波系统的基本结构图。

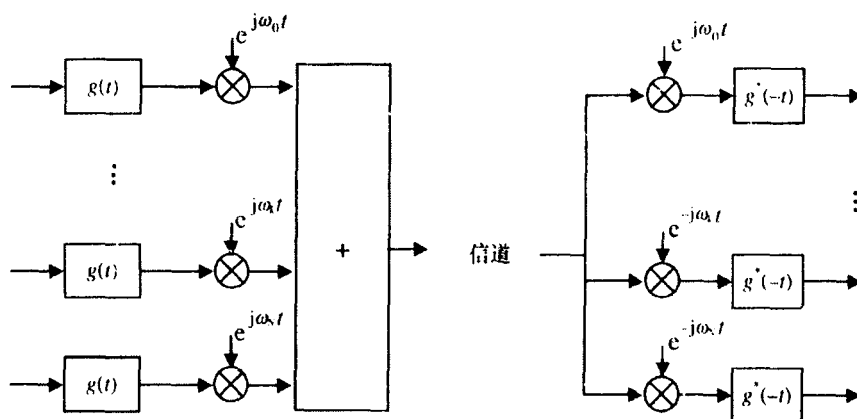


图 1.3 多载波系统的基本结构

多载波传输技术有多种提法，如正交频分复用（OFDM）、离散多音调制（DMT）和多载波调制（MCM），这 3 种提法在一般情况下等同，只是在 OFDM 中各子载波保持相互正交，而在 MCM 中这一条件并不一定成立。

子载波间存在 3 种不同的设置方案，如图 1.4 所示。第 1 种是传统的频分复用，将整个频带划分成 N 个不重叠的子带，在接收端用滤波器组进行分离，这种方法的优点是简单、直接，缺点是频谱的利用率低，子信道之间要留有保护频带，而且多个滤波器的实现也有不少困难；第 2 种采用偏置 QAM（SQAM）技术，在 3 dB 处载波频谱重叠，其复合谱是平坦的，子带的正交性通过交错同相或正交子带的数据得到（即将数据偏移半个周期）；第 3 种方案即 OFDM，各子载波有 $1/2$ 的重叠，但保持相互正交，在接收端通过相关解调技术分离出来，避免使用滤波器组，同时使频谱效率提高近 1 倍。

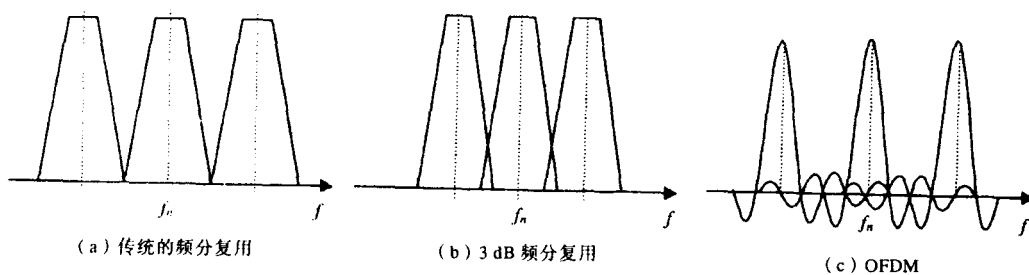


图 1.4 子载波频率设置

第四节 OFDM 通信系统

一、OFDM 的发展历史

正交频分复用 (OFDM) 是一种特殊的多载波传输方案, 它可以被看做是一种调制技术, 也可以被当作一种复用技术。选择 OFDM 的一个主要原因在于该系统能够很好地对抗频率选择性衰落或窄带干扰。正交频分复用 (OFDM) 最早起源于 20 世纪 50 年代中期, 在 60 年代就已经形成了使用并行数据传输和频分复用的概念。1970 年 1 月首次公开发表了有关 OFDM 的专利。

在传统的并行数据传输系统中, 整个信号频段被划分为 N 个相互不重叠的频率子信道。每个子信道传输独立的调制符号, 然后再将 N 个子信道进行频率复用。这种避免信道频谱重叠的方法看起来有利于消除信道间的干扰, 但是这样不能有效利用宝贵的频谱资源。为了解决这种低效利用频谱资源的问题, 在 20 世纪 60 年代提出了一种思想, 即使用子信道频谱相互覆盖的并行数据传输和 FDM, 其中每个子信道内承载的信号传输速率为 b , 而且要求各个子信道在频域距离也是 b , 从而可以避免使用高速均衡, 并且可以对抗窄带脉冲噪声和多径衰落以及充分地利用可用的频谱资源。

我们知道常规的非重叠多载波技术和重叠多载波技术之间的差别, 利用重叠多载波调制技术可以几乎节省 50% 的带宽。为了实现这种相互重叠的多载波技术, 必须要考虑如何减小各个子信道之间的干扰, 也就是要求各个调制子载波之间保持正交性。正交性在数学上存在有严格的定义。

1971 年, Weinstein 和 Ebert 把离散傅立叶变换 (DFT) 应用到并行传输系统中, 作为调制和解调过程的一部分。这样就不再利用带通滤波器, 而是经过基带处理就可以实现 FDM。而且, 这样在完成 FDM 的过程中, 不再要求使用子载波振荡器组以及相干解调器, 可以完全依靠执行快速傅里叶变换 (FFT) 的硬件来实施。

早在 20 世纪 60 年代, OFDM 技术就已经应用到多种高频军事系统中, 其中包括 KINEPLEX、ANDEFT 以及 KNTHRYN 等。以 KNTHRYN 为例, 其中的可变速率的数据调制解调器可以最多使用 34 个并行低速调相子信道, 每个子信道之间的间隔为 82 Hz。

但是直到 20 世纪 80 年代中期, 随着欧洲在数字音频广播 (DAB) 方案中采用 OFDM, 该方法才开始受到关注并且得到广泛的应用。

自从 20 世纪 80 年代以来, OFDM 已经在数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB)、基于 IEEE802.11 标准的无线本地局域网 (WLAN) 以及有线电话网上基于现有铜双绞线的非对称高比特率数字用户线技术 (例如 ADSL) 中得到了应用。其中大都利用了 OFDM 可以有效地消除信号多径传播所造成符号间干扰 (ISI) 的这一特征。

DAB 是在 AM 和 FM 等模拟广播基础上发展起来的, 其中可以提供与 CD 相媲美的音质, 以及其他的新数据业务。1995 年, 由欧洲电信标准协会 (ETSI) 制定了 DAB 标准, 这是第一个使用 OFDM 的标准。接着在 1997 年, 基于 OFDM 的 DVV 标准也开始投入使用。在 ADSL 应用中, OFDM 被典型地当作离散多音调制 (DMT modulation), 成功地用于有线环境中, 可以在 1 MHz 带宽内提供高达 8 Mbit/s 的数据传输速率。1998 年 7 月, 经过多次

的修改之后, IEEE802.11 标准组决定选择 OFDM 作为 WLAN (工作于 5 GHz 波段) 的物理层接入方案, 目标是提供 6 ~ 54 Mbit/s 数据速率, 这是 OFDM 第一次被用于分组业务通信当中。而且此后, ETSI、BRAN 以及 MMAC 也纷纷采用 OFDM 作为其物理层的标准。

此外, OFDM 还易于结合空时编码、分集、干扰 (包括 ISI 和 ICI) 抑制以及智能天线等技术, 最大限度地提高物理层信息传输的可靠性。如果再结合自适应调制、自适应编码以及动态子载波分配、动态比特分配算法等技术, 可以使其性能进一步得到优化。

二、OFDM 的优缺点

近年来, OFDM 系统已经越来越得到人们的广泛关注, 其原因在于 OFDM 系统存在如下的优点:

(1) 把高速数据流通过串并转换, 使得每个子载波上的数据符号持续长度相对增加, 从而可以有效地减小无线信道的时间弥散所带来的 ISI, 这样就减小了接收机内均衡的复杂度, 有时甚至可以不用均衡器, 仅通过采用插入循环前缀的方法消除 ISI 的不利影响。

(2) 传统的频分多路传输方法中, 将频带分为若干个不相交的子频带来传输并行的数据流, 在接收端用一组滤波器来分离各个子信道。这种方法的优点是简单、直接, 缺点是频谱的利用率低, 子信道之间要留有足够的保护频带, 而且多个滤波器的实现也有不少的困难。而 OFDM 系统由于各个子载波之间存在正交性, 允许子信道的频谱相互重叠, 因此与常规的频分复用系统相比, OFDM 系统可以最大限度地利用频谱资源。

(3) 各个子信道中的这种正交调制和解调可以采用 IDFT 和 DFT 方法来实现。对于 N 很大的系统中, 我们可以通过采用快速傅立叶变换 (FFT) 来实现。随着大规模集成电路技术与 DSP 技术的发展, IFFT 和 FFT 都是非常容易实现的。

(4) 无线数据业务一般都存在非对称性, 即下行链路中传输的数据量要远远大于上行链路中的数据传输量, 如 Internet 业务中的网页浏览、FTP 下载等。另一方面, 移动终端功率一般小于 1 W, 在大蜂窝环境下传输速率低于 10 ~ 100 kbit/s; 而基站发送功率可以较大, 有可能提供 1 Mbit/s 以上的传输速率。因此无论从用户数据业务的使用需求, 还是从移动通信系统自身的要求考虑, 都希望物理层支持非对称高速数据传输, 而 OFDM 系统可以很容易地通过使用不同数量的子信道来实现上行和下行链路中不同的传输速率。

(5) 由于无线信道存在频率选择性, 不可能所有的子载波都同时处于比较深的衰落情况中, 因此可以通过动态比特分配以及动态子信道分配的方法, 充分利用信噪比较高的子信道, 从而提高系统的性能。而且对于多用户系统来说, 对一个用户不适用的子信道对其他用户来说, 可能是性能比较好的子信道, 因此除非一个子信道对所有用户来说都不适用, 该子信道才会被关闭, 但发生这种情况的概率非常小。

(6) OFDM 系统可以容易地与其他多种接入方法相结合使用, 构成 OFDMA 系统, 其中包括多载波码分多址 MC-CDMA、跳频 OFDM 以及 OFDM-TDMA, 等等, 使得多个用户可以同时利用 OFDM 技术进行信息的传递。

(7) 因为窄带干扰只能影响一小部分的子载波, 因此 OFDM 系统可以在某种程度上抵抗这种窄带干扰。