

信息科学技术学术著作丛书

交织多址原理及其关键技术

熊兴中 胡剑浩 著



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

交织多址原理及其关键技术

熊兴中 胡剑浩 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对 IDMA 的迭代信号检测、信道估计、功率分配、同步技术、交织器的设计,以及 TDR-IDMA 传输技术、混合多址技术等关键技术进行了阐述。使读者可以从 IDMA 迭代检测的基本原理入手,认识 IDMA 系统各项关键技术和设计分析方法,进而在工程实践中使用 IDMA 的基本设计思想和关键技术,解决无线通信信号检测及工程中的具体问题。

本书可供从事无线通信及其信号处理的研究开发人员和工程技术人员阅读,也可作为信息与通信工程类研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交织多址原理及其关键技术/熊兴中,胡剑浩著. —北京:科学出版社, 2015

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-045697-7

I. 交… II. ①熊… ②胡… III. 多址通信-通信技术-研究 IV. TN914.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 220652 号

责任编辑:魏英杰 孙伯元 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张:11

字数:218 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



序

以迭代信号处理为核心技术的交织分多址(IDMA)技术,在消除用户端符号间干扰、共道干扰和多址干扰、最大编码增益和多径增益等方面具有优异的性能,而且其迭代检测的复杂度比传统方法大幅度降低。在 IDMA 系统中,交织器作为区分用户的唯一手段,对不同的用户采用不同的交织图案,交织器输出序列的相邻码片之间近似无关,从而使逐码片的迭代多用户检测得以实现。IDMA 作为一种新的迭代信号处理技术和多址接入技术,由于其独特的优势,在无线通信中具有广泛的应用前景,已引起研究人员的广泛关注。

作者所在团队近年来对交织分多址技术进行了深入的研究,本书是相关科研成果的积累和总结,也是国内外第一本系统全面地介绍交织分多址技术及其关键技术的专著,包括交织分多址技术的迭代信号检测技术、信道估计技术、功率分配技术、同步技术、交织器设计技术,以及快速收敛的传输检测技术和混合多址技术等基本原理和关键技术。书中涉及的许多研究工作具有一定的开拓性,如快速收敛的 TDR-IDMA 传输检测技术、非数据辅助的时间同步技术、SC-FDMA-IDMA 系统架构、一维和二维交织器的设计方法等。该书一方面可以使读者从 IDMA 迭代检测的基本原理和基本思想入手,全面而系统地认识 IDMA 系统各项关键技术和设计分析方法,进而在无线及移动通信工程实践中使用 IDMA 的关键技术和基本设计思想,解决工程中的实际问题;另一方面,也为有兴趣在交织分多址技术及其工程应用中从事研究工作的人员提供新思路、新方法和新途径。

交织分多址技术作为一种新的迭代信号处理技术和多址接入技术,其中的迭代检测是一项非常重要的信号处理技术,也是 Turbo 码、LDPC 码等常用码中非常重要的一项处理技术。该书对交织分多址技术在中可能遇到的困难和问题,为设计者提供了一种新的思路和方法,从而为该技术在工程中的应用起到积极的推动作用。

李 坪
香港城市大学

前 言

多址技术一直是个人通信领域,尤其是基于蜂窝架构的无线移动通信系统中的关键技术之一。目前在 3G 系统中采用的是直接序列扩频(direct sequence spread spectrum,DSSS)技术,这种 DS-CDMA 系统在实际应用中并没有完全发挥出 CDMA 在容量上的潜在优势。在 CDMA 系统中,用户位置及接入的随机性,使得用户间很难做到严格正交,从而引起各用户间的相互干扰,即多址干扰(MAI)。随着 CDMA 系统容量的扩大,MAI 问题日益严重,影响到 3G 及未来移动通信系统容量及频谱效率的进一步提高,因此多用户检测技术成为当前和未来移动通信的关键技术之一。

为了以较低的复杂度解决 CDMA 系统中日益严重的多用户干扰(MUI)问题,交织分多址(interleave-division multiple access,IDMA),简称为交织多址,就应运而生。在 IDMA 系统中,交织器作为区分用户的唯一手段,对不同的用户采用不同的交织图案。交织器输出序列的相邻码片之间近似无关,从而使逐码片(chip-by-chip,CBC)的迭代多用户检测(multi-user detection,MUD)得以实现,这也是 IDMA 的关键所在。IDMA 作为一种新兴的无线多址接入技术,由于其独特的优势,在未来的无线移动通信中具有广泛的应用前景,已经引起国内外研究人员的广泛关注。

我们近年来对交织多址技术进行了比较深入的研究,其中包括交织多址技术的迭代信号检测技术、快速收敛的 TDR-IDMA 传输技术、基于 IDMA 的混合多址技术、IDMA 系统中的信道估计及功率分配技术、IDMA 系统中的同步技术以及交织器的设计及优化等关键技术。本书也是有关研究成果的积累和总结,特别是快速收敛的 TDR-IDMA 传输技术、非数据辅助的时间同步技术、二维交织器的设计方法和 SC-FDMA-IDMA 系统架构等是具有开拓性的研究。这些研究成果可以为有兴趣在交织多址技术及其工程应用领域从事研究工作的读者起到抛砖引玉的作用。

全书共分为八章。第一章介绍在无线通信中常见的多址接入技术,进而引出交织多址的由来及发展研究现状。第二章介绍 IDMA 系统的基本工作原理,并且将 IDMA 系统的结构与 CDMA 系统的结构进行对比,在此基础上重点分析 IDMA 系统的逐码片迭代多用户检测技术及其性能评估机制。第三章介绍 TDR-IDMA 传输体制,该传输体制主要是为提高 IDMA 系统基站接收端逐码片迭代多用户检测的收敛速度、简化用户端接收设备、提高发射端发射功率的效率而提出,本章对有关算法及性能进行分析讨论。第四章介绍基于交织多址技术的混

合多址技术,包括 OFDM-IDMA、SC-FDMA-IDMA 等,着重对 OFDM-IDMA、SC-FDMA-IDMA 的系统模型及基本原理和频偏分析及补偿方法进行讨论。第五章介绍交织多址技术中的信道估计及功率分配方法,传统的基于导频训练序列的信道估计是将导频训练符号和数据符号以时分复用的方式发射出去。该方法信道资源浪费比较严重,频谱利用率较低。利用导频训练序列叠加的信道估计方法,在数据传输过程中,训练序列不占用专门的时隙,有利于提高估计的性能和资源利用率,而其中的功率分配就是一个关键问题。此外,还对 IDMA 系统的信道估计及序列叠加信道估计方法中训练序列与信息序列的功率分配进行分析讨论。第六章介绍交织多址技术的时间同步技术,研究时偏对于 IDMA 系统性能的影响,并通过系统仿真得到定时同步技术应该达到的矫正标准。基于此,讨论一种无数据辅助方式时间捕获算法,同时又在 CDMA 系统同步方式的基础上,将 PN 码同步方法应用在 IDMA 系统中。第七章介绍交织多址技术的交织器的性能分析及设计,从矩阵的角度建立交织器的数学模型,并在此基础上分析交织器算法以及交织器与解交织器的相互关系,提出设计一维交织器和二维交织器的设计方法,并给出相关的仿真结果及分析。第八章是全书的总结。

全书共分八个章节,其中熊兴中博士完成第一~四章的撰写和全书的内容组织、审查和统稿工作;第五~七章由胡剑浩博士撰写完成。此外,兰天、张承海、宋杰、王钊、骆忠强等五位先生和杨凤女士为本书有关章节的程序编写和仿真也做了大量工作。

本书内容主要源自国家自然科学基金项目(NO. 60872030)、中国博士后基金面上项目(NO. 20100471672)、四川省杰出青年基金项目(NO. 2011JQ0034)和四川省高校科研创新团队建设基金项目(NO. 13TD0017)等项目的创新成果,是近年来部分科研成果的积累和总结。作者在从事研究和本书的写作过程中得到许多同行、老师和同学的支持和帮助,特别是其中的许多结果是作者与合作者共同完成的,作者在此表示衷心的感谢。感谢香港城市大学李坪教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见。感谢兰天、张承海、宋杰、王钊、骆忠强等五位先生和杨凤女士为本书提供的支持和帮助。感谢电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室以及四川理工学院人工智能四川省重点实验室的支持。感谢科学出版社对本书出版所给予的大力支持。本书也凝聚了国内外从事 IDMA 研究的广大科研人员的智慧和见解,在此也对这些专家表示衷心的感谢。

由于作者阅历及研究水平有限,不妥之处在所难免,敬请专家和读者谅解,并欢迎批评指正。

作 者

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

序

前言

第一章 多址技术概述	1
1.1 多址技术	1
1.2 IDMA 的提出	6
1.3 IDMA 的研究现状	8
1.4 本书内容结构	10
参考文献	10
第二章 IDMA 迭代检测技术	14
2.1 IDMA 系统的结构	14
2.1.1 IDMA 系统与 CDMA 系统的结构对比	14
2.1.2 IDMA 的逐码片迭代多用户检测	16
2.2 单径信道下的迭代检测算法	18
2.2.1 MAP 算法	18
2.2.2 高斯算法	18
2.3 多径信道下的迭代检测算法	20
2.3.1 实多径信道下的算法	20
2.3.2 复数信道下的算法	22
2.4 IDMA 系统的性能评估	24
2.4.1 单径信道下 IDMA 系统的性能评估	24
2.4.2 多径信道下 IDMA 系统的性能评估	25
2.5 小结	26
参考文献	27
第三章 TDR-IDMA 传输检测技术	29
3.1 时间反转技术	29
3.1.1 无线通信系统中的常见干扰及抗干扰措施	29
3.1.2 时间反转的基本原理	31
3.1.3 时间反转的基本特点	32
3.1.4 时间反转在无线通信抗干扰中的应用	34

3.2 TDR-IDMA 上行链路的系统模型	35
3.2.1 TDR-IDMA 上行链路的系统结构	35
3.2.2 时分双工和时间反转	36
3.3 TDR-IDMA 上行链路的数据传输与检测	38
3.3.1 单径信道条件下的传输检测算法	38
3.3.2 多径信道条件下的传输检测算法	39
3.4 TDR-IDMA 上行链路的性能分析	40
3.4.1 单径信道条件下的性能分析	40
3.4.2 多径信道条件下的性能分析	41
3.4.3 实验仿真结果分析	44
3.5 TDR-IDMA 下行链路的系统模型	46
3.6 TDR-IDMA 下行链路的数据传输及检测	48
3.6.1 单径信道条件下的传输检测算法	48
3.6.2 多径信道条件下的传输检测算法	49
3.6.3 仿真结果及性能分析	50
3.7 小结	52
参考文献	52
第四章 基于 IDMA 的混合多址接入技术	56
4.1 OFDM-IDMA	56
4.1.1 OFDM-IDMA 的系统模型	56
4.1.2 OFDM-IDMA 的基本原理	57
4.1.3 OFDM-IDMA 的频偏分析	59
4.2 SC-FDMA-IDMA	63
4.2.1 SC-FDMA-IDMA 的系统模型	63
4.2.2 SC-FDMA-IDMA 的基本原理	65
4.2.3 SC-FDMA-IDMA 的频偏分析	67
4.3 基于逐码片迭代检测的频偏估计与补偿	68
4.3.1 迭代频偏估计及补偿	68
4.3.2 算法性能分析	71
4.3.3 实验仿真结果分析	71
4.4 小结	75
参考文献	76
第五章 信道估计及功率分配	78
5.1 概述	78
5.2 基于 EM 算法的混合迭代信道估计	79

5.2.1 EM 算法	79
5.2.2 EM 混合迭代信道估计	80
5.2.3 仿真结果及性能分析	84
5.3 序列叠加信道估计及其功率分配	86
5.3.1 序列叠加信道估计算法	87
5.3.2 信息序列与导频序列的功率分配	90
5.3.3 仿真结果及性能分析	91
5.3.4 迭代序列叠加信道估计及其功率分配	93
5.4 信道估计误差对 IDMA 系统的影响	96
5.4.1 信道估计误差对 IDMA 系统性能的影响分析	96
5.4.2 仿真结果及性能分析	97
5.5 小结	99
参考文献	99
第六章 IDMA 时间同步技术	101
6.1 采样时偏对 IDMA 系统性能影响	101
6.1.1 系统模型	101
6.1.2 采样时偏分析	103
6.2 IDMA 系统无数据辅助同步技术	109
6.2.1 系统模型	109
6.2.2 无数据辅助同步技术的理论分析	111
6.2.3 时间捕获机制	115
6.2.4 仿真结果	118
6.3 IDMA 系统 PN 码辅助同步技术	121
6.3.1 PN 码辅助同步原理及应用	121
6.3.2 IDMA 系统中的 PN 码辅助同步方法	123
6.4 小结	127
参考文献	128
第七章 交织器的性能分析和设计	129
7.1 交织器的数学模型	129
7.1.1 交织器概述	129
7.1.2 交织器的数学模型及交织、解交织关系分析	130
7.2 IDMA 系统交织器设计	132
7.2.1 IDMA 系统交织器设计准则	132
7.2.2 IDMA 系统中典型的交织器设计	133
7.3 IDMA 系统移位交织器设计	138

7.3.1 IDMA 系统交织器分析	138
7.3.2 移位交织器设计	140
7.4 IDMA 系统二维交织器设计	147
7.4.1 二维交织器设计算法	148
7.4.2 二维交织器距离特性的数学分析	152
7.4.3 二维交织器的性能仿真	155
7.5 小结	159
参考文献	159
第八章 结束语	161

第一章 多址技术概述

多址技术一直是个人通信领域,尤其是基于蜂窝架构的无线移动通信系统中的关键技术之一。理论分析与实践经验均证明基于非正交分割时频资源的 CDMA 能够取得比正交分割时频资源的时分多址和频分多址更高的频谱效率,因此 CDMA 技术成为第三代移动通信系统(3G)的核心技术。在 CDMA 系统中,用户位置及接入的随机性,使得用户间很难做到严格正交,从而引起各用户间相互干扰,即多址干扰(MAI)。随着 CDMA 系统容量的扩大,MAI 问题日益严重,影响到 3G 及未来移动通信系统容量及频谱效率的进一步提高。2002 年香港城市大学的研究人员提出交织分多址(interleave-division multiple access, IDMA)的概念,简称为交织多址。其目的在于以较低的复杂度解决 CDMA 移动通信系统中日益严重的多用户干扰问题。本章将在介绍多址技术的基础上,给出交织多址的由来及其研究和应用现状。

1.1 多址技术

蜂窝系统是以信道来区分通信对象,一个信道只能容纳一个用户进行通话,多个用户同时通话时,相互之间以信道来区分,这就是多址。移动通信系统是一个多信道同时工作的系统,具有广播和大面积覆盖的特点。在移动通信环境的电波覆盖区内,如何建立用户之间无线信道的连接,是多址接入方式的问题。解决多址接入问题的方法叫多址接入技术。当以传输信号的载波频率不同来区分信道建立多址接入时,称为频分多址(FDMA);当以传输信号存在的时间不同来区分信道建立多址接入时,称为时分多址(TDMA);当以传输信号的码型不同来区分信道建立多址接入时,称为码分多址(CDMA)。除了 FDMA、TDMA 和 CDMA,还有三种多址接入技术用于无线通信,它们分别是分组无线电(PR)、空分多址(SDMA)、正交频分多址(OFDMA)^[1]。其中最典型的多址方式是 FDMA、TDMA 和 CDMA。

1. 频分多址

频分多址技术按照频率来分割信道,即给不同的用户分配不同的载波频率以共享同一信道,如图 1.1 所示。频分多址技术是模拟载波通信、微波通信、卫星通信的基本技术,也是第一代模拟移动通信的基本技术。在 FDMA 系统中,信道总

频带被分割成若干个间隔相等且互不相交的子频带(地址),每个子频带分配给一个用户,每个子频带在同一时间只能供给一个用户使用,相邻子频带之间无明显的干扰。

每个用户分配一个信道,即一对频谱,较高的频谱用作前向信道,即基站向移动台方向的信道;较低的频谱用作反向信道,即移动台向基站方向的信道。一个用户必须同时占用 2 个信道(2 对频谱)才能实现双工通信。基站必须同时发射和接收多个不同频率的信号,任意两个移动用户之间进行通信都必须经过基站的中转。

FDMA 系统主要存在的干扰包括互调干扰、邻道干扰、同频干扰。互调干扰是系统内非线性器件产生的各种组合频率成分落入本频道接收机通带内。可以通过提高系统的线性度和通过选用无互调的频率集解决。邻道干扰是相邻波道信号中存在的寄生辐射落入本频道接收机带内,克服邻道干扰除了严格规定发射机的寄生辐射和接收机的中频选择外,还可以通过加大频带间隔。同频干扰是相邻区群中同信道小区信号造成的干扰,通过合理选择蜂窝结构和频率划分来减少。

FDMA 的技术特点如下:每信道占用一个载频,信道的相对带宽较窄,即通常在窄带系统中实现;符号时间远大于平均延迟扩展,所以码间干扰较少,无需自适应均衡;基站复杂庞大,易产生信道间的互调干扰;FDMA 中每个载波单个频率设计,必须使用带通滤波器来限制邻道干扰;越区切换复杂,必须瞬时中断传输,进行频率的改变,对于数据传输将带来数据的丢失。

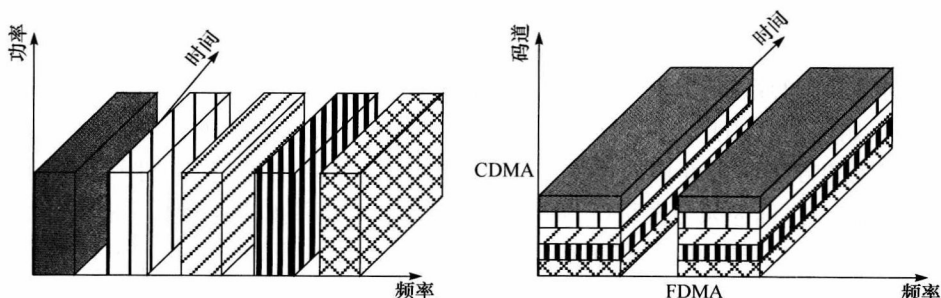


图 1.1 频分多址示意图

2. 时分多址

时分多址技术按照时隙来划分信道,即给不同的用户分配不同的时间段来共享同一信道,如图 1.2 所示。在 TDMA 系统中,时间被分割成周期性的帧,每一帧再分割成若干个时隙(地址)。无论帧或时隙都是互不重叠的,根据一定的时隙分配原则,使各个移动台在每帧内只能按指定的时隙向基站发送信号。

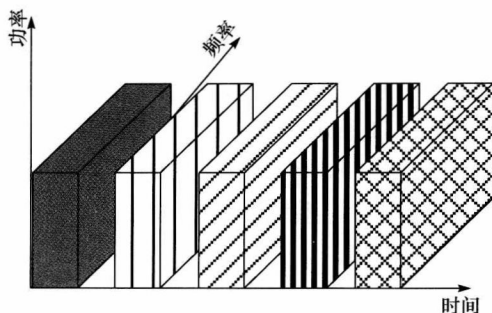


图 1.2 时分多址示意图

系统按一定的时隙分配原则,使各个移动台在每个帧内按指定的时隙向基站发射信号,在满足定时和同步的情况下,基站可以接收移动台的信号而互不干扰。同时,基站向移动台也按事先约定的顺序安排在预定的时隙中传输,各个移动台在指定的时间接收。

TDMA 系统的特点:突发传输的速率高,远大于语音编码速率,因为在 TDMA 系统中可以占用多个时隙传输大速率信息;发射信号速率随时隙数 N 的增大而提高,引起码间串扰加大,所以必须采用自适应均衡;在不同时隙收和发不需要双工器;多个用户共用一个载波,带宽相同,只需要一部收发机,基站复杂性小,互调干扰小;抗干扰能力强,频率利用率高,系统容量大;可以在无信息传输时进行,不会丢失数据,越区切换简单。GSM 系统中时分多址和频分多址的组合示意图如图 1.3 所示。

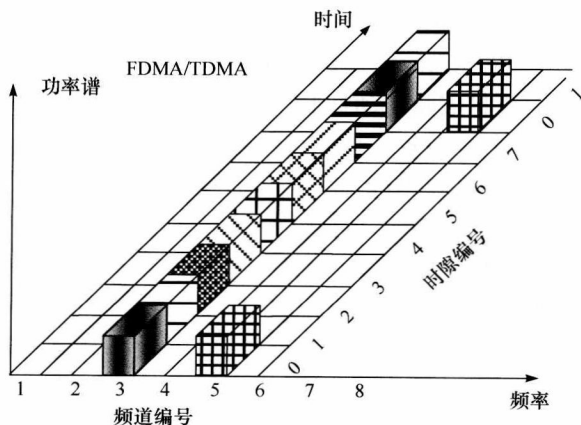


图 1.3 GSM 系统中时分多址和频分多址的组合示意图

3. 码分多址

码分多址技术按照码序列来划分信道,即给不同的用户分配一个不同的编码序列来共享同一信道,如图 1.4 所示。在 CDMA 系统中,每个用户被分配给一个唯一的伪随机码序列(扩频序列),各个用户的码序列相互正交,因而相关性很小,由此可以区分出不同的用户。系统的接收端必须有完全一致的本地地址码,才能对接收的信号进行相关检测。

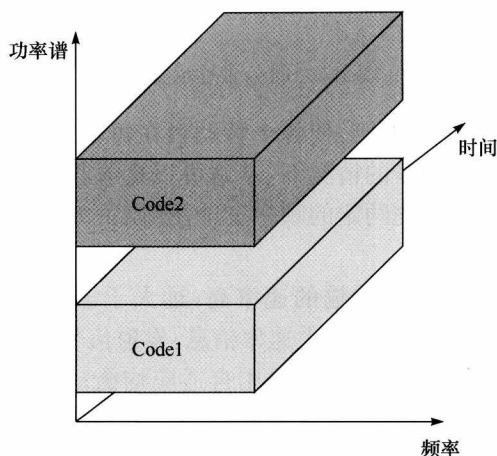


图 1.4 码分多址示意图

CDMA 系统具有以下特点:用户共享一个频率,无需频率规划;通信容量大,容量软特性,用户越多,性能越差,用户减少,性能就变好;由于信号被扩展在一较宽频谱上而可以减小多径衰落;信道数据速率很高,PN 序列具有很好的自相关性,大于一个码片的时延扩展将自动抑制,无需自适应均衡;相邻小区使用相同的频率,不仅简化频率规划,还能较好地实现平滑的软切换不会引起通信中断;扩频后信号的功率谱密度较低,能较好地克制窄带干扰。

CDMA 具有很多优势,同时也具有引入多址干扰和远近效应。不同用户的扩频序列不完全正交,扩频码集的非零互相关系数会引起用户间的相互干扰,称为多址干扰。即使采用理想的正交码和理想的正交分割,由于信道传输及同步电路的不理想,会产生码型噪声。假定所有的用户发送功率都一样,则来自不同地址的码型噪声由于传输距离不同(传输衰减不同)会有很大的差别,特别对于那些距离很近的用户,产生的码型噪声将会很大,因而造成接收干扰的提高、有效用户数的降低。这就是 CDMA 系统的远近效应。解决远近效应的方法之一是功率控制。蜂窝移动通信系统由基站来提供功率控制,以保证基站覆盖内的每一个用户给基站提供相同的功率控制。

4. 空分多址

空分多址通过空间的分割来区别不同的用户,常与 FDMA、TDMA 和 CDMA 结合使用。实现 SDMA 的基本技术就是采取自适应式阵列天线,在不同的用户方向上形成不同的波束。如图 1.5 所示,SCDMA 使用定向波束天线来服务于不同用户。相同的频率(TDMA 或 CDMA)或不同的频率(FDMA)用于服务于天线波束覆盖的范围。扇区天线可以看作 SDMA 的一个基本方式。

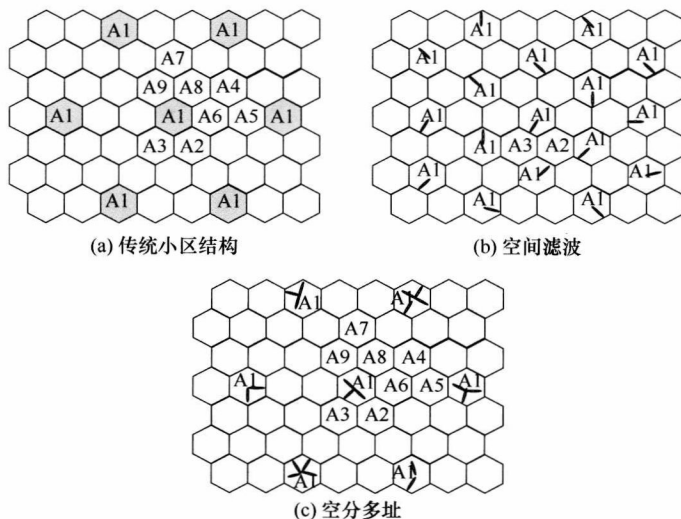


图 1.5 传统蜂窝模式、空间滤波以及空分多址示意图

5. 分组无线电 (PR)

分组无线电可以看成是 TDMA 的一种特殊形式,在分组无线电中分配给每一个用户的时隙是自适应的。

6. 正交频分多址 (OFDMA)

OFDMA 是 OFDM 技术在多用户通信中的演进,是一种多址接入技术,其本质可以看成是 OFDM 与 FDMA 的组合,它将传输带宽划分成正交的互不重叠的一系列子载波集,将不同的子载波集分配给不同的用户实现多址。OFDMA 系统可动态地把可用带宽资源分配给需要的用户,易于实现系统资源的优化利用。不同的用户分配不同的子载波,其中有三种典型的分配子载波方法,即连续分配法、均匀分配法和随机分配法,如图 1.6 所示。图 1.6 中线条位置代表子载波的位置,同一类型线条就是一个子载波集。

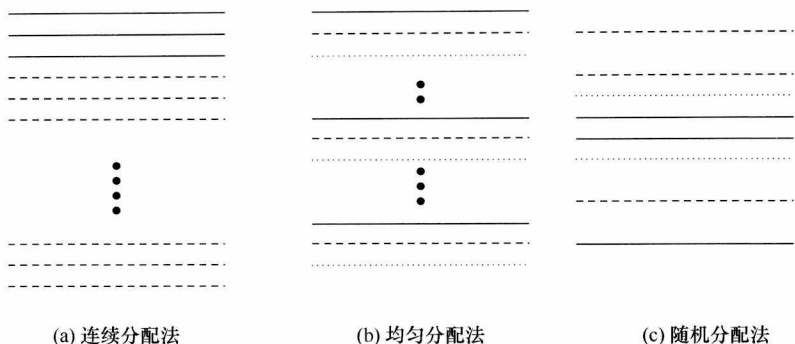


图 1.6 正交频分多址的子载波分配方法示意图

1.2 IDMA 的提出

自从 1897 年马可尼演示了无线电能够传输信息以来,无线通信技术在 20 世纪发生了革命性的变化。1948 年,香农发表的通信的数学理论^[2],更是促使通信理论蓬勃发展并取得巨大的成就。尤其是在最近二十多年里,超大规模集成电路技术、前向纠错编码技术、计算机技术、数字信号处理技术以及信息技术的飞速发展,极大地促进了无线通信技术的发展。无线蜂窝移动通信系统已经经历了从第一代移动通信系统(1G)的模拟通信到第二代移动通信系统(2G)的数字通信,而第三代移动通信系统(3G)也已投入商用,人们正在逐步迈向第四代移动通信系统(4G)的时代。其中模拟通信的代表就是 20 世纪 70 年代末美国 AT&T 开发的先进移动电话服务(AMPS)系统;另一个与其类似的是欧洲在 1985 年开发的 ETACS 系统。AMPS 系统和 ETACS 系统均采用频分复用(FDD),频分多址(FDMA)的工作频率为 900MHz。这两个模拟系统不久便被第二代数字蜂窝移动通信系统替代,其中的典型就是暂时标准 95(IS-95; Interim Standard 95)和全球移动通信系统(GSM)^[1]。IS-95 采用的是码分多址(CDMA),GSM 主要采用的是时分多址(TDMA)。

目前,三种主要的 3G 标准,即 CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA 均采用码分多址技术,所以 CDMA 一直是人们研究的热点。从 TDMA、FDMA 到 CDMA,多址技术一直是个人通信领域,尤其是基于蜂窝架构的无线移动通信系统的关键技术之一。理论分析与实践经验均证明,基于非正交分割时频资源的 CDMA 能够取得比正交分割时频资源的时分多址和频分多址更高的频谱效率^[3],因此 CDMA 技术成为第三代移动通信系统(3G)的核心技术,并得到了广泛的应用。目前在 3G 系统中采用的是直接序列扩频(direct sequence spread spectrum,DSSS)技术,这种 DS-CDMA 系统在实际应用中并没有完全发挥出 CDMA 在容量上潜在的优