GANRAO DUIQI
LILUN JIQI DIEDAI
SUANFA YANJIU

干扰对齐理论及其迭代算法研究

钟梁 ◎ 著

四川大学出版社

AI

干扰对齐理论及其迭代算法研究

钟梁 ◎ 著

安徽理工大学 藏書 图書馆

四川大学出版社

项目策划：梁　平
责任编辑：梁　平
责任校对：傅　奕
封面设计：璞信文化
责任印制：王　炜

图书在版编目（CIP）数据

干扰对齐理论及其迭代算法研究 / 钟梁著. — 成都 : 四川大学出版社, 2019.11
ISBN 978-7-5690-3120-1

Ⅰ. ①干… Ⅱ. ①钟… Ⅲ. ①无线电通信－通信干扰－研究 Ⅳ. ①TN975

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 234500 号

书名　干扰对齐理论及其迭代算法研究

著　　者	钟　梁
出　　版	四川大学出版社
地　　址	成都市一环路南一段 24 号（610065）
发　　行	四川大学出版社
书　　号	ISBN 978-7-5690-3120-1
印前制作	四川胜翔数码印务设计有限公司
印　　刷	四川盛图彩色印刷有限公司
成品尺寸	170mm×240mm
印　　张	9.5
字　　数	182 千字
版　　次	2020 年 3 月第 1 版
印　　次	2020 年 3 月第 1 次印刷
定　　价	49.00 元

版权所有 ◆ 侵权必究

◆ 读者邮购本书，请与本社发行科联系。
电话：(028)85408408/(028)85401670/
(028)86408023　邮政编码：610065
◆ 本社图书如有印装质量问题，请寄回出版社调换。
◆ 网址：http://press.scu.edu.cn

四川大学出版社
微信公众号

前　言

为了满足日益增加的无线用户对于高速无线业务的需求，未来的无线通信系统将结合多种物理层技术，如多输入多输出（Multiple－Input Multiple－Output，MIMO）、正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM）、认知无线电（Cognitive Radio，CR）和超宽带（Ultra－Wideband，UWB）等。结合这些先进技术的特点和优势将使得未来的无线通信真正实现无“盲区”亦无“忙区”的高速覆盖。在多用户环境下的无线通信系统中，多个用户通过频率复用和空间复用来实现同时通信，在提高系统的无线资源利用率的同时也势必会导致多用户之间的相互干扰。干扰对齐作为新提出的干扰管理方法，可以使得系统的容量随着用户数量的增加而线性地增加。干扰对齐技术通过将接收端干扰信号对齐到一个秩远小于干扰信号个数的信号子空间中，从而使得每个发射端都可以利用一半的无线资源发送有用信号。因此，本书在MIMO和UWB这两种技术的基础上，研究了未来宽带无线通信系统中的多用户干扰对齐算法以及应用。

另外，现有的干扰管理理论和策略还存在很多问题。比如，当信道状态信息受限时，无线通信网络中已有的信道容量结果和干扰管理策略将会面临新的难题和挑战。本书研究了信道信息受限情形下，多用户无线网络的极限性能和干扰管理策略，这主要包括信道信息受限时干扰对齐数值算法的设计，发射端信道信息受限时干扰信道的空间自由度，以及有限速率预编码反馈下的干扰管理策略等。

本书的主要内容可以概况如下：第1章介绍了干扰对齐的基本概念和基础知识以及国内外研究的现状。第2章在以MIMO技术为基础的多用户无线通信系统中，介绍基于总体最小二乘（Total Least Squares，TLS）超维平面估计算法的子空间划分方法，来实现迭代干扰对齐。第3章介绍了多用户网络及其干扰管理策略。第4章在具有非合作干扰的有限信噪比的MIMO系统中，介绍了一种结合子空间划分和最小均方误差（Minimum Mean Square Error，

MMSE）的迭代干扰对齐算法。第5章介绍了适用于认知网络环境下基于干扰对齐和中和的合作中继策略，可以在认知用户无法感知授权用户发送信息的情况下，对授权用户的通信提供帮助。本书的后半部分主要介绍与信道信息相关的干扰对齐算法。第6章针对单数据流 K 用户干扰信道，介绍了一种基于博弈理论与和速率最大化问题的分布式信号子空间干扰对齐算法。第7章从信息论的角度针对无时频域符号扩展的 K 用户 MIMO 干扰信道，介绍了发射端仅仅只有本地信道状态信息时系统总自由度的内界和外界。第8章介绍了有限速率发射预编码矩阵反馈情况下，K 用户干扰信道实现空间干扰对齐的反馈策略和充分条件。

本书在 MIMO 和 UWB 这两种技术的基础上，研究了未来宽带无线通信系统中的多用户干扰对齐算法以及应用。对于研究基于子空间划分的干扰对齐具有一定促进作用，而且在此基础上提出的干扰对齐迭代算法对实际系统中的干扰对齐应用与研究也具有一定积极意义。本书适用于通信专业教师、研究生和科技人员作为了解和学习干扰对齐算法之用。本书第1～5章由钟梁（中国地质大学（武汉））撰写，第6～8章由彭世新（华中师范大学）和何芳秋子（武汉轻工大学）共同撰写。本书插图由何芳秋子负责修饰。本书由国家自然科学基金青年基金项目“大规模 MIMO 蜂窝系统中底层 D2D 网络跨层干扰管理研究”（61601334）资助。

目　录

1　概论 …… (1)

1.1　MIMO－OFDM 技术和研究现状 …… (3)

1.2　CR 技术和研究现状 …… (5)

1.3　UWB 技术和研究现状 …… (7)

2　干扰对齐技术现状 …… (11)

2.1　干扰对齐的解析方法 …… (14)

2.2　干扰对齐的迭代算法 …… (18)

2.3　本章小结 …… (27)

3　多用户网络及其干扰管理策略 …… (28)

3.1　干扰信道的容量分析 …… (28)

3.2　基于干扰对齐的干扰管理方法 …… (34)

3.3　信道状态信息受限时的干扰网络自由度 …… (40)

3.4　有限速率反馈下的多用户网络 …… (44)

3.5　本章小结 …… (50)

4　多用户系统中高效迭代对齐算法 …… (51)

4.1　引言 …… (51)

4.2　多用户 MIMO－IC 模型 …… (52)

4.3　TLS 算法简介 …… (54)

4.4　基于 TLS 的超维空间估计算法的干扰对齐算法 …… (56)

4.5　本章小结 …… (65)

5　具有非合作干扰的多用户系统中的迭代干扰对齐算法 …… (67)

5.1　引言 …… (67)

5.2　具有非合作干扰的多用户 MIMO－IC 系统模型 …… (69)

5.3 超维空间估计算法和 MMSE 相结合的干扰对齐算法研究 …… (71)
5.4 仿真与性能分析 …… (77)
5.5 本章小结 …… (82)

6 基于博弈理论的信号子空间干扰对齐策略 …… (83)
6.1 引言 …… (83)
6.2 系统模型 …… (84)
6.3 干扰信道的贝叶斯博弈模型 …… (86)
6.4 和速率中的博弈关系 …… (91)
6.5 仿真结果 …… (96)
6.6 本章小结 …… (100)

7 本地 CSIT 情况下 MIMO 干扰信道的自由度 …… (101)
7.1 引言 …… (101)
7.2 系统模型 …… (103)
7.3 K 用户 MIMO 干扰信道空间自由度的内界 …… (107)
7.4 K 用户 MIMO 干扰信道空间自由度的外界 …… (116)
7.5 本地 CSI 下空间自由度的损失 …… (122)
7.6 本章小结 …… (122)

8 有限预编码矩阵反馈下的空域干扰管理 …… (124)
8.1 引言 …… (124)
8.2 系统模型 …… (125)
8.3 预编码矩阵的量化和反馈策略 …… (126)
8.4 空间干扰对齐的反馈比特量 …… (127)
8.5 仿真结果 …… (129)
8.6 本章小结 …… (131)

参考文献 …… (132)

1 概论

20世纪80年代第一代移动通信系统开始商用，系统采用的是模拟的调制和多址技术。模拟通信系统主要包括：AT&T贝尔实验室开发的高级移动电话业务（Advanced Mobile Phone Service，AMPS）、欧洲全接入通信系统（Extended Total Access Communication System，ETACS）。第一代移动通信系统奠定了无线通信系统的基础并且为移动通信的发展和迅速普及做出了不可磨灭的贡献，但是其容量小、安全性差、频谱利用率低，很快被第二代移动通信系统所取代。基于数字化技术的第二代移动通信系统具有模拟系统无法比拟的高容量以及低成本的特点，正是这些优势使得无线蜂窝网络进入了数字时代。全球移动系统（Global System for Mobile，GSM）是目前最为普及的第二代蜂窝移动通信标准。GSM标准对无线通信系统的网络层结构、数字调制和业务等做了细致的规定。GSM的问世解决了第一代无线通信系统面临的诸多问题，提供了更为丰富的业务支持、更加安全的空中保密性和更高的频谱效率。

但是随着移动通信业务的不断拓展，人们对于无线通信系统所能提供的服务和应用提出了更高的要求，具体到宽带业务上表现为多媒体数据、在线游戏、视频会议等。这些新兴应用的出现使得GSM系统面临严峻的考验。为了满足这些需求，第三代移动通信系统（3rd-generation，3G）应运而生。3G时代的到来意味以码分多址（Code Division Multiple Access，CDMA）技术为基础的移动通信技术成为主流。3G系统相比于GSM系统最主要的区别在于其提供的高传输速率，3G无线通信系统能够承载更加多样的通信业务，包括电话会议、电子商务等。3G标准主要分为三个，分别是宽带CDMA（Wideband CDMA，WCDMA）、CDMA2000和时分同步CDMA（Time Division-Synchronous CDMA，TD-SCDMA）。TD-SCDMA是我国具有自主知识产权的第三代无线通信标准，它融入了智能天线、软件无线电等国际领先的技术，在频谱利用率和业务支持方面具有其独特的优势，同时因为信号辐

射低等优点，该技术被誉为绿色 3G 技术。它的通过标志着我国的通信技术已经进入了国际先进行列。

随着互联网以及数据业务的迅猛发展，用户已经不再满足于 3G 系统所能提供的 Mbps 级别的传输速率，因此，新一代移动通信系统成为研究热点。从技术上讲，虽然 CDMA 系统具有信道数据率高、可进行软切换等优点，但是软容量限制和自干扰使得现有的 3G 系统很难提供更高的通信速率。2008 年，国际电信联盟（International Telecommunications Union，ITU）正式启动了高级国际移动通信（International Mobile Telecommunication－Advanced，IMT－Advanced）的标准化工作，也就是我们所谓的第四代移动通信系统（4th－generation，4G）。4G 系统在性能上着眼于在保证成本效率的条件下，实现更加高速的数据分组传输、更加灵活和广泛的业务支持、更高的频谱效率以及更好的覆盖。

除了前面所提到的蜂窝通信系统以外，无线通信系统还包括了无线局域网、无线广域网、卫星通信网和无线自组织网络等。这些系统共同合作完成了对不同区域、不同业务的无线覆盖。但是无论哪一种无线通信系统，都面临着业务数量激增的巨大挑战。展望无线通信的未来，无论处于世界的任何地方，用户都希望可以通过移动终端设备实现实时的高速数据通信。不仅如此，无线网络也将渗透到人们生活的方方面面，通过无线连接起来的电脑、电话以及各种家用电器，可以帮助人们实现智能家庭远程控制、远程视频会议、远程教育和远程医疗等梦想。而无线传感器网络也将在民用和军用两个方面都发挥巨大的作用。

这些对无线通信的愿景是建立在高速的无线数据通信的基础之上的。为了实现这些目标，越来越多的新技术被不断应用到这些系统中，包括正交频分复用技术（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM）、多输入多输出（Multiple－Input Multiple－Output，MIMO）等。OFDM 技术具有抗多径衰落、高频谱利用率等优点，而 MIMO 技术通过增加天线来达到系统容量和频谱利用率成倍增加的目的，并且可以在分集和复用之间进行折中，从而提高对用户端对端的服务质量（Quality of Service，QoS）。另一方面，以超宽带（Ultra－Wideband，UWB）技术为代表的短距高速通信技术也越来越受到学术界和工业界的关注。UWB 系统具有保密性好、传输速率高、能耗小等优点，可用于无线短距高速环境。同时，无线频谱资源的稀缺也迫使人们去提高频谱效率，认知无线电技术（Cognitive Radio，CR）就是其中最具有代表性的一种新技术。

下面分别对 MIMO-OFDM 技术、UWB 技术和 CR 技术及其研究现状进行介绍。

1.1 MIMO-OFDM 技术和研究现状

MIMO-OFDM 技术结合了 MIMO 技术和 OFDM 技术的长处，是实现下一代无线蜂窝通信的关键技术之一。

OFDM 技术可以追溯到 20 世纪 60 年代。其想法来源于美国军方提出的多载波调整技术（Multi-Carrier Modulation，MCM）。但是受限于硬件电路的发展，直到 20 世纪 80 年代，OFDM 技术才逐渐走进人们的视野。OFDM 的基本原理是将串行的高速数据流分为很多并行的低速数据流，调制到多个相互正交的载波所在子信道上。OFDM 技术的主要技术特点如下：

OFDM 技术采用多个并行的窄带子信道进行传输，从而有效避免频率选择性衰落，同时也提供了很好的抗多径衰落的能力。

相互正交的子载波避免了子信道之间的相互干扰，这种干扰称为载波间干扰（Inter-Carrier Interference，ICI）。与此同时，子载波在频率上相互叠加，具有很高的频谱效率，其频谱利用率将近 2 Bd/Hz（波特每赫兹）。

硬件电路的发展使得快速傅立叶变换（Fast Fourier Transform，FFT）得以简单的实现，从而降低了 OFDM 技术的实现成本。

为了消除码间干扰（Inter-Symbol Interference，ISI），OFDM 系统引入了循环前缀（Cyclic Prefix，CP），在一定条件下可以完全消除 ISI 的影响。

MIMO 是指发射端和接收端都采用多根不相关的天线进行无线通信的技术。传统的单天线传输技术的目的是在时间或者频率维度最大化系统可以达到的容量，而多天线的应用为系统提供了一个崭新的维度：空间维度。空间维度的利用为无线通信系统容量的进一步提升提供了可能。MIMO 是极具发展潜力的宽带通信物理层技术。它提供了很高的频谱效率，通过充分利用空间维度来提高系统的性能，适用于各种通信系统。

MIMO 系统容量的研究一直是学术界关注的焦点，20 世纪 90 年代，贝尔实验室基于接收端信道信息已知的假设条件下，得出了 MIMO 系统的容量公式。此后，Foschini 等人就不同的信道衰落分布函数，研究了 MIMO 系统的容量限。他们的研究从理论上给出了采用 MIMO 技术进行通信的链路可以实现的信道容量 C，即：在一个具有 M 个发射天线和 N 个接收天线的 MIMO 系统中，若多天线之间的信道相互独立，系统的容量随着最小天线数

min（M，N）的增加呈线性增加的趋势。在高的信噪比（Signal－to－Noise Ratio，SNR）的情况下，MIMO 系统的容量可以表示为：

$$C(SNR) = \min(M,N)\log(SNR) \tag{1.1}$$

这个公式说明 MIMO 系统相比于 SISO 系统可以实现容量的成倍增加，并为 MIMO 系统的研究打下了理论基础。此后，MIMO 系统的接收和发射算法被不断开发出来，最主要的内容就是对于空时码的研究。空时编码是一种通过将空间和时间两个维度结合起来进行处理以得到更高数据传输速率的信号编码技术。其中最为著名的包括：贝尔实验室的分层空时结构（Bell Laboratories Layered Space Time，BLAST）［具体细分为水平 BLAST（Horizontal BLAST，H－BLAST）、垂直 BLAST（Vertical BLAST，V－BLAST）以及对角 BLAST（Diagonal BLAST，D－BLAST）］、空时分组码（Space－Time Block Code，STBC）和空时格型码（Space－Time Trellis Code，STTC）等。

MIMO 技术在不增加带宽的情况下达到系统容量和频谱效率的成倍增加。从 MIMO 系统能获得的增益来说，可以分为复用增益和分集增益。复用增益通过空间复用技术来实现，从而增加系统的容量，提供频谱利用率。而系统通过在多个独立的子信道中发射相同的信号副本获得分集增益，来提高信道传输的可靠性，降低系统的误码率。在 MIMO 系统中，Zheng 研究了分集和复用增益与系统天线数之间的关系，并且证明了系统可以通过折中的方法同时获得分集和复用增益。

结合 MIMO 和 OFDM 技术的系统同时具备了 MIMO 和 OFDM 的优点，是未来无线系统实现高速传输的技术保障。MIMO－OFDM 技术目前已经被很多组织采纳为未来通信系统的核心技术，例如：长期演进（LTE，Long Term Evolution）以及增强型长期演进 LTE－A（LTE－Advance）、IEEE 802.16 等。在实际应用中，MIMO－OFDM 系统不可避免地需要解决多用户干扰管理的问题。共信道的多用户干扰在很大程度上改变了人们对于 MIMO 系统的认识，正如 Catreux 的仿真结果所显示的那样，存在干扰的 MIMO 系统容量与之前所得到的在无干扰情况下的容量有很大的不同。

同时，未来的蜂窝网络将朝着异构化的方向发展，不同类型的基站在其网络规模以及覆盖范围将有很大的不同。从基站的类型上来说，异构网包括宏蜂窝基站、微蜂窝基站、微微蜂窝基站、毫微蜂窝基站以及中继基站等。除了传统的宏基站以外，异构网络通过在同一区域部署发射功率和覆盖范围各不相同的不同类型的基站来提高传统小区的容量，同时消除宏蜂窝基站覆盖的“盲点”，并且减少覆盖“忙区”。但是，这样重叠在一起的覆盖必然会带来干扰的

问题。因此，干扰问题是MIMO系统研究的一个重要方向，也是提高未来蜂窝通信系统容量必须攻克的技术难关之一。

1.2 CR技术和研究现状

随着无线通信业务需求的增加，对无线通信速率的要求也越来越高，频谱资源短缺和日益增加的频谱需求之间的矛盾也日渐凸显出来。当前的无线频谱资源采用的是静态分配策略，根据美国联邦通讯委员会（Federal Communications Commission，FCC）的统计，很大一部分被分配的频谱资源的利用率都在15%到85%之间，可见，被分配的频率并没有被充分的利用。与此同时，剩余的可分配无线资源也越来越少。为了解决目前这种困境，动态频谱分配策略——认知无线电（CR）应运而生。在认知的网络中，认知设备在不对频谱中授权用户通讯性能产生影响的前提下，利用频谱感知和信号处理技术“伺机而动”地接入频谱，从多维的角度实现无线频谱的充分利用，从而提高无线资源的利用率。

CR的概念最初是由Mitola博士于1999年提出的，其认知的能力很大程度上依赖于上层的学习和推理能力。2005年，Haykin从信号处理的角度，全面地阐述了认知无线电的基本概念以及理论体系架构，并且指出，认知无线电必须具备的两个特征：认知能力和重构能力。此后，2009年，Goldsmith对认知无线电做了如下定义：“认知无线电是指无线通信系统智能地利用如节点活动、信道状态、码本信息、其他节点的信号等边界信息来实现频谱资源的共享的技术。”

根据节点所能得到的边界，可以将CR分为3个不同的种类：Interweave、Underlay和Overlay。下面详细介绍这三种不同种类的CR系统：

Interweave：Interweave类型的CR建立在机会通信（opportunistic communication）的基础之上。大量统计数据表明，无论从时间上还是空间上，现有分配方式下的无线频谱利用率都很低，存在所谓的“频谱空洞”。这些随时间和空间随机出现的频谱空洞，为认知用户的机会频谱接入（opportunistic spectrum access）提供了条件。在这种情况下，认知用户需要周期性地检测无线频谱，智能地获取频段中出现的频谱空洞，并且利用这些频谱空洞来进行通信，最终达到最小化对授权用户干扰的同时实现频谱“二次利用”的目的。因此，对授权用户的检测在Interweave类型的CR中显得尤为重要。但是，对授权用户的检测在实现上还存在着许多困难。认知用户需要周期性地探测一个带

宽很大的频段，从而找到可以通信的频谱空洞。由于路径衰落、阴影衰落等原因，授权用户的信号在到达认知用户时变得很微弱，使得认知用户的检测产生漏检（missed detection）。由于多个认知用户的存在，对授权用户的检测存在虚警（false alarm）概率。

Underlay：Underlay 类型的 CR 允许认知用户和授权用户同时在同一频段上进行通信，但是认知用户的发射功率被严格控制在一定范围，使得授权用户受到的干扰低于一个给定的门限。2002 年，FCC 提出了干扰温度的概念来描述授权用户所受到的干扰。Underlay 的 CR 本质上是一个基于干扰能量约束条件下的多用户干扰信道。在不同的信道条件下，其容量的研究一直是学术界关注的焦点之一。同时，必须指出认知用户对干扰强度感知也存在很多困难，并且对于 FCC 所提出的干扰温度能否有效地服务于认知系统也存在讨论。Ghasemi 对在授权用户的干扰能量约束条件信道服从不同分布时的网络容量进行了研究，其中包括高斯分布、瑞利分布、莱斯分布以及对数正态分布。而在此基础上，Gastpar 研究了将干扰能量约束条件转化认知用户发射功率限制条件时的系统容量，研究包括了在单入单出（Single In Single Out，SISO）系统中的高斯信道、衰落信道以及多址接入信道条件下的网络系统容量。

Overlay：Overlay 类型的 CR 不同于 Underlay 的地方在于其假设了授权用户的消息信息对于认知用户是已知的。因此，认知用户可以在进行通信的同时帮助授权用户进行通信。从信息论的角度来说，Overlay 的 CR 是一个非对称的消息信息的干扰信道。认知用户在得到授权用户的消息信息之后，可以采用如脏纸编码（dirty paper coding）、重叠编码（superposition coding）等编码技术来实现对于授权用户的协助通信。学者们从信息论的角度讨论了 Overlay 类型 CR 在不同的编码方式下的优缺点和所能实现的容量。但是，认知用户获取非因果的授权用户的消息信息的假设在现实的网络中存在一定的困难。

下面简要介绍上述三种不同的 CR 的优缺点。在 Underlay 和 Overlay 的 CR 网络中，通过联合编码或者功率控制技术来达到最小化认知用户所造成的干扰，使得认知用户和授权用户的通信可以同时存在的；而在 Interweave 的 CR 中，认知用户和授权用户的通信被分离开，因此可以有效避免干扰。从边带信息来说，Underlay 系统需要认知用户感知其对授权用户所造成的干扰；Overlay 系统需要认知用户准确感知授权用户的消息信息；Interweave 系统需要依赖于频谱感知技术和授权用户检测技术来获得频谱空洞。因此，这三种不同的类型在实现上各有优点，同时也存在各自不同的困难，可以预见，未来的认知系统必然朝着这三种类型相互融合，相互借鉴的方向发展。然而，无论哪

一种类型的认知系统，其中心思想都是尽可能降低认知用户对于授权用户的干扰，以达到认知用户和授权用户同时共用无线资源的目的，因此从信息论的角度来看，认知无线电网络可以等效于不同条件下的干扰信道。

1.3 UWB 技术和研究现状

随着无线应用越来越多地依赖于短距离高速无线传输，无线个域网（Wireless Personal Area Networks，WPAN）的概念被提出以后，低功耗、高速率的短距离无线通信技术受到了工业界和学术界的高度关注。1993 年，R. A. Scholtz 提出时跳（Time Hopping，TH）脉冲无线电，并将 UWB 技术引入了无线通信，从此 UWB 技术成为学术界研究的热点之一。UWB 系统以其低发射功率和高传输速率，一直以来都以 Inderlay 的形式被广泛应用于认知系统中。

最早提出的基于脉冲的 UWB 系统和现有的通信技术有很大的区别，其中最重要的一点就是脉冲 UWB 信号不需要载波，因此，极大地降低了无线通信的成本和能耗。此外，UWB 系统具有很多独特的优点，主要包括以下几个方面：

UWB 工作频带宽、传输速率高。为实现与窄带系统的共存，UWB 系统的信号能量受到了严格的控制。然而，超宽的工作频段依然可以提供很高的无线传输速率，为一些依赖超高传输速率的短距离无线应用提供了实现的可能，在 1 米的距离内 UWB 系统可以实现 1Gbps 的无线传输速率。

UWB 的频谱利用效率高。UWB 技术可以和上面介绍的认知无线电技术有效结合。通过感知频谱空洞，多载波 UWB 系统可以与现有的窄带系统很好地共存。

UWB 系统设备的实现简单，功耗低，可以根据用户的要求调整系统参数，通过在通信速率、覆盖范围以及发射功率之间进行简单的折中和互换，从而适应各种不同无线应用的需求。

UWB 信号具有很高的时间分辨率。对于脉冲 UWB 来说，其每次发射的脉冲持续时间很短，在多径反射信号到达接收端之前，直射路径信号的接收就已经完成。因此，相对于窄带系统来说，Rake 接收机可以利用 UWB 信号的多径效应实现高效低能耗的 UWB 通信。

UWB 信号具有极好的保密性。因为其带宽很大并且信号功率具有极低的频谱密度（Power Spectral Density，PSD），因此 UWB 信号往往被淹没在噪

声中，被监听和截获的概率很低。

综合以上的优点，可以说 UWB 技术是一种高速、低能耗且低成本的短距离无线通信系统。在 UWB 技术发展多年的今天，UWB 已经不再仅仅利用基于脉冲的无线电技术来实现。美国联邦通讯委员会（FCC）定义分数带宽（fractional bandwidth）大于 20%，或者绝对带宽大于 500MHz 的无线通信系统为 UWB 系统。分数带宽的定义如下：

$$B_{\text{fractional}} = B/F_C = 2(F_H - F_L)/(F_H + F_L) \tag{1.2}$$

其中，$B = F_H - F_L$ 指的是−10dB 带宽，$F_C = (F_H + F_L)/2$，为中心频点，而 F_H 和 F_L 分别表示的是−10dB 带宽的频率上界点和下界点。由此可见，只要无线通信系统满足这两个条件中的一个就可以称为 UWB 系统。但是无论哪一种 UWB 系统，其带宽相对于窄带系统来说都大得多。因此，UWB 系统通常与很多不同的窄带系统共存，为了使得在其频带范围内的其他窄带系统的通信不受影响，美国联邦通讯委员会（FCC）对 UWB 设备的发射功率进行了严格的控制。图 1.1 为 FCC 对室内的 UWB 信号发射功率的有效等向辐射功率（Effective Isotropic Radiated Power，EIRP）限制。

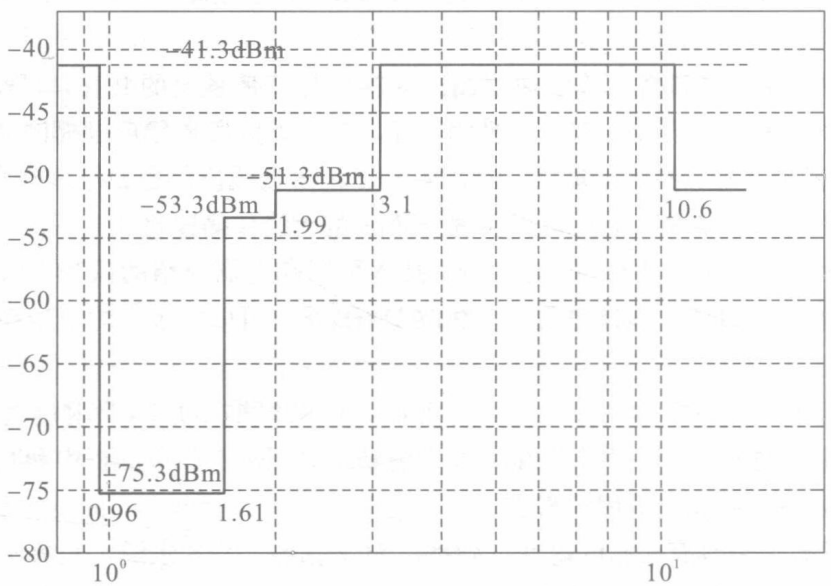


图 1.1　FCC 对室内的 UWB 信号发射功率的限制

以 UWB 信号来进行分类，UWB 系统包括了脉冲 UWB 和多载波 UWB 两种。学术界更加关注的是脉冲形式的 UWB，最主要的原因是脉冲的 UWB 相对于多载波的 UWB 来说可研究的方向更多。但是，实际的 UWB 系统更倾

向于采用多载波的 UWB 技术，主要原因在于：

系统很难找出大段连续的频谱资源供脉冲 UWB 使用。

多载波 UWB 可以灵活地利用小段的频谱空洞以提高频谱效率，并且缓解与现有系统之间的干扰。

多载波 UWB 系统中 Rake 接收机所需要使用的 finger 数远少于脉冲 UWB。另外，相对较小的带宽也有利于收发设备的实现。

多载波 UWB 结合 FDMA 的工作方式也可以有效避免远近效应。

基于上述这些优点，高速的 UWB 标准大多以多载波 UWB 为物理层的核心技术。现有的 UWB 标准按照不同的传输速率可以分为高速和低速两种。

高速 UWB 标准主要包括：IEEE 802.15.3a 和欧洲计算机制造商协会（ECMA）提出的多带 UWB 标准（Multi－Band UWB，MB－UWB）。UWB 技术被定义为高速无线个域网的物理层技术，为用户提供从 100kbps 到 100Mbps 的短距离无线传输。其应用范围包括了无线 USB、无线外设等。另外，UWB 技术保障的高通信速率也为数字电视、视频和音乐等消费电子应用提供了支持。

低速 UWB 标准：IEEE 802.15.4a。低速的 UWB 主要应用在无线传感器网络等传输环境相对恶劣的场景，为无线节点提供 100 米范围内从 50kbps 到 1Mbps 速率的无线传输。实际上，4a 标准的制定着眼于实现提供精确定位服务的低能耗、低速率的无线通信系统。

正如前面所提到的，无论脉冲 UWB 技术还是多载波 UWB 都有很多优点，但是 UWB 系统的工程和商业应用同样存在着许多亟待解决的问题，例如：

多用户之间存在的多址接入干扰（Multiple Access Interference，MAI）和共存的窄带系统干扰（Narrowband Interference，NBI）。因为 UWB 信号通常具有较低的发射功率，UWB 系统受到来自其频带内窄带信号的干扰很大。与此同时，多用户 UWB 系统必然存在多用户干扰的问题。

UWB 设备的实现。由于 UWB 系统需要在大于 500MHz 的带宽上传输数据，这为 UWB 系统的发射机和接收机实现带来了一定困难。同时，UWB 天线的设计也成为一大难点，其参数随频率的变化需要保持在一个很低的允许范围以内，其尺寸大小、成本高低也直接决定了 UWB 系统的商用前景。

UWB 信道估计和建模。不同环境下，UWB 信道具有很大的不同，因此，多场景、多环境下的 UWB 信道估计是实现 UWB 系统的关键。同时 UWB 系统多用于室内，多径成分非常丰富，并且信道的功率时延谱呈现出与窄带信道

不同的“簇”（cluster）的特点，因此，如何有效建立 UWB 信道的模型非常重要。

上述内容分别对 MIMO 技术、CR 技术和 UWB 技术做了概括性的描述，并且对这三种技术的研究现状进行了总结。随着无线业务量呈指数的增长，无线频谱资源已经极为稀缺，结合了 MIMO、CR 和 UWB 等技术优点的系统必将成为未来无线通信的发展方向。与此同时，基于这些技术的无线通信系统中无线用户数量的增加也对通信系统的容量提出了更高的要求，同频复用和空间复用是未来无线通信发展的必然趋势。在这样的前提下，MIMO 系统、CR 系统以及 UWB 系统中同时存在的，也是无线领域最为重要的技术难点——干扰问题，成为学者们关注的焦点，也是解决当前无线通信系统容量瓶颈的一个重要突破口。