



高等学校信息与通信工程“十一五”规划教材

衰落信道数字通信基础

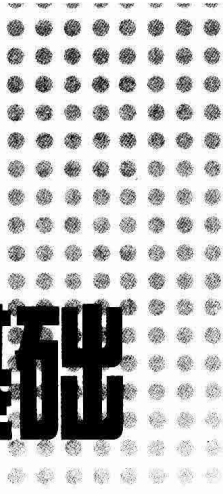
主编/张 曙 田 园 刘 彤 张锦中 主审/栾晓明

. 3-43

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



高等学校信息与通信工程“十一五”规划教材



衰落信道数字通信基础

主编/张 曙 田 园 刘 彤 张锦中 主审/栾晓明

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



内容简介

本书主要讲述衰落信道的基本原理,衰落信道的分析方法,衰落信道上的最佳接收技术,衰落信道上的单信道接收机性能,衰落信道上的多信道接收机性能,衰落信道上的最佳接收性能,衰落信道多用户技术及衰落信道容量等方面的知识。

本书内容分为两部分,第一部分包括:准备知识,多径衰落信道模型,平衰落信道,频率选择性信道,多普勒衰落信道,衰落信道上的单信道接收机性能分析及衰落信道上多信道接收机(前半部分)。这一部分的对象是通信专业及相近专业的研究生,追求建立清晰的衰落信道的物理概念,熟悉分析衰落信道的方法,了解衰落信道与高斯信道的主要区别,以及对抗衰落的基本方法。

第二部分包括:衰落信道上的多信道接收机(后半部分),衰落信道接收机的中断概率,衰落信道多用户技术及衰落信道容量等。这一部分的对象是通信专业高年级研究生及对衰落信道知识感兴趣的学生或教师。第二部分从严格的数学分析入手,重点研究衰落信道的最佳接收机及多用户技术的有关方面知识。

图书在版编目(CIP)数据

衰落信道数字通信基础/张曙等主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.4
ISBN 978-7-81133-763-1

I. ①衰… II. ①张… III. ①数字通信
IV. ①TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 067384 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 13
字 数 310 千字
版 次 2010 年 4 月第 1 版
印 次 2010 年 4 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前言

移动通信技术深刻地影响了人们的生活方式,它是当前发展最为迅速、应用最为广泛、技术最新的通信领域。预期移动通信将来还会有相当大的发展。

移动通信技术的发展面临许多新的问题,问题之一是需要进一步加强对无线信道特性深刻而全面的认识及利用。无线信道是指发射机和接收机之间存在的传送无线电信号的物理介质。对于现实的无线通信而言,无线信道可以用线性时变系统模型来足够精确地描述。无线信道不同于恒参数信道(如光纤、同轴电缆、传输线信道等),其信道参数具有随机性和时变性,对信号的影响远远超过恒参数信道对信号的影响。移动无线信道,由于存在多径传输和多普勒频移,使得信道具有明显的衰落特性,即信号经过移动无线信道传输时,可能会出现剧烈的幅度变化、码间干扰及载频偏移,致使通信系统的性能明显下降。因此移动无线信道又经常被称为衰落信道。衰落信道的复杂特性导致了对衰落信道的分析方法的复杂性。

无线信道建模与分析是移动通信技术的理论基础。移动衰落信道的建模、分析与仿真是移动通信传输系统设计与应用的基础。本书是为研究生编写的一本教材,主要讲述衰落信道的基本原理,衰落信道的分析方法,衰落信道上的最佳接收技术,衰落信道上的单信道接收机性能,衰落信道上的多信道接收机性能,衰落信道上的最佳接收机性能,衰落信道多用户技术及衰落信道容量等方面的知识。

编写本书的目的有两个。第一个目的是随着移动通信的飞速发展,与衰落信道有关的种种问题凸现,被广大从事无线电通信技术的研究人员、工程人员所关注。但现在研究生们对衰落信道的熟悉程度不够,市场上也缺乏以衰落信道为主要研究内容的教材,学生在专业知识方面出现空缺。编写本书的目的是想填补这样一个空缺,使学生们能熟悉衰落信道通信这个重要领域。

由于分析衰落信道的数学工具繁杂,理论分析艰涩,研究的结果不易和物理实际相呼应。编写本书的第二个目的是从我国研究生的实际出发,希望寻求一种从重概念,重建模,重分析到严格数学描述的两步走的方法,使学生能正确建立起衰落信道的概念及掌握分析、解决衰落信道通信的方法。本书内容的编排就是这样的一个尝试。

本书内容分为两部分,第一部分包括准备知识,多径衰落信道模型,平衰落信道,频率选择性信道,多普勒衰落信道,衰落信道上的单信道接收机性能分析及衰落信道上多信道接收机(前半部分)。这一部分的对象是通信专业及相近专业的研究生,追求建立清晰的衰落信道的物理概念,熟悉分析衰落信道的方法,了解衰落信道与高斯信道的主要区别,以及对抗衰落的基本方法。在这一部分不追求严格的数学推导,强调基本概念的理解及掌握分析衰落信道的基本方法。

本书第二部分包括衰落信道上的多信道接收机(后半部分),衰落信道接收机的中断概率,衰落信道多用户技术及衰落信道容量等。这一部分的对象是通信专业高年级研究生及对衰落信道知识感兴趣的学生或教师。在熟知第一部分内容的基础上,第二部分从严格的数学分析入手,重点研究衰落信道的最佳接收机及多用户技术的有关方面知识。

本书的第1,6,8章由张曙教授编写,第2,9章由田园讲师编写,第3,7章由刘彤博士编写,第4,5章由张锦中博士编写。全书由张曙教授统稿。在本书编写过程中,栾晓明教授认真阅读了全书原稿,提出了许多有益的建议;郭文卓、苏佳、曲家庆、郭冬梅、刁新颖、李玉梅、孙晓峰、宋俊才、李莹、所明璇等博士生和硕士生参与了部分原稿的校对、作图及文献翻译工作。在此,作者谨表诚挚的谢意!

本书编写过程中,参阅了大量国内外有关衰落信道数字通信的著作及文献,在本书的最后部分列出了这些参考资料,在此对文献的作者表示诚挚谢意。如有遗漏或差错,希望原作者或读者指出,以备再版时补正。

由于作者的水平所限,书中遗漏和错误在所难免,恳请读者不吝赐教指正。

编者

2009年11月于哈尔滨

目 录

第1章 绪论	1
1.1 衰落信道的一般描述	2
1.2 几种典型的无线信道	4
1.3 对抗衰落的基本技术	6
1.4 本书的内容组织结构	8
第2章 随机变量和随机过程	11
2.1 随机变量及其分布	11
2.2 平稳随机过程	27
小结	35
习题	35
第3章 无线信道与衰落	39
3.1 无线信道传播特性	39
3.2 大规模衰落	42
3.3 小规模衰落	44
3.4 阴影衰落	45
3.5 多径衰落信道	45
3.6 多普勒时变衰落信道	57
3.7 深衰落与电平通过率	62
小结	68
习题	68
第4章 衰落信道最佳接收机	71
4.1 幅度与相位及延时均为已知时的相干检测	72
4.2 已知相位与延时,未知幅度时的检测	74
4.3 已知幅度与延时,未知相位时的检测	76
4.4 已知延时,未知幅度及相位时的检测	77
4.5 未知幅度、相位及延迟的情况	82
小结	83
第5章 衰落信道上的单信道接收机性能	84
5.1 高斯信道接收机性能	84
5.2 衰落信道接收机性能	94
小结	106
习题	106
第6章 多信道分集接收机性能	110
6.1 合并分集	110
6.2 最大比合并	113
6.3 等增益合并	118

6.4	选择合并	122
6.5	切换分集	126
	小结	145
第7章	多用户通信系统中断性能	146
7.1	干扰受限系统的中断概率	146
7.2	最小期望信号功率受限系统的中断概率	151
7.3	双支路选择合并和切换-驻留合并分集中断概率	157
7.4	多用户通信系统的中断率和平均中断持续时间	161
	小结	163
第8章	最优合并——有干扰的衰落信道通信的分集技术	164
8.1	独立同分布衰落下,存在单个干扰时,最优合并	164
8.2	独立同分布衰落下,存在多个等功率干扰时,最优合并	173
8.3	最优合并(OC)与最大比合并(MRC)性能比较	175
8.4	独立同分布衰落下,存在多个任意功率干扰时,最优合并	176
	小结	178
第9章	衰落信道的容量	179
9.1	信道和系统模型	179
9.2	最佳功率-传输速率联合自适应	180
9.3	恒定发射功率下的传输速率自适应	182
9.4	固定速率的信道反演	184
9.5	举例	186
	小结	188
附录	定义式推导	189
	参考文献	191



第1章 绪论

如果要回答从20世纪下半叶到现在,哪一种技术深刻地影响了人们的生活方式,无疑移动通信技术将是可能的答案之一。

首先,我们简单地回顾一下移动通信的发展历程。

20世纪40年代,移动通信是以基站为中心,覆盖70~80 km半径的服务范围,频率从150 MHz到450 MHz。由于受到频率资源的限制,容量仅为几百个用户。在当时,移动通信仅能提供为政府、大企业、军方及少数特殊人群的昂贵服务。随着20世纪下半叶模拟蜂窝技术的引入,公众移动通信业务开始出现了巨大的市场。这种第一代蜂窝移动通信系统,使用频率为800~900 MHz,可以和市话网和长话网联网。由于采用了频率复用技术,用户总数显著增加。大区制的覆盖范围为20~30 km,城市中的小区制覆盖范围为几千米。从20世纪80年代末开始,GSM和窄带CDMA等数字移动通信系统,即第二代移动通信系统(2G),投入使用,它提供更高的频率利用率、更好的数据业务以及更先进的漫游服务,使得移动通信技术拥有了更大的市场。2G的频率除了800~900 MHz频段外,还增加了1 800~1 900 MHz频段。城市市区中的小区制最小覆盖范围大约为几百米,而已经开始大量使用微蜂窝和微微蜂窝移动通信系统,其覆盖范围更小。为了达到更高比特率数据业务和更好的频率利用率,目前第三代(3G)移动通信系统已在多国正式开通,它可提供一系列的新业务,如多媒体通信、高速业务处理、遥测业务以及用户通过移动通信网接入因特网或企业网等。

在近20年来,移动通信是我国持续发展最为迅速的产业,截止到2007年12月底,全国移动电话用户总数已突破5亿户,达到54 728.6万户,移动电话的普及率已达到41.6部/百人,在电信用户中,所占比重已达到60%。2003—2007年间,我国移动通信发展情况如表1.1所示。

表 1.1 2003—2007 年我国移动通信发展情况

	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年
移动电话用户/万户	26 995.3	33 482.4	39 340.6	46 105.8	54 728.6
移动电话用户所占比重/%	50.7	51.8	52.9	55.6	60.0
移动通信业务收入/亿元	2 096.2	2 540.4	2 615.3	3 368.0	3 702.7
移动通信业务收入增长率/%	17.3	16.5	17.2	18.5	17.8
移动通信业务收入所占比重/%	45.47	48.2	45.1	47.3	50.9

由表1.1可以明显地看出,移动电话用户在电话用户数中所占比例逐年提高,发展势头强劲,业务收入增长速度连续5年均超过16.5%,平均达到17.5%,移动通信业务收入已占整个电信业务收入的半壁江山,不仅带动了电信业的快速发展,也成为整个国民经济中最有活力的增长点。然而在1997年,我国固定电话用户超过1.8亿,而移动电话仅有1.4亿用户,全国普及率不足10%。10年之间的巨大变化,使我国实现了通信方式从固话



到移动的转变,为我国的信息社会发展提供了坚实的条件保障。现在我国移动电话用户超过7亿户,3G在我国已正式开通,4G也不再是遥不可及的梦想,它们都会在不久的将来为用户提供更人性化、更强大的移动服务。这一切预示着移动通信进入千家万户,已经成为国民经济的支柱产业和促进国民经济持续增长的又一强劲有力的发动机。

在通信技术,特别是移动通信技术迅速发展的同时,传输技术随着新的通信频率的采用及传输环境的变化,也面临许多新的问题,问题之一是需要进一步加强对无线信道特性深刻而全面的认识及利用。无线信道是指发射机和接收机之间存在的传送无线电信号的物理介质。对于现实的无线通信而言,无线信道可以用线性时变系统模型来足够精确地描述。无线信道与恒参数信道(如光纤、同轴电缆、传输线信道等)相比,它的一个明显的特点是信道参数的随机性和时变性。而与移动通信密切相联的移动无线信道,由于存在多径传输和多普勒(Doppler)频移,使得信道具有明显的衰落特性,即信号经过移动无线信道传输时,可能会出现剧烈的幅度变化、码间干扰及载频偏移,致使通信系统的性能明显下降。因此移动无线信道又经常被称为衰落信道。而衰落信道的复杂特性导致了衰落信道的分析方法的复杂性。

衰落信道的特点就是传输过程中的空时随机性,这种随机性表现在既可能是在同一个接收地点接收到的信号随时间随机地变化,也可能是在同一个时间点上,随着接收机地点的微小变化而接收到的信号强度随机地变化,即信号传输过程中存在空间和时间两方面的衰落。如果衰落对调制波各个频谱分量的衰减是相同的,这种衰落称为非频率选择性衰落或平衰落。如果衰落对各个频谱分量的衰减随频率不同而不同,则称之为频率选择性衰落。总之,无线信道的衰落特性可以看成信道的传输系数的随机变化,由于这种变化可能是十分激烈的,导致无线通信的可靠性要大大低于有线通信。

1.1 衰落信道的一般描述

假设发送的数字信号的已调载波形式为

$$s_0(t) = \text{Re}[u_0(t) \exp(j2\pi f_c t)] \quad (1.1)$$

经过 N 条传输路径后,收到的信号为所有多径信号之和,即

$$s(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k s_0(t - t_0 - \tau_k) \quad (1.2)$$

式中, α_k 为第 k 条路径的传输衰减系数; t_0 为参考时间; τ_k 为第 k 条路径的传输时间与参考时间之差,即多径延时。

将式(1.1)代入式(1.2),得到

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^N \alpha_k u_0(t - t_0 - \tau_k) \exp[j2\pi f_c (t - t_0 - \tau_k)] \right\} \\ &= \text{Re} \{ u(t - t_0) \exp[j2\pi f_c (t - t_0)] \} \end{aligned} \quad (1.3)$$

由式(1.3)可得到收到信号的幅度为

$$u(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k u_0(t - \tau_k) \exp(-j2\pi f_c \tau_k) \quad (1.4)$$

如果被传输的信号 $u_0(t)$ 的频谱 $U_0(f)$ 具有低通特性, $U_0(f)$ 的带宽为 B , 则有



$$u_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(f) \exp(j2\pi ft) df = \int_{-B}^{+B} U_0(f) \exp(j2\pi ft) df \quad (1.5)$$

$$B \ll f_c \quad (1.6)$$

将式(1.5)代入式(1.4), 得到

$$\begin{aligned} u(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(f) \exp(j2\pi ft) \left\{ \sum_{k=1}^N \alpha_k \exp[-j2\pi(f+f_c)\tau_k] \right\} df \\ &= \int_{-B}^{+B} U_0(f) \exp(j2\pi ft) \left\{ \sum_{k=1}^N \alpha_k \exp[-j2\pi(f+f_c)\tau_k] \right\} df \\ &= \int_{-B}^{+B} U_0(f) H(f) \exp(j2\pi ft) df \end{aligned} \quad (1.7)$$

由此可以得到信道的等效基带传输函数为

$$H(f) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \exp[-j2\pi(f+f_c)\tau_k] \quad (1.8)$$

由于基带信号带宽 $B \ll f_c$, 从而式(1.8)的复指数函数可以在 $f=0$ 处展开成 Taylor 级数, 得到

$$H(f) = H_0 - jH_1(f) + H_2(f) - \dots \quad (1.9)$$

其中

$$H_0 = \sum_{k=1}^N \alpha_k \exp(-j2\pi f_c \tau_k) \quad (1.10)$$

$$H_1(f) = 2\pi f \sum_{k=1}^N \alpha_k \tau_k \exp(-j2\pi f_c \tau_k) \quad (1.11)$$

$$H_2(f) = -2\pi^2 f^2 \sum_{k=1}^N \alpha_k \tau_k^2 \exp(-j2\pi f_c \tau_k) \quad (1.12)$$

可见, H_0 是与频率无关的量; $H_1(f)$ 和频率成线性关系; $H_2(f)$ 是频率的平方项。

如果 H_0 在 $H(f)$ 中占主要成分, 即 $H(f)$ 与频率 f 关系不大, 这意味着信号经过信道后波形基本没有失真。如果 $H_1(f)$ 或 $H_2(f)$ 在 $H(f)$ 中占主要成分, 则 $H(f)$ 会随频率变化而变化, 信道产生频率选择性衰落, 导致信号波形发生变化, 在数字通信时, 表现为符号间干扰。

由于传输的多径特性导致信道特性发生复杂的变化, 为了便于分析多径的影响, 通常采用以下几种常用的多径模型。

1. 延迟线模型

当多径数目 N 较少时, 式(1.2)可用延迟线抽头加权和模型描述。图 1.1 即是一个 3 条多径的模型, 其中, τ_0 为与最短路径相应的传输延时, τ_1, τ_2 为另外两条多径相应的传输时延与 τ_0 的差; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 为三条多径相应的路径增益。需要注意的是多径时延及路径增益均是随机变量。

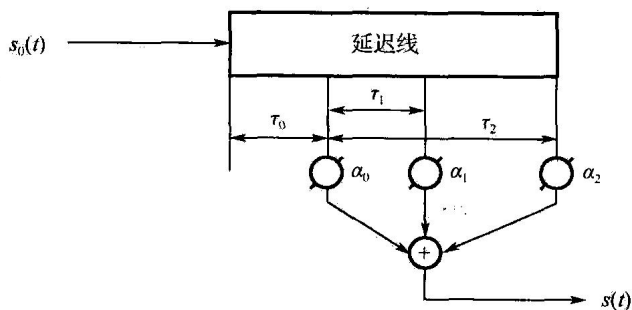


图 1.1 信道的延迟线抽头加权和模型

2. 瑞利(Rayleigh)衰落模型

当相互独立的多径数目很多, 但不存在直视路径时, 并且各多径之间的附加时延相差



不大时,接收到的各多径信号的和信号幅度 u 服从 Rayleigh 分布

$$f(u) = \frac{u}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2}{\sigma^2}\right), \quad u \geq 0 \quad (1.13)$$

而和信号的相位 φ 服从均匀分布

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi}, \quad -\pi \leq \varphi \leq \pi \quad (1.14)$$

3. 莱斯(Rice)衰落模型

在 Rayleigh 模型中,如果存在一条直视主路径,即在接收到的和信号中,除了弱小的散射信号外还有一个很强的直射信号,此时和信号的幅度 u 服从莱斯(Rice)分布

$$f(u) = \frac{u}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2 + a^2}{\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ua}{\sigma^2}\right) \quad (1.15)$$

式中, $I_0(\cdot)$ 是第一类零阶修正贝塞尔(Bessel)函数。

4. 多普勒(Doppler)衰落模型

当无线电发射机和接收机之间存在着唯一的路径,而且以相对速度 v 运动时,两者间距离与时间的关系为

$$d = d_0 + vt \quad (1.16)$$

时延变化量为

$$\tau(t) = \frac{vt}{c} \quad (1.17)$$

其中, c 为光速,式(1.8)的路径传输函数从时不变函数变为时变函数

$$H(f, t) = \alpha \exp\left[-j2\pi(f + f_c) \frac{vt}{c}\right] \quad (1.18)$$

式中, α 为路径增益。基带谱为 $U_0(f)$ 的无线电信号经过这条路径传输后为

$$u(t) = \int_{-B}^B [U_0(f) \exp(j2\pi ft)] \cdot \alpha \exp\left[-j2\pi(f + f_c) \frac{vt}{c}\right] df \quad (1.19)$$

式(1.19)说明,接收到的信号发生了频移。对于多径传输而言,由于每一条路径都会引起不同的频移,从而信号经过多径后,接收机接收到的和信号由于 Doppler 效应引起的频移是一个连续的扩展频谱。

除了以上这些模型以外,还有反映阴影效应的对数正态模型;反映大规模距离上信号衰落的模型等。

1.2 几种典型的无线信道

1.2.1 地面视距微波信道

视距微波无线信道是在直视路径上进行微波传输,但在某些场合下,也可能形成多径传输。

经历不同途径的射线到达接收端时,由于路径长度的差别,传输时延差不一致,幅度也不一致,它们是缓变的随机量。对于大多数的二径传输,一条 36.4 km 试验线路上,典型的二径强度比为 0.7,时延差为 2 ns,天线接收到的射线角度差 $0.21^\circ \sim 0.46^\circ$ 左右。偶



尔视距微波无线信道也会出现三径和四径的情况,但出现的概率较小。下面一组数据是试验中出现四径信号的强度/时延差值(1/0, 0.7/1.7, 0.2/5.6, 0.15/11),即对视距微波中继站标准距离 36.4 km 线路而言,典型最大时延差 $\tau_m = 11$ ns。

视距微波信道通常以图 1.1 延迟线抽头加权和模型来表示,当采用二径模型时接收到的信号为

$$s(t) = \alpha_0 s_0(t - t_0) + \alpha_1 s_0(t - t_0 - \tau_1) \quad (1.20)$$

归一化后的信道等效传输函数

$$H(j\omega) = 1 + \alpha_1 \exp(-j\omega t_0) \cdot \exp(-j\omega_c \tau_1) \quad (1.21)$$

这种类型的信道具有典型的频率选择性衰落特性,其频率特性如图 1.2 所示。

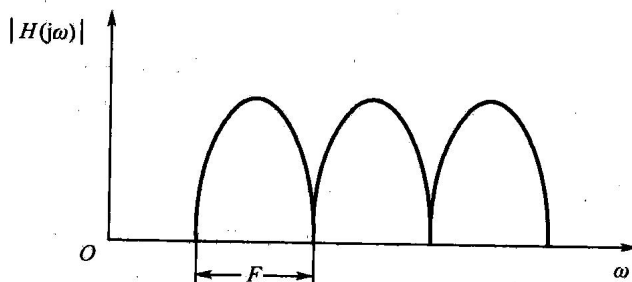


图 1.2 二径地面视距微波信道的等效基带传输函数

在图 1.2 中,相应的加强-抵消-加强的频带宽度为 $F = 1/\tau$ 。与凹口对应的信号幅度为 $1 - \alpha_1$ 。如以 36.4 km, $F = 500$ MHz, 试验线路出现的典型二径数据计算, $\alpha = 0.7$, $\tau = 2$ ns, 则信号频率恰巧在凹口时相对幅度为 0.3。

实际上多径信道的参数往往是时变的,不仅 τ_1 , α_1 会变化,多径数也可能从二径变成三径,甚至四径。这些变化反映为凹口会随时间发生在频率上和深度上的变化,例如凹口可能会发生高达 5 MHz/s 的移动,而在深度上可能发生 20 dB/s 以上,甚至 90 dB/s 的变化。

1.2.2 散射信道

散射传播是典型的衰落信道,通常在地球的对流层、平流层和电离层都会形成散射传播。

超高频波的基本传播方式是空间波的传播,以视距方式传播,由于地球的曲率关系,传播范围大约为天线以外 40 km 的地区。用大功率发射机和高增益的接收机利用对流层散射,超高频通信可达视距以外,到 100 ~ 600 km。

图 1.3 表明了散射传播的原理,由于空气温度及压力起伏在对流层中产生介电常数微弱的不均匀性,这种不均匀性就会引起无线电波的散射,当 A 点发射机用高增益天线定向辐射到 B 点,在接收点 C 用高增益天线定向指向到发射天线方向上的对流层散射区,就可以接收到散射传播来的信号。

散射传播的特点是信号电平变化很大,而这种变化一般又可分为快衰落和慢衰落两种。快衰落是指十几分钟以内的变化,主要是由各个不均匀散射体散射的信号不相关性的互相干扰引起的。实测结果在 10 min 以内的衰落分布符合瑞利分布。慢变化是指信号以每小时平均值作统计,服从对数正态分布。

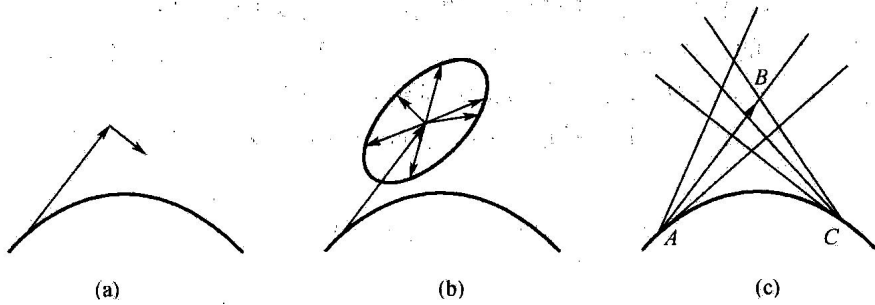


图 1.3 散射信道

(a) 单个不均匀散射体的散射; (b) 总散射体场的方向图; (c) 远距离接收散射信号

对流层散射的另一问题是存在选择性衰落, 多径间时延差为 τ , 不失真通带通常近似估计为 $F \leq 1/\tau$ 。实验证明散射传播在 300 多千米时, τ 为 $0.1 \mu\text{s}$, 因此频宽相当于 10 MHz 左右。

当电离层散射用的信号频率为 30 ~ 60 MHz, 通信距离为 1 000 ~ 2 000 km, 电离层散射是由 80 km 高度的电离层电子密度的不均匀性引起的。其情况和对流层散射十分相似, 但是电离层是色散媒介质, 其介电常数和频率有关, 散射场强和频率关系很密切。由于电离层高, 多径时差 τ 最大可达 20 ms, 所以传输的不失真带宽很小。

电离层散射信号也存在快衰落, 它也服从瑞利分布, 但与对流层散射不同, 它不决定于气象条件, 没有季节上引起的慢衰落, 而只有电离层高度变化引起的慢衰落, 这又与对流的慢衰落不同, 有关知识可查阅相关资料。

1.2.3 高频无线电信道

利用电离层天波传输无线电波称为高频无线电信道。在地球上空存在着电离层, 分成 D , E , F_1 和 F_2 层, 层电子密度及高度变化和日照辐射有着密切关系, 因此有着昼夜周期性的变化, 并且受太阳黑子和耀斑引起的灾难变化等影响。 E 层高度为 90 ~ 110 km, 当电磁波切向于地球表面发射时, 经过 E 层反射传播距离可达 2 000 km 的极限。白天 F_1 层高度为 150 km, F_2 层高度为 250 ~ 300 km。到夜晚 E 层减弱, 甚至消失, 而 F_1 和 F_2 融合成一个 F 层, 由于 F 层很高, 通信距离可达到 4 000 km, 适合工作频率高达 25 ~ 30 MHz, 有时可到 60 MHz, 高频信道是多径信道。

在数百千米之内的短程通信和超过 10 000 km 的长距通信, 多径数目多, 最大多径延迟达 5 ms 以上。而在 4 000 km 中等距离时, 可能传播模式较少, 最大多径延迟下降到 2 ~ 3 ms。由于不同的时间段中, 电离层变化很大, 导致最大多径延迟变化很大。一般可以认为多径时延差在 8 ms 左右。这就决定了高频通信中数字通信码率不高, 采用一般均衡手段对付多径形成的码间干扰, 在标准的 3 kHz 信道带宽情况下, 传输数码率在 2.4 kb/s 左右, 综合采用各种技术后, 也只能提高到 4.8 ~ 9.6 kb/s。

1.3 对抗衰落的基本技术

多径传播会引起衰落, 因此在设计电台功率和接收机灵敏度时, 就要考虑衰落储备裕



量,以补偿信道发生衰落时的传输损耗。接收机也要有足够的自动增益控制来对抗衰落。当遇到选择性衰落时,传播信道的频响和相位特性失真引起码间干扰,即使衰落储备是足够的,误码率仍不能降低,衰落严重时误码率升到一定程度会导致通信中断。

对抗衰落的基本且有效的方法是分集技术,常用的分集技术有空间分集、频率分集、角度分集、极化分集、时间分集及多径分集,等等。

1.3.1 空间分集

设置在不同接收地点的几台接收机,如果它们天线之间的距离相隔足够远,则收到的信号之间相关性很小,也就是这些信号同时经历深衰落,或者同时跌落到某个门限以下的概率很小。如果把这些信号加权后相加,或者选择所有接收信号中的最强的信号,就会得到比用单台接收机得到的效果要好。

在高频波段,要获得较好的分集效果,天线间距要大于十几个波长。间距不足,接收到的信号相关程度高,分集效果差。由于短波长为几十米,所以对短波分集而言,天线间距一般为300~600 m。

而在移动通信中,如果移动台是安装在车辆上,一般认为,天线上两个信号相关系数小于0.2就是不相关了,则天线间距可取为 $\lambda/2$ 。如对900 MHz波段, $\lambda/2 \approx 15$ cm,对车辆而言,安装起来还是方便的。试验表明,如果采用单天线接收,发生接收信号低于平均信号电平15 dB的时间为8.2%,低于平均电平20 dB的时间为2.9%。而采用两副相距 0.75λ 的天线分集后,合并信号低于15 dB的时间下降为2.6%,低于20 dB的时间下降为0.52%,可见用空间分集来对抗衰落是非常有效的。

1.3.2 频率分集

频率分集的效果取决于频率的间隔,在衰落信道上,载频之间的相关性随频率间隔的增加而减少。对于330 km的对流层散射传播,频率间隔大于2.5 MHz的两个频率可以认为是不相关的,从而可以采用分集接收的方式。对于地面微波传输,情况类似,但频率间隔相差要在几十兆赫以上的信号才能认为基本不相关。

一般频率分集要采用几套发射设备,每套设备发射不同频率的信号,所以设备成本高,而且频率资源利用率低,与其他的分集相比一般不具有优势。但是在散射通信中的宽带对抗多径技术,由于采用不同的时隙,使用不同的频率的方法,从而也可以用一套发射设备实现带内的频率分集。

1.3.3 角度分集

通常散射信道中微波接收天线中一个反射器中用两个或多个辐射器,稍微分开一个角度就可以收到从对流层中不同散射体的散射信号。发射端既可用宽波瓣天线也可用多个辐射器,接收天线的辐射器相互对准发射天线的辐射器,以接收来自发射辐射器的电波。

但在高频信道中,由于天线尺寸太大,因此不采用角度分集技术。

1.3.4 极化分集

高频长距离通信时,一个单极化波在传输过程中被椭圆极化。

在正常电离层传播中,由于收到的水平和垂直极化分量的包络起伏是近似独立的,可



以用两副布置很近、但极化互相垂直的天线接收不同极化信号加以合成克服衰落,这种方法叫做极化分集。对于越洋高频传输,极化二重分集比空间二重分集更为有效,由于极化只有两个分量,因此只能做到二重分集。

高频通信中,舰船上受空间约束难以实现空间分集,采用极化分集是很合适的。但在特高频和视距微波及散射传播中,接收到的两个极化信号呈现出接近同步的衰落,或者说两者相关系数接近于1,没有极化分集效果,因此在这些信道中不采用极化分集。

1.3.5 时间分集

时间分集和衰落信道的相干时间密切相关,它仅用于数字通信之中。最简单的时间分集方式是,在间隔大于相干时间的不同时间上,重复发送同一信息。由于在相隔大于相干时间上信道经历的衰落是相互独立的,从而将重复发送的信息合并之后,可以得到分集的效果。时间分集需要对发送的信息进行重复发送,因此需要有存储器对信息进行缓存,对数字信息而言,这并不困难。

1.3.6 时空发射分集

发射分集使用多个发射天线来为接收机提供同一信号的多个不相关副本。它最明显的优点就是将多天线的复杂性置于发射端,而许多接收机共享该发射机,因此接收机尽管可能仅有一副天线,但仍然可以获得分集增益。

发射分集采用多种形式。根据多个发射天线的使用方式来区分,有时分双工、频分双工,更复杂形式是使用发送信息的时空或频空编码。数据通过时空编码器编码,然后适当选择发射信号星座,使得编码和分集的增益达到最大。编码数据被分成 n 个数据流通过 n 个天线同时发射出去。接收方对信号合并及判决。例如 Alamouti 提出接收端采用最大似然合并的简单循环发射分集方案,即是时空编码的一种形式。

除了以上介绍的分集方式以外,还有宽带多径分集、混合分集,等等。

需要特别强调的是,分集技术必须和性能优良的合并技术相结合,才能实现对抗衰落的目的。合并技术我们将在后面章节中进行详细的研究。

1.4 本书的内容组织结构

本书主要讲述衰落信道的基本原理,衰落信道的分析方法,衰落信道上的最佳接收技术,衰落信道上的单信道接收机性能,衰落信道上的多信道接收机性能,衰落信道上的最佳接收机性能,衰落信道多用户技术及衰落信道容量等方面的知识。

在前言中说明了编写本书的两个目的。一是填补国内目前缺乏衰落信道教材的空缺,使学生们能熟悉衰落信道通信这个重要领域;二是寻求一种从重概念,重建模,重分析到严格数学描述的两步走的方法。使学生能正确建立起衰落信道的概念及掌握分析、解决衰落信道通信的方法。

本书内容分为两部分,第一部分包括:准备知识,多径衰落信道模型,平衰落信道,频率选择性信道, Doppler 衰落信道,衰落信道上的单信道接收机性能分析及衰落信道上多信道接收机(前半部分)。这一部分追求建立清晰的衰落信道的物理概念,熟悉分析衰落信道



的方法,了解衰落信道与高斯信道的主要区别,以及对抗衰落的基本方法。

第二部分包括:衰落信道上的多信道接收机(后半部分),衰落信道接收机的中断概率,衰落信道多用户技术及衰落信道容量等。这一部分在第一部分内容的基础上,第二部分从严格的数学分析入手,重点分析研究衰落信道的最佳接收机及多用户技术的有关方面知识。

本书的第2章是本门课程的基础知识,假设读者已经在本科阶段有了概率论及随机过程的基本概念,内容的安排更多是复习性和归纳性的,主要是集中在与以后衰落信道有关的方面。

第3章首先建立衰落信道的物理模型环境,并进一步得到衰落信道的数学模型。介绍了无线信道的传播特性,大规模衰落,阴影衰落及小规模衰落的特点,建立基于椭圆反射模型的多径的衰落信道模型及 Doppler 时变衰落信道。研究了 Rayleigh 信道和 Rice 信道的幅度和相位概率分布,并建立了 Nakagami - m 信道的模型;分析研究多径信道的 Clarke 功率谱密度函数;建立了相干带宽、相干时间的测度,及其他对符号间干扰、载波恢复的影响。建立了衰落信道与高斯信道的等效观点。研究了与深衰落密切相关的电平通过率(LCR)与平均衰落时间(AOD)这两个二阶统计量。

第4章从最佳检测的一般理论出发,研究衰落信道的最佳检测。同样,这一章的内容组织也是假设读者在本科期间已学习了《信号检测与估值》和《通信原理》这两门课程,所以很简洁地讨论了幅度、相位、时延这三个参量是全部已知或部分已知条件下在一般衰落信道上的相干检测,并以 Rayleigh 信道作为特例进行了分析。由于在衰落信道上载波相位恢复较为困难,研究了在双符号观察条件下的差分相干检测方法。由于第4章的内容从理论上讲是高斯信道检测的推广,所以对检测性能只作了理论分析,而省略了各种检测的性能仿真。

第5章对硕士研究生而言是非常重要的内容,它建立了本教材后面章节的理论基础。该章从针对高斯白噪声信道的各种不同调制形式传输过程中的差错特性出发,得到不同衰落类型信道上的差错特性。这些内容实际上是第3章中涉及到的衰落信道和高斯信道等效概念的实质性描述。由于在衰落信道上一般不宣传幅度调制信号,所以对单信道接收机的性能分析中,是以 BPSK, DBPSK, MPSK 为主进行的。针对慢变信道,又研究了 DQPSK 信号的差错特性;针对快变信道,研究了 DPSK 信号的差错特性。

第6章多信道分集接收机性能是本教材的核心内容。该章着重研究对抗多径衰落最有效的分集合并技术,详细分析了最大比合并(MRC),等增益合并(EGC),选择性合并(SC)性能,信道相关性对分集合并性能的影响等。分析以数学模型出发,经过严格的数学推导,得到了各种合并的性能。这一章内容的前半部分为硕士研究生准备的,后半部分内容(即选择性合并中的切换合并以后的内容)可以作为深入提高或专题研究的内容。作为近些年来广为关注的切换合并、广义切换合并、切换后检测合并、切换扫描合并,在本章的后半部分进行了详细的研究。本章仅以多径分集合并作为研究对象,但是所采用的研究方法,对于其他分集形式多数是有效的。

第7章以在衰落信道上多用户通信为研究对象,从不同 χ^2 变量的二次型入手,针对相当广泛的多种场景研究衰落信道上多用户通信系统的中断性能。研究了最小期望信号功率受限系统的中断概率。最后针对 DB-SC 和 SSC 分集系统的中断概率进行了研究。

第8章研究了在有干扰的衰落信道上多用户通信的最优合并(OC),其中包括独立同



分布衰落假设下的单干扰、双干扰最优合并的性能。

第9章研究了最佳功率 - 传输速率联合自适应, 恒定发射功率下的传输速率自适应, 固定传输速率下的信道反演三种情况下, 以 Rayleigh 衰落为例, 研究了衰落信道的容量。