

现代

无线通信电路 设计与实现

范博 杜平◎编著

XIANDAI WUXIAN TONGXIN
DIANLU SHEJI YU SHIXIAN

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



现代无线通信电路设计与实现

范博 杜安平 编著

本书由工业和信息化部教材编审委员会组织编写，旨在满足通信工程类专业本科教学需要。本书共分10章，主要介绍无线通信系统的基本组成、信道模型、调制解调技术、差错控制、多址接入、移动通信系统、卫星通信系统、微波毫米波通信系统、光通信系统、以及无线通信系统的性能分析和设计方法。本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术等专业本科教材，也可供从事通信工程工作的工程技术人员参考。

内容简介

本书由工业和信息化部教材编审委员会组织编写，旨在满足通信工程类专业本科教学需要。本书共分10章，主要介绍无线通信系统的基本组成、信道模型、调制解调技术、差错控制、多址接入、移动通信系统、卫星通信系统、微波毫米波通信系统、光通信系统、以及无线通信系统的性能分析和设计方法。本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术等专业本科教材，也可供从事通信工程工作的工程技术人员参考。

内容简介

本书由工业和信息化部教材编审委员会组织编写，旨在满足通信工程类专业本科教学需要。本书共分10章，主要介绍无线通信系统的基本组成、信道模型、调制解调技术、差错控制、多址接入、移动通信系统、卫星通信系统、微波毫米波通信系统、光通信系统、以及无线通信系统的性能分析和设计方法。本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术等专业本科教材，也可供从事通信工程工作的工程技术人员参考。



机械工业出版社

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页等，由本社负责调换。
 北京市西城区百万庄大街24号 机械工业出版社
 邮政编码：100070 电话：(010) 88379000
 电邮：jcb@vip.sina.com 网址：http://www.cmpbook.com

随着无线通信技术的快速发展，无线电路设计也越来越受到重视，对专业的电路设计人员的需求越来越大。由此可见，掌握无线电路设计技术对于有志于从事无线通信的工程师来说是十分重要的。

本书正是从实用和易懂的角度出发，系统介绍了无线电技术的基本原理，而且从整个无线电系统的角度来介绍无线电路的设计思路。本书以无线电系统相关电路的设计实务为主，以简要的设计公式及可行的近似经验公式为主线，尽量避开繁冗的理论分析、演算及设计，内容全面而系统，同时尽量做到内容浅显易懂，逐章列出其设计重点及程序，并辅以实例进行详细说明。同时在书的后部分，对现今发展迅速的软件无线电技术进行了专门的介绍，并且给出了很多设计实例来说明。

可以说本书是面向各层次的读者而编写的，不仅具有相当的理论介绍，而且还有实际应用的例子，既可作为高等院校相关专业的参考书，同时又可以作为通信工程师，尤其是通信系统电路设计人员必不可少的参考或者自学教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代无线通信电路设计与实现/范博, 杜平编著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 8

ISBN 978-7-111-24870-5

I. 现… II. ①范…②杜… III. 无线电通信 - 电路设计 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 124116 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张俊红 责任校对: 姜 婷

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17 印张 · 417 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-24870-5

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379764

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着移动通信技术的发展日新月异,无线应用技术包括 PCS 电话、射频识别 (RFID) 系统、直播电视服务 (DBS)、全球定位系统 (GPS)、无线局域网 (WLAN) 和本地多点分布系统 (LMDS) 等在内,都获得了极大的发展。而作为实现这些功能的硬件基础——无线通信电路,也越来越受到人们的重视,由此导致了对深刻掌握无线通信电路设计原理的工程师的巨大需求。但是,无线通信电路的设计要求设计者具有一定的实践经验和工程设计能力,一般性的、理论性的资料介绍无法满足实际工程设计的需要。作者根据多年从事无线电路设计的经验,搜集了大量的资料,从工程设计和设计应用角度编写了此书。

本书具有以下特点:

1. 理论性强:本书采用了通俗易懂的语言,详细地介绍了各种无线通信电路的基本原理和工作方式,使读者有完善的无线通信理论体系。

2. 工程性好:与其他许多书不同的是,本书不是提供复杂的理论以及大量的公式来详细阐述射频理论(这对于绝大多数读者甚至是工程师而言都是非常困难的,而且非常不实用),相反,本书采用简单的代数知识来简易迅速地设计振荡器、放大器、混频器、滤波器、锁相环、倍频器、射频开关等射频电路,同时也结合了大量的实例来介绍射频集成电路和单片微波集成电路。

3. 高、新:为了紧随技术的发展,本书对现今研究热点的软件无线电进行了专门的介绍,而且为了说明设计的方法,对现在流行的很多专用芯片的设计和使用也进行了详细的介绍,同时对如今电路设计中广泛使用的 EDA 辅助设计工具也进行了简要的阐述,可以说覆盖了现今无线技术发展的方向。

4. 实用性强:本书介绍了各种无线通信电路设计的方法以及设计的技巧,同时也提供了典型的射频电路供读者参考,方便读者进行电路设计。本书还介绍了关于电路设计、印制电路板设计布局、元器件参数选择的知识,有助于读者的射频电路设计。

本书由范博和杜平共同编写,其中第 1 章由杜平编写,第 2 章~第 9 章由范博编写,全书由范博进行统稿。在本书的编写过程中,王志强、张蓬、葛树涛、王鹰、王涛、曹霖工程师也参与了部分内容的编写工作;同时徐培文、孙玉林、李玉红、田丽君、杜强、姜海燕等朋友也给予了很大的帮助,帮助作者解决了很多具体问题,并参与了部分章节的编写工作;曹建军、程显奎、梁日军、于学禹在全书的排版及校阅过程中也付出了辛勤劳动,这里对他们表示深深的谢意!另外,本书在编写的过程中参考了一些书籍和公司资料,这些书籍和公司资料已在参考文献中列出。由于有些资料未能找到出处,因此未能在参考文献中列出,这里表示深深的歉意。

本书内容突出了理论性、工程性、实用性,可以作为从事无线应用领域的无线通信电路工程师的参考书,也可以作为高等院校通信、电子等相关专业研究生以及本科生的参考书目。

限于作者的水平,书中不妥和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2008 年 10 月

目 录

前言	1	3.1.3 滤波器的类型	48
第1章 概论	1	3.2 滤波器的基本设计	51
1.1 射频设计的重要性	1	3.2.1 低通滤波器原型	51
1.2 无线信道的特征	2	3.2.2 LC滤波器的设计	54
1.2.1 多普勒效应	2	3.3 滤波器的选用	61
1.2.2 多径衰落	3	3.3.1 滤波器的选型	61
1.2.3 慢衰落特性	6	3.3.2 滤波器实例	63
1.2.4 传输失真	6	3.3.3 常用滤波器设计软件	65
1.3 无线通信系统的组成	7	第4章 放大器	67
1.3.1 无线系统的接入方式	7	4.1 放大器的基本概念	67
1.3.2 无线系统的调制方式	9	4.1.1 放大器的基本原理	67
1.3.3 无线系统的基本结构	14	4.1.2 放大器的常用参数	69
1.4 常用网站和公司介绍	17	4.1.3 常用放大器的类型	73
第2章 无线通信电路的基本参数	21	4.2 基本放大电路的分析方法	76
2.1 收发信机的指标	21	4.2.1 基本放大电路的类型	76
2.1.1 输入特性	21	4.2.2 基本分析方法	78
2.1.2 增益	22	4.3 放大器的设计实例	82
2.1.3 噪声系数	22	4.3.1 基本放大电路的设计	84
2.1.4 多级线性网络级联的噪声系数	26	4.3.2 宽带射频放大器的设计	86
2.1.5 混频器噪声系数	27	4.3.3 低噪声放大器的设计	87
2.1.6 灵敏度	29	4.3.4 功率放大器的设计	91
2.1.7 动态范围	29	第5章 混频器	97
2.1.8 相位噪声	31	5.1 混频器的基本概念	98
2.1.9 选择性	31	5.1.1 混频器的基本原理	98
2.1.10 寄生输出	32	5.1.2 混频器的主要参数	100
2.2 有源器件的非线性参数	32	5.1.3 混频器的基本电路	104
2.2.1 谐波	32	5.1.4 混频器的类型	108
2.2.2 增益压缩	33	5.2 混频器设计实例	114
2.2.3 阻塞	34	5.2.1 低失真有源混频器 AD831	115
2.2.4 交叉调制	35	5.2.2 用于无线通信的 CDMA、FM 下 变频器 RF2456	118
2.2.5 互调干扰	35	5.2.3 采用 LT5560 为 WiMAX 应用提供 上变频转换	119
2.2.6 无杂散动态范围	38	5.2.4 $\frac{\pi}{2}$ 微带平衡混频器的设计	121
2.3 射频 EDA 软件简介	38	第6章 本地振荡器	127
第3章 滤波器设计	43	6.1 振荡器的基本概念	127
3.1 滤波器的基本概念	43		
3.1.1 滤波器的原理	43		
3.1.2 滤波器的主要参数	45		

6.1.1 振荡器基本原理	127	8.2.2 发射机系统设计	182
6.1.2 振荡器基本参数	129	8.3 接收机设计	186
6.2 常见振荡器类型	130	8.3.1 接收机结构	186
6.2.1 LC 振荡器	132	8.3.2 接收机的设计	195
6.2.2 晶体振荡器	134	8.4 链路预算分析	199
6.2.3 RC 振荡器	139	8.5 系统设计实例	202
6.3 振荡器的设计	140	8.6 射频电路板设计	205
6.3.1 LC 振荡器的设计	140	8.6.1 射频印制电路板的材料	205
6.3.2 晶体振荡电路	143	8.6.2 射频印制电路板的设计技巧	206
6.3.3 提高频率稳定度的措施	146	8.6.3 射频印制电路板的设计准则	210
6.3.4 集成高频正弦波振荡电路实例 ..	147	第9章 软件无线电技术	212
第7章 锁相与频率合成	151	9.1 软件无线电的基本概念	212
7.1 锁相环的基本概念	151	9.1.1 软件无线电的背景及其概念	212
7.1.1 锁相环的基本原理	151	9.1.2 软件无线电的结构形式	213
7.1.2 锁相环的基本参数	153	9.2 软件无线电的理论基础	215
7.1.3 锁相环的噪声分析	155	9.2.1 信号采样理论	215
7.2 频率合成的基本概念	156	9.2.2 射频直接带通采样原理	218
7.2.1 频率合成的常用技术	156	9.2.3 多速率信号处理	219
7.2.2 频率合成的主要参数	161	9.2.4 软件无线电中的高效数字滤波 ..	225
7.3 锁相频率合成器的设计	161	9.2.5 数字正交变换理论	231
7.3.1 基本的设计思路	161	9.2.6 软件无线电硬件的数学模型	236
7.3.2 环路滤波器的设计	165	9.3 软件无线电的硬件实现	242
7.3.3 PLL 电路的设计实例	169	9.3.1 软件无线电中的采样与量化——	
第8章 无线射频系统设计	179	ADC 及其实例	242
8.1 通信系统的组成	179	9.3.2 “DSP + FPGA” 软件无线电方案	
8.2 发射机设计	181	与实现	249
8.2.1 发射机常见结构	181	参考文献	264

第1章 概论

近几十年来,无线移动通信是电子信息领域中发展最为迅速的产业之一。利用无线通信技术可以方便地实现任何人(Whoever)在任何地方(Wherever)任何时间(Whenever),与任何人(Whomever)进行任何形式(Whatever)的信息交换。但是达到这样的水平也是无数科学家和工程师100多年来努力奋斗的结果。

在1897年,意大利科学家马可尼在陆地和一只拖船之间,用无线电实现了人类历史上第一次无线消息的传输,这被认为是无线通信的开端,可以说从那时起射频(RF)技术正式诞生了。马可尼的成功使人们意识到可以通过无线电波来代替电线进行信息的传播,这是具有历史性的。现在用于无线通信的模拟电路都已经发展到了吉赫兹波段,全球定位系统(GPS)载波频率在1227.60~1572.42MHz范围,个人通信系统中用的低噪声放大器(LNA)可以工作在1.9GHz甚至更高的频段。由于无线通信的快速发展,更紧凑的放大器、滤波器、振荡器和混频器电路正在被不断地研究出来,整个移动通信向着设备体积小、质量小、耗能低的方向不断发展。毋庸置疑,射频技术和微电子技术是当代移动通信的基础。

本章对一些基本的概念进行介绍,简要地介绍一下无线的传播环境,让读者熟悉无线通信系统运行的环境。读者必须具有足够的无线通信理论,才有可能开发出这些有专门需求的高性能系统。

1.1 射频设计的重要性

最初的电路设计,大约要追溯到18世纪末19世纪初。当时已经发明了可以连续可靠工作的蓄电池,即伏打电池,它可以为驱动最初期的电路提供可靠的直流(DC)功率。之后又出现了低频交流(AC)电源,它能更有效地输送电力,而只有很小的传输损耗,并且可以利用变压器来改变电能。1864年,麦克斯韦在英国皇家学会上发表的一篇文章中提出电场和磁场可以通过其所在的空间耦合从而实现电磁波传播的思想。赫兹于1887年用试验证明了电磁能量可通过空间发射和接收,这预示着无线通信领域的迅速发展。1920年发明了无线电,1930年电视的出现,1980年的移动电话、1990年的全球定位系统的出现和现在的3G技术的发展,可以说无线通信领域有了日新月异的变化。

在无线移动通信的收发信机中,射频部分所处理的信号是宽动态范围的高频率模拟信号,而基带部分主要完成对频率较低的数字信号或模拟信号的处理。虽然从规模角度来讲,基带部分远比射频部分庞大和复杂,但是现代无线通信中的难点却是在射频部分。

射频设计之所以比较困难,主要是因为射频设计要求射频工程师必须具有较宽的知识面。射频工程师要了解诸如无线通信的各种调制机理、各种无线通信的标准和协议,具有关于随机信号、微波技术、电波传播、多址接入、模拟电路理论、数字电路理论、天线技术、控制理论等各方面的知识。而这些学科很多都发展了半个世纪以上,都是非常复杂的理论,要在短时间内掌握这么多知识是不太可能的,但是现代通信的飞速发展却要求射频工程师能

够把几个方面的知识融合起来,充分利用多个学科的优势,来设计射频部分。这样就带来了人才的高要求。

另一方面,随着移动通信的飞速发展,要求电路集成化程度越来越高,对于射频电路也是如此。但是与基带部分几乎可以全部采用成熟的数字集成电路相比,射频部分的集成电路还处于刚刚起步的状态,集成化程度相对较低,往往需要多个器件才能组成完整的电路,导致体积的增大。另外,由于射频部分器件的非线性、时变特性、电路的分布参数和不稳定性以及缺乏相应的准确模型,射频电路的计算机辅助工具发展也不成熟,利用这些 CAD 软件所得到的结果只能起到参考作用,所以射频电路的设计在很大程度上还取决于射频工程师的调测经验,缺乏系统的理论。

任何一个无线通信系统不管基带设计得多好,假如射频系统滞后,也会导致整个系统无法正常运行,可以说基带依赖于射频。所以综上所述,射频设计对于整个无线通信系统而言十分重要。

1.2 无线信道的特征

对于不同频段的无线电波而言,其传播方式和特点是不相同的。对工作于 VHF 和 UHF 频段的无线通信来说,电波主要是通过空间波来进行传播的,即直射波、反射波,还有传播路径中各种障碍物所产生的散射波。在陆地移动系统中,移动台常常处于城市的建筑群之中或处于地形复杂的区域,其天线会接收到从多条路径传来的信号,再加上移动台本身的运动,使得移动台和基站之间的无线信道异常复杂多变。

衰落是描述无线信道的一个主要特征,其一般是指信号电平随时间而随机起伏的现象。信号电平既有几秒钟内的快速变化,也有时间长达几小时的慢变化,所以根据衰落的时间长短以及程度不同,可以将衰落分为快衰落和慢衰落。快衰落持续时间很短,只有几秒,而慢衰落持续时间很长,长达几分钟甚至几小时。

由于信号衰落是随机的,所以人们不可能准确得到信号衰落的变化形式,只能根据信号随时间的变化来得出统计规律,同时采用诸如信号电平中值、衰落幅度(衰落深度)、衰落率、衰落持续时间等参数来说明信号的衰落统计特性,从而对信号的衰落进行相应的研究。

在实际信道中,由于反射体较多,因此接收的信号多由多个电波叠加而成。直射波、反射波或散射波在接收点可能会形成干涉场,从而导致信号发生深度并且快速的衰落。由于移动台的不断变化,电波传播路径上的地形、障碍物也是不断变化的,这种变化造成的衰落比多径效应所引起的快衰落要慢得多,所以被称为慢衰落。

前人对陆地无线信道的研究做了大量的工作。在建立无线信道模型时,对于快衰落,大都采用瑞利(Rayleigh)分布或莱斯(Rician)分布;而对于慢衰落,根据实测数据的结果均采用对数正态分布。

信号的衰落现象会严重影响到电波传播的可靠度及系统的可靠性,所以在设计系统的同时,必须充分考虑到衰落问题。

1.2.1 多普勒效应

在无线移动通信环境中,当移动台移向基站时,频率变高;远离基站时,频率变低,所

以在移动通信中要充分考虑多普勒 (Doppler) 效应。当然, 在日常生活中, 由于移动速度的局限, 不可能带来很大的频率偏移, 但是这不可否认地会给移动通信带来影响。为了避免这种影响造成通信中的问题, 人们不得不在技术上加以各种考虑, 这样也加大了移动通信的复杂性。由于移动台与周围的环境中许多反射体总是处于不断运动中, 因此所接收的信号往往会产生一些频率上的偏差, 我们称这种变化现象为多普勒效应, 这是任何波动过程都具有的普遍特性。

假设一部发射机与一部接收机之间存在着相对运动, 则根据多普勒效应原理, 接收机接收到的信号频率将与发射机发出的信号频率之间产生一个差值, 这个差值就是多普勒频移。

如果使用的是单路径接收, 则多普勒频移一般规定为

$$f_d = \frac{v}{c} f_c \cos \alpha \quad (1-1)$$

式中, v 为移动台的速度, c 是光速, f_c 为载频, α 为运动方向与发射机与接收机连线间的夹角。

在多径接收的情况下, 通过多条路径到达的接收信号常常由于 α 的不同, 会产生不同的多普勒频移, 导致接收频谱将会被展宽。假定入射角均匀分布, 则被展宽的功率密度谱可以通过如下公式计算得出:

$$P(f) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{f_d^2 - f^2}} \quad (1-2)$$

当 $|f_d| > |f|$ 时, 式 (1-2) 成立, 其中 f_d 为最高多普勒频移。

一般而言, 物体在进行高速运动时, 多普勒效应常常会导致快衰落, 而且移动的速度越快, 衰落变换频率越高, 衰落深度越深。

1.2.2 多径衰落

在移动通信系统中, 接收机通过发射天线发出一个信号, 在经过移动信道传播后, 到达移动台天线的信号通常不是来自单一路径, 而是由许多路径的众多反射波的合成。因为电波通过各个路径的距离以及发射点的反射系数不同, 所以各条路径来的反射波到达的时间和相位也都不一样。不同相位的多个信号在接收端叠加, 将会导致接收信号在时域、频域和空域上都将发生变化, 并且接收信号幅度将产生衰落。这种衰落是由于多径现象造成的, 所以被称为多径衰落。

由于反射体的分布是随机分布而且是随时间变化的, 因此存在着经过这些反射体多次散射和反射的多条传播路径。每条路径的特性均不同, 取决于各自的传播时延和传播系数。

以图 1-1 为例进行分析, 假设基站发射出来的信号为

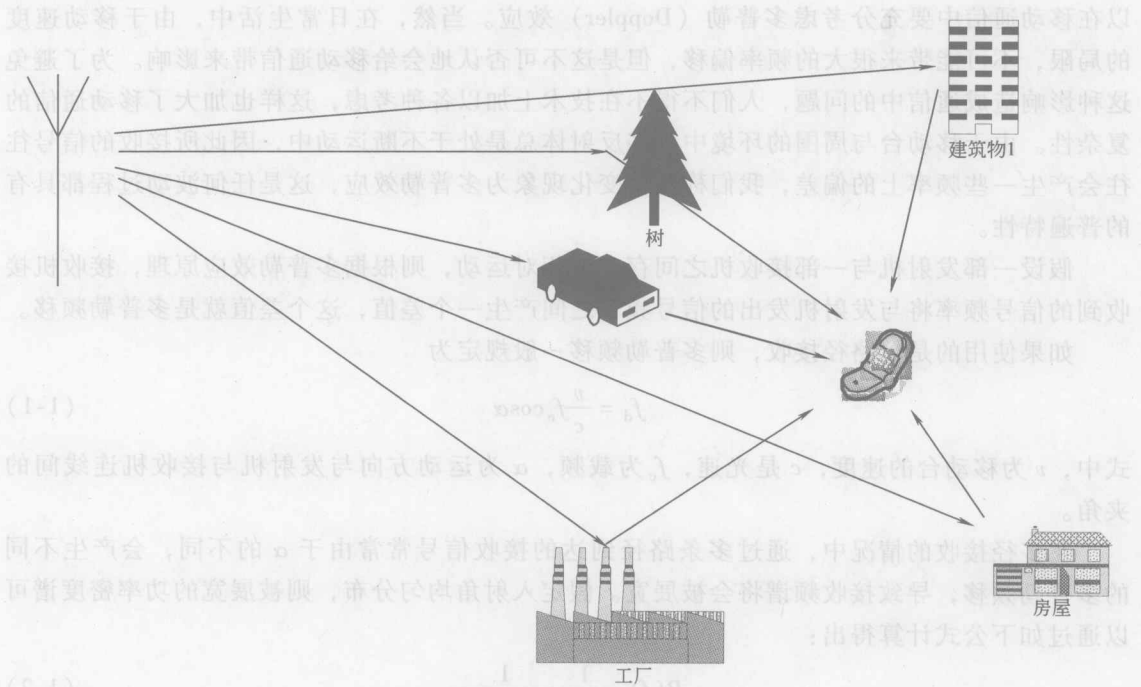
$$S_0(t) = A_0 \exp[j(\omega_0 t + \varphi_0)] \quad (1-3)$$

式中, ω_0 为载波角频率; φ_0 为载波的初相位。

经过反射和散射到达接收天线的第 i 个信号为 $S_i(t)$, 其振幅为 A_i , 相移为 φ_i , 则 $S_i(t)$ 为

$$S_i(t) = A_i \exp[j(\varphi_i + 2\pi f_i t)] \exp[j(\omega_0 t + \varphi_0)] = A_i \exp\left[j\left(\varphi_i + \frac{2\pi}{\lambda} v t \cos \theta_i\right)\right] \exp[j(\omega_0 t + \varphi_0)] \quad (1-4)$$

式中, f_i 为多普勒频移。

图 1-1 移动台接收 N 条路径信号示意图

假设 N 个信号的幅值和到达接收天线的方位角是随机的且满足统计独立, 则接收信号为

$$S(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t) \quad (1-5)$$

$$\psi_i = \varphi_i + \frac{2\pi}{\lambda} vt \cos \theta_i \quad (1-6)$$

$$x = \sum_{i=1}^N A_i \cos \psi_i = \sum_{i=1}^N x_i \quad (1-7)$$

$$y = \sum_{i=1}^N A_i \sin \psi_i = \sum_{i=1}^N y_i \quad (1-8)$$

则 $S(t)$ 可以写成

$$S(t) = (x + jy) \exp[j(\omega_0 t + \varphi_0)] \quad (1-9)$$

由于 x 和 y 都是独立随机变量之和, 根据概率的中心极限定理, 大量独立随机变量之和的分布趋向正态分布, 即概率密度函数为

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (1-10)$$

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \quad (1-11)$$

一般我们处理二维的概率密度函数时, 常采用极坐标系。此时, 接收天线处的信号振幅为 r , 相位为 θ , 则坐标系的转化如下:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (1-12)$$

$$\theta = \arctan \frac{y}{x} \quad (1-13)$$

则联合概率密度函数为

$$p(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (1-14)$$

对 θ 积分, 可以得到包络概率密度函数

$$p(r) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} d\theta = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad r \geq 0 \quad (1-15)$$

同理, 对 r 积分可求得相位概率密度

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{\infty} r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr = 2\pi \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (1-16)$$

由式 (1-16) 可知, 多径衰落的信号包络服从瑞利分布, 故把这种多径衰落称为瑞利衰落。

发生瑞利衰落通常必须具有以下的条件: 各分量应具有随机相位和近似相等的功率, 相位在 $0 \sim 2\pi$ 内随机均匀分布以及信号至少有 5 条以上路径。

瑞利分布有如下的特征:

均值 $m = E(r) = \int_0^{\infty} r p(r) dr = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma = 1.253\sigma \quad (1-17)$

方均值 $E(r^2) = \int_0^{\infty} r^2 p(r) dr = 2\sigma^2 \quad (1-18)$

瑞利分布的概率密度函数 $p(r)$ 与 r 的关系如图 1-2 所示。

当 $r = \sigma$ 时, $p(r)$ 为最大值, 表示 r 在 σ 值出现的可能性最大, 不难求得这时的概率为

$$p(r) = \frac{1}{\sigma} \exp(-0.5) \quad (1-19)$$

当 $r = \sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 1.177\sigma$ 时, 有

$$\int_0^{1.177\sigma} p(r) dr = \frac{1}{2} \quad (1-20)$$

式 (1-20) 表明, 衰落信号的包络中有 50% 概率大于 1.177σ 。这里的概率是指任意一个足够长的观察时间内, 有 50% 时间信号包络大于 1.177σ 。因此, 1.177σ 常称为包络 r 的中值, 记作 r_{mid} 。

信号包络低于 σ 的概率为

$$\int_0^{\sigma} p(r) dr = 1 - e^{-\frac{1}{2}} = 0.39 \quad (1-21)$$

同理, 信号包络 r 低于某一指定值 $k\sigma$ 的概率为

$$\int_0^{k\sigma} p(r) dr = 1 - e^{-\frac{k^2}{2}} \quad (1-22)$$

此外, 还有可能发生莱斯分布, 它发生的条件是有一条强的直达路径起主导作用。

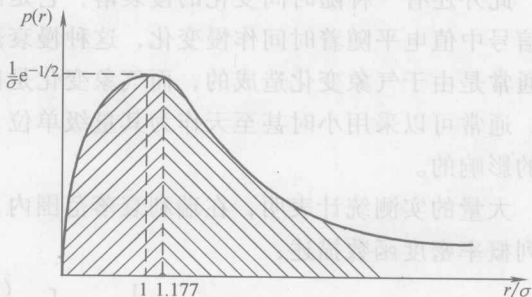


图 1-2 瑞利分布的概率密度

其信号的幅度概率密度函数为

$$p(x) = x \frac{1+K}{\sigma_0^2} \exp\left[-\frac{1+K}{2\sigma_0^2}x^2 - K\right] I_0\left[x \sqrt{\frac{2K(1+K)}{\sigma_0^2}}\right] \quad x \geq 0 \quad (1-23)$$

式中, x 为衰落信号的幅度; $K = A/(2\sigma_0^2)$ 为莱斯分布的衰落因子; A 为直达路径分量的功率; σ_0^2 为方差; $\sigma_0^2 = E(r^2)/2 = (1+K)\sigma_0^2$ 为接收信号的平均功率; $I_0[y]$ 为改进第一类贝塞尔 (Bessel) 函数。

通过以上分析, 可以得出这样的结论: 随着 K 值的变大, 信号的衰落越来越小, 因此可以认为 K 参数决定了莱斯分布的衰落深度, 也就是说 K 值越大时, 信号中 LOS 分量或强路径分量的影响越大, 信号的衰落性能也越好。同时还可以得出另外一个结论: K 值对于衰落的影响主要表现在小值的情况下, 也就是 K 值较小时, K 值变化所产生的影响较大。随着 K 值的增加, 信号衰落改善的幅度越来越小。

1.2.3 慢衰落特性

在移动信道中, 通过大量统计测试可以得出这样的结论: 慢衰落是由于通信过程中周围地形、地物对信号反射, 导致信号电平在传输几十米范围内具有大幅度的变化, 并且在信号电平发生快衰落的同时, 其局部中值电平还会随着地点、时间以及移动台的移动速度作比较缓慢的变化, 其衰落周期以秒级计。若移动台在没有任何障碍物的环境下移动, 则信号电平只与发射机的距离有关。所以通常某点信号电平是指几十米范围内的平均信号电平, 这个信号的变化呈正态分布, 所谓对数正态分布, 是以分贝数表示的信号电平为正态分布, 其标准偏差根据地形、地物而不同, 通常其值在 6~8dB。

此外还有一种随时间变化的慢衰落, 它是由于大气折射率的平缓变化, 造成同一地点上的信号中值电平随着时间作慢变化, 这种慢衰落是服从对数正态分布的。不过由于这种慢衰落通常是由于气象变化造成的, 而气象变化是比较缓慢的, 所以其衰落变化的速度往往比较慢, 通常可以采用小时甚至天作为其量级单位, 因此通常在设计中是不考虑这种慢衰落对通信的影响的。

大量的实测统计表明, 在瑞利衰落范围内, 平均的接收功率也服从对数正态分布, 并由下列概率密度函数描述:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad x > 0 \quad (1-24)$$

$$p(x) = 0 \quad x \leq 0 \quad (1-25)$$

式中, x 为随机变量, 表示信号电平的慢扰动; μ 和 σ 分别为 x 的均值和标准方差, 用 dB 表示。

1.2.4 传输失真

一般在电波经过媒介时, 由于媒介特性的原因, 不仅会产生传输损耗, 而且还会产生传输失真。对于数字信号来说, 会使误码率上升; 对于模拟信号而言, 则会产生振幅失真以及相位失真, 甚至导致信号的畸变, 信号逼真度下降。通常产生传输失真的原因有两点: 随机多径效应和媒介的色散效应。

色散效应是指由于传输的各种电波频率上的不同,导致媒介中电波传播速度不同,进一步引起信号失真。有用信息的电波信号通常占据一定的频带,那么当电波通过媒介传播到达接收点时,由于频带内各频率成分的传播速度不同,因而不能保持原有信号中的相位关系,从而引起波形失真。具有色散效应的媒介被称为色散媒介,通常需要结合具体信道传播情况,来确定色散效应所引起的信号畸变程度。

多径传输同样会引起信号畸变。当电波从两个或两个以上的不同长度的路径传播到达接收点时,接收到的信号是由几个不同路径上传来信号的叠加。由于传播路径长度的不同,信号在到达接收点时的时间延迟(时延)是不同的。定义最大的传输时延与最小传输时延的差值称为多径时延,以 τ 表示。通常过大的 τ 值,会引起较为明显的信号失真。

以电波传播中的两条路径传输为例,接收点场强是由两条路径传来的振幅不等、相位差 $\varphi = \omega\tau$ 的两个场强的叠加。对于传输信号中的各个频率分量而言,相同的 τ 值却引起了不同的相位差,例如频率为 f_1 的分量,若 $\varphi_1 = \omega_1\tau = \pi$ 时,两条路径传来的 f_1 分量的合成场强呈最小值;对于 f_2 分量, $\varphi_2 = \omega_2\tau = 2\pi$ 时,则此分量的合成场强呈最大值,其余各频率情况依次类推,如图1-3所示。 f_1 和 f_2 是两个相邻的、合成场强为最小值的频率,它们之间相位差等于 2π ,即

$$\varphi_3 - \varphi_1 = (\omega_3 - \omega_1)\tau = 2\pi \quad (1-26)$$

$$\text{则} \quad \Delta\omega = \omega_3 - \omega_1 = \frac{2\pi}{\tau} \quad (1-27)$$

$$\Delta f = \frac{1}{\tau} \quad (1-28)$$

通常称式(1-28)中的 Δf 为多径传输媒介的相关带宽,它与多径时延的 τ 值成反比。显然,若所传输的信号带宽很宽,与 $1/\tau$ 可以比拟时,则所传输的信号波形将产生明显的畸变。从另一个角度来看,多径效应对传输信号的带宽提出一定的要求,信号带宽越窄,越不容易产生信号畸变。

实际上,多径传输路径不只有两条。若传输媒介的电参数是随机变化的,那么多径时延也是随机变化的,从而其形成的合场强也是随频率的变化而随机变化的,即传输媒介对不同频率成分有着不同的、随机的响应,这种现象就是选择性衰落。

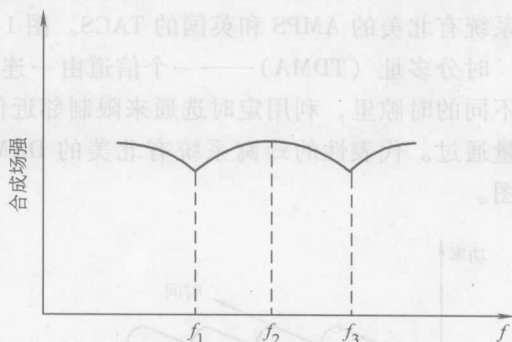


图1-3 合成场强示意图

1.3 无线通信系统的组成

所谓通信是指信息从发送端传送到接收端的过程,实现这一信息传输过程的系统称为通信系统。图1-4表示一个典型的无线通信系统的组成。

1.3.1 无线系统的接入方式

无线通信系统必须尽可能有效地利用分配的频率。由于频率资源是有限的,将有限的资

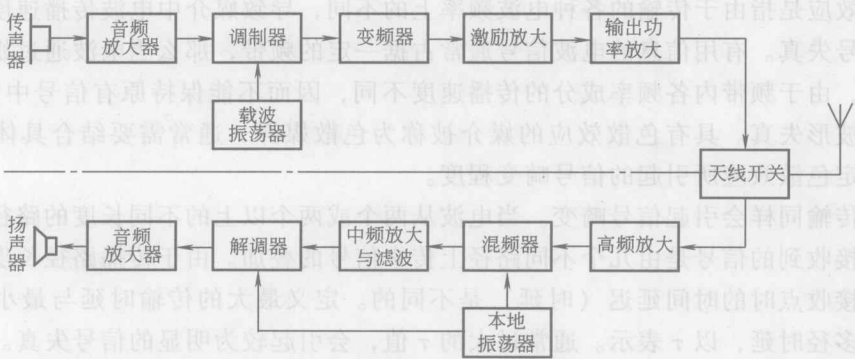


图 1-4 典型的无线通信系统

源为更多的移动用户服务是移动通信技术不断更新发展的主题。移动通信系统正在采用或研制多种多址方式。

多址方式的基本类型有频分多址 (FDMA)、时分多址 (TDMA) 和码分多址 (CDMA)。实际中也常用到 3 种基本多址方式的混合多址方式, 如频分多址/时分多址 (FDMA/TDMA)、频分多址/码分多址 (FDMA/CDMA)、时分多址/码分多址 (TDMA/CDMA) 等。

频分多址 (FDMA)——在频域中一个相对窄带信道里, 信号功率被集中起来传输, 不同信号被分配到不同频率的信道里, 发往和来自邻近信道的干扰采用带通滤波器进行限制, 这样在规定的窄带里只能通过有用信号的能量, 而其他频率的信号被排斥在外。代表性的蜂窝系统有北美的 AMPS 和英国的 TACS。图 1-5 所示为 FDMA 的示意图。

时分多址 (TDMA)——一个信道由一连串周期性的时隙构成, 不同信号的能量被分配到不同的时隙里, 利用定时选通来限制邻近信道的干扰, 从而只让在规定时隙中有用的信号能量通过。代表性的蜂窝系统有北美的 DAMPS 和欧洲的 GSM。图 1-6 所示为 TDMA 的示意图。

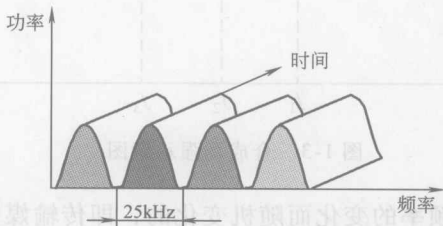


图 1-5 FDMA 示意图

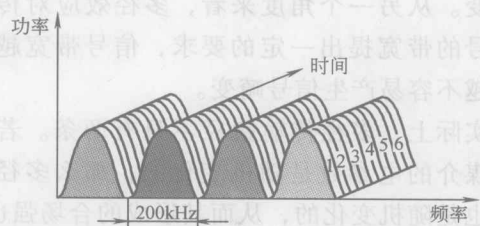


图 1-6 TDMA 的示意图

码分多址 (CDMA)——每一个信号被分配到一个伪随机二进制序列进行扩频, 不同信号的能量被分配到不同的伪随机序列里。在接收机里, 信号用相关器加以分离, 这种相关器只接收选定的二进制序列并压缩其频谱, 凡不符合该用户二进制序列的信号就不被压缩带宽, 结果只有有用信号的信息才被识别和提取出来。代

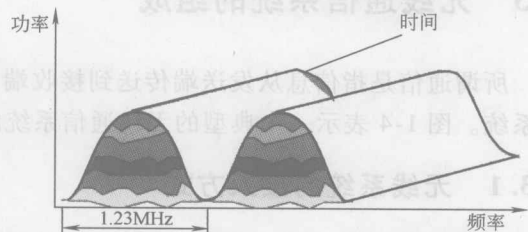


图 1-7 CDMA 的示意图

表性的蜂窝系统有北美的 QCDMA 和欧洲爱立信的 BCDMA。图 1-7 所示为 CDMA 的示意图。

SDMA 即在相同时隙、相同频率或相同地址码的情况下,可以根据信号不同的中间传播路径来区分。SDMA 是一种信道增容方式,例如空分-码分多址(SD-CDMA)。波束形成天线采用智能天线,基站的智能天线形成多个波束覆盖整个小区,智能天线可定位于每个无线终端。图 1-8 所示为 SDMA 示意图。

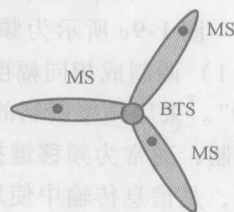


图 1-8 SDMA 示意图

1.3.2 无线系统的调制方式

在通信系统中,一般要进行调制和解调的变换。

调制是对信号源的编码信息进行处理,使其变为适合传输的形式,即把基带信号(信源)转变为一个相对基带频率而言频率非常高的带通信号。带通信号叫做已调信号,而基带信号叫做调制信号。调制可以通过使高频载波随信号幅度的变化而改变载波的幅度、相位或频率来实现。

解调则是将基带信号从载波中提取出来,以便预定的接收者(信宿)能够处理和理解的过程。

调制和解调的目的主要有三点。第一是为了将信号有效地用电磁波辐射出去。根据天线理论,为了将信号的能量有效地辐射到空间,必须要求天线的长度和信号的波长可以比拟(例如至少天线长度为信号波长的 $1/10$)。一般来说,基带信号是低频信号,通常包括零频附近的分量。以话音信号为例,一般人声的频率在 $300 \sim 3400\text{Hz}$ 之间,如果将话音信号直接辐射出去,这就要求天线长度达到 300km 以上,这是不现实的。因此为了有效利用天线,必须将发射信号的频率搬移到高频,这是因为电磁波的波长和频率成反比,频率越高,波长越小,这样可以有效地将天线长度缩小。这就是利用调制技术来实现频谱的搬移,搬移所利用的是由发射机中高频振荡器产生的高频信号,这个信号被称为载波。但是载波并不携带任何信息,其作用只是用基带信号去控制高频载波的某个参数使其携带信息。

采用调制的第二个原因是为了有效利用频谱。一般要传送的基带信号的频率范围都差不多,如果将每个基带信号都辐射出去,肯定会互相干扰,使接收机无法正常工作。只有将不同的基带信号调制到不同频率的载波上,变成中心频率不同的频带信号,才能够正常进行接收,抑制其余不需要的信号和干扰。而且已调信号的频谱一般主瓣要窄,同时副瓣的幅度要低,这样可以保证较高的频带利用率。

第三个原因是移动通信信道的噪声和干扰影响很大,这是由移动通信的电磁环境所决定的,特别是还存在多径衰落,可以说移动通信信道的环境是比较恶劣的。针对移动通信信道的特点,所传输的信号应该具有较强的抗干扰、抗衰落的能力,而基带信号是不具有这样的特点的。但是经过调制的信号可以具有高的抗干扰和抗多径性能,这样就能够在此类恶劣的信道环境下进行正常通信,而且经过解调后的信号通常输出信噪比(S/N)较大或误码率较低。

按照调制器输入形式,调制可分为模拟调制(连续调制)和数字调制。模拟调制是利用输入的模拟信号直接调制载波的振幅、频率或相位,使其具有所需传输的信息,调制后的信号分别称为调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)信号。数字调制是利用数字信号来控制载波的振幅、频率或相位。常用的数字调制有频移键控调制(FSK)、相移键控调制(PSK)、正交振幅调制(QAM)等。

图 1-9b 所示为幅度调制。幅度调制 (Amplitude Modulation) 是将不同的数据信息 (0 和 1) 调制成不同幅度但相同频率的载波信号。例如, 高幅值信号表示“1”, 低幅值信号表示“0”。采用幅度调制的 AM 无线电广播频段为 550 ~ 1600kHz。

图 1-9c 所示为频率调制。频率调制 (Frequency Modulation) 是将不同的数据信息 (0 和 1) 调制成相同幅度但不同频率的载波信号。例如, 高频信号表示“1”, 低频信号表示“0”。采用频率调制的 FM 无线电广播频段为 88 ~ 108MHz。在数字通信中, 也可以采用频率调制, 通常为频移键控 (Frequency-Shift Keying, FSK), 就是用数字信号去调制载波的频率, 是信息传输中使用得较早的一种调制方式。它的主要优点是实现起来较容易, 抗噪声与抗衰减的性能较好, 在中低速数据传输中得到了广泛的应用。

图 1-9d 所示为相位调制。相位调制 (Phase Modulation) 是利用相邻载波信号的相位变化值来表示相邻信号是否具有相同的数据信息值, 此时的幅度和频率均保持不变。例如, 发生相位变化表示“1”, 否则表示“0”。在数字通信中, 常采用此调制方式。在 CDMA 中, 调制技术就为正交相移键控 (QPSK)。

一个 I/Q 调制器允许任何一种参数来进行信号的调制, 如幅度、频率、相位等。如图 1-9e 所示, 相位和幅度都作为调制方式。利用多个参数来表示一个状态就可以传输多个比特的数据。信号的幅度和相位可以通过将信号分成 I 信道和 Q 信道来进行调制。产生 I 路信号和 Q 路信号后, 信号就可以分别与相同频率的本振进行混频, 而这两个本振有 90° 的相位差。而这种 I/Q 调制器常被用来产生固定相位差的调制, 像 GMSK; 或者相位调制, 如 QPSK。

通过幅度调制和频率调制来发送数据只需要很简单的硬件

电路, 但是由于频谱资源的有限, 这两种调制方式并不高效。更加复杂的数字调制技术, 如 16QAM, 虽然增加了硬件的复杂度, 但是它节省了频谱资源, 可以更加高效地利用频谱。由于数字调制具有很多模拟调制所不具有的优势, 所以在现今无线系统中, 常采用数字调制。

下面主要介绍常用的数字调制技术。

1. QPSK 和 OQPSK

正交相移键控调制 (QPSK) 和交错正交相移键控 (OQPSK) 是最基本的数字调制方式, 常常需要在发射端具有 I/Q 调制器, 在接收端具有 I/Q 解调器。CDMA 系统常使用这两种调制方式。

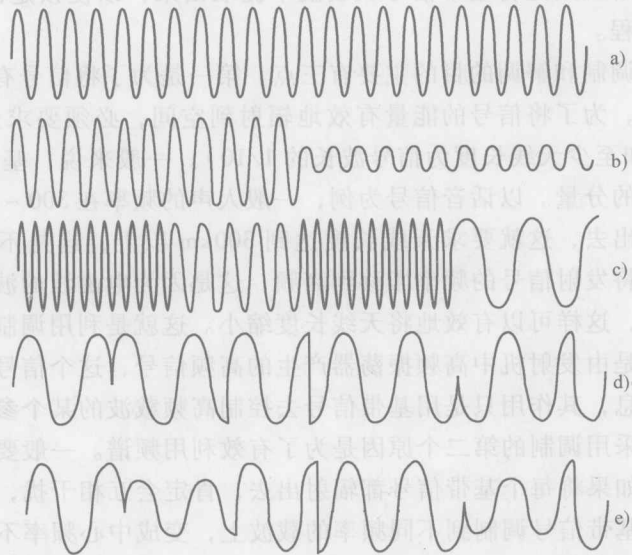


图 1-9 调制方式示意图

a) 原始信号 b) 幅度调制 c) 频率调制 d) 相位调制 e) I/Q

利用 QPSK, 载波可以承载 4 种不同的相移 (4 个码片), 每个码片又代表 2 个二进制字节。初看这似乎毫无意义, 但现在这种调制方式却使同一载波能传送 2bit 的信息而非原来的 1bit, 从而使载波的频带利用率提高了 1 倍。

如果数据的速率为 $1/T$ bit/s, 那么将其分为 2 个数据流输入到调制器。这里有 4 个相位状态: $+45^\circ$, $+135^\circ$, -45° , -135° 。在 I/Q 星座图上, 每个状态都间隔 90° 。每个状态都代表着 2 个数据比特。图 1-10 所示为典型的 QPSK 电路, 图 1-11 所示为 QPSK 的星座图, 图 1-12 所示为 QPSK 的功率谱密度。

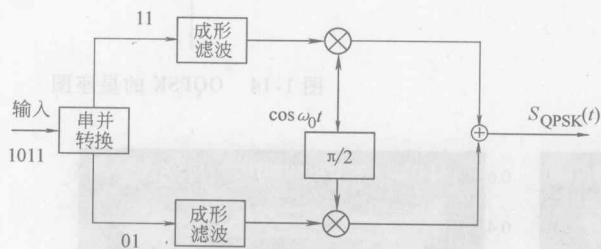


图 1-10 典型的 QPSK 电路

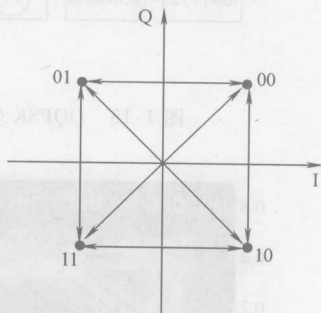


图 1-11 QPSK 的星座图

QPSK 信号的幅度是恒定的, 然而当 QPSK 进行波形成形时, 由于实际信道是带限的, 要经过带通滤波器滤波, 所以限带后的 QPSK 将失去恒包络的性质, 并且偶尔发生的 180° 的相移, 会导致信号的包络在瞬时时间通过零点, 反映在频谱方面, 会出现边瓣和频谱加宽的现象。为了防止旁瓣再生和频谱扩展, 必须使用效率较低的线性放大器放大 QPSK 信号。QPSK 对放大器线性度敏感, 交错 QPSK (OQPSK) 对出现旁瓣和频谱加宽等有害现象不敏感, 可以得到效率高的放大。

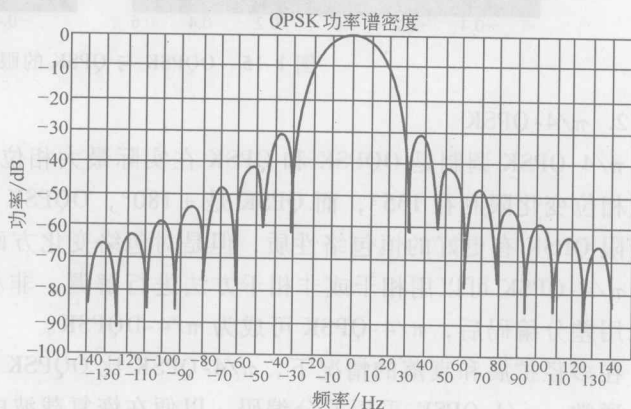


图 1-12 QPSK 的功率谱密度

QPSK 由于两个信道上的数据沿对齐, 所以在码元转换点上, 当两个信道上只有一路数据改变

极性时, QPSK 信号的相位将发生 90° 突变; 当两个信道上数据同时改变极性时, QPSK 信号的相位将发生 180° 突变。

OQPSK 信号产生时, 是将输入数据经数据分路器分成奇偶两路, 并使其在时间上相互错开一个码元间隔, 然后再对两个正交的载波进行 BPSK 调制, 叠加成为 OQPSK 信号。

图 1-13 所示为 OQPSK 的生成电路, 图 1-14 所示为 OQPSK 的星座图。

由图 1-15 可以清楚地看出 OQPSK 不会发生 180° 的相位变化。