

无线电信号 频谱分析

◆ 徐明远 陈德章 冯 云 编著



科学出版社

www.sciencep.com

无线电信号频谱分析

徐明远 陈德章 冯 云 编著

李 霖 李 玲 唐 皓 参编
王庆平 和丽芳 李 辉



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从原理、仪表测量、计算机仿真三方面对无线电信号的频谱特征进行了分析讨论。主要介绍了影响无线电信号频谱的因素,常用模拟、数字调制方式及频谱,常用发送滤波器及对无线电信号频谱的影响,常见的无线电广播通信系统频谱特性;对产生各种无线电干扰的机理进行了计算机仿真分析;简要介绍了计算机仿真的思想、方法。

书中提供的仪表测量以及仿真频谱图可供相关技术人员参考。本书可以作为培训教材,也可以作为工具书。

图书在版编目(CIP)数据

无线电信号频谱分析 / 徐明远, 陈德章, 冯云编著. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021124-8

I. 无… II. ①徐…②陈…③冯… III. 无线电信号-频谱分析

IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 027387 号

责任编辑: 余 江 潘继敏 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 4 月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—3 000 字数: 348 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈明辉〉)

序 言

我国的无线电管理事业是一个年轻的事业。说它年轻,不仅是因为无线电管理部门作为政府机构的设立时间还不到 25 年,还因为到目前为止,无线电管理还没有一套完整、成熟的理论和方法。

20 世纪 90 年代以来,在全世界范围内,无线电业务呈现出了前所未有的巨大发展,其应用深入到了经济和社会生活的各个领域。无线电业务在我国的应用总体上是和世界同步的,但有不同的特点。与其他国家相同的是无线电业务在我国的发展首先受技术进步的推动。但有很大不同的是,由于我国正在经历从计划经济体制向市场经济体制的转变,无线电业务也从国有国营转为向市场开放。另外,加入世界贸易组织,使我国的无线电管理正在经历着和国际接轨的过程。所有这些,对我国年轻的无线电管理事业提出了全新的要求,也可以说,无线电管理部门正面临着尖锐的挑战。

本书是试图回应这个挑战的一种努力。

无线电管理的核心是无线电频谱资源的管理。然而,只有通过无线电信号频谱分析,才能够使无线电频谱成为可以把握的,并进而成为产权意义上的资源。也就是说,资源管理所需要明确规范的所有权、使用权和收益权问题,在无线电频谱资源领域需要先有度量。这是无线电频谱资源管理的基础和前提。

本书作为一本专业性很强的书籍,集中探讨了与无线电监测和无线电设备检测密切相关的无线电信号频谱分析。对无线电管理来说,做的是极有价值的基础工作。对于正在发展的中国无线电管理事业来说,需要从基础积累,逐渐达到科学、有效管理的境界。

云南省无线电管理委员会办公室主任

吴 洪

2007 年 10 月

前 言

无线电技术问世以来一百多年的时间,经历了突飞猛进的发展。从最初的无线电报、短波通信、中波广播,一直到近代的移动通信、宽带接入、无线局域网、第三代移动通信系统等,已经深深地进入了人们的社会、经济、军事、生产、生活之中。无线电技术从根本上改变了人们的生活方式、生产方式、价值观念。特别是近代计算机技术、有线通信技术的飞速发展,三种技术的互相渗透、融合更是开辟了许多新的应用领域。13 亿人口的我国,无线通信设备已有近四亿之多。现在很难想象,没有卫星电视、移动通信、无线广播的现代社会是什么样子。

无线电技术、无线电通信如此重要,作为人类宝贵的、共同的无线电频谱资源的重要性日益被人们所重视。就像进入汽车时代以来,人们对道路建设的建设与管理的重要性越来越重视一样。

将无线电频谱资源科学、充分、有效的利用,是若干代从事无线电技术、设备、系统研究、开发、生产、监测、管理的人们一直不懈努力的目标。特别是近十多年来无线电新技术层出不穷,无线电新设备日新月异,新的系统设备与用户的拥有量快速发展。为了在无线电通信领域建立和谐发展的环境,保障社会、经济、生活的正常秩序,认真研究作为在地球这个公共的空间里进行通信的相同的媒介,无线电信号及其频谱的相关特性就十分必要。无线电信号的频谱分析研究不算新的课题,但是应用新的方法和手段,并且较为全面地分析现有无线电信号和系统的频谱的工具书却不多见。

本书由下列内容组成:

第一部分:基础知识。介绍了影响无线电信号频谱的因素;5 种模拟调制方式及频谱;18 种数字调制方式及频谱;3 种发送滤波器、频谱仪的原理及使用的相关知识。

第二部分:常见的 31 种无线电广播通信系统简介及频谱特性。

第三部分:无线电干扰分析。讨论了无线电干扰产生的机理;无线电干扰分类。本书从下面三个方面进行分析和讨论:

第一方面,简要介绍必要的背景,基本理论的相关知识、主要参数。

第二方面,显示应用频谱仪实际测量信号的频谱。

第三方面,应用计算机仿真的方法,从基本理论出发建立模型,进行仿真试验得出频谱图。实践证明,实测与仿真的结果高度吻合,说明方法是正确的,同时也提示,特别是对较难以测量或者不常出现的现象,各种需要研究的信号可以方便地用计算机仿真的方法再现并进行分析研究。

在上述工作基础上,进行必要的分析讨论。通过理论、实测、理论实践相结合的计算机仿真试验,加深对相关问题的理解与内在规律的认识。

第四部分:仿真技术的应用、意义及要点。

本书是云南省无线电监测中心与昆明理工大学合作的“无线电信号频谱分析”课题项目成果。该课题自始至终得到了云南省无线电管理委员会办公室领导的关心、指导和支持,还得到了云南省无线电管理委员会办公室无线电管理处、无线电稽查处的支持和帮助。在这里,要特别感谢吴洪、马丽萍、令狐昌兵、金肇元、段洪、顾延宽、赵东风等专家和顾问的指导,对所有参与和给予指导的有关同志深表感谢。

书中如有错谬之处,恳请读者批评指正。

目 录

序言

前言

第一篇 基础知识

第 1 章 无线电信号的频域、时域与相位域特性	1
1.1 基带信号的频谱	1
1.2 不同符号速率的基带信号调制后的频谱	4
1.3 调制的影响	8
1.4 发送滤波器的影响	8
1.5 基带调制与频带调制信号	10
1.6 时域特性	11
1.7 相位域特性	13
第 2 章 模拟调制信号的频谱	19
2.1 调幅 AM	19
2.2 调频 FM	26
2.3 调相 PM	34
第 3 章 数字调制信号的频谱	38
3.1 二进制幅度键控	38
3.2 二进制频移键控	41
3.3 二进制相移键控	43
3.4 四相相移键控	45
3.5 $\pi/4$ 差分四相移相键控	47
3.6 多进制相移键控——8PSK	49
3.7 M 进制正交振幅调制(MQAM)	51
第 4 章 FSK 不同频率偏移频谱图	58
4.1 原理简述	58
4.2 FSK 不同频率间隔的信号频谱	59
4.3 4FSK 原理简述	63
4.4 4FSK 不同频率间隔的信号频谱	63
第 5 章 连续相位调制	67
5.1 原理简介	67

5.2	MSK 调制	68
5.3	CPM 调制	70
5.4	CPFSK 调制	75
第 6 章	发送滤波器	90
6.1	GMSK 不同 BT (系数)的频谱	90
6.2	升余弦滤波器滚降系数的影响	96
6.3	平方根升余弦滤波器	105
第 7 章	新调制方式	113
7.1	直接扩频	113
7.2	跳频	118
7.3	OFDM 正交频分多址	121
第 8 章	频谱仪的使用及注意事项	127
8.1	无线电测试环境	127
8.2	频谱仪原理简介	127
8.3	频谱仪注意事项	130

第二篇 常见无线电通信系统及频谱

第 1 章	广播系统	135
1.1	调幅广播	135
1.2	调频立体声广播	136
1.3	TV 电视信号	140
1.4	数字电视信号频谱	142
第 2 章	模拟通信系统	146
2.1	SSB 短波单边带	146
2.2	民航地空通信系统	147
2.3	FM 调频通信系统	149
第 3 章	公众无绳电话系统	153
3.1	CT2 无绳电话的第二代	153
3.2	DECT 数字增强型无绳通信标准	154
3.3	PHS 小灵通	156
第 4 章	公众通信系统	160
4.1	GSM 全球通	160
4.2	CDPD 蜂窝数字分组数据网	165
4.3	NADC 北美数字蜂窝网	167
4.4	PDC 个人数字蜂窝电话	168
4.5	CDMA-95 码分多址通信系统	169

4.6	WCDMA 码分多址通信系统	171
4.7	CDMA2000 码分多址通信系统	173
4.8	TD-SCDMA 码分多址通信系统	174
第 5 章	卫星通信系统	177
5.1	IRIDIUM 铱星系统	177
5.2	ICO 中轨道卫星通信系统	178
5.3	甚小孔径终端卫星系统	183
第 6 章	专用通信系统	185
6.1	集群通信系统	185
6.2	APCO 数字集群通信系统	187
6.3	TETRA 欧洲数字集群通信系统	190
6.4	TFTS 地面航空电信系统	192
第 7 章	无线接入系统	193
7.1	Bluetooth 蓝牙	193
7.2	无线局域网 802.11 标准协议族	195
7.3	PWT 个人无线技术	197
7.4	本地多点分布业务系统	198
7.5	多点多路分布业务系统	201
第 8 章	特种无线电应用系统	203
8.1	GPS 全球卫星定位系统	203
8.2	雷达系统	205

第三篇 无线电干扰分析

第 1 章	噪声干扰	215
1.1	关于噪声干扰	215
1.2	加性高斯噪声环境下通信系统的传输特性	221
第 2 章	非线性电路对信号的影响	225
2.1	限幅的影响	225
2.2	非线性电路的影响	226
第 3 章	同频干扰	231
3.1	同频干扰	231
3.2	同频干扰仿真试验研究	232
第 4 章	邻道干扰	235
4.1	邻道干扰的原因	235
4.2	模拟调制系统的邻道干扰	235
4.3	数字调制系统的邻道干扰	237

第 5 章 互调干扰	242
5.1 互调干扰的产生机理	242
5.2 互调干扰的计算机仿真	243
第 6 章 其他干扰	246
6.1 中频干扰	246
6.2 扩频系统的抗干扰性	248
第 7 章 抗干扰及电磁兼容	250
7.1 无线电干扰的分类	250
7.2 电磁兼容的必要性	250
7.3 实现电磁兼容的相关原则	251
7.4 本课题与实现电磁兼容的关系	251

第四篇 仿真技术的应用、意义及要点

第 1 章 关于仿真技术的应用	252
1.1 科学研究、产品研发与仿真试验.....	252
1.2 电子通信系统的建模与仿真	252
第 2 章 MATLAB/SIMULINK 简介	257
2.1 MATLAB 产生的过程	257
2.2 MATLAB 主要功能及特点	257
2.3 MATLAB 的使用	259
第 3 章 仿真技术的要点	262
3.1 关于工具箱	262
3.2 时间域的测量仪器	263
3.3 频率域的测量仪器	266
3.4 其他虚拟仪器	270
3.5 数字通信系统仿真示例	272
结束语	275
参考文献	276

第一篇 基础知识

无线电信号频谱涉及十分宽广的学科领域。在此仅讨论与无线电信号频谱监测与检测关系较密切的相关知识。

第1章 无线电信号的频域、时域与相位域特性

1.1 基带信号的频谱

无线电通信(或者广播等)系统的使命是将语音、图像、视频以及数字信号从发射端传输到接收端。通常这些信号需要进行调制及相关处理以后再以无线电信号的方式发射到空中。接收端将无线电信号经过解调及相关处理后还原为语音、图像、视频以及数字信号。在此我们面对两种信号:无线电信号以及原来的语音、图像、视频和数字信号。本书主要是讨论分析无线电信号。

从通信的角度观察,无论语音、图像、视频以及数字信号,除了具有各自的信号特征以外,在通信系统中都以基带信号的身份出现。它们都有自己的频谱特征(基带带宽是特征之一)。基带信号经调制后生成的无线电信号的频谱特性与基带信号的频谱特性有着密切的关联,有许多情况是基带频谱在频率轴上搬移的结果。而接收端的任务,是最大限度还原被传输基带信号的相关特性,包括频谱特性。

讨论基带信号的频谱,我们来关注国家标准 GB 12046—1989“无线电发射的标识及必要带宽的确定”中的名词术语的定义,可以使我们对“基带信号”和“基带带宽”有更为准确的理解。

(1) 基带信号。用一条线路或一个无线电传输系统传送一路信号或若干多路复用信号所占有的频带。无线电通信情况下,基带信号构成调制发射机的信号。

(2) 基带带宽。用一条线路或一个无线电传输系统传送一路信号或若干多路复用信号所占用的频带宽度。

基带信号分为两类:模拟信号和数字信号。

调幅广播、调频广播与通信系统(传输非数字信号)传输的信号都属于模拟信号。可以看作在基带带宽范围内的若干不同幅度、相位的正弦信号的合成。把上述信号进行傅里叶变换之后,就可以看到构成模拟信号的若干不同幅度、相位的正弦信号。因此我们首先认识正弦信号的频谱特性,进而推广为模拟信号的频谱特性。

下面讨论正弦波的频谱。

数学上求频率为 100Hz 的正弦信号的频谱是用傅里叶变换,积分是从负无穷到正无穷。正弦信号的频谱图是通过频率轴的 100Hz 点的直线,它的长度表示幅度大小。大家熟悉的正弦信号的表达式为

$$U(t) = A\sin(\omega t + \phi) \tag{1-1}$$

A (幅度)、 ω (角频率)、 ϕ (相角) 三个参数完全描述了信号的特征。应用频谱图,即横轴是频率,纵轴是幅度的频域图(也是频谱仪的显示窗),直观地显示了信号的两个重要的参数:幅度和频率。

工程实践中研究的都是有限长的正弦信号,因此它的频谱(线)有一定宽度,如图 1-1(a)、(b)所示。有限长正弦信号可以理解为在一定长度的时间窗内来观测,简称时窗。时窗越短,表现出来的频谱特性越宽。

图 1-1(a)显示了时间长度为 10 个周期的 100Hz 正弦信号的频谱仿真实验图,图 1-1(b)显示了时间长度为 50 个周期的 100Hz 正弦信号的频谱仿真实验图。

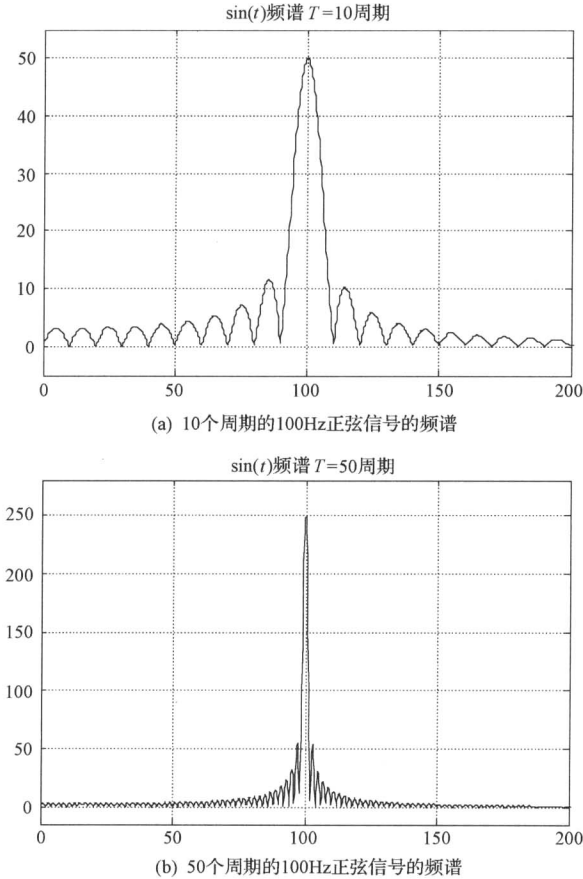


图 1-1

从信号分析的观点看,有限长度的正弦信号等于无限长正弦信号与相应宽度(时窗)的方波相乘。根据频率卷积定理,有限长度的正弦信号的频谱是:无限长正弦信号频谱与相应时窗宽度的方波频谱二者的卷积。即过频率轴的 100Hz 点的直线与图 1-2(b)形状的(方波频谱)图形的卷积。

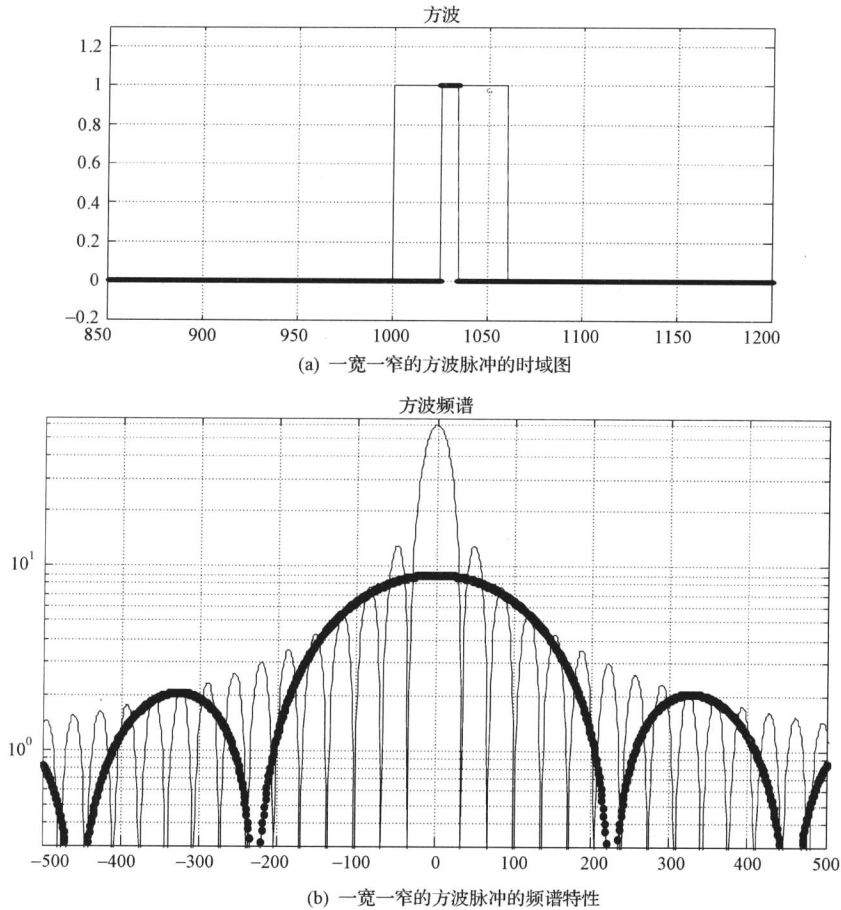


图 1-2

当正弦波的周期数足够大,此时的频谱图就接近时窗无限长的频谱,即一根位于 100Hz 处的垂直线段。因为无限长的正弦波的频谱就是位于频率轴频率为 100Hz 处的线段。

数字信号包括数字、数据信号以及数字化了的声音与图像信号。二进制与多进制的数字信号可以由不同宽度、幅度的序列方波信号组成。因此我们要认真研究方波的频谱特性。因为在此基础上,可以较为容易地延伸到对其他数字形式的无线电信号频谱的理解。

下面讨论方波信号的时域图及频谱图的特征。方波可表示为

$$g(t) = \begin{cases} A, & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (1-2)$$

方波的频谱可表示为

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} A e^{-j\omega t} dt = A\tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} \quad (1-3)$$

式中, A 为脉冲信号幅度, τ 为脉冲宽度。频谱图中 $B=1/\tau(\text{Hz})$ 以内为信号频率成分中幅度较大的部分, 如果忽略幅度较小的频率成分, 也可以近似地看成是信号的带宽。刚好是频谱图中的主瓣宽度的一半, 对应的主瓣谷点横坐标称为第一零谐振点。第一零谐振点到直流(横坐标的零点)之间的频率成分包含了信号的主要的能量。脉冲宽度(τ)越窄, 信号带宽就越宽。图 1-2(a) 的仿真实验中宽方波的宽度是窄方波的 7.5 倍, 它的第一零谐振点距 0(直流)点的距离是窄方波的频谱第一零谐振点距 0(直流)点的距离的 1/7.5。图 1-2(b) 中画出的方波的频谱图由方波频谱(右半边)与镜像(左半边)组成, 是方波信号求傅里叶变换的图形表达。上面两解析式的图形表达也可以得到相同的结果。频谱与镜像加起来带宽是实际带宽的 2 倍。

图 1-2 说明了高速数据通信情况下, 码元宽度窄, 所以需要较宽频带的信道, 才不至于因为高频率成分不能全部传输造成失真。

1.2 不同符号速率的基带信号调制后的频谱

现在, 已经占了通信系统较大比例的数字通信系统中, 基带信号就是以各种速率出现的码元, 可能是二进制或多进制的码元, 统称符号。各种符号都可以抽象为方波信号。在前面的例子中可以看出: 影响频谱宽度(频谱最重要的特征)的决定因素是方波的宽度, 而决定方波宽度的是符号的速率。因此, 符号速率是数字通信中重要的指标, 对信号的频谱特性有着决定性的影响。

图 1-3 至图 1-6 中的图(a)、(b)分别显示用 MATLAB 软件进行基带调制仿真及仪表测量(信号发生器与频谱仪进行测试, 载频 100MHz)的结果来观察符号速率对无线电信号频谱的影响。

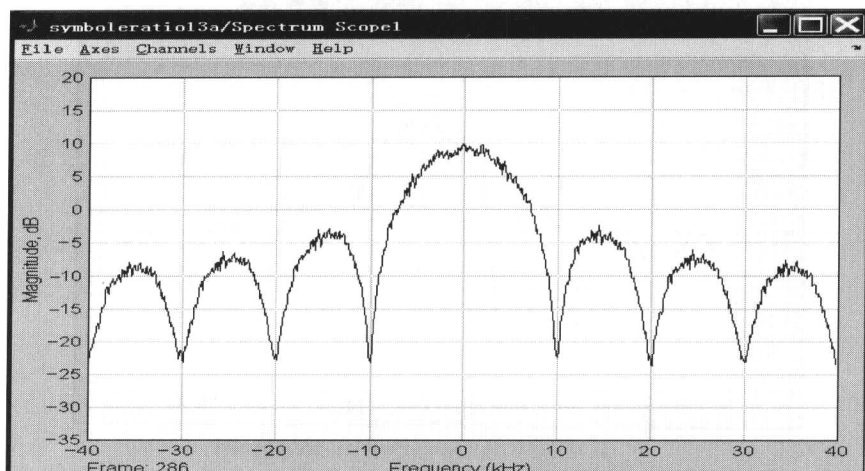
调制方式 $\pi/4$ DQPSK, 滤波器 rectangular (矩形, 即没有发送滤波器), 以符号速率分别为 10ksymbol/s、100ksymbol/s、1Msymbol/s、3Msymbol/s 四种符号速率作为基带信号进行调制。

测试环境如下:

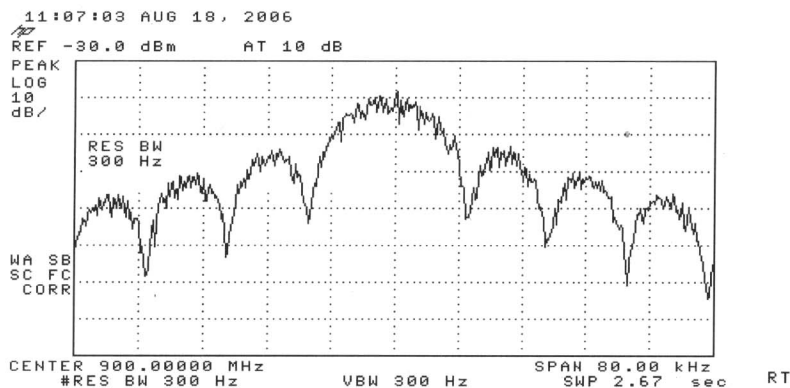
信号发生器 R&S 公司 SMIQ 06B 300kHz~6.4GHz

频谱仪 HP 公司 8593E 9kHz~22GHz

图 1-3 是符号速率为 10ksymbol/s 的调制信号的频谱。



(a) 符号速率10 ksymbol/s时仿真得到的频谱特性



(b) 符号速率10 ksymbol/s时仪器测量得到的频谱特性

图 1-3

仿真与实测试验表明：当符号速率为 10ksymbol/s 时，频谱的左右两个第四零谐振点之间的信号带宽刚好是 $2 \times 40\text{kHz}$ （频谱仪测量结果表明 SPAN 即频率窗宽度为 80kHz，二者吻合）。第一零谐振点处的信号带宽刚好是 10kHz。

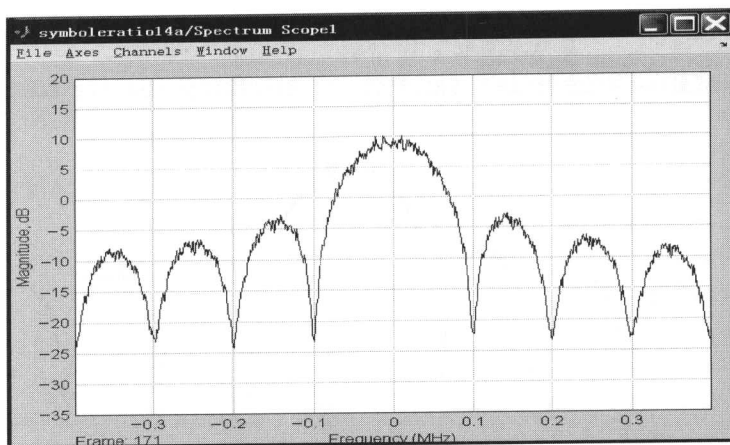
此外，当符号速率分别为 100ksymbol/s、1Msymbol/s、3Msymbol/s 时，频谱第一零谐振点处的信号带宽刚好是 100kHz、1MHz 和 3MHz。

图 1-4 是符号速率为 100ksymbol/s 的调制信号的频谱。

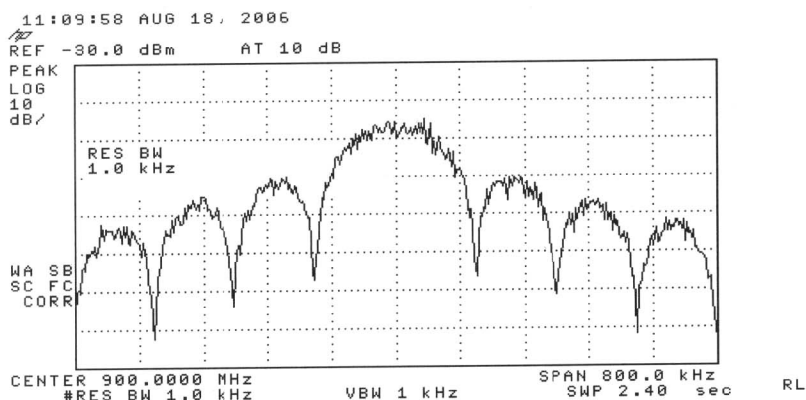
图 1-5 是符号速率为 1Msymbol/s 的调制信号的频谱。

图 1-6 是符号速率为 3Msymbol/s 的调制信号的频谱。

从吻合的很好的仿真与试验结果可以看出：具有方波形状的码元符号，经 $\pi/4$ DQPSK 调制后，具有与方波信号一样的频谱特性（方波的频谱与镜像）。

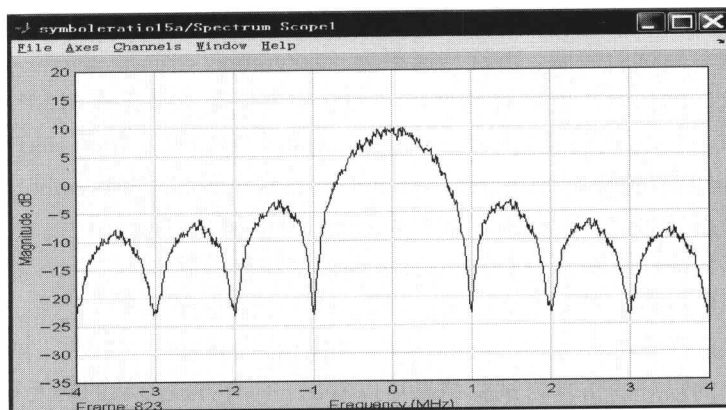


(a) 符号速率100ksymbol/s时仿真得到的频谱特性

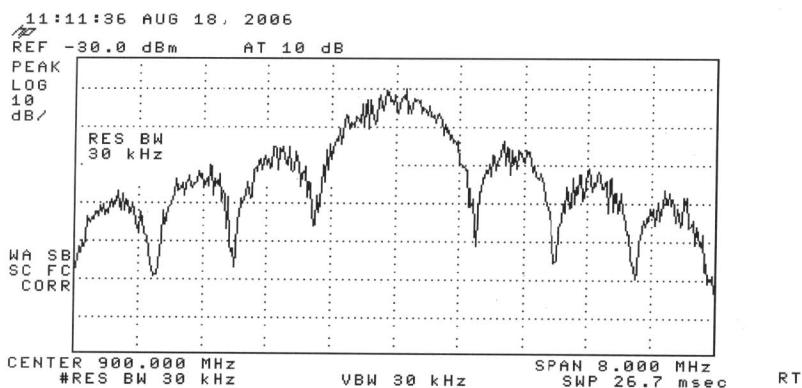


(b) 符号速率100ksymbol/s时仪器测量得到的频谱特性

图 1-4

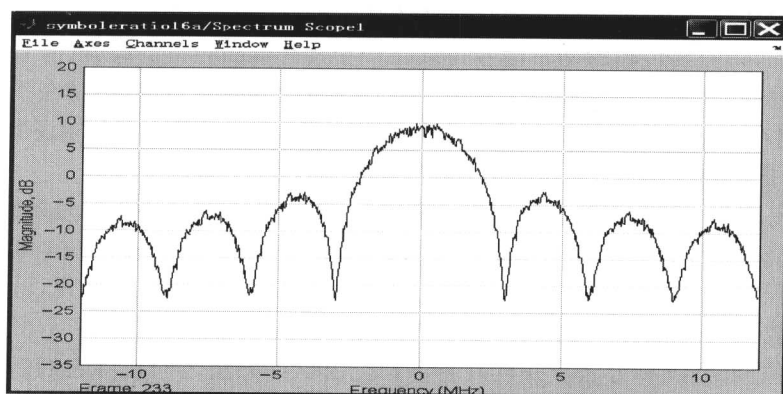


(a) 符号速率1Msymbol/s时仿真得到的频谱特性

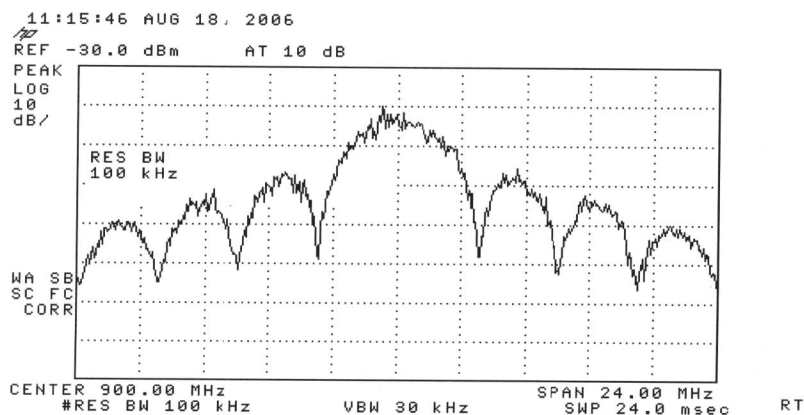


(b) 符号速率1Msymbol/s时仪器测量得到的频谱特性

图 1-5



(a) 符号速率3Msymbol/s时仿真得到的频谱特性



(b) 符号速率3Msymbol/s时仪器测量得到的频谱特性

图 1-6

理论与实践证明:BPSK、QPSK、MQAM (其中第一个 M 表示正交幅度调制的元数,以正整数表示。常见的有:16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、