

高等院校

电子信息应用型

规划教材

无线电通信设备测量

主 编 雷 斌 张旭东

副主编 吴宏钢 常思浩

主 审 芮润江



清华大学出版社

高等院校
电子信息应用型
规划教材

无线电通信设备测量

主 编 雷 斌 张旭东
副主编 吴宏钢 常思浩

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对现代通信技术发展和无线通信设备应用现状,从无线电通信工程测试应用的角度讲解了各频段无线电通信设备性能指标的测量方法,主要包括短波、微波接力、卫星设备、移动通信以及天线设备的性能指标测试方法及步骤。本书注重实践应用指导,具有理论讲解清晰,方法、步骤、过程描述精细的特点,既通俗易懂,又具有较强的理论指导性。

本书可指导和帮助通信工程技术人员掌握各类无线通信设备技术性能测试方法,既兼顾高层技术人才的学习,又兼顾院校教学、科研、实验技术及专业技术的教学,并可作为广大工程技术人员和科研人员的参考书籍。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

无线电通信设备测量/雷斌,张旭东主编. —北京:清华大学出版社,2014

高等院校电子信息应用型规划教材

ISBN 978-7-302-34608-1

I. ①无… II. ①雷…②张… III. ①无线电通信—通信设备—测量—高等学校—教材
IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第290890号



责任编辑:王剑乔

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘 静

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.75

字 数:315千字

版 次:2014年6月第1版

印 次:2014年6月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00元

产品编号:055663-01

本书编审人员

主 编 雷 斌 张旭东

副 主 编 吴宏钢 常思浩

主 审 芮润江

参编人员 李丹阳 叶奇睿 印世平 曹 亮

张继忠 赵有华 祝继兵 张 醒

张建新 许 勇 冯 雪 冉 旭

钟 鸣 杨 琳 陈善静

无线通信是以空间电磁波为载体传送信息的一种通信方式,构建无线通信时,不需要用线缆连接发信端和收信端,因而,在航天通信、海运渔业、个人移动通信及军用通信等方面,是其他通信方式不可替代的。同时,与其他通信方式相比,无线通信具有通信设备体积小、构建方便、操作使用灵活等突出特点,因而无线通信技术及多种多样的无线通信设备在国民经济的各个领域发挥着重要的作用。随着无线通信技术的发展和应用的普及,给无线通信测量技术也注入了新的活力,无线通信测量已成为研究无线电收发信机性能指标及其测量方法的一门重要学科。为了规范无线电收发信设备的检测手段,使广大通信技术人员及时掌握无线电通信设备主要技术指标和系统性能测试方法,以提高系统与网络的通信综合保障能力,组织编写了《无线电通信设备测量》一书。

本书共分7章,章节结构和主体内容设计主要由雷斌、张旭东完成。第1章介绍了无线通信基本知识,无线通信测量的地位、作用和技术发展趋势,由叶奇瑞、张建新、陈善静编写;第2章围绕普通收发信机各类电台设备技术指标测量,对测量条件和测量方法进行了详细的讲解,由常思浩、冯雪编写;第3章介绍了微波接力设备主要技术指标测量方法,由张继忠、赵有华编写;第4章围绕卫星通信系统的组成,介绍了卫星通信系统主要设备技术性能测试的常用方法,由曹亮、祝继兵、杨琳编写;第5章针对目前移动通信技术发展和应用实际,着重讲解了宽带码分多址(Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)终端射频一致性、微波存取全球互通(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)射频一致性、时分同步码分多址(Time Division Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)终端射频一致性、CDMA2000终端测试方法,并介绍长期演进(Long Term Evolution, LTE)系统测试,由印世平、张醒编写;第6章在介绍天线基本知识的基础上,对天线主要性能参数测量方法进行了讲解,由李丹阳、许勇编写;第7章针对分类电磁设

备应用环境,介绍了电磁兼容性测试的一般方法,由吴宏钢、钟鸣、冉旭编写。全书由芮润江主审。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免还有一些疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2014年2月

目 录

CONTENTS

第 1 章 无线通信测量基础

1.1	无线通信测量概述	1
1.2	无线通信系统	2
1.2.1	无线通信的基本概念	2
1.2.2	信号与通信系统概述	3
1.2.3	无线通信系统组成与电波传播	6
1.3	无线通信中的测量量值	9
1.3.1	相关量纲单位基础	9
1.3.2	电压 dB 与功率 dB 的区别	10
1.3.3	功率与电平	11
1.3.4	衰减和增益的计算	12
1.3.5	分贝与百分比之间的相互转化	12
1.3.6	dB 值的计算方法	14
1.3.7	dB_μV 、 $\text{dB}_\mu\text{V}_{\text{eff}}$ 与 dBm	15
1.4	无线通信系统中的测量参数	15
1.4.1	信噪比	16
1.4.2	噪声	16
1.4.3	噪声因子和噪声系数	17
1.4.4	相位噪声	17
1.4.5	S 参数	19
1.4.6	场强	20
1.4.7	天线增益	21
1.4.8	峰值因子	21
1.4.9	信道功率和邻道功率	22
1.4.10	误差矢量幅度	23
1.4.11	A/D 和 D/A 转换器的动态范围	23

第2章 普通无线电收发信机测试

25

2.1	调频发信机的主要技术参数和测试方法	25
2.1.1	标准测量条件	25
2.1.2	载波输出功率	26
2.1.3	频率误差	26
2.1.4	邻近信道功率比	26
2.1.5	调制灵敏度	27
2.1.6	调制特性	28
2.1.7	剩余调频	28
2.2	调频收信机的主要技术参数和测试方法	29
2.2.1	标准测量条件	29
2.2.2	灵敏度	29
2.2.3	静噪灵敏度	30
2.2.4	静噪回滞	30
2.2.5	静噪输出衰减	31
2.2.6	中频选择性	31
2.2.7	限幅特性	31
2.2.8	最大音频输出信噪比	32
2.2.9	最大音频输出功率	32
2.2.10	音频响应	32
2.2.11	可接受的频率偏移	33
2.3	调幅发信机的主要技术参数和测试方法	33
2.3.1	关于测量的标准	33
2.3.2	频率准确度	34
2.3.3	载波输出功率	34
2.3.4	调幅度	34
2.3.5	调幅灵敏度	35
2.4	调幅收信机的主要技术参数和测试方法	35
2.4.1	工作频率准确度	35
2.4.2	灵敏度	35
2.4.3	选择性	36
2.4.4	失真度	36
2.4.5	音频响应	37
2.4.6	中频抑制比	37
2.4.7	像频抑制比	37
2.5	单边带发信机的主要技术参数和测试方法	38
2.5.1	测量的标准和条件	38

2.5.2	平均功率	38
2.5.3	峰包功率	39
2.5.4	相对音频互调产物电平(互调失真)	39
2.5.5	边带抑制	40
2.5.6	载波抑制	40
2.5.7	话路输入电平	41
2.5.8	话路输入电平差异	41
2.5.9	音频频率调制特性(话路频率响应)	41
2.6	单边带收信机的主要技术参数和测试方法	42
2.6.1	测量的标准和条件	42
2.6.2	基准灵敏度	42
2.6.3	大信号信噪比	43
2.6.4	音频响应	43
2.6.5	中频选择性	44
2.6.6	带外互调	44
2.6.7	阻塞	45
2.6.8	倒易混频	45
2.6.9	中频抑制比	46
2.6.10	像频抑制比	46
2.6.11	自动增益控制特性	47
2.7	抗干扰电台的主要技术参数和测试方法	47
2.7.1	抗干扰电台的种类和主要技术参数	47
2.7.2	跳频电台的测试方法	49
第 3 章 微波接力通信设备指标测试		54
3.1	微波接力发信机设备指标测试	54
3.1.1	测量条件要求	54
3.1.2	频率稳定度	55
3.1.3	输出功率	55
3.1.4	杂波抑制制度测试	56
3.1.5	寄生频偏测试	56
3.1.6	传输衰减	57
3.1.7	杂散分量测试	58
3.1.8	调制特性测试	59
3.1.9	天线驻波系数测试	59
3.1.10	天线增益测量	60
3.2	收信机设备技术指标测试	60
3.2.1	测量条件要求	60

3.2.2	数字解调灵敏度测试	61
3.2.3	接收动态范围测试	62
3.2.4	镜频抑制度测试	62
3.2.5	噪声系数测试	63
3.3	电源技术指标测试	63
3.3.1	电源电压适应能力测试	64
3.3.2	主机功耗测试	64
3.3.3	交直流切换测试	65
3.4	功能测试	65
3.4.1	接口特性测试	66
3.4.2	工程勤务话特性测试	67
3.4.3	自动功率调整	67
3.4.4	自动频率控制	68
3.4.5	直接序列扩频抗干扰功能测试	69
3.4.6	抗邻道干扰能力测试	70
3.4.7	自适应陷波测试	72
第4章	卫星通信设备测试	74
4.1	卫星通信系统设备组成	74
4.1.1	天线分系统	75
4.1.2	伺服跟踪分系统	75
4.1.3	发射分系统	76
4.1.4	接收分系统	76
4.1.5	信道终端分系统	76
4.1.6	监控分系统	77
4.1.7	电源分系统	77
4.2	卫星通信系统的主要参数	77
4.2.1	天线增益	77
4.2.2	天线方向图	78
4.2.3	等效全向辐射功率	78
4.2.4	输入/输出补偿	79
4.2.5	卫星转发器饱和和通量密度	80
4.2.6	自由空间传输损耗	80
4.2.7	等效噪声温度	81
4.2.8	品质因数	81
4.3	天线设备测试	81
4.3.1	G/T 值测试	82
4.3.2	天线发射增益测试	86

4.3.3	天线方向图测试	88
4.3.4	天线交叉极化隔离度测试(离轴轴比测试)	92
4.3.5	发射 EIRP 及频率稳定度测试	94
4.4	高功放设备测试	95
4.4.1	饱和输出功率和增益测试	95
4.4.2	增益-频率特性测试	97
4.4.3	互调失真测试	98
4.4.4	输出噪声和杂散测试	100
4.5	低噪放设备测试	101
4.5.1	增益-频率特性测试	101
4.5.2	噪声温度测试	103
4.6	变频设备测试	104
4.6.1	幅度频率特性测试	104
4.6.2	相位噪声测试	106
第 5 章	移动通信设备测试	108
5.1	移动通信设备测试概述	108
5.1.1	移动通信终端测试的基本内容	109
5.1.2	移动通信测试的环境要求	111
5.2	WCDMA 终端射频一致性测试	112
5.2.1	测试条件	112
5.2.2	主要技术特性测试方法	113
5.3	CDMA2000 终端测试	121
5.3.1	测试条件	121
5.3.2	主要技术特性测试	121
5.4	TD-SCDMA 终端射频一致性测试	130
5.4.1	测试条件	131
5.4.2	主要技术特性测试方法	131
5.5	WiMAX 射频一致性测试	141
5.5.1	测试条件	141
5.5.2	主要技术特性测试方法	141
5.6	LTE 系统测试	145
5.6.1	LTE 概述	145
5.6.2	TD-LTE 射频测试标准及重点测试项解读	146
5.6.3	测试方案	149

第 6 章 天线测量

6.1 天线测量基本概念

6.1.1 天线测量中的互易性

6.1.2 近场和远场

6.1.3 坐标系

6.1.4 天线测量条件

6.2 主要参数测量

6.2.1 天线阻抗的测量

6.2.2 天线增益测量

6.2.3 相位的测量

6.2.4 极化的测量

第 7 章 电磁兼容性测试

7.1 电磁兼容性基本概述

7.1.1 基本定义

7.1.2 测试程序

7.1.3 测试环境要求

7.2 电磁兼容检测

7.2.1 传导干扰发射测试

7.2.2 辐射干扰发射测试

7.2.3 传导干扰敏感度测试

7.2.4 辐射干扰敏感度测试

7.2.5 静电放电敏感度测试

参考文献

159

159

159

161

161

162

172

173

176

184

186

196

196

196

197

198

199

199

201

202

206

207

208

无线通信测量基础

无线通信是以空间电磁波为载体传送信息的一种通信方式,构建无线通信时不需要用线缆连接发信端和收信端,因而,在航天通信、海运渔业、个人移动通信及军用通信等方面,是其他通信方式不可替代的。又由于与其他通信方式相比,无线通信具有通信设备体积小、构建方便、操作使用灵活等突出特点,因而无线通信技术及多种多样的无线通信设备在国民经济的各个领域发挥着重要的作用,尤其是在军事方面的应用更为瞩目。

1.1 无线通信测量概述

1. 无线通信测量的地位及作用

通信测量是通信工程中的重要内容,无线通信测量是无线通信设备的开设、维护、维修及研发设计中的重要环节。无线通信测量包括无线电通信装备性能指标测试,装备维护、维修测试,无线通信信号测试等,是研究无线电通信设备测量理论及测量方法的一门学科。随着通信技术的不断发展,无线通信测量技术的内容以及为之服务的无线通信测量仪器设备也不断经历着各种变革,无线通信已成为一门重要的学科,并催生了无线通信测量技术的发展。与此同时,无线电通信设备的性能检测和维修业也逐步发展成为一个重要行业。

2. 无线通信测量的新发展

随着社会经济的发展和科学技术的进步,近几十年来通信技术发展迅速,特别是微电子技术和计算机技术日新月异的进步,更推动了通信技术领域的革命性变化。在无线通信领域,昔日的短波和超短波已无法满足社会需求,继微波和卫星通信之后,当今世界正追求实现全球范围内的个人通信。随着第三代移动通信标准的广泛实施及第四代移动通信标准的制定和实践,这一目标的实现指日可待。而在军事通信领域,通信对抗和反对抗的技术角逐大大促进了军事通信技术的革命。

在通信技术不断发展,各种通信设备不断问世的同时,通信测量技术在不断升级的需求推动下也得到了极大的发展。如今的无线通信测量设备面对的已不仅是通常的短波和超短波收发信电台,各种新型的抗干扰通信设备、迅速膨胀的移动通信系统及其设备对测量技术和设备提出了越来越高的要求。

同样,飞速发展的微电子技术、计算机和数字信号处理技术等给通信测量技术的发展注入了强大的活力。各种相应的测量技术和设备应运而生。在这些先进技术的支持下,测量技术领域也在进行着一场变革,以模块化和总线技术为基础的 VXI、PXI 测试系统以及在计算机技术基础上发展起来的虚拟仪器正在崛起,它们将会给测量技术领域带来一场充满生机的革命。

1.2 无线通信系统

1.2.1 无线通信的基本概念

1. 概述

利用电磁波的辐射和传播,经过空间传送信息的通信方式称为无线电通信(Radio Communication),也称为无线通信。利用无线通信可以传送电报、电报、传真、数据、图像以及广播和电视节目等。

2. 无线通信使用的频段划分

1895 年意大利的马可尼(Guglielmo Marconi)利用电火花产生的电磁波,先后在 9m、975m 和 3000m 的地方收到电报信号(在相同时期,俄国的波波夫也进行了电磁波传送电报信号的实验)。从此开辟了无线通信的先河。无线通信初创时期使用的频率范围逐步扩大。目前无线通信使用的频率从超长波波段到亚毫米波波段(包括亚毫米波以下),以至光波。无线通信使用的电磁波的频率范围和波段见表 1-1。

表 1-1 无线通信使用的电磁波频率范围和波段

频段名称	频率范围/Hz	波段名称		波长范围/m
极低频(ELF)	3~30	极长波		$10^7 \sim 10^8$
超低频(SLF)	30~300	超长波		$10^6 \sim 10^7$
特低频(ULF)	300~3000	特长波		$10^5 \sim 10^6$
甚低频(VLF)	3000~30k	甚长波		$10^4 \sim 10^5$
低频(LF)	30k~300k	长波		$10^3 \sim 10^4$
中频(MF)	300k~3000k	中波		$10^2 \sim 10^3$
高频(HF)	3000k~30M	短波		$10 \sim 10^2$
甚高频(VHF)	30M~300M	超短波(米波)		1~10
特高频(UHF)	300M~3000M	微波	分米波	$10^{-1} \sim 1$
超高频(SHF)	3000M~30G		厘米波	$10^{-2} \sim 10^{-1}$
极高频	30G~300G	微波	毫米波	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
至高频	300G~3000G		亚毫米波	$10^{-4} \sim 10^{-3}$
—	—	光波		$3 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-6}$

微波波段分为 L、S、C、X、Ku、K、Ka 等波段(或称子波段),具体见表 1-2。

表 1-2 微波频段划分

代 号	频率和波长波段	
	频率范围/GHz	波长范围/cm
L	1~2	15~30
S	2~4	7.5~15
C	4~8	3.75~7.5
X	8~13	2.31~3.75
Ku	13~18	1.67~2.31
K	18~28	1.07~1.67
Ka	28~40	0.75~1.07

1.2.2 信号与通信系统概述

1. 信号

1) 信号传递方式

通信的目的是传递信息,人类社会需要传递的信息可以是声音、文字、符号、音乐、图像和数据等。

在现代通信技术中,主要运用的传输方式是电通信技术,即以电信号的形式来传递信息。在实际通信中,首先是在发送端采用传感器将一般的信息转换成电信号,然后在接收端将收到的电信号还原。

2) 信号的分类

电信号通常分为模拟信号和数字信号两大类。

(1) 模拟信号

模拟信号是指电信号某一参量的值范围是连续的,因此可有无限多个取值,如话筒产生的话音电压信号、摄像机产生的图像电流信号等。

模拟信号通常是连续时间函数,也有离散时间函数的情况,但无论时间是否连续,其取值一定是连续的。最简单的模拟信号如图 1-1 所示,图 1-2 所示为时间离散的模拟信号。

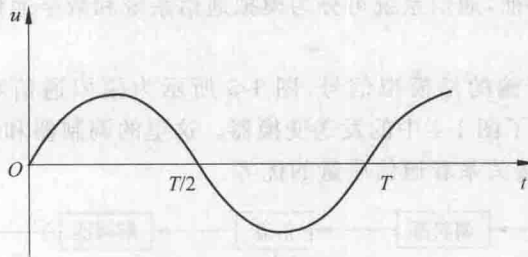
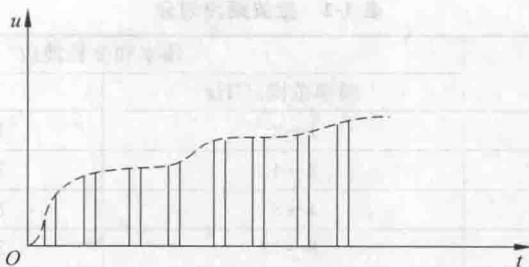


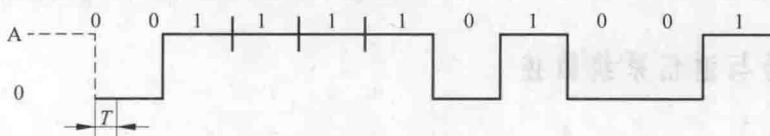
图 1-1 时间连续的模拟信号

(2) 数字信号

数字信号是指电信号的某一能量携带着离散信息,其取值是有限个数值,如电报信



号、数据信号、遥测指令等,如图 1-3 所示。



2. 通信系统的组成及工作原理

```

graph LR
    A[信源] -- 信息 --> B[发送变换器]
    B -- 信号 --> C[信道]
    C -- 信号 --> D[接收变换器]
    D -- 信息 --> E[信宿]
    F[噪声] --> C
  
```

3. 通信系统的分类

1) 模拟通信系统

```

graph LR
    A[信源] --> B[调制器]
    B --> C[信道]
    C --> D[解调器]
    D --> E[信宿]
    F[噪声] --> C
  
```

图 1-5 模拟通信系统的基本组成

2) 数字通信系统

在数字通信系统中传输的是数字信号。数字通信系统的基本组成如图 1-6 所示,包括调制器、解调器、信源编码器、信道编码器、信道译码器、信源译码器等。此外,还包括同步系统。

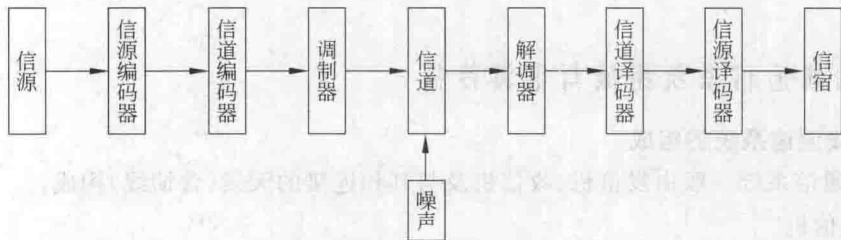


图 1-6 数字通信系统的基本组成

(1) 数字通信系统的组成

① 信源编码器。信源编码器的主要作用是提高数字信号传输的有效性。如果信息源是数据处理设备,还要进行并/串变换,以便进行数据传输。通常的数字加密也可归并到信源编码器中。收信端的信源译码是信源编码的逆变换。

② 信道编码器。信道编码器主要是为了提高数字信号传输的可靠性。由于传输信道内噪声的存在和信道特性不理想造成的码元间干扰,通信系统很容易产生传输差错,而信道的线性畸变所造成的码间干扰可通过均衡办法基本消除,因此信道中的噪声是导致传输差错的主要原因。减少这种差错的基本做法是在信码组中按一定规则附上若干监视码元(或称冗余度码元),使原来不相关的数字信息序列变为相关的新的序列,然后在接收端根据这种相关的规律性来检测或纠正序列码组中的误码,提高可靠性。因此,信道编码器又称差错控制编码器。接收端的信道译码器是信道编码器的逆过程。

③ 同步系统。同步系统用于建立通信系统收、发相对一致的时间关系。只有这样,收信端才能确定每位码的起止时间,并确定接收码组与发送码组的正确对应关系,否则收信端无法恢复发信端的信息。因此同步是数字通信系统正常工作的前提,通信系统能否有效、可靠地工作,很大程度上依赖于同步系统性能的好坏。同步可分为载波同步、位同步、帧同步和网同步 4 大类。

注:对于模拟通信系统中的时分多路脉冲调制系统、图像(电视)传输系统和采用相干解调的连续波调制系统也同样存在同步问题。

(2) 数字通信系统的特点

模拟通信系统与数字通信系统各有特点,但从总体上看,数字通信系统与模拟通信系统相比,其具有以下优点:

- ① 抗干扰能力强,数字通信系统可通过再生中继器消除噪声积累。
- ② 可采用差错控制技术,提高数字信号传输的可靠性。
- ③ 便于进行各种数字信号处理,如计算机存储和处理,使数字通信和计算机技术相结合而组成综合化、智能化的数字通信网。
- ④ 数字通信系统可使传输与交换相结合,电话、数据和图像传输相结合,有利于实现