

21 世纪工程技术新型教程系列

# 光通信与 无线通信系统

〔日〕木村磐根 编

本系列为日本名牌大学面向 21 世纪教育改革成果

科学出版社

OHM社

**薄**

最薄的大学专业系列教材。易于讲授

**精** 内容充实精

要，结构紧凑。易于学习

**新** 反映理论与实用技术的

最新发展。易于成才

---

# 光通信与无线通信系统

---

〔日〕木村磐根 编  
杨明君 孙晓东 郭雪清 译  
李英灏 校

科学出版社 OHM社

本书著作权和专有出版权受到《中华人民共和国著作权法》的保护。凡对本书的一部分或全部进行转载、或用复印机进行复制或是在其它场合引用、以及录入电子设备等行为,均属侵害著作权,构成违法。

本书如需复制、引用、转载、改编时,必须得到版权所有者的许可。

如有任何疑问请与以下部门联系。联系时请尽量使用信函或传真形式。

科学出版社总编合作部 电话:010-64010643 传真:010-64019810

邮政编码:100717 地址:北京市东黄城根北街16号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 电话:010-82087401 传真:010-62072304

邮政编码:100029 地址:北京市朝阳区华严北里11号楼2层

## 丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行学部、学科的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系和不断深入的教育计划改革,特别是由于学期制教育的引入,使得原来以分册编写的教材在一个学期的教学中很难消化。因此,各学校对“易教”、“易学”的教材需求越来越迫切。

《21世纪工程技术新型教程系列》是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教程系列。这些教程均由活跃在各学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富,有利于对学科基础的理解。版面设计时为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教科书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

### 21世纪工程技术新型教程系列编辑委员会

#### 主 编

樱井良文 大阪工业大学校长  
大阪大学名誉教授

#### 副主编

西川祎一 大阪工业大学信息科学部学部长  
京都大学名誉教授

#### 编委(按姓氏笔画顺序)

广瀨全孝	广岛大学教授	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	大阪大学教授
池田克夫	京都大学教授	滨川圭弘	立命馆大学副校长 大阪大学名誉教授

# 前 言

最近,随着计算机、半导体集成电路技术的飞速发展,通信领域从陈旧意义的公众通信,向连接计算机的因特网通信、多媒体通信等,手段更先进、更复杂化方面过渡。一方面,满足了人们在任何地方、任何时间以及与任何人都能实现通信的潜在愿望;另一方面,使我们进入了每个人都能利用手中的手持终端,在任何喜欢的时候从任何地方都能通话的时代。因此,在我们学习通信工程学之际,仅靠现在感受的通信技术,已经不能充分理解我们身边最现代化的新通信系统了。

本书按照上述观点,将重点介绍现在飞速进步的光通信领域和包括卫星通信在内的移动通信所代表的无线通信系统。因此,本书将重点叙述最新的无线通信系统中使用的高级调制解调技术,但不包括信号处理和基础调制解调、电视等广播通信技术。如果需要这些基础知识的话,请参考本系列书中的《通信工程学概论》或通信工程学方面的其他教科书。本书是以具有一定通信工程学基础知识的学生为对象,以帮助理解现在得到飞速发展的光通信、无线通信系统为目的而编写的。同时,为了理解光通信和无线通信系统,从基础开始介绍电波传播、无线通信、光纤等技术。

如上所述,在现在的通信系统中,与计算机连接的通信系统例如局域网(LAN; local area network)已经普及,而且,局域网网络与计算机终端间的连接并不是有线连接,而是利用电波或红外线的连接,并且正在普及。此外,电波或红外线传送的信息是数字信息,如与从墙面反射回的多个反射波合成的话,则会引起数字信号的波形失真,成为限制传输速率的因素,也是包括汽车电话在内的移动通信中的问题。但是,无线 LAN 网络中所处理的信号是数字数据,因此,需要使传输中的误码极少,较之与以音频通话为对象的便携式通信、移动通信系统比较具有更严格的条件。同时,手持电话中目前有蜂窝制式和简易 PHS 制式两种,它们各自的利弊也将在书中做详细地介绍。

在光纤通信系统中,通过有效地利用光缆、进一步提高半导体激光器的特性,可将通信效率、通信速率提高到极限的技术革新研究正在进行之中。而另一方面,到用户终端的用户电缆将从目前的金属电缆变成光纤,此目标也正在踏踏实实地朝着实用化迈进,本书将对此进行详细介绍。

本书第2章中未加特别说明采用虚数单位 $j$ 。并且,为了帮助读者

理解,各章后加了练习题,书末给出了详细解答。

本书的执笔者都是在教育领域具有丰富经验的学者,具体分工如下:

第1、2章 杉尾嘉彦

第3、4章 佐藤正志

第5、6、7、12章 石尾秀树

第8、9章 小川英一

第10、11章 山内雪路等

如果本书对您的工作或学习有所帮助的话,作者将感到非常荣幸。

木村馨根

## 编者、著者简历

### 木村 馨根

1955年 京都大学部电气工学  
专业毕业  
1961年 工学博士  
现在 大阪工业大学信息学  
部信息系统专业教授  
京都大学名誉教授

### 石尾 秀树

1966年 京都大学工学部电气  
工学专业毕业  
1980年 工学博士  
现在 大阪工业信息学部信  
息处理专业教授

### 小川 英一

1974年 大阪大学研究生院研  
究专业博士毕业  
1974年 工学博士  
现在 摄南大学工学部电气  
工学专业教授

### 佐藤 正志

1967年 东北大学工学部电子  
工学专业毕业  
1979年 工学博士  
现在 大阪产业大学工学部  
电气电子工学专业教  
授

### 杉尾 嘉彦

1973年 大阪大学研究生院基  
础工学研究专业博士  
毕业  
1973年 工学博士  
现在 摄南大学工学部电气  
工学专业教授

### 山内 雪路

1986年 大阪大学研究生院工  
学研究专业博士毕业  
1986年 工学博士  
现在 大阪工业大学信息学  
部信息系统专业副教  
授

# 目 录

<b>第 1 章 电波传播基础——电波是如何传播的</b> .....	1
1.1 无线通信和电波传播 .....	1
1.1.1 无线通信 .....	1
1.1.2 无线通信的电波传播问题 .....	2
1.2 地面波传播 .....	3
1.2.1 地面波和折射波 .....	3
1.2.2 地球球面上的传播 .....	3
1.3 对流层的传播 .....	6
1.3.1 大气层中的折射 .....	6
1.3.2 无线电波导 .....	7
1.3.3 衰落 .....	8
1.3.4 大气层中的衰落 .....	8
1.4 电离层传播 .....	9
1.4.1 电离层的种类 .....	9
1.4.2 电离层中的传播 .....	10
1.4.3 频段传播 .....	11
1.4.4 衰落 .....	11
1.5 卫星通信的电波传播 .....	12
1.5.1 固定卫星通信 .....	13
1.5.2 移动卫星通信的电波传播 .....	14
1.6 移动通信的电波传播 .....	14
1.6.1 传播形式 .....	15
1.6.2 陆地移动传播特性 .....	15
练习题 .....	17
<b>第 2 章 天线发展动态——电波的发射和接收形式</b> .....	19
2.1 电波如何从天线上发射 .....	19
2.1.1 微小波源的电磁场 .....	19
2.1.2 微小电偶极天线的辐射场 .....	20
2.1.3 线性偶极天线的方向性 .....	21
2.1.4 孔径天线的方向特性 .....	22



2.1.5	电波传送功率	22
2.2	影响天线特性的因素	22
2.2.1	方向特性	22
2.2.2	功率增益、有效长度、有效面积	23
2.2.3	发射阻抗、反射系数、驻波比	25
2.2.4	发信和接收——弗利斯传输公式	26
2.2.5	散射断面积	26
2.2.6	噪声温度	27
2.3	卫星通信用天线	27
2.3.1	固定基站用天线	27
2.3.2	卫星搭载天线	28
2.3.3	无线广播接收用天线	29
2.4	移动通信用天线	30
2.4.1	船舶用天线	30
2.4.2	飞机用天线	31
2.4.3	陆地移动体用天线	31
2.5	未来的天线	34
	练习题	35
<b>第 3 章</b>	<b>无线通信中的调制解调技术</b>	<b>37</b>
3.1	无线通信和调制——基本调制	37
3.2	线性调制	41
3.2.1	交错 QPSK	41
3.2.2	$\pi/4$ 移相 QPSK	44
3.3	相位连续调制方式	45
3.3.1	最小频移调制	46
3.3.2	GMSK(高斯型最小频移调制)	48
3.3.3	TFM(受控调频)	48
3.4	质量好、数量多的信息传送	49
	练习题	49
<b>第 4 章</b>	<b>今后的调制方式——扩频通信</b>	<b>51</b>
4.1	扩频通信的原理和特点	51
4.1.1	直接扩频方式	51
4.1.2	跳频方式	54
4.2	扩频码	54
4.2.1	最长序列	55
4.2.2	相关函数	56

4.2.3 戈尔德序列码 .....	56
4.3 同步方式 .....	57
4.3.1 同步捕捉方式 .....	57
4.3.2 同步跟踪方式 .....	58
4.4 码分多址接续 .....	59
4.5 扩频方式的应用 .....	60
练习题 .....	61
<b>第 5 章 光纤的原理和特性——光是如何传递的 .....</b>	<b>63</b>
5.1 光纤的原理和结构 .....	63
5.1.1 全反射与临界角 .....	63
5.1.2 光纤的结构 .....	64
5.1.3 光纤的种类和传播模式 .....	65
5.2 光纤特性的决定因素——损耗和传输带宽 .....	66
5.2.1 光纤损耗的决定因素 .....	66
5.3 决定光纤传输带宽的因素 .....	69
5.4 光纤的接续 .....	72
5.4.1 接续损耗的产生原因 .....	73
5.4.2 连接器接续 .....	73
5.4.3 永久接续 .....	75
5.5 各种光纤及其应用 .....	75
5.5.1 多成分玻璃光纤 .....	76
5.5.2 塑料包层光纤 .....	76
5.5.3 塑料光纤 .....	76
练习题 .....	76
<b>第 6 章 光的调制解调和放大技术 .....</b>	<b>79</b>
6.1 发光原理 .....	79
6.1.1 光的吸收与释放 .....	79
6.1.2 反转分布 .....	80
6.1.3 半导体的发光原理 .....	80
6.1.4 半导体激光器的构造 .....	81
6.1.5 激光器和发光二极管的区别 .....	83
6.1.6 半导体光源和光纤的耦合 .....	83
6.2 半导体光源和光的调制 .....	84
6.2.1 半导体光源的特性 .....	84
6.2.2 光的调制 .....	85
6.2.3 光纤通信中的调制形式 .....	86

6.3	光的检测原理和光信号的解调	88
6.3.1	半导体探测元件的光检测	88
6.3.2	光检测器的信噪比(S/N)	90
6.4	光的放大原理	91
6.4.1	光纤放大器	91
6.4.2	半导体激光器(LD)放大器	92
6.4.3	光放大器的应用	92
	练习题	93
<b>第7章</b>	<b>光纤通信——多媒体化的关键技术</b>	<b>95</b>
7.1	光纤通信系统的构成	95
7.1.1	光纤通信系统的基本构成与特点	95
7.1.2	长距离、大容量传输系统的构成	96
7.2	中继传输的原理	97
7.2.1	再生中继	97
7.2.2	线性中继传输	99
7.3	复用技术	100
7.3.1	频分复用(FDM)	100
7.3.2	时分复用(TDM)	102
7.4	光纤通信的未来	103
7.4.1	传输更多的信息	103
7.4.2	光电信息接口网络	106
	练习题	107
<b>第8章</b>	<b>卫星通信——广阔的服务区</b>	<b>109</b>
8.1	空间站覆盖的区域	109
8.1.1	空间无线中继站	109
8.1.2	广阔的服务区	110
8.1.3	卫星通信的限制	111
8.2	卫星通信技术	111
8.2.1	频率与传播特性	111
8.2.2	多元接续	112
8.2.3	地球站设备	113
8.2.4	卫星搭载设备	114
8.3	卫星电视广播	116
8.3.1	卫星电视广播	116
8.3.2	与通信卫星的不同点	116
8.4	移动通信	117

8.4.1	移动通信的要求 .....	117
8.4.2	低轨道环绕卫星 .....	117
8.5	大型卫星 .....	119
8.5.1	卫星的大型化和地球站的小型化 .....	119
8.5.2	卫星的高性能化 .....	119
8.5.3	身边业务的发展 .....	120
	练习题 .....	121
<b>第 9 章</b>	<b>移动通信——个人化通信技术 .....</b>	<b>123</b>
9.1	通话连接技术 .....	123
9.1.1	移动通信业务 .....	123
9.1.2	无线电路的构成 .....	123
9.2	严酷的电波传播环境 .....	125
9.2.1	个人化通信的迅速发展 .....	125
9.2.2	电波传播电路的限制 .....	125
9.3	移动通信技术 .....	127
9.3.1	多元接续 .....	127
9.3.2	数字化的特点 .....	128
9.3.3	传播电路中的克服技术 .....	129
9.4	蜂窝和 PHS .....	130
9.4.1	开发方针的不同点 .....	130
9.4.2	传输技术的不同点 .....	130
9.4.3	经济的 PHS 方式 .....	132
9.5	移动通信的多媒体化 .....	133
9.5.1	数据传输 .....	133
9.5.2	新一代的技术、业务 .....	134
	练习题 .....	135
<b>第 10 章</b>	<b>无线局域网 .....</b>	<b>137</b>
10.1	常见的局域网及其构成 .....	137
10.1.1	网络的拓扑 .....	137
10.1.2	局域网的数据流 .....	138
10.1.3	业务量与流通量 .....	138
10.1.4	典型的接入控制方式 .....	139
10.2	无线技术的应用 .....	140
10.2.1	误码率增大 .....	140
10.2.2	传输速率与通信容量的限制 .....	140
10.2.3	信号的衰落 .....	141

10.3	无线局域网的主要技术 .....	141
10.3.1	RCR STD-33 方式 .....	141
10.3.2	RCR STD-34 .....	142
10.4	无线局域网的速率 .....	144
10.4.1	一次调制的多值化 .....	144
10.4.2	扩展码系列承载信息 .....	144
10.5	红外线的应用 .....	145
10.5.1	IEEE802.11 方式 .....	145
10.5.2	红外数据结合技术(IrDA) .....	145
	练习题 .....	146
<b>第 11 章</b>	<b>无线局域网的软件技术 .....</b>	<b>147</b>
11.1	分组通信的基础技术 .....	147
11.1.1	分组通信方式 .....	147
11.1.2	误码控制 .....	148
11.1.3	自动转发要求(ARQ)的各种方式 .....	149
11.1.4	自动转发要求(ARQ)的协议层 .....	150
11.2	无线局域网用的接入控制 .....	151
11.2.1	CSMA/CA .....	151
11.2.2	随机脉冲 CSMA/CA .....	152
11.2.3	CSMA/CA+ACK .....	152
11.2.4	请求发送/清除发送(RTS/CTS) 方式 .....	153
11.3	移动终端与网络的连接 .....	154
11.3.1	超越网络界限的终端移动 .....	154
11.3.2	地址信息的动态收集 .....	155
11.3.3	移动 IP(Mobile-IP) .....	155
11.4	保证通信安全 .....	157
11.4.1	秘密键加密系统和公开键加密系统 .....	157
11.4.2	秘密键加密系统例:DES(数据加密标 准:美国数据加密标准) .....	158
11.4.3	公开键加密系统例 RSA .....	158
	练习题 .....	160
<b>第 12 章</b>	<b>用户系统——网络终端神经网络 .....</b>	<b>161</b>
12.1	点到点的传输方式 .....	161
12.2	金属电缆用户系统的数字化及界限 .....	163

---

12.3	光用户系统 .....	165
12.3.1	光纤到路边(OTTC) .....	167
12.3.2	光纤同轴电缆混合方式(HFC) .....	167
12.3.3	光纤到家庭(FTTH) .....	167
12.4	今后的用户系统 .....	170
12.4.1	宽带综合业务数字网 B-ISDN .....	170
12.4.2	CATV 的变迁 .....	171
	练习题 .....	172
	<b>练习题简答</b> .....	173
	<b>参考文献</b> .....	181



# 第 1 章

# 电波传播基础

## ——电波是如何传播的

本章概括地介绍了地球空间的电波传播状态,包括对流层和电离层的电波传播方法的基本情况,卫星通信和移动通信的电波传播方法等。

## 1.1 无线通信和电波传播

### 1.1.1 无线通信

在麦克斯韦(J. C. Maxwell)于 1861 年从理论上预言大气中存在着电磁波动之后,大约经过了 27 年,赫兹(H. R. Hertz)通过火花放电初次成功地发现了电磁波,实验证明了麦克斯韦理论(1888年)。从马可尼

表 1.1 电波的分类

波长	$10^5$ km	$10^5$ m	$10^4$ m	$3-10^3$ m	$10^3$ m	200 m	100 m	50 m	10 m	1 m	30 cm	10 cm	1 cm	1 mm
	长波			中波	中短波	短波	超短波	微波		极超短波	厘米波	毫米波	亚毫米波	
	ULF	ELF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF				
频率 [Hz]	3	3 k	30 k	300 k	3 M	30 M	300 M	1 G	3 G	30 G	300 G	3 T		

频率 [GHz]	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0	30.0	
原有的称呼		L	S	C	X	Ku	Ka

ULF : 超低频	ELF : 极低频
VLF : 甚低频	LF : 低频
MF : 中频	HF : 高频
VHF : 甚高频	UHF : 超高频
SHF : 超高频	EHF : 极高频

(G. Marconi)最初的无线通信实验(1896年)开始,出现了无线通信,船舶无线电,巡逻车、出租车无线电,雷达,个人无线电等技术,并涉及到空间上的陆地、海洋、航空、宇宙等固定和移动无线通信领域,而且达到了实用化程度。

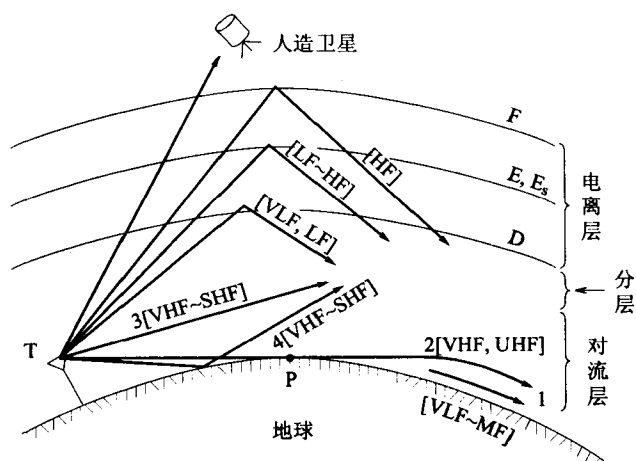


图 1.1 电波的传播方式

在电磁波中,我们把频率为  $3 \times 10^{12}$  Hz 以下的部分叫做电波 (radio wave),并将其应用于通信领域。表 1.1 示出了电磁波分类的例子<sup>[1]</sup>。通信的最终目标可以说是能随时随地与任何人直接交换本人的意见和信息,而实现这一目标的方式就是以移动体为中心的移动通信系统。

### 1.1.2 无线通信的电波传播问题

由于地球表面及空间层的环境条件不同,因此从地上发射的电波因其频率不同传播状态也不一样。图 1.1 所示为考虑了地球表面凸出因素的电波传播示意。一般分为地面波传播、对流层传播及电离层传播。电波传播中的问题所述如下:

- (1) 电波在大气层中传播时,由于雨水和空气的作用而引起散射、吸收。
- (2) 由于空气层的密度不同而产生折射,或在传播过程中被山丘、建筑物等物体阻挡或反射,也有的被大地反射回来。
- (3) 在穿过对流层时又被空间上层的电离层反射和折射。
- (4) 在基站和移动台之间的传播电路中,受到各种障碍物的影响产生多路径衰落,因而严重地影响了移动通信的质量。

表 1.2 示出了电波的传播形式、因素与系统、频率等的关系。



表 1.2 电波的传播形式和系统的关系

	方式	频率	距离	传播要素	高度
地面波	广播	MF HF VHF,UHF FM, TV	数十~ 数百公里	地形 地物	1km 以下
	移动	UHF	数百~ 数公里		
对流层	地面	微波(EHF)	数十公里	大气层折射率 大地反射 降雨	15km 以下
	卫星	SHF,EHF	数公里(基本 是自由空间)	降雨	
电离层	广播 短波通信	HF 以下 VHF 以上 透过	数百~ 数千公里	电离层反射	数十~ 数百公里

## 1.2 地面波传播<sup>[2,3]</sup>

我们把地面上 10~15km 的范围叫做对流层(troposphere)。在大气层中气象条件变化激烈处的大气密度、压力、温度及湿度等不一样,其折射率也随之变化。我们把对流层以上的上空约 50km 处的高度,叫做同温层(stratosphere),温度在 -50 ~ 0°C 范围内变化。在电波传播中,对流层内地球表面上的地面波传播和对流层传播是个问题。

### 1.2.1 地面波和折射波

调幅(AM)广播用波长为 200m 以上的中波通信,采用了沿地球表面传播的地面波(surface wave)(图 1.1)。该电波的传播受到大地和海面的影响,距地表面越远,其强度会急剧地衰落;如果电波间隔数个波长,则基本上会消失。同时,由天线(参考第 2 章)发射的电波随着地球表面的起伏、弯曲而产生绕射。接收天线的位置越高,其绕射波(diffracted wave)的接收强度就越强。在收发信号间无法看见时,可接收到地面波和绕射波的合成波。

### 1.2.2 地球球面上的传播

在收发信号点处于视线内(line of sight)的情况下,接收电场主要是直接波和大地反射波的合成波部分,频率的影响基本不存在。接收点在视线外(over of horizon)的情况下,为 1MHz 以下的低频,接收电场的主