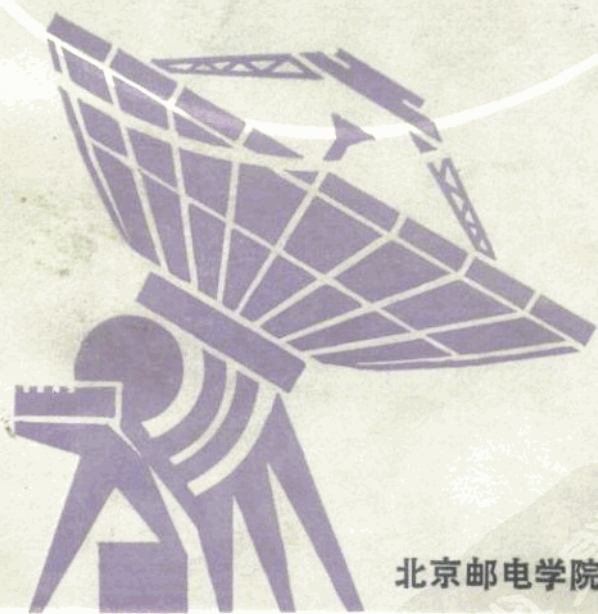


微波通信新技术

邵文昌 著



北京邮电学院出版社

序 言

通信技术的发展，在国际上一度似乎比较缓慢，但在六十年代初期，由于卫星和光纤通信的相继出现，形势大为改观。结合数字技术和计算机技术的发展，廿多年来通信的速率和容量空前地增长；地球静止卫星不仅成为洲际通信的有力工具，而且已被用于国内通信；光缆虽然主要用于城市通信，但远距离的和越洋的海底光缆也在建设之中；数字化和计算机使大规模的、高度自动化的通信网的实现成为可能，它们无疑地将为社会发挥更大的效益。实际上卫星和光纤通信的潜力还远没有被充分开发，其发展方兴未艾。这些新的进展正符合人类朝“信息社会”前进的需要，而社会的发达必将更进一步推动通信技术的迅速发展。

我国的通信设施由于历史上留下的底子过于薄弱，虽然经过有关部门作出很大的努力，但迄今在数量上和质量上都远远赶不上社会发展的需要，成为社会主义四化建设中最大障碍之一。通信不灵，也就是信息传递阻塞或延缓，引起时间的浪费和物质的损失是很大的，而且也将影响文教和宣传工作的发展，因为通信是广播、电视的基础，通信的落后，使普及文教和宣传的有力工具——广播和电视的发展受到了限制。

我国科技领导和科技人员密切注意着国际上通信技术的发展。事实上我国通信技术的科研工作，在许多方面正在向国际水平靠近。我国已经成功地发射了五颗地球静止试验

通信卫星：已经掌握了光纤通信技术并向实用化迈进，已经开发了一批通信、数传和军事指挥的自动化网络，有些已经投入使用。需要的是周密的、切合我国国情的规划：如何在我国应用和推广通信新技术，这些是值得研究的问题。我国幅员广阔，各地区的差别很大，是否可以考虑对不同地区采用不同的通信手段和体制，经过卫星联接起来。有些新技术可以在国家的关键部门尽先使用，再行逐步地向面上推广，……等等，都是可供参考的意见。我们相信，在改革、开放的有利条件下，在较短时期内建设起基本满足我国社会要求的通信系统是可以做到的。

在迫切要求发展通信事业的情势下，使广大从事这个领域工作的同志熟悉通信技术的基础理论和新的发展是十分必要的，中国科学院电子学研究所组织的《现代通信的理论和 技术》讲座是非常及时的。讲座资料由国内著名学者和富有经验的专家撰写，更为难得。这部资料也可以说是一部内容新颖而丰富的专著，我们希望它能对我国通信技术和事业的发展起推动和促进的作用。

中国科学院学部委员

中国科学院技术科学部副主任

陈芳允

一九八九年于北京

作 者 的 话

当今社会正在兴起一场新的技术革命，并将进入历史的新时期，这场革命的核心就是社会信息化，首要的问题当属通信。在我国首次发表的科技白皮书中指出：“通信是国民经济和现代国防的神经系统，它加速了信息的交流，资金周转和商品流通，为社会创造了大量财富。据估计，发达国家的国民收入的10%得益于通信。”这充分阐明了人们对于通信的重要意义和价值的认识，这也意味着发展现代通信科学技术是当务之急。

近年来，通信科学技术在迅猛地发展着。为了加强学术交流，了解当前学术动向，探讨发展的前沿，同时为了满足有关部门的要求，以提高工作水平，中国科学院电子学研究所举办了《现代通信理论和技术》系列讲座，邀请了从事各学科领域有丰富经验的著名学者和专家，全面系统地介绍通信科学各个领域的发展情况。讲座的内容包括现代通信各个学科领域的理论和技术，计有：通信理论和通信技术（周炯槃教授），光纤通信（叶培大、连汉雄教授），卫星通信技术和应用（闵士权教授级高工），微波通信新技术（邵文昌教授），扩展频谱通信（项海格教授），移动通信的发展（迟惠生教授），数据通信（张方萑副教授），计算机通信（赵辰教授），图像通信（金东瀚教授），通信终端的关键技术（钱亚生教授），程控交换系统及其软件（陈俊亮教授），ISDN与通信网（刘瑞曾副教授）。

本书系作者在《微波通信新技术》讲座的原稿基础上，重新整理编写的，在本书所介绍的各项研究工作中，作者曾得到

很多同志的帮助。有刘晖、陈教芳、邵建国、赵坚和黄东杰等同志。在出版过程中得到林坚教授、沈启明和邵昕等同志的热心帮助。在此作者向他们表示深切的感谢。由于篇幅有限，时间仓促，难免挂一漏万，不当和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

于中国科学院电子学研究所 北京

一九八九年

目 录

序言

作者的话

1. 绪论	(1)
1.1 微波概述	(1)
1.2 微波通信的几种方式	(2)
1.3 微波通信的特点	(5)
1.4 模拟微波通信与数字微波通信	(6)
1.5 数字微波通信系统的构成	(9)
1.6 数字微波通信系统的性能和主要技术指标	(10)
1.7 微波通信的发展	(12)
2. 基带信号处理	(15)
2.1 码元符号波形成形	(15)
2.2 升余弦型加权波	(17)
2.3 迭加升余弦型加权波	(21)
2.4 加权波形的优化	(22)
2.5 三角叠加正弦加权波	(28)
2.6 信号序列的逻辑处理	(29)
2.7 IIF信号编码成形	(37)
2.8 信号序列频谱成形的预编码	(41)
2.9 符号波形的传输形成和数字实现方法	(43)
3. 频带信号的处理和传输	(49)
3.1 数字信号的频带传输	(49)

3.2	数字信号的相位调制	(50)
3.3	四相相移键控(QPSK).....	(53)
3.4	QPSK调制电路分析.....	(56)
3.5	QPSK调制器的设计和测试.....	(61)
3.6	发送频谱与限带传输	(74)
3.7	QOTS调制方式	(80)
3.8	数字信号的解调处理	(89)
3.9	QPSK已调信号在非理想情形下的传输.....	(97)
3.10	256 QAM调制方式.....	(113)
4.	视距和超视距微波通信的传播	(122)
4.1	大气对微波传播的影响.....	(122)
4.2	地面对微波传播的影响.....	(125)
4.3	微波通信天线的极化和交叉.....	(128)
4.4	衰落.....	(130)
4.5	分集接收.....	(134)
4.6	自适应均衡技术.....	(137)
4.7	交叉极化干扰的抵消.....	(139)
4.8	超视距通信.....	(141)
5.	微波接收和发送设备中的新技术	(147)
5.1	微波二端器件本振源和功率振荡器.....	(147)
5.2	新颖的微波和超高速电子器件.....	(153)
5.3	微波功率放大器的组合和线性化技术.....	(159)
5.4	单片与组件	(166)
6.	毫米波通信技术	(169)
6.1	毫米波段资源的开发和利用.....	(169)
6.2	毫米波大气传播特性.....	(171)

6.3 毫米波的发射和接收.....	(174)
6.4 毫米波传输线.....	(179)
6.5 介质谐振器.....	(185)
参考文献	(190)

1 绪 论

1.1 微波概述

微波，顾名思义是指波长甚短的电磁波，换言之即频率非常之高。通常工作在甚高频(VHF)，特高频(UHF)，超高频(SHF)或极高频(EHF)等的频段范围，一般是指其射频的高端由100MHz直至毫米波段。近年来由于毫米波技术的发展，已把射频的上限提高到1000GHz^[1]，可用带宽则更为广阔，使微波的面貌焕然一新^[2]。

按照波长和频率的关系，有

$$f\lambda = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.1)$$

式中 f 是频率，其单位为Hz， λ 是波长，其单位为m， c 是光速。

阐明一下电磁频谱状况。图 1.1 是按照国际无线电咨询委员会(CCIR)的规定，表示电磁频谱和频段划分的关系。

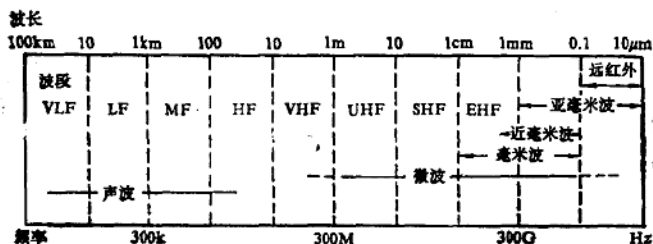


图 1.1 电磁频谱和频段划分

9110016

不同频段的电磁波都有各自的特征，在应用时亦有统一的规定。为了工作上的方便和需要常对一些频段细加划分，并以字母代称。这在国际上尚不完全一致。现将美国所采用的微波波段标准列于表1.1中。

表 1.1 常见部分波段称号及其频率范围

波段称号	频率范围(MHz)	波段称号	频率范围(GHz)
L	1120 — 1700	K	18 — 26.5
L _S	1700 — 2600	V	26.5 — 40
S	2600 — 3950	Q	33 — 50
C	3900 — 5850	M	50 — 75
X _N	5850 — 8200	E	60 — 90
X _B	7050 — 10000	N	90 — 136
X	8200 — 12500	D	137 — 143
K _u	12500 — 18000		

1.2 微波通信的几种方式

众所周知，微波已在许多科学技术领域中得到广泛的应用，并且在不断地发展着。但作为最基本和主要的方面则是通信和雷达，而又以微波通信具有一定的代表性。

微波通信系微波和通信相结合的一门学科，因其目的在于通信，故可认为它是通信科学的一个分支。它和其他通信方式相似，亦具有信息的采集、分析、加工、处理、变换、放大、发送、传输，直至接收、检测、反变换、加工处理，还有复接和交换等过程。其主要特点是工作于微波传输信道。

从应用的观点来看，现代微波通信有下列几种方式：

(1) 卫星通信(Satellite Communications)

卫星通信是利用卫星作为中继站或观测站传送各种信息，这在近年来得到很快的发展。最通常的卫星通信是从地球站发送信号至通信卫星，然后经卫星转发至接收目的地。它具有覆盖面积大，传输距离远，还可进行多址和移动通信业务，其优点较为突出。另外，卫星还可结合各种遥感、测控和制导等技术，使卫星通信应用得到了更大的发展，它具有十分广阔的前景。卫星通信的工作频率大多选用S、C、X和K等波段，V、Q和M波段亦在开发中。

(2) 微波接力通信 (Microwave Relay Communications)

这种通信以接力方式完成。信号由始发站发出后，经过若干中继站，以接力方式传送至终端站。其传输的电磁波基本上沿着地面的直线视距进行，站间的距离一般在50km左右。微波接力通信的工作频率可自150MHz—20GHz，典型的工作频段有2、4、6、7、8、9、11、12和20GHz等。由于它便于克服地形上的困难，建设灵活简便，费用也较为低廉等，因此颇受欢迎。

(3) 移动通信(Mobile Communications)

移动通信指的是移动用户间、移动用户与固定站之间或移动站之间的一种通信。所谓移动的用户或局、站，可以是陆地上的车辆、水面上的船只、空中的飞机或卫星等，因此大体上可以区分为陆地、海上和空中三种类型的移动通信。其任务是在一定区域内，针对一定数量的用户，提供一定业务等级的通信服务。近年来由于卫星通信的发展，也促进了这种通信业务的发展和扩大。其业务主要有：① 无线电话(Radiophone)，这指便携式双向无线电话系统。② 无线传

呼系统(Radio Paging Systems)，这指单向无线电寻呼系统，用户常随身携带一微型接收机，可以随时传呼。③调度系统(Dispatching Systems)，用于车队调度等。④移动电话(Mobile Telephone)，这是一种能提供商用长途电话业务的移动电话系统。⑤无线电数据包交换(Packet Radio)，将业务数据分成一个个数据包，然后通过一定的通信规程，发往目的地。移动通信的频率大多工作于UHF、L、C和K_u波段，亦可使用HF和VHF波段。

(4) 无线电系统(Radio Systems)

这种通信方式指在点和点间或一点对多点之间所进行的无线电通信，常把前者叫作点对点无线电系统，或称用户无线电通信系统，而把后者称作一点对多点无线电通信系统。它可用于边远地区、农村和城近郊区，具有投资少、安装简便、使用维护方便、适应性强，增容方便，可与市话网相连等优点。它也是发展中的一种通信方式。无线电系统的工作频率有短波、特高频、L、S和K等波段。

(5) 有线微波传输(Line Microwave Transmission)

以有线方式进行通信，这是传统最常用的方式。微波的传输线可以采用同轴电缆和波导等。但是若以此构成长距离的通信系统，其价格要比微波接力方式昂贵得多，故甚少采用。

(6) 散射通信(Scatter Communications)

利用对流层对电磁波的散射作用，进行超视距传播，可以实现微波的散射通信。其一跳的传播距离为100~500km，而传播的可靠性可达到99.9%。这种通信方式可用的工作频率为400~6000MHz，对于设计良好的对流层散射信道可提供12~240个FDM话路。此外，散射通信还可利用流星的反

射来实现。显然，这也是微波通信的一种重要方式。

以上简要地列出了几种主要微波通信方式的情况。对于各种通信应用的工作频率，上述仅表明其概况。对于频率的使用，在国际上，国际电报和电话咨询委员会 (CCITT) 有统一的规定；在国内，由国家无线电管理委员会负责管理。

1.3 微波通信的特点

采用较高频率的微波进行通信，可望在下列方面得到好处：

(1) 天线的增益高。当天线的面积给定时，天线的增益和波长的平方成反比。由于微波的波长短，容易制成高增益的天线。另外，自由空间电磁波传播的损耗和工作波长的平方约成正比，这样可从提高发射和接收天线的增益和减小传播损耗而获得足够的好处，从而可相对减小微波发射机的输出功率。

(2) 天线的方向性强。微波天线容易做到尖锐的方向性，因而可减小传输波道间的干扰。

(3) 通道容量大。由于微波的频率高，在相对带宽同一百分比的情况下，其波道的绝对带宽则要大得多，因而可传送较多的信息量，且速率高。此外，还可利用一定带宽天线方便地传送几个平行的微波波道。另一方面，虽然工作频宽得到增加，但它相对于微波载波的比值仍然较小，这有利于微波部件和设备的制备。

(4) 通信的稳定性较好。由于微波具有单色性，故在视距内的传播特性甚为稳定，但要受到地面环境和气候的影响。如果微波线路设计得当，这种影响可以抑制，使通信性

能保持稳定。另外，工作频率的提高对传播也有利，因为衰落虽然随频率的增高而增加，但第一菲涅尔区却减小了，这使地面的反射影响相对降低。

(5) 信噪比高。由于微波波段躲开了天电脉冲噪声和工业脉冲噪声的干扰，又由于微波天线的方向性尖锐，传播又在视距之内，因而通信时的噪声干扰较小，可使传输时的信/噪比得到提高。所以即使在微波传播时出现衰落现象，亦可做到信号输出的电平变化不大。

(6) 可靠性较高。微波通信是在点对点间进行，和有线通信方式相比，可减小地理条件影响，并且具有抗水淹、台风、地震等自然灾害能力，通信较为可靠。

(7) 微波通信组网的灵活性大，调整比较方便，同时，因只需建设站点，故建设速度快。

(8) 建设的投资和维护费用低。

微波通信也存在着一些问题。过去认为它的主要缺点为保密性差，因此一度曾影响它的发展。但是随着数字技术及加密技术的发展，使保密性得到了提高，同时人们对于通信保密问题亦有了进一步的认识，因此这个缺点是可以克服了。不过若就通信容量等方面和光纤通信相比较，是远非微波通信所能及的。另外，相对而言微波信道亦易受干扰，通信质量仍存在着一定的问题，技术上较为复杂，性能也不够稳定等。

1.4 模拟微波通信与数字微波通信

传统的通信方式几乎毫无例外地采用模拟信号。模拟信号亦称连续信号，它是连续的时间函数。因此对于其电路的

分析和计算，采用频域法较为简便。

对于模拟信号有三种调制方法，即调幅、调频和调相。调幅主要用于中、短波等波段的广播系统中，其技术最为容易，电路亦很简单，是最为常用的一种方法，但抗干扰能力最差。调频和调相在原理上较为接近，在技术上较调幅略为复杂，但业已相当成熟，其抗干扰性能较强，通信的质量也较好。以上三种调制方法均已在模拟微波通信系统中得到广泛的应用，但以频分一调频制较为突出。

由于模拟信号所占的频带较窄，其传输信道的频带利用率则较高。同时模拟微波通信的设备较为简单，且容易配套齐全，价格也较便宜，故当前我国仍用得很多。

另一类型的信号则是数字信号，它以数字方式表征模拟信号。它是离散的、可数的脉冲信号。由于数字信号的优越性，同样给微波通信带来好处，大大提高了微波通信的质量，从而形成了一种新型通信方式——数字微波。以这种方式进行通信正处在势头上，今后必有大发展。

世界上第一条模拟微波通信线路是出现在本世纪五十年代初，至今已有三十多年。由于微波通信有许多优点，发展十分迅速。因此近二三十年来，在地面传播条件较好的一些频段，如：2、4、6、7、8和11GHz等频段都被模拟微波通信所占满。继后，数字微波通信亦已得到迅速发展。第一条数字微波通信线路在六十年代初建成。

由于数字信号的离散性，使它占有较大的带宽，由此对信道的传输容量等相应带来一定的影响。其系统与电路的分析和计算方法亦较模拟信号的复杂，通常采用时域法较为合适。同样，数字微波通信系统中以时分一调相制较为常见。

对于数字信号的调制方式，通常也有三大类，即振幅键

控(ASK), 频率键控(FSK)和相位键控(PSK)。这也是建立在对正弦波的两个基本参量控制基础上的。为了提高频带的利用率, 在增加通信容量的同时不降低通信的可靠性, 即减小误比特率等, 可以采用以上三类的混合调制方式, 即: 混合调幅调相, 混合调幅调频和混合调频调相。必须指出, 调制解调方式是发展数字微波通信中的一个关键技术, 近年来各国研究了多种新型调制方式, 大大地提高了通信性能, 这将在下面介绍。

比较数字微波通信和模拟微波通信, 可知前者具有下列优点:

(1) 数字信号可在中继站再生而消除失真, 适宜于高质量超长距离传输, 并且亦便于开发新的频段, 例如对于12GHz以上的频段, 由于雨的影响极大, 对于模拟微波通信是难以使用的。

(2) 数字微波通信系统可与数字程控交换机直接相连, 不需要数—模转换设备。同时也适合传送综合数字业务网(ISDN)的信号, 例如可复接传送包括数据、电报、传真、电子信函、文件资料和可视电话等业务, 它要比模拟微波传送的效率 high 得多。

(3) 数字信号其本身抗干扰性强, 同时也可降低对其他通信系统的干扰。

(4) 易于加密处理, 以解决无线通信不能保密的重要问题。目前, 国际上典型商用保密处理机很容易做到密钥重数达 10^{50} 及循环长度达 10^{64} 左右。若以此加于64kb/s的用户线上, 则很难以破译。

(5) 上、下话路容易。这是由于数字微波调制解调的次要原则上没有限制, 而模拟微波只允许在数站中继后的调制

解调站上、下话路，因此会引起一些不便。

(6) 随着计算机技术和大规模集成电路的发展，便于电路进一步固体化，以提高通信系统的可靠性和有效性。

综上所述，数字微波通信无疑将是今后发展的一个重要方向。

1.5 数字微波通信系统的构成

数字微波通信系统一般由以下几大部分组成：

(1) 用户终端。即直接为用户所使用的终端设备。

(2) 交换机。用于非用户之间的电路交换。

(3) 终端复用设备。用以把来自交换机的各种业务信息变换成时分多路数字信号，并将其送入微波传输信道，同时亦把从微波信道收到的时分多路信号，以相反的方式变换成多路模拟信号传送至交换机。

(4) 微波站。其功能是以微波为载体传递数字信息。按工作性质不同，可分为微波终端站，微波中继站和微波分路站。微波站常固定于一个地点称为固定站，但亦可以移动方式进行工作，则称作移动站，移动微波站以移动方式进行微波通信。

图1.2表示微波终端站框图的一例。用户业务信息输入多路复用设备后，先作基带处理，并进行相应的控制，以适应所用调制方式的要求，然后将已调信号通过频率变换，使其成为给定的微波工作频率，再经放大以达到额定电平，最后通过滤波限带输出至天线。以上构成了发信系统。图的下半部则表示收信系统，包括接收滤波器、下变频器、中频滤波和放大器、解调器及基带处理等设备，其作用相当于发送的