

通信工程系列教材

WEIBO

CHUANSHU JISHU

微波传输技术

丁钟琦 主编



2 清华大学出版社

通信工程系列教材

微波传输技术

主编 丁钟琦

湖南大学出版社

2000年·长沙

图书在版编目 (CIP) 数据

微波传输技术/丁钟琦主编. - 长沙: 湖南大学出版社, 2000.8

通信工程系列教材

ISBN 7-81053-294-4

I. 微… II. 丁… III. 微波通信-数据传输 IV. TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 66889 号

内 容 提 要

本书阐述微波传输信息系统的组成与原理, 内容包括: 微波传播空间对微波传输的影响、波导传输线、特殊波导、空腔谐振器、微波元件 (波导元件)、微波天线、模拟及数字微波中继通信系统、辅助系统等, 共 10 章, 每章附有习题。

本书为高等理工类院校本、专科教材, 也可作继续教育工程的教材; 适合于无线电工程、信息工程、电子工程、通信工程、图象传输与处理等专业的学生使用, 亦可供从事通信工作的广大科技人员参考。

微波传输技术

Weibo Chuanshu Jishu

主编 丁钟琦

☐责任编辑 刘其斌

☐出版发行 湖南大学出版社

社址 长沙岳麓山 邮码 410082

电话 (0731) 8821691 (0731) 8821315

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 国防科技大学印刷厂

☐开本 787 × 1092 16 开 ☐印张 16.25 ☐字数 416 千

☐版次 2000 年 9 月第 1 版 ☐2000 年 9 月第 1 次印刷

☐印数 1-3 000 册

☐书号 ISBN 7-81053-294-4/TN·4

☐定价 24.00 元

(湖南大学版图书凡有印装差错, 请向承印厂调换)

通信工程系列教材编写委员会

主 任 谭扬林

副主任 程 京 康志伟

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁钟琦 邢诒存 伍任勇 肖 玲

杨用红 张 帆 周 敢 罗光明

钟 翔 曹其国 康志伟 程 京

谢冬青 谭 慧 谭扬林

通信工程系列教材

- | | |
|----------------|--------|
| 1. 信号与系统 | 主编 康志伟 |
| 2. 数字通信原理 | 主编 谭扬林 |
| 3. 程控数字交换原理及应用 | 主编 程 京 |
| 4. 光纤通信系统 | 主编 谭扬林 |
| 5. 移动通信原理 | 主编 曹其国 |
| 6. 现代通信网 | 主编 程 京 |
| 7. 微波传输技术 | 主编 丁钟琦 |

总 序

通信是人类社会传递信息,交流思想,传播文化知识的重要手段。通信与计算机的紧密结合,为通信技术的迅速发展不断注入新的生机和活力,现代通信系统和通信网正向数字化、智能化、宽带化、综合化、个人化方向发展,它是推动人类社会文明进步和发展的强大动力。

随着人类社会从大工业步入信息化社会,电子信息科学技术正以惊人的速度发展,日新月异,为人类生产力的发展开辟了一个新纪元。信息资源正成为一个国家和民族经济发展的重要战略资源和独特的生产要素。一个建设“信息高速公路”的浪潮正席卷全球,我们正面临着史无前例的一系列高科技的严峻挑战!

为了迎接挑战,为了培养面向 21 世纪的专门人材,我们组织了一批具有较高理论水平及丰富的教学、科研及工程实践经验,并长期从事通信技术研究开发及通信工程高等教育工作的同志编写了本套“通信工程系列教材”(共 7 种),由湖南大学出版社出版。它们是:《信号与系统》《数字通信原理》《程控数字交换原理及应用》《光纤通信系统》《移动通信原理》《现代通信网》及《微波传输技术》。

这套教材以当今广泛应用的通信系统和代表发展趋势的通信技术为背景,系统而较全面地阐述现代通信系统的基本概念、基本原理和基本分析方法等现代通信系统所涉及的基础理论。内容选择上着意取材的新颖性、先进性、代表性和实用性,并力求反映现代通信技术的最新发展和最新成果,尤其注意运用了与计算机结合点上的最新成果。在写法上力求条理清楚、深入浅出、循序渐进、理论联系实际,既注意必要的教学分析,又特别强调物理概念的理解和直观的教学分析。我相信通过这套教材的教学或自学,可使读者对通信工程有一个较全面清晰的了解。

张大方

千禧年元旦于长沙

前 言

微波传输尽管在 20 世纪 20 年代末期即已实现,但其应用及发展仍日新月异、兴旺不衰,一直得到世人的青睐。即使最先进的信息高速公路,也离不开微波传输。微波传输理论及应用技术,不断地吸引着世界上许多科学家去精心研究和开发。据此,在培养 21 世纪高科技人才时,国内外各高校相关专业莫不开设微波传输方面的课程。

作者根据多年从事教学的经验,针对大学本科教学,编写了本书。因微波传输理论及技术,内容非常丰富,本书篇幅虽较大,但仍不能完全包罗。限于篇幅,一些内容(如微波器件、许多微波通信电路、微波滤波器网络、微波测量等)只好忍痛割爱。

作者编写此书时力求逻辑清晰、论理充分、理论联系实际,易于学习。

本书由原湖南大学计算机通信专业(后调海南大学电子系)的丁钟琦主编,负责全书的组织、内容规划、修改与定稿工作,同时编写了第一、二、三、五、六章及附录;海南大学信息学院丁士华博士编写了第四章及第六章的第八节;海南师范学院电子技术专业周萍副教授编写了第七、九、十章;湖南大学电气工程学院曾文海副教授编写了第八章。在本书编写过程中,得到了湖南大学计算机与通信工程学院的大力支持;得到了海南大学信息学院的大力支持;得到了谭扬林老师的热情帮助与指导,他审阅了手稿,提出了许多宝贵意见;得到了冯晋臣教授、周又玲硕士、丁少琦同志的热情帮助,在此对他们表示衷心的感谢!本书的编写,参考了许多专家学者的论文及著作,在此一并向他们表示感谢!

由于编者水平有限,书中错误与疏漏难免,敬请读者批评指正。

编者

2000 年 6 月

目 次

第一章 绪论

§ 1-1 微波传输概述	(1)
§ 1-2 两种微波传输系统	(2)
一、模拟微波传输系统	(2)
二、数字微波传输系统	(4)
§ 1-3 微波中继传输	(6)
§ 1-4 微波传输系统的主要技术参数	(8)
§ 1-5 微波的应用及发展	(11)
复习思考题	(14)

第二章 微波传播

§ 2-1 概述	(15)
§ 2-2 地面对微波传播的影响	(17)
一、费涅尔区	(18)
二、费涅尔区对电波传播的影响	(19)
三、用费涅尔区解释阻挡物的影响	(20)
四、用费涅尔区分析平坦地面的反射	(21)
五、微波线路分类	(23)
§ 2-3 大气对微波传播的影响	(23)
一、大气折射	(23)
二、大气折射对余隙的影响	(26)
三、K 值及余隙的选择	(27)
§ 2-4 衰落	(29)
一、衰落的种类	(29)
二、衰落的统计特性	(30)

三、频率选择性衰落	(31)
§ 2-5 抗衰落技术	(34)
一、电平储备法	(35)
二、分集技术	(35)
三、天线最佳口面法	(37)
四、均衡技术	(37)
复习思考题	(39)

第三章 波导传输线

§ 3-1 概述	(41)
§ 3-2 波导中的电磁波	(42)
§ 3-3 矩形波导中的波动方程及其解	(44)
一、TM 波	(47)
二、TE 波	(48)
§ 3-4 矩形波导中波的传输特性	(50)
一、临界频率 (临界波长)	(50)
二、波导波长	(51)
§ 3-5 TE_{10} 波的特性	(52)
一、 TE_{10} 波的场强表示式	(52)
二、 TE_{10} 波的场强分布	(53)
三、 TE_{10} 波的特性参数	(55)
§ 3-6 圆形波导	(59)
一、圆形波导波动方程及其解	(59)
二、特性参数	(61)
三、圆波导中几种常用波型的分析	(62)
§ 3-7 同轴电缆中的高次波	(63)
一、TM 波	(63)
二、TE 波	(65)
三、传输 TEM 波必须满足的条件	(65)
§ 3-8 波导的衰减	(65)
§ 3-9 波导的设计	(66)
§ 3-10 波导的激励	(67)

一、电激励	(68)
二、磁激励	(68)
复习思考题	(68)

第四章 特殊波导

§ 4-1 概述	(70)
§ 4-2 带状线	(70)
一、带状线的特性阻抗	(71)
二、带状线的相位常数、传播速度与波导波长	(74)
三、带状线的衰减	(75)
四、带状线中的高次模及尺寸选择	(78)
§ 4-3 微带线	(78)
一、微带线的工作模式	(79)
二、微带线的特性阻抗	(80)
三、微带线中传播速度及波导波长	(83)
四、微带线的损耗与衰减	(84)
五、微带线的色散及尺寸选择	(84)
§ 4-4 耦合带状线与耦合微带	(85)
一、耦合传输线的基本方程	(85)
二、耦合带状线	(88)
三、耦合微带	(90)
§ 4-5 介质波导	(90)
一、介质波导的基本工作原理	(91)
二、介质板波导	(91)
三、介质杆波导	(94)
复习思考题	(97)

第五章 空腔谐振器

§ 5-1 概述	(98)
§ 5-2 波导型谐振腔	(99)

一、谐振波长的一般公式	(99)
二、谐振腔的场强	(100)
三、几种谐振腔的谐振波长	(101)
§ 5-3 常用的非波导型谐振腔	(104)
一、环形谐振腔	(104)
二、加载电容式同轴谐振腔	(106)
§ 5-4 谐振腔的 Q 值与等效电导	(107)
一、 Q 值	(107)
二、等效电导	(110)
§ 5-5 谐振腔的等效电路	(110)
§ 5-6 谐振腔的激励与耦合	(112)
一、激励(耦合)方式	(112)
二、圆柱腔 E_{010} 波的激励	(112)
三、波导与谐振腔耦合的等效电路	(112)
四、由等效电路求参数	(114)
复习思考题	(115)

第六章 微波元件

§ 6-1 概述	(116)
§ 6-2 波导阻抗及工作状态	(117)
一、阻抗	(117)
二、波导的工作状态	(119)
§ 6-3 膜片及谐振窗	(119)
一、膜片	(119)
二、谐振窗	(120)
§ 6-4 波导分支	(122)
一、T形接头	(123)
二、双T接头	(125)
三、环形桥路	(126)
§ 6-5 波导中的其它不均匀性	(127)
一、销钉	(127)
二、谐振隙	(128)

三、波导弯头及扭转波导	(128)
§ 6-6 抗流接头与短路活塞	(129)
一、抗流接头	(129)
二、短路活塞	(130)
§ 6-7 几种常用的波导元件	(132)
一、匹配负载	(132)
二、衰减器	(133)
三、移相器	(134)
四、阻抗变换器	(134)
五、定向耦合器	(136)
§ 6-8 微波铁氧体元件	(139)
一、微波铁氧体的性质	(140)
二、微波铁氧体与波导结合的元件	(143)
复习思考题	(146)

第七章 微波天线

§ 7-1 天线的基本参数	(148)
一、有效面积	(148)
二、天线增益	(148)
三、天线方向图	(149)
四、天线的频带宽度	(150)
五、天线的极化	(150)
六、天线阻抗与反射系数	(150)
七、天线的寄生耦合	(150)
§ 7-2 微波通信中的常用天线	(151)
一、抛物面天线	(152)
二、卡塞格伦天线	(153)
三、馈源	(154)
复习思考题	(155)

第八章 模拟微波中继通信系统

§ 8-1 模拟微波中继通信系统的构成	(156)
一、系统概况	(156)
二、系统设备构成	(156)
§ 8-2 频率配置	(160)
一、频率配置的原则	(160)
二、单波道频率配置	(160)
三、多波道频率配置	(161)
四、频率配置举例	(162)
五、本振频率	(162)
§ 8-3 频分多路电话信号及多路电话信号调频波的特性	(162)
一、频分多路电话信号的特性	(162)
二、多路电话信号调频波的特性	(165)
§ 8-4 噪声	(168)
一、噪声来源	(168)
二、热噪声	(169)
§ 8-5 群频通道的失真及失真噪声	(180)
一、调制-解调器综合转移特性非线性产生的组合波	(181)
二、输入为限谱白噪声时的串噪声	(184)
三、微分线性	(186)
四、串噪声信噪比的加权加重	(189)
§ 8-6 调频通道的失真及失真噪声	(191)
一、调频通道线性失真对调频波的影响	(191)
二、微分增益失真及噪声	(198)
三、微分相位(群延迟)失真及噪声	(203)
四、回波失真及噪声	(205)
复习思考题	(206)

第九章 数字微波中继通信系统

§ 9-1 数字微波中继通信系统的组成	(208)
一、天馈线系统	(208)
二、发信通道	(209)
三、收信通道	(209)
四、信道终端	(209)
§ 9-2 数字复接与分接	(210)
一、复接概念	(210)
二、同步复接	(210)
三、异步复接	(211)
§ 9-3 误码率	(214)
一、波形失真	(214)
二、调制、解调器引起的恶化	(214)
三、判决电路产生的判决电平误差	(215)
四、时钟定时误差及相位误差	(215)
五、放大器带宽	(215)
复习思考题	(216)

第十章 辅助系统

§ 10-1 切换电路	(217)
一、备份工作原理	(217)
二、数字基带切换系统	(217)
三、模拟微波通信的波道切换	(219)
§ 10-2 公务联络系统	(221)
一、公务信号的传送方法	(221)
二、模拟公务系统	(222)
三、数字公务系统	(224)
§ 10-3 监控系统	(229)
一、监控的必要性	(229)

二、监控方式	(229)
三、监控系统的基本功能	(231)
四、监控系统的组成	(231)
五、监控信号和控制线路	(233)
复习思考题	(233)
参考文献	(234)
附录	(235)
一、绝对电平与相对电平	(235)
二、话路噪声功率单位	(236)
三、直角坐标系中 $\nabla^2 L + K^2 L = 0$ 的解	(236)
四、圆柱坐标系中波动方程及其解	(237)
五、圆柱坐标系中场强横向分量与纵向分量的关系	(239)
六、阻抗圆图及其应用	(240)

第一章 绪论

§ 1-1 微波传输概述

所谓微波就是波长 λ 很短即频率 f 很高的电磁波。前面,它与超短波即甚高频($f = 30\text{MHz} \sim 300\text{MHz}$)波毗邻;后面,它和亚毫米波即超微波($\lambda = 0.1\text{mm} \sim 1\text{mm}$, $f = 300\text{GHz} \sim 3000\text{GHz}$)相交接,亦即 $\lambda = 1\text{mm} \sim 1\text{m}$ ($f = 0.3\text{GHz} \sim 300\text{GHz}$)的波称为微波。人们除了称甚高频(Very High Frequency, 缩写为 VHF)外,还习惯称 $f = 300\text{MHz} \sim 3000\text{MHz}$ 为特高频(UHF, U 为 Ultra 之缩写), $f = 3\text{GHz} \sim 30\text{GHz}$ 为超高频(SHF, S 为 Super 的缩写), $f = 30\text{GHz} \sim 300\text{GHz}$ 为极高频(EHF, E 为 Extreme 之缩写)。有时简称超微波为微波。

为了工作之便,常将 $1\text{GHz} \sim 325\text{GHz}$ 细分为表 1-1 所示波段。

表 1-1 常用微波分波段名称表

波段名称	频率(GHz)	波段名称	频率(GHz)
L	1.0~1.7	V	26.5~40
L _s	1.7~2.6	Q	33~50
S	2.6~3.95	M	50~75
C	3.9~5.85	E	60~90
X _N	5.85~8.2	N	90~136
X _B	7.05~10	D	137~145
X	8.2~12.5	G	140~220
K _u	12.5~18	R	220~325
K	18~26.5		

微波传输信息,是把微波用作信息的载体。在发信方,用振荡器产生微波,再用调制器使微波携带信息,然后将它放大,最后送到天线上辐射出去。此种带着信息的微波为远方的接收机所接收,再用解调方法将信息取出,微波便完成了传输的使命。

微波传输有以下一些优点:

1. 通信容量大

微波频段很宽($300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$),其频段宽度为 $300\text{GHz} - 0.3\text{GHz} \approx 300\text{GHz}$,它约为长、中、短波及超短波频段的总和的 1000 倍,可传输比其它波段多得多的欲传信号。又若从带宽看,也可得到同样的结论。因为微波频率高,在 Q 值一定时,微波电路的带宽很宽,而被传信号的频谱不宽(如语音信号为 $50\text{Hz} \sim 15000\text{Hz}$),故微波电路可传输许多路这样的信号。正因微波电路的带宽很宽,所以它才可较好地传输电视、数字信号等这样一些频谱较宽的信号。

2. 天线方向性强

微波有近于光波的特性,可用将它聚成窄波束的天线向特定方向发射,故微波天线有尖锐的方向性。

3. 天线增益高

天线增益是其方向系数与效率之积,微波天线方向系数大,故增益高。例如,直径 3m 的抛物面微波天线,当波长为 7.5cm 时,增益可达 40dB。

4. 信噪比高

微波传输基本上没有天电脉冲干扰、工业脉冲干扰,加之天线的方向性强,可以避开非传输方向的干扰,故信噪比高。

5. 建设投资少、见效快

建设微波传输系统的费用较低,按传输线路的公里数计算,其建设费用只有同轴电缆的 $1/3 \sim 1/2$,比光纤传输更低。象目前广泛应用的县级微波多路分配(传输)系统,简称为 MMDS (MMDS 为 Microwave Multichannel Distribution System 的缩写),只需 100 万元左右,它可复盖全县,使村民接收到 12 套电视节目。

建设微波传输线路只要建设微波站,进行无线电传输,故建设时间短,见效快。

6. 微波传输可靠性较高

微波传输具有单色性,在视距内的传输比较稳定。如果设计得好,传输基本上不受地面环境和气候的影响,具有抗水、抗台风的能力。

微波传输也有一些缺点。其主要缺点是保密性差,曾一度影响它的发展。随着数字技术应用到微波传输中以及加密技术的发展,使这一问题得到了较好的解决。微波传播特性接近光波,传播距离不太远,在长距离通信时,中途要设置若干中转站。微波传输的容量及抗干扰性方面不及光纤传输。微波传输的稳定性尚嫌不够,如电波传播时发生衰落将影响被传输信号的大小。如果微波线路设计得当,这种影响可以抑制。

本书将介绍微波传输有关方面的问题,内容包括微波传播的一些特性、模拟及数字微波通信系统以及辅助系统。微波传输必然用到传输信号的元件(如波导之类)、天线及馈线,因此,在本书中也予以介绍。不过,微波天线当属专门的课程,有专著讨论^[1],我们仅根据本课程的需要,择要介绍而已。

关于微波通信系统的具体设备及电路,微波测量,限于篇幅,本书只好割爱,有兴趣地读者可参阅有关文献^{[2]~[8]}。

§ 1-2 两种微波传输系统

20 世纪 50 年代初,世界上建成了第一个微波传输系统,它传输模拟信号,称为模拟微波传输系统。近 50 年来,地面传播条件较好的一些波段,如 2GHz、4GHz、6GHz、7GHz、8GHz、11GHz 等波段,均已被模拟微波传输所占用。随后,60 年代初,出现了第一个数字微波传输系统,而且发展很快。下面,我们先简要地介绍一下这两种传输系统,以后还要分章详述。

一、模拟微波传输系统

该系统框图如图 1-1 所示。图中被传输的信号首先加到多路复用设备。在模拟微波传输系统中,多路复用设备采用频分原理将许多路被传信号组合在一起而互不干扰。此组合信号称为群频信号、群路信号或基带信号。频分多路原理是采用调幅方法将各路被传信号分别调制到不同载频上使各自占据不同频率位置,依次排列,互不重叠。以传送 960 路电话信号为例,每一路的音频频带都是 300Hz ~ 3400Hz(传输电话信号,只要 300Hz ~ 3400Hz 即可,若是乐器、唱歌信号,则频带宽得多,一般是 50Hz ~ 15000Hz)。为不使各被传信号调幅后相互窜扰,应使调幅后的群频信号中相邻的两路之间留有 900Hz 的间隙,作为保护频带。这样,每一话路的基本频带为 $(3400 - 300 + 900)\text{Hz} = 4000\text{Hz}$ 。

第 1 路电话信号对频率为 64 kHz 的载波进行调幅,调幅后,除 64 kHz 载波外,尚有上边

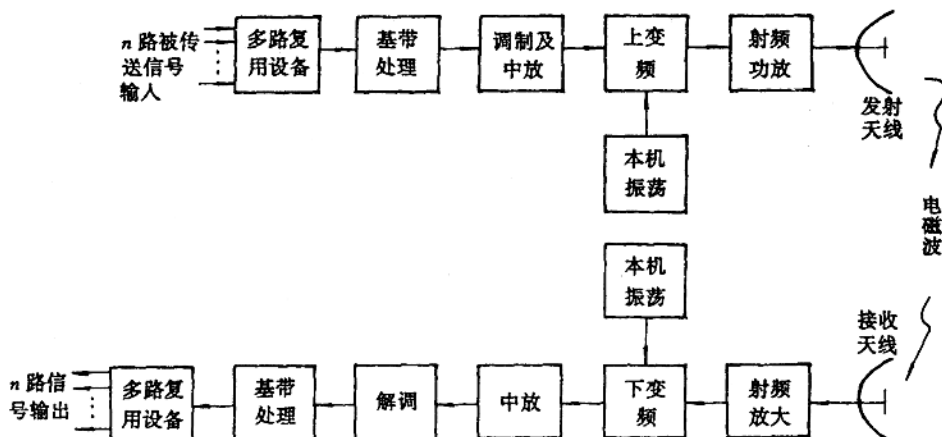


图 1-1 模拟微波传输系统方框图

带,其频率为 $(64000 + 300)\text{Hz} \sim (64000 + 3400)\text{Hz}$ 。而下边带则为 $(64000 - 3400)\text{Hz} \sim (64000 - 300)\text{Hz}$,即 $60.6\text{kHz} \sim 63.7\text{kHz}$ 。4GHz/960 路微波传输系统的复用设备采用单边带传输,即滤去载波及上边带,选取下边带传输。这样第 1 路占据的频带为 $60.6\text{kHz} \sim 63.7\text{kHz}$ 如图 1-2 所示

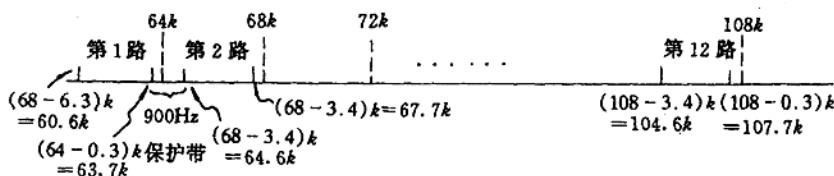


图 1-2 频分多路原理图

示。第 2 路电话信号对 $(64 + 4)\text{kHz} = 68(\text{kHz})$ 的载波进行调幅,用滤波器取出下边带,它的频带范围是 $(68 - 3.4)\text{kHz} \sim (68 - 0.3)\text{kHz}$ 即 $64.6\text{kHz} \sim 67.7\text{kHz}$ 如图 1-2 所示。类似地,第 3、4……12 路电话信号分别对 72kHz 、 76kHz 、 80kHz 、 84kHz 、 88kHz 、 92kHz 、 96kHz 、 100kHz 、 104kHz 、 108kHz 的载波进行调幅并全取下边带。第 12 路占据的频带为 $(108 - 3.4)\text{kHz} \sim (108 - 0.3)\text{kHz}$ 即 $104.6\text{kHz} \sim 107.7\text{kHz}$ 。这 12 路信号为一组,称为基群信号,总的频带范围为 $60.6\text{kHz} \sim 107.7\text{kHz}$,一般取为整数 $60\text{kHz} \sim 108\text{kHz}$ 。由五个基群信号分别对五个频率为 420kHz 、 468kHz 、 516kHz 、 564kHz 、 612kHz 的载波进行调幅并全取下边带。五个下边带分别是 $(420 - 107.7)\text{kHz} \sim (420 - 60.6)\text{kHz} = 359.4\text{kHz} \sim (468 - 107.7)\text{kHz} \sim (468 - 60.6)\text{kHz}$ 即 $360.3\text{kHz} \sim 407.4\text{kHz}$ 、 $(516 - 107.7)\text{kHz} \sim (516 - 60.6)\text{kHz}$ 即 $408.3\text{kHz} \sim 455.4\text{kHz}$ 、 $(564 - 107.7)\text{kHz} \sim (564 - 60.6)\text{kHz}$ 即 $456.3 \sim 503.4\text{kHz}$ 、 $(612 - 107.7)\text{kHz} \sim (612 - 60.6)\text{kHz}$ 即 $504.3\text{kHz} \sim 551.4\text{kHz}$ 。这样,共有 $12 \times 5 = 60$ 路电话信号。此 60 路电话信号群称为超群,其频带为 $312.3\text{kHz} \sim 551.4\text{kHz}$,一般取为整数 $312\text{kHz} \sim 552\text{kHz}$ 。

基群和超群是两个标准群,用它们可组成更多的话路。用 16 个超群可组成 $16 \times 60 = 960$ 路电话信号群,方法仍然如上。第 1 个超群对频率为 612kHz 的载波进行调幅,取下边带,为 $60\text{kHz} \sim 300\text{kHz}$,如图 1-3 所示。第 2 个超群不必调幅进行频率迁移,直接排列在第 1 个超群之后,二者之间有 12kHz 的间隙(保护带)。第 3 个超群对频率为 1116kHz 的载波进行调幅,取下边带,为 $(1116 - 552)\text{kHz} \sim (1116 - 312)\text{kHz}$ 即 $564\text{kHz} \sim 804\text{kHz}$,它与第 2 个超群之间的空隙