

WEIBOZHONGJIYUANLIHESHEBEI

山东省广播电视厅微波总站编

微波中继原理和设备

45993

III

中国广播电视出版社

73.25993
111

广播电视中等专业学校试用教材

微波中继原理和设备

山东省广播电视厅微波总站编

中国广播电视出版社

8810492

责任编辑：萧 歌

D024/16

微波中继原理和设备

山东省广播电视厅微波总站编

中国广播电视出版社出版
大兴沙窝店印刷厂印刷
新华书店北京发行所经销

787×1092毫米 16开 22.75印张 567(千)字
1987年12月第1版 1987年12月第1次印刷
印数：1—8,000

统一书号：15236·023 定价：3.50元

ISBN 7-5043-0021-7/ TN·11

1987.12.1

出版者的话

为了适应广播电视中等教育事业发展的需要，改变教材严重缺乏的局面，广播电影电视部教材编审委员会组织力量编写一批中专工科教材，并由中国广播电视出版社出版，公开发行。这批计划出版的专业教材有：《广播声学》、《广播播控设备》、《有线广播技术》、《电视播控设备》、《彩色电视摄象机》、《录象设备》、《数字电视》、《微波技术基础》、《微波中继原理和设备》，共计九种。在教材编写过程中，力求做到立论正确、概念清楚、理论联系实际。

这批教材暂作试用教材，适于招收初中毕业生、学制为四年的学校使用。鉴于目前各学校招生对象、学制、专业划分和课程设置不尽相同，各校可根据情况选用。设有相近专业的其它中等专业学校和职业高中也可选用本教材。

这批教材还可以作为干部培训的中级教材和职工自学的参考书，也可以供具有高中文化程度和一定无线电基础知识的读者阅读。我们殷切希望广大读者对本教材提出意见和建议，帮助我们做好教材出版工作。

前 言

本教材是根据 1985 年 4 月在贵阳召开的广播电视中等专业学校工科教材大纲审定会通过的《微波中继原理和设备》教学大纲编写的,可作为四年制和二年制中专微波专业的试用教材,也可以作为广播电视系统从事微波设备维护工作的技术人员的自学参考书。

全书共分十七章,其中一至五章讲述微波中继通信的基本原理和微波传播的基本知识;六至十三章分析微波收发信机的工作原理和测试方法;十四至十七章分析电视调制解调机的工作原理和电视通道测试方法。

本课程总学时为 150 学时。建议各校结合教学进度安排一定的时间,让学生到微波站参观、实习,以使他们对微波设备建立起感性认识,增强实际知识和操作技能。

本书由山东省广播电视厅微波总站承编。各章节具体分工如下:第一至五章和第十七章由吴明亮执笔,第六至十三章由王仁亭执笔,第十四至十六章由高彤鼎执笔。

白玉琨、张棣二同志对本书初稿提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中一定存在许多问题和错误,恳请各校师生和读者提出批评意见。

编 者

1987 年 4 月

目 录

第一章 微波中继通信系统概述	(1)
1.1 频分多路电话通信	(1)
1.2 微波中继通信的特点	(6)
1.3 微波中继系统	(7)
1.4 微波中继系统的频率分配	(10)
1.5 微波中继设备的基本组成	(17)
第二章 信号的电平及其传输特性带宽	(21)
2.1 电平	(21)
2.2 调频波的传输特性带宽	(32)
第三章 噪声及其控制技术	(37)
3.1 噪声的来源和噪声加权	(37)
3.2 热噪声的额定噪声功率	(39)
3.3 噪声系数	(40)
3.4 调频热噪声	(47)
3.5 加重技术均衡信杂比的原理	(52)
第四章 电视传输系统的失真和杂波	(54)
4.1 线性失真	(54)
4.2 非线性失真	(62)
4.3 杂波和干扰	(66)
4.4 回波的影响	(68)
4.5 电视传输中的加重和加权	(69)
4.6 失真和杂波的叠加规律	(73)
第五章 微波传播	(79)
5.1 电波在自由空间的传播	(79)
5.2 地形对电波传播的影响	(80)
5.3 对流层对电波传播的影响	(96)
5.4 衰落现象及其克服措施	(105)
第六章 微波中继通信设备的组成	(108)
6.1 概述	(108)
6.2 微波收发信机的组成和电平图	(109)
第七章 发信通道	(115)
7.1 限幅中频放大器	(115)
7.2 功率中频放大器及代振器	(122)

7.3 发信本振源	(125)
7.4 发信混频器	(137)
7.5 行波管放大器	(139)
第八章 收信通道	(149)
8.1 收信本振源	(149)
8.2 收信混频器	(149)
8.3 前置中频放大器	(152)
8.4 第一中频放大器	(156)
8.5 主中频放大器	(158)
第九章 天线馈线系统	(172)
9.1 天线	(172)
9.2 馈线系统	(176)
第十章 辅助系统	(181)
10.1 信号指示系统	(181)
10.2 信号告警系统	(181)
10.3 超基带公务联络系统	(184)
第十一章 电源系统	(186)
11.1 直流稳压器	(186)
11.2 直流变换器	(191)
11.3 电源控制系统	(195)
11.4 微波站上电源配置	(201)
第十二章 2GHz/300 路微波中继通信设备	(203)
12.1 概述	(203)
12.2 微波收发信机的组成和电平图	(205)
12.3 微波振荡源	(214)
12.4 平衡式混频器	(218)
12.5 前置中频放大器	(223)
12.6 电源系统	(229)
12.7 天馈线系统	(233)
12.8 次基带公务联络系统	(242)
第十三章 微波收发信机的测量	(249)
13.1 噪声系数的测量	(249)
13.2 收信机中频输出电平、自动增益控制范围和代振启闭电平的测量	(254)
13.3 幅频特性的测量	(255)
13.4 微波功率的测量	(260)
13.5 驻波比的测量	(263)
13.6 微波频率的测量	(268)
第十四章 电视调制解调机的工作原理	(274)
14.1 电视调制解调机的作用	(274)

14.2 电视调制解调机的总体结构.....	(275)
14.3 调制部分的工作原理.....	(281)
14.4 解调部分的工作原理.....	(285)
14.5 公用电路和辅助电路.....	(289)
第十五章 调制解调电路.....	(296)
15.1 中频调制电路.....	(296)
15.2 副载频调制电路.....	(307)
15.3 中频解调电路.....	(313)
15.4 副载频解调电路.....	(326)
第十六章 电视调制解调机的单元电路.....	(335)
16.1 视频放大电路.....	(335)
16.2 输出电路.....	(340)
16.3 输出控制电路.....	(343)
16.4 收信监测电路.....	(345)
16.5 噪声比较电路.....	(348)
16.6 导频振荡器.....	(349)
第十七章 电视通道的测量.....	(351)
17.1 通道测量的概念和意义.....	(351)
17.2 视频通道测量.....	(352)
17.3 插入测试信号.....	(356)
17.4 伴音通道测量.....	(357)

第一章 微波中继通信系统概述

微波中继通信是一种先进的通信技术。它具有通信容量大、传输质量高和稳定可靠等优点。目前,国内微波中继设备大都采用频分多路-调频制式。本章首先讲述大容量通信的基本原理和多路电话信号频谱的组成,然后介绍微波中继通信系统的组成和工作方式,讨论中继系统的频率分配问题,最后介绍 8 GHz 和 2 GHz 微波中继设备的基本组成。

1.1 频分多路电话通信

一、什么是多路电话通信

我们知道,在电话通信中,由电话机把声音转换成电信号后,经过线路传送到对方,再由电话机把电信号还原成声音。这种方法,一条线路只能传送一个电话通路(简称一个话路)。如果有 100 个用户同时通话,就需要有 100 条线路。显然,这种通信方式既不能满足日益增长的话路需要,又造成很大的浪费。那么,能不能利用一条公共线路,同时传送成百上千个话路,而又互不干扰呢?实践证明是完全可以的。这种利用一条公共线路同时传送多个话路的通信方式,就叫做多路电话通信。

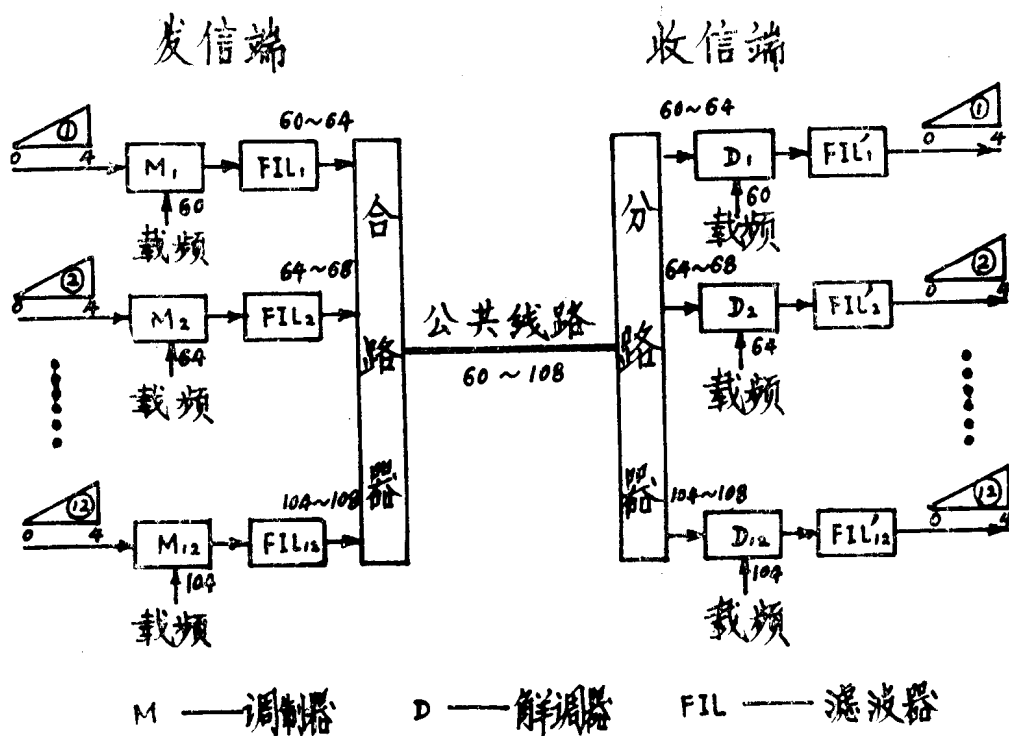
二、实现多路通信的方法

为了实现多路电话通信,只简单地把各个用户的信号混合在一条公共线路上是不行的。我们知道,尽管每个话路的语言内容千差万别,每个用户的语言声调又各不相同,但大量的统计分析表明,人们语言声音的基本频带大致在 300~3400Hz 范围内。如果简单地把代表不同声音的电信号混合在一起,势必会造成互相窜扰,无法分开。由此自然会想到,为了使许多频带相同的电话信号互不窜扰,应该使它们各自占据不同的频率位置。因此,必须对多路电话信号进行频带迁移。具体办法是,先把每路电话信号移到各个不同的载频上,按载频高低依次排列起来进行传输。由于各个话路信号处于不同的载频位置,它们在公共线路上传输就不会产生干扰。到了接收端,再把电话信号从载频上取下来。这种按载频不同把话路混合和分开的传输方式,叫做频率复用方式,或简称频分多路(FDM)。

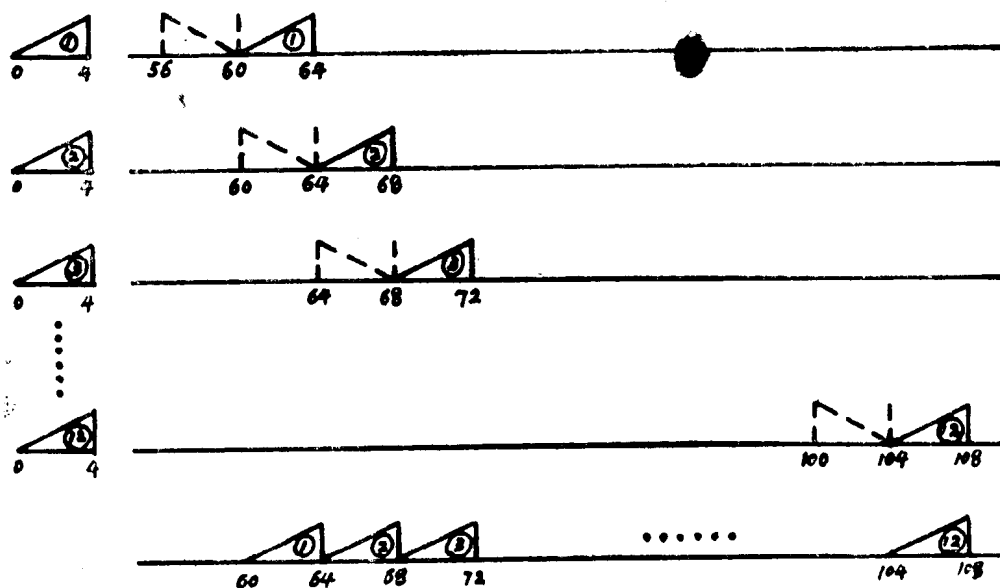
除了上述频率复用方式外,还有时间复用方式,也叫时分多路(TDM)。它是利用时间分割原理,把不同话路信号的传输按时间区分开来,进行数字化编码,然后再按一定规律的时间间隔轮流复用线路,实现多路通信。

三、频率复用原理

频率复用的基本原理是:利用载波的办法,把多路电话信号的基本频带迁移到不同的载频位置上,使它们依次排列,互不重叠干扰。这种频带迁移,也称频率变换,简称变频。变频是由变频器来完成的,它由调制器(或解调器)和带通滤波器组成。下面,我们以 12 个话路为例,说明频带迁移的过程,如图 1-1 所示。



(a) 基本组成



(b) 频带迁移

图1-1 频分制12路电话通信

图中：频率单位为 KHz

前面讲过,每个话路信号的基本频带都是 $300\sim 3400\text{Hz}$ 。为了防止各个话路信号在频带迁移过程中,因传输电路的频率特性失真而产生重叠干扰,应使各相邻的话路基本频带的前后都留有空隙。因此在频分多路系统中,每个话路的基本频带通常定为 4KHz ,如图中所示,用下面标有0和4的直角三角形来代表一个话路的基本频带。

在发信端,为了对12个话路信号进行变频,需要设置12个载频,分别选取 $60、64、68\cdots\cdots 104\text{KHz}$ 。如图所示,话路①的信号被加到调制器 M_1 上,对 60KHz 载频进行调幅并抑制其载频,在调制器输出端得到残余载频和上、下两个边带,经过带通滤波器 FIL_1 取出上边带(或下边带),得到话路①的单边带信号。同样,话路②信号对 64KHz 载频调幅后,经带通滤波器 FIL'_1 取出话路②的单边带信号,等等。显然,12个话路信号通过变频,其基本频带保持不变,但在频率坐标轴的位置上发生了迁移:话路①占据 $60\sim 64\text{KHz}$,话路②占据 $64\sim 68\text{KHz}\cdots\cdots$ 话路⑫占据 $104\sim 108\text{KHz}$ 。频带迁移的结果,使12个话路信号在 $60\sim 108\text{KHz}$ 的迁移频带内依次排列起来,互相都不重叠。这样,就可以通过合路器复用线路,向收信端传输。

在收信端,首先利用分路器把各个话路的单边带信号从迁移频带上选出来,然后通过解调器和带通滤波器,输出各自的话路信号。

上述频分多路电话信号的传输,由于利用了载波进行变频,所以叫做载波电话通信。这种通信设备,叫载波机。载波机送到线路上的频分多路电话信号,叫做群频信号,它们所占据的频率范围称为群频频带。

四、频分多路电话信号的频谱组成

为了使载波机能够复用更多的话路,从理论上讲,可以按上述方法设置更多的载频,把所有话路信号依次向更高的频率方向排列起来,这是采用一次变频的方法。但实际上这种方法是难以实现的。因为话路越多,需要的载频越多,相应的调制器、解调器、滤波器等部件的规格也越多,不利于制造和成批生产。另一方面,话路越多,使用的载波就越高,而频率的漂移会越严重,这样反而会影响相邻话路信号的隔离,造成串扰。

由此可见,为了实现大容量通信,必须采用多级变频。所谓多级变频,就是频带的多次迁移,即把原始信号频带迁移到群频频带上,不是一次完成的,而是经过多次变频才完成。在多级变频中,还要用到群变频的概念。群变频指所要变频的信号不是一个话路信号,而是由若干路信号组合在一起的群信号。通过变频,把整个一群信号的频谱迁移到新的频率位置上,这就叫做群变频。频分多路通信最基本的原理,就是把多路电话信号经过多级变频,达到传输通道所能适应的群频频谱。目前通用的载波机系列都是以12个话路的合成信号为一个基本单元,称为一个基群,以基群为基础,来组成60路、120路、300路、960路、1800路等大容量通信系统。

为了使载波机生产系列化、标准化,而且便于不同容量的载波机相互转接和分路,载波机的频谱系列和设备制式已经标准化国际。电报电话咨询委员会(CCITT)建议采用以下几种标准频谱。

1. 一个话路(CH)的频谱安排为 4KHz ,而话音信号用滤波器限制在 $0.3\sim 3.4\text{KHz}$ 频带内。

2. 基群(G),即上面讲的12路组,频谱为 $60\sim 108\text{KHz}$ 。它由12个话路分别与12个话路载频 $64、68、72\cdots\cdots 108\text{KHz}$ 调制后取下边带组成,如图1-2所示。

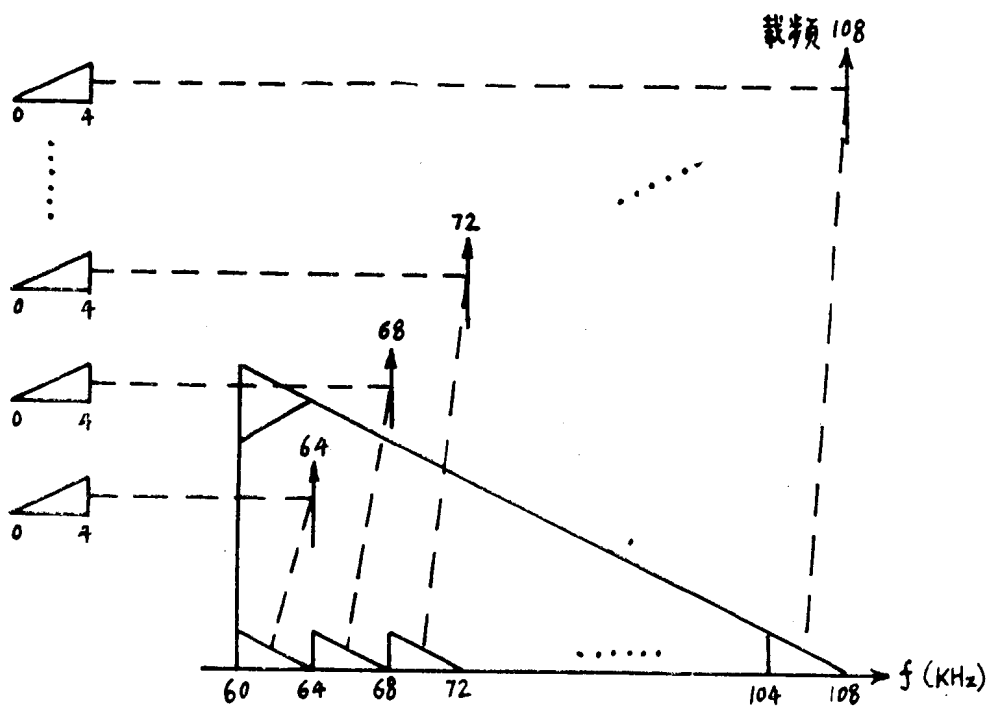


图 1-2 基群标准频谱的构成

3. 超群 (SG), 又称 60 路组, 频谱为 312~552KHz。它是由 5 个基群标准频谱分别与基群载频 420、468、516、564 和 612KHz 调制后取下边带组成, 如图 1-3 所示。

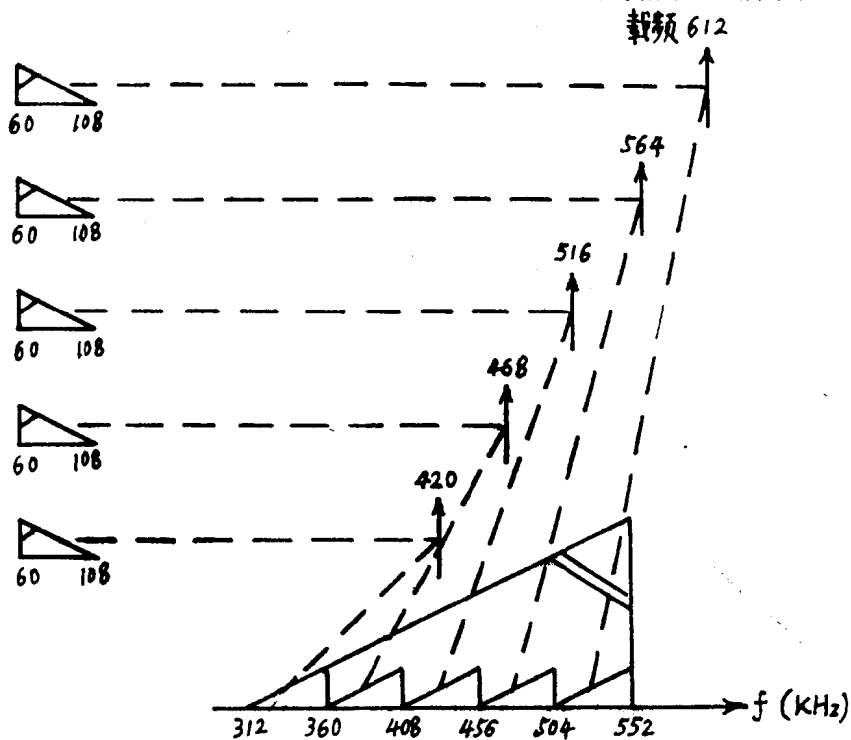


图 1-3 超群标准频谱的构成

4. 主群(MG), 又称 300 路组, 频谱为 812~2044KHz。它是由 5 个超群分别与超群载频 1364、1612、1860、2108 和 2356KHz 调制后取下边带组成, 如图 1-4 所示。

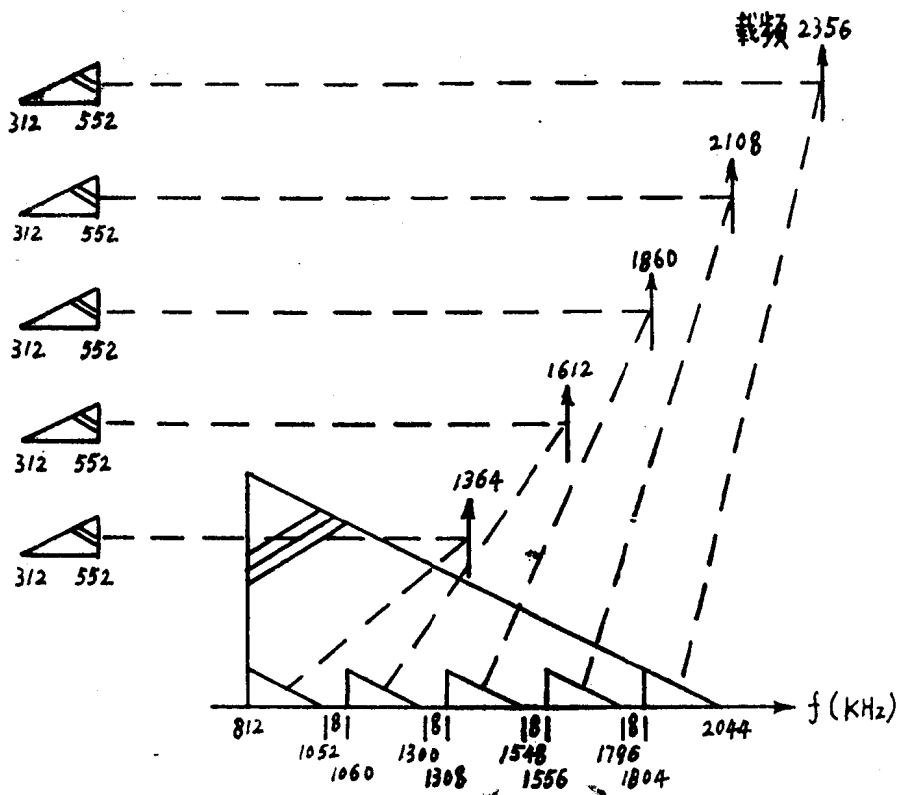


图 1-4 主群标准频谱的构成

5. 超主群(SMG), 又称 900 路组, 频谱为 8516~12388KHz。它是由 3 个主群分别与主群载频 10560、11880、13200KHz 调制后取下边带组成, 如图 1-5 所示。

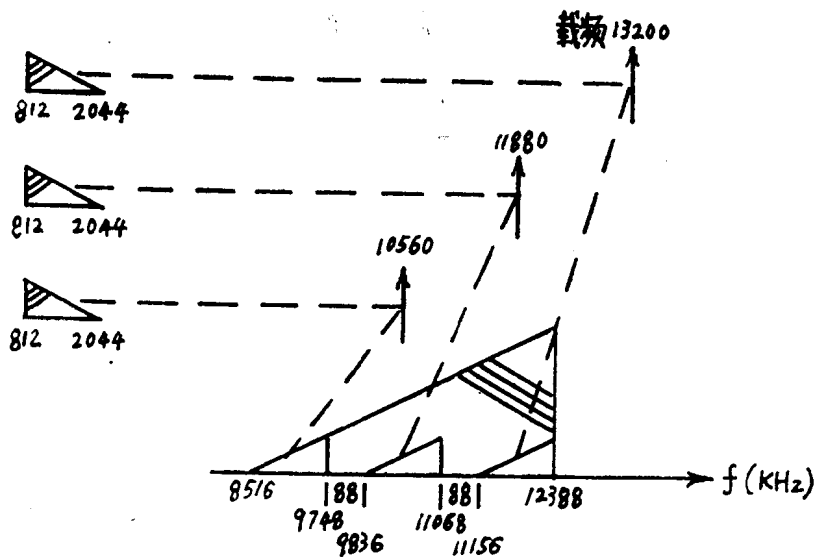


图 1-5 超主群标准频谱的构成

由上述可知，频分多路传输系统的所有调制级，都采用单边带抑制载频的传输方式，一般取其下边带，所以每经过一级调制，频谱就反转一次。

在频分多路复用系统中，将多个话路按预定的标准频谱逐级变频的过程，称为通路编组。采用上述标准频谱进行通路编组，就可以组成大容量通信系统。例如 960 路（Ⅰ型机系统）的频谱为 60~4148KHz，是由 11 个超群和 1 个主群组成。1800 路的频谱为 312~8428 KHz，是由 10 个超群和 4 个主群组成。

1.2 微波中继通信的特点

一、什么是微波通信

在无线电技术中，通常用频率（或波长）作为无线电波最有表征意义的参量。这是因为频率相差很远的无线电波，具有很不相同的传播特性。比如长、中波沿地面传播，绕射能力很强，而微波却只能沿直线传播，绕射能力很弱。因此，人们把无线电波按频率来命名，如表 1-1 所列。表中某一频率范围内的无线电波，具有大致相同的性质。

表 1-1 无线电波频段的划分

频 段	频 率	波 长
长 波	30 ~ 300 KHz	1000 ~ 10000 m
中 波	300 ~ 3000 KHz	100 ~ 1000 m
短 波	3 ~ 30 MHz	10 ~ 100 m
超 短 波	30 ~ 300 MHz	1 ~ 10 m
微 分 米 波	300 ~ 3000MHz	1 ~ 10 dm
厘 米 波	3 ~ 30 GHz	1 ~ 10 cm
波 毫 米 波	30 ~ 300 GHz	1 ~ 10 mm

由表 1-1 可知，微波是指频率为 300MHz~300GHz、波长为 1m~1mm 范围内的无线电波。所谓微波通信，就是利用微波频段的无线电波传递信息的一种通信方式。

二、微波通信的特点

微波通信是一种新兴的通信技术，它具有一系列的特点，归纳起来主要有以下几点。

1. 微波的波长很短，具有类似光波的传播特性，绕射能力很弱，容易被障碍物反射，只能在视距范围内传播。由于地球表面是弯曲的，为了避开传播途中的障碍物，需要架设较高的天线塔，或在高山顶上建站。因此，要实现远距离的微波通信，需要采用接力的方式，将信号多次转发。另一方面，由于微波在空间传播过程中，能量会受到较大损耗，所以也必须采用接力方式，逐段收放大，弥补能量损失，才能实现远距离通信。接力就是中继，微波接力通信，也叫做微波中继通信。

2. 微波波段具有很宽的频带。频带越宽，容纳的无线电信道越多，传递的信息也越多。从表 1-1 可见，长波到超短波的总频带不超过 300MHz，而微波的频带宽达 300GHz，是前者的 1000 倍。

另外，在微波通信中，微波是作为运载信息的载波来使用的。载频越高，从工程设计的角度出发，通信设备的通频带容易做得越宽，通信容量也就越大。

3. 由于微波的波长很短，可以使用尺寸较小的天线，把电磁波聚集成一个很尖锐的波束，象探照灯的光束那样，按指定的方向发射，使得传播能量高度集中。这样，微波发信机一般只需要发射几瓦的功率就能够传输几十公里。此外，由于微波天线的方向性很强，通信中的相互干扰现象也大为减弱。

4. 在微波波段，电波受工业、天电和宇宙等外部干扰的影响很小，12GHz以下的常用微波波段，受风雨冰雪等恶劣气象条件的影响也较小。因此微波中继通信的质量稳定可靠。

综上所述，由于微波通信具有容量大、传输质量高两个显著的特点，微波中继传输在电视、广播信号的远距离传送方面，以及其他方面，如国防、铁道、石油、电力、气象等各部门的专用通信中都得到日益广泛的应用。

1.3 微波中继系统

前面讲过，远距离微波传输的一个重要特点是需要中继，这就要求每隔几十公里设置一个中继站，采用接力方式组成一条传输线路。

一、线路的组成

微波中继线路，是由两端的终端站和中间的许多中继站组成的。微波干线上的信号经过中继站分路，又构成微波支线，干线和支线组成整个微波中继传输网。

终端站简称端站，它的任务一方面是把电视台送来的视频信号和伴音信号，调制成中频信号后，再变换成微波信号发射出去。另一方面，从接收到的微波信号里，解调出视频和伴音信号送往电视台。简言之，端站只对一个方向收发，如图1-6所示。

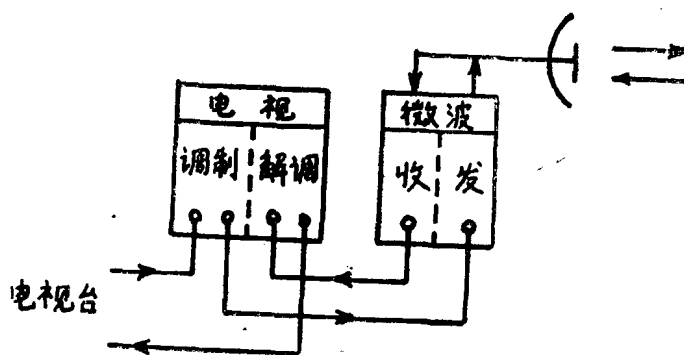


图 1-6 端站示意图

中继站的任务是完成微波信号的放大和转发，如图1-7所示。根据是否分出或加入信号，中继站又分为两种类型。

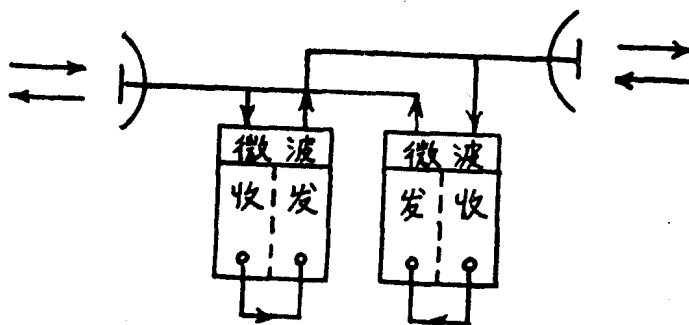


图 1-7 中继站示意图

1. 中间站，不需要分出或加入信号，只将微波信号进行放大和转发。首先将微波收音机收到的微波信号进行变频，变成 70MHz 中频信号，经中频放大器放大后，再送入微波发信机进行变频，变换成另一频率的微波信号向下一站转发。由此可见，信号的转接是在中频上进行的，称为中频转接。这比在微波频率上直接转发有更多的优点。首先，中频信号比微波信号容易处理，中频的调制、解调和放大都容易实现高质量。其次，采用中频转接，端站和中继站的微波收发信机可以统一规格，给生产和维护都带来很大方便。有些中间站还担负分路任务，把干线上传输的微波信号经过变频、放大，转发到支线上去。

2. 主站，是需要分出或加入信号的中继站。在主站，一方面把收到的微波信号继续往下一站转发，另一方面，经过解调设备取出电视信号供当地转播台使用，或者经过调制设备把当地的节目送入微波线路进行传输。有些主站同时也担负向支线转发微波信号的任务。

二、系统的工作方式

1. 多波道运用

为了增加微波中继线路的传输容量，微波站可以使用好几套收、发信设备同时工作，每套设备工作在不同的频率上，它们之间用滤波器分开，但共用一套天线、馈线系统。这样，每一套微波收、发信机就构成了一条独立的传输通道，称为一个波道。通常一条微波电路上可以设置若干个波道并联工作，使整个电路的传输容量大大增加。

目前广播电视系统的微波电路，大都采用 8 GHz 频段，也有一部分采用 2 GHz 频段。根据国际无线电咨询委员会(CCIR)建议，8 GHz 频段内设置了 8 个波道，2 GHz 频段内设置了 6 个波道。

2. 导频

由载波机送到微波发信机的群频信号，除了包含前面讲的频分多路电话信号外，还有一些导频信号。电视调制机在用电视信号调制 70MHz 中频时，也要加入导频信号。在整个微波中继系统中，用来指示或控制该系统传输特性的单频引导信号，称为导频。通常把频分多路电话信号或电视信号，包括导频信号在内所占有的频带，称为基带。在电视传输系统中，导频的频率是 9.023MHz，处于基带的最高端，而且是一个幅度稳定的单频信号。所以导频最能反映传输通道的基本传输状况。如果线路工作不正常，导频首先受到影响，这时接收部分应自动切换到备用设备上去。导频除了用作微波线路通断的监测和控制外，还可以用作微波收音机的自动增益控制。

3. 备用制式

为了确保微波线路的畅通,除了精心设计微波电路、提高传输设备质量和加强维护管理外,必须采取备用措施。在备用制式上,一般有两种方案。一种是机组备用,即在一个波道上设置两套微波收发信机,一套主用,另一套备用,当主用设备发生故障时,立即以备用设备替换。另一种是波道备用,即设置专门的备用波道,当主用波道设备发生故障或者产生电波传播衰落时,自动切换到备用波道上去。

目前 8 GHz 中继系统采用 1:1 波道备用制式,即一个主用波道,配一个备用波道。以端站为例,在发信端,电话(或电视)调制机通过三角形分路网络把信号分成两路,经调制放大后变成两路中频信号,分别送入两个波道的微波发信机,构成“发端并发”形式,同时发出微波信号。在收信端,相应的两波道收信机分别接收前站发来的两路微波信号,解调放大后,经星形网络合为一路信号输出。这是“收端合路”形式,如图 1-8 所示。当两波道中任一波道由于设备故障或者电波传播发生深衰落时,都会使基带内的噪声升高或者使导频信号下降甚至丧失。这时控制电路会自动切断故障波道,保证正常波道单路信号输出。

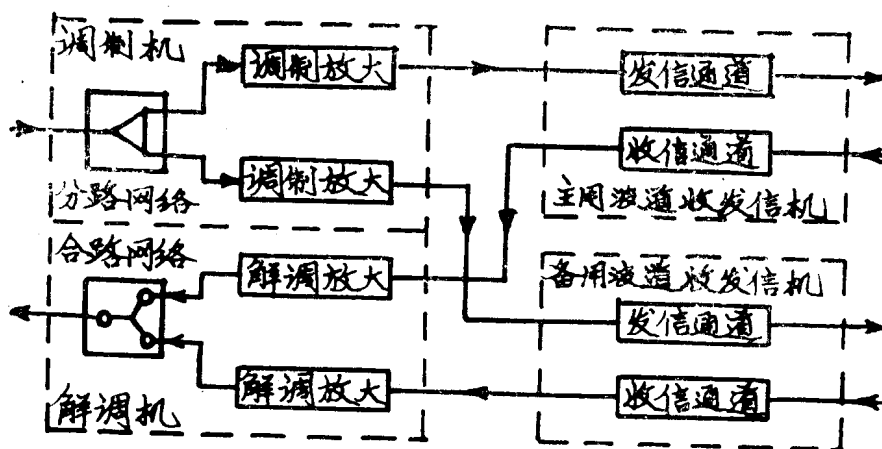


图 1-8 8 GHz 波道备用方框图

2 GHz 中继系统根据总体设计要求, I、V 波道或 II、VI 波道为电话波道,其中 I 或 II 为主用波道, V 或 VI 为备用波道,组成 1:1 波道备用制式。以端站为例,在发信端,通过三角网络把输入信号分成两路,分别送至 I、V 波道的发信通道,构成“发端并发”形式。在收信端,主、备设备的收信通道分别接收前站发来的两路微波信号,经解调放大后,利用基带内的导频信号控制倒换开关,在两个波道的输出信号之间进行自动选择:当主用波道工作正常时,导频信号也正常,信号从主用波道取出;当主用波道设备发生故障或电波产生深衰落时,导频信号就控制倒换开关动作,输出信号从备用波道取出,这就构成“收端倒换”形式,如图 1-9 所示。

2 GHz 系统的 III 波道或 IV 波道为电视波道,采用机组备用制式。仍以端站为例,在发信端,电视调制机经过三角网络把信号分成两路,经调制放大后把两路中频信号送入同一电视波道(III 波道或 IV 波道)的两个发信机去,输出两个同频率的微波信号。为了防止同频发射干扰,设置了天线开关,使主用发信机的输出信号进入天线向外发射。当主用发信机出现故障时,通过人工倒换天线开关,将备用发信机的输出信号送入天线。这是“发端并发、人工倒换”形式。在收信端,主、备用收信机经过定向耦合器隔离,接收同一个微波信号,经