



高等学校教材

电力线载波通信

四川联合大学 袁世仁 主编



新
知
學

PDG

740936

高等学校教材

电力线载波通信

四川联合大学 袁世仁 主编



YD06/28



21113001094530

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是电力高等院校通信工程专业教材，共分十二章。本书着重讲述电力线载波通信系统的构成及其工作原理，并对部分以往教材讨论较少或尚未涉及，且又是掌握现代电力线载波机必需的新技术、新方法，如集成化的调制器、压扩器、FSK 调制解调器、数字锁相环频率合成器等新技术，数字信号处理等新方法的基础知识，以及收发频带紧邻、复用高频保护与微机自动交换系统基础等新内容进行了较详细的论述。此外还较全面地介绍了 ESB-500、ESB-2000 型现代新型电力线载波机系统的组成及原理。

本书为高等院校电力系统通信专业教材，也可供有关专业的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力线载波通信/袁世仁主编. —北京：中国电力出版社，1998

高等学校教材

ISBN 7-80125-477-5

I. 电… II. 袁… III. 电力线载波通信系统-高等学校-教材 IV. TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19142 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1998 年 4 月第一版 1998 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 442 千字

印数 0001—2070 册 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)



前 言

本书是根据“电力工业部高等学校通信工程专业教学协作组”第五次会议通过的《电力线载波通信教材编写纲要》的要求，并参照国家教委正在制定和实施的《面向 21 世纪教学内容和课程体系改革研究计划》所强调的，“我国高等教育的教学内容，应当把当代科技的新进展反映到教学过程中去”的精神，而编写成的一门专业课教材。

电力线载波通信是电力通信网的基础之一，是传送电力系统继电保护、远动信息、组织电力调度指挥的一种重要通信手段。近年来电力线载波通信技术的面貌发生了重大变化，现代电力线载波与微电子学、数字技术、数字信号处理、微型电子计算机相结合，使电力线载波通信的技术水平发展到了一个崭新的阶段，涌现出了许多新型电力线载波机。我国通过研制和引进技术，已经能批量生产多种新型电力线载波机，并在电力系统中成功地大量投入使用，标志着我国的电力线载波通信技术及运行管理水平，已经步入了国际先进行列。

为了使本教材能反映时代的进步，本书在教材的体系结构、内容选材上，作了一些努力。在对国内外 10 余种新型电力线载波机所涉及的新技术与理论知识进行研究分析与归纳的基础上，适当压缩了部分传统内容，充实了许多掌握现代电力线载波通信新技术所必须了解的新内容，如集成调制器、集成压扩器、集成自动增益控制放大器、集成 FSK 调制解调器、集成数字锁相环频率合成器、数字信号处理与数字滤波器的基础知识、电力线载波复用高频保护的原理、收发频带紧邻原理与乱真发射防卫度的计算，以及微机自动交换系统基础等新内容。

本书内容包括多路载波和电力线载波，但重点是电力线载波。全书共十二章，讨论了载波通信的基本原理、电力线载波通信系统、差接系统、压扩器、调制器、载供系统、自动电平调节系统、呼叫系统、现代电力线载波机的体系结构、新型电力线载波机、微机自动交换系统基础和载波通路的质量指标等内容。

本书的第一、五、六、八、九、十章由四川联合大学袁世仁编写，第四、七、十一章由华北电力大学鲍慧编写，第二、三、十二章由华北电力大学毛恩启编写。本书由袁世仁任主编，教授级高工陈维千担任主审。

本书中除个别涉及具体设备及国外集成器件外，所有文字符号和图形符号原则上采用国家有关新标准符号。

在本书的编写过程中得到了电力部中国电力企业联合会、国电通信中心、四川电力调度局、电力部扬州电讯仪器厂、南京有线电厂、山东电讯十厂、江苏清江无线电总厂、许昌继电器厂和绵阳 730 厂等单位的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者学识水平有限，书中错误在所难免，诚请广大读者批评指正。

编者

1997 年 7 月

目 录

前 言	
第一章 载波通信的基本原理	1
第一节 概述	1
第二节 频分复用多路通信的基本原理	2
第三节 多路载波通信系统的组成	11
第二章 电力线载波通信系统	20
第一节 电力线载波通信系统的组成原理	20
第二节 电力线高频通道的耦合装置与耦合方式	21
第三节 分支线路和载波桥路	22
第四节 高频通道上的杂音	24
第五节 电力线载波机的性能及组成原理	27
第六节 电力线载波的通信方式	34
第七节 电力线载波通信的转接	36
第八节 其他形式的电力线载波通信	39
第三章 差接系统	42
第一节 混合线圈的工作原理	43
第二节 等臂混合线圈	48
第三节 混合线圈的应用	49
第四节 平衡衰减	51
第四章 压缩扩展器	55
第一节 作用与特性	55
第二节 压扩器的工作原理	61
第三节 实际电路介绍	65
第四节 瞬态失真与频率特性	71
第五章 调制器	75
第一节 作用、要求与分类	75
第二节 桥式调制器	77
第三节 环形调制器	82
第四节 无源晶体三极管调制器	90
第五节 有源晶体三极管调制器	97
第六节 集成电路调制器	105
第六章 载供系统	116
第一节 载供系统的技术要求	116
第二节 载供系统的组成	121

第三节	锁相环工作原理	126
第四节	锁相环路的基本部件	133
第五节	CMOS4046 型单片集成锁相环	150
第七章	自动电平调节系统	155
第一节	自动电平调节系统的作用	155
第二节	自动电平调节系统的构成及原理	157
第三节	热电式自动电平调节系统	162
第四节	其他形式的自动电平调节系统	170
第五节	系统的静态特性	174
第六节	自动电平调节系统的技术要求	179
第八章	呼叫系统	181
第一节	作用与组成	181
第二节	技术要求和防误动措施	187
第三节	FSK 呼叫信号的产生	191
第四节	FSK 呼叫信号的接收	198
第九章	现代电力线载波机的体系结构	205
第一节	电力线载波机的特点与技术要求	205
第二节	单边带电力线载波机的体系结构	207
第三节	电力线载波机复用高频保护	223
第十章	新型电力线载波机	230
第一节	ESB-500 型电力线载波机	230
第二节	数字信号处理的基本概念	238
第三节	ESB-2000 型电力线载波机	250
第十一章	微机自动交换系统基础	262
第一节	作用与逻辑要求	262
第二节	分立元件自动交换系统	264
第三节	微机自动交换系统原理	266
第四节	TCP-1 型微机程控自动交换系统	278
第五节	电力线载波机与自动交换机的接口	286
第十二章	载波通路的质量指标	291
第一节	传输电平	291
第二节	通路净衰减频率特性	297
第三节	通路稳定度	299
第四节	通路振幅特性	300
第五节	通路的杂音	302

第一章 载波通信的基本原理

第一节 概 述

为达到联系的目的，采用电的或非电的任何方法，通过任何媒质（有线、无线或光学传输系统等），将信息（如语言、文字、数据或图像等）从一地传到另一地的过程，称为通信。通信按其业务内容、传送信号的物理性质与方式、传送媒质的不同，可划分成多种类别。例如通信按其业务内容可分为电报、电话、传真、数据、图像通信等；按传送信号的物理性质可分为电信号通信（简称电信）和光通信；按传送信号方式可分为模拟通信和数字通信；按传送媒质可分为有线通信和无线通信等。

载波通信是有线长途通信中应用十分广泛的一种通信方式。它是根据频率搬移、频率分割原理，将原始信号对载波进行一次或多次调制，搬移到不同的线路传输频带，然后送到线路上传输，从而实现多路通信的一种通信方式。载波通信不仅可用来实现多路电话通信，而且还可以二次复用，在一个或若干个话路上开放载波电报、广播节目、电视、传真、传输数据和实时遥控、遥信、遥测信号等。

早期的有线长途通信是用架空明线把安装在甲乙两地的两部电话机直接连接起来而实现的，称为音频长途通信。但是音频长途通信具有通信距离短、线路利用率低等缺点，不能满足长途通信的需要。延长通信距离、提高长途通信线路的利用率是发展长途通信必须解决的两个基本课题。载波通信能在一对通信线路上同时开通多路电话通信，并且通过加装放大器可以极大地延长通信距离，有效地解决了长途通信的两大基本课题，因而得到了巨大地发展。数十年来载波通信一直是有线长途电信中应用最广泛的一种通信方式。尽管现代信息科学、计算机通信、数字通信、光纤通信、微波通信、卫星通信等取得了飞跃的发展，但目前载波通信仍是模拟长途通信中最主要的通信方式。

载波通信按其话路容量可分为单路、3、12、24、60、120、300、600、900、1800、2700、7200、10800、13200路载波电话等。按传输线路可分为明线载波、电缆载波和海底电缆载波等。

电力线载波是一种利用高压输电线路作为高频信号传输线路的长途通信方式，用于电力调度所与变电所、发电厂之间的通信，是电力系统特有的一种通信方式。利用高压输电线路传输高频电流具有以下优点：

- 1) 线路衰减小；
- 2) 输电线路机械强度很高，因而具有较高的传输可靠性；
- 3) 不需要通信线路建设的基建投资和日常维护费用等。

因此，电力线载波对小容量、长距离通信来说，是一种经济可靠的通信方式。多年来，在电力系统通信网的规划设计中，电力线载波作为电力系统传输信息的基本手段得到

了广泛采用。

第二节 频分复用多路通信的基本原理

一、频率搬移

多路通信是指利用一条公共线路或信道，同时传输若干路相互无关的消息的通信方式。利用一条线路同时进行多路通信而互不干扰的方法称为线路复用。目前，实现线路复用的方法主要有两种，即频分制和时分制。频分制多路通信也称频分复用，它是指在一条公共线路或信道上利用不同频率来传送各路消息，以实现多路通信的方式，适用于模拟通信系统。载波通信系统就是典型的频分复用多路通信系统。时分制多路通信也称时分复用，它是在一条公共线路或信道上，按照时间的次序依次循环地传送各路消息的采样值，以实现多路通信的方式，适用于数字通信系统。它的工作原理属于“数字通信”课程的内容，本书不作讨论。

我们知道，电话信号是一个复杂的随机波形，可分解成许多个频率的正弦波之和，占有 $80\sim 8000\text{Hz}$ 带宽，电话信号基带的频谱能量大部分集中在 4kHz 以下，测试表明采用 4kHz 带宽来传送一路话音信号，无论在响度上还是话音清晰度上，都能得到相当满意的话音质量。所以国内外都统一规定一路电话信号的带宽为 $0.3\sim 3.4\text{kHz}$ 。同时我们注意到各种实际传输线路的实用传输频带远比 4kHz 宽，例如，目前架空明线实用传输频带的最高频率可达 300kHz ，对称电缆可达 600kHz ，同轴电缆可达 60MHz ，电力线高频通道可达 500kHz 。由此可见，在一条传输线路或信道的实用传输频带宽度内，实际上可以同时容纳多路电话信号，这就为传输线路的频分复用，即利用一条传输线路实现频分制多路通信提供了物理基础。

实现频分制多路通信的物理过程如图 1-1 所示。它所包含的基本概念是“频率搬移”。由图可见，要想在同一条公共传输线路上传输的各路信号互不干扰，首先在发信端必须把

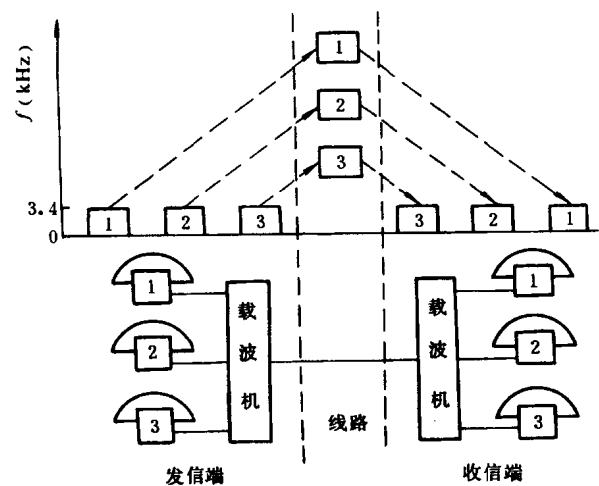


图 1-1 频率搬移过程示意图

各路原始话音信号的基带频谱 $0.3\sim 3.4\text{kHz}$ ，通过“频率搬移”搬到适合线路传输的频带内并依次排列起来，且互不重叠，然后在线路上传输到受信端。在受信端，利用各路信号所占用的线路传输频带的位置不同，通过“频率分割”把各路信号频带分割出来，再各自进行反“变换”，恢复其原来的基带频谱，最后分别由各自对应的用户接收，从而实现了频分制多路通信。

“频率搬移”也叫“频率变换”，简称“变频”，其实质就是把信号的频

带从一个频段搬移到另一个频段。实现“变频”的部件称为变频器。我们讨论的载波通信，就是按照频率搬移、频率分割原理实现频分多路复用的一种通信方式。

二、非线性元件的变频作用

(一) 非线性元件

电路元件的参数与外加的电压或电流强度有关，称为非线性元件。对电阻元件而言，若其伏安特性不服从欧姆定律，即电阻中电流强度的变化与外加电压不成比例，称为非线性电阻。晶体二极管也是典型的非线性元件，由晶体管电子学可知，它的伏安特性不符合欧姆定律，而是遵循如下特定的非线性函数关系

$$\begin{aligned} i &= I_s(e^{\frac{q}{kT}u} - 1) \\ &= I_s(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 U_T ——等效热电势， $U_T = kT/q$ ；

q ——电子电荷量， $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

T ——绝对温度，K， $T = 273 + t$ ($^{\circ}\text{C}$)；

k ——波尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

I_s ——反向饱和电流；

u ——瞬时电压。

在室温 $t = 27^{\circ}\text{C}$ 时， $U_T = kT/q = 26\text{mV}$ 。通常晶体二极管两端的外加电压 $u \gg 26\text{mV}$ ， $e^{\frac{u}{U_T}} \gg 1$ ，所以式 (1-1) 可简化为

$$i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}} \quad (1-2)$$

即晶体二极管的伏安特性曲线近似为指数曲线，如图 1-2(b) 所示，并可用幂级数表示为

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + \dots \quad (1-3)$$

式中 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ ——各项的常数。

在工程分析中可近似写为

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 \quad (1-4)$$

(二) 单一余弦电压作用下的变频作用

设在二极管两端加上单一余弦电压 $u = U_m \cos 2\pi f t$ ，由图 1-2 可见，流经二极管的电流波形 i 发生了畸变，即产生了非线性失真。

将外加电压 $u = U_m \cos 2\pi f t$ 代入式 (1-3)，得

$$i = a_0 + a_1 U_m \cos 2\pi f t + a_2 U_m^2 \cos^2 2\pi f t + a_3 U_m^3 \cos^3 2\pi f t + \dots \quad (1-5)$$

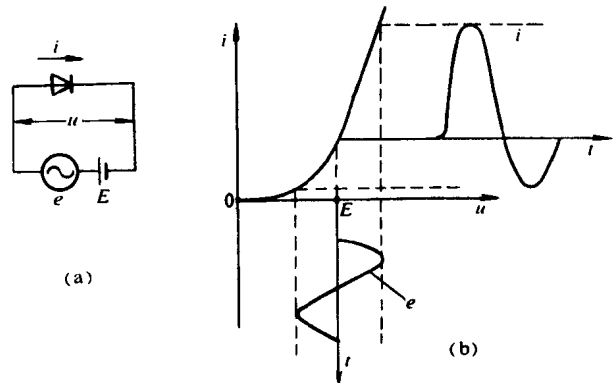


图 1-2 晶体二极管的伏安特性与非线性失真
(a) 电路图；(b) 伏安特性

利用下列三角公式

$$\cos^2 2\pi ft = \frac{1}{2}[1 + \cos 2\pi(2f)t]$$

$$\cos^3 2\pi ft = \frac{1}{4}[3\cos 2\pi ft + \cos 2\pi(3f)t]$$

$$\cos^4 2\pi ft = \frac{1}{8}[3 + 4\cos 2\pi(2f)t + \cos 2\pi(4f)t]$$

代入式 (1-5), 并整理可得

$$i = A_0 + A_1 \cos 2\pi ft + A_2 \cos 2\pi(2f)t + A_3 \cos 2\pi(3f)t + \dots \quad (1-6)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= a_0 + \frac{1}{2}a_2 U_{mf}^2 + \frac{3}{8}a_4 U_{mf}^4 + \dots \\ A_1 &= a_1 U_{mf} + \frac{3}{4}a_3 U_{mf}^3 + \dots \\ A_2 &= \frac{1}{2}a_2 U_{mf}^2 + \frac{1}{2}a_4 U_{mf}^4 + \dots \\ A_3 &= \frac{1}{4}a_3 U_{mf}^3 + \dots \\ A_4 &= \frac{1}{8}a_4 U_{mf}^4 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

由式 (1-6) 可知, 流经二极管的电流, 不仅含有外加电压的频率成分, 还含有直流、二次谐波、三次谐波以及高次谐波分量。这就表明当余弦 (正弦) 信号作用于非线性器件时, 输出产生了新的频率成分。

(三) 两个不同频率的余弦电压同时作用下的变频作用

如果把两个不同频率 F 、 f 的余弦电压 u_F 、 u_f , 如图 1-3 (a) 所示, 同时加到晶体二极管上, 则二极管两端的瞬时电压为

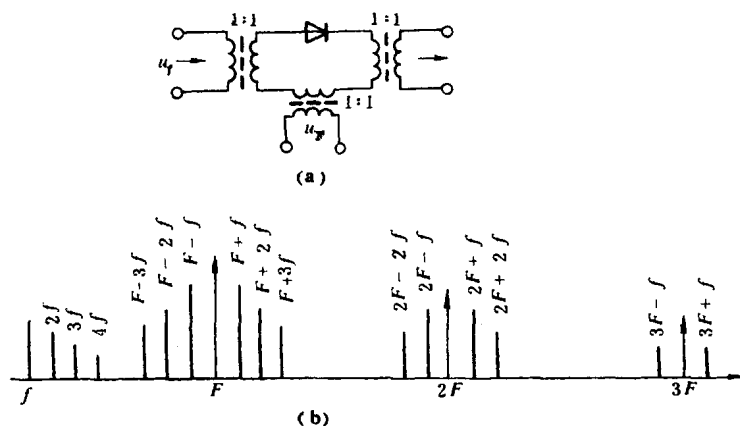


图 1-3 非线性元件的变频作用

(a) 原理电路; (b) 输出产物

$$u = u_f + u_F = U_{mf} \cos 2\pi ft + U_{mF} \cos 2\pi Ft$$

式中, u_F 称为载波电压, u_f 称为调制信号。

将瞬时电压 u 的值代入式 (1-3), 并整理得到输出电流

$$\begin{aligned}
i &= a_0 + a_1(U_{mf}\cos 2\pi ft + U_{mF}\cos 2\pi Ft) + a_2(U_{mf}\cos 2\pi ft + U_{mF}\cos 2\pi Ft)^2 \\
&\quad + a_3(U_{mf}\cos 2\pi ft + U_{mF}\cos 2\pi Ft)^3 + \cdots \\
&= \left(a_0 + \frac{1}{2}a_2U_{mf}^2 + \frac{1}{2}a_2U_{mF}^2 + \cdots\right) \quad \text{直流分量} \\
&\quad + \left(a_1U_{mf} + \frac{3}{2}a_3U_{mf}U_{mF}^2 + \frac{3}{4}a_3U_{mf}^3 + \cdots\right)\cos 2\pi ft \quad \text{信号基波分量(信漏)} \\
&\quad + \left(a_1U_{mF} + \frac{3}{2}a_3U_{mf}^2U_{mF} + \frac{3}{4}a_3U_{mF}^3 + \cdots\right)\cos 2\pi Ft \quad \text{载波基波分量(载漏)} \\
&\quad + \left(\frac{1}{2}a_2U_{mf}^2 + \cdots\right)\cos 2\pi(2f)t + \left(\frac{1}{2}a_2U_{mF}^2 + \cdots\right)\cos 2\pi(2F)t \quad \text{二次谐波} \\
&\quad + (a_2U_{mf}U_{mF} + \cdots)\cos 2\pi(F-f)t \quad \text{差频} \\
&\quad + (a_2U_{mf}U_{mF} + \cdots)\cos 2\pi(F+f)t \quad \text{和频} \\
&\quad + \left(\frac{1}{4}a_3U_{mf}^3 + \cdots\right)\cos 2\pi(3f)t + \left(\frac{1}{4}a_3U_{mF}^3 + \cdots\right)\cos 2\pi(3F)t \quad \text{三次谐波} \\
&\quad + \left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}U_{mF}^2 + \cdots\right)\cos 2\pi(2F-f)t \\
&\quad + \left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}U_{mF}^2 + \cdots\right)\cos 2\pi(2F+f)t \\
&\quad + \left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}^2U_{mF} + \cdots\right)\cos 2\pi(F-2f)t \\
&\quad + \left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}^2U_{mF} + \cdots\right)\cos 2\pi(F+2f)t \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} &\left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}U_{mF}^2 + \cdots\right)\cos 2\pi(2F-f)t \\ &\left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}U_{mF}^2 + \cdots\right)\cos 2\pi(2F+f)t \\ &\left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}^2U_{mF} + \cdots\right)\cos 2\pi(F-2f)t \\ &\left(\frac{3}{4}a_3U_{mf}^2U_{mF} + \cdots\right)\cos 2\pi(F+2f)t \end{aligned}} \right\} \text{三次组合波项} \\
&\quad + \cdots \quad (1-8)
\end{aligned}$$

由式 (1-8) 可以看出, 输出电流所包含的频率成分是十分丰富的。在输出电流中不仅包含有直流分量与两个外加信号电压频率 F 和 f 的基波分量和谐波分量, 而且还包含了许多和频分量与差频分量。其中一次项产生了两个频率的基波分量 F 与 f , 分别称为载漏与信漏; 二次项产生了两个频率的二次谐波分量 $2f$, $2F$ 以及频率为 $F \pm f$ 的组合波分量; 三次项产生了两个频率的三次谐波分量 $3f$ 和 $3F$, 以及频率为 $F \pm 2f$ 、 $2F \pm f$ 的组合波分量, 而高次项还将产生更多的频率分量。所有这些分量统称为组合频率分量, 其分布情况如图 1-3 (b) 所示。这些频率产物成分可以统一地用式 (1-9) 表示

$$|\pm pF \pm qf| \quad (1-9)$$

式中 $p, q=0, 1, 2, \cdots$ 。

对于任何一个 n 次方项能产生哪些组合频率分量成分, 有如下规律:

- (1) 当 n 为偶数时, $p+q$ 也是偶数。
- (2) 当 n 为奇数时, $p+q$ 也是奇数。
- (3) $p+q$ 的最大值小于或等于 n 。
- (四) 有用产物

载波通信变频的目的在于把原始信号的频带搬移到适合线路传输的频带上, 因此对变频后的信号有如下要求:

(1) 变频后的信号频率与原始信号的基带频率不同, 以实现频率搬移。

(2) 变频后的信号应能反映出原始信号的特征。

分析式 (1-8) 各项输出产物可知, 能同时满足上述两项要求的输出产物是由二次项产生的两个输入频率的和频项与差频项, 即

$$(a_2 U_{mf} U_{mF} + \cdots) \cos 2\pi(F + f)t$$

$$(a_2 U_{mf} U_{mF} + \cdots) \cos 2\pi(F - f)t$$

它们的振幅与输入信号振幅成正比, 而频率由 F 和 f 共同决定, 能实现频率搬移, 故称为有用产物, 其余各项统称为无用产物。无用产物对载波通信是有害的, 若泄漏出将会干扰其他话路或信道的通信。无用产物中以 $F \pm 2f$ 和 $F \pm 3f$ 频率成分危害最大, 因为这两类产物的幅度较大, 且其频率距有用边带 $F \pm f$ 又较近, 不容易完全用滤波器滤去, 所以必须严格控制。为了减少无用产物, 在工程应用中, 常令 $U_{mf} \ll U_{mF}$, 即调制系数

$$m_a = \frac{U_{mf}}{U_{mF}} \ll 1$$

通常取 m_a 值为 $0.02 \sim 0.001$, 故包含 U_{mf} 的二次方项以及高次方项均可忽略不计。又因高次项的系数 a_4 、 $a_5 \cdots$ 等的值很小, 故高次项产物一般也可忽略不计, 因此式 (1-8) 可近似写为

$$\begin{aligned} i = & \left(\frac{1}{2} a_2 U_{mF}^2 + \cdots \right) && \text{直流分量} \\ & + \left(a_1 U_{mf} + \frac{3}{2} a_3 U_{mf} U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi f t && \text{信漏} \\ & + \left(a_1 U_{mF} + \frac{3}{4} a_3 U_{mF}^3 + \cdots \right) \cos 2\pi F t && \text{载漏} \\ & + \left(\frac{1}{2} a_2 U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi(2F) t && \text{二次载漏} \\ & + (a_2 U_{mf} U_{mF} + \cdots) \cos 2\pi(F - f) t && \text{差频} \\ & + (a_2 U_{mf} U_{mF} + \cdots) \cos 2\pi(F + f) t && \text{和频} \\ & + \left(\frac{1}{4} a_3 U_{mF}^3 + \cdots \right) \cos 2\pi(3F) t && \text{三次载漏} \\ & + \left(\frac{3}{4} a_3 U_{mf} U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi(2F - f) t \\ & + \left(\frac{3}{4} a_3 U_{mf} U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi(2F + f) t \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} i = & \left(\frac{1}{2} a_2 U_{mF}^2 + \cdots \right) \\ & + \left(a_1 U_{mf} + \frac{3}{2} a_3 U_{mf} U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi f t \\ & + \left(a_1 U_{mF} + \frac{3}{4} a_3 U_{mF}^3 + \cdots \right) \cos 2\pi F t \\ & + \left(\frac{1}{2} a_2 U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi(2F) t \\ & + (a_2 U_{mf} U_{mF} + \cdots) \cos 2\pi(F - f) t \\ & + (a_2 U_{mf} U_{mF} + \cdots) \cos 2\pi(F + f) t \\ & + \left(\frac{1}{4} a_3 U_{mF}^3 + \cdots \right) \cos 2\pi(3F) t \\ & + \left(\frac{3}{4} a_3 U_{mf} U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi(2F - f) t \\ & + \left(\frac{3}{4} a_3 U_{mf} U_{mF}^2 + \cdots \right) \cos 2\pi(2F + f) t \end{aligned}} \right\} && \text{三次组合波}$$

(1-10)

由式 (1-10) 可见, 当 $U_{mf} \ll U_{mF}$ 时, 输出产物中无用产物大大减少, 如图 1-4 所示。

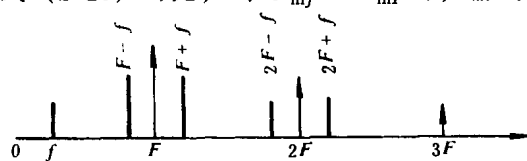


图 1-4 在 $U_{mf} \ll U_{mF}$ 时的输出产物

图中有用产物 $F - f$ 的频率低于载频 F , 称为下边频, $F + f$ 的频率高于载频 F , 称为上边频。在各项无用输出产物中, 直流项与输入调制信号的幅度基本无关, 且很容易用变量器加以隔离。调制信号的谐波分

量 $2f$ 、 $3f$ 等的幅度衰减很快，因而信号谐波及其组合波 $F \pm 2f$ 、 $F \pm 3f$ 等通常可以不考虑。但是，由于 $F \pm 2f$ 、 $F \pm 3f$ 分量离有用边带较近，不容易用滤波器消除，容易造成干扰，故在必要时应予以特别注意。载波的高次谐波 $2F$ 、 $3F$ 、 $4F$ 等项容易用滤波器抑制，三次组合波 $2F \pm f$ 项也容易用滤波器抑制。但是，载波的基波 F 项（载漏），仅靠采用滤波器完全阻止较困难，故应从调制器电路设计上考虑，防止产生载漏。

三、变频器的组成与传输方式

变频器由一个调制器和一个带通滤波器组成，如图 1-5 所示。图中 f 代表音频或输入调制信号， F 代表载波信号频率，简称载频，其值根据频率搬移的位置来决定。变频器的基本作用是变频，即把信号频带从一个频段搬移到另一个频段。在发送端，利用非线性元件构成的调制器把音频变成高频；在收信端的变频器又称反变频器或解调器，用同样的非线性元件构成的解调器，把高频还原成音频。由话音频率 f 变到高频 $F \pm f$ 的过程叫做调制，由高频 $F \pm f$ 还原成话音频率 f 的过程叫做解调。调制器和解调器的电路结构工作原理完全相同，仅用途相反。在调制或解调器后所接的滤波器，其作用是选择有用边带，抑制无用产物。

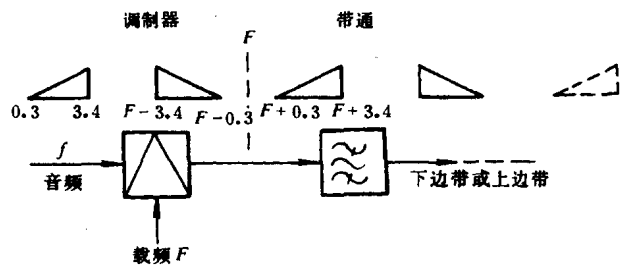


图 1-5 变频器的组成（单位：kHz）

如前所述，实际电话信号的带宽为 $0.3 \sim 3.4\text{kHz}$ （常近似表示为 $0 \sim 4\text{kHz}$ ）。当把 $0.3 \sim 3.4\text{kHz}$ 话音频信号加到调制器输入端时，由于有各个话音频率对载频的同时作用，在调制器的输出端将产生由各个有用上、下边带分别组成的频带 $(F + 0.3 \sim F + 3.4)\text{kHz}$ 和 $(F - 0.3 \sim F - 3.4)\text{kHz}$ ，前者频率高于载频，称为上边带，后者频率低于载频，称为下边带。在载波通信中，习惯采用直角三角形 $\triangle$ 来分别表示话音频带与上、下边带，称为话音三角形，如图 1-5 中所示。直角三角形的斜边形象地表示了原始话音频率由低到高的上升的方向，斜边的低端永远对应着原始话音频率的低频端 0.3kHz ，斜边的高端永远对应着原始话音频率的高频端 3.4kHz 。上、下边带的频率范围虽然与原始话音频不同，但却保留着原始话音频的振幅频率关系的特征，故都能用于传输信息。由图 1-5 可见，上边带话音三角形与调制器输入调制信号的话音三角形方向一致，称为频带平移；而下边带的话音三角形的方向与输入调制信号话音三角形的方向相反，称为频带倒置。但是，频带倒置后仍然保持着原始话音频率振幅频率关系的特征。

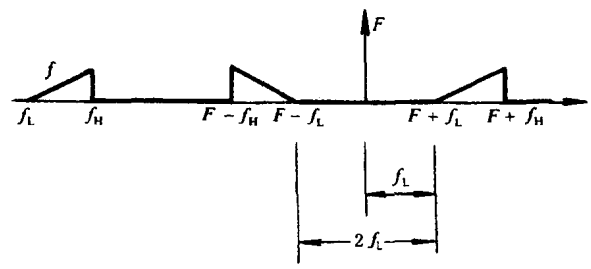


图 1-6 上、下边带与载频之间的频率间隔

在一般情况下，若调制器输入调制信号 f 的频带宽度为 $(f_L \sim f_H)$ ，其中 f_L 代表低端频率， f_H 代表高端频率，则输出上、下边带分别为 $F + (f_L \sim f_H) = (F + f_L) \sim (F + f_H)$ 与 $F - (f_L \sim f_H) = (F - f_H) \sim (F - f_L)$ ，如图 1-6 所示，图中输入

调制信号以及输出上、下边带仍用直角三角形表示，称为频谱三角形。

由图 1-6 可见，上边带频谱三角形相当于输入频谱三角形的平移，而下边带频谱三角形相当于输入频谱三角形的倒置。上、下边带与载频之间的频率间隔等于输入调制信号的低端频率 f_L ，

即
$$(F + f_L) - F = f_L$$

或
$$F - (F - f_L) = f_L$$

而上、下边带之间的频率间隔等于 $2f_L$ ，即

$$(F + f_L) - (F - f_L) = 2f_L$$

应当注意，这种以正、反频谱三角形代表上、下边带的方法，在分析变频过程和作频谱图时经常用到，必须牢固掌握。

在实际载波通信系统中，把有用边带送到线路上的传输方式有多种。若把载频 F 和上、下边带 $F \pm f$ 一起送到线路上传送，称为双边带调幅传输方式；只传送两个有用上、下边带 $F \pm f$ ，而不传送载波本身，称为载频抑制双边带调幅传输方式；仅传送一个有用边带，而把另一个有用边带和载频都抑制掉，称为载频抑制单边带调幅传输方式。

单边带通信的优点是：

- 1) 节省发信功率；
- 2) 节约频带；
- 3) 保密性较好。

现代载波机几乎全部都采用这种通信方式。

单边带通信的缺点是设备比较复杂。它除了要求调制器和滤波器对载频有较高的抑制能力外，在收信端，为了恢复原来的信号，还必须产生一个解调载波信号，并要求它的频率和相位与发信端的调制载波的频率和相位完全相同，称为载频同步。但是载波频率不容易做到很稳定，要做到两端机间的载频准确同步是相当困难的。因此，在一些电力线载波机中，往往不把发信端的中频载波频率完全抑制掉，而是有意地在发送频带中加入一个电平稳定，但电平值却很低的中频载波频率信号（导频信号），在收信端则通过导频窄带滤波器把它取出来作为自动电平调节系统用的导频信号，以及作为实现最终同步的中频解调载频信号。这种通信方式称为载频部分抑制单边带通信方式。晶体管电力线载波机大多采用这种通信方式。

四、三路单向载波电话的传输过程

为了实现对线路的多路频分复用，必须把各路话音信号，选用不同载频进行变频，搬移到线路传输频带的不同位置上依次排列起来。三路单向载波电话复用线路的方框图如图 1-7 所示。图中各路话音频带均取 $0.3 \sim 3.4\text{kHz}$ ，三路载频分别为 8 、 12kHz 和 16kHz 。各路载频依次间隔为 4kHz ，恰好等于每个话路的带宽，以便有效地利用线路传输频带，同时也便于产生各路载频。各路话音信号分别调制后，经各路带通滤波器取下边带，即分别选出 $4.6 \sim 7.7\text{kHz}$ ， $8.6 \sim 11.7\text{kHz}$ 和 $12.6 \sim 15.7\text{kHz}$ 。变频后的频谱三角形被倒置，并在三个带通滤波器并联输出端上合并成 $4.6 \sim 15.7\text{kHz}$ 的三路群信号，再经过一个公用的线路放大器放大后送到传输线路上。由于各路信号在线路上所占用的频带不同，因此可

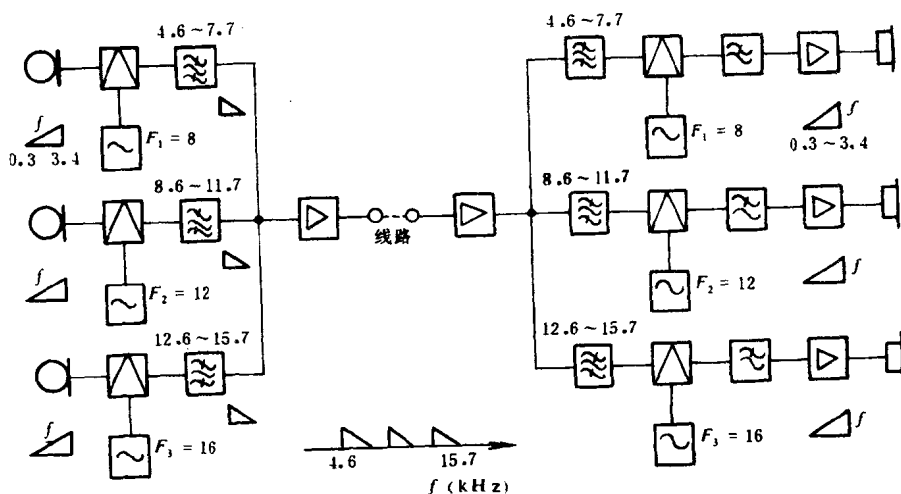


图 1-7 三路单向载波电话复用线路方框图

沿同一线路互不干扰地传送到受信端。在受信端，三路群信号经一个公用放大器放大后，由各路带通滤波器进行频率分割，它们各自选取与本路相应的载波边带信号，从而将群信号分割成三个话路频带，并分别送到各自的解调器进行解调。各路解调器的解调载频应与该路发送端的调制载频频率相同，即载频同步，否则将使被还原的信号产生失真，严重时甚至影响通信的进行。最后由低通滤波器从解调器的输出产物中提取出各自的原始话音信号，经放大后送到受话器，从而完成了三路单向载波电话通信的过程。

上述载波通信的基本过程可归纳为一句话：“一变二分三还原”。变，就是用调制器把话音频带变换到高频频带；分，就是频率分割，即在受信端用滤波器把各路信号从群信号中分割出来；还原，就是利用解调器把高频频带还原成话音频带。按照频率搬移、频率分割原理实现传输线路频分多路复用的设备叫做载波机。

为了实现载波通信，载波机中必须包括以下几种基本部件。

- (1) 调制器（或解调器）：实现频率变换。
- (2) 载频振荡器：产生载频信号。
- (3) 滤波器：完成选频与频率分割作用。
- (4) 放大器：提高信号电平。

在载波机中，各路单独使用的设备称为分路设备；各路共用的设备称为群路设备，如图 1-7 中的线路放大器。载波机的路数越多，所需的分路设备越多，对群路设备的技术要求也越高。

五、双向通信的实现

由于载波通路中的放大器是单向性部件，图 1-7 只能完成单向电话通信。实际电话通信总是双向的，这就需要在通信双方同时装设一条发信支路和一条收信支路，如图 1-8 所示。但是如果实际电路像图 1-8 这样把收、发信支路直接并联起来，则非但不能实现双向通信，就是连单向通信也无法进行了。这是因为出现了“收后重发”和“自发自收”的现

象，从而造成电路振鸣，无法通信。

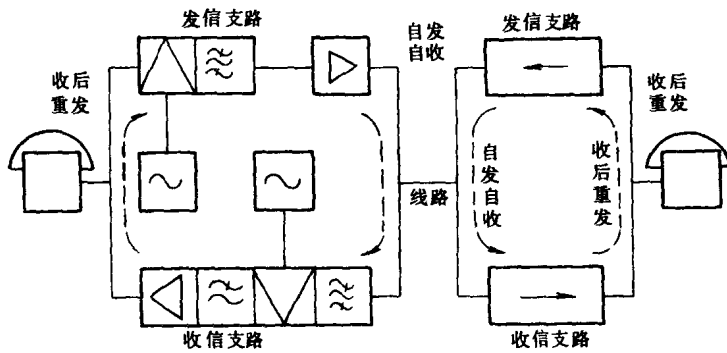


图 1-8 双向通信示意图

为了实现双向通信，必须设法消除上述两种现象。

对于“收后重发”现象，可通过在载波机用户端加上一种叫做“差接系统”的部件加以消除。差接系统能把用户方向的二线电路与载波机的收、发信支路的四线电路连接起来，同时能使收信支路与发信支路彼此隔离，切断“收后重发”通路，如图 1-9、图 1-10 中所示。这是因为差接系统具有信号在邻端方向传输衰减小，对端方向传输衰减大的性能。

为了解决“自发自收”问题，对于不同传输线路，一般采用两种解决办法。

1. 双带二线制双向通信

所谓双带二线制，指的是在一对通信线路的两个传输方向上，采用两个不同的线路传输频带，利用方向滤波器把收、发两个方向的线路传输频带分开，切断“自发自收”通路，如图 1-9 所示，从而实现双向通信。这种方法主要用在传输线对较少的载波通信系统中。如架空明线载波、电力线载波通信系统中都采用这种通信方式。

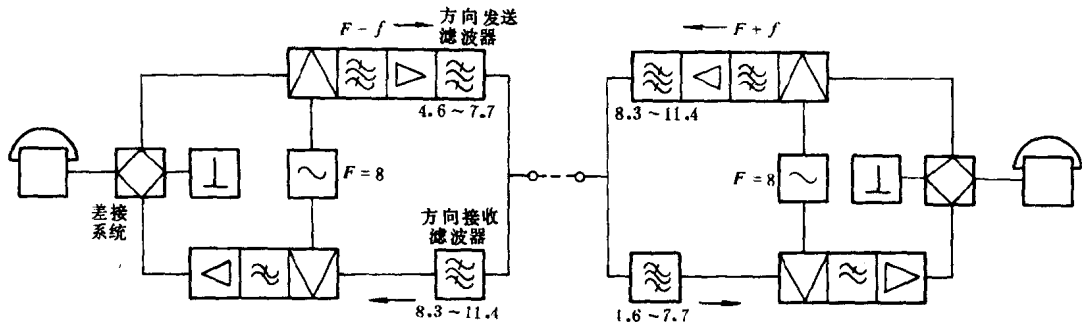


图 1-9 双带二线制双向通信示意图 (单位: kHz)

2. 单带四线制双向通信

所谓单带四线制，指的是在线上收、发信两个传输方向上采用相同的传输频带，而用两对导线（四根导线）来各自传输一个方向的信号，从而切断了“自发自收”通路。这种方法主要用在对称电缆和同轴电缆载波通信系统。

图 1-10 为单边带四线制载波电话双向通信示意图。由图可见，除在“用户侧”仍然采用差接系统来连接外，在“线路侧”可以不需要方向滤波器。