

调频无线电技术

王保华 周志畅 编

调频无线电技术

王保华 周志畅 编

上海科学技术出版社

调频无线电技术

王保华 周志畅 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8.875 插页 3 字数 189,000

1978年10月第1版 1978年10月第1次印刷

书号: 15119·1904 定价: 0.83 元

前 言

华主席在全国工业学大庆会议上指出：“无产阶级专政的一个重要任务，就是迅速发展生产力，实行技术革新和技术革命，创造比资本主义更高的劳动生产率”。我们一定要高举毛主席的伟大旗帜，响应华主席的号召，树雄心立壮志，尽快地把科学技术搞上去，为实现四个现代化而努力奋斗。

遵循伟大领袖毛主席关于“尽量采用先进技术”的教导，我们基于调频无线电技术具有较高的传输质量和抗干扰能力，在广播、电视、通讯、遥测遥控技术中的应用，编写了《调频无线电技术》一书。书中，首先阐述了调频技术的基本概念，然后对调频信号的发生、调谐放大和倍频以及变频器、限幅器和鉴频器等调频收、发信机中的各个单元电路逐一进行分析介绍，最后把一些较为常用的调频系统介绍给读者。本书可供具有电子技术基础知识的同志参阅。

在编写本书的过程中，我们综合分析了国内有关工厂、学校和研究所近年来研制的产品，选用了几种比较典型的调频系统。本书初稿完成后曾在上海科技大学有关专业经过试讲，并作了较为全面的修改，这对书稿质量的提高起了有益的作用，在此我们对为本书提供资料和意见的同志表示深切的谢意。

我们热忱地期望读者对本书的缺点和错误提出宝贵意见,以利再版时修改和提高。

一九七七年十月

目 录

第一章 调频的基本概念	1
1-1 引言	1
1-2 调频信号及其频谱	3
1-3 调频制的优缺点	9
1-4 调频系统的一般方框图	11
第二章 正弦波振荡器及调频振荡器	15
2-1 引言	15
2-2 振荡器的基本工作原理	15
2-3 低频振荡器	19
2-4 高频振荡器	26
2-5 对调频振荡器的性能要求与实现调频的方法	40
2-6 电容式话筒调频	44
2-7 晶体三极管调频	45
2-8 变容二极管调频振荡器	52
2-9 石英晶体调频振荡器	69
2-10 间接调频法	75
第三章 调谐放大器及倍频器	81
3-1 引言	81
3-2 小信号(电压)调谐放大器	81
3-3 大信号(功率)调谐放大器	110
3-4 倍频器	142
第四章 变频器	149
4-1 引言	149

4-2	变频原理	150
4-3	晶体三极管混频器	154
4-4	混频器的工作状态选择	162
4-5	变频器的干扰	165
4-6	变频器举例	169
第五章	限幅器及鉴频器	176
5-1	引言	176
5-2	限幅器	177
5-3	鉴频器——调频波的解调	186
第六章	调频系统举例	212
6-1	概述	212
6-2	调频通讯	212
6-3	调频广播	244
6-4	调频遥控装置	256
6-5	调频载波有线广播设备	264
6-6	调频信号发生器	270

第一章 调频的基本概念

1-1 引言

无线电广播、无线电通信、遥测遥控等都是利用无线电波的方式来传送信号的。由于被传送的信号频率都较低，直接将这些低频信号通过天线辐射到空间去，天线的长度需很长，否则辐射效率很低。而且即使信号被辐射出去，因各种信号频率相差无几，在空间混杂一起，接收者也无法选择所需的信号。因此，目前的无线电系统中，通常是先将这些低频信号“加载”于高频振荡上，然后通过天线向空间辐射，这样天线尺寸就可缩小，同时，由于可将各种低频信号加载于不同频率的高频振荡上，所以各信号之间就不会互相干扰。

带有信息的低频信号，一般常称为控制信号。载运控制信号的高频振荡称为“载波”，产生高频振荡的设备叫做高频振荡器。将控制信号加载到高频振荡器，使高频振荡器的电参数（如振幅、频率、相位）按控制信号的强弱而变化的过程称为“调制”。经过调制后的高频振荡称谓“已调信号”（或称已调波）。通过传输线将已调信号送至天线，就可向空间辐射。

一个高频正弦振荡电压可以用下式表示：

$$u_0(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1-1)$$

式中 $u_0(t)$ 是高频正弦振荡电压的瞬时值，

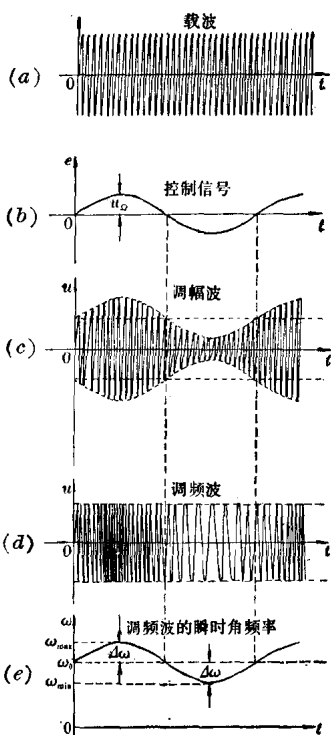


图 1-1 载波、控制信号、调幅波、调频波和调频波的瞬时角频率

载波功率利用系数,以及抗干扰能力强等一系列优点,这对提高广播、通信距离,提高广播、通信质量都是十分有利的。因此调频法广泛地应用在通信、广播、遥控遥测等各个方面。但因调频波所占的频带较调幅波宽,在同一频段中能容纳的调频电台较调幅电台为少,故调频法通常只应用在超高频波段上。

U_0 是它的振幅,

ω_0 是角频率,

φ_0 是初始相角。

高频振荡(载波)的振幅随控制信号电压变化的调制方式,叫做“调幅”,经调幅后的已调信号称为调幅波。与此相应,若高频振荡的频率、相位随控制信号电压变化,则分别称为“调频”和“调相”,相应的已调信号称为调频波和调相波。载波、控制信号(假定为低频正弦信号)、调幅波、调频波的波形分别如图 1-1(a)、(b)、(c)、(d) 所示,而图 1-1(e) 则表示调频波瞬时角频率变化的情况。调相波的波形类同于调频波。

与调幅相比,调频由于高频振荡振幅不变而具有较高的

1-2 调频信号及其频谱

调频信号的基本特征是载频振荡幅度保持不变, 振荡频率随控制信号电压(讨论调制时称调制电压)的大小而变, 即所需传送的信号反映在高频振荡的频率变化上。

无论是语音、图象或其他不同类型的电信号, 都可以看作是由各种不同频率的正弦振荡叠加而成的。因此, 为讨论方便起见, 我们可以用单频正弦信号 $e = U_m \cos \Omega t$ 作为调制信号来讨论调频信号及其频谱, 从而进一步研究调频(收发)系统的工作过程及指标。

单频正弦信号对载频调制的情况, 已示出于图 1-1 中。由图可知, 当未加调制信号电压时, 调频振荡器输出一个等幅的、固定载频为 ω_0 的信号。当加上调制信号后, 在调制电压的正半周, 载波振荡频率随调制电压变化而高于载频, 到调制电压的正峰值时, 已调高频振荡频率达最大值 $\omega_{\max} = \omega_0 + \Delta\omega$, 在调制信号负半周, 载波振荡频率随调制电压变化而低于载频, 到调制电压负峰处, 已调高频振荡频率至最小值 $\omega_{\min} = \omega_0 - \Delta\omega$ 。在整个调制过程中, 调频波的幅度保持不变, 而瞬时角频率 ω 则按调制信号同样的规律变化, 如图 1-1(e) 所示。也即:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t \quad (1-2)$$

式中 $\Delta\omega$ 为调频波的最大角频率偏移(简称频偏), 它与调制电压 u_m 成正比, 即:

$$\Delta\omega = k u_m \quad (1-3)$$

式中 k 为比例常数, 其值取决于调制设备。

由于角频率 ω 就是相角 φ 的变化速度, 即:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

故,
$$\varphi = \int \omega dt$$

将(1-2)式代入上式,则可得调频波的瞬时相位为:

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \int_0^t [\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t] dt \\ &= \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi_0\end{aligned}\quad (1-4)$$

式中 φ_0 为积分常数,物理概念即为初始相位,可设为零,并不影响分析。

由此,我们可得到调频波的一般表示式:

$$\begin{aligned}u(t) &= U_m \sin \varphi(t) = U_m \sin \left[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right] \\ &= U_m \sin [\omega_0 t + m_f \sin \Omega t]\end{aligned}\quad (1-5)$$

式中 $m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ 称为调频指数,它是最大频偏 $\Delta\omega$ 与调制信号频率 Ω 之比。调频指数与频偏成正比,与调制信号的频率成反比。 m_f 值可以大于一(这与调幅波不同,调幅指数 m_a 总是小于一的)。例如电视微波中继站,伴音信号对付载频调制,产生的频偏为 75kHz,伴音的最高频率为 15kHz,其调频指数 $m_f = \frac{75}{15} = 5$ 。

为了决定调频发射机与接收机的带宽,必须对调频波的频谱进行分析。同时,通过频谱分析,也可进一步深入了解调频波的特性。将调频波的表示式(1-5)式用三角函数展开:

$$\begin{aligned}u(t) &= U_m [\cos(m_f \sin \Omega t) \sin \omega_0 t \\ &\quad + \sin(m_f \sin \Omega t) \cos \omega_0 t]\end{aligned}\quad (1-6)$$

可见调频波的表示式是较复杂的,其频谱也将更复杂。为讨论方便起见,先看一下 $m_f \ll 1$ 的情况,在这种情况下,可以认为:

$$\cos(m_f \sin \Omega t) \approx 1 \quad \sin(m_f \sin \Omega t) \approx m_f \sin \Omega t$$

于是,(1-6)式就可写作:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m (\sin \omega_0 t + m_f \sin \Omega t \cos \omega_0 t) \\ &= U_m \sin \omega_0 t + \frac{1}{2} m_f U_m \sin(\omega_0 + \Omega)t \\ &\quad - \frac{1}{2} m_f U_m \sin(\omega_0 - \Omega)t \end{aligned} \quad (1-7)$$

也就是说,当 $m_f \ll 1$ 时,调频波的频谱可以认为由载频 ω_0 和两个边频(上边频 $\omega_0 + \Omega$ 和下边频 $\omega_0 - \Omega$)组成,这与调幅波是相似的,不同的仅在于两个边频的符号相反。故在 $m_f \ll 1$ 时,调频波所占据的频带宽度 B 为:

$$B = 2F_{\max} \quad (1-8)$$

式中 $F_{\max}$ 为最高调制频率, $F_{\max} = \frac{\Omega_{\max}}{2\pi}$ 。

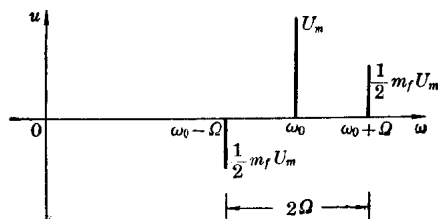


图 1-2 $m_f \ll 1$ 时调频波的频谱

在当调频指数 m_f 增大时,可以将(1-6)式中的 $\cos(m_f \sin \Omega t)$ 和 $\sin(m_f \sin \Omega t)$ 用富里哀级数展开,在贝塞

尔函数理论中证明了下列关系式:

$$\left. \begin{aligned} \cos(m_f \sin \Omega t) &= J_0(m_f) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m_f) \cos 2n\Omega t \\ &= J_0(m_f) + 2J_2(m_f) \cos 2\Omega t \\ &\quad + 2J_4(m_f) \cos 4\Omega t + \dots \\ \sin(m_f \sin \Omega t) &= 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(m_f) \sin (2n+1)\Omega t \\ &= 2J_1(m_f) \sin \Omega t + 2J_3(m_f) \sin 3\Omega t \\ &\quad + 2J_5(m_f) \sin 5\Omega t + \dots \end{aligned} \right\} (1-9)$$

式中 $J_n(m_f)$ 是宗数为 m_f 的第一类第 n 阶贝塞尔函数。

将(1-9)式代入(1-6)式, 调频波的表示式变为下列形式:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m [J_0(m_f) \sin \omega_0 t + 2J_1(m_f) \sin \Omega t \cos \omega_0 t \\ &\quad + 2J_2(m_f) \cos 2\Omega t \sin \omega_0 t \\ &\quad + 2J_3(m_f) \sin 3\Omega t \cos \omega_0 t + \dots] \\ &= U_m [J_0(m_f) \sin \omega_0 t \\ &\quad + J_1(m_f) \sin (\omega_0 + \Omega)t - J_1(m_f) \sin (\omega_0 \\ &\quad - \Omega)t + J_2(m_f) \sin (\omega_0 + 2\Omega)t \\ &\quad + J_2(m_f) \sin (\omega_0 - 2\Omega)t + J_3(m_f) \sin (\omega_0 \\ &\quad + 3\Omega)t - J_3(m_f) \sin (\omega_0 - 3\Omega)t + \dots] \quad (1-10) \end{aligned}$$

由(1-10)式可见, 调频波的频谱是由载频 ω_0 和无数对边频 ($\omega_0 \pm n\Omega$) 组成, 其中 n 为任意正整数 $n=1, 2, 3, \dots$ 。相邻边频之间的间隔等于调制信号频率 Ω , 第 n 条谱线与载频之差为 $n\Omega$ 。边频的相对幅度是以调频指数 m_f 为参量的各阶贝塞尔函数, 其边频振幅可能超出载频振幅。贝塞尔函数的具体数值可由贝塞尔函数表查得, 函数曲线如图 1-3 所示。

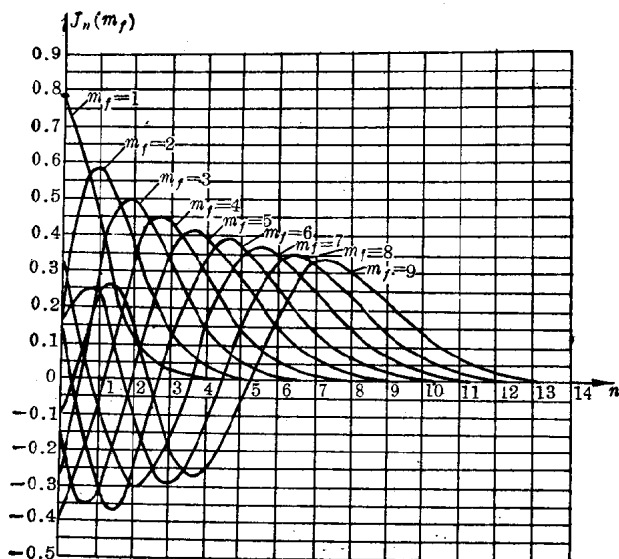


图 1-3 贝塞尔函数曲线

图 1-3 说明了载波和各次边频分量的振幅 $J_n(m_f)$ 与调频指数 m_f 的关系。这里假设未调制时的载波振幅为 100%。从理论上说，调频波的边频有无限多个，因而频带也为无限宽。但实际上调频波的能量绝大部分是集中在载频附近的一些边频中，图 1-4 给出了不同 m_f 值时的频谱图，谱线的长度都是相对值（设未调制时的载波振幅为 100%）。

由图可得出：

(1) 当 m_f 较大时，随着 m_f 值的增大，调频波边频分量中幅度较大者的数目增加，也就是说有效频谱宽度也相应增大。

(2) 在当 $n > (m_f + 1)$ 时，贝塞尔函数 $J_n(m_f)$ 的数值

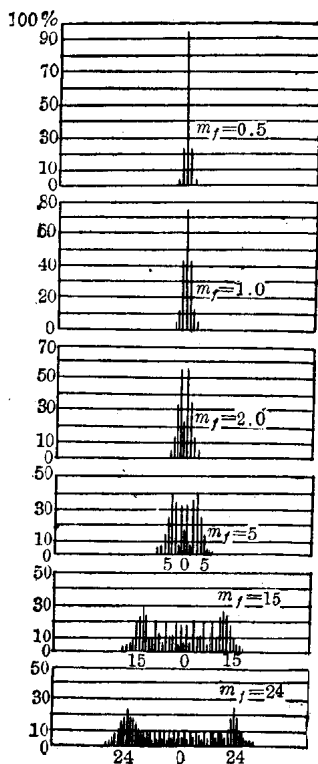


图 1-4 不同 m_f 值时的频谱图

已下降到小于 0.1。滤除这些分量，对调频波的失真影响不大。因此在考虑上下边频的情况下，调频波的频谱有效宽度为 $2(m_f + 1)\Omega$ ，即频带宽度可取：

$$B = 2(m_f + 1)F_{\max} \quad (1-11)$$

式中 $F_{\max}$ 为最高调制频率。

考虑到 $m_f\Omega = \Delta\omega$ 或 $m_f F_{\max} = \Delta f_{\max}$ ，则 (1-11) 式可写作：

$$B = 2(\Delta f_{\max} + F_{\max})$$

在 $m_f \gg 1$, 即 $\Delta f_{\max} \gg F_{\max}$ 时

$$B|_{m_f \gg 1} \approx 2\Delta f_{\max} \quad (1-11)$$

由此可见, 在 m_f 较大情况下, 调频波的有效频谱宽度近似地等于最大频偏 $\Delta f_{\max}$ 的二倍。

在要求两相邻电台干扰较小, 或要求非线性失真很小(例如 1%)时, 带宽还应适当的加宽一些, 通常取:

$$B \approx 2(1 + m_f + \sqrt{m_f})F_{\max} \quad (1-12)$$

例(1-1) 若调频信号的最大频偏 $\Delta f_{\max} = 80\text{kHz}$, 最高调制频率 $F_{\max} = 5\text{kHz}$, 试决定调频信号接收机的通频带。

$$\text{解: 调制指数 } m_f = \frac{\Delta f_{\max}}{F_{\max}} = \frac{80}{5} = 16$$

据(1-12)式可求得接收机的通频带为:

$$\begin{aligned} \Delta f_{0.7} = B &= 2(1 + m_f + \sqrt{m_f})F_{\max} \\ &= 2 \times (1 + 16 + \sqrt{16}) \times 5\text{kHz} = 210\text{kHz} \end{aligned}$$

由该例可以看出, 由于调频信号的有效频谱宽度 B 比较宽, 故调频接收机应选用较宽的通频带, 通常调幅接收机带宽只及 $10 \sim 15\text{kHz}$ 而已。

1-3 调频制的优缺点

为了实现满意的远距离通信, 必须提高信号的抗干扰能力。对于不同的调制方式, 它们的抗干扰能力是不相同的。与调幅波相比, 调频波具有较强的抗干扰能力, 这是由于在调幅系统中, 为了减小失真, 调制指数 m_a 不能大于 1, 然而在调频的情况下, 调制指数 m_f 可以远大于 1。可以证明, 在输入信

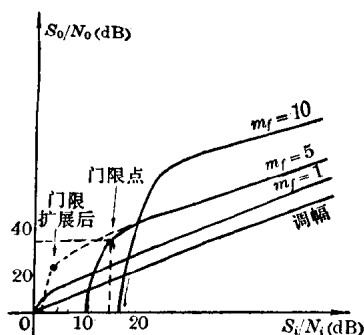


图 1-5 调频制的“门限效应”

号噪声比(以下简称信噪比)较大的情况下,通过解调后输出的电压信噪比,调频波要比调幅波高 m_f 倍,即信噪比改善 m_f 倍,相应的抗干扰能力也提高 m_f 倍。

但我们必须注意到,上述调频制抗干扰能力的提高是有条件的,在 m_f 较大的

情况下,当输入信噪比(S_i/N_i)低于某一“门限”值时,输出信噪比(S_o/N_o)将急剧下降,如图 1-5 所示,这就是所谓调频制的“门限效应”。它表示只有当输入信噪比(S_i/N_i)在门限值以上才能正常接收,这是调频制的一个缺点。不同的 m_f 值,门限点也是不同的, m_f 越大,门限越高,也即接收弱信号的能力也越差。

考虑上述二方面的因素,调频指数 m_f 的选择显得颇为重要,为了获得较强的抗干扰能力,宜取较大的 m_f 值,但为了降低门限点,提高弱信号接收能力,则宜采用较小的 m_f 值。为此,应根据不同要求来选择 m_f 值。例如,对调频广播、电视伴音来说,希望有较好的音质和低的噪声,通常应将 m_f 取得大些,例如取 $m_f = 4 \sim 5$ 。 m_f 取大,意味着调频系统的带宽要大,故称为宽频带调频系统。对于通讯机来说,弱信号的接收是主要矛盾,因此,这种情况下,门限应低些,宜采用较小的 m_f 值,通常取 $m_f = 1 \sim 2$ 。这种调频系统称为窄频带调频系统。在某些场合,例如卫星通信中,来自遥远的通信卫星的信号很微弱,输入信噪比往往接近门限点,或在门限点以