

调频立体声 广播发射机

岑伟德 编著

国防工业出版社

前 言

随着我国四化建设的不断发展, 人民群众文化物质生活水平日益提高, 单声道广播从艺术欣赏到技术性能都已不能满足广大听众的要求了。发展调频立体声广播, 播送高保真、高音质的文艺节目, 使听众得到满意的艺术享受, 这是我国当前经济文化形势发展的必然趋势。1983年召开的第十一次全国广播电视工作会议确定了自中央到县四级办广播和大力发展调频广播的政策。今后我国将建立一个从中央到省、市、县的四级调频广播网, 以覆盖全国。因此, 现在全国各地都在积极开办调频广播, 特别是立体声广播。为了适应这一迅速发展的需要, 编者总结了在这方面的工作经验和体会, 参考了国内外的有关资料, 编著了本书, 以期对我国调频广播事业的发展起一定的促进作用。

编者根据我国的实际情况, 在编写中力求深入浅出, 通俗易懂, 既注意阐述物理概念, 又重视实践中的经验, 同时给出了一些实用电路和数据供读者选用参考。

本书在编写过程中, 得到了浙江省广播电视厅领导和浙江省电子工业总公司领导的关怀, 得到了厉志华、王开源、应昌伟、陈亚君等同志的支持, 并得到了浙江省广播电视厅等单位的资助, 在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限, 书中定有不妥甚至错误之处, 恳切希望广大读者批评指正。

编者 1986.10.

目 录

第一章 调频广播的基础知识	1
第一节 调频广播的基本过程	1
一、引言	1
二、调频广播工作过程	2
第二节 调频立体声广播制式	2
一、导频制	2
二、主载频调制信号的频谱	3
三、调频立体声广播发射机概述	4
第三节 调频广播及发射机的特点	5
一、调频广播的特点	5
二、调频发射机的特点	6
第四节 调频广播的技术参数	6
一、已调频波信号的频带宽度	6
1 已调频波频谱分析	6
2 已调频波频带宽度	9
二、调频广播的噪声和预加重	11
1 调频广播的信噪比改善系数	11
2 预加重和去加重	13
三、调频广播的失真	16
1 频率调制器及 π 网络的非线性引起的失真	16
2 传输系统的幅频特性及相频特性不是线性时产生的失真	18
3 馈线系统反射(回波)产生的失真	17
4 多径失真	18
5 调幅-调相的变换失真	19
6 发射机产生的失真	19
四、左右信号分离度	19
1 分离度的定义	19
2 分离度与主、副信道输出信号的振幅比、相位差的关系	20
五、副载频和导频	22
1 副载频和导频的功能	22
2 导频信号和副载频的相位关系	23
六、导频制的调制信号	24
1 调制信号波形及其功用	24
2 调制信号电平	28
第五节 调频广播的标准	29
第二章 调频调制方法和调制器	35
第一节 电抗管调频法	35
一、电抗管调频原理	36
二、电抗管调频法的实用电路	38

三、晶体管电抗电路的缺点	39
第二节 可变电抗元件调频法	40
一、变容二极管	40
二、变容二极管调频原理	42
三、利用变容二极管实现调频的优缺点	45
四、实用电路	46
第三节 调频晶体 (FMQ) 法	50
一、石英晶体谐振器和 $\lambda/4$ 电路	50
二、调频晶体 (FMQ) 法的工作原理	52
三、调频晶体 (FMQ) 法的优缺点	52
第四节 脉冲调相式间接调频法	53
一、工作原理	53
二、脉冲调相式调频法的优缺点	54
三、实用电路	54
第五节 矢量合成调频电路	58
一、工作原理	58
二、实用电路	58
第六节 自动相位控制 (APC) 系统	59
一、APC 系统的工作原理	59
二、APC 系统的捕捉带和同步带	63
三、APC 系统的捕捉方法 (或搜索电路)	64
四、分频电路	66
五、自动相位控制 (APC) 的实际电路	67
第三章 立体声激励器	68
第一节 立体声激励器的原理	68
一、基本概念	68
二、立体声激励器的三种典型方案	68
第二节 立体声激励器的电路结构	71
一、矩阵器单元	71
二、副载频发生器单元	71
三、平衡调制器单元	76
四、延时器单元	79
五、信号合成器单元	80
六、FM 调制器单元	80
七、锁相器单元	80
第三节 辅助电路	85
一、衰减器	85
二、滤波器	89
三、均衡器	94
第四节 立体声激励器的实用电路	95
一、TL1 型立体声激励器	95
二、日本 NHK 立体声激励器	111

第五节 立体声激励器的调试	116
一、调试仪器	116
二、各单元电路的调试	116
三、立体声激励器的整机调试	120
四、可能出现的故障及解决办法	124
第六节 开关方式立体声编码器及其调频激励器	127
一、硬开关方式编码器的工作原理	128
二、XT-24型立体声编码器	130
三、日本 NEC 的 HPA-4536B 立体声调制器及其 FM 调制器	132
四、TPF-J 型立体声激励器	136
第四章 立体声带附加信道	148
第一节 调频广播立体声带附加信道制式	148
一、引言	148
二、附加信道制式	148
三、主载频调制信号的频谱图	149
第二节 附加信道技术参数和国家标准	150
一、主要技术参数	150
二、附加信道广播的标准	152
第三节 压缩扩张技术	154
一、引言	154
二、压扩器原理	155
三、压扩器的构成	156
四、压缩器的调整	159
五、压缩器可能出现的故障	159
第四条 附加信道调制器	160
一、附加信道调制器的原理	160
二、附加信道信号进行第二次调频的方法	160
第五章 倍频器和变频器	162
第一节 倍频器的功能	162
第二节 倍频器的原理	163
一、概述	163
二、丙类倍频器	164
三、参量倍频器	167
第三节 倍频器的实际电路	171
一、总体方案	171
二、实际电路	176
第四节 倍频器的调整	178
一、调试用仪器	178
二、调试步骤	178
三、注意事项	181
四、可能出现的故障及处理办法	182
第五节 变频电路	183

一、概述	183
二、工作原理	184
三、变频电路的技术参数	186
四、变频电路的实际线路和调整方法	187
第六章 高频大功率放大器	189
第一节 高频大功率发射管	189
一、金属陶瓷发射管	189
二、发射管电流的计算方法	190
1 谐波分析法	190
2 近似积分法	192
第二节 高频大功率放大器的基本原理	197
一、阴地放大器的基本原理	197
二、栅地放大器的基本原理	199
第三节 高频功率放大器工作状态的分析	200
一、工作状态的分类	200
二、控制参量变化对工作状态的影响	201
1 栅极电压变化对工作状态的影响	202
2 屏栅压对工作状态的影响	202
3 板压对工作状态的影响	203
4 负载对工作状态的影响	203
三、工作状态的选择	204
1 板流导通角的选择	204
2 工作状态的选择	206
四、工作状态的计算	206
1 阴地线路工作状态的计算方法	206
2 栅地电路工作状态的计算方法	210
第四节 高频大功率放大器线路	210
一、馈电电路	210
1 串联馈电电路	211
2 并联馈电电路	212
3 电阻级馈电电路	212
4 灯丝馈电电路	213
二、输出回路	213
1 概述	213
2 输出回路的耦合效率	214
3 负载耦合轻重对放大器输出功率 P_o 及输出回路传输效率 η_k 的关系	215
4 板极回路电容 C 的选择	216
5 串并联负载回路	216
三、输入回路	213
第五节 高频大功率放大器的实用电路	219
一、FU-500F 高频功率放大器	219
二、FU-60F 高频功率放大器	221
三、FU-100F 高频功率放大器	222
四、FU-60Z 高频功率放大器	224
五、FC-10F 高频功率放大器	225

六、FU-113F 高频功率放大器	226
第六节 高频大功率放大器的调整	228
一、加电前的检查	228
二、加电调整	228
三、电子管的中和	232
1 四极管阴地放大器的中和	232
2 四极管栅地电路的中和	234
四、可能出现的故障及处理方法	235
第七节 辅助设备	237
一、定向耦合器及其检波器	237
1 用途	237
2 定向耦合器的基本原理	237
3 检波器	239
4 调整方法	239
二、双针功率表	239
三、谐波滤波器	241
第八节 晶体管高频功率放大器	242
一、工作原理	242
二、实用线路	249
三、放大器的调整	249
四、可能出现的故障及处理办法	253
第七章 调频发射机的电源	255
第一节 概述	255
一、电源的组成	255
二、电源的特点	255
第二节 发射机大功率级的板极电源	257
一、三相整流电路	257
二、 Γ 型滤波器	260
第三节 调频发射机电源的实际电路	263
一、发射机电源的实际电路	263
二、可能出现的故障及其处理方法	266
第八章 调频广播发射机实例	268
第一节 调频广播发射机实例	268
一、TPF-10P-1型和TPF-Ⅱ型调频发射机	270
二、TF3型调频发射机	276
第二节 国外调频立体声广播发射机发展概况	287
一、ADSM 调频调制器	288
二、数字频率合成调制法(DSM)和软开关方式立体声编码器	290
三、全固体化调频广播发射机	297
四、电子管射频功率放大器的新发展	298
1 高 μ 零偏压三极管	298
2 折迭半波长谐振腔	298

第九章 调频广播发射机技术指标的测试	300
第一节 调频立体声广播发射机主要技术指标的测试方法	300
一、测试条件	300
二、测试用仪器及其技术要求	300
三、测试注意事项	301
四、主要技术指标的测试方法	301
第二节 立体声带附加信道的测试方法	305
一、立体声信道主要技术指标测试方法	305
二、附加信道主要技术指标测试方法	305
三、立体声与附加信道相互串音测试方法	306
四、使用仪器的要求	307
参考资料	309

第一章 调频广播的基础知识

第一节 调频广播的基本过程

一、引言

语言和音乐等所产生的电信号与其他低频电信号一样，不能直接作远距离传播。根据电学知识，必须用比它的频率高很多的高频电振荡运载，才能传播到远方去。将语言和音乐等产生的低频电信号“加载”到高频电振荡上去的具体方法，可以是在适当的电路中由低频电信号使高频电振荡的某个电参数改变，例如改变其振幅、频率或相位。这种改变的过程，称为调制。需要传输的由语言和音乐等所产生的带有信息的低频电信号称为调制信号。用来载送低频电信号而尚未载有低频电信号的高频电振荡称为载波。经过调制后的高频电振荡称为已调信号，或简称为已调波。通过传输线将已调信号送至天线，就可以向空间辐射。

一般高频振荡的瞬时电压可用下式表示，

$$u = U \cos(\omega t + \phi) \quad (1-1)$$

式中， U 为振幅；

ω 为角频率；

ϕ 为初相角。

当 ω 和 ϕ 一定时，若 U 随调制信号电压的变化规律而变化，则称这种调制方式为调幅(AM)。经调幅后的已调信号称为调幅波。

当 U 和 ϕ 一定时，若 ω 随调制信号电压的变化规律而变化，则称这种调制方式为调频(FM)。经调频后的已调信号称为调频波。可见调频就是使高频振荡的频率按照调制信号电压(或电流)的变化规律而变化，而高频振荡振幅保持不变。得到的已调波是一个频率随调制信号电压(或电流)变化的等幅波。因此，调频就是频率调制的简称。

当 U 和 ω 一定时，若 ϕ 随调制信号电压的变化规律而变化，则称这种调制方式为调相(PM)。经调相后的已调信号称为调相波。

载波、调制信号、调幅波、调频波的波形分别如图1-1(a)、(b)、(c)、(d)所示。调相波的波形类同于调频波。

由于调频较之于调幅，有很多优点，因此调频方式广泛地应用在通信、广播、遥控

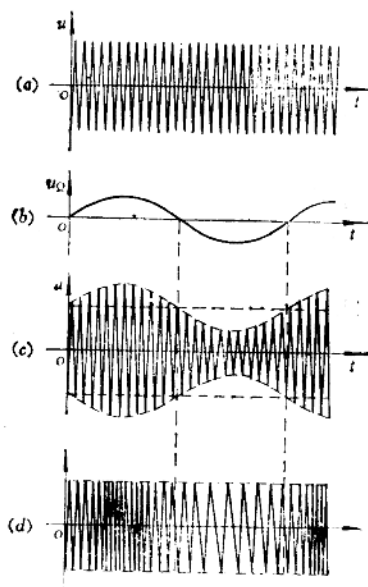


图1-1 载波、调制信号、已调波波形图

(a) 载波；(b) 调制信号；
(c) 调幅波；(d) 调频波。

遥测等各个方面。

二、调频广播工作过程

典型的调频广播系统（如图 1-2 所示）由以下四部分组成。

- 1) 调频广播发射机；
- 2) 发射天线；
- 3) 接收天线；
- 4) 调频广播接收机。

在发射端，播控中心送来的声频节目，即调制信号送到调频激励器进行频率调制，

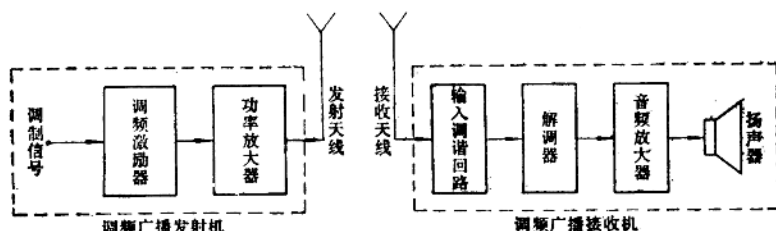


图1-2 典型的调频广播系统

使高频电振荡的频率按照调制信号的变化规律而变化。如果得到的已调信号的载频比发射频率低，那么，还需要把它倍频或变频到发射频率。然后再经功率放大器放大到实际需要的功率，最后由同轴电缆把已调信号输送到发射天线辐射出去。

在接收端，已调信号由接收天线接收下来后，经输入调谐回路选择出所需要接收的电台，然后由解调器从已调信号中检出调制信号，并经音频放大器放大，最后推动扬声器还原成声音。

调频广播分单声道广播、立体声广播和多节目广播，但它们的基本工作过程是相同的。本书将主要介绍其中的立体声发射机部分。

第二节 调频立体声广播制式

一、导频制

本世纪六十年代初以来，欧美和日本对于利用调频广播来进行立体声广播和多种节目广播都进行了实验和研究，研制出了十几种立体声调频广播的制式，这些制式可以从广播内容和调制方式上加以区分，主要有频率分割制和时间分割制两大类。然而不管哪种制式，都应该是普通单声道调频广播和立体声广播之间具有兼容性和逆兼容性。兼容性就是播送立体声广播时，单声道调频接收机也能接收，而且能收听到全部节目内容。逆兼容性就是用立体声接收机也能接收单声道调频广播。两者都不应产生不自然的感觉。因此进行兼容性立体声广播时，既传送立体声和普通单声道声音两者兼容的信号，还传送立体声广播用的附加信号。不同的立体声广播制式，对这些信号的传送方式也就不同。

我国于1983年5月在广州召开的调频立体声制式验证鉴定会上已正式确定导频制

为我国的调频立体声广播标准制式。立体声广播导频制是一种用于调频发射机的双信道立体声广播系统。这种制式以 $(L+R)$ 即和信号作为兼容性信号 (L 、 R 分别表示左右两传声器的信号电压), 它具有分布在声音频带内的频率分量, 形成主信道信号; 以 $(L-R)$ 即差信号对副载频进行抑制载频式调幅, 形成副信道信号。主信道信号和副信道信号以及频率为副载频 $1/2$ 的导频信号, 三者构成立体声复合信号, 然后再对主载频进行调频, 从而产生立体声调频信号。

美国于一九六一年确定的 FCC 立体声标准制式和日本电波技术审议会确定的频分制中的 AM-FM 方式, 其原理均与上述导频制相同。

导频制具有很多优点, 主要的有以下几点:

1) 由于导频制巧妙地利用了 R 信号与 L 信号之和大于时, 其差必小, 差大时其和必小的原理, 因此导频制的最大优点是主、副信道都能分别对其主载频达到 90% 的调制度。这样, 当进行导频制调频立体声广播时, 与普通调频广播作普通调频接收相比, 立体声发射作普通调频接收时的信噪比只下降 3~5dB (无附加信道时), 说明进行这种制式的立体声广播时几乎不影响普通调频广播的听众。也就是说, 服务区域基本上不减小。

2) 从调制特性和立体声分离特性上看, 导频制不论在理论上或是实用上都比较好。

3) 接收机的价格比其他制式的便宜。

4) 导频制立体声广播可以与附加信道多路并用 (附加信道广播与立体声或普通调频广播所不同的是服务对象不是一般听众, 而仅仅对特约者广播的一种通信业务。节目内容一般限制在新闻、音乐、报时、气象报道等范围), 并且在运用上优点较多, 因为一般立体声接收机收听不到附加信道广播。另外, 这种制式可以对立体声广播或立体声加附加信道广播以及普通调频加附加信道广播作任意的选择。在进行附加信道多路广播时, 接收普通调频广播和接收立体声广播, 信噪比只下降约 1dB。这就是说, 由于作附加信道广播, 服务区的减少是微量的。

二、主载频调制信号的频谱

我国的国家标准规定: 调频立体声广播的主载频的调制信号是立体声复合信号, 由主信道信号 (左信号和右信号的和信号)、副信道信号 (由左信号和右信号的差信号对副载频进行抑制载频式调幅后所产生的上下边带波的合成信号) 与导频信号 (立体声广播时, 为了接收而传送的辅助信号) 组成。立体声复合信号的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} A &= M + S + P \\ M &= L + R \\ S &= (L - R) \sin \omega_c t \\ P &= p \sin \left(\frac{\omega_c}{2} t \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中, A 为立体声复合信号的电压; M 为主信道信号的电压; S 为副信道信号的电压; P 为导频信号的电压; ω_c 为副载频角频率; p 为导频信号电压的振幅值; t 为时间。

我国的国家标准还规定: 导频信号的频率为 19kHz, 副载频频率为 38kHz。导频信号对主载频的频偏, 为最大频偏 (100% 调制时的频偏为 ± 75 kHz) 的 10%, 即 ± 7.5 kHz。只向左信号或右信号输入端输入额定音频信号时, 由主信道信号所产生的主载频

频偏和副信道信号所产生的主载频频偏, 数值相同, 其最大幅值为最大频偏的 45%, 即 $\pm 33.75\text{kHz}$ 。

综上所述, 主载频调制信号的频谱图应如图 1-3 所示。

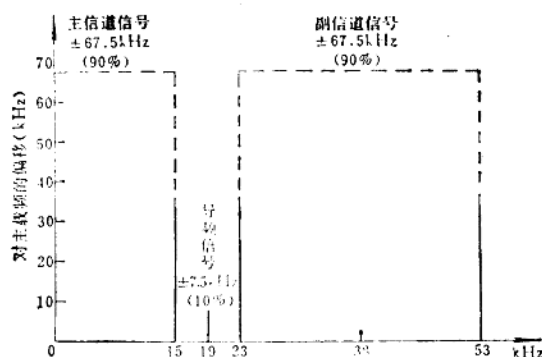


图1-3 主载频调制信号频谱图

图中虚线表示主、副信道的信号都能分别对主载频达到 90% 的调制度, 即 $\pm 67.5\text{kHz}$ 。

三、调频立体声广播发射机概述

典型的导频制调频立体声广播发射机的方框图如图 1-4 所示。由图可知, 发射机由调频立体声激励器和功率放大器二部分组成, 其中调频立体声激励器又可分为立体声

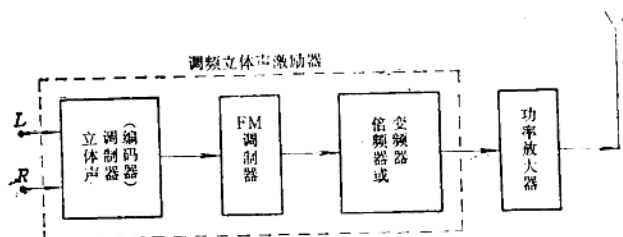


图1-4 导频制调频立体声广播发射机方框图

调制器 (也称为立体声编码器)、FM 调制器及倍频器或变频器三部分。L 信号和 R 信号输入到立体声编码器, 形成主信道信号和副信道信号, 并和 19kHz 导频信号合成为立体声复合信号。在 FM 调制器中, 立体声复合信号对主载频进行频率调制, 输出立体声调频信号。再经过倍频器或变频器, 变换到发射频率。最后, 由功率放大器进行功率放大, 获得所需要的发射功率, 并通过天线将立体声调频信号辐射出去。

如果调频激励器采用脉冲调相式间接调频法, 则立体声调制器须将主信道信号与副信道信号加导频信号) 分成二路输出。

图 1-5 是采用脉冲调相式间接调频法的立体声广播发射机的方框图。主信道信号经音频放大器及预加重电路后送入脉冲调相式调制器进行调制, 然后由倍频器倍频到

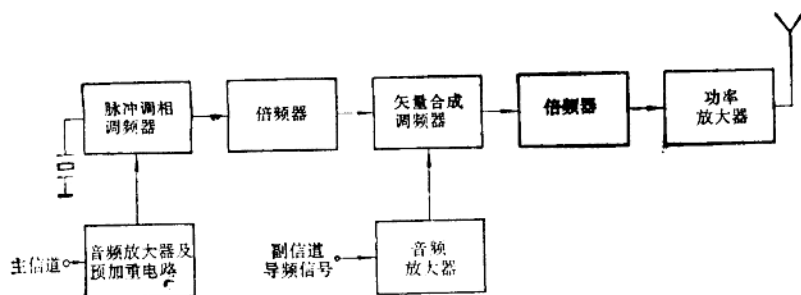


图1-5 用脉冲调相式间接调频法的立体声广播发射机方框图

7 MHz, 再与经过音频放大器放大的导频信号及副信道信号一起在矢量合成调制器中进行调制, 从而产生立体声调频信号。

由图1-4和图1-5可以看出, 若调频激励器采用直接调频法, 如图1-4所示, 则立体声调制器的输出是由主信道信号、副信道信号及导频信号合成的立体声复合信号。若使用脉冲调相式间接调频法, 如图1-5所示, 则必须由立体声调制器的不同端子分别取出主信道信号、副信道信号和导频信号。不过, 不管采用哪一种调频法, 都是在立体声调制器内产生主信道信号、副信道信号及导频信号, 二者的差别只在于输出端将主信道信号和(导频加副信道信号)再合成, 还是将它们分别取出。

第三节 调频广播及发射机的特点

一、调频广播的特点

由于调频广播采用了调频方式及使用超短波波段, 因此具有以下特点。

1) 根据超短波传播特性, 调频电台的服务范围仅在视距之内, 因此就能增加同频道的电台数, 电台间的相互干扰少, 只要广播电台具有比某一干扰台高一定程度的电场强度, 就能使干扰信号得到足够的抑制。然而场强受台址地形的影响, 不象中波广播那样, 在夜间能加大电波传播距离, 欲扩大调频电台服务范围, 把信号传送到更远的地方去, 就得使用无线电中继接力站和转播站。此外, 超短波信号还会产生少量由飞机引起的散乱反射衰落, 不过这在弱场强区以外的地方基本上不成问题。

2) 抗干扰性强。各种各样的干扰信号(例如自然干扰、工业干扰、家用电器设备干扰等)和有用的信号混在一起, 调幅收音机很难把它们分开。但在调频收音机里, 可以用限幅器把因干扰引起的振幅变化成分切除掉, 因而使干扰大为减小; 又由于干扰所引起的寄生调频比在发射机中产生的有用的频率调制要小得多, 因此在调频收音机里出现的噪声电平远低于有用的声音电平; 而且噪声电平还和频率成正比, 这样, 对人耳最为灵敏的低频率噪声就显得很微弱。所以, 调频广播的信噪比较之调幅广播要好得多。但在弱场强区, 汽车点火一类的噪声仍然有较大的干扰。

3) 由于调频接收机中装有限幅器, 因此可以抗衰落。也就是说, 输出电平不随电场强度而变。

4) 调频电台的频带宽, 可以获得高逼真度的广播。一般调频电台的频带大约是 $200 \sim 250 \text{ kHz}$, 是调幅电台所占频带的数十倍。这是一个很大的优点。调幅波受到频宽的限制, 音频信号的频率范围局限于 $50 \text{ Hz} \sim 8 \text{ kHz}$, 但在调频时, 将音频信号的频率范围扩大到 $30 \text{ Hz} \sim 15 \text{ kHz}$, 于是音频信号的质量大为提高。尤其在山区, 调频广播的质量比调幅好得多。

5) 发、收系统的综合信噪比好, 失真小, 所以能加大动态范围。

6) 由于使用 VHF 波段, 扩大了无线电广播的分配频道数, 并且能进行包括立体声广播和附加信道广播的多路广播。

二、调频发射机的特点

和调幅广播发射机相比较, 现在的调频广播发射机具有很多优点, 主要的有以下几点。

1) 因为用低电平调制, 并且先使频率比较低的高频振荡受到调频, 然后把它加以多次倍频, 以使频率偏移, 也就是调频指数随之跟着加大, 因此调制设备结构简单, 性能优良, 结果使得发射机的结构也简单, 价格低廉。

2) 无论倍频级还是功率放大级都工作于丙类状态, 所以发射机的效率高, 设计调整容易。

3) 为了增加调频发射机的输出功率, 只要附加一级或数级丙类功率放大器就行了, 与调幅广播相比, 欲使输出功率增加, 就必须提高调制器的输出电平这一点来说, 其结构是极其简单的。

4) 因为调频指数大于 1, 调频波所携带的能量大部分集中在边带波上, 而载波很弱。

5) 调频振荡的幅度不变, 管子的最高耐压能力可以合理使用。

6) 超短波天线尺寸很小, 能够做成使无线电波在垂直方向内很集中, 不乱跑到电离层去, 同时水平方向内还是四面八方都有, 其效率大大超过中波天线。

以上几点都说明了调频发射设备的经济效率比较高。

7) 电路的非线性不是产生失真的原因, 失真是由相位特性的不良所引起的, 而这在电路结构上容易解决。

由于调频广播具有以上这一系列独特的优点, 因而从 50 年代初开始, 便得到迅速发展, 世界各国先后开始采用调频广播来弥补调幅广播的不足。60 年代初以来, 不少国家利用调频频道来进行立体声广播和多路广播。我国自从 1983 年确定了调频立体声广播的制式和技术标准、并在哈尔滨、上海、广州、北京等城市先后进行了试播以来, 也得到了很快发展。

第四节 调频广播的技术参数

一、已调频波信号的频带宽度

1. 已调频波频谱分析

如果把式 (1-1) 中的 $(\omega t + \phi)$ 用 $\theta(t)$ 来表示, 并称为总相位角, 表明它是时间的函数, 即,

$$\theta(t) = \omega t + \phi$$

则式 (1-1) 可写为:

$$u = U \cos \theta(t) \quad (1-3)$$

在调频过程中, 高频振荡的振幅是不改变的, 初相角也是不变的, 而改变的只是高频振荡的频率。那么,

当 $\omega = \omega_0$ (为常数) 时, 则

$$\theta(t) = \omega_0 t + \phi$$

这表明当高频振荡的频率不变时, 高频振荡的总相位随时间线性增长, 也就是说, 高频振荡在未调频时, 它是一个角频率为已调波中心角频率 ω_0 的简谐波。其表示式可写为:

$$u = U \cos(\omega_0 t + \phi)$$

当调频时, 即当 $\omega = \omega(t)$ (不为常数) 时, 则它与总相位之间的关系式为:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-4)$$

或

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt \quad (1-5)$$

式 (1-4) 和式 (1-5) 表明角频率变化必然导致总相位角的变化; 反之, 总相位角的变化也必然引起频率的变化。

若调制信号是一个角频率为 Ω 的低频余弦波, 且初相角为零, 它可以表示为:

$$u_1 = U_1 \cos \Omega t$$

那么, 已调频波的瞬时角频率对中心角频率 ω_0 的偏移值应与调制信号电压的大小成正比。所以, 用这角频率为 Ω 的余弦波对高频振荡进行调频时, 已调频波信号的瞬时角频率为:

$$\omega(t) = \omega_0 + K_f U_1 \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta \omega_f \cos \Omega t \quad (1-6)$$

式中, K_f 为比例常数, 又称为调制灵敏度, 其物理意义是每单位调制电压的角频率偏移值。 ω_0 为未调制时的角频率 (即中心频率)。 $\Delta \omega_f = K_f U_1$ 称为已调频波的最大频偏, 简称频偏, 它与调制电压振幅成正比, 而与调制电压的频率无关。调制电压的频率只决定每秒钟内频率偏移的次数。

根据式 (1-5) 即可求得在调频时, 由于角频率的变化而产生的相位变化, 即:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \int \omega(t) dt = \int (\omega_0 + \Delta \omega_f \cos \Omega t) dt = \omega_0 t + \frac{\Delta \omega_f}{\Omega} \sin \Omega t + \phi_0 \\ &= \omega_0 t + m_f \sin \Omega t + \phi_0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 $m_f = \Delta \omega_f / \Omega$ 称为调频指数, 它与调制信号的幅度成正比, 与调制信号的频率成反比。

利用式 (1-7) 和式 (1-3), 即可得出已调频波的表达式为:

$$u = U \cos(\omega_0 t + m_f \sin \Omega t + \phi_0) \quad (1-8)$$

若将式 (1-8) 利用三角函数中的变换式, 即:

$$\cos(A+B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

展开, 则可得:

$$u = U [\cos(m_f \sin \Omega t) \cos(\omega_0 t + \phi_0) - \sin(m_f \sin \Omega t) \sin(\omega_0 t + \phi_0)] \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 可以看出, 公式中出现了两个新函数, 即:

$$\cos(m_f \sin \Omega t)$$

$$\sin(m_f \sin \Omega t)$$

在这两个新函数中, 当 $m_f \ll 1$ 时,

$$\begin{aligned}\cos(m_f \sin \Omega t) &\approx 1 \\ \sin(m_f \sin \Omega t) &\approx m_f \sin \Omega t\end{aligned}$$

将它们代入式 (1-9), 可得:

$$\begin{aligned}u &= U [\cos(\omega_0 t + \phi_0) - m_f \sin \Omega t \sin(\omega_0 t + \phi_0)] = U \cos(\omega_0 t + \phi_0) \\ &\quad + \frac{1}{2} m_f U \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \phi_0] - \frac{1}{2} m_f U \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \phi_0]\end{aligned}\quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可见, 当 $m_f \ll 1$ 时, 已调频波变得和已调幅波相似, 它的频谱也是由载波频率 ω_0 (中心频率) 和两个边频 $(\omega_0 \pm \Omega)$ 组成, 两者的区别仅在于已调频波的两个边频的符号相反。这时, 它的频带宽度亦为 $2F$ (F 为调制信号频率)。为此, 把在这种条件下得到的调频称为窄频带调频。

在上述两个新函数中, 当 $m_f > 1$ 时, 就可以利用贝塞尔函数理论中的关系式, 所以:

$$\begin{aligned}\cos(m_f \sin \Omega t) &= J_0(m_f) + 2J_2(m_f) \cos 2\Omega t + 2J_4(m_f) \cos 4\Omega t + \dots \\ \sin(m_f \sin \Omega t) &= 2J_1(m_f) \sin \Omega t + 2J_3(m_f) \sin 3\Omega t + 2J_5(m_f) \sin 5\Omega t + \dots\end{aligned}$$

式中, $J_n(m_f)$ 是宗数为 m_f 的 n 阶第一类贝塞尔函数。因此, 就可以将式 (1-8) 写为:

$$\begin{aligned}u &= U [J_0(m_f) \cos(\omega_0 t + \phi_0) - 2J_1(m_f) \sin \Omega t \sin(\omega_0 t + \phi_0) \\ &\quad + 2J_2(m_f) \cos 2\Omega t \cos(\omega_0 t + \phi_0) - 2J_3(m_f) \sin 3\Omega t \sin(\omega_0 t + \phi_0) \\ &\quad + 2J_4(m_f) \cos 4\Omega t \cos(\omega_0 t + \phi_0) - \dots] \\ &= U J_0(m_f) \cos(\omega_0 t + \phi_0) + U J_1(m_f) \{\cos[(\omega_0 + \Omega)t + \phi_0] \\ &\quad - \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \phi_0]\} + U J_2(m_f) \{\cos[(\omega_0 + 2\Omega)t + \phi_0] \\ &\quad + \cos[(\omega_0 - 2\Omega)t + \phi_0]\} + U J_3(m_f) \{\cos[(\omega_0 + 3\Omega)t + \phi_0] \\ &\quad - \cos[(\omega_0 - 3\Omega)t + \phi_0]\} + U J_4(m_f) \{\cos[(\omega_0 + 4\Omega)t + \phi_0] \\ &\quad + \cos[(\omega_0 - 4\Omega)t + \phi_0]\} + \dots\end{aligned}\quad (1-11)$$

由式 (1-11) 可见, 在用低频余弦波信号调频的情况下, 已调频波可以用载频分量 (角频率为 ω_0) 和无限多对上下边频分量 (角频率为 $\omega_0 \pm n\Omega$) 之和来代表, 其中 n 为任意正整数, 即 $n = 1, 2, 3 \dots$ 。上下边频不对称, 奇数的下边频带负号。相邻边频之间的间隔等于调制信号频率 Ω , 这些边频分量与载频分量之间的角频率差为 $n\Omega$ (n 为任意整数)。第 n 条边频分量的振幅为 $U J_n(m_f)$, 这里 $J_n(m_f)$ 可以根据不同的 m_f 值, 由贝塞尔函数来决定, 边频的振幅可能超出载频振幅。图 1-6 给出了当 $n = 0, 1, 2, 3$ 的 $J_n(m_f)$ 与 m_f 值的关系曲线。

由图 1-6 可以看出, 当 m_f 值变化时, $J_n(m_f)$ 的值有正有负, 而且有时为零。表 1-1 列出了 $J_0(m_f)$ 等于零, 即载频分量为零的 m_f 值。

当 m_f 为一定时, 随着 n 的增大, $J_n(m_f)$ 值虽有起伏, 但总趋势是减小的。这意味着远离载频的高次边频其振幅虽有起伏, 但总趋势是减小的。图 1-7 画出了当 $m_f = 4$ 时, 已调频波的频谱图, 由图可以清楚地看出这一规律。

以上分析了单一频率调制的情况。实际上, 由语言和音乐所产生的调制电压频率往往是从 $30\text{Hz} \sim 15\text{kHz}$, 而不是单音频。这时, 已调频波的频谱就更为复杂, 占用的频带也更宽, 这就是所谓宽频带调频。至于它的频谱, 同样可用类似的方法求得, 这里不再赘述。

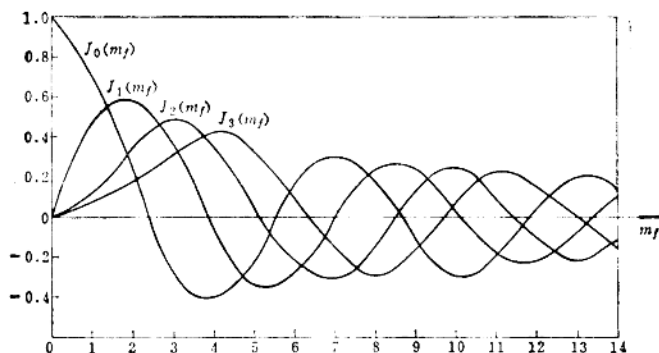
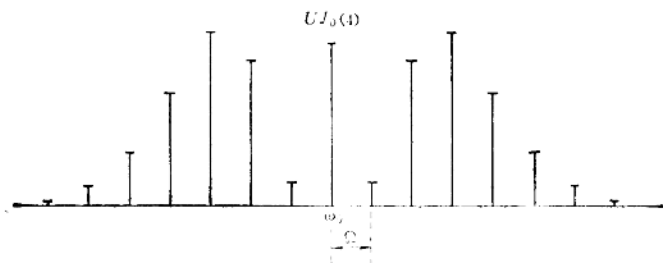


图1-6 贝塞尔函数曲线

表1-1 载频分量为零的 m_f 值

$J_0(m_f)$ 出现零值的次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_f 值	2.40	5.52	8.65	11.79	14.93	18.07	21.21	24.35	27.49	30.63

图1-7 $m_f = 4$ 时调频波的频谱图

2. 已调频波频带宽度

上面的论述已经指出, 从理论上来说, 在已调频波中, 除载频分量外, 还出现有无限多个边频分量, 因而, 已调频波应占据的频带是无限宽的。为了不失真地传送已调频波信号, 调频发射机的高频回路系统的频带也应为无限宽。但是, 这在实际工作中是难以实现的。时至1935年阿姆斯特朗 (Armstrong) 论证了有限带宽的宽频带调频, 能大幅度改善信噪比, 并用这种方法的发射机进行了实验, 证明了调频广播的优越性, 调频广播才得以实现。

实际上, 通过对已调频波的频谱分析, 可以发现, 已调频波的能量绝大部分都集中在载频附近的一些边频分量之中, 即根据 m_f 的不同, 已调频信号的能量主要集中在中心频率附近的 n 对边频中, 而其余一些更高次边频分量的幅度却很小, 以致忽略这些高次边频分量, 对于不失真地传送已调频信号不会带来明显的影响。图1-8给出了不同的 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%), 该图清楚地说明了这一点。