

内 容 简 介

本书比较全面和系统地叙述了调频(FM)袖珍电台的设计与制造技术,并进一步阐述了袖珍电台的小型化、集成电路化设计中的具体问题。书中提供了部分实用电路与工程计算公式和图表。

本书共分十二章。主要内容包括:调频袖珍电台的系统设计和技术指标、振荡与调制、倍频器、高频功率放大器、高频放大器和变频器、中频放大器和限幅器、鉴频器、静噪和低频放大器、袖珍电台天线、集成电路化、节电措施和测量等。

本书可供从事移动无线通信设备研制、生产的工程技术人员和使用、维修人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

调频袖珍电台的设计与制造

陈 俊 张孝素 张建勋
钟毓煌 顾淑敏 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张13¹/₂ 344千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷 印数: 0,001— 4,500册

统一书号: 15034·2674 定价: 2.00元

前 言

随着移动无线通信事业的发展，袖珍电台的应用已相当广泛。它不仅应用于军事，而且在工矿企业、港口码头、商业、交通、警察、消防等各个领域已成为不可缺少的通信工具。袖珍电台具有体积小、重量轻、携带方便、使用灵活等特点。它可以供个人与个人联络用，也可以与基地电台和移动电台组成无线通信网。它可以迅速传递信息，进行指挥行动和生产调度。我国在实现四个现代化的进程中，移动无线通信将起着越来越重要的作用，对袖珍电台的需求也将日益增加。为了适应这一迅速发展的需要，我们总结了这方面的经验和体会，参考了国内外有关资料，编著了本书，以期对移动无线通信事业的发展起到一定的促进作用。

本书首先叙述了调频袖珍电台的技术指标和系统设计，然后对发射机和接收机的各部分电路作了较详细的介绍，并进一步阐述了袖珍电台小型化、集成电路化等问题，最后叙述了袖珍电台指标的测量方法。在编写时，我们力求作到深入浅出，既注意阐述物理概念，又注重了实践中的经验，同时给出了一些实用电路和数据，可供选用参考。

本书在编写过程中，得到了领导和很多同志的大力支持和协助，在此表示衷心感谢。由于编者水平有限，书中定有不妥甚至错误之处，诚恳希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 概述	1
1-1 调频袖珍电台的系统设计	1
1-1-1 调频袖珍电台的组成	1
1-1-2 接收机系统设计	2
1-1-3 发射机系统设计	6
1-2 调频袖珍电台的主要技术指标	9
1-2-1 一般性技术指标	9
1-2-2 发射机技术指标	10
1-2-3 接收机技术指标	12
1-3 调频袖珍电台的发展趋势	14
1-3-1 集成电路化	14
1-3-2 窄带化	16
1-3-3 节电措施	17
1-3-4 数字化	18
1-3-5 发展超小型元器件	18
第二章 振荡与调制	24
2-1 振荡器的基本知识	24
2-1-1 四端振荡器的基本原理	24
2-1-2 电容三点振荡器——考毕兹振荡器	24
2-1-3 改进的电容三点振荡器——克拉泼振荡器	25
2-2 晶体振荡器	26
2-2-1 晶体振子的等效电路和阻抗特性	26
2-2-2 晶体振子的稳频原理	27
2-2-3 晶体对振荡电路的要求	30
2-2-4 晶体振荡器电路设计	33
2-3 频率调制	35
2-3-1 基频晶体振荡器的直接调频	36
2-3-2 $\lambda/4\pi$ 型网络转换的晶体振荡器的直接调频	41
2-3-3 泛音晶体振荡器的直接调频	48
2-4 相位调制	54
2-4-1 矢量合成调相器	55

2-4-2 桥式调相器	58
2-4-3 可变容抗调相器	59
2-5 表面波振荡器	64
2-5-1 概述	64
2-5-2 表面波振荡器及其调频原理	66
2-5-3 表面波调频振荡器电路实例	67
2-5-4 表面波振荡器的应用	69
2-6 话音放大器	70
2-6-1 话音放大器的作用和要求	70
2-6-2 话音放大器的典型电路及其分析	74
参考资料	80
第三章 倍频器	81
3-1 概述	81
3-2 非线性特性的折线法分析	82
3-3 调谐放大器的特性	85
3-3-1 单调谐放大器的特性	85
3-3-2 双调谐放大器的特性	94
3-4 晶体三极管倍频器	98
3-4-1 倍频器的主要指标	99
3-4-2 单调谐三极管倍频器的设计	102
3-4-3 双调谐倍频器的设计	109
3-4-4 其它几种三极管倍频器	112
参考资料	114
第四章 高频功率放大器	115
4-1 高频功率管的一般特性	115
4-1-1 晶体管的频率特性	115
4-1-2 高频功率管的等效电路	117
4-1-3 高频功率管的功率增益	120
4-2 高频功率放大器设计	122
4-2-1 功率增益分配	122
4-2-2 功率管的选用原则	123
4-2-3 基本电路类型]	127
4-2-4 单调谐回路功率放大器的设计	128
4-2-5 LC 组合匹配电路的设计	134
4-2-6 功率放大器的附属电路	147
4-2-7 制作中注意事项	150

参考资料	153
第五章 高频放大器和变频器	154
5-1 概述	154
5-2 高频放大器	155
5-2-1 小信号高频晶体管参量	155
5-2-2 高频放大器的单向化	163
5-2-3 LC 调谐高频放大器	172
5-2-4 具有高滤波性能的高频放大器	187
5-3 变频器	194
5-3-1 变频原理	194
5-3-2 混频器工作状态的选择	201
5-3-3 本地振荡器	204
参考资料	206
第六章 中频放大器和限幅器	207
6-1 中频放大器	207
6-1-1 中频放大器的主要指标	207
6-1-2 晶体管和 LC 回路级联中频放大器的设计要点	210
6-1-3 带通滤波器的设计	217
6-1-4 集成化中频放大器的设计	232
6-1-5 寄生反馈的来源和稳定措施	239
6-2 限幅器	244
6-2-1 概述	244
6-2-2 二极管限幅器	246
6-2-3 三极管限幅器	248
参考资料	252
第七章 鉴频器	253
7-1 概述	253
7-2 LC 调谐回路鉴频器	253
7-2-1 斜率鉴频器	253
7-2-2 振幅鉴频器	254
7-2-3 相位鉴频器	259
7-2-4 比例鉴频器	263
7-2-5 福斯特-西勒 (Foster-Seeley) 鉴频器	266
7-2-6 不平衡鉴频器	277
7-3 模拟乘法鉴频器	280
7-3-1 模拟乘法器鉴相	280

7-3-2 模拟乘法器鉴频	282
7-4 陶瓷鉴频器与晶体鉴频器	285
7-4-1 陶瓷鉴频器的工作原理	285
7-4-2 压电陶瓷振子和电容串联的差动鉴频器	287
7-4-3 不平衡式陶瓷鉴频器	295
7-4-4 陶瓷鉴频器线性范围的扩展	301
7-4-5 晶体鉴频器	304
参考资料	305
第八章 静噪和低频放大器	306
8-1 静噪	306
8-1-1 概述	306
8-1-2 常用的静噪电路类型	307
8-1-3 三种静噪类型的比较	311
8-1-4 噪声型静噪电路的设计	319
8-1-5 制作和使用中的几个问题	329
8-2 低频放大器	331
8-2-1 无变压器输出电路	331
8-2-2 低频放大器和静噪的联接	336
参考资料	336
第九章 袖珍电台天线	337
9-1 概述	337
9-2 人体对天线的影响	338
9-3 天线类型	343
9-3-1 鞭状天线	343
9-3-2 送受话器引线外皮软天线	347
9-3-3 加载天线	349
9-3-4 螺旋天线	352
9-3-5 环形天线	356
9-3-6 多匝环形天线	361
9-3-7 铁氧体天线	363
9-4 天线的转换	364
参考资料	368
第十章 集成电路化	369
10-1 概述	369
10-2 集成电路整机系统设计的考虑	370

VIII

10-3 集成电路设计的考虑	375
10-4 一个电路集成化的步骤	387
10-5 集成电路组件设计举例	388
参考资料	396
第十一章 节电措施	397
11-1 概述	397
11-2 串联供电与脉冲供电	397
11-2-1 串联供电方式	397
11-2-2 脉冲供电方式	399
11-3 低压微功耗集成电路和微功耗晶体管	402
11-3-1 微功耗集成电路举例	402
11-3-2 微功耗晶体管系列产品举例	408
11-3-3 微功耗整机举例	408
11-4 选用大容量电池	408
第十二章 测量	410
12-1 测量条件	410
12-2 发射机指标测量	411
12-3 接收机指标测量	417

第一章 概 述

1-1 调频袖珍电台的系统设计

调频（FM）袖珍电台，是一种体积小，重量轻，便于手持、袋装或身挂，使用方便的小型无线电话设备。它适于工矿企业、机场、车站、港口、施工工地、警察、消防及交通等部门的流动人员随身携带。

在讨论电台各级电路设计之前，先谈谈电台的系统设计问题，以便对电台的基本组成及对每个组成部分在整机中的作用，有一个基本的了解。

1-1-1 调频袖珍电台的组成

典型的 FM 袖珍电台，主要由如下四部分组成（见图 1-1）：

- （1）接收机；
- （2）发射机；
- （3）控制部分；
- （4）附件：天线及送、受话器和电源等。

接收机、发射机是电台的核心。本书将重点叙述收、发信机各部分的电路设计，介绍几种实际应用的电路。控制部分是实

现收、发信机功能转换的电路，它通常包括带音量调节的电源开关、收发信机电源、天线和送受话器转换电路，以及静噪控制和音频呼叫电路等。因为袖珍电台体积很小，一般功能要求比较简单，为了使电台结构紧凑，便于操作，一般总是将控制电路装在

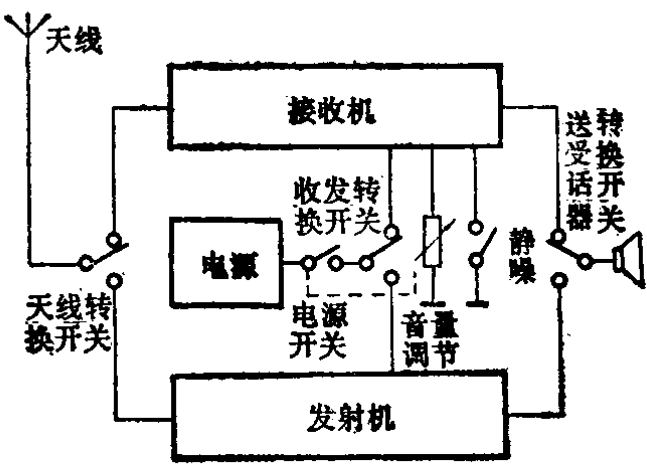


图1-1 袖珍电台组成图

一个很小的操作手键中，或者直接装在主机上。

袖珍电台的小型天线和人体对天线的影响，是一个很重要的问题，将在第九章中叙述。

1-1-2 接收机系统设计

在国外，广泛使用的 FM 袖珍电台有 150 MHz 和 400 MHz 两个频段的，800MHz 频段的也正在研制和试用。在我国，150MHz 频段的已投入使用，400MHz 频段的正处于研制和试用阶段。下面将列举四个例子来说明这两个频段接收机的系统设计和增益分配。

接收机系统设计需要注意两个问题：一是选择一次超外差式或是二次超外差式；二是在保证接收机灵敏度的情况下，怎样合理地将增益分配到电路各级。

一次超外差式的优点是电路简单，因为没有第二混频和第二本振，谐波干扰少。为了保证足够的象频抗扰度，中频频率不宜选得太低，一般选标准中频频率 10.7 MHz。整机增益除高放承担 20~30 dB 以外，其余全部增益由中放承担(对灵敏度为 $1\mu\text{V}$ 的接收机来说，大约需要 110~120 dB)。由于频率高、增益大，故中放制作难度大。

二次超外差式电路比一次超外差式的复杂，多了一个第二混频和第二本振，谐波干扰大，但中频可采用两个，一般采用标准中频 10.7 MHz 或 21.4 MHz（第一中频）和 465 kHz（第二中频）。增益可以分配在这两个中频级。由于第二中频频率较低，因此中频级便于制作。所以，一般都采用二次超外差式电路。

为了使袖珍电台接收机的灵敏度能达到 $0.5\sim 2\mu\text{V}$ ，这主要取决于高放，其次是中放。而高放的好与坏，关键在于高频管的质量。下面我们以灵敏度为 $1\mu\text{V}$ 的接收机为例，谈谈增益的分配问题。假设输入信号 $U_i = 1\mu\text{V}$ ，其输出信号 $U_o = 3\sim 5\text{V}$ （对 9 V 及 12 V 电源的接收机，当采用三极管饱和限幅时，其限幅电压分别约为 3 V 及 5 V）。根据增益公式：

$$K_v=20\lg\frac{U_o}{U_i} \tag{1-1}$$

代入数值后，得

$$K_v=20\lg\frac{3}{1\times10^{-6}}\approx129\text{dB}$$

K_v 就是为达到灵敏度点所需要的总增益。

另外，在各种不同的使用环境下，各级放大器的增益也不完全一致，为了获得良好的调幅抑制制度，需要深度限幅（见第六章）。因此，必须给整机的增益留 10~20 dB 的富裕量。所以，整机实际所需增益为

$$K_v=20\lg\frac{U_o}{U_i}+(10\sim20)\text{dB} \tag{1-2}$$

代入数值后，得

$$K_v=129\text{dB}+(10\sim20)\text{dB}=139\sim149\text{dB}$$

下面我们将介绍工作于 150 MHz 和 400 MHz 频段、采用一次和二次超外差式的四种实际应用电路的增益分配情况。

〔例1-1〕 150MHz 频段二次超外差式 XBA-22 型 电台接收机方框图和增益分配，如图 1-2 所示。

该机除高放采用分立元件组装外，其他各级采用薄膜（或厚膜）组件。

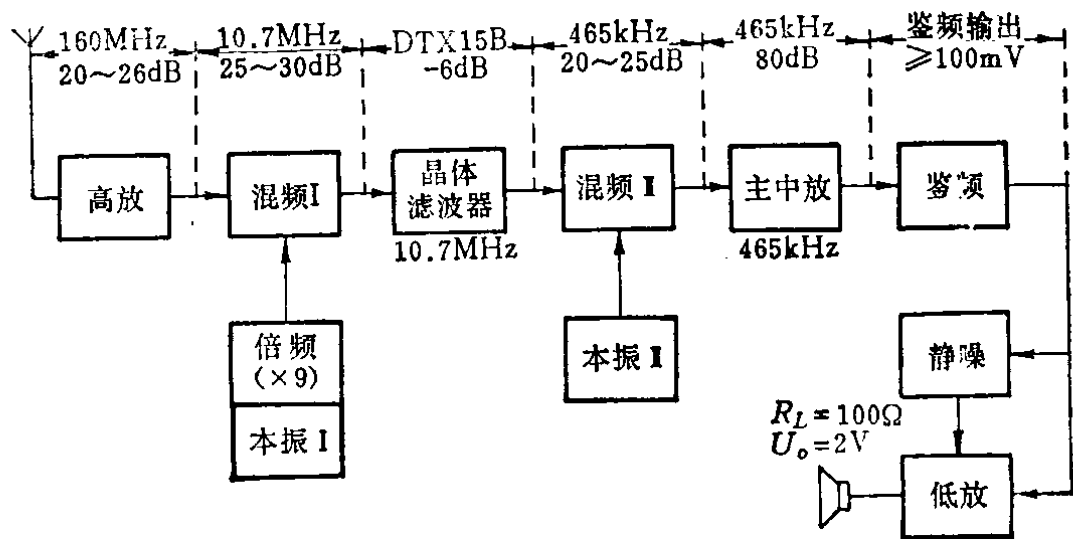


图1-2 XBA22 型电台接收机方框图

〔例1-2〕 150 MHz 频段一次超外差式 丹麦 CQ511R 型电台接收机方框图和增益分配, 如图 1-3 所示。

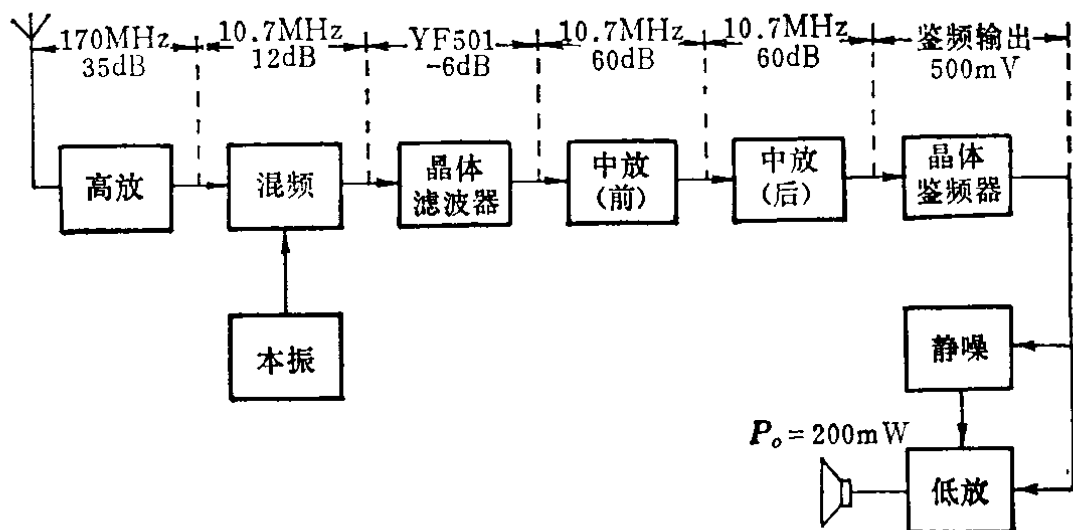


图1-3 丹麦CQ511R 型电台接收机方框图

该机全部用晶体管分立元件紧装配组成, 采用一次超外差式电路, 整机增益主要由中放级承担, 约为 120 dB。它由六级单调谐级联放大器组成, 每级都封在金属屏蔽罩内, 以防止寄生反馈。另外, 采用了晶体鉴频器, 以减少鉴频零点的漂移; 提高稳定性和鉴频跨导。

在 400 MHz 频段, FM 袖珍电台的系统设计思想与 150 MHz 频段是一致的。但有两个问题必须加以考虑: 一是因工作频率提高以后, 高放级的带宽也相应有所增加, 用 10.7 MHz 作为第一中频时, 象频抗扰度不易作好, 因此第一中频的频率最好采用 21.4 MHz; 二是随着工作频率的提高, 对前级高频低噪声管要求很高 ($f_r \geq 2000 \text{ MHz}$, $N_F \leq 3 \text{ dB}$), 此管不易制作, 价格也很昂贵。在实用中通常有高放式和直接混频式两种。下面将举两个例子予以说明。

〔例1-3〕 400MHz 频段日本 TTR-40G 型电台 二次超外差有高放式接收机方框图和增益分配, 如图 1-4 所示。

该机是用线性 IC 和部分晶体管分立元件紧装配而成, 结构紧凑, 体积小。接收机用了—个晶体滤波器和一个陶瓷滤波器,

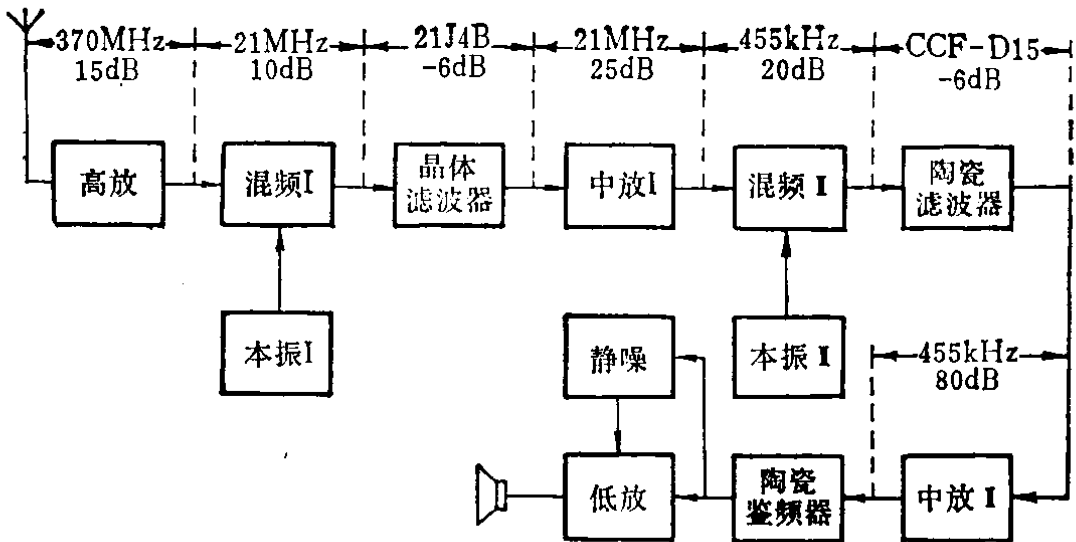


图1-4 日本TTR-40G型电台接收机方框图

选择性好，邻道抗扰度可达 70 dB 以上。鉴频器采用了陶瓷鉴频器，性能比较稳定。

〔例1-4〕 400MHz 频段英国 PF 2 UB 型直接混频式电台接收机方框图和增益分配，如图 1-5 所示。

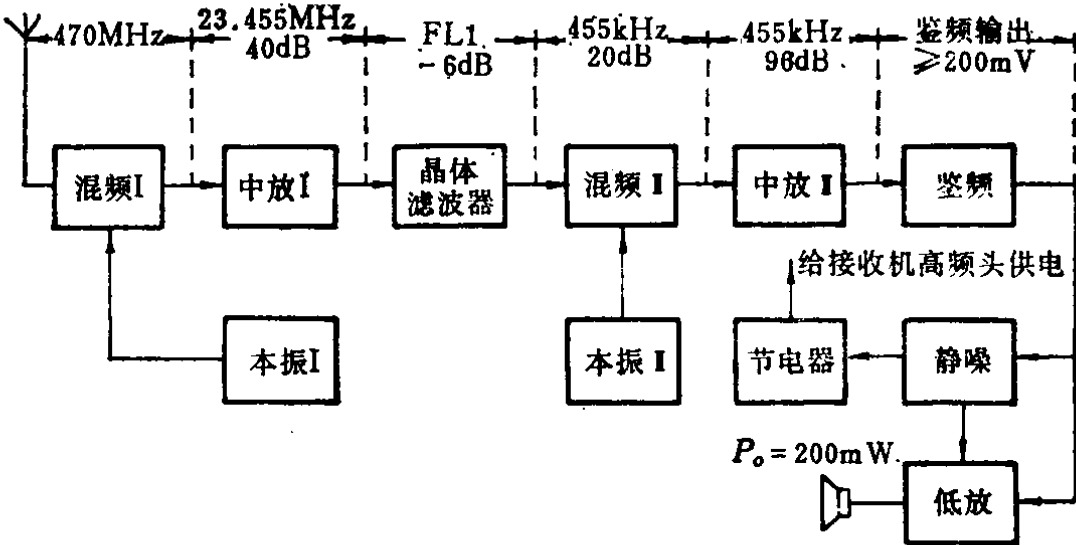


图1-5 英国PF2UB 型电台接收机方框图

该机全部采用晶体管分立元件紧装配组成。虽然使用普通元件，但电路设计比较巧妙，采用了串联供电，耗电较小。例如，第二中放增益达 96 dB，用四级 RC 放大器串联供电，该机还采用了脉冲供电节电器，使电台在等待接收状态时耗电仅为

1.3mA。

该机采用模拟乘法鉴频器，这是一般电台中少见的。另外，还采用超高频低噪声二极管 BAB 作第一混频，灵敏度达到 $1\mu\text{V}$ ，信杂比 $S/N \geq 20\text{dB}$ 。

以上列举的 150 MHz 和 400 MHz 频段 FM 接收机二次超外差式、一次超外差式，有高放式和直接混频式实例四个，已成为接收机设计的基本形式，

可供设计时参考。

1-1-3 发射机系统设计

发射机系统设计，一是要考虑采用何种调制方式？二是要考虑采用几次倍频？发射机的调制方式，可以分为直接调频发射机和调相发射机两种。直接调频发射机的方框图，如图 1-6 所示。调相发射机的方框图，如图 1-7 所示。

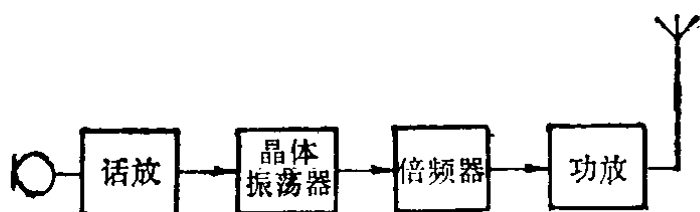


图1-6 直接调频发射机方框图

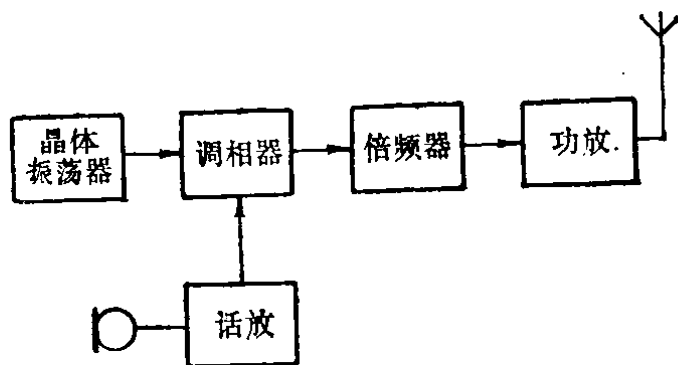


图1-7 调相发射机方框图

这两种调制方式的主要区别是：直接调频是在晶体振荡器中完成了频率调制，不需要另外的调制器，因此电路简单；而调相则要单独的调制器，即频率调制是在调相器中完成的。就频率稳定度而言，调相发射机的频率稳定度要比直接调频的高。但是，在实际中，由于采用窄带调频，在晶体振荡器中直接进行频率调制的频偏不大（一般为 5kHz），所以对频率稳定度的影响也不大。晶体振荡器是发射机的核心，它的作用是产生频率稳定的载波。倍频器的作用是把来自晶体直接调频振荡器或调相器的已调高频信号进行倍频，达到所需要的载波频率，同时增大调制指数，达到所要求的频偏。在取得工作所需要的载波频率和频偏的情况下，

倍频次数应尽可能少。只有这样，才能使发射机的杂波小、电路简单。功率放大器的作用是将载波放大到输出所需要的功率，通常由 1~2 级组成，输出功率一般在 0.1~1W。整个发射机的级数与使用晶体管的优劣有关，也与对发射机性能要求有关。袖珍电台的发射机，由于功率小，杂波辐射要求不高，为使电路简单，一般不采用滤波度较好但电路复杂的双回路，而要求使用功率增益和效率较高的晶体管。如果发射机的输出功率为 0.5W，晶体振荡器的输出功率为 5mW 左右，那么整机需要的功率增益为

$$K_p = \frac{500\text{mW}}{5\text{mW}} = 100 \text{ 倍}(20\text{dB})$$

这 100 倍的功率增益分配方案可以考虑如下：倍频器约为 4 倍（输出约 20mW），推动级约为 5 倍（输出约 100mW），末级约为 5 倍（输出约 500mW）。

〔例 1-5〕 XBA22 型电台发射机的方框图，如图 1-8 所示。该机采用晶体直接调频振荡器（兼作三倍频器），后跟两级二倍

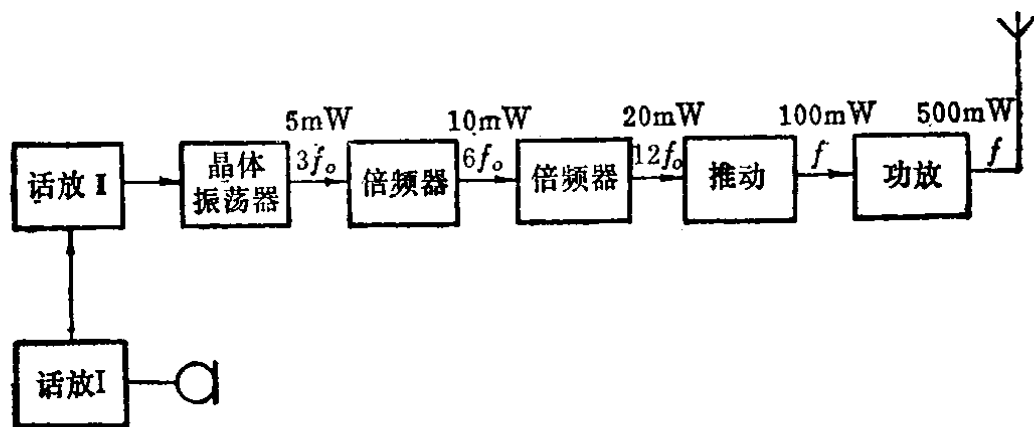


图 1-8 XBA22 型电台发射机方框图

频电路，总共 12 次倍频，频偏 7kHz，倍频以后是两级功率放大器。晶体直接调频振荡器和话音放大电路是薄（厚）膜组件，其他是采用分立元件紧装配。整个发射机电路简单，体积（ $100 \times 35 \times 13\text{mm}^3$ ）很小。

〔例 1-6〕 英国 PF2UB 型电台发射机的方框图如图 1-9 所示。

该机工作在 400MHz 频段，发射机输出功率 0.5W，采用相

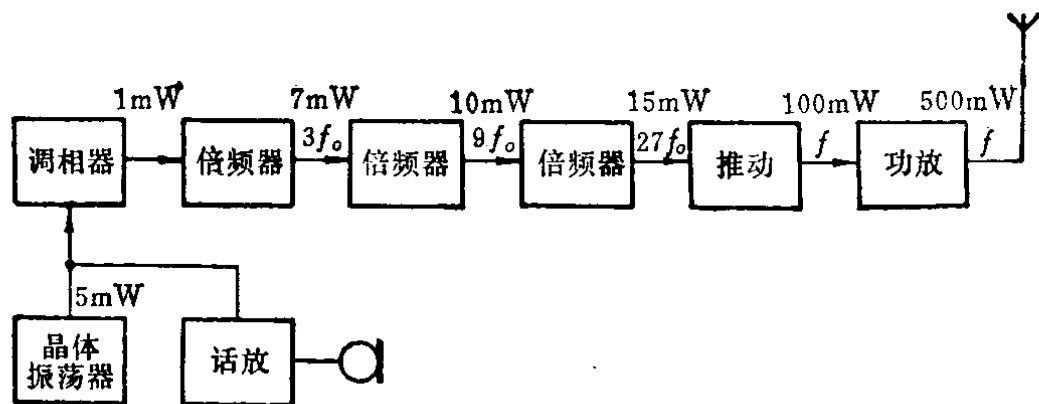


图1-9 英国PF2UB型电台发射机方框图

位调制，频偏 5kHz。三级倍频器，共 27 次倍频。功率增益分配大致如图 1-9 所示。整机采用小型分立元件紧装配，体积 $(138 \times 21 \times 23\text{mm}^3)$ 也很小。由于晶体管的增益和效率较高，所以发射机的耗电量不大，约为 180mA。

由于晶体基频只能做到 25MHz 以下，且调制频偏也不能太大，为了得到 150MHz 或者 400MHz 的发射频率和一定的调制频偏，就必需采用倍频。但是倍频会带来一些不利的因素，如增加了电路的复杂性，以及产生杂波辐射等，因此必须综合考虑。

载波频率为 $f = n f_0$ 。式中， n 为倍频次数； f_0 为晶体的基频。在发射机的频谱中，除了 $f = n f_0$ 以外，每间隔 f_0 就有一个频率点，尤其是不希望有的 $(n \pm 1) f_0$ 和 $(n \pm 2) f_0$ 的频率成分，因为它很难被滤波器完全滤掉。而且当 n 愈大时， $(n \pm 1) f_0$ 和 $(n \pm 2) f_0$ 的频率愈靠近 f ，要滤除就更加困难了。因此 n 要尽量取小。 n 最小的限制将取决于晶体的基频。而晶体的基频工作频率一般都小于 25MHz，因此，如果发射机工作在 150MHz，则 $n \geq f / f_0 \geq 150 / 25 \geq 6$ ，如 XBA22 型电台就是采用 $n = 3 \times 2 \times 2 = 12$ 。如果工作于 400MHz，则 $n \geq f / f_0 \geq 400 / 25 \geq 16$ ，如 PF2UB 型电台就是采用 $n = 3 \times 3 \times 3 = 27$ 。

长期以来，人们在寻找减少倍频次数的方法。首先，从振荡调制入手，采用泛音晶体，从而提高晶体振子实用的频率上限。目前，三次泛音晶体已广泛被使用。随着五次和七次泛音晶体的研制，在窄带调频中，倍频次数已在不断减少。现在，150MHz 直

接调频振荡器，不需要倍频的发射机已经实现。对 153、200MHz 泛音晶体振荡器进行直接调频的试验，可以得到 10kHz 的频偏。

在一般的调相器中，调制线性在理论上限制在 $\pm 1\text{rad}$ 以内，不断研制线性良好的调相器也有助于减小倍频次数，有人将两级这样的调制器串联使用，结果使调制度倍增，而倍频次数却减半。

表面波振荡器在袖珍电台发射机中的应用将开辟新的途径。随着表面波振荡器的进展，上述困难问题可望得到圆满的解决，尤其是在 400MHz 以上的频段，它的潜力很大。在发射机中采用表面波振荡器，就可以完全去掉倍频器，直接使用基频工作，并能得到所需要的频偏。目前尚需解决表面波振荡器的频率-温度稳定性。对于那些频率稳定度要求不太高的地方，或者对温度范围变化比较小的场合，现在就可以得到满意的结果。采用表面波振荡器的发射机方框图如图 1-10 所示。

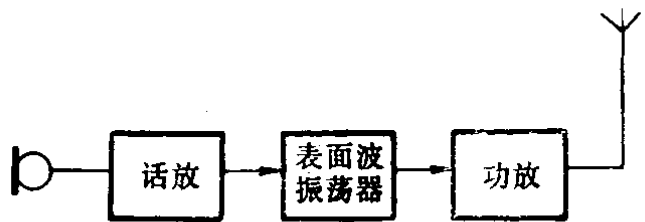


图1-10 采用表面波振荡器的发射机方框图

1-2 调频袖珍电台的主要技术指标

1-2-1 一般性技术指标

1. 工作频率范围

民用袖珍电台频率范围，一般在 27~74.5MHz，150~167MHz、403~470MHz 和 800MHz 等频段。由于频率较低时，遇到的各种干扰比较大，因此，目前采用 150~167MHz 和 403~470MHz 频段的较多。由于用户的急剧增加和电子器件的迅速发展，800MHz 频段也已开辟使用。

2. 频道和频道间隔

袖珍电台的通信频道，可以采用一个或多个，当采用多个频道时，频道间隔分为 100kHz、50kHz、25kHz 和 12.5kHz。随着用户的增加和器件的进展，100kHz 频道间隔已不再采用，要

逐步过渡到 25kHz 乃至 12.5kHz。频道间隔的缩小,有利于使有限的无线电频谱资源得到更充分的利用。但是,在技术上它也会带来不少困难。目前,电子工业部标准〔27~470MHz 调频(或调相)民用小型无线电话机技术条件〕规定频道间隔为 25 kHz。

3. 天线和天线阻抗

天线的种类很多,可以根据使用要求确定。天线的阻抗为 50Ω 。

4. 电池与耗电

从晶体管的工作能力和便于与车载电台兼容起见,电池电压选用 12V 比较合适。但为了使体积小,也可以选用比 12V 低的电压。

从目前电池的类型和成本方面考虑,采用可以复充使用的镉镍密封蓄电池比较好。镉镍密封蓄电池有圆柱式和扣式两种,其规格参见表 11-5,可以根据电台结构和使用要求选用。

耗电问题对袖珍电台极为重要,因为半导体集成电路的出现和采用,使袖珍电台的体积和重量大为减小,而电池却占了较大的比重。为了缩小体积、减轻重量,要求收发信机都要尽量采用低功耗电路,长期处于等待接收状态的接收机,尽可能采用节电电路,发射机要选用高效率的晶体管,力求提高整机效率。

5. 工作环境

温度 $-10\sim+55^{\circ}\text{C}$

$-25\sim+55^{\circ}\text{C}$

电源电压 标称电压 $\pm 10\%$

6. 体积 袖珍电台不大于 $0.5\times 10^6\text{mm}^3$; 便携电台不大于 $2\times 10^6\text{mm}^3$

7. 重量 袖珍电台不大于 1 kg; 便携电台不大于 2 kg

1-2-2 发射机技术指标

1. 发射机输出功率

袖珍电台发射机的输出功率,一般在 $0.1\sim 2\text{W}$ 。