

内 部

78001

电子技术会议录

——微波铁氧体材料及器件专辑

第四机械工业部第一研究所

一九七八年二月

前 言

四机部磁性材料及器件专业技术情报网于1977年10月20~26日在四川灌县召开了微波铁氧体材料及器件技术交流会。会上收到稿件共69篇。大会责成本刊编辑部编印会议录。由于印刷篇幅的限制,现只能将大会各小组推荐的部分文章共20篇予以选登,其余文章有的还将在网刊上发表。

编 者

1977年11月16日

目 录

微波铁氧体器件在卫星通讯接收系统中的应用.....	(1)
YIG滤波器在侦察接收机中的应用	(14)
搜索接收中应用的单晶铁氧体器件.....	(20)
2-4 GHz YIG 磁调振荡器的分析.....	(26)
快速跳频甚高频带通滤波器.....	(36)
静磁延迟线的研制.....	(41)
边导模的理论分析.....	(50)
共振型边导模环行器的实验研究.....	(58)
用m 式滤波器考虑的集中参数环行器.....	(64)
500-1000兆赫倍频程隔离器的研制.....	(75)
高平均功率使用的波导结环行器功率容量提高的若干问题.....	(80)
五厘米波段锁式非互易铁氧体微带移相器的研制.....	(85)
波导铁氧体移相器的匹配问题.....	(97)
内磁路结型锁式铁氧体开关.....	(113)
十公分高功率快速开关.....	(123)
微波多晶钽铁石榴石的研制.....	(127)
多晶铁氧体的介电损耗.....	(132)
微波锂铁氧体材料.....	(145)
微波铁氧体器件测试的讨论.....	(150)
在给定磁场下旋磁材料磁化强度及温度曲线测量仪的一些讨论.....	(167)

微波铁氧体器件在卫星通讯接收系统中的应用

成都 392 信箱 72 号

一、前言

微波铁氧体器件主要是用于雷达、通讯、导航、侦察、干扰、遥测、遥控、导弹制导和微波测量等电子设备中。

本文的目的,主要是简单的叙述微波铁氧体器件在通信接收系统的应用,即低功率器件的应用。在通讯接收系统中,各种通讯手段,比如卫星通讯、散射通讯、微波接力等,对于铁氧体器件的要求大致相同,根据应用的情况不同,指标略有差别以外,主要的器件指标都是大同小异的。因此,我们仅以卫星通讯接收系统为例,对于低功率微波铁氧体器件在整机中的应用原理,器件指标的提出,以及以后发展的方向,国内外目前的发展水平等方面作一略述。文中首先对于卫星通讯接收系统作一概要的说明,而后对于系统中主要应用的微波铁氧体器件逐一叙述。有些特殊情况的应用,例如目前尚未应用,而有待于器件发展,提高其性能之后再应用的移相器等,在文中也略有提及。

卫星通讯是一种新型的通讯方式,它在近十几年来有了显著的发展,并得到了广泛的使用。目前,已成为国际国内通讯,特别是远距离、大容量、跨洋干线通讯的重要手段。随着微波铁氧体器件的发展,使之在卫星通讯系统中得到了广泛的应用,并展现了这类器件广阔的发展前景。

另外要说明的是,微波铁氧体器件因为主要用于微波频段,因而就应用数量方面来说,它和大量应用在载波机和计算机中的软磁、矩磁材料相比,要少得多。但是就其发展的前景,低损耗、大带宽、高的稳定性和可靠性等方面的工作还是大量的。随着新原理、新效应的发现,还要研制出更多更好的新器件,以供在通讯中的应用需要。近年来边导模器件的出现就是一个明显的例证。

在实践中,整机、器件、材料三方面的发展总是互相促进和相互制约的。随着通讯容量的增大,质量的提高,总是要求研制出更新、更高性能的器件。由于器件的水平不断提高,和新型器件的不断出现,不但使其应用更为广泛,也使得整机的性能不断提高。另外,在整机和器件这一对相互制约又相互依赖的矛盾中,愈来愈有整机和器件联合设计的必要。一方面,整机对器件提出要求,另一方面,器件也对于整机提出必要条件、这方面的例证在文中还要提及。

可以预料,卫星通讯技术在八十年代将有一个更大规模的、全面的发展,应用范围将日益扩大,对现代通讯体系将产生更加深刻的影响。因而,微波铁氧体器件也将要有一个更加明显的发展,才能满足形势的需要。

二、卫星地面站接收系统的微波铁氧体器件

1. 卫星地面站概述

为了对卫星地面站有个概括的了解,我们不妨以日本茨城地面站为例,画出它的接收系

统的简略方框图（如图1）。

来自卫星的微弱信号，由于远距离传播，以及大气层复杂条件的衰减，已变得很微弱。国际电信通讯卫星的下行信号频带是3700—4200MC，这个相当微弱的信号由馈源经波导开关送到低噪声参量放大器，经过二级（或三级）带宽为500MC的参量放大器放大以后，送往带宽为500MC的微波晶体管放大器，再次放大，获得必要的增益。其后分为若干路（微波分路），又由变频器将其信号变为相应的中频信号，再经均衡解调器之后送往电话终端或者电视控制中心，由国内传输设备送往各地。

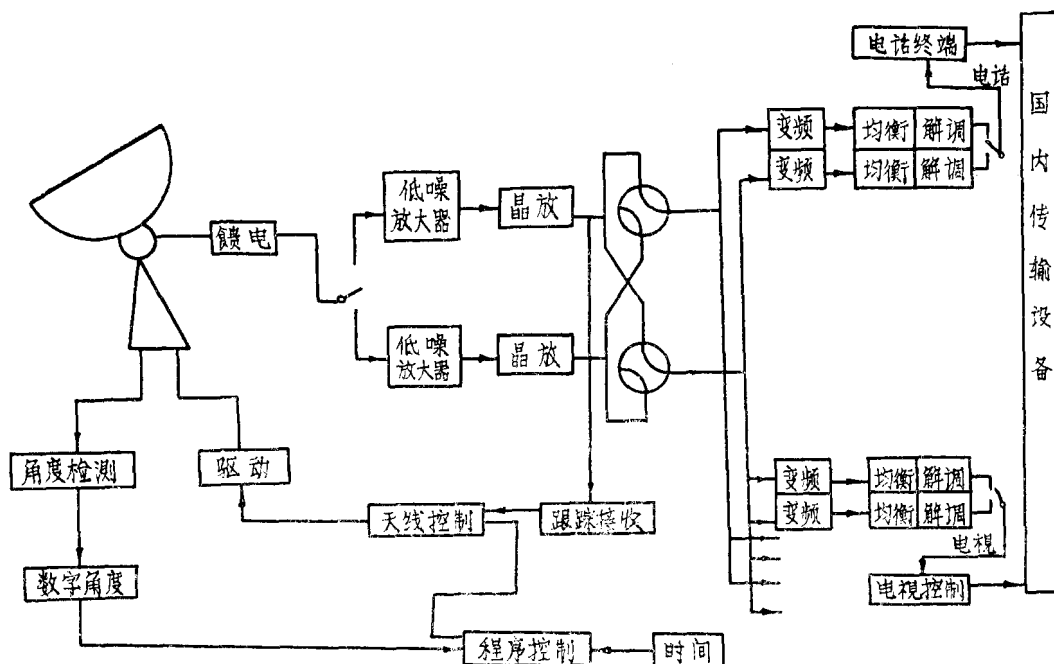


图1 日本茨城地面站接收系统

由图1可以看出，在均衡解调器之前的大部分方框图中，都有微波铁氧体器件的应用。在天线系统，如果采用单脉冲跟踪，必须要采用铁氧体调幅器（或PIN二极管调幅器），以便随时取出天线的方位与俯仰角度误差信号，送给天线伺服系统，驱动天线始终对准卫星，实现自动跟踪，以确保良好的接收。在低噪声参量放大器中，必须采用5端（四端）的多端口结环行器。结环行器是低噪声参量放大器的重要组成部分，它直接影响了放大器的性能。在低噪声参量放大器的泵浦系统，往往为了稳定泵浦功率的幅度，而采用电调衰减器。在微波晶体管放大器中，为了减少晶放对参放，变频器对晶放的影响，就必须采用隔离器。隔离器使用的场合是很多的，比如参放泵源系统为了保证体效应振荡器的正常稳定的工作也必须采用隔离器。变频器的输入与输出端都加隔离器，等等。

单晶YIG振荡器和滤波器，在搜索、扫描的电子设备中，在克服镜像噪声和排除邻近信号的干扰中，得到了广泛的应用。

微波吸收材料在卫星通讯系统中也有很多的应用，比如用在终端负载和可变衰减器中，它具有体积小和应用方便等优点。

在天线测试，整机调整，各种测试仪器中，诸如扫频仪、标准信号发生器等，都大量使用各种微波铁氧体器件。尤其是500—1000MC，1000—2000MC以至于毫米波段的宽带隔离

器更获得了大量的应用。

下面我们就接收系统所应用的主要铁氧体器件逐一进行简略叙述。

2. 地面站接收系统固定磁场器件的应用

(1) 结环行器——低噪声参量放大器的重要部件

低噪声放大器是实现卫星通讯的一个最重要的环节。目前主要是应用微波参量放大器。由于参量放大器的发展、性能的不断提商，对卫星通讯的逐步发展具有相当的影响。由于静止式同步卫星定位于离地面35800公里的高度，卫星上的太阳电池的输出功率是有限的，卫星上的天线增益也是有限的，因此卫星的有效幅射功率不可能太大。而卫星地面站的接收性能，按国际标准站的要求，它的G/T（即天线增益和系统噪声之比）必须满足并大于40.7分贝/°K。要达到这样高的要求，不但要采取大直径的天线（27~30米），而且接收机的输入端噪声必须小于20°K。这样，目前广泛采用了三级致冷参放。它的大致方框图如图2所示。

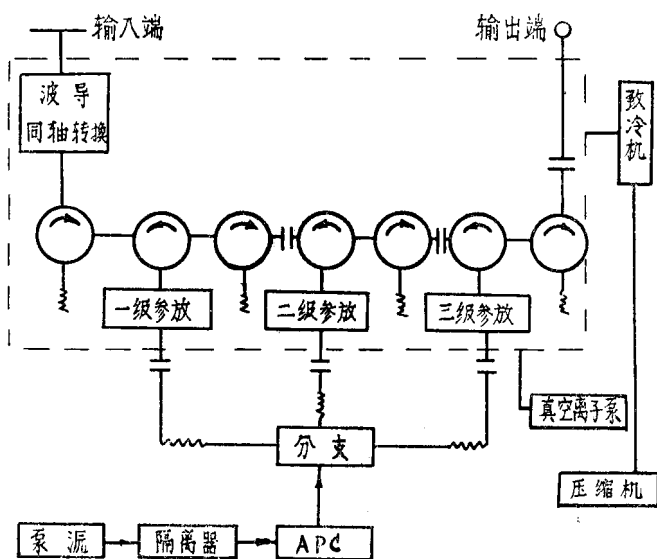


图2 致冷参量放大器

可以看出，结环行器是微波参量放大器不可缺少的重要部件，它用来分离单端负阻反射型参量放大器的输入和输出信号。即由天线来的微弱信号经环行器进入参放进行放大，放大的信号再反射回环行器，由于环行器的不可逆作用，将由3端输入到下一级参放。这时，为了减少反射到输入端口的返转损耗，2—1端的隔离应作的足够大。同时，环行器的输入电压驻波比和插入损耗直接影响到参量放大器的噪声性能。

低噪声系统的噪声性能是用

下式表征的：

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 \dots G_n} \quad (1)$$

这里： T_e 为低噪声放大器等效到输入端口的噪声温度（°K）

T_{e1} 、 T_{e2} …… T_{en} 为各级参放的噪声温度

G_1 、 G_2 …… G_n 为各级参放的增益

T_{e1} 是包括波导同轴转换和环行器在内的损耗所贡献的噪声

$$\text{这时：} T_{e1} = (L_1 - 1) T_0 \quad (2)$$

L_1 为贡献 T_{e1} 的损耗值

T_0 为物理温度

可见，假如只计算由环行器损耗所引起的噪声，假定环行器损耗为0.4db（两个结），则在致冷20°K时， $T_{e1} \approx 2.2^\circ\text{K}$ ，在常温300°K时， $T_{e1} = 33^\circ\text{K}$ 。在低温20°K条件下，环行器损耗提供的噪声是很小的，但在常温下就很可观了。由于应用致冷机是很昂贵的，而且可靠性较差，已成为影响接收系统发生故障的主要来源。因此，目前全世界对于中型或小型地面

站的要求正在增长, 这些地面站将装备噪声温度较大型天线为高的天线。在这种情况下, 如采用冷参放在经济上和技术上都是不合适的, 因而常温参放正在发展起来, 并大有代替冷参放的趋势。目前国外的采用热电致冷的4GC常温参放的噪声温度已达到小于45°K (日本 HEC 公司) 和更小 (美国) 的水平。在这种情况下, 环行器的损耗就成为一项特别重要的指标了。

另外, 环行器的输入输出驻波比也对噪声性能有很大影响。假如驻波比小于1.25, 那么所引起的反射损耗将大约为0.05db, 用下式表征:

$$L_A = 10 \log_{10} (\rho + 1)^2 / 4\rho \quad (3)$$

L_A 为反射损耗, ρ 为电压驻波比。这时由 (2) 式可得出, ρ 为1.25时, 对于 T_{e1} 的贡献为3°K左右, 也是很可观的。

为了减少环行器损耗对于噪声的贡献, 目前的常温参放大多采用四端口结环行器。即天线输入端跟参放之间只有一个结, 为单结损耗, 国外用高质量的多晶柝榴石材料作成的四端口环行器的损耗小于0.1db, 采用单晶可作的更小, 这样对于 T_{e1} 的贡献就小于7°K。同时, 采用四端口环行器之后, 2-1端的隔离就应该作的足够大, 否则参放就不能正常的稳定工作, 频幅响应变差, 我们用图3来说明之:

假如环行器的2-1端隔离为20db, 天线的回波损耗为17db, 参放的功率增益为13db的话, 那么被天线反射回来的参放输出信号为:

$$-17 + 13 - 20 = -24 \text{ db}$$

此值显然是不够的, 因而2-1端的隔离应大于35db或者更大。

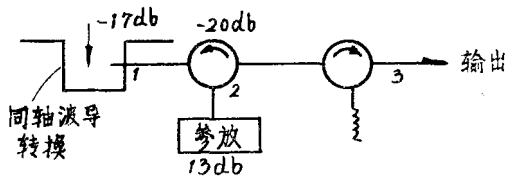


图3

另外, 电压驻波比对噪声的贡献可用下述情况来说明。当使用常温参放时, 环行器也处在常温下, 由环行器负载产生的噪声则为300°K这个噪声由天线反射到参放输入端, 若环行器的输入驻波比为1.25:1相当于回波损耗20db, 这时有下式所示:

$$\Delta T = \frac{T_o + T_r}{R - 1} \quad (4)$$

式中: T_o 为负载温度

T_r 为参放噪声温度

R 为天线输出端回波损耗

若 $T_o = 300^\circ\text{K}$, $T_r = 55^\circ\text{K}$, $R = 20\text{db}$, 则有 $\Delta T = 3.5^\circ\text{K}$ 。

天线输出端的电压驻波比与环行器输入驻波直接有关, 因而环行器的输入驻波也是很重要的一个电气参数。

综上所述, 低噪声放大器对于结环行器所提出的要求是, 反向隔离应尽可能的大; 插入损耗和输入输出电压驻波比应尽可能的小; 温度稳定性要好。从带宽来说, 目前出现了大量倍频程的环行器, 满足参放要求是不成问题的。国外大量生产的参放用低温环行器的损耗在C波段可以从小于0.1db到0.2db不等, 隔离20db到30db, C波段常温环行器的插入损耗可以小于0.1db, 隔离大于35db (日本 NEC 公司), 插入损耗小于0.06db的结环行器亦有产品。在国内, 结环行器近年来发展很快, 采取双Y结和单Y结的情况都有, 插入损耗也可以接近0.1db, 隔离大于30db以上, 很接近国际水平。

波导结型环行器频宽一般在10~30%。国内用于参放的4.5CM四端口波导结型环行器采

用鎂錳鋁材料可以得到正向损耗小于0.2到0.3db, 反向隔离大于30db, 电压驻波比小于1.1:1, 7.5cm的三端口波导结环行器采用鈣鈦石榴石材料可以作到正向损耗小于0.08db, 而反向隔离大于30db, 电压驻波比小于1.05:1。

近年来由于集成电路的发展, 参放也可以集成化, 环行器则可以作成微带型式。微带型式的环行器分为三种, 一种是嵌入式, 即将铁氧体元片嵌入到陶瓷基片中, 然后将整个基片用薄膜工艺刻成微带电路, 并在铁氧体元片区加磁场而成。另一种是用整个铁氧体做成基片; 第三种是所谓的“插入式”, 即将做成的环行器, 插入到集成电路中去。微带环行器用于集成参放主要是为轻小型化, 诸如机载移动站或者雷达等方面有所应用。英国曾经建立了一个固定地面站, 采用了全集成化电路, 但其性能较非集成化而言, 是不优越的。目前, 由于微带环行器的插入损耗还较大, 为0.4db左右, 隔离也不如带线环行器为大, 故在地面固定站中采用的还不够多。有待进一步提高性能, 使之应用更加普遍化。

在前言中我们已经提到, 整机和器件的发展总是互相促进和相互制约的, 这是一对对立统一的矛盾。在解决这一矛盾的过程中, 愈来愈有整机和器件联合设计的必要, 以相互满足, 相互补偿。

为了使参量放大器实现宽带化, 人们经常采用宽带补偿电路。即Dejager所指出的, 用若干串并联交替的网络补偿可以使一个电抗性负载获得宽带匹配。一般的参量放大器结构如图4表示; 同时, 它的等效电路可以用图5来说明。

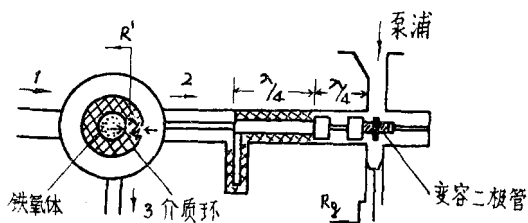


图4 参放结构

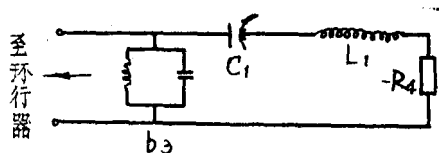


图5 参放等效电路

我们看到, 泵激变容管部分除提供一个必要的负载 $-R_A$ 而外, 还提供一个 C_1 和 L_1 组成的串联回路。若使这个串联回路谐振在信号频率的中心频率上, 为了增加带宽必须附加一个有负斜率参量的并联谐振回路 b_3 。通常这个并联

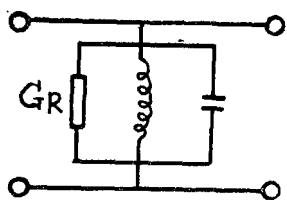


图6 环行器等效为一个并联谐振器

谐振回路是由 $\frac{\lambda}{2}$ 开路支节或者一节 $\frac{\lambda}{2}$ 传输线, 或者两节 $\lambda/4$ 传输线所提供的。这样不但使信号电路增加了一定的损耗, 而且在结构上也较复杂。我们知道, 环行器的结通常也可等效为一个并联谐振回路, 如图6表示:

这个并联谐振回路的谐振频率为:

$$\omega_r = \frac{1.84}{R \sqrt{\mu_{eff}}} \quad (5)$$

式中 R 为样品半径, μ_{eff} 为有效导磁率, 与 $4\pi M_s$ 以及磁化场强度有关。假如我们能够使 ω_r 等于信号中心频率, 并且并联谐振器在 ω_r 处的斜率等于 b_3 , 同时满足环行器的环行要求, 则可以在环行器和变容管之间实现共扼匹配, 实现参放的宽带化。

另外,如图5,呈现在环行器样品表面的阻抗 R' 大抵为 20Ω 左右,而从二极管向环行器看去的 R_g (R_g 的大小是为满足增益要求而设计的)也通常在 20Ω 左右。假如把环行器与放大器直接做在一起,变为一体化,并寻求二者之间的共扼匹配,则可大大增加放大器的带宽,又省去了阻抗变换电路以及外加补偿电路的损耗,这样是大有好处的。

上述的设想在国外文献中很少报导。但在国内已有人在这方面开始了工作。例如可以把环行器同放大器作在一起,虽然在电路中仍采用了二节 $\lambda/4$ 阻抗变换段作为阻抗变换兼宽带补偿作用,但是把环行器的结已置于距离二极管一个波长或者 $1\frac{1}{4}$ 波长处,使得结的并联谐振器,也兼起放大器宽带补偿的作用。这是一个可喜的尝试,也获得了一定的效果。

今后的工作,应该就环行器结的并联谐振器作一些定量的研究,寻求其完全取代经常采用的传输线式或支节式宽带补偿电路的方法。使其 Q_1 能随要求变化是我们所期望的。

(2) 接收系统中大量应用的隔离器

在地面站接收系统中应用各种隔离器的场合是很多的。前面已经提到,在泵源与参量放大器腔体之间,在微波晶体管放大器的输入和输出端,变频器的输入与输出端等等都要采用铁氧体隔离器,使得系统能够正常稳定的工作,排除外来干扰的影响。

在泵源与参量放大器腔体之间隔离器的使用如图7所示。

作为泵浦源的甘氏振荡器(或速调管,现在大量使用的为甘氏体效应管振荡器)的输出功率和频率稳定度是影响参放稳定性的一个重要因素。然而隔离器的性能也直接地影响了甘氏振荡器的功率和频率稳定度。我们知道,微波振荡器输出端

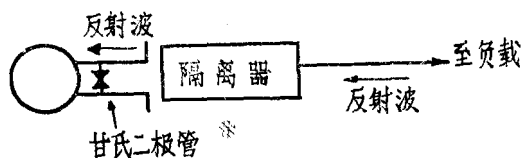


图7

接匹配负载时,其性能往往是优良的。但是在一般整机应用中,负载往往是不匹配的,就使得振荡器工作极不稳定,功率和频率都会发生变化,而且经常发生跳模现象。为了参放调整上的方便,对于甘氏振荡器有一定的频带要求。采取外腔稳频的振荡器牵引带宽一般有3%~5%。但是,假如不用隔离器的话,那么不但使这个牵引带宽化为乌有,而且主振频率也极不稳定,常发生跳模和偏移。隔离器的隔离如果太小,输入电压驻波比太大,以及温度稳定性不大好等,都会产生上述现象而影响振荡器性能。我们在1.25公分和8毫米甘氏振荡器调试中,使用正向损耗 $<0.5\text{db}$,反向隔离 $>20\text{db}$,电压驻波比 $<1.2:1$ 的小型波导结隔离器,仍然存在因隔离器的性能不一律而存在不可互换的缺点(由于隔离器的反向隔离和驻波比不一样而使负载性质发生变化,从而不可互换),一个振荡器必须固定某一个隔离器使用。因此,隔离器必须使反向隔离足够大,大于25db或更大,才能免于或减少由负载反射对振荡器的影响,甘氏振荡器的振荡频率升高时,往往输出功率要变小,为满足参放的功率要求,必须使隔离器的正向损耗足够低,输入电压驻波比也应进一步降低,使用隔离器以后,甘氏振荡器的性能大大改善,稳定度提高,基本避免了跳模现象。甘氏振荡器频率稳定度可达 $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 以上,要优于速调管。高性能小型隔离器的出现也必将进一步提高振荡器的稳定性和可靠性。

另一方面,参放对于泵频的要求愈来愈向更高频率发展,目前国内生产的毫米频段的隔离器还大多是谐振式的,这种隔离器在使用上不如波导结小型隔离器方便,而且体积较大。因而研制30~60GC以上的小型波导结隔离器也是今后要进行的工作。一九七六年国外报导已有26.5~110GC的T结波导隔离器产品。1409所在今年七月份鉴定了4毫米和8毫米的波导隔离

器，其主要性能为，在65GHz~75GHz范围内，可以作到带宽大于5GHz，插入损耗小于1.5db，隔离大于18db，驻波小于1.4：1。在8毫米34~36.5GHz范围内，可作到带宽大于200MHz驻波小于1.25：1。

在微波晶体管放大器的输入和输出端使用的隔离器也主要是为了保证放大器工作的稳定，减少和排除晶放对参放，混频器对晶放的影响，其使用原理和要求同泵源隔离器大致相同。目前，微波晶体管放大器大多作成集成型式，因而隔离器也多作成相应的微带型式。因为晶放的噪声对整机噪声虽然也有直接的影响，但是由于它接在参放之后，对整机输入端的噪声贡献已不如参放用环形器那样显著，所以它的正向损耗小于0.2db已可以满意的使用了。

在微波混频器中使用的铁氧体隔离器如图8所示：

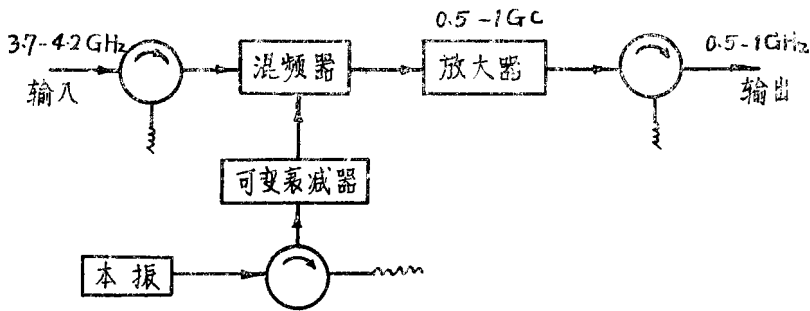


图8 微波混频器

图中使用了3种隔离器，以确保混频器的工作正常与稳定。我们采用了3.7~4.2GHz的同轴型结环行器作为隔离器，3.2GHz的隔离器亦为同轴结型。0.5~1GHz的隔离器目前国内尚未有产品提供，因而暂时尚未使用。成都电讯工程学院303教研室研制的隔离器在0.6~1GHz频带内的性能是这样的，正向损耗小于1.5db，反向隔离大于15db，电压驻波比小于1.3：1。其结构大致如图9所示。

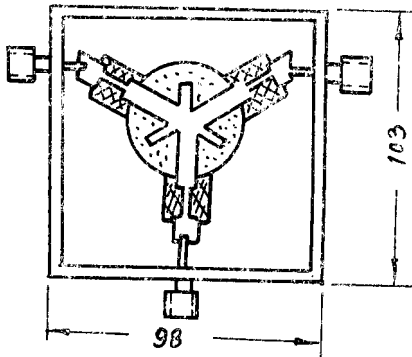


图9 L波段隔离器

为了获得宽频带，减少体积，采用了双Y结中心导体，再加上一节四分之一阻抗变换器，以达到宽带匹配。变换器中的电介质采用ε为20的含有二氧化钛的聚苯乙希材料。

在1GHz以下的倍频程隔离器虽然在国外已有产品，但国内进行这方面的工作也是近两年的事。在这个频段，采用集中参数的型式，虽然可以作到小型化，但单个环形器很难做到0.5~1GHz的倍频程带宽。有人试图采用级连型式来达到，这样不但要增加损耗，而且带内波动也较大。国外已报导有

100~200MHz、200~400MHz、300~600MHz、450~800MHz、800~1000MHz的集中参数器件，在1.7GHz可作到30%带宽，温度稳定性很好。但0.5~1GHz的集中参数器件尚未见到报导。

由于边导模器件的出现，使得在2~13GHz频段范围内可以作出倍频程以至数个倍频程的宽带隔离器，但是1GHz以下的边导模器件报导甚少。只有一九七六年MTT曾报导一个220~

400MHz的高功率边导模隔离器，插入损耗在225MHz时为0.9db，400MHz时为2.2db，驻波小于1.4：1，反向隔离大于15db，温度范围从-40℃~70℃。而且这时的边导模器件并不比分布参数结环行器小很多。

目前，国内在卫星通讯、微波电子设备中，诸如扫频仪、标准信号发生器等方面都很需求0.5~1GC的高性能隔离器，而且要减少重量，缩小体积。因而对于这类器件的研制就是很迫切的了。我们在考虑整机方案时，因为没有这类器件，只好牺牲整机性能而暂不采用。

3. 变动磁场器件的应用

(1) 电控衰减器——泵源稳幅环路的主要环节

我们知道，当一个直流纵向磁场加在铁氧体上时，通过铁氧体的电磁波会发生法拉弟旋转效应，使电场的方向偏转一个角度。当直流磁场变化时，这个偏转角度也发生变化，如果在电磁波传播方向上的某一定角度放置一衰减片（通常把衰减片放置在两块铁氧体之间，使衰减片平面垂直于电场方向如图10所示），那么因法拉弟旋转的角度的不同，衰减片对电场分量的吸收亦不同，用这种方法制成泵源稳幅环路的电控衰减器，这类器件在稳幅环路的使用情况如图11所示。

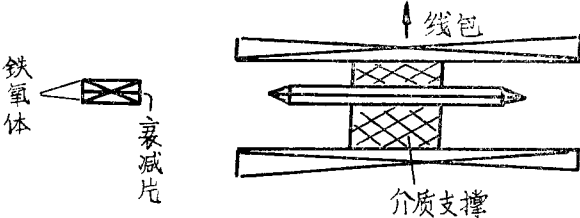


图10 电控衰减器

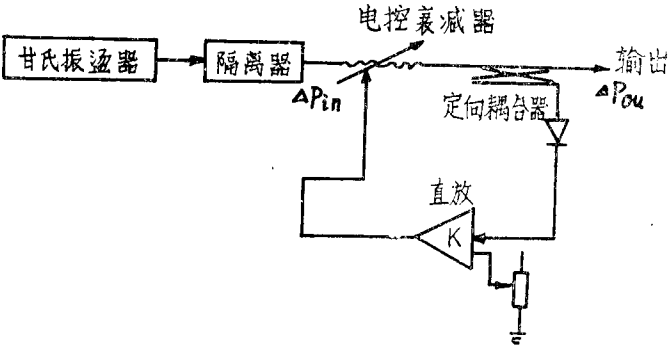


图11 泵源稳幅环路

因为泵源功率的变化是参量放大器不稳定的重要因素，当这个功率变化 $\pm 0.1\text{db}$ 时，致使参放增益变化 $\pm 1\text{db}$ 。如果变化太大，将使参放发生自激。因而稳幅环路在参放分机中是很必须的。电控衰减器的简单工作原理是这样的。当温度的变化。或者外界的干扰引起甘氏振荡器的功率变大或变小时，就产生一个误差信号 $\pm \Delta P$ ，经定向耦合器、检波器输出的误差电压则为 $\pm \Delta u$ ，再经直流放大器比较放大K倍后送往电控衰减器，这个放大后的电压加到电控衰减器的线圈，使原来的磁场变小或变大，从而使衰减器对功率的衰减量变小或者变大，以达到输出功率稳定的目的，即 ΔP_{in} 变化以后，使得 ΔP_{ou} 变化极小。

环路的增益（即对功率的稳定程度 $\Delta P_{in}/P_{ou}$ ），是用下式来表征的：

$$A = \frac{\Delta P_{in}}{\Delta P_{ou}} = K \cdot K_D \cdot S$$

式中：K——直流放大器的放大倍数

K_D ——检波器的斜率（V/db）

S——电控衰减器的跨导（db/V）

若直流放大器的放大倍数为2000倍，检波器的斜率为20mV/db，要使环路增益为30db（31.6倍），则要求电控衰减器的跨导为0.8db/V（在工作点的斜率）。

可见，电控衰减器在工作点（一般取为2~3db）附近的跨导越大越好，它可以减轻对直流放大器的压力。直流放大器的增益越高，则放大器越不稳定。环路对电控衰减器的要求还有以下几点：

①输入电压驻波比要小，以减少反射对甘氏振荡器的影响。

②零场损耗要小，通常甘氏振荡器的功率是有限的，而且频率越高，输出功率就越小。如果参量放大器采取二级或三级共泵时就显得功率更不够用了。为保证环路有一定的可控范围，比如 $\pm 1.5\text{db}$ ，则由于零场损耗太大而迫使提高环路工作点，这是不利的。因而对于泵功率引进的零场衰减应尽可能小。

③线包的直流电阻不宜太大。

目前，国内生产的1.25公分电控衰减器一般达到正向损耗小于0.5db，跨导大于0.5db/V，线包直流电阻为1K Ω 左右，基本满足使用。但是，随着参量放大器的发展，泵频也在不断的提高，因而研制8毫米以上以至4毫米的电控衰减器就成为现实的课题。并且应进一步提高其性能，以满足整机使用的要求。

（2）调幅器的应用

上节所叙述的电控衰减器实际上就是一个调幅器，所不同的是应用场合不同，而且电控衰减器的磁场为直流磁场，而在本节所要叙述的用于高频调制“和”“差”幅度单脉冲跟踪系统的调幅器的磁场为交变磁场，为正弦调制或者余弦调制。即外加磁场按正弦或余弦规律变化，则输出的微波信号振幅也按同样规律变化，从而起到调幅作用。这种调幅器在这里的应用如图12所示。

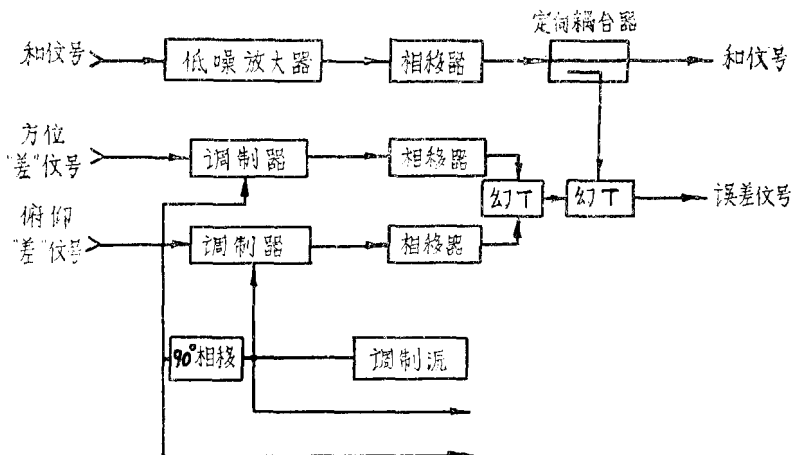


图12 误差信号的取出

其大致工作原理是这样的，即由五喇叭（或九喇叭）馈电器输出三个信号，和信号（包括通讯、跟踪讯号）、俯仰“差”信号和方位“差”信号，其中方位“差”信号和俯仰“差”信号分别进入调幅器，两个调幅器的调制信号共用一个375Hz的调制源，用一个90°相移器使得两个调幅器分别得到正弦调制和余弦调制。调制后的方位和俯仰“差”信号经相移器到幻T相加，成为方位和俯仰“差”信号的合成信号，此合成信号与经相移器的和信号在幻T相加，则得到和信号与误差信号两路输出，图12示出了这种情况。这两路信号送往伺服系统的跟踪机，经放大解调，最后送往驱动马达，驱动天线随时校正其俯仰和方位，实现自动跟踪。

这种调幅器在结构上跟电调衰减器略有不同，如图13所示：

与电调衰减器所不同的，只不过铁氧体棒为无棒，波导为无波导，两边到矩形波导的过渡采用聚四氟乙希阶梯匹配，矩形波导输入与输出E面相差90°。在应用中，调幅器之前的微波信号因为未经放大，故要求器件损耗小以及电压驻波比小，以减少实际的最小调制损耗。我们自制的这类调制器在4公分频段，8%带宽内的电压驻波比为1.15，但损耗还较大，为0.8db，需要进一步提高性能才能满意使用。

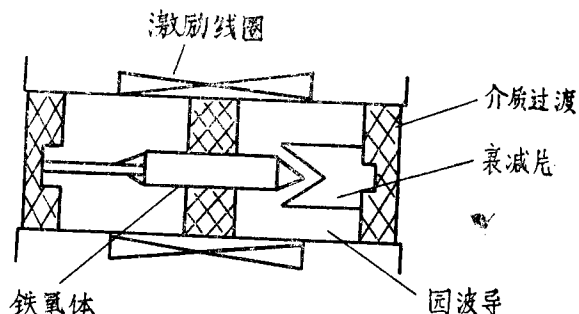


图13 调制器结构

由图12可以看出，在这里要采用3个移相器，在取出“和”信号以及方位和俯仰“差”三个信号之前，在五喇叭之后，仍需采用8个移相器。若用九喇叭，则要用的移相器更多。目前，在地面站接收系统所应用的移相器大多采用介质移相器和三螺钉移相器，在应用中不承受大功率，而且这种移相器的损耗比铁氧体移相器小得多，一般都小于0.1db。假如铁氧体移相器的插入损耗能同介质移相器及三螺钉移相器比拟，则它兼有体积小优点而被采用。目前，各种铁氧体移相器大量的用于现代相控阵雷达中，是相控阵雷达的关键部件之一。

4. 单晶器件——YIG磁调振荡器和滤波器

前面我们已经讲过，在现代电子技术侦察设备中，必须对整个信号频段实行不间断的监视，就需要在很宽的频率范围内实现快速电调，以搜索、扫描，发现有用的信号。YIG单晶振荡器能理想地满足这种要求。另外，在许多微波设备中，也要应用YIG单晶振荡器。在这里，举出YIG振荡器的一个应用例子，如图14所示：

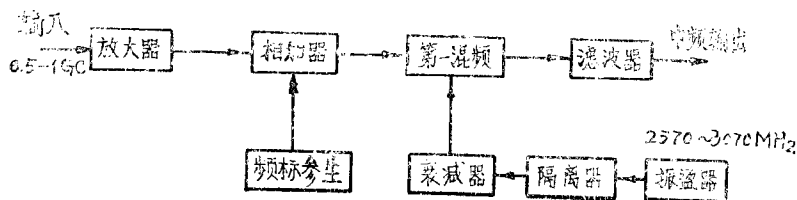


图14

在图14的应用中，因为信号频率的带宽为 500MHz ，因而YIG振荡器的带宽有 500MHz 就行了，如果它的振荡频率为 $2570\sim 3070\text{MHz}$ ，将与信号保持 2070MHz 的中频。一旦信号频段内有信号出现时（比如 500MHz ），则在YIG振荡器的对应频率上（ $500+2070\text{MHz}=2570\text{MHz}$ ）处有中频输出。这个中频信号经滤波、放大、二次变频等处理，最终送往示波管，显示一个脉冲信号。YIG振荡器在使用中对机器性能影响主要有以下几个方面：

①频率偏移：频率偏移使中频输出的频率发生偏移。当扫描带宽较窄时，（比如可以在 200MHz 、 100MHz 、 50MHz 、 20MHz 范围内扫描以及单频使用。）频率偏移过大会使频率偏出扫描范围。相对而言，扫描状态对频偏的要求比单频使用时要宽松得多。单频使用时频偏的影响则更为严重，致使中频输出发生偏移而后边的解调器解不出信号来。在采用锁相技术时，长期漂移和瞬时漂移都需要有一定的限制。

发生频率偏移的主要原因是振荡器的温度漂移和磁滞所致。温度漂移可采用恒温箱措施和对小球精确定向来消除。近年来，国内外在解决温度漂移和磁滞频偏等方面作了不少工作，也收到了显著的成效。

我们目前采用的YIG振荡器在 $2000\sim 3200\text{MHz}$ 的范围内输出功率大于 6mW ，温度漂移为 $3\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ （扫频状态），因为在本应用中对温度漂移的要求并不严格。以上指标已基本满足使用了。

②扫速：扫速也是影响机器性能的一个重要指标。限制扫速的主要因素是磁场相对于线圈电流的滞后，在频率较高时，涡流是主要的。可以采用不同形式的金属腔和磁路材料来提高。本应用中对扫速要求不高，仅50次/秒。

③非线性：改善非线性也是一个很重要的问题，工作中要求振荡频率跟线包的电流成线性关系。在这方面，国内外有人作了很多工作，收效也是很显著的。

④频率范围：在本应用中的带宽为 500MHz ，因而YIG振荡器在这里使用，频率范围是不成问题的。目前，国内外生产的各种YIG振荡器都可以达到倍频程以至数个倍频程范围。输出功率从几毫瓦到数十毫瓦的量级。调谐频率从 0.5GHz 一直到 40GHz 。一九六七年微波刊出广告，美国Watkins—Johnson公司有 $8\sim 18\text{GHz}$ ， $18\sim 26.5\text{GHz}$ ， $26.5\sim 40\text{GHz}$ 的最新产品。

YIG滤波器为六十年代新技术，它经常用作频率预选器，在微波接收机中广泛应用。假如与YIG电控固体源（微波晶体三极管、体效应管、阶跃恢复二极管等）配合统调更为有利。YIG滤波器作为电子对抗中的侦察与干扰设备，可以自动控制干扰敌人的信号。YIG滤波器可用于可调微波鉴频器、频谱分析仪、宽带数字式频率计及在全景接收机中作射频频谱监视等。

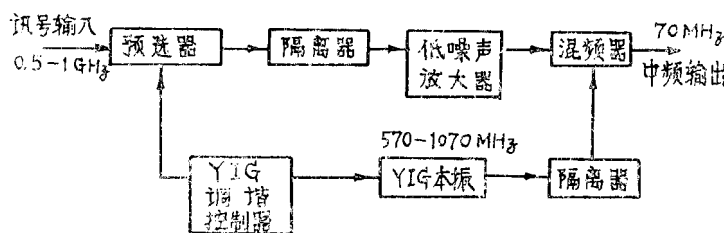


图15 YIG滤波器和振荡器应用一例

在地面站接收系统，主要用YIG滤波器作为预选器和后选器。有时在使用中为了方便，只采用预选器或者只用后选器，也可同时采用。图15是用作预选器的一个例子。

在一般接收机中,为了抑制镜像频率和防止相隔为一个中频(比如70MHz)的邻近讯号进入接收机而产生干扰,都必须使用预选器。用YIG滤波器作为预选器与YIG振荡器配合调谐是相当便利的。

图15的应用原理大致是这样的。即来自分路器的500~1000MHz的载波可能很多。所以通过窄带可变预选器以抑制互调干扰和镜像频率的干扰,同时预选出所需要的信号,经隔离器,低噪声放大器放大之后进入混频器,输出70MHz的中频信号送往70MHz放大器。

YIG滤波器的独特特点之一就是多倍频程调谐范围,它的调谐范围可以做的很宽,单个多倍频程滤波器已做到1~18GHz,复盖L、S、C、X、K五个波段,可以满足需要宽带调谐应用场合。

YIG滤波器和振荡器在实际设计中有很多共同的问题,因而上述YIG振荡器对机器影响的几个方面对于YIG滤波器来说也同样存在。另外,YIG滤波器是一个固有的窄带器件,通常它的百分带宽只有2~3%,据报导也有作到5%的,不象其它微波滤波器那样可以作到百分比大的器件。同时,如果单是增加带宽也就影响了带外抑制以及在通带内出现寄生影响。因而在很多场合影响了这类器件的应用范围。比如在图15的应用中,同时需要3dB带宽40MHz或者更宽一些的滤波器,在器件制作上就显得困难了。这将是对于这类器件今后的重要课题。国外的四级YIG滤波器在0.5—1GHz范围内,3dB带宽为35MHz,插入损耗4dB,带外隔离为80dB。

另外,为了减轻YIG滤波器在设计制作上的困难,在整机方案的采取上也应相应的考虑一些有效的措施。整机和器件综合考虑以便统筹解决这一对矛盾。例如在本应用中,若把图8的混频器输出频率提高,用1—1.5GHz或1.5—2GHz等高中频率。这样,YIG滤波器在带宽、带外抑制以及带内寄生响应诸方面的压力就减轻了许多。由于YIG滤波器的输入与输出端一般必须采取隔离器,0.5—1GHz的隔离器的问题也随之解决了。

看来,正如参量放大器对环行器的要求一样,整机与器件这一对矛盾的解决,一方面都需要提高器件性能,向高水平发展,另一方面就是整机和器件综合考虑,联合设计。用户与厂家密切配合,共同提高机器质量。

5. 铁氧体吸收材料的发展,它在电子技术中的应用也越来越广泛。比如可用于飞行器和地面装备为防护敌方电子侦察所采用的伪装保护,无回波隔离室的吸收材料以及用于波导和同轴线中吸收元件的材料。在地面站接收设备中,微波铁氧体吸收材料可用作终端负载和可变衰减器等。

我们知道,在参量放大器中,每一级参放加至变容二极管的直流偏压是彼此独立的(如图2,每级之间都要加直流隔离)。并且为了防止直流通路,图2中各环行器的负载必须是隔直流的。若用超高频电阻作隔直流负载,不仅体积大而且使用也很不方便,结构也较复杂。因此,在这里采用铁氧体材料来作吸收负载,此两个缺点都能得以克服。

国内通常采用NiZn系的铁氧体材料($4\pi M_s$ 为5000左右)用作4GHz的环行器负载,其形状如图16所示。

它的尖端可磨成楔形,以获得好的驻波系数。其厚度和长度就可以根据需要进行调整。使用时,只要把如图16形状的两块负载片填充在带状线的内外导体之间,适当的调整其位置,能获得很好的吸收匹配负载。

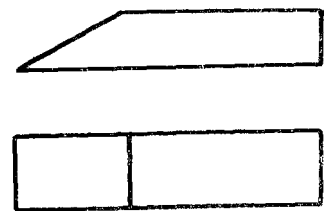


图16 负载形状

用氯丁橡胶铁氧体吸收材料作负载边能得到很好的结果。把它切成一定的形状，填充在WR137波导内，在6—8 GHz频率范围内可得到驻波系数小于1.09:1。

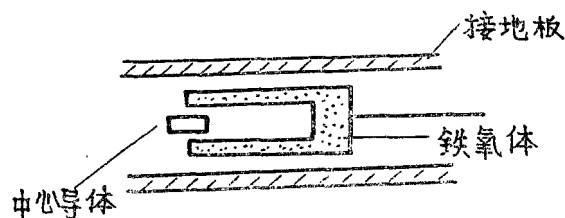


图17 可变衰减器

铁氧体负载跟调谐机构连接可以移动，达到可变的目的。我们在图17的结构中，对碳基铁（P4材料）和NiZn材料（ $4\pi M_s$ 为500左右）作了对比，在最大衰减情况下得到如图18的大致曲线。

由图18可见，使用NiZn铁氧体比较优越。据报导，迄今为止，为终端负载，衰减器以及其它装置新研制的材料，都存在工作温度、导热率及被吸收的功率电平不够高等缺点，但在小功率应用时却基本能满足要求。

电波吸收材料的前景是很广阔的，尤其是大力发展电子对抗方法和器材不仅是国外目前的特点，而且予料将来也是如此。铁氧体吸收材料在所有诸吸收材料中占着很大的比重。

Emerson 和 Cuming 公司生产了 Eccosorb Zn 陶瓷铁氧体吸收材料，供作衰减器和终端负载用。这样板材尺寸为 $25 \times 25 \times 3.2$ 毫米，它的特点是在30兆赫~50千兆赫频段内损耗很大。用作可变衰减器的铁氧体吸收材料一般作成如图17所示的形状（图8中所用可变衰减器就是这种型式）。

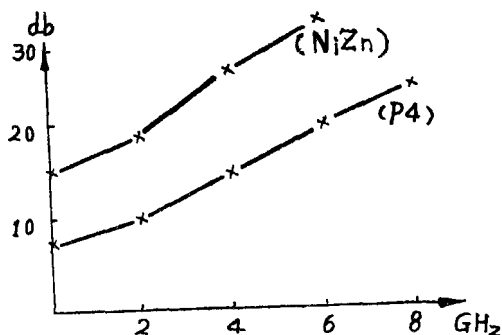


图 18

参 考 文 献

- 1.《卫星通讯工程》人民邮电出版社1975年出版
- 2.《微波铁氧体进展》第三次全国磁学和磁性材料会议综合报告
- 3.IEEE trans MTT No.12 1974
- 4.IEEE trans MTT No.3 1976 P129-135
- 5.Microwaves No.2 1976
- 6.Microwaves 1976
- 7.“L频段宽带隔离器的研制”成都电讯工程学院 1977.3
- 8.TDK 1972 (Japan) 产品目录
- 9.“电磁波吸收材料综述”国外电子技术 No.7 1976
- 10.微波技术动态 No.5 1971

YIG滤波器在侦察接收机中的应用

1029 研究所

YIG 滤波器的调谐速度较快, 调谐线性很好, 不需要机械调谐部分, 因此可靠性较高, 这些特点使它在侦察接收机中得到了广泛应用。

目前 YIG 滤波器在侦察接收机中最典型的应用是作超外差式侦察接收机的预选器。它比老式的机械调谐的预选器速度快, 线性好, 可靠性高, 并且可以实现高精度的统调。它与 YIG 调谐的本机振荡器一起构成了侦察接收机高频部分的核心, 使外差式侦察接收机性能得到了显著提高。

YIG 滤波器在高放检波式接收机中也有应用。但由于其选择性和分辨力与侦察接收机的要求还有较大距离, 并且理论上没有可能解决此问题, 应用有限。

本文主要讨论 YIG 滤波器在外差式接收机中用作为预选器的一些问题, 顺便也提及一些在高放检波式接收机中的应用问题。

一、应用 YIG 预选器的外差式接收机方框图

使用 YIG 预选器的外差式接收机的典型方框图如图 1 所示。它与普通外差式接收机没有明显的差别。由于侦察接收机要求调谐范围很宽, 并且要求在宽的调谐范围内和大的动态范围上不要有虚假的响应, 因而对 YIG 预选器提出了一系列要求。

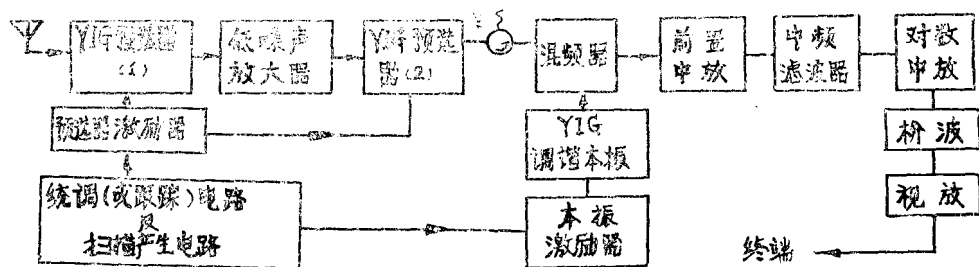


图 1 外差式侦察接收机方框图

在对接收机灵敏度要求特别高时, 需在混频器前加装低噪声的高放。这时为避免高放噪声进入混频器的镜频通道在高放与混频器之间需加予选器 (2)。此外, 为了抑制高放的交调影响, 还要在高放之前加予选器 (1)。这种将予选器分布在高放前后的作法不是侦察机特有的, 在收音机、电视机、通信机中都在大量应用着。在高放检波式接收机中也是这样用的。

当混频器前不需加装低噪声高放时, 可用一个予选器代替图中的两个予选器 (1) 和 (2), 但是, 为了减少予选器的型号, 考虑到通用性, 可以把予选器作在同一个磁路中, 四个小球两两构成一个予选器, 使用时可分成两个也可串联成一个应用。

过去在解决统调问题时, 主要精力集中于改进滤波器和本振的设计上, 使它们本身具有统调到一起的能力。虽然国外已有统调好的产品, 但困难是不小的, 统调质量也不佳, 而且