

甚高频话音通信系统

本章主要介绍甚高频话音通信系统,回顾了甚高频话音通信的发展历程,并阐述了其基本原理,重点介绍了甚高频话音系统的硬件结构、工作方式、主要技术指标和测试维护方式等关键技术。

3.1 甚高频话音通信系统发展

3.1.1 概述

早期航空飞行活动中,由于飞行器没有安装无线电通信设备,飞行员经常通过摇摆机翼的方法来通知塔台工作人员,飞机将在下一次飞跃跑道时进行着陆。通过摇摆机翼进行地空信息交换的方法存在传输信息量少、容易引起误解等缺陷。因此业界迫切希望采用更先进的手段来解决飞行员与地面人员之间信息交换的问题。

早在 1917 年,人类首次实现了飞行员与地面间的无线电话音通信,然而受当时无线电设备制造成本与水平的限制,飞行器并没有广泛安装无线电通信设备,这一时期飞行员与地面间通过摇摆机翼的方法进行信息交流。

直到 20 世纪 40 年代,无线通信设备才被广泛应用于航空飞行中,按照目前通信设备的标准来看,当时的航空无线电通信设备是专用的、无组织的,通信系统的可靠性也非常低。此外,当时地—空无线通信使用 3~30MHz 短波频率,飞行器与地面的通信易受无线电干扰及大气噪声的影响。

20 世纪 40 年代后期,甚高频通信凭借其传输性能良好、抗干扰性强以及甚高频低功率发射机技术发展较成熟的优势,开始大规模应用于飞行器,由此引发了航空无线电通信方式的变革。

第二次世界大战后期,喷气式发动机的发明为航空运输开创了一个崭新的时代,同时也带来了旅客远距离出行方式的变革。1947 年 4 月国际民航组织(ICAO)成立后,为解决航空无线电通信混乱的局面,人们迫切希望以更加有效的方式来管理航空无线电通信。借助国际民航组织的巨大影响,1947 年于大西洋城召开的世界无线电大会将 118~132MHz 频

段保留给即将出现的航空无线电航路业务(AM(R)S)使用。航空无线电航路业务定义为:在国内及国际航路上,开展的与飞行安全及飞行管理相关的通信业务称为航空无线电航路业务,英文简称 AM(R)S。

与此同时,世界无线电大会也对航空无线电非航路业务(AM(OR)S)进行定义。航空无线电非航路业务是指位于国内及国际航路以外,为飞行的协调而开展的通信业务,这些业务主要为军用通信系统使用。

为向航空无线电航路业务提供通信服务,甚高频通信系统的工作频段为 118~132MHz,调制方式为双边带-调幅,传输带宽为 200kHz,整个工作频段划分为 70 个信道。以当前通信技术的标准看,双边带调幅较为落后,但当时甚高频航空通信系统选择使用双边带-调幅的主要原因为:第一,双边带-调幅设备简单可靠;第二,双边带-调幅适合甚高频电波传输;第三,双边带-调幅是当时最先进的无线通信技术。综合来看,甚高频通信系统具有设备简单、可靠、成本低廉的优势。

早期的甚高频航空通信系统使用半双工方式工作,即在某一时刻,系统仅允许一个发射机使用信道,用户通过按下 PPT 来发射信号,用户使用完信道后通过发送“Over”来通知其他用户,此时,其他用户通过按下 PPT 来使用信道。半双工通信的优势是以广播方式工作,这意味着当塔台管制员发射信号时,塔台覆盖范围内的所有飞行员均可接收到管制员发射的信号,这便于飞行员掌握当前的飞行动态。

3.1.2 甚高频航空信道带宽划分

随着时间的推移,市场的需求不断增加,某些地区内的 70 个甚高频无线通信信道很快被占用殆尽,人们不得不采取措施解决频率拥塞及信道饱和的问题。

从通信技术角度,以下两方面的因素将影响无线通信系统信道的宽度设置。

载波频率的稳定度:随着无线电通信设备制造技术的不断进步,地面与机载甚高频通信终端发射信号的频率稳定度可限制在 200kHz,甚至更小的频率范围。

双边带-调幅信号的传输带宽:人类话音信号的能量主要集中在 200Hz~4kHz 的频带范围,因此甚高频通信系统仅需要传输话音信号频率范围的频率分量。

根据无线电设备载波频率稳定度及双边带-调幅系统传输带宽的要求,甚高频航空无线通信系统的信道间隔经历了多次调整,以提高甚高频航空通信系统可用信道的数量。在 20 世纪 50 年代,双边带-调幅通信系统的信道间隔设置为 100kHz,甚高频航空通信系统总信道数为 140 个;在 1959 年召开的世界无线电大会上,航空无线通信的工作频带拓展到 118~136MHz,此时甚高频通信系统可用信道总数拓展为 180 个;到了 20 世纪 60 年代,随着无线电设备制造水平的提高,双边带-调幅通信系统的信道间隔调整为 50kHz,此时甚高频无线通信系统的信道数目达到 360 个;到了 1972 年,借助当时无线电设备制造技术水平,甚高频航空无线通信系统的信道间隔再次缩小为 25kHz,此时 118~136MHz 频段可用信道总数达到 720 个;在 1979 年召开的世界无线大会上,甚高频航空无线通信系统的工作频带再次扩展到 117.975~137MHz,此时甚高频航空通信系统可用信道数达到 760 个,目前该信道分配方案一直延续至今。

随着空中交通管理业务量的迅速增加,空中交通管理系统对甚高频话音通信系统的容量提出了更高要求。为解决此问题,1996 年欧洲提出进一步将 25kHz 信道传输带宽缩减

为 8.33kHz 的建议,其主要原因是:双边带-调幅通信系统的最小传输带宽为 8kHz,通过将 25kHz 的信道传输带宽缩减为 8.33kHz,甚高频 117.975~137MHz 频段可获得 2280 个通信信道,信道总数提高近 3 倍,可有效地缓解甚高频通信频率拥挤的问题。然而,美国并没有采取这一频率调整方案,他们认为可通过使用更先进的数据链系统来提高通信系统的容量。通过缩小信道间隔来提高通信系统容量的方法最后一次被提案并否决,这也标志着双边带-调幅通信技术已发展到尽头。

从理论角度来看,通过缩小信道间隔来提高甚高频通信系统的容量可获得 3 倍信道容量,但在实际应用中,由于诸多限制因素,容量并不能达到理论最大值。限制因素包括:第一,为避免无线电干扰,需要设置保护频率间隔;第二,地面需要提供高优先级服务;第三,甚高频频段存在带宽 25kHz 的甚高频数据链系统;第四,由于某些飞行器没有使用 8.33kHz 的信道间隔,因此地面需要保留相应的 25kHz 通信服务;第五,新通信服务也会受原有的 25kHz 信道分配方案的限制。

基于以上诸多因素,国际航空界对甚高频航空通信系统的未来演变存在两种不同的意见,欧洲支持 8.33kHz 的频率配置方案,而北美则建议使用 VDL3 系统。

需要特别说明的是,全球范围内航空通信系统的应用情况差异较大,在某些交通繁忙区域,航空通信系统已开始使用甚高频数据链系统提供地空通信服务,而在某些地区(如非洲、新西兰),航空通信系统仍在使用传输带宽 50kHz 的老式甚高频通信设备,在极少数地区甚至仍然在使用传输带宽为 100kHz 的通信设备。通过缩小信道间隔的方法来提高通信系统容量的极限信道间隔是 8.33kHz,如果还希望进一步地提高通信系统的容量,则需重新设计甚高频航空通信系统。

20 世纪 90 年代中期,欧洲就已经确立甚高频航空通信系统的信道间隔由 25kHz 向 8.33kHz 的演进计划,但由于该系统建设周期长,甚高频航空通信系统向 8.33kHz 的信道间隔的演进过程仍处于起步阶段。目前,欧盟已签署相关法令要求飞行高度超过 19 500 英尺的民航与军航飞机必须安装 8.33kHz 信道间隔的甚高频话语通信系统。

2007 年国际民航组织欧洲民航委员会与欧盟共同决定减少 8.33kHz 系统的垂直扩展上限,同时增加 8.33kHz 系统的水平覆盖范围,但由于该计划会造成航空公司设备成本的显著增加,降低航空公司的预期收益,因此许多私人飞机和航空公司推迟安装 8.33kHz 的甚高频通信设备,目前仅有少数私人喷气式飞机及军方飞机安装有 8.33kHz 的甚高频通信设备。

3.2 标准调幅原理

基于双边带-调幅(AM)传输体制的甚高频航空通信系统已经使用了五十余年,可以预计未来 20 年内航空无线通信仍将使用双边带-调幅传输体制,但会出现传输带宽 25kHz 与 8.33kHz 并存的局面。

3.2.1 调制原理

幅度调制是高频正弦载波的幅度随调制信号作线性变化的过程。而所谓线性调制是指,在波形上,幅度随基带信号呈正比例变化;在频率上,简单搬移。但是,已调信号和基带

信号之间非线性。

正弦载波： $s(t) = A\cos\omega_c t$

基带调制信号(消息信号)： $m(t) \leftrightarrow M(\omega)$

用消息信号(调制信号) $m(t)$ 去调制正弦型载波 $s(t) = A\cos\omega_c t$, 即正弦载波的幅度随消息信号作线性变化。

$$m(t)A\cos\omega_c t \leftrightarrow \frac{A}{2}[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

发射端类比始发站, 消息信号 $m(t)$ 类比货物, $A\cos\omega_c t$ (可视幅度 $A=1$) 类比火车, 货物 $m(t)$ 承载在火车 $\cos\omega_c t$ 上, 发送给接收方, 接收端类比终点站, 到站后卸货, 即接收机解调。在整个过程中, 已调信号 $s_m(t)$ 的产生方法如图 3-1 所示。

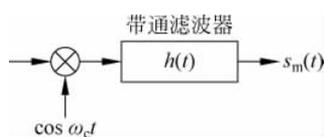


图 3-1 线性调制器的一般模型

带通滤波器的传递函数： $H(\omega)$, 带通滤波器的冲激响应： $H(\omega) \leftrightarrow h(t)$ 。

线性调制器的输出

时域表示： $s_m(t) = [m(t)\cos\omega_c t] * h(t)$

频域表示： $S_m(\omega) = \frac{1}{2}[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] \cdot H(\omega)$

在该模型中, 适当地选择带通滤波器的传递函数, 可得到不同的幅度调制信号, 双边带-调幅(AM)的传输体制在航空甚高频航空通信系统中仍在广泛使用。

AM 的时域表示

$$s_{\text{DSB-AM}} = [A_0 + m'(t)]\cos\omega_c t = A_0\cos\omega_c t + m'(t)\cos\omega_c t \quad (3-1)$$

式中, $m(t) = A_0 + m'(t)$, $A_0 \geq |m(t)|_{\max}$ 。

为作图方便, $m'(t)$ 画成单音频正弦波, AM 的时域信号波形如图 3-2 所示。

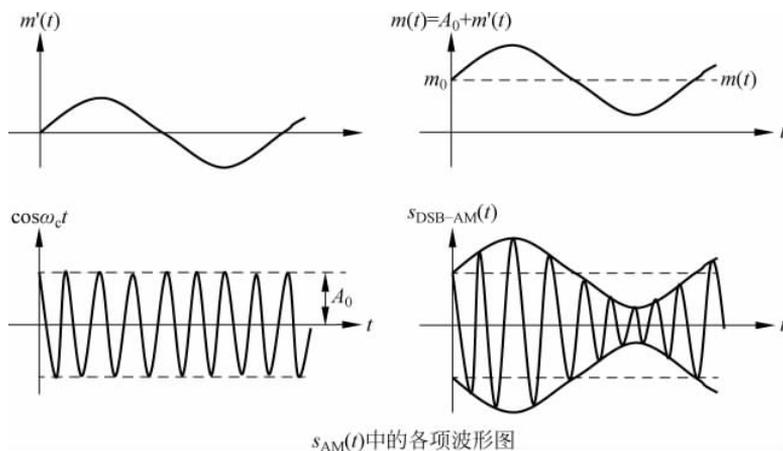


图 3-2 AM 的时域信号波形图

AM 的频域表示

$$S_{\text{DSB-AM}}(\omega) = \pi A_0[\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] + \frac{1}{2}[M'(\omega + \omega_c) + M'(\omega - \omega_c)] \quad (3-2)$$

式中, $m'(t) \leftrightarrow M'(\omega)$ 。

注：常数的傅氏变换对为(时域) $A_0 \leftrightarrow 2\pi A_0 \delta(\omega)$ (频域)，即 $F[A_0] = 2\pi A_0 \delta(\omega)$ ，常数项是直流信号， $\omega=0$ 的频率分量，而 $F[A_0 \cos\omega_c t] = A_0 F[\cos\omega_c t]$ 。

$\cos\omega_c t$ 的傅氏变换

$$F[\cos\omega_c t] = \pi[\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)]$$

类似地： $\sin\omega_c t \leftrightarrow j\pi[\delta(\omega + \omega_c) - \delta(\omega - \omega_c)]$

$$m'(t) \cos\omega_c t \leftrightarrow \frac{1}{2}[M'(\omega + \omega_c) + M'(\omega - \omega_c)], m'(t) \leftrightarrow M'(\omega)$$

注：频率搬移性质

$$f(t) \leftrightarrow F(\omega), f(t)e^{j\omega_c t} \leftrightarrow F(\omega - \omega_c)$$

$$M'(t) \cos\omega_c t = \frac{1}{2}[m'(t)e^{j\omega_c t} + m'(t)e^{-j\omega_c t}]$$

应用搬移性质

$$m'(t) \leftrightarrow M'(\omega), m'(t) \cos\omega_c t \leftrightarrow \frac{1}{2}[M'(\omega + \omega_c) + M'(\omega - \omega_c)] \quad (3-3)$$

AM 的频谱如图 3-3 所示。

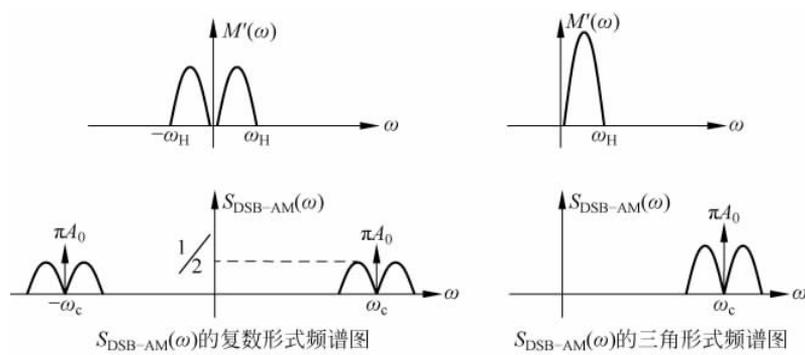


图 3-3 AM 的频谱图

图 3-3 中画出了复数频谱和三角频谱图，复数频谱是双边谱，三角形频谱是单边谱，单边谱等于 2 倍双边谱。由图 3-3 可见：第一，AM 的时域信号波形包络与输入基带信号 $m(t)$ 成正比，解调可采用相干解调，或者包络检波；第二，频谱具有上下对称的两个边带，故 AM 信号传输带宽为基带信号最高频率的两倍。频谱中的载波分量(即 $\pm\omega_c$ 处的两个冲激)并不携带信息。

AM 信号产生的原理图，可以直接由其数学表达式来画出，如图 3-4 所示。AM 信号调制器由加法器、乘法器和带通滤波器(BPF)组成。图 3-4 中带通滤波器的作用是让处在该频带范围内的调幅信号顺利通过，同时抑制带外噪声和各次谐波分量进入下级系统。

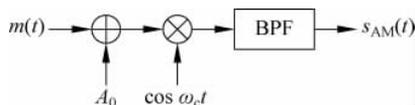


图 3-4 AM 信号的产生

根据已调信号的时域数学表达式，画出调制器(信号产生)原理方框图是通信原理中的一个基本方法。

AM 信号产生的具体电路比较多，其方法名称归纳如表 3-1 所示。

有关 AM 信号调制器的电路与原理，在本章的甚高频设备原理部分介绍。

表 3-1 AM 信号产生方法

AM 信号产生方法	高电平调制	基极调幅
		集电极调幅
		集电极、基极调幅
	低电平调制	单二极管调制
		二极管平衡调制器
		利用模拟乘法器调制

3.2.2 解调原理

AM 信号的解调一般有两种方法,一种是相干解调法,也叫相干接收法或同步解调(接收)法;另一种是非相干解调法,就是通常讲的包络检波法。由于包络检波法电路很简单,而且又不需要本地提供同步载波,因此,对 AM 信号的解调大都采用包络检波法。

1. 相干解调法

用相干解调法接收 AM 信号的原理方框如图 3-5 所示,它一般由乘法器、低通滤波器(LPF)和带通滤波器(BPF)组成。

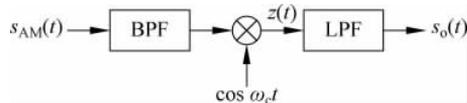


图 3-5 AM 信号的相干解调法

相干解调法的简单工作原理是:AM 信号通过信道后,自然叠加有噪声,经过接收天线进入 BPF。BPF 的作用有两个,一是让 AM 信号顺利通过;二是抑制(滤除)带外噪声。信号 $s_{\text{DSB-AM}}(t)$

通过 BPF 后与本地载波 $\cos \omega_c t$ 相乘,然后进入截止频率设定为 f_c (也可以为 f_m)的 LPF,它不允许频率大于截止频率 f_c 的成分通过,因此 LPF 的输出仅为需要的信号。

数学表达式 3-4 清楚地说明了相干解调法中各点的工作原理。

$$\begin{aligned}
 s_{\text{DSB-AM}}(t) &= [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t \\
 z(t) &= s_{\text{DSB-AM}}(t) \cos \omega_c t = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t \cos \omega_c t \\
 &= \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega_c t) [A_0 + m(t)] \\
 s_0(t) &= \frac{A_0}{2} + \frac{1}{2} m(t) \quad (3-4)
 \end{aligned}$$

在式 3-4 中,常数 $A_0/2$ 为直流成分,可用一个简单的隔直流电容来去除,故原理图中没有画出。

在通信理论中,阐述工作原理时,常用 3 种方式:文字叙述、各点数学表达式表示、各点波形(时域或频域)示意。值得说明的是,本地载波 $\cos \omega_c t$ 是通过对接收到的 AM 信号进行同步载波提取而获得的。本地载波必须与发送端的载波保持严格的同频同相。综上所述,相干解调法的优点是接收性能好,但要求在接收端提供一个与发送端同频同相的载波。

2. 非相干接收法

AM 信号非相干接收法的原理方框如图 3-6 所示,它由 BPF、线性包络检波器(LED)和 LPF 组成。



图 3-6 AM 信号非相干接收法的原理方框图

在图 3-6 中,BPF 的作用与相干接收法中

的 BPF 作用完全相同。LED 为关键部件,它将 AM 信号的包络直接提取出来,从而将一个高频信号直接变成低频调制信号; LED 后面的 LPF 在这里仅起平滑作用。如果仅从原理上讲,非相干接收法的原理图用一个 LED 也可以实现(LED 通常用二极管、电容、电阻实现)。

包络检波器如图 3-7 所示。

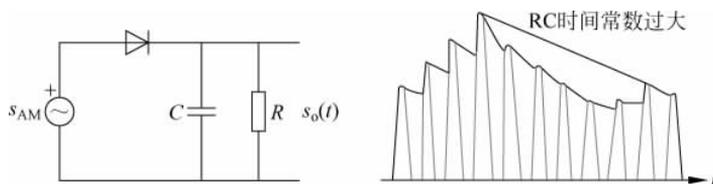


图 3-7 AM 信号包络检波器

$$s_{AM} = [m_0 + m'(t)]\cos\omega_c t = m_0 \cos\omega_c t + m'(t) \cos\omega_c t \quad (3-5)$$

输入信号的正向周期,通过 D 二极管正向电阻向电容 C 充电,在二极管截止时,电容通过 R 电阻放电。输入信号的负半周期过不来。当下一个正向周期到来时,电容 C 再次充电。合理选择 RC 时间常数,可防止拖尾。再加一级低通滤波器,可将包络锯齿滤去。

综上所述,非相干接收法的优点是实现简单,成本低,且不需要同步载波,但同时系统存在抗噪声性能较差的缺点(存在门限效应)。

3.3 甚高频话音通信系统

甚高频通信系统 VHF 是一种近距离的飞机与飞机之间、飞机与地面电台之间的通信系统,如图 3-8 所示。VHF 是目前民航飞机主要的通信工具,在飞机起飞、降落或者通过管制空域时,用于机组人员和地面管制人员之间的双向语音通信。起飞和降落期间是驾驶员处理问题最繁忙的时段,也是飞行中最容易发生事故的时段,因此必须保证甚高频通信的高度可靠。

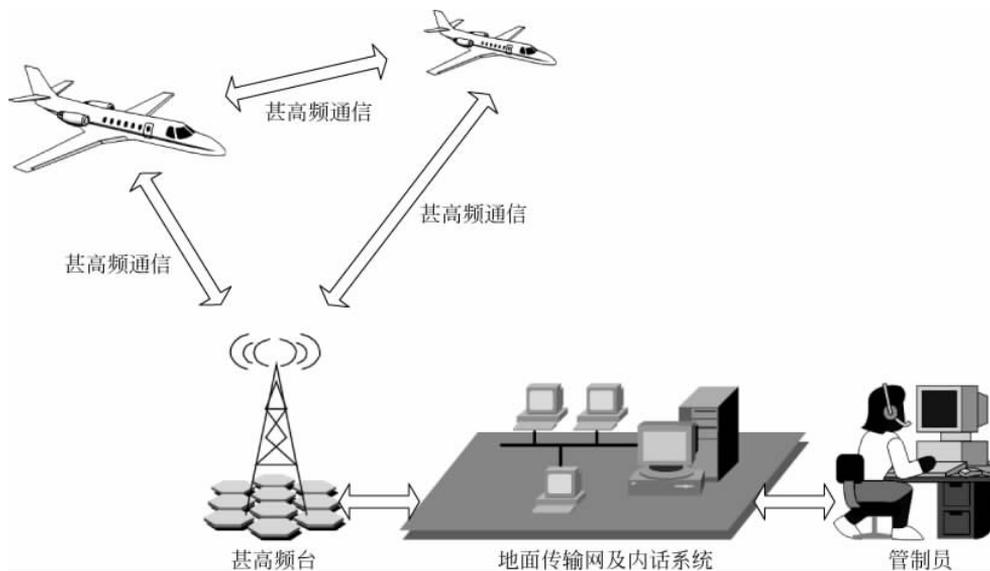


图 3-8 航空甚高频通信系统

管制员对处在数百千米之外、高度数千千米之上的飞机进行指挥,让这些航空器按照指定的航线进行飞行活动,需要雷达和甚高频设备,并且要通过相关的网络化技术,将远端的雷达扫描的飞机目标信号及管制员、飞行员的空地数据通信语音传回区管中心空管自动化指挥系统、内话系统。

由于工作频率高,其地面波衰减大,传播距离近,而天波传播方式又会穿过电离层而不能有效地反射,故 VHF 主要以空间波的方式传播。有效传播距离一般限于视线范围。但由于对流层对超短波的折射作用,使得实际的传播距离略大于视线距离,作用距离随高度而变化。

3.3.1 民航甚高频话音通信系统组成

VHF 通信与 HF 通信相比较,VHF 通信反射少(指电离层对信号的反射),传播距离近,抗干扰性能好,并且天电干扰、宇宙干扰、工业干扰等对 VHF 波段的通信干扰较小。

目前在民航应用的 VHF 地空通信地面设备大致包括 VHF 共用天线系统、VHF 单电台、VHF 便携电台、VHF 遥控台。应用的场合为塔台、进近、航路管制,ICAO 根据不同功能对有关电台的功率做了规定,塔台设备的发射功率不应超过 10W,航路对空电台的发射功率应在 20~50W 之间。

民航 VHF 地空通信系统与飞机上的机载设备由收发机、控制板、天线组成,如图 3-9 所示。天线接收的射频信号经过收发机处理后,转换成音频信号,通过遥控电子组件(REU)分别送到驾驶舱和选择呼叫系统。发射时,来自驾驶舱的音频信号经过收发机处理成射频信号,经过天线对外辐射。民航飞机上一般装有 2~3 套 VHF 通信系统。

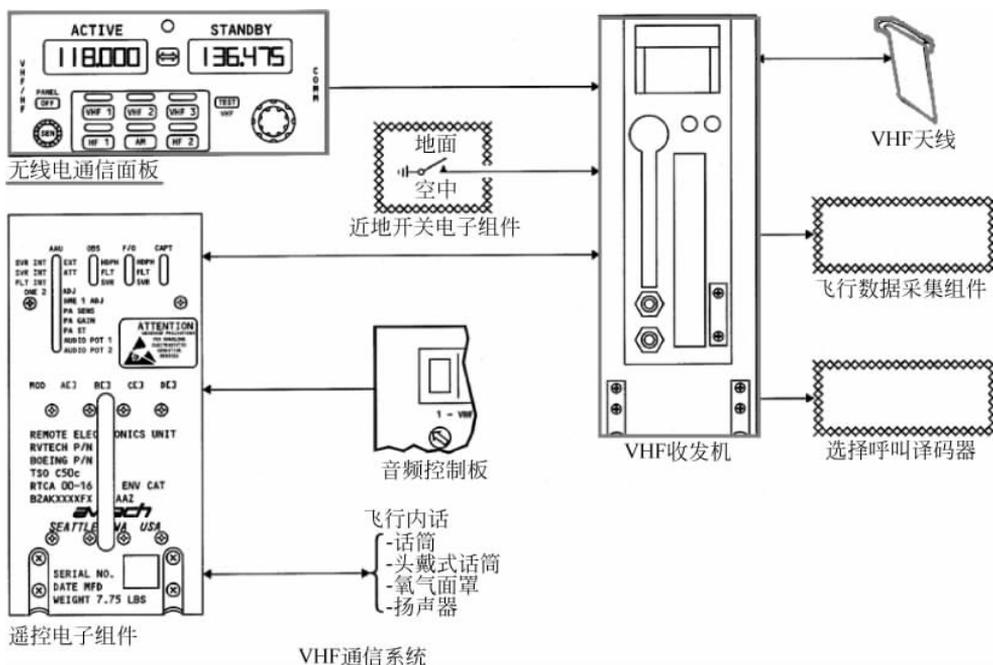


图 3-9 机载 VHF 通信系统

3.3.2 内话系统

民航运输中安全是第一要务,因此用以支持民航相关业务的设备及备用设备的可靠性就成了影响民航安全的重要因素。当前,在空管通信领域中,内话系统是最为重要的系统之一。空管内话系统,其全称是民航空管语音交换系统,是不同地区管制员之间以及地面管制人员与飞机机组人员进行通信联络的主要方式。内话系统集成了空管业务中最主要的通信资源,集成接入了各类有线、无线通信等设备设施,通过各类电话业务网和航空电信网,能够实现空管中各类的地一地、地一空通信,有效地简化了管制员的操作业务流程,使得管制员能够更为高效、有序地调配空域资源,提供安全、可靠的通信链路和空管综合业务保障。

事实上,内话系统主要的功能为三项: 话音交换、话音监听存储以及话音数模转换处理。

目前,北京、上海、广州三大区管中心使用的内话系统,均是 VCS 3020X 型内话系统,该系统具有容量大、可靠性高等优点,适合大型的区管中心使用,来处理冗杂、大数据量的空管业务。整个内话系统的语音采用数字 PCM 编码,系统的中央交换部分的硬件由冗余的无间断并行运行的 PCM 电路板模块组成,系统的接口部分可以连接不同的通信资源,例如无线设备、电话线路和 ATS 网络。除此之外,还有一类内话系统是意大利 SITTI 公司生产的 M600S 型内话系统,例如福建空管局使用的就是此系统。

内话系统又称语音通信交换系统,如图 3-10 所示。它负责将各种不同传输方式的语音资源接入,进行灵活地配置并且分配到各个管制席位中,为管制员的对空指挥和管制协调提供友好的人机界面。整个内话系统的语音和数据处理是完全独立的,全系统采用总线式拓扑结构,数字化的语音信号在总线中进行交换。

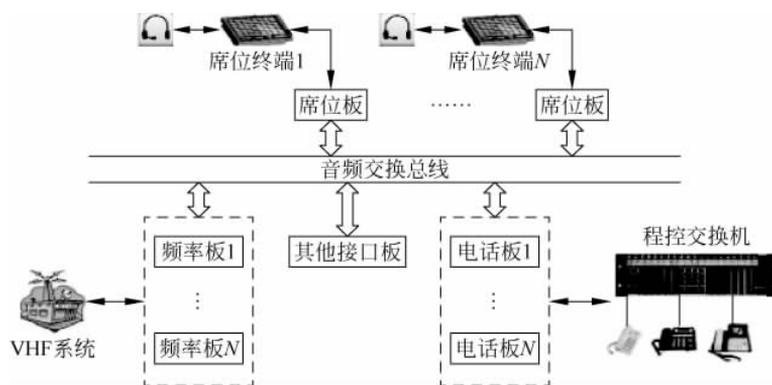


图 3-10 内话系统拓扑结构

1. 音频交换总线

音频交换总线担负着整个系统的语音交换工作,一方面它将来自频率板、电话板的语音信号交换到席位板;另一方面它将席位终端的语音信号交换到对应的频率板、电话板。

2. 频率板

频率板作为甚高频、高频话音系统与内话系统的接口板,每个频率板可以处理两个独立的频率信号。在 PCM 线路中,每个频率对应着一个固定的时隙。

3. 席位终端

席位终端安装在管制席位上,为管制员整合频率、电话资源,提供良好的人机界面,并进行语音信号的 A/D、D/A 转换。

4. 席位板

席位板位于内话机柜,将总线交换来的频率、电话信号送至终端部分,同时将席位终端的语音信号发送至总线板,再由总线交换至相应的频率、电话板。

接收时,语音信号交换过程如图 3-11 所示。

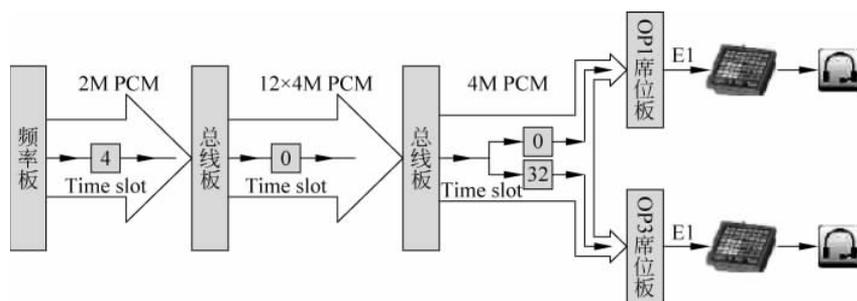


图 3-11 接收甚高频语音交换过程

- (1) 语音信号在频率板进行 A/D 转换后,送到连接的总线板。
- (2) 总线板将语音信号交换至总线。
- (3) 连接席位机框的总线板从总线中提取接收信号,交换至席位板。
- (4) OP1,OP3 席位板再分别将信号送至 OP1,OP3 席位终端,完成 D/A 转换由扬声器或耳机送出。

发射时,OP1 发射信号与接收过程相反,OP3 的监听信号由频率板送回,与接收过程相同,如图 3-12 所示。

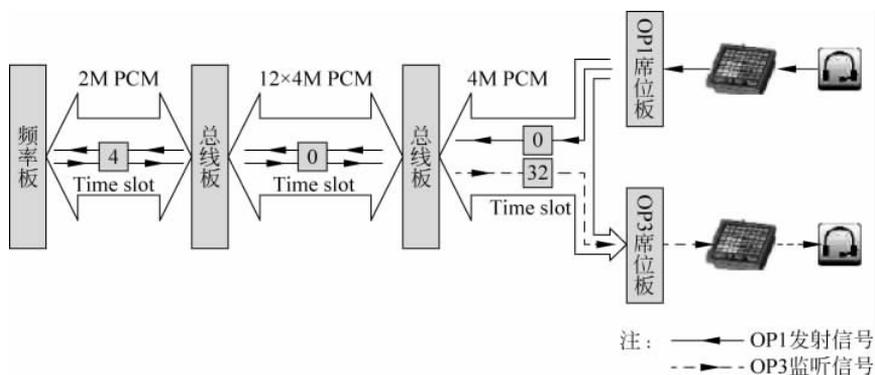


图 3-12 发射甚高频语音交换过程

3.3.3 地面传输

民用航空中,地面间的话音和数据通信主要依托民航局搭建的平面数据通信网来进行通信。这个网络的基本功能是信息的传递,同时也是一个拥有大量用户的复杂的通信网络

系统,因此其有着区别于点对点通信系统的独特网络技术和工作方式。除此之外,还需要相应的信令、协议和网络管理控制系统等方面的支持,才能使这些设备协调地工作。

1. 异步传输模式 ATM 介绍

在通信系统中,异步传输模式(Asynchronous Transfer Mode, ATM)被认为是目前已知的最适合宽带综合业务数字网的一种交换方式。

异步传输模式由异步时分复用和快速分组交换技术演化而来,它综合了灵活(分组交换)以及时延小(电路交换)两个特点。它工作的主要原则是尽可能把交换处理的负担转移到通信的两端,以最大限度地减小交换机的数据处理量和处理时间,并给用户和操作员尽可能大的灵活性。

交换机对用户信元是透明的,不进行任何的处理,把控制交给网络终端来处理,交换机通过硬件来选路和传输,大大提高了传输容量和速率。

2. 我国民航地面通信网

我国民航地面通信网以 ATM 信元交换技术为核心,支持异步传输模式、帧中继、X.25、IP 语音业务,同时也能提供专线连接、局域网互联、程控交换互联等业务。

民航地面网络管理系统包括一个位于中国民航局空管局的网管中心、一个位于浦东的网管备用中心以及位于中国民航局空管局、首都机场、虹桥机场、白云机场、双流机场、桃仙机场、地窝堡机场和咸阳机场的 8 个网管监控中心。

3. 地面空管内话通信

地面空管内话通信是指根据各空管局对语音管制通信的需求,将各机场或空管局的内话系统通过网络进行互联,构成一个语音管制移交网络。

北京、上海与广州 3 个点间形成互联,再分别以这 3 个节点为中心通过点到点方式连接各自区域内的机场和空管站,如图 3-13 所示。各通信终端间通过建成的 ATM 链路进行通信,每一路使用 72kbps 的传输速率,这样就能够实现 64kbps 的传输要求。

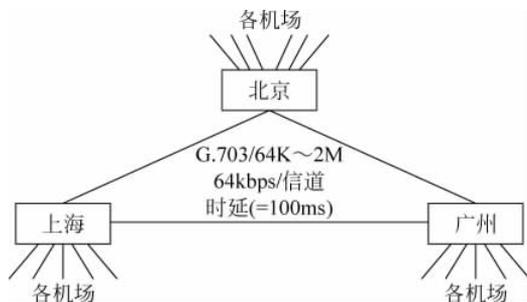


图 3-13 我国空管内话连接示意图

3.3.4 控制板

1. 机载 VHF 控制板

控制板如图 3-14 所示,可用于频率选择和转换,以及对相应收发机进行测试。按下“COMM”测试电门,可使接收机内的静噪电路失效,接收机应有噪声信号输出,从而对接收机进行测试。控制板使用 28VDC 电源。控制板输出的信号通过 ARINC429 数据总线送到收发机。



图 3-14 机载 VHF 通信控制板

2. 收发机控制板

VHF 收发机可对 RF 信号进行调制、发射、接收及解调,从而实现话音和数据通信。收发机内部由电源电路、频率合成电路、接收机、发射机等部分组成。工作电压为 DC 27.5V,最小发射功率 25W。

VHF 收发机控制板如图 3-15 所示,在收发机前面板按压“静噪/灯测试”电门,可对面板上的两个灯进行测试,这时使静噪电路失效,可在耳机内听到噪音,从而对接收机进行测试。按压“测试”电门,可对收发机进行自测试,同时也对串行数据输入和天线电压驻波比进行测试。绿色的“LRUPASS”灯亮、数显窗内读数小于 2.0 表明收发机自测试正常,红色的“控制输入失效”灯亮表明来自控制板的输入无效。电压驻波比显示在上部电压驻波比/功率窗口。当功率指示控制电门置于“FWD”和“DEF”位时,显示窗口分别指示发射和反射功率。面板上还有耳机和麦克风插孔,可对系统进行操作。

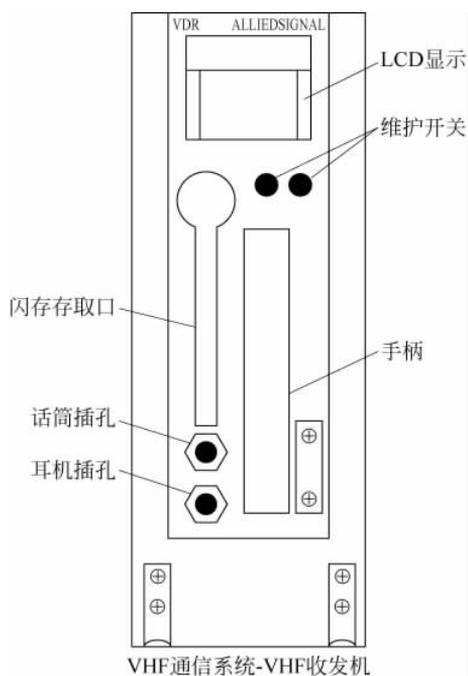


图 3-15 VHF 收发机控制板

3.3.5 甚高频发射机

VHF 发射机的原理框图如 3-16 所示,当 PTT 信号有效时,系统处于发射状态,天线转换电门断开天线与接收机的连接,同时接通天线与发射机的连接。频率合成器输出控制电门断开频率合成器输出与接收第一混频器的连接,同时接通频率合成器输出与发射机的连接。在调制器内,来自遥控电子组件的音频信号对来自频率合成器的等幅载波进行调制,已调信号经过放大后得到一个 30W 的射频信号送至天线进行辐射。发射功率经过采样反馈至调制器,用于保持调制信号的线性化,采样信号还作为“自听”信号送到接收机音频输出电

3. 末级功率放大器

末级功率放大器采用宽带高频功率放大器。由于谐振功率放大器的调谐与调整需要花时间,而且功率越大,级数越多,花在调谐与调整上的时间也就越多。这对于要求迅速更换频率的场合显然是很不利的。例如在飞行中,通信联络要力求迅捷可靠。为了解决这个问题,可以采用宽带高频功率放大器。它不需要调谐回路,可在整个波段内获得线性放大。这样,改换工作频率就只需要改变频率源的频率,而不必对以后各放大级进行调谐,克服了调谐放大的缺点。当然,所付出的代价是输出功率和功率增益都降低了。因此,一般来说,宽带功率放大器适用于中、小功率级。对于大功率设备来说,可以采用宽带功放作为推动级,同样也能节约调谐时间。

最常见的宽带高频功率放大器是利用宽带变压器作为耦合电路的放大器。宽带变压器有两种形式:一种是利用普通变压器的原理,只是采用高频磁芯,可工作到短波波段;另一种是利用传输线原理与变压器原理两者结合的所谓“传输线变压器”,这是最常用的一种宽带变压器。

4. 频率合成器

无论是对接收机还是发射机而言,频率合成器都是最核心的功能模块。近年来,由于无线电通信技术的迅速发展,对振荡信号源的要求也在不断提高。不但要求它的频率稳定度和准确度高,而且要求能方便地改换频率。石英晶体振荡器的频率稳定度和准确度很高,但改换频率不方便,只适用于固定频率;LC振荡器改换频率方便,但频率稳定度和准确度不够高。近年来迅速发展的频率合成技术将这两种振荡器的优点结合起来,不仅频率稳定度和准确度高,而且改换频率方便。

频率合成器是利用一个高稳定度晶体振荡器产生一系列频率信号(它们具有与晶体振荡器相同的频率稳定度和准确度)的设备,它是近代通信系统中的重要组成部分。实现频率合成的方法可归纳为直接合成法和间接合成法(锁相环路法)两类方法。

此外,频率合成器频谱的纯度会对系统造成影响,因输出频谱不纯所产生的影响包括:频率合成器输出中的边带噪声和强干扰形成倒易混频;频率合成器输出中的带内噪声和信号相混频;由于混频电路的不平衡,使频率合成器的杂散噪声直接窜入中频通道。

为了提高收信机的抗干扰能力,需要对频率合成器的频谱纯度做如下要求:

(1) 对于带内噪声在偏离本振频率 300Hz 处测量,在 1Hz 带宽内的信噪比为 -75dB (指与本振信号相比)。

(2) 对于带外噪声在偏离本振频率 100kHz 处测量,在 1Hz 带宽内的信噪比应小于 -135dB 。

对于输出的杂散噪声要求是:在 300~3000Hz 范围内的杂散噪声,信噪比小于 -50dB ; 100kHz 以外的杂散噪声,信噪比要小于 -100dB ; 50~100Hz 内的杂散调频,信噪比要小于 -50dB 。

3.3.6 甚高频接收机

VHF 接收机的框图如图 3-18 所示,VHF 接收机是一个二次变频的超外差接收机,工作方式是标准调幅,只能接收调幅信号。接收机的具体电路可分为高频段电路、中放和检波以及音频电路。

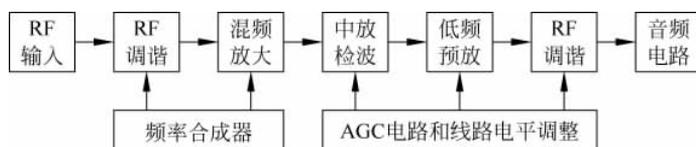


图 3-18 VHF 接收机框图

1. 高频段电路

高频段电路如图 3-19 所示,由输入电路、射频衰减器、高频放大器和混频器组成。它们决定着接收机的灵敏度及抗干扰能力。一般要求这部分电路线性要好,动态范围要宽。来自天线的射频信号经过收发转换电路加到接收机。

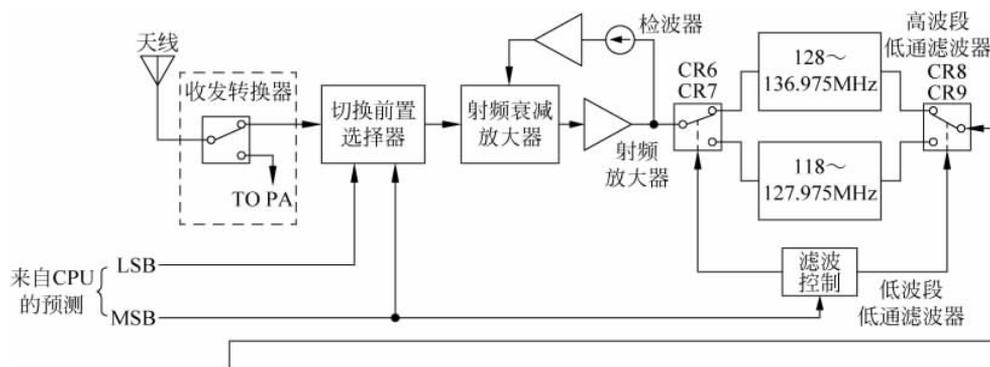


图 3-19 VHF 接收机高频单元电路

(1) 预选器

预选器由 4 个 LC 带通滤波器组成,在 118~136.975MHz 频率范围内形成一个平坦的幅频特性。来自天线的射频信号经过收发转换电路加到 LC 滤波器,LC 滤波器对 118~136.975MHz 以外的信号进行有效抑制。

(2) 射频衰减器

高频带通滤波器输出的射频信号经过分相变压器被加至射频衰减器。射频衰减器使接收机的射频电路有一个较宽的动态范围。衰减量的大小可由控制板上的射频灵敏度控制旋钮来控制。衰减量为 20dB。

(3) 射频放大器

高频放大器工作在甲类放大状态,可提高接收机的输出信噪比。

(4) 混频器

在第一混频器中,射频放大器的 118~136.975MHz 输出与经过频率合成器的 138~157MHz 的第一本振信号进行混频。混频器输出的 20.025MHz 的第一中频信号通过晶体滤波器加至第二混频器。在第二混频器中,20.025MHz 信号与固定的 9.325MHz 信号进行混频,输出 10.7MHz 的第二中频信号。

中频放大器由两个带通滤波器和五级放大器组成,带通滤波器保证接收机的选择性,放大器提供 100dB 的增益。前三个中放的增益有自动增益控制电压控制,自动增益控制电压是由检波器产生的直流分量经过低通滤波器、自动增益控制放大器加至中放的前三级中放。该中频信号经过包络检波,得到音频信号,加至音频电路。

2. 音频输出电路

音频输出电路由静噪电路、音频压缩放大器、有源滤波器 and 音频功率放大器组成,其电路图如图 3-20 所示。

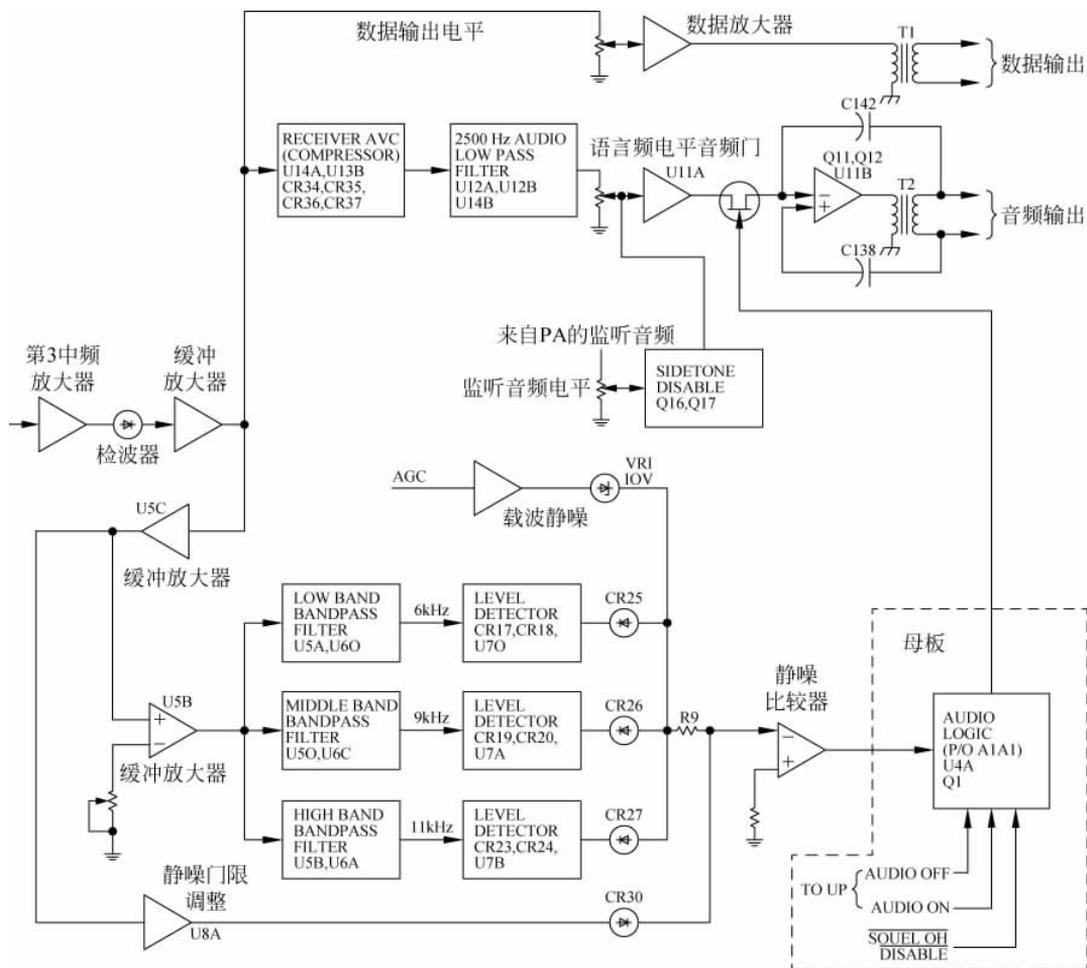


图 3-20 VHF 接收机音频电路

(1) 音频压缩放大器

检波出来的音频经过缓冲放大器加至音频压缩放大器。音频压缩放大器的作用是在所接受的信号调制幅度从 40% 变化到 90% 时保持音频输出电压变化值在 3dB 之内。

(2) 有源低通滤波器

有源低通滤波器为三级有源低通谐振滤波器,有源滤波器的作用是在 300Hz~2.5kHz 频率范围内保持理想的平坦响应。

(3) 音频功率放大器

音频功率放大器由两级放大和一个输出阻抗匹配变压器组成。放大器提供 100mW 的输出电平,经过输出变压器耦合后,提供 600Ω 的平衡输出至后插座。

(4) 静噪电路

静噪电路的主要作用是当没有外来射频信号输入或外来输入信号的信噪比很小时,抑

制噪声输出,从而降低飞行员的听觉疲劳。

当没有外来射频信号输入或外来输入信号的信噪比很小时,AGC 电路产生的 AGC 电压值较小,送到静噪电路中的比较器中使输出逻辑高电平加到音频逻辑电路,这时音频逻辑电路输出逻辑低电平,使音频门电路断开,音频信号无法加到音频功率放大器,无信号输出。

当按下收发机前面板上的静噪试验按钮时,音频逻辑电路输出逻辑高电平,使音频门电路打开,信号经过音频门电路加到音频功率放大器中,有噪声信号输出。

来自检波器的噪音信号由缓冲放大器分别经过 6kHz、9kHz 和 11kHz 带通滤波器后加至 3 个噪声电平检测器,如果噪声电平较大时,比较器使输出逻辑高电平加到音频逻辑电路,这时音频逻辑电路输出逻辑低电平,使音频门电路断开,音频信号无法加到音频功率放大器,无信号输出。

3.3.7 天线共用系统

甚高频天线共用系统采用中馈天线,并加入带通滤波器、带阻滤波器、匹配网络和隔离网络等措施,使多个电台在共用天线过程中相互隔离且各自匹配。可以分为收发一体天线共用系统和收发分开天线共用系统。无论是收发一体或是收发分开的天线共用系统,其网络拓扑结构都可以用图 3-21 表示。

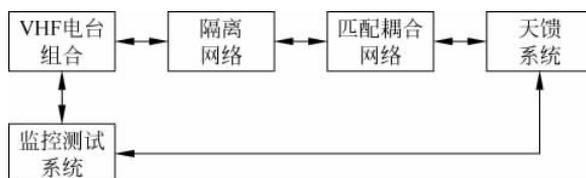


图 3-21 天线共用系统网络拓扑结构

其中 VHF 电台组合就是由一系列 VHF 电台单元组成,在天线共用系统(见图 3-22)中,我们按不同的频率来确定信道,在民航应用中一般对应每个信道均有主备机 1+1 冗余配置。需要说明的是,每一个信道有 A、B 两台设备,A、B 机之间通过连线可以相互检测并实现 A、B 机自动切换,因为在每台设备中都有机内自检设备(Build-In Test Equipment, BITE)装置,可以对设备的各个模块进行故障检测并定位,然后通过加法器将检测信号输出到接口和连线(或结合控制模块)以实现主备电台之间的相互监测和切换功能。

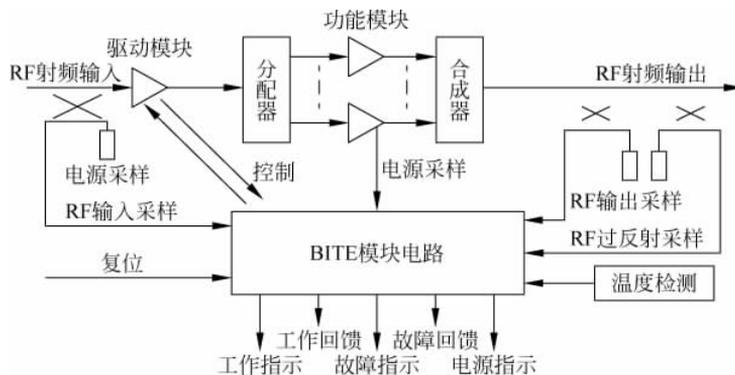


图 3-22 天线共用系统

为了确保众多不同频率的电台共用一根天线而不会相互干扰,需要在电台和天线之间加装功率隔离设备——滤波器。我们在大多数情况下使用腔体及多腔体滤波器,腔体滤波器是一种具有可调带通滤波器的结构,有良好的阻带特性,它利用矩形腔体和内部的金属膜片、金属谐振杆组成谐振腔,通过改变膜片的位置进而改变结构谐振频率实现可调的滤波特性。

它具有如下特点:第一,结构简单、加工方便、易于实现;第二,较宽的阻带范围,较低的带内衰减和很高的阻带衰减;第三,调谐方便,能承受较大功率。大部分腔体滤波器采用在铜或铝材料表面镀银的工艺制造。腔体滤波器在各自的频率范围内呈现最小的衰减,在各自的频带外,能够保证产生功率隔离所必须的衰减,其带通频率特性如图 3-23 所示。

为了更好地保证天线共用系统的电磁兼容性,避免发射系统的交、互调干扰,除了滤波器,我们还需要在发射网络中加装隔离设备,如铁氧体环流器、隔离器等,而且对隔离器的要求也越来越高。对环行器和隔离器的典型要求是应用频段更宽、功率容量更大。在共用的天线系统中,铁氧体环行器和隔离器主要用作功率隔离,避免互调干扰,同时有效地保护发射机。如果发射机输出功率很大,隔离器的反射端口还需接入足够容量的假负载。

保证能量单向传输,能有效地保护发射机,起到隔离的作用。要获得高隔离、低损耗、小驻波并能承受高功率的隔离器,隔离器的各部件必须电性能优良,且要求部件之间匹配良好。非互易移相器采用的是 H 面结构形式,上下壁各有一片铁氧体,移相量将加倍。

为了确保众多不同频率的电台可以共用一根天线,既不能相互干扰,同时还要阻抗匹配,就必须使用耦合器件,那么天线多路耦合器的耦合网络是如何匹配的呢?我们先来看环形耦合网络。

天线多路耦合器必须满足两个方面的要求:第一,从任一电台输出的射频功率只能进入天线负载而不能串入其他电台;第二,任一电台与天线之间的匹配状况不受其他电台工作状态的影响。为此天线多路耦合器采用如图 3-24 所示的结构。

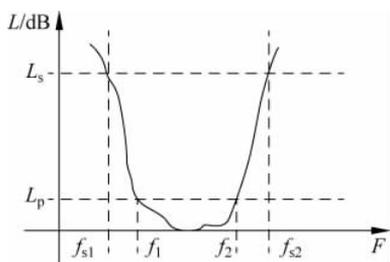


图 3-23 带通滤波器的频率特性

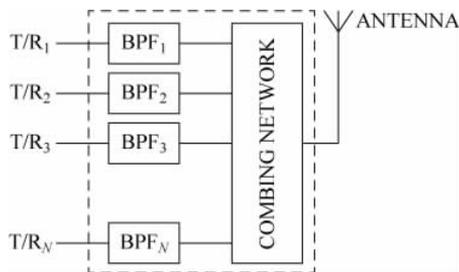


图 3-24 天线多路耦合器结构

耦合网络图及等效电路如图 3-25 所示。

在民航的实际应用中有时也采用如图 3-26 所示的 T 型串联耦合网络,开路端接 50Ω 负载,它的优点是结构简单、价格便宜、便于安装,缺点是耦合的电台数量越多,耦合到天线端口的功率差异越大。

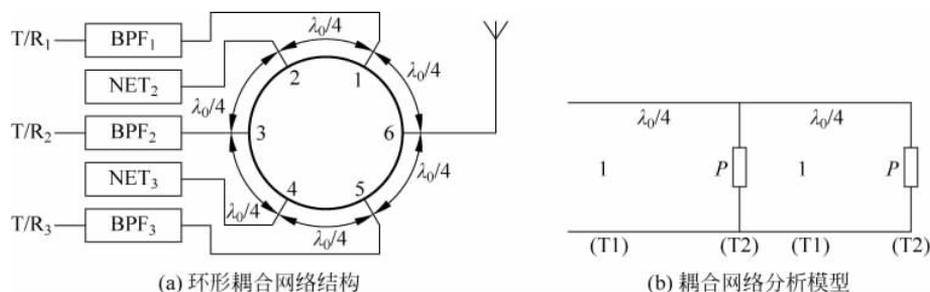


图 3-25 天线耦合网络图及等效电路

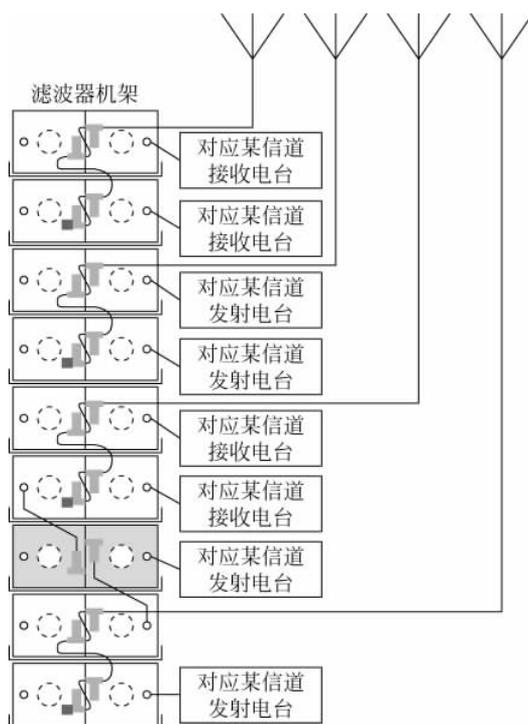


图 3-26 T 型串联耦合网络

3.3.8 甚高频天线

系统中的信号最终要通过天线与外界进行能量交换,天线是电磁波的换能器件,用以发射和接收电磁波。它把在电路里流动的高频电流通过电磁感应转换成高频电磁波向外辐射,并把在空间的电磁波通过感应转换成高频电流。

为了提高天线的辐射强度,必须使经过天线导体的高频电流尽量强。当电路处于谐振状态时,电路上的电流最大,天线的辐射最强。

当导体长度为 $1/4$ 波长的整数倍时,该导体在该波长的频率上呈谐振特性,导体长度为 $1/4$ 波长的是串联谐振特性,导体长度为 $1/2$ 波长的是并联谐振特性。

由于 $1/2$ 波长的振子比 $1/4$ 波长的振子长,故 $1/2$ 波长振子的辐射比 $1/4$ 波长振子强,但当振子超过 $1/2$ 波长时虽然辐射继续加强,由于超过 $1/2$ 波长的部分辐射是反相位而对辐射有抵消的作用,因此总的辐射效果反而被打折扣。所以,通常的天线都采用 $1/4$ 波长或 $1/2$ 波长的振子长度单位,这种由两根长度相同的导体构成的天线就叫偶极天线。

电磁波在传播时其电场或磁场的方向有固定的规律,叫电波的极化,以电场分量的方向命名。电波的电场和地面垂直,为垂直极化;电波的电场与地面平行,为水平极化。

天线的重要指标包括辐射效率、特性阻抗和天线增益。

对于一个好的天线系统,首先要求天线系统本身的辐射效率高、损耗小;其次是与传输系统匹配,使整个收发系统的传输效率达到最高;最后是能尽量地使所辐射的能量集中到所需要的地方,抑制不必要的辐射。

VHF 地面设备天线(见图 3-27)的收发隔离度各不相同,和系统性能有关,但是主要取决于天线的性能,我们一般要求 $\geq 40\text{dB}$ 。

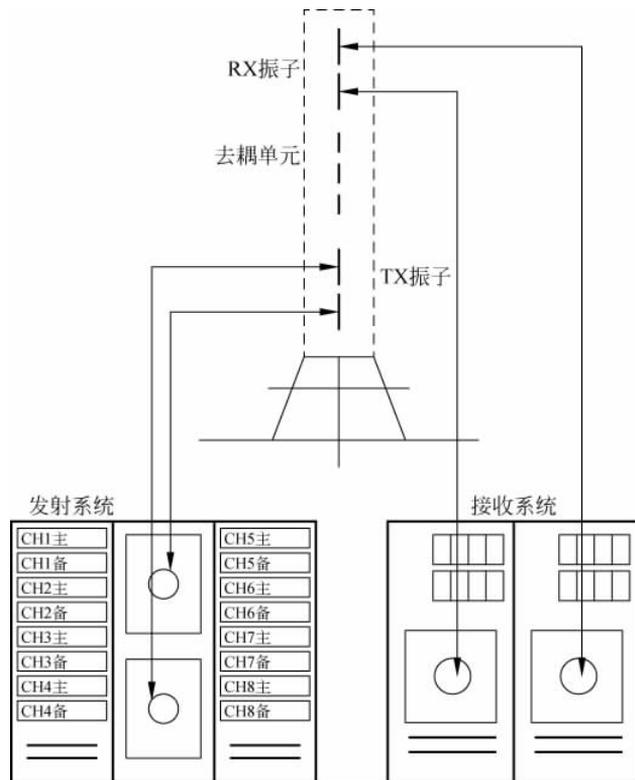


图 3-27 地面 VHF 设备天线示意图

机载 VHF 天线(见图 3-28)分别在机腹前部和后部,它可在 VHF 频段发射和接收射频信号。VHF 称作“刀”形天线,长 12in,底部宽 8in,天线属垂直极化,阻抗值为 50Ω ,可实现全方向的接收和发射。

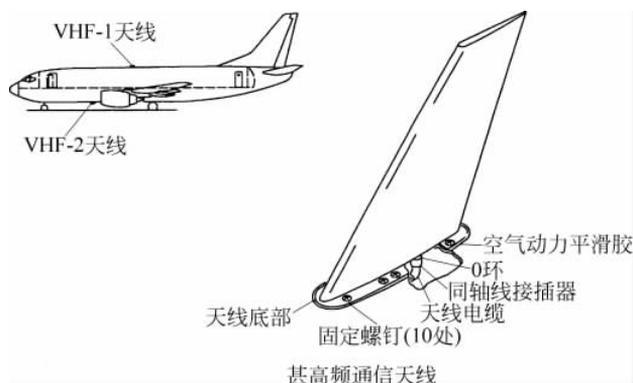


图 3-28 机载 VHF 天线

3.4 甚高频话音通信系统测试

3.4.1 系统技术指标

VHF 电台的供电要求：机房交流电压信号必须符合国家标准 GB/T《交流输出稳定电源通用规范》。通过稳压器后接入设备的交流电压信号必须符合电子行业标准 SJ/T10541-94《抗干扰型交流稳压电源通用条件》和 SJ/T10542-94《抗干扰型交流稳压电源测试方法》。电源部分接入直流电压信号必须符合国家行业标准 SJ2811.1-87《通用直流稳定电源术语及定义、性能与额定值》。

供电电源质量要求：稳态电压偏移范围(%) ± 5 ；稳态频率偏移范围(Hz) ± 0.5 ；电压波形畸变率(%) $5\sim 8$ ；允许断电持续时间(ms) $0\sim 4$ 。

电台的测试连接图如图 3-29 所示。



图 3-29 电台测试连接图

收发信机的整机测试包括收信机测试、发信机测试两大部分。

收信机的测试,归纳起来主要包括以下几个方面:接收灵敏度、信道选择性、寄生响应、互调响应衰减、音频失真、90%调制度、静噪灵敏度、抗阻塞特性、互调响应特性、接收机响应时延、收信机动态范围的测试等。

发信机的测试,归纳起来主要包括以下几个方面:输出功率、谐波失真、线性特性的测试、发信机杂散特性的测试、发信机响应时延的测试、发信机动态范围的测试和频率测试。

系统调试:系统安装完毕后,需要经过调试才能投入使用。系统的调试包括单机调试和系统联调。

1. 网络覆盖

网络覆盖范围给出了一个通信系统可提供通信服务的区域。在陆地公共移动通信系统中,根据电波传播环境的不同,不同区域的通信系统覆盖差异较大,陆地公共移动通信系统的典型通信区域有乡村、郊区、城市等;在甚高频航空移动通信系统中,覆盖区域划分为航路区域、终端机动区(TMA)及机场覆盖区域。

在通信网络建设的初期,系统设计者主要关心网络的覆盖速度,或网络覆盖的饱和程度;在通信网络建设的后期,系统设计人员更多关心如何通过网络优化,提高网络系统的服务质量,降低网络内部的干扰。

通信系统的覆盖范围与发射天线和接收天线的高度(飞行器高度)有密切关系。在甚高频航空通信系统中,当电波传播超过视距范围以后,电波传播带来的衰耗急剧增加,因此甚高频航空通信系统有效通信覆盖范围为电波传播视距范围。视距传播模型仅适应于飞行器在航路飞行阶段,并不适合低空飞行非视距通信,例如在终端机动区或机场附近区域,在低空飞行环境下,无线电波在传播过程中将产生反射和折射现象,因此可考虑使用 Hata 与 Okamura 等人提出的复二径传播模型。

以下是甚高频航空通信系统设计时的一些基本准则:

当飞行器在航路飞行时,地面站与飞行器间传播环境可视为视距传播,视距传播链路仅受限于链路预算及地平线,如果飞行器位于山区或海洋区域,需要进一步对模型进行修正,另外还需考虑电波向地球的折射效应,建议 k 因子选取为 $2/3$,此时甚高频地空链路建立及维持的可能性超过了 99.9%。

当飞行器高度较低时,此时飞行器与地面通信链路不满足视距传播环境,此时需要仔细考虑地形、建筑物布局及其他可能传播障碍物的影响,如果条件允许,应根据地形、建筑物布局使用专用链路预算工具计算电波传播的损耗。

以上两个方面设计准则不能替代实地测量,系统设计人员应亲自前往关键区域进行实地测试验证。

ICAO 附件 10 关于覆盖范围的描述:

在航路飞行过程中,地空通信的传播环境为视距传播,甚高频航空通信系统的覆盖范围由地面站与飞行器的高度确定,甚高频地面站通信距离达 350km;

在地面通信过程中,甚高频通信系统覆盖范围受电波传播遮拦及其反射效应的影响,为提高系统的覆盖范围,可通过安装架设多个地面站和设置多个信道的方法来提高通信系统的覆盖范围。

在标准工作环境下,ICAO 定义要求,在地对空通信中,接收信号场强为 $75\mu\text{V}/\text{m}$ ($-109\text{dBW}/\text{m}^2$); 在空对地通信中,接收信号场强为 $20\mu\text{V}/\text{m}$ ($-120\text{dBW}/\text{m}^2$)。

2. 系统容量

一般情况下,容量定义为通信系统可处理移动呼叫的总数,也可定义为网络内单个蜂窝处理移动呼叫的总数,在某些特殊情况下,容量还可根据网络单位面积内处理的移动呼叫数来描述。

在航空移动通信系统中,使用单个扇区内峰值飞机数(PIAC)来描述系统的峰值容量。以下简要说明航空移动通信系统扇区与陆地移动通信系统蜂窝在概念上的差异。

扇区是描述空域的专业术语,扇区内的交通管制服务由单个管制员负责。

蜂窝是单个基站的通信覆盖区域,蜂窝通常呈现为圆形,在某些情况下,受电波传播环境的影响,蜂窝也可能呈现不规则的形状。

在欧洲中部、日本部分地区、美国东海岸及加利福尼亚州部分区域等飞行流量密集区域,如何进一步提高甚高频航空移动通信系统的容量是一个极具挑战性的难题。为解决此问题,人们提出以下技术手段:小区分裂、信道窄带化、干扰控制和邻信道保护措施。

ICAO 容量规范:

传统甚高频通信网络采用半双工非中继方式工作,多个用户共同使用一个信道,信道分配使用由管制员负责;繁忙扇区/机场使用多个 ATC/AOC 信道,在郊区各种类型的通信业务仅使用单个信道;在繁忙飞行区域,基于甚高频 DSB-AM(R)S 系统的通信容量是关注的主要问题。

3. 通信质量

通信系统质量包含以下含义:

信道可用性与可靠性。

网络通信连接建立后,网络连接被阻塞的概率。

接收信号质量:信噪比与信干比(模拟系统)、比特错误概率(数据链系统)。

通常情况下,在通信网络建设的初期,网络的覆盖范围是设计者重点关注的内容;而在通信业务繁忙的区域中,通信系统的容量更为引人关注,此时,通信系统的服务质量被放置在次要位置,甚至被最后考虑。

4. 可用性和可靠性

通信系统可靠性与可用性是在通信设备设计、实现过程中需要仔细考虑的问题,通常在通信系统的标准中很难找到关于可用性和可靠性的定义。例如,查阅国际民航组织标准建议措施(SARPs)附件 10 第 2 章相关内容,可以发现文档详细给出了不同场景下接收机接收信号场强的取值,而并没有给出甚高频航空通信系统可用性和可靠性的定义。可靠性和可用性似乎更多是设备使用国的内部事务,在调查多个国家及相关组织的相关文件后发现,不同国家对可用性的定义差异较大,而通信系统可用性一般定义为 $99.9\% \sim 99.999\%$ 。

5. 射频的不平衡特性

传统的观点认为,在飞行器内操作和使用无线电设备的难度较大,因此在制订标准时,对机载设备的技术要求相对地面设备较宽松,此外,在航空无线电通信系统中,地面设备的工作频率通常是固定的,而机载设备工作频率可在全频段灵活改变。以下内容摘自国际民航组织附件 10 第 2 章关于发射机及接收机的技术规范。

机载发射机规范：除了以下参数外，机载发射机要求与地面站发射机相同；频率稳定度：信道间隔为 25kHz 时，频率稳定度为 0.003%；频率稳定度为 $\pm 0.005\%$ 。

机载接收机规范：除了以下参数外，机载接收机参数与地面站接收机相同；接收机灵敏度应满足，在大多数情况下，接收信号场强为 75V/m ($-109\text{dBW}/\text{m}^2$) 时，输出话音信噪比优于 15dB (话音调制深度 50%)；当使用甚高频附加接收装置时，接收机灵敏度为 30V/m，静噪解除场强为 14V/m。

在阅读以上技术规范时，需要注意以下两个方面的内容：第一，限于当时无线电设备制造水平，标准建议措施采用基站使用大功率发射，高灵敏度的接收方案；第二，标准建议措施要求基站天线辐射方向指向天空，并在水平方向达到最大。

在机载无线电系统中，提高发射机发射功率、增加无线电设备体积、重量以及设备散热往往需要付出很高的代价；此外，考虑到飞行器姿态多变，飞行器使用全向天线。正是由于以上诸多因素，机载无线电设备的技术指标相对地面设备较宽松。

6. 系统规范

国际民航组织标准建议措施(SARPs)的一般性技术规范。

邻信道抑制：在 $\pm 25\text{kHz}$ 时，邻信道抑制达 50dB；在 $\pm 17\text{kHz}$ 时，邻信道抑制达 40dB。

发射信号波形：A3E。

发射信号极化：垂直极化。

3.4.2 发射机与接收机指标测试

1. 发射机测试

以 50W 电台为例，测试前确认设备的外观正常，线路及电源连接正确，开机后设备自检正常没有报警信号。将设备调谐在预定使用的频率上，如果不知道设备的实际工作频率，那么测试时将设备调谐在中间频率 127.5MHz。

需要的测试仪器和测试工具有：频谱仪、频率计、综合测试仪以及相关的工具和连线等。发射机测试连接图如图 3-30 所示。

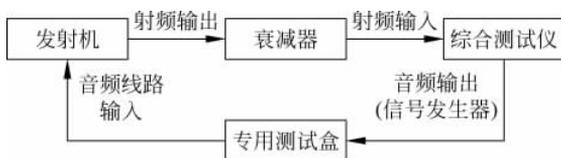


图 3-30 发射机测试连接图

通过测试盒产生一个 PTT 信号，设备的载波信号（没有调制）输入到综测仪，可以测量电台频率（也可以直接使用频率计测量），测量的频率值和设定值的差在常温下应该为： $\leq 5\text{ppm}$ （基本要求为视实际需要设置的频偏不同，要求也不同）。

通过测试盒产生一个 PTT 信号，设备的载波信号（没有调制）输入到综测仪，可以测量出电台功率，其值应该为 $+47\text{dBm}$ （或 50W ） $+1.5\text{dB}$ 。

通过测试盒产生一个 PTT 信号，同时通过综测仪产生一个 -10dBm @ 1kHz、600 Ω 平衡输出的音频信号，这两个信号通过线路输入发信机，发信机的调制载波输入综测仪，可以测出调制度，其值应该为 $\geq 85\%$ 。

在上述基础上将综测仪的音频调制信号增加到 $-7\text{dBm} @ 1\text{kHz}$,则可以用综测仪进行总谐波失真度测量,其值应该为 $\leq 10\%$ 。

2. 接收机测试

需要的准备的测试仪器有综测仪、专用测试盒及相关工具电缆。其中综测仪必须具备以下功能:①频率范围满足 $118\sim 137\text{MHz}$;②可以产生 1kHz 、调制度为 90% 的音频调幅信号;③可以测量音频电平、谐波失真度和 SINAD(Signal to Noise and Distortion Ratio, 信号-噪声及失真比);④其音频测试模块中必须提供符合 CCITT 标准的加权滤波器。接收机测试连接图如图 3-31 所示。



图 3-31 接收机测试连接图

灵敏度测试: 将综测仪的射频调整为和接收机的射频一致,然后在综测仪上设置 $-101\text{dBm} @ 1\text{kHz}$ 、调制度为 30% 的调幅信号,此时综测仪应打开音频测试的加权滤波器(即 CCITT FILT ON),进行 SINAD 测试,该值应该为 $\geq 12\text{dB}$ 。

失真度测试: 设置综测仪的射频与接收机相同,然后在综测仪上产生一个 $-53\text{dBm} @ 1\text{kHz}$ 、调制度为 30% 的调幅信号,此时应关闭综测仪音频测试的加权滤波器(即 CCITT FILT OFF),选择总谐波失真度测量,该值应该为 $\leq 5\%$ 。

在前面的条件下,在综测仪上产生一个 $-53\text{dBm} @ 1\text{kHz}$ 、调制度为 90% 的调幅信号,选择总谐波失真度测量,该值应该为 $\leq 10\%$ 。

音频输出电平: 设置综测仪的射频与接收机相同,然后在综测仪上产生一个 $-53\text{dBm} @ 1\text{kHz}$ 、调制度为 90% 的调幅信号,在综测仪上选择音频测试,测出的接收机输出音频电平值应该为 $-10\text{dBm} \pm 2\text{dB}$ (或 245mV , $194\sim 307\text{mV}$ 也在正常范围内)。

静噪信号测试: 根据当地的电磁环境进行设置并测试。

3. 滤波器测试

这里指的是对最常用的带通滤波器的调整和测试,不讨论双腔和带阻滤波器。测试所必须的仪器有:具有扫频功能的频谱仪以及相关的工具和连接线、接头等。

该测试的连接图如图 3-32 所示。

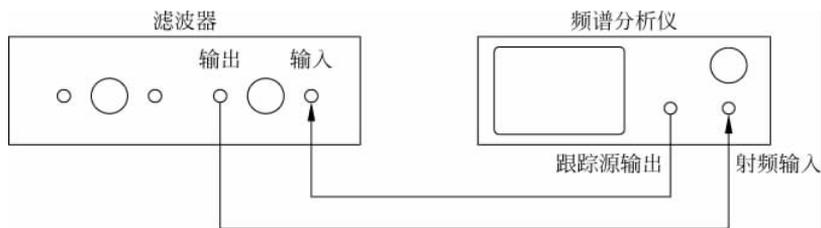


图 3-32 滤波器测试连接图

滤波器应当在 $118\sim 137\text{MHz}$ 频率范围适用,将滤波器调谐在预定实际使用的频率上,如果尚不知道设备的实际工作频率,那么测试时将设备调谐在中间频率 127.5MHz ,并将该

频率作为滤波器的中频。

测试中频插损：将频谱仪的中频与滤波器的中频设为一致，将频谱仪的扫描带宽设置为 2.2MHz，将跟踪源的输出设置为 0dBm，参考电平设置为 0dBm，其他参数按有利于观察频谱图的原则设定。如果对测试电缆的衰减不明，那么首先将两根射频电缆有 N-N 型接头连接后用频谱仪进行测试可做出损耗标记，然后再连接到滤波器进行测试即可屏蔽掉电缆的损耗。测试的中频插损值应该为 $\leq 2\text{dB}$ 。

测试选择性：测试条件与上述相同，使用频谱仪的标记功能在中频高低 500kHz(CF \pm 500kHz)处测量出的隔离度的值应该为 $\geq 15\text{dB}$ 。

4. 天馈系统的测量

天馈的测量应该在正常的环境下进行，环境温度应该满足： $-40\sim+70^{\circ}\text{C}$ 、风速 $\leq 150\text{km/h}$ 。该测量仅针对天馈网络，不包括隔离网络中的任何器件(如滤波器、耦合器或隔离器等)。

该测试需要准备的仪器有：频谱仪、定向耦合器、假负载以及相关的工具和连线。其中频谱仪应具备跟踪源，定向耦合器的隔离度不小于 30dB。

测试连接图如图 3-33 所示。

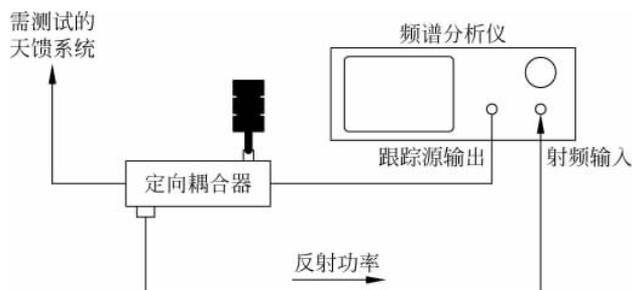


图 3-33 天线系统测试连接图

反射损耗的测量(VSWR)：该方法可以测量天馈系统的反射损耗，并且可以根据查询转换表将其转换为电压驻波比。连接好电缆后，调整频谱仪的参数，将起始频率设置为 118MHz，将终止频率设置为 137MHz(也可以根据实际天线的参数设置的更宽，比如 156MHz 或者更高)，跟踪源输出设置为 0dBm，参考电平设置为 -10dBm ，其他参数的设置以便于观察频谱图为原则。测试前先将定向耦合器至天馈的电缆拆下，则：①此时功率全反射，频谱仪的读数为高；②调整参考电平，将频谱仪的动态范围调至最大；③通过频谱仪的间隔标记功能，在频谱仪上设置一个 0dB 的反射损耗参考电平。然后将测试仪器和天馈系统按图 3-33 连接好，测试反射损耗，其值在 118~137MHz 范围内应该为 $\leq -9.5\text{dB}$ (对应 $\text{VSWR} \leq 2.0$)，反射损耗与电压驻波比的转换关系可以查表。

以上都是基本的调试，系统安装完毕后都必须进行。此外还有一些其他的性能参数，例如电台的平稳度、各种带内抑制度(中频抑制、互调抑制、敏感抑制等)、谐波离散度。音频响应、响应时间、隔离器的参数、耦合器的参数以及一些特殊用途的滤波器(如陷波器)的参数一般只在特殊情况下测试，在这里不作要求。

单机调试合格后，在系统正式投入使用之前还需要进行系统联调。一般情况下，共用天线系统的安装界面为主配线架，但是系统要投入使用，还需接入用户终端。用户终端可能是

内话系统也可能是带有耳麦的遥控盒或是其他终端设备,不论哪种终端设备,都必须支持共用天线系统最基本的信号连接,即基本的语音信号和基本的控制信号。

不论哪种终端设备,只要支持上述基本信号,就可以和天线共用系统连接,连接的方式可以是电缆直接连接,也可以是通过各种传输设备连接,不论怎样连接,都应该确保终端设备的音频电平和电台的电平相匹配,对 TX 电平双方都尽量设置在动态范围的中间位置,同时保持在发射机的音频压缩点附近,如果过高的调整发信机的线路信号增益,则设备基础噪声会导致信噪比的降低;而对于 RX 信号,只要双方匹配并且尽量调整到动态范围的中间段就可以了。

不同的终端设备与天线共用系统的基本连接方式可能略有差异,而且不同的终端设备采用的标准不同,对天线共用系统的支持度也不同,有的除了连接基本信号,还支持一些辅助功能,例如主备选择、静噪模式选址、带内调制、比选等,如果通过传输设备连接,那么还需要考虑所有中间设备的匹配问题,即系统联调包括了共用天线系统、传输网络和终端系统的联合调试。

3.4.3 天线共用系统测试

随着民航业务的发展,对 VHF 的波道数量需求越来越多,对天线场地和电磁环境的要求越来越高,逐步由 VHF 单体电台过渡到 VHF 共用天线系统。

VHF 共用天线系统可以采用收发信集中放置,安排在一个炮筒天线内,也可以采用收发信分开,收发天线分开,或若干信道共用一个天线,但一个天线的信道数量不能太多,否则存在互调干扰和较高的插入损耗,同时一旦此天线故障,会影响较多的信道。

配置系统时要综合考虑可靠性、天线场地、通信质量、价格、频率指配间隔等相关因素。在选择天线场地时,有许多因素影响天线之间的安全距离,例如:频率值、滤波器特性、发信机的输出功率、收信机的灵敏度、有无垂直间隔等。采用水平天线隔离时,工作频率为 126MHz 时,天线相距 65m,相当于 50dB 隔离度;天线相距 20m,相当于 40dB 隔离度;天线相距 10m,相当于 33dB 隔离度。若采用天线垂直隔离时,还可增加隔离度。

单体电台的基本结构如图 3-34 所示。

为了验证天线隔离度,可以采用图 3-35 所示方法进行测试。

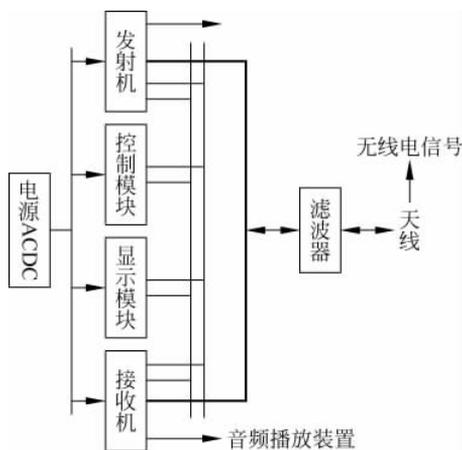


图 3-34 单体电台结构

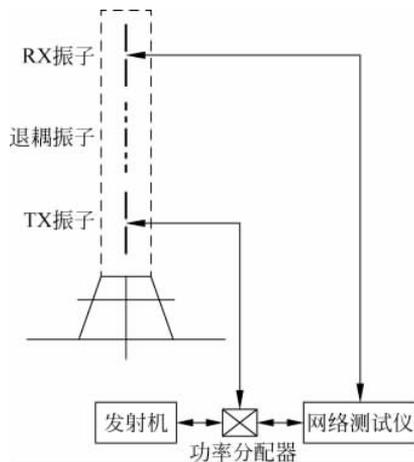


图 3-35 天线隔离度测试连接图

对于收发分开的天线共用系统,那么可以采用图 3-36 所示模式,在该种模式下,收发信天线是分开设置的,收发天线的隔离度主要取决于收发天线之间的距离,当然和整个系统的性能也有关系。

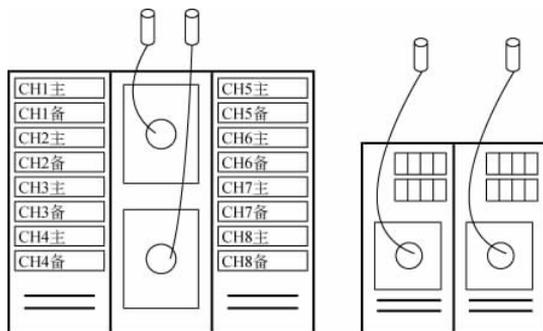


图 3-36 收发分开天线共用系统

对于收发一体天线,我们还应当考虑周围环境对收发振子退耦度的影响,如图 3-37 所示。

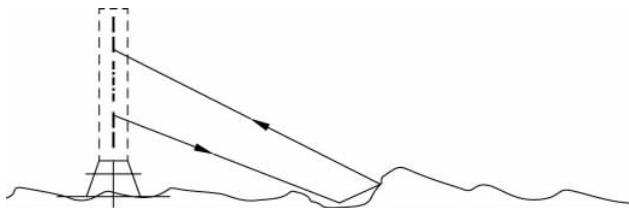


图 3-37 收发一体天线共用系统

一些连接附件也是将单体电台组成网络的必备器件,它们起到隔离和耦合作用。例如对发射机来说,一般采用主备机配置,由于主备机共同使用一根天线,那么主备机射频信号就不能同时并联发射,否则功放可能因为旁路过载而损坏,一般采用发射继电器来解决这个问题,只有处于工作状态的设备才能连接到天馈网络进行发射,而处于备用状态的设备与天馈系统断开,处于保护状态,不能发射,这里的继电器在网络中起到隔离保护作用。

而对接收机来说,同样也是采用双机互为备份配置,那么射频信号必须经过功率分配,以阻抗匹配的方式平均分配到两部接收机中,这里的功率分配器在网络中起耦合作用。

为了实现系统测试,有时还需要定向耦合器,以便对信号进行采样、计算和测试,有些场合定向耦合器也用作隔离器。定向耦合器是一种射频信号处理中的重要部件,它接收一个输入信号,输出两个有用信号,主线上输出较大的信号,耦合线上输出较小的信号。

为了便于管理和维护,天线共用系统一般都配备了整套的监控系统,该系统一般不影响天线共用系统的正常工作,通过监控接口监控系统的工作情况,如图 3-38 所示。系统发生工作异常时,监控系统可记录相应的变化情况,发出相应的显示或做出各种报警。系统监控、维护人员也可通过监控系统改变天线共用系统的工作参数,从而达到远程调整和维护天线共用系统工作状态的目的。

在一些比较复杂的 RCMS 配置情况下,例如不同台站的不同功能的电台需要经由一个

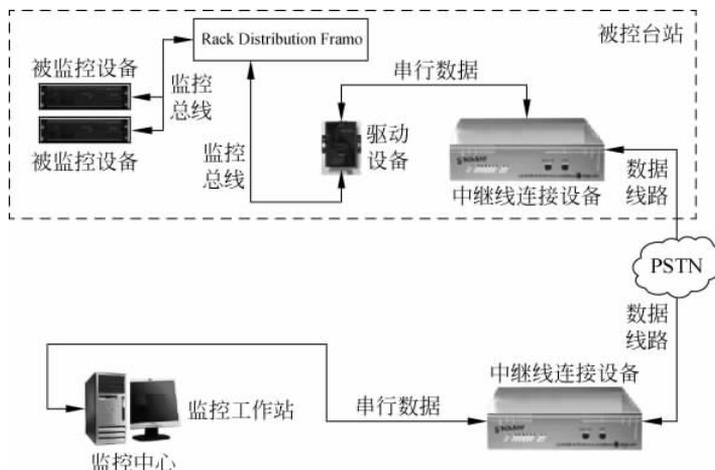


图 3-38 天线共用系统监控系统

MODEM 路由并且与同一台 PC 的多个串口相连,这时 RCMS 的配置比较复杂,解决办法是使用 RS232 复用设备进行连接。

3.4.4 天线共用系统的安装与调试

选址及准备:天线共用系统的安装主要是为了解决地空通信的覆盖问题,所以首先应进行选址,根据计划和需要覆盖的管制区、飞行航路以及飞行高度,结合 VHF 理论覆盖图,最终选定合适的站点来建设 VHF 天线共用系统。

ICAO 规定 VHF 通信接收点的最低电场强度为 $75\mu\text{V}/\text{M}$ (接收机灵敏度为 $1\sim 10\mu\text{V}$)。已知发射天线的输入功率为 P_t ,发射天线在接收方向的天线增益为 G_t ,通信距离为 D ,接收点电场强度为

$$E = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{D} \times 10^6 (\mu\text{V}/\text{m}) \quad (3-6)$$

地面台电波最大覆盖距离按 EGLI(适用于 VHF)数学模型计算 $d(\text{Km})$

$$L_b = 88 + 20\lg F + 40\lg d - 20\lg H_t - 20\lg H_r \quad (3-7)$$

其中 $L_b(D_b)$ 为传播衰耗, $F(\text{MHz})$ 为工作频率, $H_t(\text{m})$ 为发射天线高度, $H_r(\text{m})$ 为接受天线高度,利用 VHF 电磁波传播的视距估算原理,计算通信覆盖,通信覆盖计算主要取决于:

- (1) 地球表面上的障碍物阻挡。
- (2) 地球表面的弯曲:当通信距离超过 30 千米后,必须计入地球表面的弯曲,用地球突起高度表示光滑地球的地弧影响。
- (3) 大气对电波的折射:低层大气层是一种非均匀介质,其介电常数除受大气成分、气压、温度和湿度的影响,还随时间和高度的变化而变化,对于沿水平方向传播的电波,影响最大的是相对介电常数 $\epsilon_T(h)$ 会随高度 h 而变化。

如果使用的是收发分体的共用天线,其架设的位置除了必须满足上述要求之外,还必须考虑收发天线的隔离度问题。收发隔离度,是 VHF 信号从发射天线到接收天线的空中路径衰落值。收发隔离度分为水平隔离度和垂直隔离度。利用 EGLI(适用于 VHF 的数学模

型)模型估算水平隔离度 L_h 用分贝表示公式如下

$$L_h = 88.0 + 20\log_{10}(d/\lambda) - (G_t + G_r) + C \quad (3-8)$$

其中,88.0 为传播常数, d 为收发天线水平距离, λ 为天线工作波长, G_t 、 G_r 分别为发射和接收天线的增益(单位: dB), C 为阻挡物体的损耗。

垂直隔离度 L_v 用分贝表示公式如下

$$L_v = 96.0 + 40\log_{10}(d/\lambda) \quad (3-9)$$

其中,96.0 为传播常数, d 为收发天线垂直间隔。

在同频情况下,接收机有一个它能接受的最大信号电平,在 R/S 200 系列中,其值为 $5V_{emf}=27\text{dBm}$ 。发射功率为 $50\text{W}(47\text{dBm})$ 时,自由空间损耗 20dB 。发射功率 $25\text{W}(44\text{dBm})$ 时,自由空间损耗 17dB 。

当两根发射天线使用不同频率时,在有互调的情况下,如果 $2T_{x1}-T_{x2}$ 等于 R_{x3} ,则必须加装滤波器和隔离器,最小距离约为 1km 。

在没有互调的情况下,如果 $2T_{x1}-T_{x2}$ 不等于 R_{x3} ,则最小距离依照上述标准公式计算确定天线位置之后,可以建造符合条件的机房,机房和天线之间的距离应尽量控制在 100m 以内。

在机房装修前应首先确定天线共用系统的规模、机架尺寸、满载机架重量以及确定系统对电源、接地、避雷及环境参数的要求,进而确定对机房的需求。

3.5 民航甚高频话音通信系统关键技术

当飞行器飞行高度较低时,飞行器与地面站间的电波传播以非视距传播为主。为提高网络覆盖范围,同时避免使用小区分裂带来设备成本及维护复杂度增加的问题,建议使用以下技术提高通信质量。

3.5.1 频率耦合

为方便交通管制,一个管制区通常划分为多个管制扇区,每个扇区配置相应的空管人员负责该扇区的交通管制,当一个管制区的交通流量迅速下降时,此时整个管制区域仅需一个管制员就可实现整个区域的交通管制。此时,可通过多个发射频率耦合在一起的方法来实现管制员话音在多个信道的传播问题;在接收机中,管制员则通过信号必选器选择信号最好的信道进行接收。

对于模拟通信系统,信号的必选功能可通过比较接收信号强度的方法来实现,而对于数字通信系统则可通过统计链路比特差错概率的方法来确定最佳接收信号。以上将多个管制扇区合并为单个管制区的过程简称为“合扇”。

3.5.2 载波偏置技术

在某些特殊情况下,受基站环境的限制,单个地面基站不能实现整个通信区域的覆盖,例如图 3-39 所示的非规则五边形是地面基站需要提供通信覆盖的区域,但受电波传播环境的限制,单个基站可能不能实现五边形区域的通信覆盖,为实现五边形的通信覆盖可能需要设置 4 个地面基站。从网络运营的角度,利用 4 个不同频率基站来提供整个区域通信的覆盖

非常不方便,但通过甚高频调幅接收机的捕获效应,可方便利用载波偏置技术(CLIMAX)实现多基站的网络覆盖。

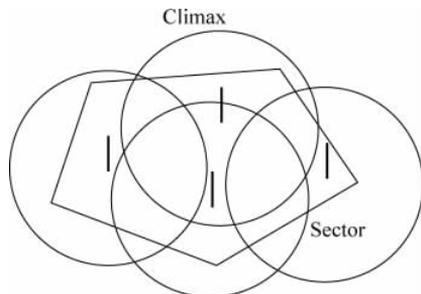


图 3-39 扩展信号覆盖示意图

如图 3-40 所示给出了使用载波偏技术来拓展甚高频通信系统覆盖的示意图。在地空链路中,管制员的话音信号分别送到 4 个地面基站发射,4 个地面基站发射载波频率分别设置为 $f-\Delta$ 、 $f+\Delta$ 、 $f-2\Delta$ 和 $f+2\Delta$,其中, Δ 代表载波频率的偏置量;在机载接收机中,接收机载波频率设置为 f ,借助调幅接收机的捕获效应,机载接收机锁相环路可锁定在 $f-\Delta$ 、 $f+\Delta$ 、 $f-2\Delta$ 、 $f+2\Delta$ 中的一个频率上,并实现地面发射信号的正确接收。

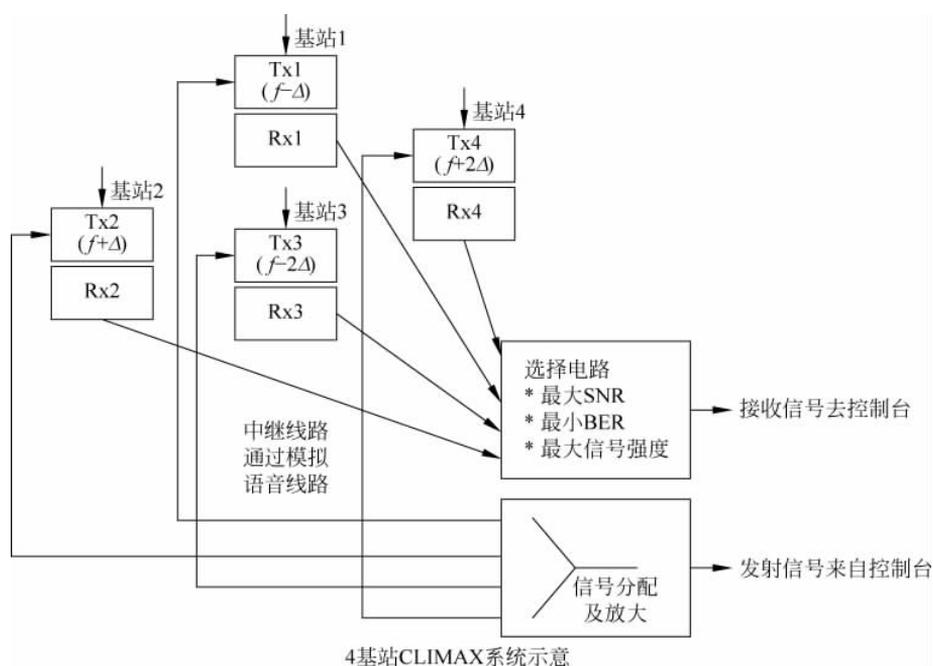


图 3-40 载波偏技术系统示意图

在地空链路中,机载发射机载波频率设置为 f ,4 个地面基站接收机载波频率均设置为 f ,机载发射机发射的信号,分别被 4 个地面基站接收机接收,并通过地面网络传输到管制中心,管制员利用信号比选器选择最佳信号进行接收。

表 3-2 显示给出基站数与基站载波频率设置。

表 3-2 CLIMAX 配置

每扇区基站数目	频 偏
1	0
2	$f_1 = f_c + 5\text{kHz}$ $f_2 = f_c - 5\text{kHz}$
3	$f_1 = f_c + 7.5\text{kHz}$ $f_2 = f_c - 7.5\text{kHz}$ $f_3 = f_c \text{kHz}$
4	$f_1 = f_c + 7.5\text{kHz}$ $f_2 = f_c - 7.5\text{kHz}$ $f_3 = f_c + 2.5\text{kHz}$ $f_4 = f_c - 2.5\text{kHz}$

3.5.3 小区分裂与信道窄带化

为了提高通信系统的容量,可通过将容量饱和和管制区域分裂为多个管制扇区的方法来提高系统的容量。此外也可通过压缩信道间隔的方法来提高通信系统的容量,例如将 25kHz 信道传输带宽压缩至 8.33kHz。

3.5.4 频率重用技术

频率重用也称频率再用,就是重复使用(reuse)频率,在 VHF 网络中频率复用就是使同一频率覆盖不同的区域(一个基站或该基站的一部分(扇形天线)所覆盖的区域),这些使用同一频率的区域彼此需要相隔一定的距离(称为同频复用距离),以满足将同频干扰抑制到达允许的范围。

频率重用系数受许多因素的限制为:首先,工作扇区的顶部高度;其次,航空移动通信服务类型,例如机场终端信息服务(ATIS),或控制交通管制话音服务(ATC)。

3.5.5 干扰及干扰抑制技术

在甚高频航空移动通信系统中,为提高系统的频率重用系数,不同区域使用相同工作频率,此时系统不可避免将出现共信道干扰。在理想情况下,系统的共信道干扰是完全可以消除的,但实际系统中,系统内总残留一定的共信道干扰。为解决此问题,国际民航组织制订共信道干扰及邻信道干扰消除的规范。

在甚高频航空移动通信系统中,某些信道具有较高的优先级,例如用于机场进近及飞机着路的交通管制话音信道。为防止高优先级信道被干扰,高优先级信道两侧的若干信道被禁止使用,例如应急工作频率(121.5MHz)两侧的 25kHz 信道被禁止使用。

为使读者对通信容量有深刻的认识,下面以欧洲为例来说明对民航对航空通信系统的容量需求。在 117.975~137MHz 航空甚高频工作频段,欧洲为各种不同类型的通信业务提供了 10 000 个信道,假设每个信道占用 25kHz 传输带宽,这相当于 117.975~137MHz 频率范围内的每个信道被重复使用了 13 次。

在飞行器中,提高通信系统容量的方法是使用多个机载航空发射机,且不同发射机工作

频率不相同,在地面基站中,可通过使用多个收/发信机来提高通信容量。多个发射机输出射频信号通过耦合器送入单个天线,天线接收到的信号通过功分器连接到不同接收机中。

1. 接收机淹没干扰

甚高频航空移动通信频段的低端是无线电广播频段(88~108MHz),无线电广播设备的发射功率非常高,且发射天线采用全向天线,广播设备发射功率通常为千瓦量级。飞机在着陆阶段,经常会飞越广播电台,此时飞机距离广播电台的距离仅为几百米,在飞机着陆阶段,飞机迫切需要地面导航及通信系统提供服务。

根据电波传播理论,电波在自由空间的传播损耗表示为

$$L_{fspl} = 32.44 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{MHz}) \quad (3-10)$$

由于 $d_{km} < 1\text{km}$,因此 $20\log_{10}(d_{km})$ 项取值非常小,可近似忽略。另外根据链路预算方程,接收机接收信号功率表示为

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_{f1} + G_1 - fspl + G_2 - L_{f2} \quad (3-11)$$

考虑到无线电广播发射机的发射功率极高,即 P_{Tx} 取值非常大,此时飞机接收机接收信号功率非常高。如果接收机射频通道较宽,则强干扰信号将淹没接收机期望接收的弱信号。由于航空导航系统(工作频段 108.000~117.075MHz)离无线电广播频段频率的间隔更近,因此无线电广播对航空导航系统的影响更加明显。总之,无线电广播系统的带外泄漏对航空无线电通信及导航系统的影响是需要解决的重要问题。解决方法是使用带限特性更加优良的滤波器,这种技术称为甚高频硬化技术。

2. 互调干扰

无线电广播系统产生的压制性干扰可通过使用带通特性(118~137MHz)更加优良的滤波器来加以克服。但对于天线、传输线及发射机产生的互调干扰,如果干扰信号恰好落入118~137MHz工作频带范围内,则无法通过滤波的方法消除。

除了本书理论部分介绍的互调产生的原理以外,无线电广播及航空多载波发射机的高功率非线性器件,如天线、二极管、波导管等,非常容易产生谐波分量,如果谐波分量落入航空通信及导航接收机的接收通道则将形成互调干扰。

虽然互调干扰功率远低于无线电广播干扰功率,但由于互调干扰信号的工作频率与接收频带完全相同,因此不可能通过滤波的方法来消除,互调干扰显著降低期望信号的解调性能。为克服无线电广播发射机的压制性干扰及无线电广播系统产生的互调干扰,国际民航组织提出了对压制性干扰及互调干扰不敏感的技术规范以及航空电子设备接收机硬化的解决方案。

习题

- 3-1 简述飞机上 VHF 接收机从射频到中频的变频过程。
- 3-2 简述飞机上 PTT 按钮的功能。
- 3-3 飞机甚高频通信系统主要由哪几部分组成,各部分主要功能是什么?
- 3-4 画图说明甚高频通信系统中接收机中混频电路的工作情况。
- 3-5 简述对甚高频接收机进行测试需要准备的仪器、测试方法及测试指标。

参考文献

- [1] 刘连生. 飞机通信系统[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.
- [2] 樊昌信, 张甫翊, 徐炳祥等. 通信原理(第5版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] Dale Stacey. Aeronautical Radio Communication Systems and Networks [M]. England: John Wiley & Sons, 2008.
- [4] 魏光兴. 通信导航监视设施[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004: 49-53.
- [5] Richard Womersley, Carolyn Tournadre, Philip Hodder, Investigation of interference source and mechanisms for Eurocontrols Final Report[J], 1997.
- [6] Dale Stacey 著. 吴仁彪, 刘海涛, 马俞昭等译. 航空无线电通信系统与网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [7] 任航. SITT M600S 内话系统语音交换分析[J]. 信息通信, 2012(4): 268-269.