

文章编号: 1001-893X(2011)03-0004-05

舰载通信信号侦察接收系统^{*}

黄 慰, 刘 震

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘 要: 在分析沿海地区复杂电磁环境构成因素的基础上, 阐述了舰载通信信号侦察接收系统的技术体制、侦收方法及特点, 探讨了舰载通信信号侦察接收系统为适应复杂电磁环境的解决措施, 并在实际工程应用中证明改进措施能够很好地解决舰载通信信号侦察接收机的实际使用问题, 保证其具有大侦收带宽、高灵敏度、大动态范围、强抗干扰能力。

关键词: 舰载侦察系统; 复杂电磁环境; 通信信号; 侦察接收机; 软件无线电

中图分类号: TN85 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.002

Ship-borne Communication Signals Reconnaissance Receiver System

HUANG Wei, LIU Zhen

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Through analysing the characteristics of complicated electromagnetic environment in coastal areas, the technical system, reconnaissance method and features of ship-borne communication signals reconnaissance receiver system are described, the measures for ship-borne communication signals reconnaissance receiver system to adapt the complicated electromagnetic environment are discussed. The application in project has proved that the measures can well solve the problems of the ship-borne communication signals reconnaissance receiver system, and realize the capability of wide reconnaissance band, high receiver sensitivity, high dynamic range and strong anti-jamming.

Key words: ship-borne reconnaissance system; complicated electromagnetic environment; communication signals; reconnaissance receiver; software defined radio(SDR)

1 引 言

复杂电磁环境, 是指在一定的时域、空域、频域上, 电磁信号密集跌宕、纵横交错、功率分布起伏变化, 在有限的时空范围内, 电磁活动产生重大影响的一种电磁环境^[1]。随着现代信息技术的发展和大量军用、民用电子设备的广泛应用, 空间电磁环境较以往发生了巨大的变化, 电磁环境越来越恶化。尤其是沿海及近海地区, 由于其环境和地理位置的特殊性, 其电磁环境更加复杂。

对于舰载侦察接收系统来讲, 在保证各项技术指标要求的前提下, 适应沿海及近海地区复杂的电

磁环境是该系统设计的一个重点。本文通过分析通信信号侦察接收的技术体制和特点, 探讨了一系列为适应复杂电磁环境的改进措施, 并在实际工程应用中证明该方法能较好地解决舰载通信信号侦察接收系统的使用问题, 保证系统具有大侦收带宽、高灵敏度、大动态范围、强抗干扰能力。

2 沿海地区复杂电磁环境的特点

沿海和近海地区由于其自身的一些特殊性, 空间中聚集着大量的电磁信号, 即使是在和平时期, 沿海和近海地区的电磁环境较内陆地区, 其电磁辐射源的数量更多, 信号的密集程度更高、复杂性更强^[2]。

^{*} 收稿日期: 2010-10-26; 修回日期: 2011-02-28

沿海和近海地区复杂电磁环境突出表现为以下特征:

(1)辐射源数量多、密度高

沿海和近海地区由于其自身的地理因素,空间中充斥着大量的民用和军用电磁信号。常见的民用信号的发射站有 GSM、CDMA 手机基站、民用的海岸电台、渔业指挥岸台、广播电视信号、民用导航雷达、渔用雷达等。同时,海岸地带会设立各种军事基地;建设海岸炮、导弹等防控阵地;在港湾内设立舰艇停泊码头和后勤保障设施;在临海山地建设观通雷达站,构成坚固的防御体系。因此,在海岸线附近的空间中还存在着大量的军用电台通信信号、海面警戒雷达信号、防空警戒雷达信号、舰载雷达信号等。

(2)电波传播复杂

沿海及近海地区由于其自身的一些物理和大气特性会造成电波传输中较为严重的折射、反射和散射。海面的强反射、潮涨潮落和雨、雾、海面水蒸气、海面大气逆温等均可能引起电波的多径传输干涉性衰落,即由于直射波和反射波相互叠加,使得接收端的接收电平起伏、失真和波形展宽。这种衰落在信号幅度上服从瑞利分布或广义瑞利分布。彼此处于协同方的通信系统常常采用分集接收、增加收发天线高度差、自适应均衡技术等措施来抗海面多径衰落或相位波动;对于非协同方的侦察接收系统来说,由于海面及大气引起的多径衰落对通信信号侦察的影响将更加严重,增加了信号接收的不稳定因素。

(3)大功率发射信号多

随着沿海渔业、海上旅游业的迅速发展,尤其是渔民对移动通信需求的增大,为了保证手机用户在近海地区能接收到手机信号,GSM、CDMA 等手机基站发射的功率一般都强于内陆地区。如 GSM 系统根据 TS GSM05.05 技术规范要求,大部分基站输出功率为40 W(46 dBm)第 4 级功率等级;但在沿海及近海地区,为了满足在近海 50 多公里范围内通话正常,部分基站输出功率为320 W(55 dBm)第 1 级功率等级。其它各种调频电台、军民用雷达信号也比内陆地区相同功能设备的信号发射功率强得多。如渔民常用的船用单边带电台(IC - M801)发射功率为125 W,IC - M802 的最大发射功率为150 W;船用雷达 MR - 1000TⅢ的峰值输出功率为4 kW;船用导航雷达 RM1290A 的发射功率为25 kW。军用对海警戒雷达发射的峰值功率为数千瓦级,对空警戒雷达发射的峰值功率为数兆瓦级,平均功率为数千瓦级。

(4)辐射信号体制复杂

随着信息技术的突飞猛进,目前通信、雷达装备广泛采用了各种复杂的信号调制样式。通信信号的调制方式从传统的 FM、SSB、AM 到现在的 QPSK、MQAM、FSK 及其改进、衍生的调制样式,如高斯滤波最小移频键控(GMSK)、偏移四相相移键控(OQPSK)、正交频分复用调制(OFDM)等。许多新体制的雷达已广泛采用频率捷变、重频参差、重频抖动、重频编码、脉内压缩以及频率分集和跳频等一系列抗干扰技术体制。

(5)电磁频谱范围跨度大

沿海和近海地区内各种军民混用的电子收发设备,所占用的频段几乎涵盖了整个电磁频谱,其中包括从短波、超短波、微波到毫米波、红外的几乎所有电磁频谱。

3 舰载通信信号侦察系统的组成

近年来,随着软件无线电(Software Defined Radio, SDR)的飞速发展和不断成熟,基于软件无线电技术的数字接收机被广泛应用于各个领域。目前,通信信号侦察系统也普遍采用这种技术体制,该系统主要由侦察天线、接收机、高速 A/D 转换器和数字信号处理器四大部分组成。舰载通信信号侦察系统由于其自身的工作环境所限,以及为了便于人员操作等因素,接收机和数字信号处理设备一般都是位于舱室内部,通过船用长电缆与舱外的侦察天线相互连接,因此,舰载通信系统一般还多一级射频前端组件位于侦察天线和接收机之间,其系统组成框图如图 1 所示。

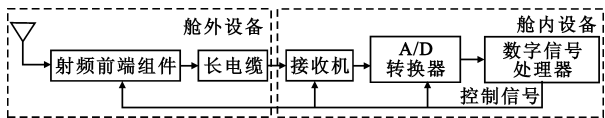


图 1 舰载通信侦察系统组成框图

Fig. 1 Composition of ship - borne communication signals reconnaissance system

舰载通信侦察接收系统主要是由图 1 中的射频前端组件和接收机组成,其中射频前端组件一般是由限幅器、低噪声放大器、可变衰减器等组成,位于舱室外部并尽量靠近天线输出端口以提高整个接收系统的灵敏度,并补偿从天线处到舱室内长电缆的损耗。接收机可以由诸如 WJ - 8969、IC - R8500 这类常规的商用接收机,或一些定制的接收机组成。这些接收机一般都会设有预选器、可变衰减器、

AGC/MGC 等器件,以实现滤除带外干扰和通过改变增益来扩大接收机动态范围。

在传统的设计方法中,一般对带外强干扰信号的滤除和扩大接收系统的动态范围都是依靠舱室内的接收机来完成,射频前端组件往往会忽略,设计得比较简单,一般是选用一个性能优良的宽带低噪声放大器来降低系统噪声系数,提高侦收灵敏度。这种设计方法在电磁环境比较好的条件下能够适用,但是在日趋复杂的电磁环境尤其是沿海地区复杂的电磁环境中往往不能胜任。因为在这种情况下,射频前端组件中可能就已经产生了严重的非线性失真、信道饱和,甚至信道阻塞。因此,需要通过增加射频前端组件设计的复杂性和抗强信号、多信号的能力,以提高整个侦察接收系统的环境适应性和系统可靠性。

4 沿海地区复杂电磁环境对通信信号侦察接收系统的影响分析

沿海和近海地区不论是在和平时期,还是危机期间和战争时期,其空间内都存在大量民用和军用的通信、雷达信号。在时域上,这些电磁波时隐时现,时疏时密,在特定时间内有可能呈现高密度状态;在空域上,各种电磁信号遍布空中、地面、海上,辐射距离从几十米到数千公里;在频域上,电磁信号占用的频段几乎覆盖了整个频带;在能量上,大功率辐射信号多,且辐射功率强弱不定、跌宕起伏^[3]。这些复杂背景信号的存在为电子侦察提出了新的挑战,增加了侦察接收系统的不稳定因素,为后端设备对未知的有用信号进行分析处理造成了非常大的影响。

传统的舰载侦察接收机为了保持对海面环境的实时监视,要达到 100% 的截获概率,通常采用侦收天线在方位上 360°覆盖,侦收信道在频域内采用全频段宽开接收的体制。信号先通过舱外的天线接收下来,再经过侦收信道,到舱内的各种接收机和交换网络中进行后端的分析处理。

传统的侦收信道在一般的电磁环境下和实验室条件下有可能具有良好的性能,但是一旦在密集复杂的电磁环境下,特别是沿海和近海地区则常会出现系统整体侦收性能下降^[4],遇到较多的问题,主要有以下几个方面:

(1) 雷达信号抑制能力差

目前,雷达和通信信号的区别越来越不明显,它们所占用的频率范围与以前所规定的使用频段也不

同,通信系统已经在以前只属于雷达范畴的频率上工作,而远程雷达也在原属于通信范畴的 VHF 频段上工作。而且,两种体制的信号特征也不再有明显的区别,通信信号一般为连续波形,个别采用间断连续波形,如短时猝发通信信号;雷达信号最常见的为脉冲调制波形,但少部分雷达也采用了连续波信号。

在对通信信号进行侦察时,常常是进行宽带侦察。在复杂电磁环境下,雷达与通信信号往往同时存在,在宽频带内很难将其滤除,而且雷达信号的功率往往大于通信信号,容易引起通信信号的侦收信道饱和,导致信道中部分有源器件非线性问题严重。

(2) 系统适应能力差

复杂电磁环境中,电磁信号密集多样,使得侦察接收系统的宽带接收信道在瞬时带宽内能同时接收到数量众多、种类各异的电磁信号,超出了后端侦察设备的识别处理能力,导致侦察设备的侦察能力降低,使得有价值的信号漏报;也有可能各个信号之间交调产生出虚假信号,导致误报,从而影响情报的可靠性和真实性。

当频段内有连续波和脉冲信号同时存在时,ELINT 系统中的 IFM 接收机将无法准确地测频,这样就极大地降低了其测频精度、截获概率以及识别的可靠性;超外差接收机虽然不像 IFM 接收机那样易受干扰,但也会造成其侦收信号的精度和可靠性下降。在很多地方 ELINT 系统的 IFM 接收机在 0.8 ~ 2 GHz 频段几乎无法测量,这正是由于手机信号的频率正好处在该频段内造成的。

(3) 系统性能下降

在有线测试接收系统的噪声系数时,测试的指标非常好,用传统经典公式可以换算成极低的接收灵敏度电平值。但在实际使用中,特别是在沿海等复杂的电磁环境下,系统无线测试时,有可能发现在实际使用环境中该系统的接收灵敏度会变差,实测电平值会远高于推算值。原因是由于接收信道的 1dB 压缩点电平值是相对于整个系统能接收到的所有信号的功率总和而言,即整个接收频带内所有信号功率的叠加值。有时,往往需要侦收的有用信号的电平值不是很大,但是宽频带内其它频点的大信号会使得侦收信道完全饱和、失真,整个接收系统的噪声基底被抬高,与测试时单个信号的接收灵敏度预计值有很大差别。因此,对于宽带侦察的接收系统,有时一味追求噪声系数尽可能地小,而把系统的增益过分抬高,简化前端设计,这种做法常常会使系统的稳定性大打折扣,对外界环境尤其是沿海复

杂的电磁环境的适应性大大降低,系统稳定性、实用性和环境适应性变差。

5 复杂电磁环境下通信信号侦察接收系统的解决措施

(1)滤除雷达等复杂背景信号,降低信道非线性概率

当宽开的接收信道存在像雷达、GSM、CDMA 等大功率信号时,由于能量的累加作用,会导致侦察接收信道完全饱和。其所产生的非线性交调、谐波分量以及各干扰信号相位噪声的影响,使得整个接收信道的噪声基底被显著抬高,不利于对小信号的截获、识别、分析和解调。因此,图1中的射频前端组件里应增加滤除大功率信号功能的器件。比较灵活的一种方法是在支路中设置电调带阻滤波器,滤除脉冲信号和大功率连续波等背景信号,稀释进入接收机的信号密度,防止其阻塞侦察接收信道。但由于微波工艺和器件水平限制,目前电调滤波器体积、插损大,重量重,将其前置会影响整个接收系统的接收灵敏度,难以放置在接收信道前端。另一种方法是将预选器前置,从天线接收到的信号先经过预选器分段滤除干扰信号。为了抑制强信号在接收信道中非线性器件的交互调干扰,前置预选器一般是采用亚倍频段的要求进行设计。但在实际工程设计中,为了降低预选器的复杂程度和插损值,在频率低端可以依据已知的一些实际外部信号的分布情况,适当增加低端频率的滤波器带宽;同时,在设计时也可以预先把不关心的雷达信号占用的频带或者手机基站的频段排除在外,对已知的大功率干扰信号能够起到很好的抑制作用。

(2)通过定向天线和全向天线、宽带信道和窄带信道相结合的方法,提高发现侦察发现概率和识别解调门限

由于电波传播的方向性,对已知来波方向的信号,可以利用定向天线对其进行侦收。由于定向天线的波瓣宽度窄、方向性好、增益高、作用距离远、抗干扰能力强,因此通过定向天线的使用,可以在空域内稀释信号,滤除或减小其它方向来波信号的电平值。在实际侦收时,通过全向天线和定向天线的配合使用,或是采用多个定向天线组阵的方式,通过全向天线在全空域360°范围内发现有用信号后,再引导定向天线在该来波方向上实施侦收的方式,来发现外界感兴趣的信号并对其进行详查分析。

对通信信号的侦察,在系统设计时还可以考虑通过采用宽带和窄带超外差相结合的体制,宽带支路实现高截获概率并引导窄带支路侦收。其中,宽带支路由于带宽比较宽,带内信号多,可以使用限幅器保护前端放大器;窄带支路由于带内信号数量少,可以不用限幅器,直接选用低噪声、高增益、高截点的窄带放大器,以实现较低的识别解调门限。实际使用中可以先通过宽带信道观察全频段内的信号,有感兴趣的信号,再切换到相应的窄带信道中,对该信号进行识别、分析、解调、存储、记录等操作。

(3)慎用限幅器

为了保护接收信道中的第一级低噪声放大器不被外界的强信号烧毁,实际使用中,经常在天线和第一级低噪声放大器之间加入一个宽带的限幅器,对后级器件起到一个保护的作用。

但是,限幅器大多采用PIN二极管,而二极管是与整个频带内所有信号的能量总和相对应,因此其不具备根据频率把需要的和不要的信号区别开来的能力。当有大功率的信号输入时,输入电平幅度大到使限幅器开始起作用时,其输出的信号幅度将产生严重非线性失真。而且,限幅器还存在信号抑制作用,即当噪声或干扰信号与有用信号同时加到限幅器上,而且输入的干扰信号接近或超过有用信号时,在限幅器输出端有用信号将受到抑制,这就是限幅器的信号抑制。例如在一种特殊情况下,噪声信号能使限幅器输出端的正常信噪比较输入端的信噪比减小5~6 dB。

通信信号侦察系统不同于雷达信号侦察系统,雷达信号的侦察对信号幅度不是很关心,因此常常使用限幅器,但是通信信号侦察系统对信号的幅度比较敏感,因此在通信信号侦察接收系统的前端,尤其是对侦察信号幅度参数比较敏感的接收系统中,应慎用限幅器。

(4)提高接收系统的整体动态范围

一般而言,动态范围可以很好地表征电磁环境对接收设备的影响,动态范围大的接收设备对电磁环境适应能力强,反之则弱。因此,为了更好地适应日益恶化的电磁环境,应尽量提高接收系统的动态范围。系统的动态范围主要由如图1中所示的射频前端组件和接收机等模拟模拟器件的动态范围和AD模数转换器的动态范围两部分组成。

对模拟射频器件,常用的提高动态范围的方法有采用对数放大器、手动增益控制(MGC)方式、自动增益控制(AGC)方式,或选用高性能的器件(低的噪

声系数、高的1 dB压缩点,二阶、三阶截点)。对数放大器本身就是一个非线性的器件,一般是在对信号幅度不敏感的系统选用,以提高系统的动态范围。一般线性系统的动态范围为60 dB左右,采用对数放大器后动态范围可以扩大到90 dB以上。但是在通信信号侦测系统中,对于像QAM等调制方式信号的解调或比幅测向、干涉仪测向系统以及圆锥扫描天线跟踪系统都需要准确的信号幅度信息,因此在通信信号侦测系统中采用对数放大器来扩大系统动态范围有一定的局限。

目前,在工程上已普遍选用16 bit、61.44 MHz的ADC对70 MHz中频信号进行带通采样,该器件能实现其有效位数为13位,无杂散动态范围为80 dB,信噪比为65 dB左右,完全可以满足前端模拟器件所需的动态范围要求。在实际设计中ADC应该作为接收系统的一部分与前端超外差接收系统一起设计,使得其增益、动态范围的设计应与模数变换器(ADC)的指标相匹配,把前端模拟器件的增益设计合理,不宜过高,降低模拟器件信道的非线性压力,充分发挥各部分器件的最大功效。

(5)运用新技术提高在复杂背景下的信号侦测能力

近年来,随着新技术的进步,诸如数字波束形成(DBF)技术和自适应均衡器被广泛应用于移动通信领域,用于降低码间干扰和信道间干扰,提高通信质量。其中,DBF技术是利用天线阵元将接收到的信号无失真地下变频到数字信号,再通过乘以相应的加权系数形成所需的接收波束,由于是数字处理,因而采用DBF技术易于实现低副瓣、自适应零点及超强分辨处理能力。利用波束形成技术,通过空间扫描来稀释进入接收通道的信号,充分利用信号的空间可分性,有助于完成对侦察信号的检测与分选识别工作。而在通信信号侦察领域也可以采用信道自适应均衡技术,克服侦收无线信道衰落,特别是海面多径传播造成的幅度衰落、多径时延,以及多普勒频移等造成的衰落,改善侦收系统性能,提高在复杂背景下的信号侦测能力。

6 结 论

本文针对沿海地区复杂电磁环境的特点,对通信信号侦察接收系统的技术体制、侦收方法进行了详细分析,提出了在复杂电磁环境下的改进建议,通过对通信信号侦察接收系统的改进,可以使通信信号侦收

系统能够更好地适应日趋复杂的电磁环境。

在实际工程应用中,该舰载侦察接收系统的设计思想得到了较好的应用。在复杂的沿海电磁环境中,该系统在1~8.5 GHz的侦察带宽内,宽带侦察通路的侦察灵敏度为-102 dBm(1 MHz带宽、10 dB信噪比时),窄带侦收通路的侦收灵敏度为-105 dBm,动态范围70 dB;并且较好地解决了当侦察带宽内存在大功率信号时,侦收信号大幅度抖动的现象,提高了整个侦察接收系统的稳定性和环境适应性。对沿海地区复杂电磁环境对舰载侦察接收系统的影响及解决措施分析,对宽带通信信号侦察接收系统的总体设计和前期接收设备的研制具有一定的参考和指导意义,后续工作需要在如何通过运用新技术来提高复杂电磁环境的适应性等方面做进一步的深入研究和探讨。

参考文献:

- [1] 兰俊杰. 复杂电磁环境下电磁干扰抑制措施研究[J]. 航天电子对抗, 2008(6):35-37.
LAN Jun-jie. Interference Suppression Measures in Complex EME[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008(6):35-37. (in Chinese)
- [2] 曾文龙. 复杂电磁环境对电子对抗侦察的影响及对策[J]. 国防科技, 2008(4):54-57.
ZENG Wen-long. The Impact of Complex Electromagnetic Environment on the Electronic Surveillance and Countermeasures[J]. National Defense Science & Technology, 2008(4):54-57. (in Chinese)
- [3] 肖昌达. 复杂电磁环境对电子装备的影响[J]. 舰船电子对抗, 2008(6):17-20.
XIAO Chang-da. Influence of Complicated Electromagnetic Environment on Electronic Equipment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008(6):17-20. (in Chinese)
- [4] 刘丽明. 海战场复杂电磁环境构建方法[J]. 舰船电子对抗, 2010(4):15-17.
LIU Li-ming. Construction Method of Complex Electromagnetic Environment in Sea Battlefield [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010(4):15-17. (in Chinese)

作者简介:

黄 慰(1978-),男,四川资阳人,2004年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为侦察接收系统及侦收信道设计;

HUANG Wei was born in Ziyang, Sichuan Province, in 1978. He received the M.S. degree in 2004. He is now an engineer. His research direction is reconnaissance receiver system and reconnaissance channel design.

Email: huangwei7848@163.com

刘 震(1964-),男,四川成都人,研究员,主要从事侦察系统设计。

LIU Zhen was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1964. He is now a senior engineer of professor. His research direction is reconnaissance system design.