

文章编号:1001-893X(2011)06-0001-05

通信侦察系统总体设计技术*

潘宝凤

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:介绍了通信侦察系统的组成和功能,讨论了通信系统中天线、射频前端、接收机及信号处理终端等的设计方法和设计技术,分析了通信信号侦察中信号的快速搜索、截获、调制识别和高精度测向、定位等关键技术。

关键词:通信信号;侦察系统设计;调制识别;测向

中图分类号:TN971 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.06.001

Overall Design of Communication Reconnaissance System

PAN Bao-feng

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

Abstract: This paper introduces the composition and functions of communication reconnaissance system, discusses the design methods and technologies about antenna, RF front-end, receiver and signal processing terminal of communication system, and analyses relevant key technologies such as quick search and interception for communication signal, modulation recognition, high precision direction finding and localization in communication reconnaissance.

Key words: communication signals; reconnaissance system design; modulation recognition; direction finding

1 引言

通信侦察在电子信息战中起着举足轻重的作用,目前已经研制出许多小型或大型的通信侦察系统,广泛应用于陆基、舰船、飞机、无人机、卫星平台等。通信侦察的主要任务为电磁频谱监测、敌方通信信号技术参数和内涵情报的获取、对辐射源信号的测向、定位等。

随着民用和军用通信技术的高速发展,通信频段内的信号变得日益密集,民用、军用、不同功率、不同带宽、不同调制制式的通信信号交织在一起,使得电磁环境变得更加复杂。另外,跳频、扩频和跳扩结合等新体制通信信号的应用,使得信号的搜索、截获和分析处理变得更加困难。鉴于上述原因,人们对通信侦察系统的设计提出了更高的要求。本文将介绍通信侦察系统的总体设计,并对关键技术进行讨论。

2 通信侦察系统的组成及设计

2.1 通信侦察系统的组成

通信侦察系统主要由侦收天线、前置低噪声放大器、射频转接网络、调谐接收机、中频转接网络、监听接收机、信号处理终端、数据存储器等组成,其组成原理框图如图 1 所示。

通信侦察系统的主要功能为:

- (1)具有通信信号频谱的全频段或分频段显示功能,能完成对目标信号的实时监控、自动搜索;
- (2)能够依靠人工和自动的手段实现对通信信号调制体制识别,并具有对信号的调制参数(包括调制系数、信号带宽、载频、码速率等)的测量功能,建立辐射源目标特征库;
- (3)能够根据信号的识别结果,实时或离线完成

* 收稿日期:2011-05-04;修回日期:2011-06-03

信号的解调,获取情报内涵信息;

(4)能够对通信信号进行宽带或窄带测向,具有交汇定位功能和目标态势显示功能。

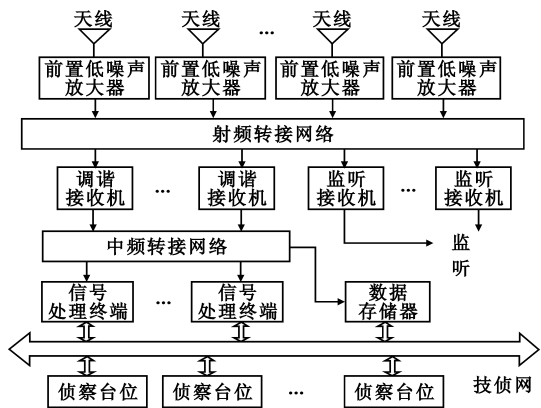


图 1 通信侦察系统组成原理框图

Fig.1 Block diagram of communication reconnaissance system

2.2 通信侦察系统设计

2.2.1 侦收天线

根据侦收信号的频段和搭载平台的不同,侦收天线的形式也各不相同,一般要求具有全方位覆盖能力,具有高的天线增益,能满足平台安装适应性要求。对于测向天线,一般还要求天线的幅相一致性较好,天线间的互耦小,安装无遮挡等。

陆基短波通信侦察系统通常采用大型的阵列天线来完成对短波通信信号的侦察和测向,船载短波通信信号的侦收天线形式主要为倒 L 天线和鞭状天线,后者较前者有更高的天线增益,但当信号电磁环境复杂、有强干扰信号时,容易造成射频前端饱和,产生虚假信号;倒 L 天线对甚长波信号的侦收效果较好,且能侦收水平极化的信号。

超短波通信信号侦察系统的天线形式较多,目前常用的有双锥天线、盘锥天线、刀形天线、有源单极子天线、对数周期天线等,前 4 种天线均为水平全向天线,可实现对信号的全方位侦收,适用于信号普查和电磁频谱监测。对数周期天线为方位天线,用于对远距离、低功率信号的高灵敏度侦收。为了确保对微弱信号的侦收效果,常常采用两副或多副天线组阵,通过波束合成方法提高天线的增益,构成高增益天线,其增益可达 10 ~ 20 dBi。另外,为了保证对信号的全方位高增益侦收,通常使用带旋转平台的方位天线,也可将多副方位天线进行布阵,使得每副天线对应不同方位,实现对信号的 360° 侦收。

对于短波、超短波信号的测向通常采用天线阵

的形式。实际工程项目中,通常采用多副天线来满足侦察系统的要求。

2.2.2 射频前端

射频前端通常包括前置低噪声放大器、射频转接网络和中频转接网络,其性能设计的好坏将影响后端信号的接收质量。

(1)前置低噪声放大器

前置低噪声放大器是整个接收通道最关键的模块,其主要功能是在引入尽量低的噪声的前提下,为后面各级提供足够的增益。前置低噪声放大器组件通常要求紧挨着天线安装,以减少信号传输带来的损耗,其指标包括抗烧毁功率、工作频率、增益、噪声系数、1 dB 压缩点等。

由于前置低噪声放大器通常为宽开的,当侦收频段内存在大功率信号时,容易引起整个接收链路的饱和,噪声基底抬高,侦收的弱信号淹没在噪声里,同时产生虚假信号。在实际使用时,通常设置一个旁路开关,当侦收电磁环境中存在大功率信号时,可将前置低噪声放大器旁路,以保证对监测频段内所有信号的正常接收。另外,需合理设计放大器的增益,尽量提高其 1 dB 压缩点;也可在保证整个系统噪声系数的前提下,采取在放大器前端加陷波器的方式,将已知大功率干扰频段的信号抑制,如移动通信频段的信号。

(2)转接网络

射频转接网络将各副天线接收下来的射频信号进行放大、功分、转接,根据侦测终端的需求,将其指定天线的信号送到后端对应的接收机单元。通过射频转接网络可实现天线资源的共享,后端侦测设备可根据需要灵活选择天线。

中频转接网络将调谐接收机输出的中频信号进行放大、功分、转接,将接收到的中频信号送到要求对其进行侦收处理的终端处理设备,可以实现接收机资源的共享和灵活分配应用。

转接网络主要由功分器、选择开关、放大器等组成。转接网络的主要技术指标包括输入/输出路数、工作频率、增益、1 dB 压缩点、开关隔离度等,设计时需重点关注隔离度指标,否则会引起不同信道间信号的串扰,影响信号的侦收质量。

(3)接收机

监听接收机通常采用窄带超外差体制,能对接收到的 AM、FM、SSB 等常规模拟通信信号进行解调,输出音频信号,进行监听。

调谐接收机将接收到的信号进行滤波、放大和变频,输出中频信号到中频转接矩阵。目前工程中常用的调谐接收机也为超外差式接收机,具有宽带和窄带接收功能。短波宽带最大侦收瞬时带宽一般设计为1 MHz或500 kHz,超短波为12 MHz、20 MHz或60 MHz。接收机带宽越宽,搜索速度越快,但邻道干扰大,信号侦收灵敏度低,且信道容易饱和,使得信号失真或发生交调现象,噪声基底抬高,产生虚假信号,接收信噪比下降。

无虚假响应动态范围是接收机的一个重要性能指标,常用双音信号来测试,称为双音动态范围。它表征了接收机在大的干扰信号存在下,对小信号的接收能力。要设计双音动态范围大的接收机,必须合理分配各级增益,链路余量适宜、各级均衡,并着重考虑末级、末前级放大器的三阶截点及增益大小^[1]。

另外,接收机设计时前端需加预选滤波器,其作用是减小射频输入带宽,尽可能地抑制不需要频谱的信号,减少组合干扰。

2.2.3 信号处理终端

信号处理终端是通信侦察系统的核心处理单元,主要对前端接收设备进行监控,完成电磁信号频谱显示及信号搜索、信号的调制分析、参数测量、信号的解调、数据采集存储、编码分析等功能。通常要求采用模块化、标准化设计,使用统一的硬件平台通过加载不同的软件实现不同的处理功能,这样可提高设备的可靠性,增加系统的可扩展性和灵活性,以满足不同任务的需求。

信号处理终端一般采用多个信号处理板加计算机的硬件结构。信号处理板主要由 FPGA、DSP、存储芯片、计算机总线接口芯片、网络通信芯片等组成。目前最常用是 CPCI 总线型计算机。随着通信侦察技术的发展和小型化、一体化设计需求的增强,人们对信号处理能力和信号的传输速度要求越来越高,CPCI 总线传输速度已经成了制约信号处理终端发展的瓶颈。近年来,许多新的高速数据总线相继推出,如 PCI Express 2.0 和 PXI - E 高速数据总线,两种数据总线应用设计技术已日趋成熟,已有一些成熟产品,相信不久的将来会在工程中得到广泛的应用^[2]。

3 通信信号侦察的关键技术

3.1 通信信号的快速搜索、截获

通信侦察作为非协同方,我们事先不是总能知

道所感兴趣信号的位置,而且也不知道这些信号何时出现,工作在哪个频点或频段,它们混杂在几十个、上百个无用信号或干扰信号中,有些还可能淹没在噪声里,因此,对信号的搜索、截获是通信侦察要解决的首要任务。

通信信号的搜索、截获处理流程如图 2 所示。

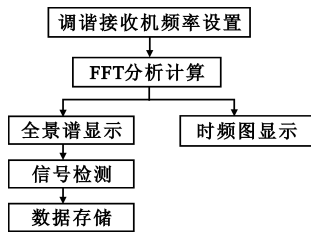


图 2 通信信号的搜索、截获处理流程
Fig.2 Flow chart for search and intercept of communication signal

理想的信号搜索需要极高的搜索速度和高的频域分辨率,搜索速度越快,就越有可能捕获到持续时间较短的信号;高的频域分辨率更能看清频谱的细节,发现信号,特别是那些在大信号位置附近或接近基底噪声的低电平信号。

影响信号搜索速度的系统因素有很多,包括天线的波束宽度、接收机的瞬时带宽和频率切换时间、频谱分析的处理时间、信号检测的准则及判决时间等。采用宽波束天线进行宽带接收、多处理器并行处理和快速、有效的信号检测算法等均可提高信号的搜索速度。实际应用中,还将多个宽开信道联合,采用频率拼接的方案来实现信号的超宽带步进搜索,进一步提高信号的搜索速度,如由 5 个12 MHz的接收信道拼接成60 MHz的瞬时扫描带宽。

影响信号频率分辨率的因素主要包括信号的持续时间、FFT的点数、采样速率。采样速率又与信号的分析带宽即接收机的瞬时带宽有关。要获取高的频率分辨率,要求低的采样速率、足够大的 FFT 点数,此时要耗费较长的信号处理时间,从而降低信号搜索速度。因此,系统设计时两者必须综合考虑。

信号检测和判决是最终发现信号,完成信号搜索、截获的必要手段。通常采用以下技术手段来实现信号的检测。

(1)固定门限检测

在全景谱上人工设置一信号幅度门限,当信号超过该门限时,即停止扫描或将该信号的频率记录在信号列表或信号数据库中,并可启动自动存储功能完成数据的存储。

(2) 进行频率规划和滤波

预先设置感兴趣的频段或组合频率点,只对上述频段或频率范围内出现的信号进行检测,剔除非感兴趣频段或频点的信号。

(3) 自适应门限检测

采用相关算法,根据噪声谱线的分布特征估计出自适应检测门限。

(4) 其它检测手段

对过门限信号的频谱进行分析,根据信号的频谱形状、带宽、峰值等来区分是否为感兴趣的信号;对特殊的信号如 Link16 信号等,必须根据信号的组合特征进行综合分析、识别,实现对信号的检测和截获。

文献[3]针对宽带数字式搜索接收机信号处理中的高分辨率谱估计和弱信号漏检问题,提出一种有效的信号检测方法。安捷伦公司近年推出的 E3238S(黑鸟)信号监测设备采用了电平判决、电磁环境背景判决、噪声自适应判决、用户定义判决 4 种能量判决方法和频谱形状相关判决、峰值判决、调制类型判决和模板判决 4 种信号判决方法,快速有效地实现了对空中瞬态信号的搜索、发现^[4],其设计技术值得借鉴和学习。

3.2 通信信号的调制识别

通信信号的调制识别是近来信号处理领域的热门课题,在这方面有大量的文献资料,提出了很多新的思路和方法。文献[5]提出了一种基于统计模式识别的通信信号识别方法;文献[6]提出了一种基于高阶累积量为特征参数,实现数字调制信号的分类识别方法;文献[7]提出了一种基于谱特征的模拟与数字调制方式自动识别算法;文献[8]针对 $\pi/4$ QPSK 和 8PSK 信号调制体制识别,提出了一种基于相位差分信号星座图的调制体制识别算法等。

目前,通信信号的调制识别技术已应用于实际工程,取得了一定的效果,但如何提高小样本、低信噪比情况下通信信号的调制识别准确率,寻找计算量更小、适应复杂电磁环境、宜于工程化实现、识别性能更好的新识别特征参数和识别方法等,仍是今后很长一段时期内努力的方向。

3.3 通信信号的高精度测向、定位

3.3.1 通信信号的测向

无线电测向是利用无线电波在均匀媒质中传播的匀速直线性,根据入射电波在接收天线中感应产生的电压幅度、相位或频率上的差别判定辐射源信

号的来波方向。测向系统的主要指标包括频率覆盖范围、测向准确度、灵敏度、抗扰度、时效性等。

实现测向的方法很多,目前工程应用较多的主要有比幅法^[9,10]、相关干涉仪测向法^[9]和时差测向法^[11]。

对于比幅测向法,影响系统测向精度的因素包括系统噪声误差、通道幅度特性的不一致、波束轴角的指向偏差、量化误差等,要提高系统的测向精度必须对系统进行精心设计,同时采取误差修正手段和采用好的测向算法,以降低各种误差因素对角度测量的影响。对于相关干涉仪测向法,由于采用相关处理技术,弱化了传统干涉仪中天线单元之间、载体与天线单元之间等的不良影响。这些影响虽然还存在,还影响着波阵面畸变和相位分布的失真,但只要这些影响是稳定的,由于这些失真已经存入样本之中,通过相关处理,就在实际效果上弱化了其对测向精度的影响。对于时差测向法,在进行测向时,精确的时间差测量是影响测向精度的关键。测向基线越短,在相同测向精度条件下,对时间差测量的精度要求越高。时间差测量的方法主要有两种^[11]:时域测量方法和频域测量方法。采用时域方法测量时差时,要获得较高的时间测量精度,一是要采用自适应门限,二是需要保证足够的系统处理带宽,另外还要有高的信噪比。采用频域方法测量时差时,信号带宽越宽,信噪比越高,时差测量的精度就越高。该方法对弱信号的检测处理能力高于时域时间差测量方法。

3.3.2 通信信号的定位

采用 3 个时间差侦测系统布站即可实现对目标的定位,即时差定位法。在平面情况下,一个 TDOA 确定一条双曲线,两个 TDOA 确定两条双曲线,这两条双曲线的交点即为辐射源的位置。由于测时精度的关系,现有的无源时差定位要达到 1% 的相对定位精度,一般都采用基线距离长达数十公里的长基线系统。近年来,人们开始关注短基线时差定位技术的研究。关于通信信号的定位,工程上还采用了交汇定位技术,通过将机动平台如船、飞机在不同位置测得的同一目标的方位或分布在不同地理位置的测向站测得的同一目标的方位值进行交汇,获取目标的位置坐标。多站交汇定位需解决的关键问题之一是辐射源信号的匹配问题,通常根据信号的截获时间、工作频率和调制方式等,对于 Link11 这种特殊的信号,可根据其 PU 码来识别匹配。为了在复杂电磁环境下更好地完成信号的匹配,需要研究新

的辐射源匹配技术,如根据信号的细微特征来完成信号的匹配。

另外,单站定位技术近年来也得到了发展和应用。

4 结束语

通信信号侦察系统的设计是一个综合性的问题,需要从系统的应用平台、应用环境、作战性能要求等诸多方面进行综合考虑。本文对通信信号侦察系统组成、设计及关键技术的论述,对通信侦察实际工程系统的设计具有一定的指导意义。另外,随着通信技术的发展,通信侦察系统还需突破和解决通信网台的分选与识别、时频混叠信号的分离、同频多信号测向和通信信号的“指纹”特征分析、辐射源目标识别等诸多关键技术。

参考文献:

- [1] 汪玉平.一种大动态范围射频接收机的设计[J].电讯技术,2010,50(7):115-118.
WANG Yu-ping. Design of a RF Receiver with Wide Dynamic Range[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7):115-118. (in Chinese)
- [2] 叶关山.PXI总线平台的比较研究科学技术与工程[J].科学技术与工程,2008,8(16):4508-4512.
YE Guan-shan. Comparative Study on PXI Platform[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(16):4508-4512. (in Chinese)
- [3] 王永明,张尔扬,程巧金.一种有效的宽带数字侦察接收机信号检测方法[J].信号处理,2010,26(2):208-212.
WANG Yong-ming, ZHANG Er-yang, CHENG Qiao-jin. An Efficient Method of Signal Detection for Wideband Digital Reconnaissance Receiver[J]. Signal Processing, 2010, 26(2): 208-212. (in Chinese)
- [4] 李明.频谱监测中的宽带瞬态信号截获技术[J].中国无线电,2009(5):40-43.
LI Ming. Wideband Instantaneous Signal Capture Technology in Spectrum Monitoring[J]. China Radio, 2009(5):40-43. (in Chinese)
- [5] 陈怀新,南建设,肖先赐.基于统计特征主分量的信号调制识别[J].电子科技大学学报(自然科学版),2004,33(3):231-238.
CHEN Huai-xin, NAN Jian-she, XIAO Xian-ci. Modulation Recognition of Signal Based on Statistical Principal Component Feature Parameters[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China(Natural Science Edition), 2004, 33(3):231-238. (in Chinese)
- [6] 包锡锐,吴瑛,周欣.基于高阶累积量的数字调制信号识别算法[J].信息工程大学学报,2007,8(4):463-467.
BAO Xi-rui, WU Ying, ZHOU Xin. Algorithm of Digital Modulation Recognition Based on Higher-Order Cumulants[J]. Journal of Information Engineering University, 2007, 8(4):463-467. (in Chinese)
- [7] 包锡锐,吴瑛.基于谱特征的模拟与数字调制方式识别方法[J].计算机工程与设计,2008,29(14):3569-3571.
BAO Xi-rui, WU Ying. Automatic classification for analogue and digital modulation based on spectrum feature[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(14):3569-3571. (in Chinese)
- [8] 徐哲,胡世安,吴钦,等.一种基于差分星座图的调制体制识别算法[J].计算机仿真,2009,26(11):182-185.
XU Zhe, HU Shi-an, WU Qin, et al. A Modulation Classification Algorithm Based on Differential Constellation Shape[J]. Computer Simulation, 2009, 26(11):182-185. (in Chinese)
- [9] 朱庆厚.无线电监测与通信侦察[M].北京:人民邮电出版社,2005.
ZHU Qing-hou. Radio Monitoring and Communication Reconnaissance[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 顾敏剑.多波束比幅测向系统精度分析[J].舰船电子对抗,2007,30(3):70-73.
GU Min-jian. Accuracy Analysis on Multi-beam Amplitude-comparison Direction Finding System[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2007, 30(3):70-73. (in Chinese)
- [11] 王俊凌,夏雄.时差测量方法对比分析[J].电子信息对抗技术,2008,23(6):24-27.
WANG Jun-ling, XIA Xiong. Contrast and Analysis of DTOA Measurement Methodology[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(6):24-27. (in Chinese)

作者简介:

潘宝凤(1966—),女,四川自贡人,高级工程师,主要从事信号处理及侦察领域系统总体工作。

PAN Bao-feng was born in Zigong, Sichuan Province, in 1966. She is now a senior engineer. Her research concerns signal processing and the system design for signal reconnaissance.

Email: pan_bao_feng@sina.com