

文章编号:1001-893X(2010)08-0097-06

通信信号分析工程应用关键技术^{*}

梁先明

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:介绍了非协同方式下工程上通信信号事后分析的总体框架及流程,重点讨论了通信信号分析中的参数测量、调制识别、细微特征分析、信道盲均衡、解码、跳频分析等关键技术以及工程应用上的实际问题和解决方法。

关键词:非协同通信;信号分析;调制识别;细微特征;跳频分选

中图分类号:TN911.6 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.020

Key Techniques of Engineering Application of Communication Signal Analysis

LIANG Xian - ming

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

Abstract: This paper discusses the overall framework design and flow of post analysis of non-cooperative communication, focuses on the parameter measurement, modulation recognition, fine feature analysis, blind channel equalization, decoding, frequency hopping analysis of communication signals, and discusses the difficulties and the solutions in engineering applications.

Key words: non-cooperative communication; signal analysis; modulation recognition; fine feature; FH signal sorting

1 引言

军事通信信号“短、跳、隐”的特点,使得信号的实时解调变得非常困难。随着软件无线电技术的发展及其广泛应用,侦察对象的不断变化要求侦察手段和处理方法要能不断更新、升级,并且应具有强大的信号分析能力来适应。同时,针对不同的侦察平台,尤其是有人机、无人机、卫星等平台,硬件实时信号分析往往不能保证分析的有效性和完整性,因此,通常需要将原始采样数据或者经下变频后的基带数据进行实时回传或者平台存储下载到地面的处理方式,进行事后信号分析。这需要功能强大的信号分析工具和手段,尽可能地通过分析这些原始素材更准确有效地得到信号的参数或者内涵,形成丰富的

素材库。由于软件事后分析具有信号不丢失、反复重放、可重采样处理、完整性分析强、可人工辅助参与等优势,其可能提供的情报效益远远大于硬件实时分析的处理方式,所以军事意义非常明显。

对于民用无线电频谱管理、监测等方面,为了更好地掌控无线电电磁环境,除了需要实时判证的分析设备,同样也需要事后对于存在的信号进行更为严格的综合分析判证、反复监听分析等,从而更好地摸清信号活动规律及内容细节。

通信信号包含多种体制,本文主要讨论的是通用的定频通信信号、跳频信号的软件事后分析处理。

2 通信信号分析总体框架

由于分析的对象往往隐藏在复杂的电磁环境

^{*} 收稿日期:2010-03-26;修回日期:2010-07-02

下,可能是短时突发信号、连续信号、跳频信号等。信号存储采用的是自动或者手动存储方式,所以一般通信信号分析时,首先利用 Cool Edit 软件对采样数据进行时域、频域、调制域等初步分析,并将感兴趣的信号进行截取存储;然后,根据不同的信号类型分别由宽带通信信号分析软件、话带通信信号分析软件、跳频通信信号分析软件进行分析处理。如果经宽带通信信号分析软件分析得到的是模拟调制方式(AM、FM、SSB 等),解调结果可由话带通信信号分析软件判断是语音信号还是话带信号,对于话带信号可以继续信号参数测量、调制方式识别、解调、解码等分析;如果经跳频通信信号分析软件对跳频信号完成识别、拼接后,可以将拼接后的数据用宽带通信信号分析解调软件进行继续分析。其工作流程图如图 1 所示。

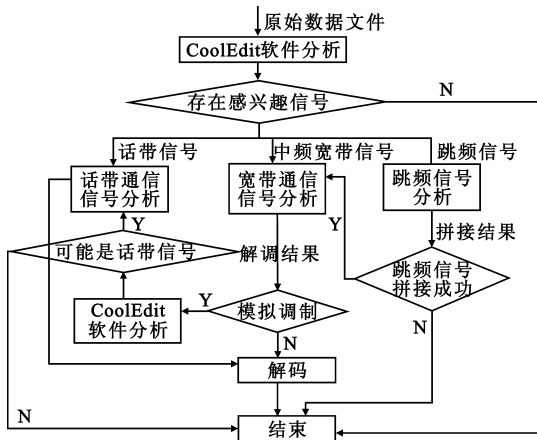


图 1 通用通信信号分析总体框架

Fig.1 Overall framework of general communication signal analysis

宽带/话带通信信号分析软件主要是完成中频/话带定频通信信号的时域、频域、调制域分析,载频、符号速率、信号功率、信噪比、信号带宽等参数测量,细微特征分析,调制识别,解调等功能。跳频通信信号分析软件主要是完成短波/超短波跳频通信信号的频率集、跳速、信号带宽及功率等参数提取,跳频信号的分选、拼接等功能。

3 信号分析的关键技术

实际信号侦收往往采用的是宽带接收机方式,因此带宽内可能存在着多个信号,通过人工选择分析信号频段进行数字下变频,然后进行信号的参数测量、调制识别、细微特征、解调、解码等分析,以下是通用通信信号事后分析涉及的关键技术。

3.1 数字下变频

数字下变频作为软件无线电的基本处理形式,将中频信号变成基带信号可以大幅提高后续处理效率。信号分析中采用的数字下变频基本类型如图 2 所示。

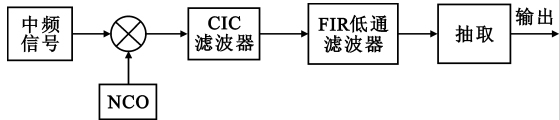


图 2 数字下变频框图
Fig.2 Block diagram of DDC

CIC 滤波器的传递函数为

$$H(z) = ((1 - z^{RM}) / (1 - z^{-1}))^N$$

式中, M 为 CIC 滤波器梳状部分的延迟数量,只能取 1 和 2,用于控制滤波器的频率响应^[1]; R 为抽取倍数; N 是级数。

CIC 滤波器的结构图如图 3 所示,每级 CIC 滤波器主瓣比旁瓣高 13.46 dB,所以通常取 5 级 CIC 就可以满足 67.3 dB 衰减的要求^[2]。软件分析选取 CIC 滤波器的主要目的是减少乘法计算,提高运算速度。

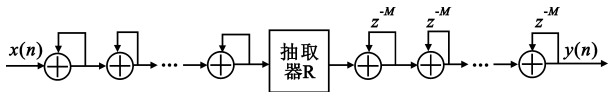


图 3 CIC 滤波器结构图
Fig.3 Structure of CIC filter

CIC 滤波器之后的“低通滤波 + 抽取”可采取多相结构以减少运算量,也可用多级半带滤波器来实现,半带滤波器可用来减少滤波的运算量。

如果需要同时处理多通道的信号,可以采用图 2 的多个并行结构方式,也可以采用多相滤波器组信道化接收机模型^[1]进行数字下变频,这种数字下变频方式主要优点是在大幅节省 FPGA 资源的前提下并行处理多个信号。对于软件处理方式,一般每次都是处理一个信号,因而一般可利用多相滤波的结构实现 FIR 低通滤波器以减小计算量。

3.2 参数测量

参数测量是信号分析最基本的一项任务,对于数字调制最基本的参数是载波频率及符号速率,对于模拟调制信号最基本的参数是载波频率和带宽。信号的信噪比、功率谱、基带赋形滤波器形式及滚降系数等也是信号分析的常用分析对象。

3.2.1 载频测量

对于单载频数字调制信号,对信号的 M 次方的

非线性处理,可再生出单频信号;然后,通过估计非线性变换生成单频信号的频率来估计信号载波的频率。如 BPSK 信号利用平方谱可以估计出载频分量,QPSK、8PSK 可以分别利用 4 次方、8 次方谱估计出载频分量;对于 MQAM 信号,其 4 次方谱也会出现谱线分量,从而可估计其载频。对于恢复出来的单载波信号,除了采用基本的 FFT 运算,还可以通过线性调频 Z 变换(即 CZT 运算)的方法来进一步提高频率分辨率,CZT 算法比较适合细化倍数高的场合,具有频率分辨率高、速度快的优点^[3]。

对于多载频数字调制信号,采用 M 次方不能得到载频分量,可采用时频变换得到信号的瞬时频率^[4],然后通过平均运算估计出信号载频。

3.2.2 符号速率测量

任意多进制基带信号序列可以看成由稳态波 $V_r(t)$ 和交变波 $U_r(t)$ 构成。基带信号 $S(t) = V_r(t) + U_r(t)$,由其功率谱密度^[5]表达式可发现,随机脉冲序列的功率谱包含有连续谱和离散谱。此外,还可发现含有频率间隔为离散谱码元速率的离散谱。而功率谱可通过计算信号自相关函数的傅里叶变换得到,这也是延迟相乘法的理论依据。

B.S.Koh 在文献^[6]中发现 MPSK、MQAM 等信号的复包络频谱中存在符号速率对应的离散谱线,从而也可以估计出信号的符号速率。对于 MFSK 类信号的符号测量一般是对信号瞬时频率做傅里叶变换得到符号速率离散谱线。

3.3 调制识别

调制识别是通信信号分析很重要的一项任务,而实际侦收信号的调制识别也是一个难点。通信信号调制识别典型的方法包括统计模式识别^[7]、周期谱相关方法^[8]、高阶累积量^[9]、星座图聚类^[10]、支持向量机识别^[11]、基于最大似然比准则识别^[12]等。其中统计模式识别主要还是根据通信信号基本特征来完成的,通信信号的几个基本特征参数是:零中心归一化瞬时幅度之谱密度的最大值 $\gamma_{\max}$ 、零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量绝对值的标准偏差 σ_{ap} 、零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量的标准偏差 σ_{dp} 、零中心非弱信号段瞬时频率绝对值的标准偏差 σ_{af} 、谱对称性 P 、归一化瞬时幅度的峭度 μ_{42}^a 、归一化瞬时频率的峭度 μ_{42}^f 、归一化载频处的幅值大小 J 等。

在实际调制识别算法中,尤其是包含了很多种

模拟、数字调制方式的情况下,通常采用判决树的模式进行。除了上述通信信号的特征参数外,同时需要综合考虑信号的频谱、 M 次方谱、符号速率谱、星座图特性、瞬时频率、瞬时幅度等多种特征参数进行判决。

由于是事后分析,在调制识别中可以采用自动识别方式和手动识别两种方式。对于手动识别,可以在识别流程关键点或者特征容易出错的流程点进行特征值或者特征图形显示,通过人工辅助向导式完成调制识别。这种识别方式对于复杂环境下的信号调制识别实用性更佳。

在实际复杂的电磁环境下,调制识别容易受到多普勒、多径、信道衰落等影响而降低识别概率,所以制定调制识别算法流程时需要充分考虑需要识别的调制种类、信号频段、信道特征、分析对象平台特征等诸多因素。

3.4 细微特征分析

细微特征是指偏离指标/参数、相对固定、可检测的偏差值^[13]。在电子战研究领域,通过对接收信号进行细微特征(“指纹”)分析,确定产生信号的辐射源个体,美军将其定义为“将辐射源唯一电磁特征与辐射源个体关联起来的能力”。通信电台的这种关联起来的能力称为电台个体识别^[14]。作为信号的细微特征要求具有独立性、稳定性、可测性几个基本特征^[15]。通信信号细微特征分析需要高稳、线性、相对非时变的高保真接收信道作为基础,尽量消除接收机信道本身、无线电磁环境等影响从而尽量恢复通信发射机的固有个体特征。细微特征的提取存在两个主要技术难点,稳定可靠的特征参数确定与高精度的特征参数获取。

通信信号的细微特征可以采用以下两种方式进行分类:

(1)根据信号固有特征表现形式分为暂态特征、稳态特征。其中暂态特征反映了系统非稳定工作状态时的非线性特性,带有强烈的个体色彩,例如通信信号电台开、关机时表现的暂态特性;稳态特征反映的是系统稳定工作状态下的特征,例如频率稳定度、调制度、相噪特征、杂散特征(包括互调、寄生调制等);

(2)根据信号特征的稳定性时间表现形式分为相对特征、绝对特征。绝对特征是在一个时间段内(例如一次开关机持续时间段等)比较稳定的特征,在实际工程中很难找到不同目标的绝对特征;而相对特征(例如一定时间段内的频率稳定度、瞬时频率

曲线、调制度等)在不同的发射台之间往往有一定的区别,这也是实际工程应用中比较关注的一类特征。除了单纯从实际信号的表现形式上分析外,同时也可以对信号进行内涵分析,通过解析协议层的内容得到不同发射台的个体标识,从而达到细微特征分析的最终目的,进行个体识别。

雷达信号的细微特征从 20 世纪 80 年代开始研究相对较多,也有一定的实际应用。雷达信号的特征包括对时域和频域上对雷达信号脉内、脉间以及脉组间的调制、编码及变换特性等进行分析,其中脉内细微特征分析作为一项研究重点,采用了时域自相关法、频域倒谱算法、调制域过零检测法、时频分析法^[16]等。通信信号细微特征近些年是在雷达信号细微特征基础上提出的,通信信号相对雷达信号带宽窄。随着软件无线电技术的不断发展,同一设备的通信体制可以软件灵活配置,且器件本振频率准确度要求更高等,造成了通信信号细微特征分析非常困难。文献^[14]介绍了采用小波变换提取通信信号瞬时特征达到个体识别,文献^[17]则介绍了采用多种方法进行辐射源载频、调制参数、杂散特征等参数提取,并利用多个特征参数矢量进行个体识别。目前通信信号细微特征的研究很少,工程上还没有形成真正有效的算法。

3.5 解调

解调是非协同信号分析的一个升华,也是作为对参数测量、调制识别分析结果的一种佐证。对于非协同的通信信号进行解调时,首先必须要通过参数测量估计出信号的载频、符号速率、带宽,然后通过调制识别分析出调制方式,最后才能进行解调。为了达到更好的解调效果,要求方便调整解调器参数(包括匹配滤波器类型、滚降系数、载波环带宽、符号同步环带宽等),并且可显示解调眼图、星座图等图形。

由于侦收信号频段可能涉及到短波、超短波、微波等频段,且不同频段的电磁环境、信道模型、信号带宽、调制样式以及侦收对象等差异很大;同时,接收的侦收信号由于多径效应、信道衰落、多普勒、信号起伏等因素使得信号分析变得更加困难,需要有相应的信道均衡技术、AFC、AGC 技术来进行适应和改善信号质量。

一个实际的基带传输系统不可能完全满足理想的波形传输无失真条件,因而串扰是不可避免的。当串扰影响严重时,必须对整个系统的传递函数进

行校正,使其接近无失真传输条件,这就是均衡。对于非协同侦收情况下没有训练序列信号,只能利用接收机接收到的信号来消除码间干扰,获得与信道匹配的参数,具有“自学”能力的均衡^[18]是盲均衡技术。图 4 是典型的盲均衡处理框图。

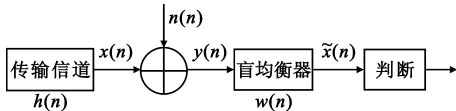


图 4 盲均衡处理框图

Fig.4 Block diagram of blind equalization processing

盲均衡算法也是多种多样,例如:恒模算法(CMA)^[19]、多模算法(MMA)^[20]、简化星座算法(RCA)、判决反馈最小均方算法(DD-LMS)^[21]等。通常,在实际信号分析中需要多种算法进行综合处理以达到更好的效果,文献^[21]介绍了综合修正模算法与 DD-LMS 算法解决存在严重码间干扰的方案。

3.6 解码

解调得到的基带码流如果需要恢复信息序列则需要进一步进行编码分析完成解码。编码通常有信道编码、信源编码。信道编码通常包括分组码、CRC 校验编码、奇偶校验、自同步加扰、HDLC 规程编码等,信源编码通常包括字符编码、传真编码、语音编码、图像编码等。对于非协同事后解码分析而言,往往面对的是非常杂乱的二进制码流,因此事先需要进行数位预处理功能,包括数位分选、提取、AND/OR/XOR/NOT 逻辑操作、位提取、移位、位插入、HDLC、镜像、截取、反差分以及强大的统计能力,包括特征码概率统计、重码统计等,从而便于找出需要重点关心的码流字段;预处理后再进行信道编码分析、信源编码分析,对于已知规格的信号可以恢复出原始信息。编码分析要求对于编码分析理论、形式比较熟悉,同时对于信号链路层也有一定要求,在信号分析中属于专业性很强的一个关键专题,也是恢复原始信息的最重要部分。

3.7 跳频信号分析

跳频信号是一种抗干扰、低截获率信号,它在每个频率上驻留的时间很短,并且出现的时间随机不定,如果单从频谱上来看,无法区分被观察信号是跳频信号还是彼此互不相关的常规通信信号,而利用调制域分析可以更好地发现和识别跳频信号。对于跳频信号的识别分选,最常用的方法是最大相关处

理法和时间相关统计法^[22],文献[23,24]介绍了采用多跳自相关及其改进算法进行跳频信号的参数估计。笔者认为上述方法针对实际复杂的电磁环境下进行跳频信号的检测及分选容易受到偶然突发信号或者其它强干扰信号的影响,可采用综合多种方法形成的相似判决法来完成。

相似判决法的步骤:选择某一跳作为判决依据,提取该跳频台的跳速、占空比、幅度、信号带宽等参数,然后在接收机带宽范围内频率从低到高依次搜索该时间段,对每个频点计算该时间段内过判决门限的时间长度、过门限信号幅度及方差、信号带宽,通过多方面的参数比较,寻找与第 1 跳最相似的频点作为后续的跳频点。在进行跳频信号分选的同时,根据参数测量的结果完成跳频信号的拼接,从而可以变频到某一固定的频率上进行信号的分析及解调。

除了上述单天线接收方式下的跳频信号检测、分析方式外,随着阵列信号处理技术的不断发展,当前基于阵列天线的跳频信号检测、分选的研究也在不断进步。采用天线阵处理跳频信号的一个基本原理是:通过互相关减少噪声的影响^[25]。基于天线阵处理可以进行信号 DOA 估计及波束合成,从而可以更好地进行跳频信号的检测、分离、分选及参数测量等。

4 结束语

通信信号侦察面临着电磁环境复杂、信号样式体制多变、截获概率低等问题,软件分析可方便地进行升级以适应侦察对象的发展,从而保证整个侦察设备始终保持着战斗力。本文所讨论的通信信号分析方法已在工程上得以实现并通过了部分实际信号的验证,取得了一些实际成果。

参考文献:

- [1] 杨小牛,楼才义,徐建良.软件无线电原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2005:45-46.
YANG Xiao-niu, LOU Cai-yi, XU Jian-liang. Application and Principle of Software Radio [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:45-46. (in Chinese)
- [2] 黄联芬,程恩.软件无线电中 CIC 滤波器的性能改进[J].厦门大学学报(自然科学版),2004,43(5):640-642.
HUANG Lian-fen, CHEN En. Improved Performance of CIC Filter in Software Define Radio[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2004, 43(5):640-642. (in Chinese)
- [3] 谷云高,石彦君,王文谦.一种基于 ChirpZ 变换的频谱细化实现方案与仿真[J].电讯技术,2009,49(5):93-95.
GU Yun-gao, SHI Yan-jun, WANG Wen-qian. A Spectrum Zooming Scheme Based on Chirp Z Transform (CZT) and its Simulation [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5):93-95. (in Chinese)
- [4] Tran T D, Mathews V J, Rushforth C K. A New Carrier Frequency Estimator For Modem Signals [C]//Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-88). New York, NY: IEEE, 1988:1886-1889.
- [5] 宋成森.数字通信调制方式识别与参数估计[D].杭州:浙江大学,2006.
SONG Cheng-sen. Modulation Classification and Parameter Estimation for Digital Communication Signals [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [6] Koh B S, Lee H S. Detection of Symbol rate of Unknown Digital Communication Signals [J]. Electronic Letter, 1993, 29(3):278-279.
- [7] 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,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, 2004, 33(3):231-238. (in Chinese)
- [8] 何楚斌,许林,傅汝霖.信号调制方式自动识别的谱相关方法[J].物探化探计算技术,2005,27(1):70-74.
HE Chu-bin, XU Lin, FU Ru-lin. Spectral Currelation Method for Signal Modulation Automatic Recognition [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 27(1):70-74. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 王建新,宋辉.基于星座图的数字调制方式识别[J].通信学报,2004,25(6):166-173.
WANG Jian-xin, SONG Hui. Digital modulation recognition based on constellation diagram [J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(6):166-173. (in Chinese)
- [11] Cheol-Sun Park, Won Jang, Sun-Phil Nah, et al. Automatic Modulation Recognition using Support Vector Machine in Software Radio Applications [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Communication Technology. Gangwon-Do: IEEE, 2007:9-12.
- [12] 赵知劲,郎涛.基于最大似然比准则的 MPSK 信号分

- 类方法[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(2): 54 – 57.
- ZHAO Zhi-jin, LANG Tao. A classification method for MPSK signals based on the maximum likelihood criterion[J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(2): 54 – 57. (in Chinese)
- [13] 南建设. 信号细微特征分析技术研究[J]. 电讯技术, 2007, 47(2): 68 – 71.
- NAN Jian-she. On Fine Signature Analysis Technique[J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(2): 68 – 71. (in Chinese)
- [14] 陆满君, 詹毅, 司锡才, 等. 通信辐射源瞬态特征提取和个体识别方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(4): 736 – 740.
- LU Man-jun, ZHAN Yi, SI Xi-cai, et al. Extraction of the transient characteristics of the communication radiating source and individual identification[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(4): 736 – 740. (in Chinese)
- [15] 许丹, 柳征, 姜文利, 等. 窄带信号中的放大器“指纹”特征提取: 原理分析及 FM 广播实测实验[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 927 – 932.
- XU Dan, LIU Zheng, JIANG Wen-li, et al. Extraction of Amplifier Fingerprints from Narrow Band Signal: Principle Analyzing and FM Broadcast Experiment[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5): 927 – 932. (in Chinese)
- [16] 邹顺. 雷达信号分选与细微特征分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- ZOU Shun. Deinterleaving of Radar Signals and Analyzing Fine Features of Intra-pulse Signals[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [17] 黄玉春. 基于极致学习机的通信信号辐射源个体识别技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- HUANG Yu-chun. Study on Extreme Learning Machine Based Communication Signal Transmitter Recognition Technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [18] 张思玉. 自适应均衡算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- ZHANG Si-yu. Study on Adaptive Equalization Algorithms[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. (in Chinese)
- [19] Cheded L, Naveed R B. An improved CMA-based hybrid algorithm for blind channel equalization[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing (ICSP 2008). Beijing: IEEE, 2008: 1726 – 1730.
- [20] 刘洋, 王斌, 张刚. 一种改进的多模高性能盲均衡算法[J]. 信息工程大学学报, 2008, 9(2): 172 – 175.
- LIU Yang, WANG Bin, ZHANG Gang. Modified Multi-Mode High Capacity Blind Equalization Algorithm[J]. Journal of Information Engineering University, 2008, 9(2): 172 – 175. (in Chinese)
- [21] 朱行涛, 赵翔, 刘郁林. 基于 DD-LMS 和 MCMA 的盲判决反馈均衡算法研究[J]. 微波学报, 2007, 23(2): 67 – 70.
- ZHU Xing-tao, ZHAO Xiang, LIU Yu-lin. Study On Blind Decision Feedback Equalization Algorithm Based on DD-LMS and MCMA[J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(2): 67 – 70. (in Chinese)
- [22] 徐启华. 信号侦察中的跳频信号识别方法[J]. 电子技术, 2005, 45(4): 2 – 5.
- XU Qi-hua. Recognition Method for Frequency Hopping in Signal Reconnaissance[J]. Electronic Technology, 2005, 45(4): 2 – 5. (in Chinese)
- [23] Char-Dir Chung, Andreas Polydoros. Parameter estimation of random FH signals using autocorrelation techniques[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2-4): 1097 – 1106.
- [24] Janani M, Vakili V T, Jamali H. The modified autocorrelation technique for parameter estimation of random FH signals [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Signal Processing (ICSP'98). Beijing: IEEE, 1998: 188 – 190.
- [25] 朱文贵. 基于阵列信号处理的短波跳频信号盲检测和参数盲估计[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007.
- ZHU Wen-gui. Blind Detection and Blind Parameter Estimation of High Frequency FH Signals Based on Array Signal Processing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)

作者简介:

梁先明(1976-), 男, 湖南永顺人, 工程师, 主要研究方向为通信侦察领域信号处理及信号分析等。

LIANG Xian-ming was born in Yongshun, Hunan Province, in 1976. He is now an engineer. His research concerns signal processing and signal analysis for communication reconnaissance, etc.

Email: liangxm@21cn.com