

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.009

引用格式:龙慧敏. 基于时域调制域特征的 IFF 模式 5 信号识别[J]. 电讯技术,2014,54(7):910-914. [LONG Hui-min. Identification of IFF Mode 5 Signals Based on Time&Modulation Domain Characteristics[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(7):910-914.]

基于时域调制域特征的 IFF 模式 5 信号识别*

龙慧敏**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对 Mark XIIA 系统模式 5 信号处理的需求,对模式 5 信号的格式和基本特征进行了分析,提出了一种基于模式 5 信号时域和调制域特征的识别方法。该方法通过提取模式 5 信号脉冲时域参数和对脉冲进行 MSK 解调,获取模式 5 前导脉冲时域参数脉宽和前导脉冲固有的 16 位 MSK 解调结果 0111100010001001 来完成模式 5 信号前导脉冲识别,并根据前导脉冲偏移值特点优化了模式 5 信号框架匹配算法流程,实现了模式 5 信号的识别处理。Matlab 仿真和硬件实现验证了方法的有效性,当满足一定信噪比条件时,识别正确率可达 100%。

关键词:敌我识别系统;模式 5;信号识别;时域调制域特征

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0910-05

Identification of IFF Mode 5 Signals Based on Time&Modulation Domain Characteristics

LONG Hui-min

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

Abstract: According to the new Mark XIIA Identification Friend or Foe (IFF) System Mode 5 signal processing requirement, the format and features of Mode 5 are analyzed and a new IFF Mode 5 identification method is proposed based on time and modulation domain characteristics of Mode 5. Through Mode 5 pulse width (PW) parameter extraction and MSK demodulation, this method combines with the PW parameter and inherent 16 bit MSK code 0111100010001001 of Mode 5 preamble pulse to complete the preamble pulse recognition. Furthermore, according to the stagger of preamble pluses, an optimized algorithm is used to realize pulses frame matching. Both the simulation and experimental results verify the correctness and validity of the method, and the correct identification rate is up to 100% under a given signal-to-noise ratio (SNR) condition.

Key words: IFF system; Mode 5; signal identification; time&modulation domain characteristics

1 引言

针对 Mark X 或 Mark XII 敌我识别系统信号形式简单、调制方式单一、抗干扰能力弱等缺陷,北约在其基础上增加模式 5 信号,扩展为 Mark XIIA 系统,以提高系统的抗干扰性、安全性和保密性模式^[1]。模式 5 信号频率仍是询问 1 030 MHz,应答 1 090 MHz,单调制方式为 MSK 调制,码速率 16 MHz,具有较高抗干扰性、安全性和保密性,用作北约“地对空”、“海对空”、“空对海”、“海对海”、“空对空”的骨干战斗识别系统。通过对模式 5 信号的侦察识别可实现对目标的侦察监视,得到目标的多种重要参数,实现目标的属性识别。

* 收稿日期:2014-06-05;修回日期:2014-07-16 Received date:2014-06-05;Revised date:2014-07-16

** 通讯作者:huanxue06@163.com Corresponding author:huanxue06@163.com

文献[2]对模式 1、2、3/A、4、C 和模式 S 的信号格式进行了详细分析,文献[3-4]对模式 5 信号格式进行了详细描述。文献[4]中采取了脉冲框架匹配的方法实现模式 5 信号的识别,但实际侦收环境中敌我识别信号尤其是应答信号数量巨大,各种脉冲混叠情况层出不穷,因此仅仅采取脉冲框架匹配办法识别模式 5 信号会造成一定程度的虚警。文献[5]中则采用同步脉冲相关的方法实现模式 5 信号的识别,快速有效,适用于低信噪比环境,但该方法仅适用模式 5 信号,不能同时适用于 Mark XIIA 系统其他模式信号的侦收识别。

本文根据模式 5 信号的时域调制域特征,提出了一种模式 5 信号识别方法,完成了模式 5 信号的检测、分选和模式识别,通过 Matlab 仿真验证了方法的有效性,并通过硬件完成了模式 5 信号的实时检测、解调和信号识别,具有较好的工程使用价值。

2 基于时域调制域的模式 5 识别方法

模式5询问信号由4个前导脉冲、2个旁瓣抑制脉冲和11个数据脉冲组成,脉冲宽度 $1.0625 \sim 1.375 \mu\text{s}$ 。

模式5一级应答信号由2个前导脉冲和1个数据长脉冲组成,前导脉冲宽度 $1.062\ 5 \sim 1.375\ \mu\text{s}$,数据长脉冲宽度 $9.062\ 5 \sim 9.375\ \mu\text{s}$ 。

模式5 二级应答信号由4个前导脉冲和1个数据长脉冲组成,前导脉冲宽度 $1.062\ 5 \sim 1.375\ \mu\text{s}$,数据长脉冲宽度 $33.062\ 5 \sim 33.375\ \mu\text{s}$ 。

模式 5 信号不仅具有与其他敌我识别信号不同的脉冲时域特征,且调制方式为 MSK 调制,前导脉冲具有固定的宽度和固定的码字,因此本文提出一种脉冲参数与 MSK 解调结果结合的模式 5 信号实时识别方法,通过对相应脉宽的脉冲进行 MSK 解调,解调结果为 0111100010001001,可初步判断脉冲为模式 5 信号的前导脉冲,再结合脉冲框架搜索共同实现对模式 5 信号的识别,详细方案如图 1 所示。

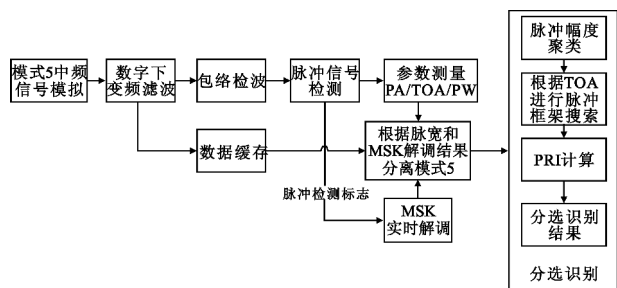


图 1 模式 5 信号识别框图

Fig. 1 The block diagram of Mode 5 identification

下面以模式 5 询问信号为例对识别流程进行详细描述,应答信号可参照询问信号识别流程。

2.1 脉冲检测和参数测量

敌我识别中频信号进行数字下变频变换到基带,进行包络检波形成视频脉冲信号,采用过门限检测方法检测出信号中存在的脉冲。检测到脉冲后,提取脉冲宽度(PW)、脉冲幅度(PA)、脉冲到达时间(TOA)和脉冲间隔等时域参数。

通过脉冲宽度首先将可能为模式 5 信号的脉冲与其他模式的敌我识别信号脉冲分离开。考虑到敌我识别系统实际工作环境,在根据脉冲时域参数对信号进行初步判断时,应考虑一定的容限。结合模式 5 信号资料,模式 5 信号脉宽容限可定为 $0.1 \mu\text{s}$,脉冲间隔容限可定为 $0.125 \mu\text{s}$ 。

将脉冲宽度符合 1、2、3/A、4、C 和模式 S 的脉冲参数形成 PDW 进行存储, 初步判断脉宽在 $0.9675 \sim 1.475 \mu\text{s}$ 范围内的脉冲可能为模式 5 信号前导脉冲。但此时在疑似模式 5 的脉冲中还混杂着大量的应答 S 模式脉冲和其他脉冲, 如何将分离真正的模式 5 信号前导脉冲, 则取决于 MSK 解调结果。

2.2 高速实时短时 MSK 解调

模式 5 信号脉冲持续时间短,要实现短时高码速率的 MSK 信号实时解调首先要能准确检测模式 5 信号的脉冲前沿,保证在脉冲到来时及时启动 MSK 解调,尽快实现码元同步。如果脉冲前沿检测出现偏差,则容易导致解调结果出现码元移位的现象。

模式 5 信号前导脉冲内固定的 16 位二进制序列 0111100010001001, 考虑基准码片 0、2 个导入码片和 3 个导出码片, 完整模式 5 前导脉冲二进制序列应为 0000111100010001001010, 考虑到传输中的影响和解调同步问题, 在用二进制序列判断前导脉冲时, 应考虑一定的解调偏差。若脉冲解调结果二进制序列码元个数小于等于 22, 且内含有 0111100010001001 (可允许 1 个码元错误), 并满足导入导出码片规则, 则可判断为模式 5 前导脉冲。

2.3 前导脉冲特征分析

模式 5 询问信号前导脉冲(P1、P2、P3 和 P4)脉冲间隔以 P4 的下降沿位置为基准,由固定值(P1 ~ P4 为40.375 μ s,P2 ~ P4 为23 μ s,P3 ~ P4 为13 μ s)加上与模式 5 信号 TRANSEC 相关的偏移值(S1, S2, S3),偏移值与时间相关。数据脉冲与 P4 的脉

冲间隔固定。偏移值对模式 5 信号的框架识别具有较大影响,本文对偏移值进行了深入分析,其计算式如表 1 所示。

表 1 前导偏移值 (S1,S2,S3) 计算

Table 1 Stagger computation (S1,S2,S3 in chips)

CVI Mod 3	S1	S2	S3
0	$2\times((\text{int}(x/16))\text{mod } 8)$	$2\times((\text{int}(x/4))\text{mod } 4+16)$	$2\times(x\text{ mod } 4+8)$
1	$2\times((\text{int}(x/16))\text{mod } 8+8)$	$2\times((\text{int}(x/4))\text{mod } 4)$	$2\times(x\text{ mod } 4+4)$
2	$2\times((\text{int}(x/16))\text{mod } 8+16)$	$2\times((\text{int}(x/4))\text{mod } 4+20)$	$2\times(x\text{ mod } 4)$

表 1 中 CVI 即通信安全有效性间隔, x 为 8 b 偏移值索引(范围 0 ~ 255), 时间增量为码元宽度, 则 S1 和 S2 范围为 0 ~ 2.875 μs , S3 范围为 0 ~ 1.375 μs 。在不同 CVI 条件下 S1、S2、S3 随 x 变化, 变化范围如表 2 所示。

表 2 S1、S2、S3 数值范围

Table 2 The range of S1,S2,S3

CVI Mod 3	S1	S2	S3
0	0.000 0 ~ 0.875 0	2.000 0 ~ 2.375 0	1.000 0 ~ 1.375 0
1	1.000 0 ~ 1.875 0	0.000 0 ~ 0.375 0	0.500 0 ~ 0.875 0
2	2.000 0 ~ 2.875 0	2.500 0 ~ 2.875 0	0.000 0 ~ 0.375 0

可以看出,在同一 CVI 条件下,S3 变化范围最小但变化最频繁,S1 变化范围最大但变化最缓慢。

2.4 脉冲框架匹配优化算法

通过脉冲检测、脉宽判断和 MSK 解调过程,形成批量模式 5 信号脉冲描述字,通过脉冲框架匹配完成模式 5 信号的识别。

通常脉冲框架匹配采用后向搜索法,即找到一个符合条件的脉冲后,向后顺序搜索符合框架条件的其他脉冲。但模式 5 信号以 P4 为基准,P1、P2、P3 的脉冲间隔由于偏移量的存在而并不固定,因此采用单纯的后向搜索会增加搜索难度。

本文根据模式 5 信号的时域特点,采用先确认前导脉冲 P4,以 P4 为基准前向搜索 P1、P2、P3,以 P4 为基准后向搜索数据脉冲的方法。以此方法搜索,可充分利用 S1、S2、S3 三者的数量关系,缩小搜索范围,匹配算法流程如图 2 所示。

脉冲输入时,首先根据脉宽和 MSK 结果判断是否是前导脉冲,若是则记录 TOA 值 T_1 ,向后在 $(T_1+22.812\ 5)\ \mu\text{s}$ 范围搜索第一个数据脉冲,如果有数

据脉冲,则认为 T_1 对应的脉冲即为前导脉冲 P4;以 T_1 为基准时间,向前 $(40.375+S_1)\ \mu\text{s}$ 寻找前导脉冲 P1,找到 P1 后计算 S1,根据 S1 值结合 S1、S2、S3 的变化范围关系,推算出 S2 和 S3 的范围,再根据推算出的结果前向搜索 P2 和 P3。完成 4 个前导脉冲的搜索后,则以 P4 为基准后向搜索旁瓣抑制脉冲 I1、I2 (不一定存在)和数据脉冲,最终识别出一个完整的模式 5 询问信号。通常在实际侦收环境下,不一定能得到完整的 4 个前导,那么在搜索到 3 个完全满足框架条件的前导脉冲时,仍应判断为模式 5 信号。

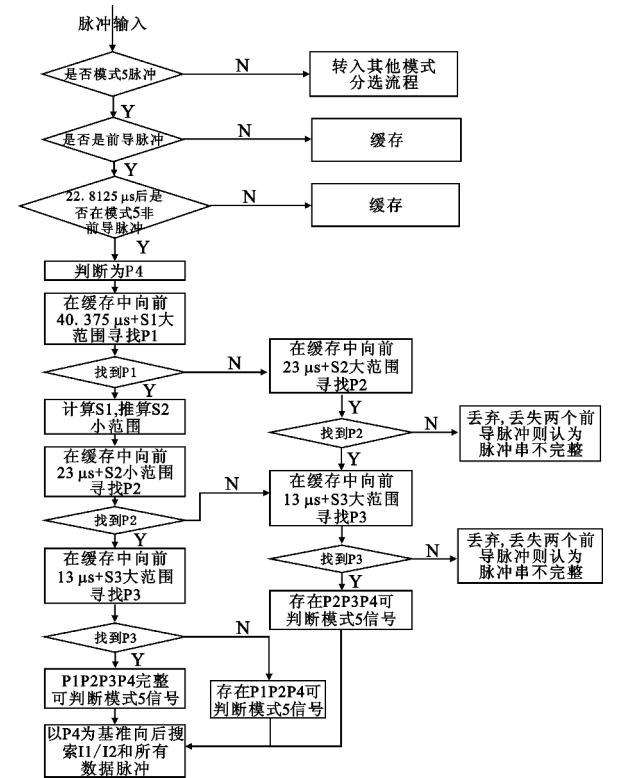


图 2 脉冲框架匹配优化算法
Fig. 2 The optimized methods of frame searching

上述搜索方法充分利用了模式 5 信号前导脉冲偏移值特点,可在一定程度上缩小搜索范围;在复杂信号环境下,可能会存在多组模式 5 信号交叉或混叠的情况,搜索范围越大越容易造成误判,因此缩小搜索范围可减小误判的概率,提高信号识别准确率,降低虚警。

2.5 优势对比

本文设计的识别方法可对模式 5 信号脉冲进行实时识别。与文献[4]相比,在识别时间上,本文对脉冲进行 MSK 实时解调,在脉冲结束后一个码元宽度即可完成解调,并输出解调结果。结合脉冲参数和 MSK 解调结果,在采样率 200 MHz 情况下,可在

100 ns内完成模式 5 前导脉冲和数据脉冲识别,缩短识别时间;在识别准确率上,不仅采用信号时域特征,还结合信号调制域特征,并通过前导脉冲偏移值 S_1 、 S_2 、 S_3 变化范围缩小脉冲框架匹配时的搜索范围,可降低游离脉冲和其他信号脉冲对脉冲框架匹配的影响,提高识别准确率,降低虚警概率。

与文献[5]相比,本文的识别流程不仅可用于模式 5 信号识别,同时适用于 Mark XIIA 其他所有模式的侦收识别,适用范围广,实用性强,可对 Mark XIIA 敌我识别信号进行一体化处理。

3 试验情况

在信噪比15 dB、采样率160 MHz条件下,通过 Matlab 仿真产生了模式 5 信号,并完成了模式 5 信号的识别仿真。图 3 为模式 5 询问信号、应答 level1 信号和应答 level2 信号的时域图、频域图以及包络图。

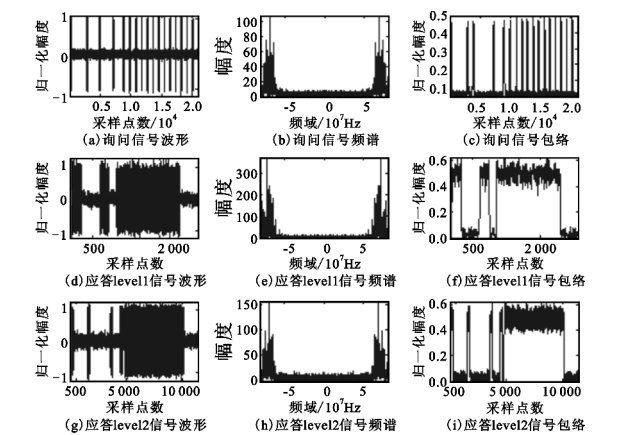


图 3 模式 5 信号
Fig.3 Mode 5 signal

图 4 显示了在不同 CVI 条件下, S_1 、 S_2 、 S_3 随 x 变化的数值范围,可看出不同 CVI 条件下, S_1 、 S_2 、 S_3 具有不同的数值范围。

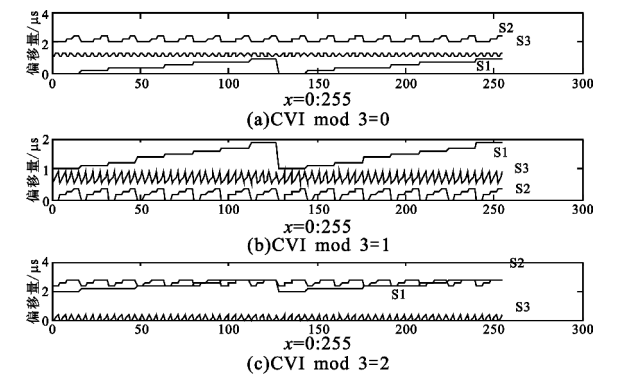


图 4 S_1 、 S_2 、 S_3 变化范围
Fig.4 The range of S_1 , S_2 , S_3

本文以模式 5 询问信号为例分别对信号幅度相同和强弱信号共存的情况进行了 Matlab 仿真, SNR 为 15 dB, 采样率160 MHz, 相同幅度模式 5 信号 7 组;不同幅度信号组含强信号 4 组,弱信号 3 组,强信号大于弱信号2 dB。仿真结果表明,在信号幅度相同和强弱信号共存的情况下,本文的模式 5 识别方法可对信号进行准确的识别和分选。

图 5 为分选识别结果,可看出共识别出 7 组信号,并测量出了每组信号前导脉冲的 TOA(前 4 列,单位 μs)和归一化脉冲幅度(后 4 列),信号幅度相同。

xw_out <7x23 double>								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.1688	16.9250	29.2938	42.1750	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638
2	134.2875	151.0500	163.4188	176.3000	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638
3	268.4125	285.1750	297.5438	310.4250	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638
4	402.5375	419.3000	431.6688	444.5500	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638
5	536.6625	553.4250	565.7938	578.6750	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638
6	670.7875	687.5500	699.9188	712.8000	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638
7	804.9125	821.6750	834.0438	846.9250	0.6371	0.6450	0.6329	0.6638

图 5 模式 5 询问信号识别结果(同幅度)
Fig.5 Identification result of Mode 5 interrogations signals
(same amplitude)

图 6 为分选识别结果,可看出共识别出 7 组信号,并测量出了每组信号前导脉冲的 TOA(前 4 列,单位 μs)和归一化脉冲幅度(后 4 列),其中 4 组信号幅度较大,3 组信号幅度较小,根据脉冲幅度的明显差异可分离出强弱信号。

xw_out <7x23 double>								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.1688	16.9188	29.3000	42.1688	0.7367	0.6237	0.5884	0.6083
2	134.3000	151.5375	156.4250	177.1688	0.4978	0.4974	0.5411	0.4924
3	269.2938	296.0438	298.4250	311.2938	0.7367	0.6237	0.5884	0.6083
4	403.4250	420.6625	425.5500	446.2938	0.4978	0.4974	0.5411	0.4924
5	538.4188	555.1688	567.5500	580.4188	0.7367	0.6237	0.5884	0.6083
6	672.5500	689.7875	694.6750	715.4188	0.4978	0.4974	0.5411	0.4924
7	807.5438	824.2938	836.6750	849.5438	0.7367	0.6237	0.5884	0.6083

图 6 模式 5 询问信号识别结果(不同幅度)
Fig.6 Identification results of Mode 5 interrogations signals
(different amplitude)

通过 Matlab 分析了在不同信噪比条件下的模式识别正确率,MSK 解调仅有 1 个码元误码视为正确。图 7 为不同信噪比下模式 5 信号识别正确率,可看出当信噪比满足一定条件时,识别正确率为 100%。

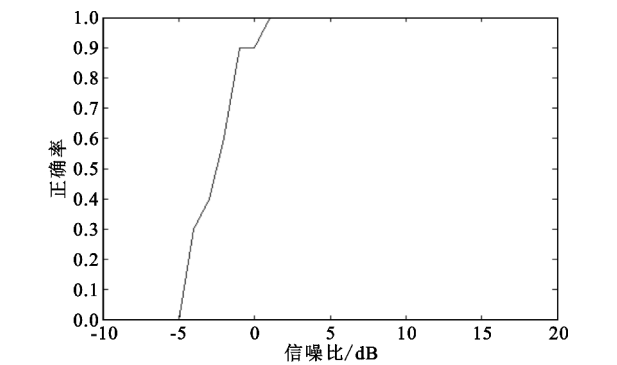


图 7 模式识别正确率
Fig.7 Correct identification rate of Mode 5

在实验室通过信号源模拟产生模式 5 询问信号,通过 VHDL 语言实现模式 5 信号检测和解调。FPGA 芯片为 Xilinx xc5vsx95t,采样率 200 MHz,采样深度 12 b,通过 Chipscope 显示 FPGA 内部模式 5 信号检测和解调结果。图 8 展示了在 FPGA 内对模式 5 询问信号 P1 和 P2 前导脉冲的检测和解调。图中第一个信号为脉冲检测标志,第二个信号为解调完成标志,第四个则为解调结果数据,可看出在脉冲结束后 80 ns 内完成解调,解调结果为 0000111100010001001010,完全符合模式 5 信号前导脉冲的二进制序列格式。

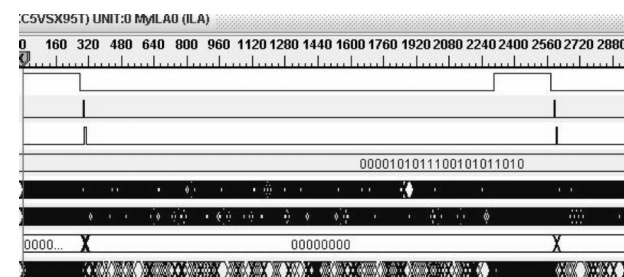


图 8 模式 5 信号检测和解调

Fig. 8 Detection and decoding of Mode 5 signals in FPGA

4 结 论

本文对新型敌我识别信号模式 5 进行了研究分析,根据信号特征,提出了一种脉冲时域特征和 MSK 实时解调相结合的模式 5 信号快速识别方法;利用前导脉冲位置偏移值的特征设计了适合于模式 5 的框架匹配算法。Matlab 仿真和硬件平台验证均表明,该方法能实现对模式 5 信号的准确识别,实时性高,适应性较强,具有较好的工程应用价值,目前已得到实际应用。

下一步工作是继续对模式 5 信号协议进行研究,以从模式 5 信号内部挖掘更多有用信息;同时继续加强对复杂环境下的模式 5 信号处理方法研究,以适应真实的复杂电磁环境。

参考文献:

- [1] 黄成芳,何利民. 敌我识别 Mark XIA 浅析 [J]. 电讯技术,2007,47(4): 66-71.
HUANG Cheng-fang, HE Li-min. Discussion on IFF MK XIA Mode 5 [J]. Telecommunication Engineering, 2007,47(4): 66-71. (in Chinese)
- [2] 钱眺,茅玉龙,查荣. IFF 信号的分析与识别研究 [J]. 雷达与对抗,2008(3):45-48.
QIAN Tiao, MAO Yu-long, ZHA Rong. A study on the analysis and identification of IFF signals [J]. Radar & ECM, 2008(3):45-48. (in Chinese)
- [3] 邱红坤,杨建波,毛虎. Mark XIA IFF 系统及其信号消息格式 [J]. 电讯技术,2010,50(6):16-20.
QIU Hong-kun, YANG Jian-bo, MAO Hu. Mark XIA IFF System and its Signal Message formats [J]. Telecommunication Engineering, 2010,50(6):16-20. (in Chinese)
- [4] 丁浩. 复杂环境下 MARK XIA IFF 信号识别方法 [J]. 火控雷达技术,2012,41(1):43-46.
DING Hao. Identification Method of Mark XIA IFF Signal in Complex Environment [J]. Fire Control Radar Technology, 2012,41(1):43-46. (in Chinese)
- [5] 邱红坤,杨建波,刘鹏. 新的 IFF 系统及其信号检测方法 [J]. 火力与指挥控制,2012,37(2):147-150.
QIU Hong-kun, YANG Jian-bo, LIU Peng. Research on a New IFF System and Signal Detection Method [J]. Fire Control & Command Control, 2012,37(2):147-150. (in Chinese)

作者简介:



龙慧敏(1980—),女,四川乐至人,2006 年于电子科技大学获工学硕士学位,现为工程师,主要从事非通信号处理算法研究和实现等工作。

LONG Hui-min was born in Lezhi, Sichuan Province, in 1980. She received the M. S. degree from University of Science Electronic and Technology of China in 2006. She is now an engineer. Her research concerns non-communication signal processing, etc.

Email: huanxue06@163.com