2013年12月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

## 文章编号: 2095-4980(2013)06-0964-06

# 卫星常用调相信号自动调制识别算法

# 裴立业,江 桦

(信息工程大学 信息系统工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对高阶幅度相移键控(APSK)信号在卫星通信中的应用,提出了一种识别数字调相信号的新方法。在信噪比估计的基础上,利用信号包络的统计特征对 MPSK,MQAM,16APSK 和 32APSK 信号进行区分。理论推导和实验仿真验证了该统计特征具有对加性高斯白噪声和滚降系数 不敏感的特性。根据鲁棒性较好的四阶循环累积量提出一种新的特征参数 Q以实现 MPSK 和 MQAM 信号的类内识别。仿真表明,当信噪比达到 5 dB 时,该方法拥有较好的识别率(>95%)。

关键词:调制识别; APSK 信号; 信噪比估计; 循环累积量
 中图分类号: TN911
 文献标识码: A
 doi: 10.11805/TKYDA201306.0964

# Automatic recognition for the satellite phase modulated signals

PEI Li-ye, JIANG Hua

(Department of Information Systems Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: A new algorithm for automatic classification of digital phase modulated signals is proposed aiming for the application of high-order Amplitude Phase Shift Keying(APSK) signals in satellite communication. The algorithm utilizes signal envelope statistical feature to distinguish MPSK, MQAM, 16APSK and 32APSK based on the SNR estimation. Nevertheless, it is proved that this statistical feature parameter is insensitive to additive Gaussian noise and the roll-off factor of the pulse shaping filter by theoretical deduction and simulation experiments. Therefore a new statistical parameter Q is proposed according to four-order cyclic cumulant which is robust to the presence of carrier frequency offsets, time delay and phase offsets. {QPSK 8PSK} and {16QAM 32QAM} can be classified based on the parameter Q. Simulation results show that the proposed recognition algorithm can obtain high probability of correct identification(>95%) when the SNR is above 5 dB.

Key words: modulation recognition; APSK; signal to noise ratio estimation; cyclic cumulant

信号调制类型识别就是通过对信号特征参数的估计、测量和分析来判断信号的调制类型。作为软件无线电、 自适应调制、认知无线电的关键技术之一,它已被广泛应用于信号的确认、干扰辨识、无线电侦听、电子对抗、 信号监测、频谱管理和威胁分析等领域<sup>[1]</sup>。卫星通信中常用的数字调相信号有 QPSK,8PSK,16QAM,32QAM, 16APSK 和 32APSK 等。其中包络恒定的 PSK 调制方式频谱效率不高,QAM 调制方式由于存在较多的幅度,通 过转发器时非线性失真严重。在 DVB-S2(新一代数字卫星广播)标准中采用了 16APSK 和 32APSK 调制方式,其 拥有比 PSK 高的频谱利用率和功率利用率,又拥有比 QAM 少的调制幅度。因此 APSK 成为一种极具潜力的调 制方式,针对其进行调制识别的研究在通信侦察和对抗中具有十分重要的意义<sup>[2-3]</sup>。

现阶段关于高阶 APSK 调制识别的文献相对较少,文献[4]采用人工神经网络的方法对 DVB-S2 标准中的 4 种调制样式进行了识别,但是全连接的网络结构增加了运算量。文献[5]结合信号星座图分维和幅度分类的特征, 提出一种基于高阶累积量和信号均方幅度比的联合识别算法,可对 DVB-S2 系统中的数字调相信号的调制方式进 行有效识别,但是其对信噪比的要求较高,而且只能识别 QPSK,8PSK,16APSK,32APSK,没有包括卫星通信中常 用的 QAM 信号。文献[6]利用幅度特征参数 R 来区分模拟信号,并且论证了该特征参数不受高斯白噪声的影响, 通过研究发现该特征对于不同调制方式的数字信号也有较好的识别效果,并且对滚降系数不敏感,本文将此特征 参数用于常用调相卫星信号的类间识别。文献[7]提出的四阶循环累积量具有很好的鲁棒性,本文在其基础上提

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2012-12-16

(1)

(2)

965

出了一种新的特征参数 Q,用来完成 PSK 和 QAM 调制方式的类内识别。2 种特征参数相结合可以有效识别 QPSK, 8PSK,16QAM,32QAM,16APSK 和 32APSK 信号。

## 1 信号模型

设噪声信号为
$$n(t)$$
,接收机接收到的信号 $r(t)$ 为:  
 $r(t) = s(t) + n(t)$   
式中 $s(t)$ 为调制类型未知的已调信号,可以表示为:  
 $s(t) = \sum_{n} a_n g(t - nT) \sin(2\pi f_c t + \theta + \phi_n)$ 

式中: $a_n$ 为码元幅度(对于 MPSK 调制信号, $a_n$ 的值是固定的,但 是对于 APSK 和 QAM 信号, $a_n$ 的值随编码而变化),g(t)为成型滤 波函数, $f_c$ 和 $\theta$ 分别为载波频率和相位, $\phi_n$ 为调制相位,n(t)为均 值为零,方差为 $\sigma_n^2$ 的高斯白噪声。图 1 给出了 16APSK,32APSK 调 制方式的星座图。



Fig.1 Constellation of 16APSK and 32APSK 图1 16APSK,32APSK 星座图

对于高阶 APSK 信号,不同的编码速率对应着不同的最优相对半径,所以在信号特征分析和调制识别过程中都要考虑半径的不同所带来的影响。

表 1 给出了 16 元和 32 元 APSK 信号针对不同编码速率的最优相对半径。

表 1 16 元和 32 元 APSK 信号最优相对半径

Table1 Optimal relative radii of 16 and 32APSK										
modulation mode	code rate	spectrum efficiency	optimal relative radius 1	optimal relative radius 2						
4+12APSK	2/3	2.67	3.15	_						
4+12APSK	3/4	3.00	2.85	_						
4+12APSK	4/5	3.20	2.75	_						
4+12APSK	5/6	3.33	2.70	_						
4+12APSK	8/9	3.56	2.60	_						
4+12APSK	9/10	3.60	2.57	_						
4+12+16APSK	3/4	3.75	2.84	5.27						
4+12+16APSK	4/5	4.00	2.72	4.87						
4+12+16APSK	5/6	4.17	2.64	4.64						
4+12+16APSK	8/9	4.44	2.54	4.33						
4+12+16APSK	9/10	4.50	2.53	4.30						

# 2 基于信号包络和四阶循环累积量的识别算法

文献[6]提出的信号包络统计特征具有很好的抗噪性,并且对滚降系数不敏感,文献[8]提出的循环累积量对 噪声和干扰具有很好的鲁棒性,所以都可以作为可靠的信号特征用于调制方式的自动识别。本文首先利用信号包 络统计特征对 MPSK,MQAM,16APSK 和 32APSK 信号进行识别,然后根据信号的四阶循环累积量提出一种新的 特征参数 *Q* 完成 MPSK 和 MQAM 信号的类内识别,从而完成对 6 种信号的自动识别。

#### 2.1 {QPSK,8PSK}, {16QAM,32QAM}, 16APSK 和 32APSK 信号的识别

2.1.1 基于信号包络的特征参数 R

文献[6]提出了一种对高斯白噪声不敏感的信号包络统计特征 R,实现了模拟调制方式的识别,即:信号包络四次方的均值与包络平方均值的平方 2 倍的差值。其定义为:

$$R = E[\xi^{2}(t)] - 2E^{2}[\xi(t)]$$
(3)

其中 ξ(t) 为信号包络的平方。

通过实验发现特征参数 *R* 也可应用于 APSK 信号的调制识别当中,表 2 给出了不同数字调制方式信号在功率归一化条件下的特征参数 *R* 的理论值,其中信号为独立、等概、同分布的,信号的成型滤波为均方根升余弦函数(滚降系数为 0.5)。这里采用的 16 元 APSK 信号相对半径分别为 2.57,2.75,3.15,32 元 APSK 信号为 {2.53,4.30} {2.64,4.64} {2.84,5.27},其中星座图的内圆半径设定为 1。从表 2 可以看出各调制方式的特征参数 *R* 不完全相同,同时文献[6]指出特征参数 *R* 不受高斯白噪声的影响,所以可以根据特征参数 *R* 的理想值选取合适的判决门限 *τ*,*τ*,*τ*, 实现 32APSK,MQAM,16APSK 和 MPSK 区分。

太赫兹科学与电子信息学报

表 2 不同调制方式(均方根升余弦)特征参数 R 理论值												
Table2 Theoretical values of characteristic parameters R in different modulation systems (root raised cosine)												
characteristic parameter QPSK	OPSK	8PSK 16	160AM	320AM	16APSK		32APSK					
	QLOK	01 51	100/101	52Q/101 -	R=2.57	R=2.75	R=3.15	R1=2.53, R2=4.30	R1=2.64,R2=4.64	R1=2.84,R2=5.27		
R	-0.82	-0.82	-0.53	-0.53	-0.61	-0.6	-0.58	-0.48	-0.47	-0.42		

信号调制识别往往应用于非协作通信的场合,文献[9]通过对接收信号直接功率归一化求取特征参数 R,该方法往往需要很大的输入信噪比才能达到理论值,不适合应用于实际信号的调制识别。图 2 给出了该方法所得特征参数 R 随信噪比变化的曲线,可以发现当信噪比达到 15 dB 后特征参数 R 才趋于理想值,验证了上面的结论。由于信号的 R 参数理论值是无噪环境下功率归一化所得,所以本文采用的改进方法为:在接收方首先对接收信号进行信噪比估计,在此基础上完成已调信号(不包括噪声)的功率归一化,进而完成特征参数 R(图 3)的计算,最后根据选取的判决门限完成信号调制方式的自动识别。图 3 清楚地表明当信噪比达到 2 dB 时,信号的特征参数

将趋于理想值,远远低于图 2 的 15 dB。这里给出了频带接收信号功率归一化公式:  $Y = \sqrt{\frac{SNR^*E[2X^2]}{2(SNR+1)}}$ ,其中 X

为频带接收信号, Y 为功率归一化信号, SNR 为估计信噪比。



图 2 第三方接收信号(功率归一化)特征参数 R 随信噪比变化



Fig.3 Characteristic parameters *R* of receiving signal (power normalized) based on SNR estimation versus SNR
 图 3 信噪比估计基础上信号(功率归一化)特征参数 *R* 随信噪比变化

在非协作通信环境下,调制类型都是未知的,所以要求信噪比估计算法普遍适用于某一调制类型集合内的所 有信号,文献[10-11]提出利用训练序列构造信号的自相关矩阵,通过奇异值分解分离噪声子空间和信号子空间, 进而实现信噪比的估计,本文的下一部分将对信噪比估计方法进行理论推导和性能仿真测试。

## 2.1.2 信噪比估计算法

normalized) versus SNR

设接收采样信号 r(k) 为: r(k) = s(k) + n(k),其中 s(k) 为调制信号,n(k) 为噪声。信号与噪声分布独立,所以 采样信号的自相关矩阵可以表示为:

 $R_{rr} = E\{r(k)r(k)^{H}\} = E\{[s(k) + n(k)][s(k) + n(k)]^{H}\} = E\{s(k)s(k)^{H}\} + E\{n(k)n(k)^{H}\} = R_{ss} + R_{nn}$ (4) 式中:  $R_{rr}$ 为 $q \times q$ 方阵,上标H表示共轭转置。由上式可知接收信号r(k)的自相关矩阵等于调制信号s(k)和噪声n(k)的自相关矩阵之和。并且由于n(k)为均值为零,方差为 $\sigma_{n}^{2}$ 的高斯白噪声,所以 $R_{nn} = \sigma_{n}^{2}I$ 。

由自相关矩阵的性质可知,  $R_{rr}$  和  $R_{ss}$  均为半正定矩阵。因此调制信号自相关矩阵  $R_{ss}$  奇异值分解可得  $R_{ss} = UA_{ss}U^{H}$ ,其中 U 为正交矩阵,若  $R_{ss}$  矩阵的秩为 p,则  $A_{ss} = \text{diag}(\lambda_{1}, \lambda_{2}, \dots, \lambda_{p}, 0, \dots, 0)_{q\times q}$ , diag(•)表示对角阵, 且  $\lambda_{1} \geq \lambda_{2} \geq \dots \geq \lambda_{p}$ ,  $p < q \circ R_{rr}$  的特征值矩阵为  $A_{rr} = \text{diag}(\gamma_{1}, \gamma_{2}, \dots, \gamma_{q}) = \text{diag}(\lambda_{1} + \sigma_{n}^{2}, \dots, \lambda_{p} + \sigma_{n}^{2}, \sigma_{n}^{2} \dots \sigma_{n}^{2})_{q\times q} \circ$ 将上边 q个对角线元素组成空间称为含噪信号空间,其中前 p 个元素组成的空间称为信号子空间,后 q - p 个元素组成的 空间称为噪声子空间。文献[12]指出调制信号功率可表示为  $A_{ss}$  对角线元素之和,噪声功率为 q 倍  $\sigma_{n}^{2} \circ$  所以接收 信号的信噪比可表示为:

$$S\hat{N}R = 10 \lg \left( \frac{\sum_{k=1}^{p} \gamma_k - p\hat{\sigma}_n^2}{q\hat{\sigma}_n^2} \right), \quad \hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{q - p} \sum_{k=p+1}^{q} \gamma_k$$
(5)

从上式可以看出完成信噪比估计的首要任务是确定 Ass 的秩 p。

采用最小描述长度(Minimum Description Length, MDL)原理来确定 p,

$$MDL(k) = M(q-k) \lg \left( \frac{\frac{1}{q-k} \sum_{i=k+1}^{q} \hat{\gamma}_i}{\left(\prod_{i=k+1}^{q} \hat{\gamma}_i\right)^{\frac{1}{q-k}}} \right) + \frac{1}{2}k(2q-k) \lg M$$
$$\hat{p} = \arg\min_{k} MDL(k); \ k = 1, 2, \cdots, q-1$$



估计出信号空间维数后将 p代入式(5)就可以估计出信噪比。图 4 给出

了信噪比估计的性能,接收信号为随机产生的 MPSK,MQAM,MASPK 信号通过 AWGN 信道,可以看出当信噪比 大于-5 dB 时估计性能良好。

#### 2.2 {QPSK,8PSK}和{16QAM,32QAM}信号类内识别

文献[8,13-14]指出信号的循环平稳性对初相、定时误差以及频偏均不敏感,在低信噪比条件下,识别性能较好,是一类很好的识别特征。这里给出了循环累积量和时变累积量的关系:

$$c_x(\boldsymbol{\beta};\boldsymbol{\tau})_{n,q} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} c_x(t;\boldsymbol{\tau})_{n,q} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\boldsymbol{\beta}t} \mathrm{d}t$$
(8)

(6)

(7)

$$c_x(t;\boldsymbol{\tau})_{n,q} = \sum_{\beta \in \kappa_{n,q}^c} c_x(\beta;\boldsymbol{\tau})_{n,q} e^{j2\pi\beta t}$$
(9)

从式(8)和式(9)可以清楚地看出,对于循环平稳信号来说,循环累积量和时变累积量存在傅里叶变换关系,因此计算循环累积量时,常常利用时变累积量进行傅里叶变换,快速得到相应结果。图 5 给出了 4 种调制方式的四阶循环累积量,可以清楚地看出 QPSK 和 8PSK 以及 16QAM 和 32QAM 的四阶循环累积量具有明显的区别,基于此可以提取新的信号特征参数 Q,这里给出了分类特征参数 Q 的定义:

$$Q = \frac{\max_{1}(C^{\beta}(4,0))}{\max_{2}(C^{\beta}(4,0))}$$
(10)

式中:  $C^{\beta}(4,0)$ 是指信号的四阶 0 次共轭循环累积量,  $\max_{1}(*), \max_{2}(*)$ 分别表示\*的最大值和次大值。



图 5 QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM 四阶零次循环累积量

图 6、图 7分别给出了 QPSK,8PSK 和 16QAM,32QAM 特征参数 Q 随信噪比的变化,可以看出信噪比大于-5dB

时,QPSK,8PSK 以及 16QAM,32QAM 信号具有明显不同,所 以该特征参数在信噪比较小的情况下仍能很好地实现 MPSK 和 MQAM 信号的类内识别。

#### 2.3 识别流程

根据上述分析,可以得到 QPSK,8PSK,16QAM,32QAM, 16APSK 和 32APSK 6 种调制方式识别算法步骤:

步骤一:根据接收射频信号 r(k)估计信号的信噪比 SNR,进而求出有用信号的功率,并对其进行功率归一化;

步骤二:计算功率归一化信号的特征参数 R,根据判决门 限将信号识别为 32APSK,MQAM,16APSK 和 MPSK;

步骤三:如果信号属于 MPSK 或是 MQAM 子类,信号需进行下变频,由于特征参数 Q 对频偏不敏感,下变频只需根据频谱中心粗略估计下变频频率。据 2.2 节特征参数 Q 的计算方

法分别求取特征参数 Q,并根据设定的门限完成 MQAM 或是 MPSK 信号的类内识别。



Fig.6 Characteristic parameters Q versus SNR(QPSK,8PSK) 图 6 QPSK,8PSK 特征参数 Q



g. / Characteristic parameters Q versus SNR(16QAM,32QAI 图 7 16QAM,32QAM 特征参数 Q

## 3 仿真性能与分析

实验仿真依托 LabVIEW 软件平台,LabVIEW 是一种图形编译 语言的虚拟仪器软件开发平台,其具有数据采集、数据分析、信号 生成、信号处理、输入输出控制等功能。与传统的文本语言编程相 比,LabVIEW 使用 G 语言编程,界面更加友好直观,是一种直觉式 图形程序语言。以下实验主要从信号的识别正确率以及成型滤波系 数、频偏等对其的影响展开。参数设置如下:载波频率  $f_c = 5$  kHz, 采样频率  $f_s = 16$  kHz,码元速率  $R_s = 1$  kHz,符号数为 2 048,每个信 噪比下均进行 500 次 Monte Carlo 实验。其中各门限值通过理论值 得到,分别设为: $r_1 = -0.49$ , $r_2 = -0.54$ , $r_3 = -0.75$ , $q_1 = 1.5$ , $q_2 = 1.5$ 。

实验一:算法在不同信噪比下的识别性能。

本次实验选取均方根升余弦成型滤波函数,滚降系数为 0.5。对随机产生的 QPSK,8PSK,16QAM,32QAM,16APSK 和 32APSK 6 种不同调制方式信号,分别仿真 0 dB~20 dB 信噪比下的识别性能,结果如图 8 所示。可以清楚地看出,随着信噪比的增加,信号的识别正确率越来越高,信噪比达到 8 dB 时,算法的调制识别正确率达到了 99%以上,验证了算法的抗噪声性能。

实验二:算法在不同滚降系数下的识别性能。

本次实验选取均方根升余弦成型滤波函数,对随机产生的 6种调制信号分别仿真在不同滚降系数(0.2,0.3,0.5,0.6)下的识别 性能,结果如图 9。4种不同滚降系数信号的识别性能无明显差 异,信噪比大于 8 dB 时,识别概率均达到了 99%以上,与实验 一仿真结果一致,验证了本文算法对成型滤波器滚降系数不敏 感的特性,便于实际信号的辨别应用。

实验三:特征参数 Q 在不同频偏下的识别性能。

假设接收信号为射频信号,而特征参数 *Q*的计算基于基带 信号,所以信号需进行下变频,非合作接收环境下的基带信号 往往存在载波频偏,本次实验主要检验频偏对特征参数 *Q*的影 响,成型滤波采用均方根升余弦函数,滚降系数为 0.5,分别仿 真基带信号存在不同频偏(0,50,100,200)Hz 情况下, QPSK,8PSK 及 16QAM,32QAM 信号的类内识别效果。图 10 表明信噪比大 于-5 dB 时存在不同频偏的 MPSK 信号类内识别率均能达到 100%,图 11 表明信噪比大于-2 dB 时存在不同频偏的 MQAM 信号类内识别率均能达到 100%,总体验证了特征参数 *Q* 对频 偏以及高斯白噪声均不敏感的特性。



本文针对卫星通信中不断出现 APSK 信号的情况,着重研究了常用调相信号的自动识别问题,首先利用信号 的包络统计特征参数 *R* 完成了对 MPSK,MQAM,16APSK 和 32APSK 信号的有效区分,然后在四阶循环累积量的 基础上提出了新特征参数 *Q* 用来实现 MPSK 和 MQAM 信号的类内识别。计算机仿真表明该方法对成型滤波滚降 系数和频偏具有很好的鲁棒性,在较低信噪比条件下仍有很好的识别性能。

## 参考文献:

- Dobre O A,Abdi A,Bar-Ness Y,et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends[J]. IET Communications, 2007,1(2):137-156.
- [2] 吴慧谦,黄焱,张白愚. 星上 DVB-S2 载波快速搜索技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(1):37-40. (WU Huiqian,



图 11 频偏对 MQAM 特征参数 Q 识别性能的影响

HUANG Yan,ZHANG Baiyu. Quick searching technology for satellite DVB-S2/S2 carriers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(1):37-40.)

- [3] Kim Jae-Hyun, Sin Cheon Sig, Lee Sang Uk, et al. Improved Performance of APSK Modulation Scheme for Satellite System[C]// proceeding of 2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing. Singapore:[s.n.], 2007:1-4.
- [4] 刘磊,江桦,贾永强. 基于人工神经网络的 DVB-S2 数字信号调制模式识别[J]. 微计算机信息, 2005,12(2):169-171.
   (LIU Lei,JIANG Hua,JIA Yongqiang. Pattern recognition of DVB-S2 digital signals based on artificial neural network[J].
   Microcomputer Information, 2005,12(2):169-171.)
- [5] 田上成,王可人,金虎. 卫星通信中数字调相信号调制方式识别方法研究[J]. 信号处理, 2011,2(27-2). (TIAN Shangcheng,WANG Keren,JIN Hu. Automatic recognition for the digital phase modulated signals in satellite communication[J]. Signal Processing, 2011,27(2):271-275.)
- [6] Taira S,Murakami E. Automatic classification of analogue modulation signals by statistical parameters[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999(1):202-207.
- [7] Gardner W A,Spooner C M. The cumulant theory of cyclostationary time-series, Part I-II [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994,42(12):3387-3428.
- [8] 冯祥,李建东. 基于高阶循环累积量的 SQAM 信号调制识别算法[J]. 电子与信息学报, 2007,29(1):125-128. (FENG Xiang,LI Jiandong. Robust modulation classification algorithm based on higher-order cyclic cumulants for SQAM signals with frequency offset[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007,29(1):125-128.)
- [9] 包锡锐. 短波通信信号调制分类算法研究及 DSP 实现[D]. 郑州:信息工程大学, 2007. (BAO Xirui. Research on the algorithm of shortwave communications signals modulation classification and its DSP realization[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007.)
- [10] Wu Dan,Gu Xuemai,Guo Qing. Blind signal-to-noise ratio estimation algorithm with small samples for wireless digital communications[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2006,35(1),741-748.
- [11] Sui Dan, Ge Lindong. A blind SNR estimation for digital bandpass signals[J]. Journal of Electronics, 2008, 25(1):8-13.
- [12] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1995. (ZHANG Xianda. Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.)
- [13] 郑鹏,张鑫,刘锋,等. 基于循环谱的 MSK 信号盲检测与参数估计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(3):350-354. (ZHENG Peng,ZHANG Xin,LIU Feng,et al. Blind detection and parameter estimation of MSK signal based on cyclic spectrum[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(3):350-354.
- [14] Dobre O A, Abdi A, Bar-Ness Y, et al. Cyclostationarity based modulation classification of linear digital modulations in flat fading channels[J]. Wireless Personal Communications, 2010(54):699-717.

## 作者简介:



**裴立业**(1987-),男,石家庄市人,学士, 在读硕士研究生,研究方向为通信信号处理. email: peiliye1234@163.com. **江** 桦(1956-),男,江苏省南通市人,硕 士,教授,博士生导师,研究方向为通信信号 截获与处理.