

文章编号: 2095-4980(2017)05-0849-06

一种高效的 APSK 调制信号载波频偏估计算法

李东波, 欧阳喜

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 提出一种有效的幅度相位键控(AMPSK)调制信号载波频偏估计算法。该算法针对定时同步后的信号数据, 根据 AMPSK 调制信号星座图数据点幅度半径不同的特点, 将星座图上幅度半径最小的数据点保留, 其余幅度半径较大的数据点的值均置零。对置零处理后的数据进行 4 次方谱线提取, 从而估计信号的载波频偏。仿真试验表明该算法计算复杂度低, 具有很强的实用性。当数据量为 500, 信噪比大于 15 dB 时, 频偏估计均方误差低于 -80 dB。

关键词: 幅度相位键控; 载波频偏估计; 星座图; 4 次方谱

中图分类号: TN911.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0849

An efficient algorithm for estimating carrier frequency offset of AMPSK modulated signal

LI Dongbo, OUYANG Xi

(Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: An effective algorithm is presented for estimating carrier frequency offset of Amplitude Phase Shift Keying(AMPSK) modulated signal. The data of the signal is obtained after the process of timing synchronization. The algorithm is based on the characteristic that the radiuses of the points of the constellation of AMPSK modulated signal are different. The value of the data is set to zero except the points with the smallest radius. The spectrum line of the quartic spectrum of the zeroing data is extracted to estimate carrier frequency offset. Simulation results show that this algorithm has low complexity and high practicality. The mean square error of the estimation of carrier frequency offset is below -80 dB when the number of symbol is 500 and the signal to noise ratio is above 15 dB.

Keywords: Amplitude Phase Shift Keying; carrier frequency offset estimation; constellation; quartic spectrum

幅度相移键控(AMPSK)作为一种联合幅度和相位的高阶调制方式, 因为其频谱利用率高, 星座形状呈圆形, 能够很好地适应卫星信道的非线性特征, 因而在卫星通信中发挥的作用越来越明显^[1]。在新一代卫星数字电视广播系统(DVB-S2)中就将 16/32-AMPSK 列为可选择的调制方式之一^[2]。然而, 这些高阶调制信号受载波频差的影响更严重, 又由于存在多个幅度, 相位区分度也变得更加狭小, 因此, 高阶调制信号的同步算法也较通常的同步算法复杂, 高阶调制信号的载波同步技术也变得更加重要。

文献[3]针对传统多进制数字相位调制(Multiple Phase Shift Keying, MPSK)信号非数据辅助(Non-Data Aided, NDA)频偏估计算法存在估计范围有限、估计方差较大、符号个数少时估计性能受限等问题, 提出了基于粒子群优化的频偏估计方法。文献[4]通过星座点周期性相差实现了 AMPSK 信号的小频偏估计。本文针对 AMPSK 调制信号, 首先分析其星座图的幅相构成, 得到其不同幅度半径的值, 通过设置合理的判决门限, 将幅度大于门限的数据置零, 幅度小于门限的数据保留, 从而使得处理后的数据中非零数据只包含星座图中幅度半径最小的圆环上的星座点。星座图中幅度半径最小的圆环上的星座点可视为正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制, 利用 4 次方谱线提取的算法就可估计原信号的载波频率^[5]。经仿真分析可知, 该方法对 16AMPSK 和 32AMPSK 调制信号载波频偏估计均较为准确, 误差能够满足载波同步对频偏估计精确度的要求。

1 APSK 调制信号解调流程及其星座图特性

1.1 APSK 调制信号解调流程

非合作条件下卫星信道中幅相调制类通信信号的解调一般需要完成调制识别、定时同步和载波同步等一系列工作,如图 1 所示。

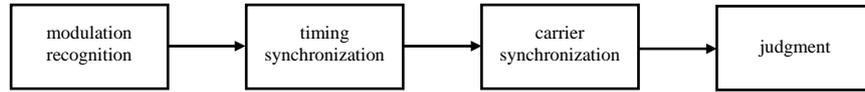


Fig.1 Satellite signal demodulation process under non-cooperative reception conditions

图 1 非合作接收条件下卫星信号解调流程

载波同步是幅相调制信号解调中最为关键和核心的部分。一般而言,不同的调制方式对应着不同的载波同步过程,所以传统的载波同步要求必须完成精确的调制识别。目前针对该类信号载频估计主要是依靠 M 次方谱^[6],对信号进行去调制信息后,利用单频谱线进行载频估计,这种方法的前提是必须已知信号的调制方式,且对信号的数据量、信噪比等要求较高。这种非线性变换的方法由于在进行高次方谱时会引入交叉项干扰,故受限于高阶调制信号。

1.2 APSK 调制信号星座图特性

APSK 调制方式的星座图通常由多个同心圆共同组成,在每个同心圆上均匀分布着多个信号点,这些信号点构成的信号集可表示为:

$$C_k = R_k \exp \left[j \left(\frac{2\pi}{n_k} i_k + \theta_k \right) \right] \quad (1)$$

式中: R_k 为第 k 个同心圆的半径, $(2\pi/n_k) \cdot i_k + \theta_k$ 为星座中信号的相位; n_k 为第 k 个同心圆上的信号点数; θ_k 为第 k 个同心圆上的信号点的初始相位, $i_k (i_k=0,1,\dots,n_k-1)$ 为第 k 个同心圆上的一个信号点。

16APSK 调制信号的星座图由 2 个同心圆组成,其中在内圆上均匀分布 4 个信号点,而在外圆上均匀分布 12 个信号点,它们分别按 4PSK,12PSK 方式排列,如图 2 所示,其中横坐标 I 表示实部,纵坐标 Q 表示虚部。

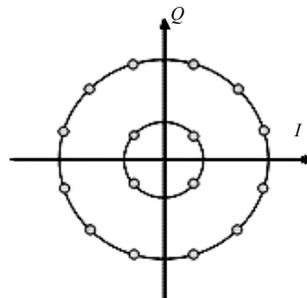


Fig.2 16APSK signal constellation
图 2 16APSK 信号星座图

32APSK 调制信号的星座图为 3 个同心圆,内圆上均匀分布着 4 个信号点,中间圆上均匀分布着 12 个信号点,外圆上均匀分布着 16 个信号点,分别按 4PSK,12PSK,16PSK 方式排列,如图 3 所示,其中横坐标 I 表示实部,纵坐标 Q 表示虚部。

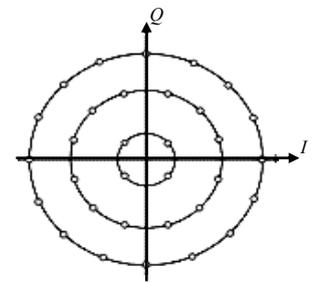


Fig.3 32APSK signal constellation
图 3 32APSK 信号星座图

2 算法流程

2.1 星座图分布统计

在幅相调制信号解调过程中,经定时同步后,可获得传输信号的含频偏星座图,如图 4 所示。

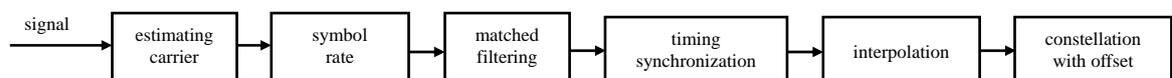


Fig.4 Symbol synchronization process of APSK signal

图 4 幅相调制信号定时同步流程

对星座图上映射点进行取模操作,可以得到其幅度分布。理想无噪声,仅存在频偏的情况下,APSK 调制信号星座图会呈现几个圆环,模值即为该圆环的半径。含噪声情况下,APSK 调制信号星座图将呈现出离散的圆环

状，此时星座点模值统计直方图将呈现出类高斯分布，均值为圆环的半径，方差为圆环状星座点的方差，该方差与噪声方差呈正相关。

若存在载波频偏，星座图将产生旋转形成多个环，有噪声情况下对其模值进行直方图统计将展现出多个高斯分布混合特性，这符合高斯白噪声信道的假设，如图 5、图 6 所示。

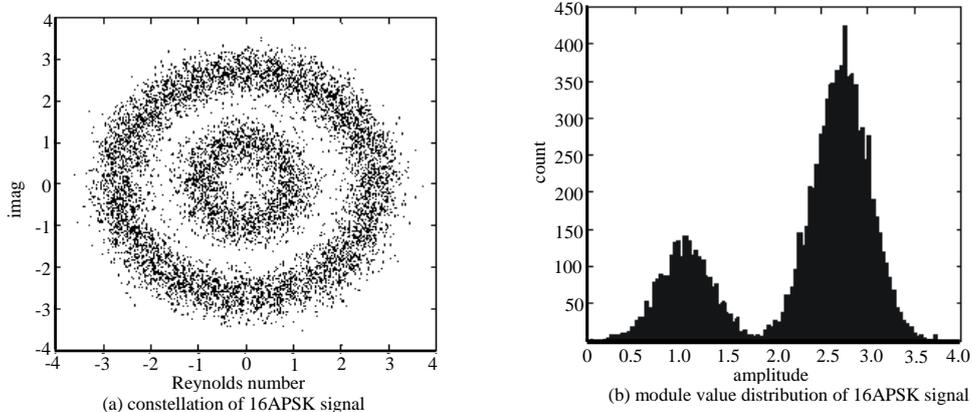


Fig.5 Constellation and module value distribution of 16APSK signal

图 5 16APSK 信号含频偏、噪声星座图及其模值分布

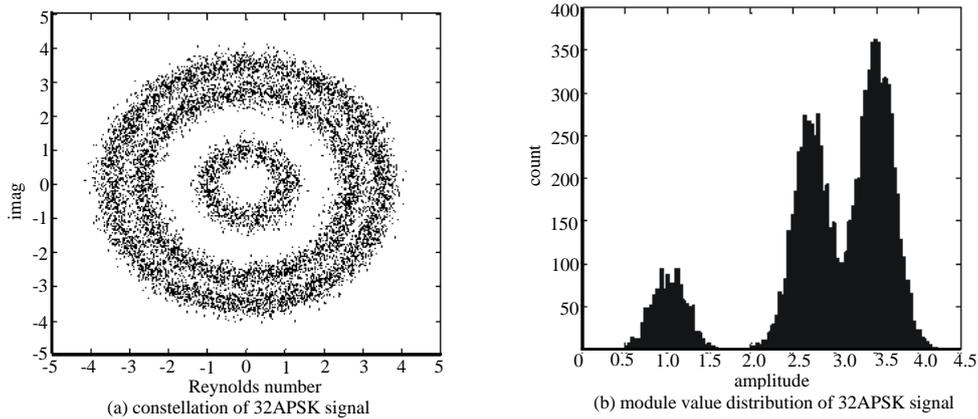


Fig.6 Constellation and module value distribution of 32APSK signal

图 6 32APSK 信号含频偏、噪声星座图及其模值分布

经过理论分析及实验仿真，对于幅相调制信号的星座图特征可得到如下结论：由于应用背景为高斯白噪声信道，故含频偏星座图上星座点的环状分布特性，在数学上可以理解为星座点幅值的概率密度是多个高斯分布的混合，由于各环上星座点的数量可能不同，统计意义上反映到模型中即各高斯分布的权重不同。

文献[6]说明了这一点，并进一步证明了各环高斯分布的方差：

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \sigma_n^2 \tag{2}$$

式中 σ_n^2 为信道噪声方差。

设 $x = [x_0, x_1, \dots, x_N]$ 为定时同步后的星座点幅值，由以上分析可知，在高斯白噪声信道下，这些星座点幅值的概率密度应满足式(3)所示的混合高斯分布：

$$P(x, \theta) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x; \mu_k, \sigma_k^2) \tag{3}$$

式中： π_k, μ_k, σ_k^2 依次为第 k 个高斯分布的权重、均值和方差。 k 为高斯分布个数，在此为星座图环数。 θ 为一组权重、均值、方差等待估参数。

2.2 判决门限设定与载波频率估计

2.2.1 判决门限设定

在对定时同步后信号星座图模值进行直方图统计的基础上，可以设定一判决门限，将模值大于该门限的信号

点的值置零，模值小于该门限的信号点的值不变。按此判决准则对信号处理之后，APSK 调制信号星座图上半径最小的内环上的星座点的值保持不变，除此内环之外的半径较大的外环上的点的值均置零。由于频偏和噪声的影响，信号星座图呈现出离散的圆环状，如何合理设定门限，使得星座图半径最小的内环上的信号点保留，其他外环上的信号点均置零，是一个关键步骤。

1) 按最小错误概率准则设置门限

根据前述对信号星座图模值进行直方图统计，并将其看作多个不同权值高斯分布的混合的假设，判决门限可以运用最小错误概率准则(最大后验概率准则)^[7]来设定。对 16APSK 调制信号而言，设判决门限为 Th ，信号模值为 x ，则可考虑二元检测问题：

$$\begin{cases} H_0 : x \leq Th \\ H_1 : x > Th \end{cases} \quad (4)$$

条件概率密度 $f(x|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-r)^2}{2}\right)$ ， $f(x|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-R)^2}{2}\right)$ ，式中： r, R 分别为内环、外环半径； σ 为高斯分布的方差。 $P(H_0), P(H_1)$ 表示星座图内环和外环上的点的概率，显然 $P(H_0)=4/16=0.25$ ， $P(H_1)=12/16=0.75$ 。根据最大后验概率准则，若：

$$l(x) = \frac{f(x|H_1)}{f(x|H_0)} \geq \frac{P(H_0)}{P(H_1)} \quad (5)$$

则判 H_1 为真，否则判 H_0 为真。其中 $l(x) = \frac{f(x|H_1)}{f(x|H_0)}$ 为似然比。可以得出最佳判决门限为 $Th = (r + R) / 2 + (\ln 3) / (r - R)$ 。

2) 按星座图各环半径均值设置门限

由于信号数据是随机出现的，对 16APSK 信号而言，信号数据只可能存在于内外 2 个不同半径的环上，故可以内外环半径的均值作为判决门限，即 $Th = (r + R) / 2$ 。

分别在上述 2 种判决门限的前提下进行仿真，信号数据量 500，得到频偏估计均方误差随信噪比变化性能曲线，见图 7。 Th_1 为按最小错误概率准则设置的门限， Th_2 为按星座图各环半径均值设置的门限。可见均值门限的性能略优于按最小错误概率准则设置的门限的性能。

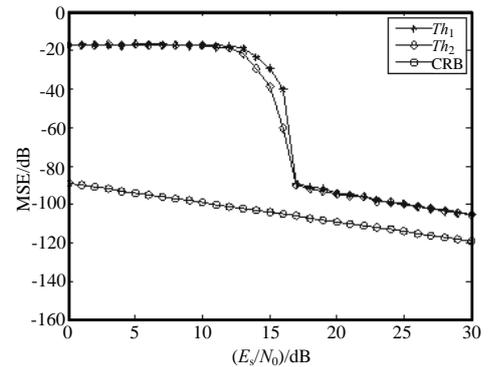


Fig.7 Performance of the algorithm under the condition of different thresholds
图 7 不同判决门限条件下算法性能

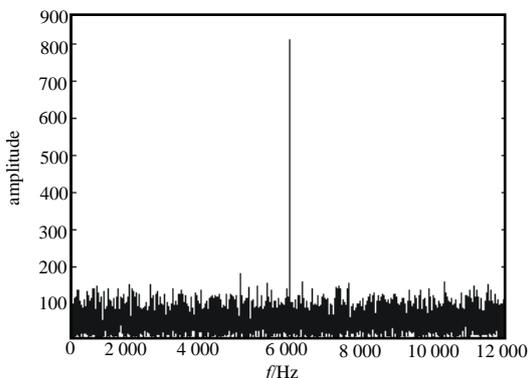


Fig.8 Quartic spectrum of 16APSK signal
图 8 16APSK 信号 4 次方谱图

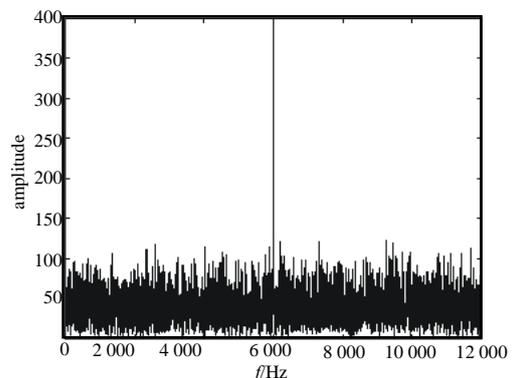


Fig.9 Quartic spectrum of 32APSK signal
图 9 32APSK 信号 4 次方谱图

2.2.2 载波频率估计

通过按照最小错误概率准则设立合理检测门限，将 APSK 调制信号星座图半径最小的内环信号点数据保留，外环信号点数据置零。置零处理后的信号数据由于只保留了内环上的数据，可将其看作 QPSK 信号(数据点间随机插入了零数据)。4 次方谱的计算是运用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)，不受置零数据的影响。实际系统中星座点是随机出现的，当数据量足够大，则内环保留的数据也增多，由文献[8]知，对置零处理后的

信号数据求取 4 次方谱，则 QPSK 信号在频率为载波频率 4 倍处会有离散谱线。检测谱线峰值处的频率值，设为 f_0 ，则信号载波频偏估计值为 $\hat{f}_c = f_0/4$ 。图 8、图 9 分别为仿真实验所得 16APSK 和 32APSK 信号数据置零处理后经变换得到的 4 次方谱图。设信号载波频率为 1 500 Hz，图中 $\hat{f}_c = f_0/4=6\ 000/4=1\ 500$ Hz，可见谱线非常突出，易于提取。

2.3 APSK 调制信号载波频偏估计算法流程

步骤 1：对接收信号进行定时同步，获得符号速率信息后对低通信号进行匹配滤波，计算时延，获得最佳抽样时刻，对信号进行抽样，获得含频偏与噪声星座图(见图 10)。

步骤 2：对含频偏星座图进行取模处理，通过直方图统计，获得星座图环个数及半径等信息。

步骤 3：根据最大后验概率准则求得判决门限，并对信号数据作保留和置零处理。

步骤 4：对部分置零处理后的信号数据求得其 4 次方谱，检测谱线最大值，得到信号载波频偏估计值。

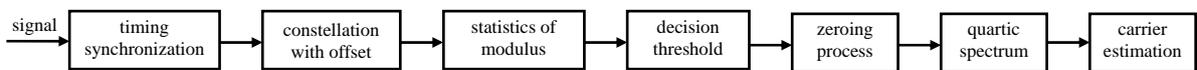


Fig.10 Estimation process of carrier frequency offset for APSK signal
图 10 APSK 信号载波频偏估计流程

3 仿真实验

实验 1：信号调制类型为 16APSK 和 32APSK，载波频偏为 0.01，信号数据量设定为 500 个符号，采用加性高斯白噪声，信噪比取值范围从 0~30 dB。对每种调制方式、每个信噪比都进行 500 次独立 Monte-Carlo 实验，用频偏估计均方误差作为评价性能的指标，得到频偏估计均方误差随信噪比变化曲线，见图 11(图中圆圈点型曲线为克拉美罗限)。

实验 2：信号调制类型为 16APSK 和 32APSK，载波频偏为 0.01，信噪比为 20 dB，信号数据量设定为从 500~5 000 个符号(数据量间隔为 100)。对每种调制方式在不同数据量条件下都进行 500 次独立 Monte-Carlo 实验，得到频偏估计均方误差随数据量变化曲线，见图 12(图中圆圈点型曲线为克拉美罗限)。

从图 11 可以看出，对于 APSK 类调制信号而言，信噪比较低时，算法性能较差，这是由于低信噪比下，星座图的分布聚集性将受到严重干扰，甚至被噪声彻底掩盖。当信噪比逐渐提高时，随着星座图的局部聚集性逐渐凸显，算法性能迅速提高，最终达到解调要求。图 11 中， $E_s/N_0=15$ dB 时，频偏估计 MSE 有较大跳变，原因是数据置零处理时的判决门限是一定的，对于固定的判决门限，信噪比越高，则星座图聚集性越好，从而使得星座图的数据点在该门限下可以按照预定的置零规则对数据进行处理，而较少有错误置零的数据点，获得的非零数据基本都是半径最小的内环上的点，频偏估计性能也出现跳变。对于不同的判决门限，频偏估计性能迅速提高的跳变点的信噪比不同，这与门限的设定有关。

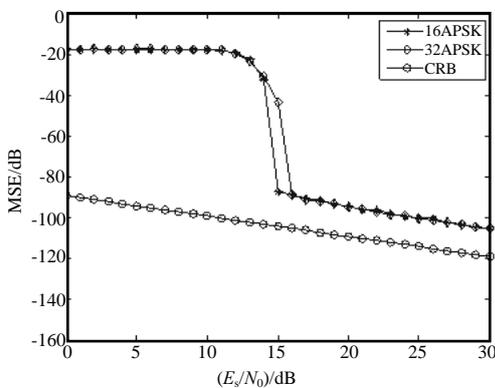


Fig.11 Performance of APSK signal carrier frequency offset estimation with SNR

图 11 APSK 信号载波频偏估计随信噪比变化性能

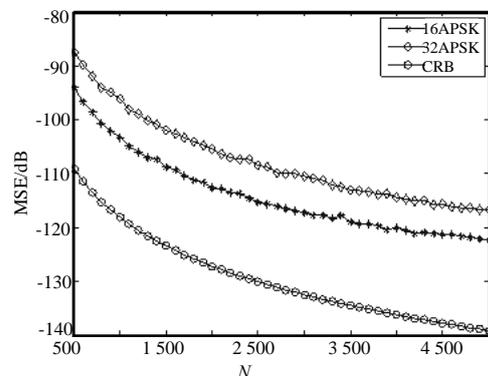


Fig.12 Performance of APSK signal carrier frequency offset estimation with the number of symbols

图 12 APSK 信号载波频偏估计随数据量变化性能

图 12 表明，随着数据量的增多，估计精确度也得到提高。在实际的系统中，内外层半径上的信号是随机出现的，为了保证该算法性能有效，半径最小环上的信号数据量要有足够的数量。因此数据量增多时，半径最小环上的数据数量也相应增多，才能满足利用 4 次方谱提取谱线时对数据量的要求，从而频偏估计精确度也更高。而

且在相同的数据数量的条件下, 16APSK 相比 32APSK 内环上的数据点更多, 所以频偏估计精确度高, 算法性能更好。

图 11 和图 12 中, 频偏估计均方误差随信噪比和数据量变化曲线与相应的克拉美罗限均有一定差距, 这是由于运用 4 次方谱进行频率估计时, 受一些因素(FFT 点数等)限制, 该方法本身频率估计精确度有限, 故算法性能受到影响。如图 12 中, 频偏估计均方误差随着数据量增加而改善的情况逐渐变得不明显, 就是因为受限于此。故算法性能与理想的克拉美罗限^[9]相比还不够理想, 有待进一步研究。

4 结论

本文提出了一种非合作接收条件下 APSK 调制信号的载波频偏估计算法, 该算法充分利用幅相调制信号星座图的特点, 实现了全盲条件下载波频偏估计, 相较于传统算法, 算法复杂度低, 适应性和抗噪性能有明显优势, 十分适合 APSK 调制信号的盲载波频偏估计。在精确度达到要求的前提下, 可运用于工程实践。

参考文献:

- [1] 邓元策. M-APSK 调制解调关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015. (DENG Yuance. Study of key technologies of M-APSK modulation and demodulation[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2015.)
- [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,HUANG Yan,ZHANG Baiyu. Quick searching technology for satellite DVB-S/S2 carriers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(1):37-40.)
- [3] 胡礼,廖明,王世练. 基于粒子群优化的 MPSK 信号频偏估计算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):947-951. (HU Li,LIAO Ming,WANG Shilian. Frequency estimation of MPSK signals based on PSO algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):947-951.)
- [4] 胡景明,刘爱军,郭道省. 基于 APSK 信号周期性相差的载波频偏估计算法[J]. 军事通信技术, 2013,34(1):7-12. (HU Jingming,LIU Aijun,GUO Daoxing. Algorithm of carrier frequency offset estimation based on APSK cyclical phase offset[J]. Journal of Military Communication Technology, 2013,34(1):7-12.)
- [5] 杨琳,许小东,路友荣,等. 常见数字通信信号的谱线特征分析[J]. 电子与信息学报, 2009,31(5):1067-1071. (YANG LIN,XU Xiaodong,LU Yourong,et al. Analysis of spectrum feature of common digital communication signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,31(5):1067-1071.)
- [6] 廖灿辉,涂世龙,万坚. 一种抗频偏的卫星幅相调制信号识别算法[J]. 电子与信息学报, 2014,36(2):346-352. (LIAO Canhui,TU Shilong,WAN Jian. An anti frequency offset algorithm for modulation recognition of satellite amplitude-phase modulated signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014,36(2):346-352.)
- [7] 张贤达. 现代信号处理[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2015. (ZHANG Xianda. Modern Signal Processing[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.)
- [8] 杨琳,许小东,路友荣,等. 基于谱线特征的恒包络数字调制方式识别方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2009,39(9):936-943. (YANG Lin,XU Xiaodong, LU Yourong,et al. Algorithm for modulation recognition of constant envelope signal based on spectrum feature[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009,39(9):936-943.)
- [9] D' ANDREA A N. The modified Cramer-Rao Bound and its application to synchronization problems[J]. IEEE Trans. on Communication, 1994,42(2):1391-1399.

作者简介:



李东波(1988-), 男, 河北省张家口市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为通信信号处理与软件无线电.email:ldongbo@163.com.

欧阳喜(1973-), 男, 江西省吉安市人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为通信信号处理。