

基于信号分解的 MFSK 信号码元速率估计算法

徐健飞 汪美平 王赞基

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室 北京 100084)

摘要 针对 MFSK 信号码元速率估计问题,提出了一种基于信号分解的估计算法。算法将 MFSK 信号分解为 M 个单音信号的形式,利用信号的循环平稳特性,在所有单音信号包络和的频谱中提取 MFSK 信号码元速率对应的谱线,从而实现对 MFSK 信号码元速率的估计。该算法仅需将 MFSK 信号的频率集作为先验信息,同时允许信号含有载波频偏。经过理论分析可知,该算法在多径信道条件下同样适用。仿真实验表明,该方法在高斯信道下有良好的估计性能,在多径信道下性能损失很小,表现出良好的实用性和鲁棒性。

关键词 频移键控,码元速率,循环平稳,多径信道,载波频偏

中图分类号 TN911.72 **文献标识码** A

Algorithm for MFSK Symbol Rate Estimation Based on Signal Decomposition

XU Jian-fei WANG Fu-ping WANG Zan-ji

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract To estimate the symbol rate of MFSK signal, a new algorithm based on signal decomposition was presented. Under this algorithm, MFSK signal is decomposed into M single tones, and as a cyclostationary signal, the symbol rate is estimated by extracting the spectrum line corresponding to symbol rate in the spectrum of all the single tone envelopes. Frequency set is the only needed apriori knowledge, and frequency offset is allowed under this algorithm. Theoretical analysis proves this algorithm is effective under multipath channel. Computer simulation results show that the algorithm is effective and robust which performs well under AWGN and has little SNR loss under multipath channel.

Keywords FSK, Symbol rate, Cyclostationary, Multipath channel, Frequency offset

1 引言

通信信号调制样式识别和调制参数估计是电子对抗中的重要内容,是对敌方通信进行干扰、侦听的前提。MFSK 信号是现代通信系统中常用的数字调制方式,对 MFSK 信号的调制方式识别以及解调的一个重要依据就是信号的码元速率。

目前主要的码元速率估计方法包括基于小波变换的估计方法^[1-4]和基于数字通信信号循环平稳特性的估计方法^[5-8]。其中,基于小波变换的估计方法具有实现简单、计算复杂度小等优点,但是一般需要较高的采样速率,同时存在小波尺度盲点、抗噪声性能差等问题。与小波变换法相比,基于信号循环平稳特性的估计方法具有更好的抗噪声性能,且适用于多种成型脉冲滤波器,但该算法无法直接用于 MFSK 信号的码元速率估计。近几年还出现了能量算子法^[9]、最大似然^[10]法等新的码元速率估计算法,但这些算法大都只适用于线性调制信号。而且,现有文献提出的大多数算法通常假设相对理想的信道环境,即信道噪声简单地看作加性高斯白噪声,很少涉及信号在复杂信道条件下的码元速率估计问题。

本文针对 MFSK 信号的码元速率估计提出了一种新的方法,即仅需将 MFSK 信号的频率集作为先验信息,并允许

信号含有载波频偏。文中讨论了算法在多径信道下的估计性能,从理论上证明了该方法在多径信道条件下的适用性。本文首先介绍了算法的原理,又根据 MFSK 信号的特点对算法进行了改进,最后通过仿真实验对算法的性能进行了验证。仿真结果表明,该算法性能优异,且在多径信道条件下和接收信号含有频偏的条件下都有良好的估计性能。算法适用范围广,适合实际应用。

2 基于信号分解的 MFSK 码元速率估计算法原理

中频 MFSK 信号可以表示为:

$$x(t) = \sum_i \exp[j2\pi(f_c + a_i \Delta f)t + j\theta_i] p(t - iT_b) + n(t) \quad (1)$$

式中, T_b 为符号周期, $p(t)$ 为持续时间为 T_b 的成型脉冲, $a_i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 为符号序列, Δf 为正交载波频率间隔, θ_i 为载波初相位, $M \in \{2, 4, 8\}$ 为调制进制, $n(t)$ 为零均值高斯白噪声。这里令 $\{f_m = f_c + m\Delta f, m = 0, 1, \dots, M-1\}$ 为 MFSK 信号的正交载波频率集。

将 MFSK 根据其频率集表示为多音形式:

$$x(t) = \sum_{m=0}^{M-1} x_m(t) + n(t) \quad (2)$$

式中, $x_m(t) = \sum_i c_{i,m} \exp(j2\pi f_m t + j\theta_i) p(t - iT_b)$, $c_{i,m} = \begin{cases} 1, & a_i = m \\ 0, & a_i \neq m \end{cases}$ 。

到稿日期:2011-03-23 返修日期:2011-06-12 本文受高等学校博士学科点专项科研基金(20060003032)资助。

徐健飞(1982—),男,博士生,主要研究方向为软件无线电、通信信号处理, E-mail: xjf@mails. tsinghua. edu. cn; 汪美平(1974—),男,副教授,主要研究方向为通信信号处理; 王赞基(1946—),男,教授,主要研究方向为电路与系统。

假设 MFSK 信号的频率集已知。定义单音带宽比例系数 λ , 满足 $\lambda \geq 1$ 。令 $G(f)$ 为一个频率中心在 f_m 、宽度为 $\lambda \Delta f$ 的矩形窗, 可通过对 $x(t)$ 的频谱 $X(f)$ 进行分解得到近似的各单音信号的频谱 $X_m(f)$, 即:

$$X_m(f) = X_{0m}(f)G(f) + N(f) \quad (3)$$

式中, $X_{0m}(f)$ 为各单音信号 $x_m(t)$ 的频谱; $N(f)$ 为零均值高斯噪声和其他单音信号在 $(f_m - \frac{\lambda}{2} \Delta f, f_m + \frac{\lambda}{2} \Delta f)$ 内的频谱。

对 $X_m(f)$ 进行傅里叶反变换, 可得近似的各单音时域信号:

$$x_m'(t) = x_m(t) * g(t) + n(t) \quad (4)$$

式中, $g(t)$ 为 $G(f)$ 对应的时域函数。对得到的单音信号的包络加和, 可得:

$$\begin{aligned} x_l(t) &= \sum_m |x_m'(t)| \\ &= \sum_m |x_m(t) * g(t) + n(t)| \\ &= \sum_m |\sum_i c_{i,m} p(t - iT_b) \exp(j2\pi f_m t + j\theta_0) * |g(t)| + n'(t)| \\ &= \sum_i p(t - iT_b) * |g(t)| + n'(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $n'(t)$ 为化简后的近似噪声。由式(5)可以推出 $x_l(t)$ 的傅里叶变换为:

$$S(f) = \frac{1}{T_b} \sum_l P(f) \delta(f - \frac{l}{T_b}) |G(f)| + N'(f) \quad (6)$$

由信号的循环平稳特性可知, $S(f)$ 中 $l=0$ 的谱线对应着直流分量, $l=\pm 1$ 的谱线对应着信号的码元速率 $\frac{1}{T_b}$ 。由此可以在 $S(f)$ 中观察到码元速率 $\frac{1}{T_b}$ 对应的谱线, 从而得到码元速率 T_b 的估计值。为了进一步提高码元速率的估计的准确性, 可以采用“频域窗口平均”的方法^[11]将幅度谱的每个离散频点与周围某个范围内的频点之和进行平均, 通过得到的新的幅度谱来使谱线突出出来。

3 多径信道下码元速率估计算法的性能

多径效应主要是由通信信号传输路径中的多径反射造成的。考虑信号通过多径信道后的情况, 如果认为信道个数是有限的, 那么接收信号可以表示为:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K-1} h_k \sum_i \exp[j2\pi(f_c + a_i \Delta f)(t - \tau_k) + j\theta_0] + p(t - iT_b - \tau_k) + n(t) \quad (7)$$

式中, h_k 为第 j 径的衰减, τ_k 为对应的时间延迟, K 为总的径数。用单径的推导方法可先推得单音信号的表达式。

$$x_m(t) = \sum_{k=0}^{K-1} h_k \sum_i c_{i,m} \exp(j2\pi f_m(t - \tau_k) + j\theta_0) p(t - iT_b - \tau_k) \quad (8)$$

对所有通过式(4)得到的单音信号包络加和, 得到:

$$x_l(t) = \sum_m |x_m'(t)| = \sum_{k=0}^{K-1} h_k \sum_i p(t - iT_b - \tau_k) * |g(t)| + n'(t) \quad (9)$$

由此, 推导出 $x_l(t)$ 的傅里叶变换的表达式:

$$S(f) = \frac{1}{T_b} \sum_{k=0}^{K-1} h_k e^{-j2\pi f \tau_k} \sum_l P(f) \delta(f - \frac{l}{T_b}) |G(f)| + N'(f) \quad (10)$$

式(11)同式(6)相比, 仅多出一个多径影响因子 $\sum_{k=0}^{K-1} h_k e^{-j2\pi f \tau_k}$

$h_k e^{-j2\pi f \tau_k}$, 由此可知, 该算法在多径信道条件下依然适用。且由于多径影响因子 $\sum_{k=0}^{K-1} h_k e^{-j2\pi f \tau_k}$ 多为对码元速率对应谱线的衰减, 因此在多径信道下算法性能有所下降。

4 性能仿真与分析

仿真试验中设置码元速率为 150 波特/s, 采样频率为 3kHz, 随机产生码元, 进行 1000 次蒙特卡罗实验, 统计算法对 2FSK, 4FSK 和 8FSK 信号码元速率估计的正确率。

首先仿真 2FSK, 4FSK 和 8FSK 信号码元速率估计正确率和单音带宽比例系数 λ 的对应关系。图 1 给出了仿真结果。当单音带宽比例系数 λ 在区间 $[1.05, 1.45]$ 变化时, 算法均取得了较好的估计结果。

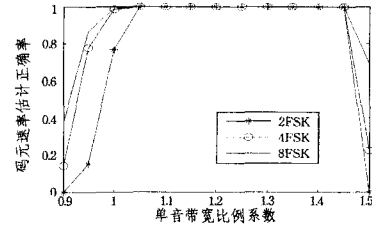


图1 单音带宽比例系数 λ 变化时码元速率估计正确率

图2给出了在高斯信道中码元速率估计正确率随着输入信噪比变化的曲线。可以看出, 随着输入信噪比的增加, 算法的估计正确率也在增加。在输入信噪比为 -9dB 时, 对 2FSK, 4FSK 和 8FSK 信号码元速率估计的正确率都达到了 90% 以上, 表现出较好的性能。而且调制进制 M 越小, 接收信号频谱中各单音信号间的影响就越小, 故识别正确率高, 和仿真曲线相符。

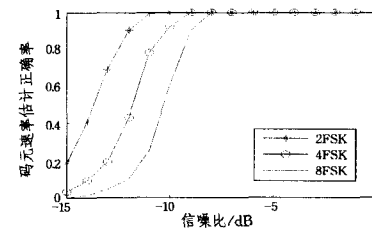


图2 不同输入信噪比下码元速率估计正确率

图3给出了多径信道下码元速率估计算法性能仿真曲线。算法采用文献[12]的典型郊区信道模型, 其中多径信道幅度参数为 $h=[1.000, 0.631, 0.398, 0.251, 0.159, 0.1]$, 时间延迟参数为 $\tau=10^{-3}[0, 0.31, 0.71, 1.09, 1.73, 2.51]$ s。由仿真结果可以看出, 算法在多径信道下鲁棒性很强, 与高斯信道下的仿真结果比较仅有很小的性能损失。

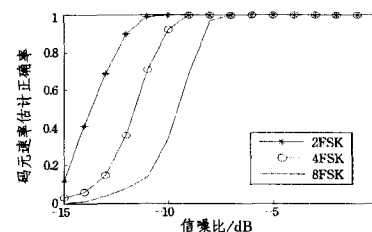


图3 多径信道下码元速率估计正确率

从图1的仿真结果可知, 算法对 MFSK 信号频率集中各单音频率中心的位置变化有一定容许度, 即算法在一定频偏

(下转第 71 页)

集。定义 RCE 表示欺诈行为带来的信誉增加值占社区信誉值的比例,将其作为模型衡量指标。对可疑欺诈行为数据进行 0%~100% 的欺诈比例假设,计算了不同欺诈比例行为下 RCE 指标的变化趋势。最后通过与淘宝信誉机制、SPORAS 信誉模型两种典型 C2C 信誉计算模型进行比较,验证了模型在 3 类常见的信誉欺诈中的抗攻击性能。

参考文献

- [1] Gahill V, Gray E, Seigneur J M, et al. Using trust for secure collaboration in uncertain environments[J]. IEEE Pervasive Computing Magazine, 2003, 2(3): 52-61
- [2] Ba S, Pavlou P. Evidence of the Effect of Trust Building Technology in Electronic Markets; Price Premiums and Buyer Behavior[J]. MIS Quarterly, 2002, 26(3): 243-268
- [3] Zacharia G, Maes P. Trust management through reputation mechanisms[J]. Applied Artificial Intelligence, 2000, 14(9): 881-907
- [4] 王茜, 杜瑾珺. 一种 P2P 电子商务安全信任模型[J]. 计算机科学, 2006, 33(9): 55-57
- [5] Mui L, Mohtashemi M. A computational model for trust and

reputation[A]//Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Science(HICSS '02)[C]. 2002: 2431-2439

- [6] Jøsang A, Bhuiyan T. Optimal trust network with subjective logic[C]//2nd Int. Conf. Emerging Security Inf., Systems and Technologies(SECURWARE 2008). IARIA, 2008: 179-184
- [7] Sabater J, Sierra C. Review on computational trust reputation models[J]. Artificial Intelligence Review, 2006, 24(1): 33-60
- [8] Bharadwaj K K, Yahya M, Al-Shamri. Fuzzy computational models for trust and reputation systems[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2009, 8(1): 37-47
- [9] Xiong L, Liu L. PeerTrust: Supporting reputation-based trust for peer-to-peer electronic communities [J]. IEEE Trans. on Knowledge And Data Engineering, 2004, 16(7): 843-857
- [10] 路松峰, 刘芳, 胡和平, 等. 一种节点信誉相关的 P2P 网络信任管理模型[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(11): 2139-2145
- [11] Elizabeth C, Tharam D, Farookh K H. Trust and Reputation for Service-oriented Environments; Technology for Building Business Intelligence and Consumer Confidence[M]. 陈德人, 郑小林, 于红华, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 104-105

(上接第 67 页)

范围内有效。设置输入信噪比为 -5dB, 仿真不同载波频偏下的算法性能, 图 4 给出了仿真结果。由此可知, 当载波频偏 $\Delta\omega$ 满足 $\frac{|\Delta\omega T_b|}{2\pi} \leq 0.1$ 时, 算法取得了良好的码元速率估计正确率。

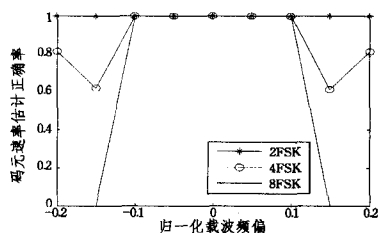


图 4 不同载波频偏下码元速率估计正确率

结束语 针对 MFSK 信号的码元速率估计问题, 给出了一种新的基于信号分解的估计算法。算法利用信号的循环平稳特性, 通过对信号频谱的分解, 在所有信号单音包络和的频谱中提取码元速率对应的谱线, 实现了对 MFSK 信号码元速率的估计。通过理论分析, 证明了算法在多径信道下的有效性, 又通过对算法的改进和分析, 得出本算法可适用于信号存在载波频偏的情况。最后通过仿真实验对算法各项性能进行了验证。综上, 本算法具有如下优点, 且具有良好的实用性和鲁棒性。

- (1) 本算法仅需要 MFSK 信号的频率集为先验信息;
- (2) 在高斯信道下, 本算法的码元速率估计性能优异, 在输入信噪比为 -9dB 时, 对 2FSK, 4FSK 和 8FSK 信号码元速率估计的正确率都达到了 90% 以上;
- (3) 本算法在信号含有载波频偏时依然适用, 当输入信噪比为 -5dB 时, 频偏适用范围为 $\frac{|\Delta\omega T_b|}{2\pi} \leq 0.1$;
- (4) 本算法在多径信道下能够有效地提取 MFSK 信号的码元速率参数, 仿真实验表明, 算法在多径信道下性能损失很

小, 且有很好的鲁棒性。

参考文献

- [1] Ho K C, Prokopi W, Chan Y T. Modulation identification of digital signals by the wavelet transforms[J]. Radar Sonar and Navigation IEE Proceedings, 2000, 147(4): 169-176
- [2] 许军. 通信盲接收中短数据处理若干问题的研究[D]. 北京: 清华大学电机系, 2007: 25-32
- [3] Gao Yong, Li Mu, Huang Zhen, et al. A symbol rate estimation algorithm based on Morlet wavelet transform and autocorrelation[C]//Information, Computing and Telecommunication. Beijing, China, 2009: 239-242
- [4] 高勇, 黄振, 陆建华. 基于小波变换的 MPSK 信号符号速率估计算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(S): 167-170
- [5] Lopez Salcedo J A, Vazquez G. Stochastic approach to square timing estimation with frequency uncertainty[C]//IEEE International Conference on Communications 2003. 2003: 3555-3559
- [6] 罗明, 杨绍全, 魏青. 基于循环平稳分析的 MPSK 信号接收[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(5): 115-119
- [7] Yin Wan-xue, Wang K. A New Method to Symbol Rate Estimation of MPSK Signals[C]//2008 Congress on Image and Signal Processing. Sanya, China, 2008: 394
- [8] 刘伟, 杜娟. 基于循环谱理论的弱信号检测及特征参数估计[J]. 通信技术, 2010, 43(4): 28-30
- [9] 胡建伟, 杨绍全, 汤建龙. 基于多频带能量算子的符号率盲估计[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1539-1544
- [10] Mosquera C, Scalise S, López-Valcarce R. Non-data-aided symbol rate estimation of linearly modulated signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 664-674
- [11] 唱亮. 通信信号盲接收的参数估计方法研究[D]. 北京: 清华大学电机系, 2008: 47
- [12] 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1995: 68-75