

基于二阶循环累积量的载波频率估计

龚牡丹, 郭荣辉

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016)

摘 要: 针对单信道中时频重叠双信号的载波频率估计问题, 提出一种基于二阶循环累积量的载波频率估计方法。该方法通过检测信号二阶循环累积量的峰值进行载波频率估计, 不需要对信号进行分离, 可以直接估计双信号的载波频率。仿真结果表明, 对于 BPSK、QPSK、8QAM、16QAM 任意组合的时频重叠双信号, 在信噪比不低于 -5 dB 的情况下, 该方法的载波频率估计准确率高于 95%。

关键词: 时频重叠; 二阶循环累积量; 载波频率估计; 循环平稳性

Carrier Frequency Estimation Based on Second-order Cyclic Cumulants

GONG Mu-dan, GUO Rong-hui

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

【Abstract】 Aiming at time-frequency overlapped two-signals in single-channel, this paper proposed a method to estimate carrier frequency based on second-order cyclic cumulants. Carrier frequency estimate can be implemented by detecting the peak of the specific cycle cumulants. This method doesn't need to separate the signals, can estimate the carrier frequency of the two-signal directly. For any combination of BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM modulation, simulation result shows the accuracy of carrier frequency estimation is greater than 95% when Signal to Noise Ratio(SNR) isn't less than -5 dB.

【Key words】 time-frequency overlap; second-order cyclic cumulants; carrier frequency estimation; cyclostationary

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.20.028

1 概述

通信信号载波频率估计是通信信号分析领域的重要组成部分, 信号的载波速率估计问题是实现信号识别和解调的重要环节。载波频率估计的准确度将直接影响后续处理工作, 如码元速率估计、信号恢复等。

目前用于载波频率估计的方法主要有周期图法、频率居中法、零交叉法和最小均方算法, 这些方法都是估计在噪声背景下单信号的载波频率。文献[1]提出了基于高阶循环累积量的载波估计方法, 该方法能有效地估计高斯噪声环境下的单信号的载波频率, 但由于无线通信环境的日益复杂, 实际接收到的信号往往是多个信号共存的, 在这种情况下, 直接利用上述方法来估计信号的载波频率是行不通的。此时可利用文献[2-3]提出的信源个数估计方法和盲信号分离方法, 先将各个信号分离出来, 然后进行单信号的载波估计。但这样算法复杂度高, 对于实时要求性较高的系统, 此算法也不行。因此, 研究直接估计时频重叠信号的载波频率方法具有实际意义。

本文针对单信道中的时频重叠双信号的载波频率估计问题, 提出了一种基于二阶循环累积量的载波频率估计方法。

2 信号模型与算法推导

2.1 信号模型

本文研究时频重叠双信号, 采用如下的信号模型:

$$r(t) = s_1(t) + s_2(t) + n(t) = \sum_{k1} a_{k1} \sqrt{E_{k1}} p(t - kT_{s1}) \exp(j2\pi f_{c1}t + j\theta_{c1}) + \sum_{k2} a_{k2} \sqrt{E_{k2}} p(t - kT_{s2}) \exp(j2\pi f_{c2}t + j\theta_{c2}) + n(t)$$

$$p(t) = \begin{pmatrix} \sin(\pi t/T_{si}) \\ \pi t/T_{si} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\pi \alpha t/T_{si}) \\ 1 - (2\alpha t/T_{si})^2 \end{pmatrix}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

其中, $k=1,2,\dots,N$, N 为发送码元序列的长度; a_{ki} 为发送码元序列; T_{si} 为码元宽度; f_{ci} 为载波频率; θ_{ci} 为载波相位; E_i 为信号的能量; $p(t)$ 为发送码元采用的升余弦脉冲波形; α 为滚降系数; $n(t)$ 为零均值的复高斯白噪声, 且与信号 $s_i(t)$ 独立。

对于不同的调制方式, a_{ki} 有不同的形式, 具体如下:

(1) MPSK

$$a_k \in \{\exp[j2\pi(m-1)/M], m=1,2,\dots,M\} \quad (2)$$

(2) MQAM

$$r(t) = \sum_k \sqrt{E} (a_k + jb_k) p(t - kT_s) \exp(j\Delta\theta) + n(t) \quad (3)$$

其中, 当 $M=16$ 时, $a_k, b_k \in \{-3, -1, 1, 3\}$; 当 $M=16$ 时, $a_k \in \{-3, -1, 1, 3\}, b_k \in \{-1, 1\}$ 。

2.2 算法推导

数字通信信号的突出特点为具有循环平稳性, 循环累积量已成为分析数字通信信号的一种有效信号处理工具。二阶循环累积量在理论上可渐进地抑制任何平稳高斯或非高斯噪声以及非平稳的高斯噪声^[4], 因此, 在二阶循环累积量在一定程度上可以得到较高的信噪比, 从而有利于信号相关的参数估计^[5]。

循环平稳信号 $x(t)$ 的 k 阶循环矩可表示为:

作者简介: 龚牡丹(1986—), 女, 硕士研究生, 主研方向: 认知无线电, 数字信号处理; 郭荣辉, 副教授

收稿日期: 2011-03-10 **E-mail:** gongmudan1986@163.com

$$M_{kx}^{\alpha}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} x(t)x(t+\tau_1) \cdots x(t+\tau_{k-1}) e^{-j2\pi\alpha t} = < x(t)x(t+\tau_1) \cdots x(t+\tau_{k-1}) e^{-j2\pi\alpha t} >_t \quad (4)$$

其中, k 为循环矩的阶数; α 为循环频率; T 为信号平均时间长度; N 为时间 T 内的数字信号采样点数。

n 阶时变累积函数可表示为:

$$C_{kx}^{\alpha}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \sum_{\bigcup_{p=1}^q I_p = I} [(-1)^{q-1} (q-1)! \prod_{p=1}^q M_{kx}^{\alpha}(\tau_{I_p})] \quad (5)$$

其中, 集合 $I = \{1, 2, \dots, n\}$, I_j 表示集合 I 的无交连的非空分割, 分割数为 q 。 $x(t)$ 在循环频率 α 处的 n 阶循环累积量可表示为:

$$C_{kx}^{\alpha}(\tau) = < C_{kx}^{\alpha}(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} >_t \quad (6)$$

信号模型如式(1)所描述, 假设 f_{c1} 、 f_{c2} 分别为 2 个信号的载波频率, 2 个信号和噪声是相互独立的。由于噪声的二阶循环累积量可以忽略, 并且根据文献[1]的结论, 可得:

$$C_{2r}^{\alpha}(\tau) = C_{2s}^{\alpha}(\tau) + C_{2n}^{\alpha}(\tau) = C_{2s}^{\alpha}(\tau) \quad (7)$$

$$C_{2r}^{nf_{c1}}(0) = C_{2s}^{nf_{c1}}(0) \quad (8)$$

$$C_{2r}^{nf_{c2}}(0) = C_{2s}^{nf_{c2}}(0)$$

从而可得时频重叠信号载波频率估计的步骤如下: (1)从接收信号中取长度为 L 的样本, 计算信号频谱。(2)采用自适应方式计算信号有效的频谱范围。(3)计算信号在频率范围内的二阶循环累积量。(4)通过提取峰值来估计信号的载波频率。

3 仿真结果及分析

为从不同的侧面验证该算法的性能, 按上文的理论分析和载波估计算法, 本文对算法进行了实验仿真。假设 2 个信号的功率相等, 2 个信号和噪声之间是相互独立的, 成形脉冲采用滚降系数为 0.35 的升余弦脉冲, 仿真中采用平稳高斯白噪声序列作为观测噪声模型。信噪比定义为双信号的能量总和与信号带内噪声能量的比值。信号的调制方式为 BPSK、QPSK、8QAM、16QAM 中的任意一种。各组仿真均进行了 100 次 Monte Carlo 实验。

图 1 表示 BPSK 和 QPSK 混合信号的频谱, BPSK、QPSK 信号的载波频率分别为 5.0×10^3 Hz 和 5.2×10^3 Hz。根据图 1 的数据并利用自适应方法, 确定有效的频率范围。

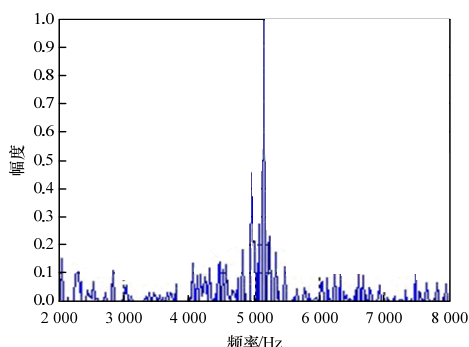


图 1 BPSK 和 QPSK 混合信号的频谱

图 2 表示 BPSK 和 QPSK 混合信号的二阶循环累积量, 结果表明, 该算法能有效地检测出重叠双信号的载波频率。

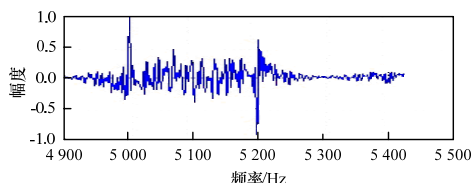


图 2 BPSK 和 QPSK 混合信号的二阶循环累积量

表 1 显示了不同调制方式组合在不同信噪比处的载波估计性能, 采用的数据长度为 10 000。由于篇幅有限, 仅选取部分数据罗列。结果表明, 该算法在信噪比不低于 -5 dB 时, 载波估计的准确率高于 95%; 在信噪比不低于 -15 dB 时, 载波估计的准确率高于 90%。

表 1 不同调制方式组合的载波估计性能 (%)

调制方式组合	准确率			
	信噪比为 -20 dB	信噪比为 -15 dB	信噪比为 -5 dB	信噪比为 5 dB
BPSK+QPSK	87.38	93.29	99.45	99.64
QPSK+8QAM	85.61	90.96	96.37	96.37
8QAM+16QAM	85.06	93.01	98.03	98.28

图 3 显示了数据采样长度对载波估计性能的影响, 采样数据长度分别为 2 000、5 000 和 10 000。结果表明, 随着信噪比的增加或者采样数据的长度的增加, 载波估计的性能也将随之提高。其原因是, 随着采样数据的长度增加, 二阶循环累积量的误差将减少, 该算法的性能将会有所提高。

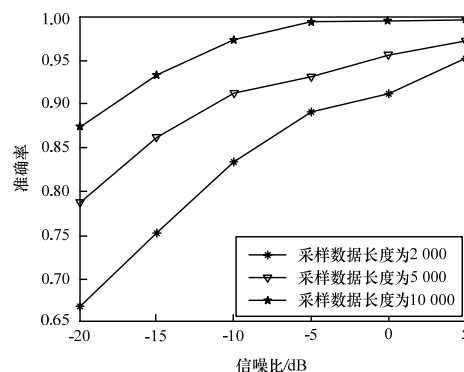


图 3 数据采样长度对载波估计性能的影响

图 4 显示了载波间隔对载波估计性能的影响。载波间隔分别是 50 Hz、200 Hz 和 300 Hz。实验结果表明, 随着载波间隔的增加, 载波估计性能也将随之提高。

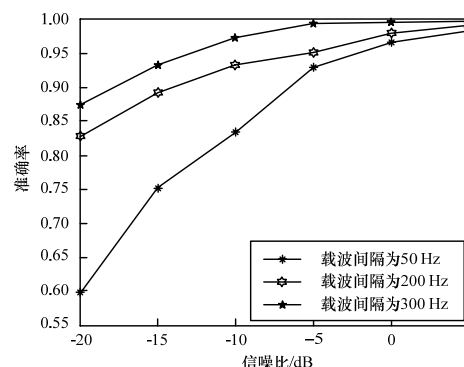


图 4 载波间隔对载波估计性能的影响

该算法与同类算法相比, 在不对时频重叠混合信号进行分离的情况下, 能识别 4 种调制方式组合而成的混合信号的载波频率。与采用高阶循环累积量来估计载波频率的算法相比, 算法复杂度较低。同时, 该算法先计算信号的频谱, 作为二阶循环累积量的估计范围, 这也减少了算法的运算量。

4 结束语

目前, 在双信号共存的情况下, 不对信号进行分离而直接估计载波频率的算法较少。为此, 本文提出一种基于二阶循环累积量的载波估计算法。仿真结果表明, 当采样点数增加和信号间的载波间隔增大时, 载波估计性能也随之提高。

(下转第 86 页)

15 个、20 个、25 个, 在 100 s 时开始随机抽取网络节点任意修改其 ID。每个通信节点都在模拟的前 10 s 内随机选择一个时间开始发送数据包, 模拟场景的时间为 1 000 s, 从 50 s 开始记录。分别对 AODV 协议和利用 BA 改进后的 BAODV 协议进行仿真。每种场景进行 10 次模拟, 取平均值作为最终数据。选取数据包传输率、路由开销、路由获取时延 3 个参数进行比较, 结果见图 6~图 8。通过仿真数据的对比, 可以得到如下结论: BAODV 协议在部分网络节点失效的情况下, 在数据传输率、路由开销以及路由获取时延 3 个方面表现均优于 AODV 协议, 数据传输的可靠性强于 AODV 协议。由此可见, BAODV 协议的可靠性优于 AODV 协议, 利用 BA 改进后的 BAODV 协议可靠性得到了提升。

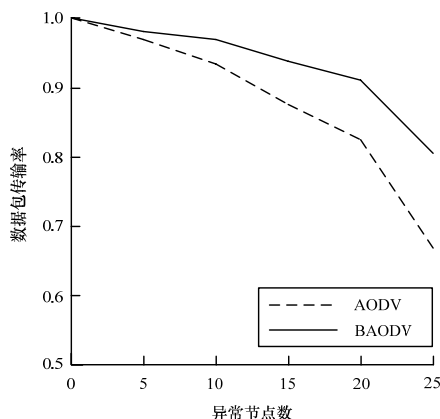


图 6 异常节点对数据包传输率的影响

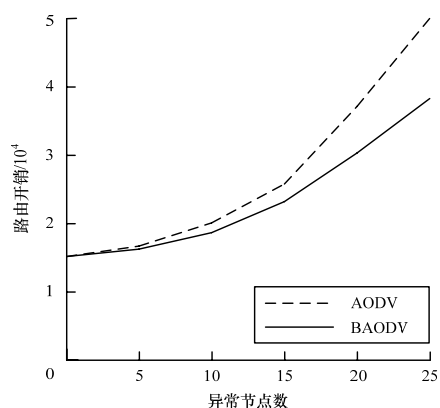


图 7 异常节点对路由开销的影响

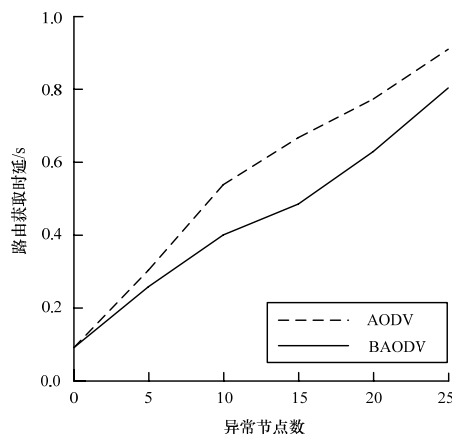


图 8 异常节点对路由获取时延的影响

6 结束语

在提高了无线 Mesh 网络可靠性的同时, 本文提出的拜占庭原理的应用方式带来了如下问题: 为获得最好的容错效果, 无线 Mesh 网络适用结构受限; 带来了额外的网络开销; 提出的 BA 只针对无线 Mesh 网络骨干节点。在今后的研究工作中, 将同时考虑无线 Mesh 网络用户节点的容错处理, 进一步降低拜占庭原理应用带来的负面影响。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Wang Xudong, Wang Weilin. Wireless Mesh Networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.
- [2] Lamport L, Shostak R, Pease M. The Byzantine Generals Problem[J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems, 1982, 4(3): 382-401.
- [3] 胡荣磊, 李 然, 李兆斌, 等. 基于可信计算的 Ad Hoc 网络认证方案[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 146-148.
- [4] 焦传熙, 高志伟. 拜占庭容错机制在 P2P 网络安全中的应用[J]. 石家庄铁道学院学报, 2009, 22(1): 66-71.
- [5] 赵蕴龙, 单宝龙, 高振国, 等. 无线 Mesh 网骨干层 2——终端可靠性计算策略[J]. 计算机学报, 2009, 32(3): 424-431.
- [6] 王吉喆. 无线 Mesh 网可靠路由技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

编辑 陆燕菲

(上接第 82 页)

在多信号情况下, 也可利用调制信号的循环平稳特性对信号的其他调制参数进行识别, 如调制类型、码元速率等。下一步将研究调制信号的循环平稳特性, 将其应用于认知无线电频谱感知领域, 并对调制信号循环平稳特性的工程估计算法进行研究和优化, 以提高运算速度。

参考文献

- [1] 郑文秀, 赵国庆, 罗 明. 基于循环累积量的星形 QAM 载波盲估计[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(2): 233-235.

- [2] 刘 玲, 曾孝平, 曾 浩. 基于奇异值的信源数估计方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(12): 34-37.
- [3] 康 浚, 肖 明. 频域单源区间和欠定的盲信号分离[J]. 计算机工程, 2009, 35(12): 269-271.
- [4] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 郭黎利, 李矿代, 石荣登. 单信道时频重叠双信号的码速率估计方法[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(1): 1-5.

编辑 金胡考