

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.011

基于数值拟合的 PCMA 系统自干扰信号幅度估计算法^{*}

才昀成^{**},马正新,王毓晗

(清华大学 电子工程系,北京 100084)

摘 要:针对卫星成对载波复用(PCMA)系统中的自干扰信号,提出基于数值拟合方法的幅度估计算法,并对其性能进行了分析。该算法适用于非对称和对称 PCMA 系统,可以有效抵消自干扰信号与有用信号互相关项不为零引起的误差,并且不会引入相位噪声,更符合工程应用实际。仿真结果表明,在干信比为12 dB的非对称 PCMA 系统中,该算法仍能获得较好的幅度估计精度,信噪比损失始终在0.1 dB左右。

关键词:卫星通信系统;成对载波复用;非对称 PCMA;幅度估计;数值拟合

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0730-05

Amplitude Estimation Based on Numerical Fitting of Interference Signal in PCMA Systems

CAI Yun-cheng, MA Zheng-xin, WANG Yu-han

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

Abstract: A new amplitude estimation algorithm based on the numerical fitting in Paired Carrier Multiple Access (PCMA) satellite communication systems is proposed in this paper. The algorithm is applicable to both the asymmetric and symmetric PCMA systems. It can offset the error caused by the non-zero cross-correlation term without introducing phase noise, which is more corresponded to engineering practice. Simulation results show that the proposed algorithm can still achieve high estimation accuracy in the asymmetric PCMA system even when the interference to signal ratio is 12 dB, and the signal to noise ratio loss is always about 0.1 dB.

Key words: satellite communication system; paired carrier multiple access (PCMA); asymmetric PCMA; amplitude estimation; numerical fitting

1 引 言

卫星成对载波复用(PCMA)由 Viasat 于 1998 年提出^[1],这项技术可使两个地球站在同一时间使用相同频带实现通信,从而达到频率资源倍增;同时通信双方信号相叠加,使系统本身具有更好的保密特性。PCMA 技术基于两项基本假设:首先,由于通信双方上行频率相同,每个终端自身的发送信号同时被接收;其次,卫星的工作状态为透明转发,实现简单的功率放大和频率搬移。大部分的卫星通信系统

均满足以上这两项假设。

PCMA 系统的技术关键是自干扰信号参数估计,包括幅度、相位、载波频偏、传输延时以及信道响应等。在非对称 PCMA 系统中,特别是干扰信号功率远大于有用信号功率时,干扰信号幅度估计精度要求更高。目前,信号幅度估计方法包括极大似然法、傅里叶谱分析法、高阶差分法、自适应干扰对消法等。黄晓红等人提出了基于全相 FFT 谱分析的信号参数估计方法^[2];吴杰康等人提出了基于数值差分和中央拉格朗日差值的正弦信号参数估计方法^[3];对于干扰信号比特信息完全已知的 PCMA 系

^{*} 收稿日期:2013-01-23;修回日期:2013-04-07 Received date:2013-01-23;Revised date:2013-04-07
^{**} 通讯作者:laopiao04@gmail.com Corresponding author: laopiao04@gmail.com

统,田文科等人提出了基于自适应可变遗忘因子(VFF) RLS 算法^[4],克服了频偏误差的影响,抵消效果较好,但由于在干扰抵消过程中接收信号需经过自适应滤波器,因此该算法会引入一定的相位噪声;潘申富等人给出了干扰信号幅度估计的克拉美罗不等式,提出了基于极大似然法的干扰信号幅度一致无偏估计,同时给出了基于判决反馈的迭代算法^[5]。在对称 PCMA 系统中,这种迭代算法的估计精度接近克拉美罗界,性能较好;同时,干扰抵消过程采用接收信号与重构干扰信号相减的方式,不改变有用信号的相频特征,因此这种算法不会引入相位噪声。基于极大似然幅度估计方法的前提是干扰信号载波频差和初始相位完全补偿,同时忽略有用信号与自干扰信号的互相关项,但在非对称 PCMA 系统中,特别是自干扰信号功率远大于有用信号功率时,由互相关项不为零引入的误差量相比有用信号已经不能忽略,此时对有用信号判决的误比特率较大,基于迭代的幅度估计算法造成有用信号的信噪比损失较大。

本文从 PCMA 系统模型出发,针对非对称 PCMA 系统中自干扰信号功率远大于有用信号功率的特征,提出了一种基于数值拟合的自干扰信号幅度估计算法,并进行了仿真分析。仿真结果表明,该算法可以在一定程度上修正由于自干扰信号与有用信号互相关项不为零造成的误差,在不引入相位噪声的前提下实现幅度估计,并适用于对称、非对称 PCMA 系统。

2 信号模型

在 PCMA 系统中,以 BPSK 为例,地面终端接收信号可以表示成

$$r(t) = As_1(t) + Bs_2(t) + n(t) \tag{1}$$

其中, $s_1(t)$ 为本地信号经过信道传输到达接收端的自干扰信号, $s_2(t)$ 为通信对端信号即有用信号, s_1 与 s_2 统计独立,且在统计时间内具有单位功率。 A 和 B 分别为自干扰信号与有用信号幅度; $n(t)$ 为噪声信号,假设其功率谱密度为 N_0 , 方差为 σ^2 。考虑到存在载波频偏和相差等因素,接收信号 $r(t)$ 可以表示成

$$r(t) = As_1(t - \tau_1)e^{j(2\pi\Delta f_1 t + \phi_1)} + Bs_2(t - \tau_2)e^{j(2\pi\Delta f_2 t + \phi_2)} + n(t) \tag{2}$$

其中, Δf_1 和 Δf_2 分别为干扰信号与有用信号的载波剩余频偏, ϕ_1 和 ϕ_2 分别是干扰信号和有用信号的载波初始相偏, τ_1 和 τ_2 分别是两路信号的传输

延时。PCMA 系统中干扰来源于自身发送信号,比特信息完全已知。整个系统实现过程如图 1 所示。在非对称工作模式中,当主站信号功率远大于小站信号功率时,在主站接收端有 $A \gg B$,即干扰信号强度远大于有用信号强度,此时,对干扰信号的参数估计需要更加准确;在小站接收端有 $A \ll B$,此时干扰信号强度远小于有用信号强度,对干扰信号的参数估计无需过于精准即可实现有用信号正常解调。

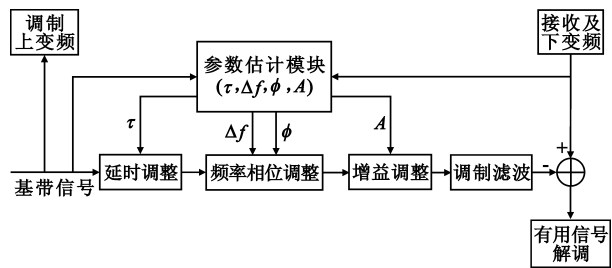


图 1 PCMA 系统处理过程示意图
Fig.1 Block diagram of PCMA modem

定义经过采样后的接收信号与本地已知基带信号的相关结果为

$$\begin{aligned} \lambda_1(m) &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [As_1(k - \tau_k)s_1(k - m)\cos(2\pi\tilde{\Delta f}_1 k + \Delta\phi_1) + \\ &\quad \tilde{B}_{21}(k)s_1(k - m) + n_1(k)s_1(k - m)] \\ \lambda_Q(m) &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [As_1(k - \tau_k)s_1(k - m)\sin(2\pi\tilde{\Delta f}_1 k + \Delta\phi_1) + \\ &\quad \tilde{B}_{2Q}(k)s_1(k - m) + n_Q(k)s_1(k - m)] \end{aligned} \tag{3}$$

其中, s_1 为 BPSK 调制信号的基带信号, $\tilde{s}_{21}$ 和 $\tilde{s}_{2Q}$ 分别为等效有用信号的 I 路和 Q 路, n_1 和 n_Q 分别是等效噪声信号的 I 路和 Q 路。这里 $\tilde{\Delta f}_1 = \Delta f_1 \cdot N/f_s$, 其中 N 为过采样率, f_s 为采样频率。

为抵消相位偏差造成的影响,取 λ_1 和 λ_Q 的平方和,忽略其中的互相关项,假设同步模块已经得到准确的时延参数 τ_k ,令 $m = \tau_k$,得到相关函数 $\Lambda(\tau_k)$ 为

$$\begin{aligned} \Lambda^2(\tau_k) &= \lambda_1^2(\tau_k) + \lambda_Q^2(\tau_k) \approx \\ &\quad \frac{A^2}{M^2} \left\{ \left[\sum_{k=1}^M \cos(2\pi\tilde{\Delta f}_1 k + \phi_1) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. \left[\sum_{k=1}^M \sin(2\pi\tilde{\Delta f}_1 k + \phi_1) \right]^2 \right\} = \\ &\quad \frac{A^2}{M^2} \left| \sum_k \exp[j(2\pi\tilde{\Delta f}_1 k + \phi_1)] \right|^2 = \\ &\quad \frac{A^2}{M^2} \frac{1 - \cos 2\pi\tilde{\Delta f}_1 M}{1 - \cos 2\pi\tilde{\Delta f}_1} \end{aligned} \tag{4}$$

由式(4)可知,相关函数 $\Lambda^2(\tau_k)$ 与载波初始相差无关,只与自干扰信号幅度 A 、相关长度 M 和自干扰信号载波频偏 $\tilde{\Delta f}_1$ 有关,特别地,当 $\tilde{\Delta f}_1 = 0$ 时,

相关函数 $\Lambda^2(\tau_k) = A^2$ 。

定义观测时间内接收信号的平均功率 P_r 为

$$P_r = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N r(k)r^*(k) \approx A^2 + B^2 + \sigma^2 \tag{5}$$

当观测时间足够长,即 N 足够大时,平均功率 P_r 只与自干扰信号幅度 A 、有用信号幅度 B 和噪声方差 σ^2 有关。

3 基于数值拟合的幅度估计算法

文献[5]给出了 BPSK 调制系统中,在已获得自干扰信号载波频率和相位的精确估计的条件下,自干扰信号幅度的一致无偏估计,如下式:

$$\hat{A} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M r_k s_{1k} \tag{6}$$

考虑到 BPSK 调制系统初始相位旋转的影响,式(6)的估计结果可以等效为式(7)。可以证明,式(7)的估计也是一致无偏估计。

$$\hat{A} = \Lambda(\tau_k) = \sqrt{\lambda_1^2(\tau_k) + \lambda_Q^2(\tau_k)} \tag{7}$$

上式的估计误差 ΔA 主要来自于自干扰信号与有用信号的互相关项,假设载波频率偏差和初始相位偏差的估计完全准确,为便于计算,定义幅度估计平方误差为

$$\Delta A^2 \triangleq |A^2 - \hat{A}^2| = |A^2 - [\lambda_1^2(\tau_k) + \lambda_Q^2(\tau_k)]| = \left| \frac{2}{M} AB \sum_{k=1}^M s_1(k - \tau_k) [\tilde{s}_2(k) + n(k)] + \delta_{B,n} \right| \tag{8}$$

式(8)在一定程度上反映了估计误差的组成。其中, $\delta_{B,n}$ 为与干扰信号幅度 A 无关的互相关平方项,剩余项与相关长度 M 和干扰信号强度 A 有关。当相关长度固定时,有用信号与自干扰信号的互相关项不完全为零就会引入误差,并且随干扰信号幅度 A 的增大而增大。在非对称 PCMA 系统中,由于主站端自干扰信号功率远大于有用信号功率,系统对自干扰信号幅度估计的误差精度要求更高,式(7)的幅度估计方法难以满足精度要求。

为了消除由式(8)中互相关项不为零引入的误差,实现高精度的幅度估计,提出基于数值拟合的算法。在存在载波频偏和相偏的情况下,可利用式(4)进行估计,得到幅度估计结果为

$$\hat{A} = \Lambda \cdot \sqrt{\frac{M^2(1 - \cos 2\pi \Delta f_1)}{1 - \cos 2\pi \Delta f_1 M}} = \frac{\Lambda}{\sqrt{C}} \tag{9}$$

其中, C 的取值与自干扰信号的频偏 Δf_1 、符号速率 F_s 和相关长度 M 有关,其表达式为

$$C = (1 - \cos 2\pi \Delta f_1 M) / M^2 (1 - \cos 2\pi \Delta f_1)$$

当符号速率 F_s 一定时, M 的取值越大, C 和相关峰值 Λ 随 Δf_1 变小的速度就越快;而为了保证相关峰峰值精度, M 的取值又不宜过小。为避免这种情况,工程中可利用经验信息,先做固定频率补偿,选取定值 M ,保证相关峰峰值存在,同时不引入相位噪声。

令 $y = \Lambda^2 / P_r$,将式(4)和式(5)代入得到

$$y = \frac{\Lambda^2}{P_r} \approx \frac{\frac{A^2 1 - \cos 2\pi \Delta f_1 M}{M^2 1 - \cos 2\pi \Delta f_1}}{A^2 + B^2 + \sigma^2} = \frac{C}{1 + \sigma^2 / A^2 + B^2 / A^2} \tag{10}$$

令 $x = B^2 / A^2$,即信干比(SIR),则由上式可得

$$y = \frac{C}{m + x} \tag{11}$$

其中, $m = 1 + \sigma^2 / A^2$ 。为补偿由互相关项不为零引入的误差,设计拟合函数如下式:

$$y = \frac{c_1(\Delta f)}{c_2(\Delta f) + x} + c_3(\Delta f) \tag{12}$$

其中, c_1 、 c_2 和 c_3 为与频偏 Δf 有关的待拟合参数。基于数值拟合的幅度估计算法流程为

(1)离线拟合得到 $c_1(\Delta f)$ 、 $c_2(\Delta f)$ 、 $c_3(\Delta f)$ 参数表,其中 Δf 间隔取为 500 Hz;

(2)利用干扰信号实际频偏估计结果 Δf_1 查表及线性插值,得到实际拟合参数 c_1 、 c_2 和 c_3 ;

(3)利用式(5)计算接收信号总功率 P_r ,利用式

(4)计算相关峰峰值 Λ^2 ;

(4)由 $y = \Lambda^2 / P_r$ 计算得到 y ,代入式(12),得出 x 为

$$x = \frac{c_1}{y - c_3} - c_2 \tag{13}$$

(5)得到幅度估计结果为

$$\hat{A} = \sqrt{\frac{P_r}{1 + \frac{c_1}{y - c_3} - c_2}} \tag{14}$$

4 仿真结果

仿真选用 BPSK 调制方式,不失一般性,以实际卫星通信系统为基础,仿真参数选取如下:符号速率为 2.5 Mb/s,干扰信号初始相偏为 1,干扰信号频偏为 5 kHz,平方根升余弦滚降滤波器系数为 0.35,过采样率为 16,有用信号 E_b/N_0 (假设不发射干扰信号时)为 5 dB,相关比特长度为 128。参数的选取不会影响最终结果。

参数拟合曲线如图 2 所示,可以看出拟合效果

理想。对基于数值拟合的幅度估计算法进行性能仿真,假设准确估计频差和相差,PCMA 系统有用信号 E_b/N_0 随信干比变化的曲线如图 3 所示。取干扰信号功率比有用信号功率大 12 dB(非对称 PCMA 系统),幅度估计方差随干扰信号载波频偏变化曲线如图 4 所示。

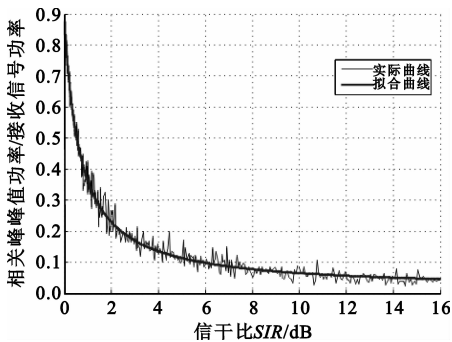


图2 频偏为 5 kHz 时参数拟合曲线

Fig.2 Parameter fitting curve with 5 kHz frequency offset

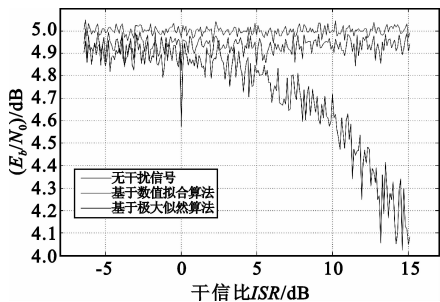


图3 PCMA 系统有用信号 E_b/N_0 性能仿真曲线

Fig.3 The desired signal E_b/N_0 performance in the PCMA system

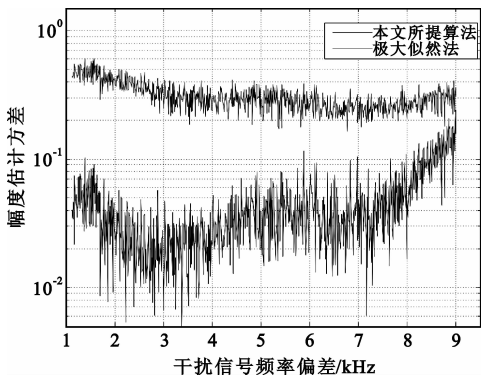


图4 幅度估计方差仿真曲线

Fig.4 The variance of amplitude estimation

图 3 的仿真结果表明,利用式(7)进行基于极大似然法的幅度估计,有用信号信噪比损失随着干扰信号功率增大而变大,当干扰信号功率比有用信号功率大 12 dB 时,文献[5]中的算法使非对称 PCMA 系统有用信号的信噪比损失达 1 dB 以上,这与式(8)的误差分析结果一致;而本文提出的基于数值拟合

的幅度估计算法不随干扰信号功率变大而恶化,在对称、非对称 PCMA 系统中,信噪比损失始终在 0.1 dB 左右。当自干扰信号的功率相对于有用信号较大时,本算法在估计精度上明显优于文献[5]中的算法,适用范围更广。

图 4 的仿真结果表明,在一定频率偏差范围内,本文提出的算法幅度估计精度不随频偏增大而恶化,而本算法是在干扰信号存在载波频差和初始相差的前提下进行幅度估计,对频率估计和相位估计模块要求不高,更有利于工程实现和后续有用信号解调。

5 结束语

本文研究了卫星成对载波复用(PCMA)系统中自干扰信号的幅度估计问题,通过分析基于极大似然法幅度估计的误差组成,利用非对称 PCMA 系统中自干扰信号功率较大的特征,通过理论推导建立用于幅度估计的拟合函数,进而提出基于数值拟合的幅度估计新算法,并对算法进行了性能仿真与分析。与传统基于极大似然自干扰信号幅度估计算法相比,本算法可以有效修正非对称 PCMA 系统中由自干扰信号与有用信号互相关项不为零引入的误差,使系统信噪比损失不随干扰信号功率的增大而增大,算法适用范围更广;同时,本算法的拟合过程离线进行,抵消自干扰信号的过程中不会引入相位噪声,更符合工程应用实际。

参考文献:

- [1] Dankberg M. Paired Carrier Multiple Access (PCMA) for Satellite Communications [C]// Proceedings of 1998 Pacific Telecommunications Conference. Honolulu, Hawaii; IEEE, 1998:322 – 329.
- [2] Huang X D, Wang Z, Huo G Q. New method of estimation of phase, amplitude, and frequency based all phase fft spectrum analysis [C]//Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Xiamen; IEEE, 2007:284 – 287.
- [3] Wu J K, Long J, Liang Y. Estimation of frequency, amplitude and phase of sinusoidal signals [C]//Proceedings of 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Ajaccio, France; IEEE, 2004:353 – 356.
- [4] 田文科,王剑,山秀明. PCMA 自适应自干扰抵消算法与仿真[J]. 电讯技术, 2011, 51(9): 78 – 82.
TIAN Wen-ke, WANG Jian, SHAN Xiu-ming. Adaptive Interference Cancellation for Paired Carrier Multiple Access[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51 (9): 78 – 82. (in Chinese)
- [5] 潘申富,白栋,依那,等. 成对载波多址系统中干扰信

- 号幅度的估计[J].真空电子技术,2003,21(2):21-24.
- PAN Shen-fu, BAI Dong, YI Na, et al. Estimation of interference amplitude in PCMA system[J]. Vacuum Electronics, 2003, 21(2): 21-24. (in Chinese)
- [6] 公博, 郭庆. PCMA 系统自干扰频率估计新算法[J]. 通信技术, 2010, 43(11): 37-38.
- GONG Bo, GUO Qing. A Novel Self-Interference Frequency Estimation Algorithm in PCMA Systems[J]. Communications Technology, 2010, 43(11): 37-38. (in Chinese)
- [7] 万坚, 李明, 朱中梁. 一种新型卫星多址方式的分离新算法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1799-1869.
- WAN Jian, LI Ming, ZHU Zhong-liang. A Novel Separation Algorithm of A New Multiple Access Mode in Satellite[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1799-1869. (in Chinese)
- [8] 徐彬, 芮国胜, 陈必然. 一种单天线同频混合信号幅度的估计算法[J]. 电讯技术, 2011, 51(10): 20-23.
- XU Bin, RUI Guo-sheng, CHEN Bi-ran. An Amplitude Estimation Algorithm for Co-frequency Mixture with Single Antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 20-23. (in Chinese)

作者简介:



才昀成(1986—),男,黑龙江黑河人,2008年于清华大学电子工程系获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信和卫星通信;

CAI Yun-cheng was born in Heihe, Heilongjiang Province, in 1986. He received the B. S. degree in 2008. He is now a graduate student. His research interests include wireless communications and satellite communications.

Email: laopiao04@gmail.com.

马正新(1969—),男,湖南长沙人,副教授,主要研究方向为无线通信和卫星通信;

MA Zheng-xin was born in Changsha, Hunan Province, in 1969. He is now an associate professor. His research interests include wireless communications and satellite communications.

王毓晗(1977—),男,北京人,工程师,主要研究方向为无线通信和卫星通信。

WANG Yu-han was born in Beijing, in 1977. He is now an engineer. His research interests include wireless communications and satellite communications.