

一种改进的非数据辅助 SNR 估计算法研究

杨 俊 江 虹 张秋云

(西南科技大学信息工程学院 绵阳 621010)

摘 要 针对几种现有的非数据辅助信噪比估计算法对 QPSK 信号的信噪比估计性能较差的问题,提出了一种改进的低复杂度信噪比估计算法,以提高信噪比估计的估计范围和精度。改进算法首先将接收信号分为同相和正交两路信号;然后充分利用每路信号的过采样率信息,在每个过采样周期内对两路信号分别进行数据统计处理;最后根据处理得到的均值和方差信息获得信噪比估计值。仿真结果表明,该算法在 $-15 \sim 30$ dB 信噪比范围内具有较小的估计偏差和估计均方误差,其估计性能明显优于现有其它算法。

关键词 非数据辅助,信噪比估计,QPSK 信号,数据统计,估计性能

中图分类号 TN911.6 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.014

Improved Non-data-aided SNR Estimation Algorithm

YANG Jun JIANG Hong ZHANG Qiu-yun

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract To solve the problem of low signal-to-noise ratio (SNR) estimation performance of several existing Non-data-aided (NDA) estimation algorithms for quadrature phase shift keying (QPSK) signal, this paper proposed an improved low complexity SNR estimation algorithm to improve the estimation precision and estimation range. Firstly, the proposed algorithm divides the received signal into in-phase channel and orthogonal channel. Then, this algorithm takes full advantage of information of over-sampling rate and makes data statistic processing for the two channel signals in per over-sampling period respectively. Finally, the SNR value is estimated according to the calculated mean value and variance of each channel signal. Simulation results show that the improved algorithm has low estimation bias and mean-squared-error (MSE) when the SNR value is in the range of -15 to 30 dB, and thus has better estimation performance than other existing algorithms obviously.

Keywords Non-data-aided, SNR estimation, QPSK signal, Data statistic, Estimation performance

1 引言

信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)是衡量信道质量最主要的指标^[1]。信道的信噪比估计对于蜂窝网络、卫星遥测等通信系统来说是非常重要的,一方面,通过信噪比估计可以自适应地采用更有效的解调算法来提高解调性能;另一方面,信噪比估计为功率控制算法、信道分配算法以及自适应调制算法等提供了所需的信道质量信息^[2-4]。

信噪比估计一直是无线通信领域的一个研究热点,国内外相关研究人员对信噪比估计技术做了大量研究。目前,信噪比估计算法可大致分为两类:一类是数据辅助(Data-Aided, DA)估计算法,其需要传输数据的先验知识,即发送端发送特定的已知序列,接收端比较已知的序列和接收到的序列来获取信噪比信息^[5];另一类是非数据辅助(Non-Data-Aided, NDA)算法,该算法只需利用接收数据便可对信噪比进

行盲估计^[5,6]。DA 估计算法的缺点是占用额外的带宽来发送已知序列,通常不被采用^[7]。对于 NDA 信噪比估计算法,文献[8]设计了 4 种信噪比估计器,但 4 种估计器的估计误差均较大;文献[9]结合接收信号的高阶特性,提出了一种二阶四阶矩($M_2 M_4$)信噪比估计算法,其提高了算法在高信噪比条件下的估计精度;文献[10]采用数据拟合方法,通过多项式运算估计信噪比值,但该算法只在拟合区间具有较好的性能,且接收数据长度对估计精度有较大影响;文献[11]利用接收信号的概率密度函数对信噪比进行估计,提出了一种误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)信噪比估计算法,该算法对较高信噪比估计比较精确,在低信噪比条件下估计性能较差;文献[12]根据接收信号的自相关特性,采用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)法估计信噪比,虽然扩大了估计范围,但该信噪比估计算法总体表现为估计误差较大,且算法复杂度高,不易于工程实现。

到稿日期:2016-01-12 返修日期:2016-04-02 本文受国家自然科学基金项目(61379005, 10zg2117),中物院网络与信息安全重点实验室资助项目(2014-w10)资助。

杨 俊(1992—),男,硕士生,主要研究方向为通信与信息处理、嵌入式技术, E-mail: yang_jun1219@163.com;江 虹(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为通信与信息处理、认知无线电技术、无线组网测控技术;张秋云(1988—),男,硕士,助教,主要研究方向为通信与信息处理、智能控制。

本文以 QPSK 信号为例,在加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道下,研究了四种典型的信噪比估计算法,并在文献[11]提出的 EVM 估计算法上进行改进。仿真实验表明,该算法有效克服了上述已有信噪比算法估计精度低和估计范围窄的缺点。

2 典型信噪比估计算法

2.1 信号模型

本文所述 NDA 估计算法都基于图 1 所示的信号传输模型进行信噪比估计算法研究。

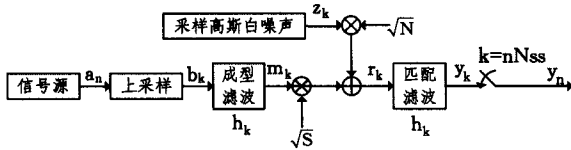


图 1 信号传输模型

信号 a_n 通过上采样 (采样率为 N_s) 及成型滤波后经过 AWGN 信道,设定信号功率为 S ,噪声功率为 N ,则接收端在 k 时刻接收到的信号可以表示为:

$$r_k = \sqrt{S}m_k + \sqrt{N}z_k, k=1, 2, \dots, N_s \times L$$

其中, L 为信号 a_n 的长度。当 a_n 为 QPSK 信号时,可将其等效为复信号,即 $m_k = m_{I,k} + jm_{Q,k}$, $m_{I,k}$ 为同相分量, $m_{Q,k}$ 为正交分量, z_k 为零均值的复高斯白噪声信号。所以, r_k 可重新表示为:

$$r_k = \sqrt{S}(m_{I,k} + jm_{Q,k}) + \sqrt{N}(z_{I,k} + jz_{Q,k}), k=1, 2, \dots, N_s \times L$$

最后,在 n 时刻经过下采样 (采样率为 N_s) 后的接收数据 y_n 可表示为:

$$y_n = y_{n,I} + jy_{n,Q}, n=1, 2, \dots, L$$

其中, $y_{n,I}$ 为接收数据的同相分量, $y_{n,Q}$ 为接收数据的正交分量。

2.2 现有 NDA 估计算法

下面给出针对 QPSK 信号现有的几种典型信噪比估计算法。对于文献[8]提出的 4 种估计算法,经过分析比较得出第 2 种算法 (简称算法 1) 的估计性能最优,其信噪比估计式为:

$$\hat{SNR} = L \left(\sum_{n=1}^L \frac{(|y_{n,I}| - |y_{n,Q}|)^2}{y_{n,I}^2 + y_{n,Q}^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

其中, $\hat{SNR}$ 为信噪比估计值。

文献[9]提出的二阶四阶矩估计算法 (简称算法 2) 利用接收信号的二阶矩 M_2 和四阶矩 M_4 完成信噪比的估计,其中, $M_2 = E\{y_n y_n^*\}$, $M_4 = E\{(y_n y_n^*)^2\}$ 。其信噪比估计表达式为:

$$\hat{SNR} = \frac{\sqrt{2M_2^2 - M_4}}{M_2 - \sqrt{2M_2^2 - M_4}} \quad (2)$$

由于直接计算 M_2 和 M_4 的过程较为复杂,因此实际应用该算法时,常采用接收信号 y_n 的时间平均近似表示 M_2 和 M_4 ,即:

$$M_2 \approx \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L |y_n|^2, M_4 \approx \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L |y_n|^4$$

文献[10]提出的基于数据拟合的信噪比估计算法 (简称算法 3),在一定待估计信噪比范围内,通过多项式建立真实信噪比与接收数据之间的关系,从而得到估计的信噪比。其

算法流程如下。

计算信噪比估计自变量:

$$z \approx \frac{y_{n,I}^2 + y_{n,Q}^2}{|y_{n,I}|^2 + |y_{n,Q}|^2}$$

信噪比估计值:

$$\begin{aligned} \hat{SNR} = & 10^4 (-0.41292958452235 \times z^5 + \\ & 2.66418532072905 \times z^4 - 6.86724072350538 \times \\ & z^3 + 8.84039993634297 \times z^2 - 5.68658561155135 \times \\ & z + 1.464045795143920) \end{aligned} \quad (3)$$

文献[11]提出的误差矢量幅值估计算法 (简称算法 4) 将接收信号的 I 、 Q 两路信号分为正负进行处理,其估计流程如下:

①判断 $y_{n,I}$ 和 $y_{n,Q}$ 的正负;

②在接收数据长度 L 内求出 $y_{n,I}$ 和 $y_{n,Q}$ 所有正值的均值

$mean$ 和方差 var ,并估计其信噪比 $\hat{SNR} = |mean|^2 / var$;

③同步步骤②,对 $y_{n,I}$ 和 $y_{n,Q}$ 所有负值进行信噪比估计,并将估计值与正值的估计值求平均以提高估计精度。

以上提到的 4 种算法主要存在以下缺点:文献[8]和文献[11]中提出的算法只在高信噪比条件下适用,当信噪比低于 5dB 时,其估计性能较差;虽然文献[13]在文献[11]的基础上对估计结果进行了分段处理,在不同的信噪比范围内对估计值进行取对数以及开方等运算,使得估计范围得到了一定扩张,但估计精度仍然较差,且增加了算法复杂度;文献[9]提出的算法在信噪比低于 3dB 时估计性能也较差,算法实现复杂度高;文献[10]由于是在一定范围内进行的数据拟合,因此其估计范围较窄,计算量也较大。

3 改进的信噪比估计算法

基于文献[11]的设计思想,本文设计了一种改进的 EVM 非数据辅助算法。分析上述 EVM 算法流程可以得出,该算法在信噪比较低时,未充分考虑在一个采样周期内噪声对信号幅度的影响。本算法利用采样前的信号 y_k 对信噪比进行估计,算法实现流程如下:

①根据式(4)得到 N_s 个符号内 $y_{n,I}$ 的均值:

$$I_{n,mean} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} y_{k,I} \quad (4)$$

②若 $I_{n,mean}$ 为正,则将 $I_{n,mean}$ 的值赋于二维数组 I 的第 n 行,其中二维数组 I 的列数固定为 N_s , $n=1, 2, \dots, L$;

③由式(5)、式(6)求出二维数组 I 的均值和方差:

$$mean(I) = \frac{1}{L \times N_s} \sum_{n=1}^L \sum_{k=1}^{N_s} I[n][k] \quad (5)$$

$$var(I) = \frac{1}{L \times N_s} \sum_{n=1}^L \sum_{k=1}^{N_s} [I[n][k] - mean(I)]^2 \quad (6)$$

然后由式(7)求出其信噪比估计值:

$$\hat{SNR} = |mean(I)|^2 / var(I) \quad (7)$$

④重复步骤②一步骤③,求出 $I_{n,mean}$ 为负时的信噪比估计值;同理,求出 $y_{n,Q}$ 对应的 $Q_{n,mean}$ 为正、负时的信噪比估计值。最后求出 4 个估计值的均值,以提高估计精度。

改进的 EVM 信噪比估计算法在较大范围 ($-15 \sim 30$ dB) 内估计精度较高,偏差小,且算法只涉及到对数据求均值和方差,复杂度低,易于工程实现。

4 仿真分析

本文采用 MATLAB 数学分析软件对所述典型信噪比估计算法以及改进算法进行仿真,并采用信噪比估计偏差 SNR_{bias} 以及信噪比估计均方误差 SNR_{mse} 衡量不同估计算法的性能。估计偏差和方差分别定义如下:

$$SNR_{bias} = E\{\hat{SNR} - SNR\}$$

$$SNR_{mse} = E\{(\hat{SNR} - SNR)^2\}$$

其中, SNR 为真实的信噪比。

仿真实验时,待估计 SNR 的范围设置为 $-15 \sim 30$ dB,并在同一 SNR 值下对不同算法分别进行 10 次仿真,然后对 10 次仿真获得的估计值求平均得到 $\hat{SNR}$ 的均值。信号长度 L 首先设为 500,采样率 N_s 设为 8,仿真得到的信噪比估计均值与理论值的关系如图 2 所示。

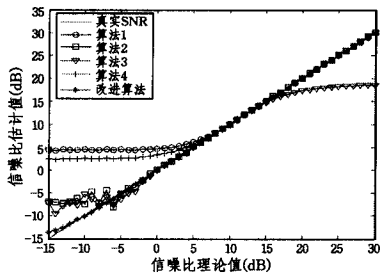


图2 信噪比估计均值与真实值的关系($L=500$)

相比于其它算法,改进的算法在给定的范围内具有更高的估计精度。为了更好地比较各算法的估计性能,图 3、图 4 分别给出了 $L=500$ 时各算法的估计偏差和估计均方误差。

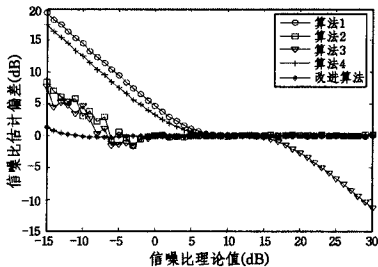


图3 信噪比估计偏差

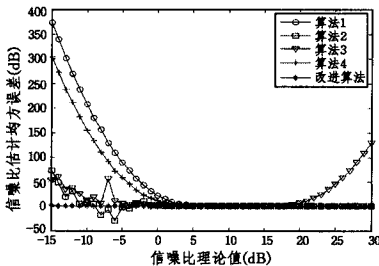


图4 信噪比估计均方误差

从仿真结果可以看出,改进的算法在估计偏差与估计均方误差上都明显优于其他几种算法。改进算法在信噪比大于 -5 dB 时,其估计偏差不超过 0.1 dB,说明该算法可近似看作无偏估计;在 $-15 \sim -5$ dB 之间,其估计偏差也较小,不超过 1.3 dB;在整个范围内,改进的算法都具有较小的均方误差,不超过 2 dB²。其中,算法 1 在信噪比大于 8 dB 时估计偏差与方差较小,在低信噪比条件下,估计误差呈指数上升,估计性

能较差;算法 2 在信噪比大于 1 dB 时估计性能较好,但在信噪比低于 1 dB 时,估计值出现较大波动,不适合于低信噪比估计;算法 3 在 $0 \sim 15$ dB 范围内具有较好的估计性能,但在该范围外,估计性能较差;算法 4 整体估计性能与算法 1 相似,主要表现为估计范围较窄。

由于本算法充分利用了过采样率 N_s 这一信息,为进一步研究 N_s 对改进算法性能的影响,本文在 N_s 为不同值($N_s = 2, 4, 8, 20, 40$)时对改进算法进行了仿真分析,结果如图 5 和图 6 所示。

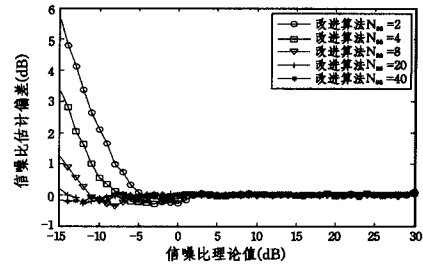


图5 不同 N_s 值下改进算法的估计偏差

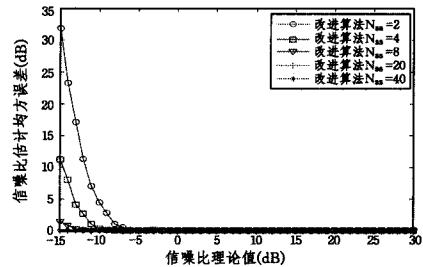


图6 不同 N_s 值下改进算法的估计均方误差

由图 5 和图 6 的仿真结果可以得到:在低信噪比条件下,不同的 N_s 值对改进算法具有较大影响,当信噪比大于 0 dB 时, N_s 值对估计值影响较小,整体表现为在整个估计范围内, N_s 值越大,估计性能越好。工程应用时,可根据实际情况选择不同的 N_s 进行估计。

结束语 针对几种现有的 NDA 信噪比估计算法估计精度低和估计范围窄的缺陷,本文在 EVM 算法的基础上提出的改进算法在大信噪比范围内都具有较高的精度,估计偏差较小,特别在低信噪比条件下,估计性能明显优于其它算法,且改进算法实现复杂度低,具有较强的实用性。

参考文献

- [1] Liu Yuan-yuan, Jiang Xue, Xie Xian-zhong, et al. An improved SNR estimation for BPSK signals and its FPGA implementation [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2014, 26(5): 630-635 (in Chinese)
刘源源,江雪,谢显中,等.一种改进的 BPSK 信噪比估计方法及其 FPGA 实现[J].重庆邮电大学学报(自然科学),2014,26(5):630-635
- [2] Fu Yong-ming, Zhu Jiang, Wang Shi-lian, et al. Robust Non-Dat-Aided SNR Estimation for Multilevel Constellations via Kolmogorov-Smirnov Test [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(10): 1707-1710

(下转第 104 页)

- wireless communications[J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2013, 4(2): 99-109
- [5] Zang Hong-yan, Min Le-quan, Zhao Geng. A generalized synchronization theorem for discrete-time chaos system with application in data encryption scheme[C]//Proceeding of the 2007 Int. Conf. on Communications. Konkuoka Japan; Circuit and Systems, 2007: 1325-1329
- [6] Liu Shu-tang, Zhang Fang-fang. Complex function projective synchronization of complex chaotic system and its applications in secure communication[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 76(2): 1087-1097
- [7] Sheikhan M, Shahnazi R. Synchronization of general chaotic systems using neural controllers with application to secure communication[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 22(2): 361-373
- [8] Min Le-quan, Chen Guo-rong. Generalized synchronization in an array of nonlinear dynamic systems with applications to chaotic cnn [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2013, 23(1): 1350016-1-1350016-53
- [9] Abdurahman K, Askar H, Guo Wen-qiang. Color image encryption using skew tent map and hyper chaotic system of 6th-order CNN [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(5): 1671-1675
- [10] Zhu He-gui, Zhao Cheng, Zhang Xiang-de. A novel image encryption-compression scheme using hyper-chaos and Chinese remainder theorem[J]. Signal Processing, 2013, 28(6): 670-680
- [11] Edi S, Suryadi M T, Agus M M. The implementation of henon map algorithm for digital image encryption [J]. Telkomnika, 2015, 12(3): 2775-2780
- [12] Guan Zhi-hong, Huang Fang-jun, Guan Wen-jie. A Chaos-based image encryption algorithm [J]. Physics Letters A, 2005, 346(1): 153-157
- [13] Wang Shi-hong, Kuang Jin-yu, Li Jing-hua, et al. Chaos-based secure communications in a large community [J]. Phys Rev E, 2002, 66(6): 65202
- [14] Wang Jing, Jiang Guo-ping. Cryptanalysis of a hyper-chaotic image encryption algorithm and its improved version [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(6): 83-93 (in Chinese)
王静, 蒋国平. 一种超混沌加密图像加密算法的安全性分析及改进[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 83-93
- [15] Zhu Cong-xu, Hu Yu-ping, Sun Ke-hui. New image encryption algorithm based on hyperchaotic system and ciphertext diffusion in crisscross pattern[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(7): 1735-1743 (in Chinese)
朱从旭, 胡玉平, 孙克辉. 基于超混沌系统和密文交错扩散的图像加密新算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1735-1743
- [16] Chen Jun-xin, Zhu Zhi-liang, Fu Chong, et al. A fast image encryption scheme with a novel pixel swapping-based confusion approach [J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 77(4): 1191-1207
- [17] Xu Dao-lin, Chin Y C, Li Chang-pin. A necessary condition of projective synchronization in discrete-time systems of arbitrary dimensions[J]. Chaos Solitons and Fractals, 2004, 22(1): 175-180
- [18] Liu Hong-jun, Wang Xing-yuan. Triple-image encryption scheme based on one-time key stream generated by chaos and plain images[J]. The Journal of Systems and Software, 2013, 86(3): 826-834
- [19] Liu Shu-bo, Sun Jing, Xu Zheng-quan. An improved image encryption algorithm based on chaotic system [J]. Journal of Computers, 2009, 4(11): 1091-1100
- [20] Fouda J S A E, Effa J Y, Samrat L S, et al. A fast chaotic block cipher for image encryption [J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2014, 19(3): 578-588
- [21] Liu Hong-jun, Abdurahman K. Asymmetric color image encryption scheme using 2D discrete-time map [J]. Signal Processing, 2015, 113(2): 104-112

(上接第 73 页)

- [3] Guo Bei-chen. Research on Self-adaptive Satellite Communication System Modulation Decision and Modulation Recognition Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese)
国北辰. 自适应卫星通信调制方式决策与识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
- [4] Liu Guang-zu, Wang Jian-xin. Improved SNR estimation technique for BPSK and QPSK signals[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 239: 994-999
- [5] Rice M. Data-Aided and Non-Data-Aided Maximum Likelihood SNR Estimators for CPM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4244-4253
- [6] Salman T, Badawy A, Elfouly T M, et al. Non-data-aided SNR Estimation for QPSK Modulation in AWGN Channel[C]//Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Larnaca: IEEE, 2014: 611-616
- [7] Xu Hua, Wang Ai-fen, Yang Xiao-yu. Survey of the SNR Estimation of Conventional Digital Communication Signals[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(6): 723-733 (in Chinese)
许华, 王爱粉, 杨晓宇. 常规数字通信信号信噪比估计综述[J]. 信号处理, 2013, 29(6): 723-733
- [8] Beaulieu N C, Toms A S, Pauluzzi D R. Comparison of four SNR estimators for QPSK modulations [J]. IEEE Communication Letters, 2000, 4(2): 43-45
- [9] Li Zhi-xin, Wu Nan, Shi De-sheng, et al. A Low Complexity SNR Estimation for QPSK Modulation in AWGN Channel[C]//Proceedings of the 8th International ICST Conference on Communications and Networking in China. Guilin: IEEE, 2013: 129-132
- [10] Xu Hua, Fan Long-fei, Zheng Hui. A precise SNR estimation algorithm for QPSK signals [J]. Journal on Communications, 2004, 25(2): 55-60 (in Chinese)
许华, 樊龙飞, 郑辉. 一种精确的 QPSK 信号信噪比估计算法[J]. 通信学报, 2004, 25(2): 55-60
- [11] Shin D J, Sung W, Kim I K. Simple SNR Estimation Methods for QPSK Modulated Short Bursts[C]//Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, 2001 (GLOBECOM'01). IEEE, 2001: 3644-3647
- [12] Wu Tao, Zheng Hai-xin, Yan Di, et al. A modified SNR estimation algorithm based on singular value decomposition[C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Information and Communications Technologies. Nanjing, China: IET, 2014: 1-5
- [13] Chen Chao, Xu Chang-chun, Wang Yue, et al. Research on an Improved Algorithm for SNR Estimation [J]. Radio Engineering, 2012, 42(2): 62-64 (in Chinese)
陈超, 徐长纯, 王玥, 等. 一种改进的信噪比估计算法[J]. 无线电工程, 2012, 42(2): 62-64