

基于似然比的码辅助Turbo迭代同步算法

赵旦峰¹, 朱铁林¹, 姜丁睿²

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001; 2. 中国石油管道公司 济南 250000)

【摘要】针对传统接收机在低信噪比环境中因同步损失而引起的Turbo码纠错性能恶化问题, 结合Turbo迭代机制, 提出基于对数似然比的最大似然比均值(MMLR)码辅助同步算法。首先采用改进的数据辅助方法, 将定时误差控制在一个码元周期内; 然后根据信号同步、失步时译码输出似然比分布差异, 反馈误差信息, 进行迭代相位估计。该算法充分发挥译码器的校正纠错功能辅助同步环节, 有效地提高了同步精度。最后针对最小移频键控(MSK)信号建立Turbo-MSK仿真模型。仿真结果表明, 在极低信噪比下, 该算法能够准确完成定时和相位估计, 获得与理想同步近似的可靠性性能。

关键词 码辅助; 数据辅助; 对数似然比; 信号同步; Turbo迭代

中图分类号 TN945.13

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.04.003

Code-Aided Turbo Iterative Synchronization Algorithm Based on Likelihood Ratio

ZHAO Dan-feng¹, ZHU Tie-lin¹, and JIANG Ding-rui²

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University Harbin 150001;

2. PetroChina Pipeline Company Jinan 250000)

Abstract In view of the error-correcting performance deterioration of Turbo codes due to the synchronization loss at low SNR environment, a code aided synchronization algorithm named maximum-mean likelihood ratio (MMLR) based on the log-likelihood ratio is proposed by combining with Turbo iterative mechanism. Firstly, improved data aided (DA) method is adopted to ensure the timing error less than one symbol period. And then error information is fed back according to the distribution of likelihood ratio. The iterative phase estimation is carried out. Since the decoder has the error correcting function, the synchronization accuracy of the algorithm is effectively improved. Turbo-minimum shift keying(MSK) simulation model is established. Simulation results show that the algorithm can accurately complete the timing and phase estimates and achieve the reliability close to that of ideal synchronization at very low SNR.

Key words code aided; data aided; likelihood ratio; signal synchronization; Turbo iteration

理想同步前提下, Turbo码^[1]在低信噪比环境中具有接近香农极限的优异性能。然而传统信号检测和同步装置在极低信噪比下产生的同步损失将引起Turbo编译码系统误码率性能急剧恶化。因此, 充分利用译码器输出的似然比对同步参数进行反馈校正成为同步技术的必然选择和发展趋势。

常用的载波参数估计包括锁相环法^[2]、插入导频法^[3]及最大似然估计(MLE)算法^[4]等。由于这些算法位于译码之前, 没有考虑码字特征及译码输出对同步性能的参考作用, 在低信噪比环境下同步精度受到了一定限制。近年来, 以Turbo迭代思想为指导,

一种码辅助(code-aided, CA)同步算法^[5]得到了广泛的关注。文献[6]提出基于EM(expectation-maximum)算法的载波相位、频率偏移和定时误差迭代估计方法, 将Turbo接收机与EM迭代算法相结合, 给出了Turbo同步的理论方案; 文献[7]则将EM算法与“和积”算法相结合, 设计了一种低复杂度、高性能的迭代同步方案; 文献[8]提出了Turbo编码系统的APPA(a priori probability aided phase estimation)算法, 以最大似然为准则用外信息辅助相位估计, 代替了传统的在译码之前完成同步的方法; 文献[9]针对Turbo编码提出软输出最大均方(M²S²O)载波同步

收稿日期: 2010-08-24; 修回日期: 2011-03-02

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 赵旦峰(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信道编码与调制技术等方面的研究。

算法, 但没有给出相对运算判决准则。本文采用DA算法, 利用已编码训练序列以最大似然准则进行定时同步, 由于对训练序列进行了信道编码, 可靠性显著提高。根据译码输出似然比在载波同步、失步情况下的分布差异, 以定时同步结果为起始时刻进行MMLR运算, 提出一种定时同步和载波同步为一体的码辅助迭代算法。仿真证明, 该算法有效提高了低信噪比下信号的同步精度。

1 系统模型及核心思想

本文建立的系统模型如图1所示。首先对信息序列添加训练序列送入编码模块, 信道编码采用典型的Turbo码结构, 调制方式选择包络恒定、频带利用率高的MSK^[10], 经加性高斯白噪声(AWGN)信道传输后, 在接收端采集到的信号可表示为:

$$y_n = e^{j\phi_n} x_n + w_n \quad (1)$$

式中, x_n 为单位能量的MSK符号; ϕ_n 为接收信号与本地载波的相位偏移; w_n 是均值为0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声样值。

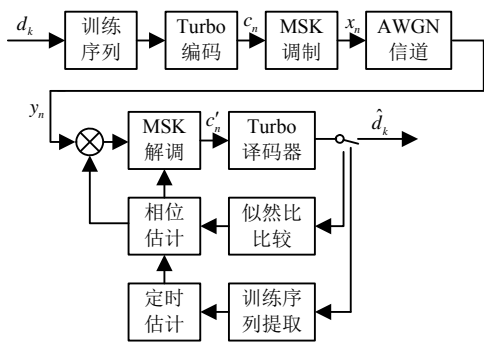


图1 码辅助信号同步模型

2 定时同步与ML估计

定时同步的任务是正确找出训练序列的起始位置, 即信号的到达时刻。本文采用最大似然准则对定时参数进行估计。对数域中似然函数表达式为:

$$\ln p(y, k) = \ln \left(\prod_{n=1}^{T_N} P(a_n = A_n) p(y | A_n, k) \right) \quad (2)$$

式中, k 为信号到达时刻; a 为发送的训练序列; T_N 为训练序列长度; A 为训练序列集合; $p(y | A_n, k)$ 可以表示为:

$$p(y | A_n, k) = \prod_{n=1}^{T_N} F(a_n, y_n(k)) \quad (3)$$

在AWGN信道下:

$$F(a_n, y_n(k)) = \exp \left\{ -\frac{E_s}{N_0} (2 \operatorname{Re}[a_n^* y_n(k)] - |a_n|^2) \right\} \quad (4)$$

使似然函数 $\ln p(y, k)$ 最大, 也即将式(2)对 k 求偏导有:

$$\frac{\partial}{\partial k} \ln p(y, k) = \sum_{n=0}^{T_N} \frac{P(a_n = A_n) p(y | A_n, k)}{p(y, k)} \frac{\partial}{\partial k} \ln p(y | A_n, k) \quad (5)$$

对定时时刻 k 的最大似然估计可以令 $\frac{\partial}{\partial k} \ln p(y, k) = 0$ 进行求解。

对于接收信号采样序列, 很难对式(5)直接进行求解。然而, 在Turbo码编码系统中, 译码通常采用最大似然的MAP类算法, 由此通过对训练序列编译码, 可以直接得到训练序列的似然值。同时, 依靠Turbo码优异的纠错性能, 使所得似然值准确度大幅度提高。

在AWGN信道下, 最大似然准则等价于最小距离准则^[11], 对于MAP译码器, 可以进一步转化为最小误比特率准则。

当定时误差大于一个码元宽度 T_c 时, 接收序列与原训练序列不相关, 等价于随机序列, 对于长度 T_N 的训练序列, 译码结果概率为:

$$P_f = \frac{1}{2^N} \quad (6)$$

则不同误码率 $\operatorname{ber}_f = \frac{\operatorname{noe}_f}{N}$ 出现的概率为:

$$P_{\operatorname{ber}}(\operatorname{ber}_f) = C_N^{\operatorname{noe}_f} \times P_f \quad (7)$$

假设 $\operatorname{ber}_f \leq \operatorname{ber}_{\operatorname{gate}}$ 时能够正确定时, 则正确定时概率为:

$$P_{\operatorname{time}}(\operatorname{ber}_{\operatorname{gate}}) = 1 - \int_0^{\operatorname{ber}_{\operatorname{gate}}} P_{\operatorname{ber}}(\operatorname{ber}_f) d\operatorname{ber}_f = 1 - \int_0^{\operatorname{ber}_{\operatorname{gate}}} P_{\operatorname{ber}}(C_N^{N \times \operatorname{ber}_f} \times P_f) d\operatorname{ber}_f \quad (8)$$

训练序列长度 T_N 分别为32、64和128时, 正确定时概率与 $\operatorname{ber}_{\operatorname{gate}}$ 的对应关系如图2所示。

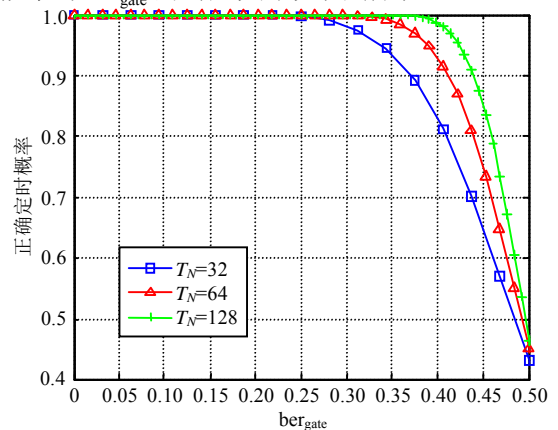


图2 正确定时概率的理论值

由图2看出,训练序列的长度和误码率门限的大小将直接影响正确定时的概率,而误码率门限的设置取决于系统信道环境。当 $\text{ber}_{\text{gate}} \leq 0.25$ 时,系统能正确完成定时同步。

定时误差影响信号起始时刻的估计准确程度,从而影响系统误码率。对于MSK正交解调,在理想同步时经低通滤波有:

$$(S_{\text{MSK}}(t) + w(t)) \cos \omega_s t \cos \left(\frac{\pi f_c t}{2} \right) \approx \frac{I_n}{4} \quad (9)$$

$$(S_{\text{MSK}}(t) + w(t)) \sin \omega_s t \sin \left(\frac{\pi f_c t}{2} \right) \approx \frac{Q_n}{4} \quad (10)$$

式中, ω_s 为载波角频率; $w(t)$ 为高斯白噪声; f_c 为符号速率; I_n 为同相分量; Q_n 为正交分量。考虑定时误差,式(9)和式(10)可变换为:

$$(w(t') + (S_{\text{MSK}}(t'') + w(t''))) \cos(\omega_s t + \Delta\phi) \cos \left(\frac{\pi f_c t}{2} \right) \approx \frac{I_{n''}}{4} \cos \Delta\phi \quad (11)$$

$$(w(t') + (S_{\text{MSK}}(t'') + w(t''))) \sin(\omega_s t + \Delta\phi) \sin \left(\frac{\pi f_c t}{2} \right) \approx \frac{Q_{n''}}{4} \cos \Delta\phi \quad (12)$$

式中, $t = [t' \ t'']$, t' 和 t'' 为信号到达前后的分段连续时刻,经积分, $I_{n''}$ 、 $Q_{n''}$ 分别为受到噪声影响后输出的解调分量,当 $\Delta\phi = 2i\pi$, $i = 0, 1, 2, \dots$ 时:

$$\frac{I_{n''}}{4} \cos \Delta\phi = \frac{I_{n''}}{4} \quad (13)$$

$$\frac{Q_{n''}}{4} \cos \Delta\phi = \frac{Q_{n''}}{4} \quad (14)$$

假设 $t' < T_c/2$, 系统能够根据频率比重以较大概率正确译码,而当 $\Delta\phi = (2i+1)\pi$, $i = 0, 1, 2, \dots$ 时,则解调结果全部取反,导致译码错误概率接近于1。对不同的检测定时误差进行仿真,结果如图3所示。

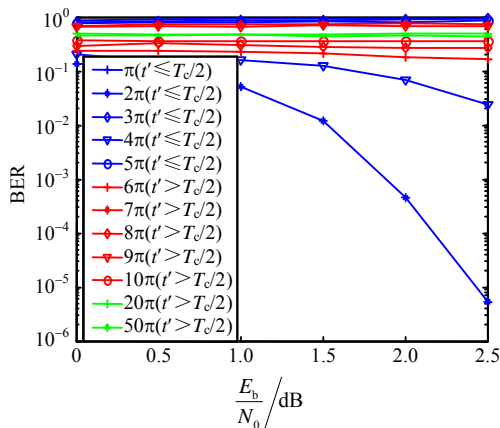


图3 不同定时误差下误码率

从图3可看出,在 $t' > T_c$ 时,无论 $\Delta\phi$ 为何值,帧头误码率维持在0.5,在 $t' \leq T_c$ 且 $\Delta\phi$ 为 π 的奇数倍时,训练序列误码率大于0.5;而当 $t' \leq T_c$,尤其是 $t' < T_c/2$ 且 $\Delta\phi$ 为 π 的偶数倍时,误码率才低于门限值0.25。由此,可以得出依据训练序列误码率进行最大似然定时同步时,能够将信号同步于 $t' < T_c/2$ 以内,以便利用MMLR算法进行载波同步。

3 MMLR算法与载波同步

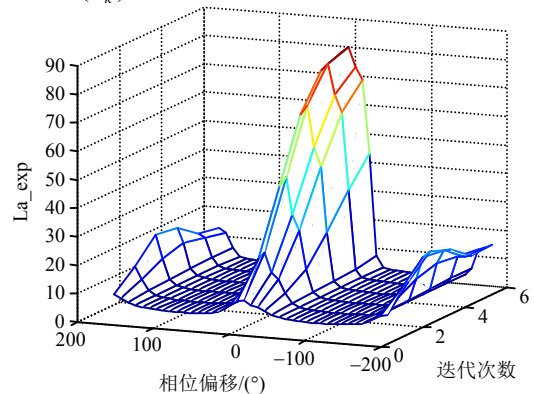
3.1 MMLR算法

MMLR同步算法的核心思想是寻找系统同步与非同步情况下对数似然比的分布差异,反馈到载波同步单元。

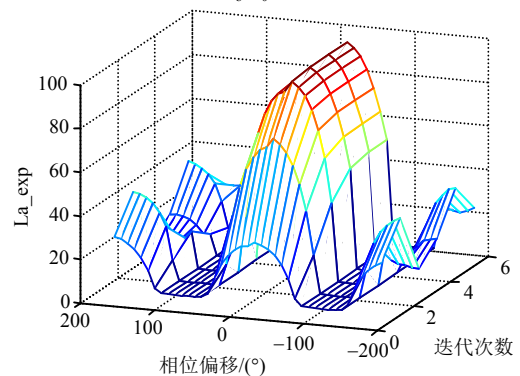
MAP类译码算法中对数似然比定义为:

$$\text{LLR}(d_k) = \text{La}(d_k) + \text{Lc} \times y_k^s + \text{Le}(d_k) \quad (15)$$

式中, $\text{La}(d_k)$ 为输入译码器的先验信息; $\text{Lc} = 4aE_b/N_0$ 为信道可靠值, a 为信道衰落因子,对于AWGN信道,衰落因子 $a = 1$; y_k^s 为接收到的信息位; $\text{Le}(d_k)$ 为译码输出外信息。



a. $E_b/N_0 = 2 \text{ dB}$



b. 无噪

图4 La_{exp} 随相位偏移和迭代次数的统计分布

在非同步情况下,MSK正交解调的特点使得式(15)中 y_k^s 幅值大幅衰减,同时由于信息位与校验位不满足网格图约束关系,先验信息 $\text{La}(d_k)$ 得不到

有效更新, 收敛速度慢, 输出的 $LLR(d_k)$ 幅值严重下降。基于此, 在极低信噪比下, 对似然比绝对值的数学期望进行统计:

$$La_exp = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |LLR(d_k)| \quad (16)$$

La_exp 随相位偏移和迭代次数的变化曲线如图4所示。

从图中看出, 无论有无噪声, La_exp 都在完全

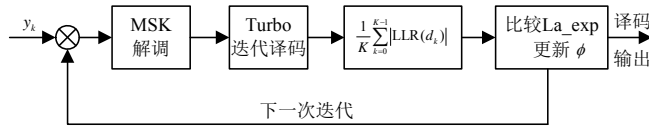


图5 MMLR算法流程

图中, 为减小数据量, 每次迭代只保留较大值的相位和采样数据, 迭代一次更新一次。达到指定迭代次数, 得出估计相位 $\hat{\phi}$, 完成载波同步。

4 仿真结果及分析

建立Turbo-MSK系统仿真模型, 设置参数为:

Turbo 码子编码器采用 (13,15)RSC(递归系统卷积码), QPP(二次置换多项式)交织器, 训练序列长度 64, 信息帧长 512, 码率 1/2, 译码器采用线性拟合 Log-Map 算法^[12], 译码迭代 6 次。

首先对改进 DA 算法的正确定时概率进行仿真, 设置 $ber_{gate} = 0.25$, 在归一化信噪比 0 dB 以上, 系统误码率始终低于 0.25, 最大似然估计的定时误差 $t' < T_c/2$ 的概率为 1。以定时估计时刻为起始时刻, 在不同相偏情况下对系统的误码性能进行仿真, 结果如图 6 所示。

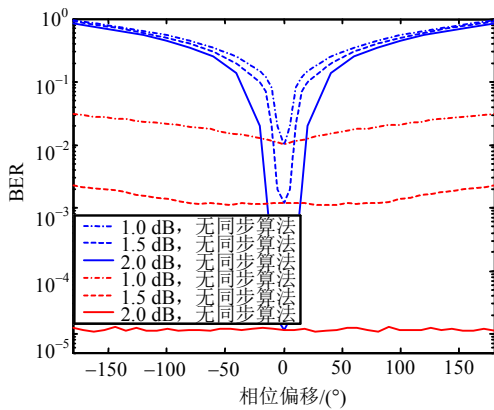


图6 不同相偏下系统误码率

从图中看出, 在极低信噪比下, MMLR 算法能够校正 $[-\pi, \pi)$ 区间的相位偏移, 增强了系统对相偏的承受能力。

同步时取得最大值, 而且随着译码迭代次数的增加, La_exp 值逐渐增大。由此可以得出载波相位估计准则 MMLR:

$$\hat{\phi} = \arg \max_{t' < T_c} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |LLR(d_k)| \right) \quad (17)$$

3.2 MMLR同步流程

根据式(17), 可以得到码辅助 MMLR 同步框图如图 5 所示。

计算本文同步算法相位估计偏差 $\Delta\phi$ 的均方差, 与迭代载波恢复算法的 CRB(Cramer-Rao bound)^[13] 进行比较, 结果如图 7 所示。

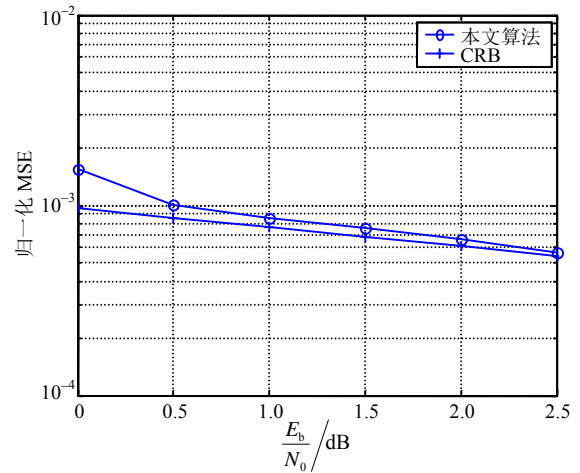


图7 算法的估计性能与CRB比较

CRB 定义为:

$$CRB = \frac{1}{10^{-10} L} = \frac{1}{10^{-10} L r M} \quad (18)$$

式中, L 为发送符号数; r 为编码码率; M 为调制制数。可以看出, 归一化信噪比大于 0.5 dB 后算法估计的 MSE 接近于 CRB。

常用同步算法与本文同步算法的系统误比特率性能比较如图 8 所示。可以看出, 经典的锁相环法在极低信噪比下已不能捕获跟踪, 而波形相关性性能也受到严重影响, EM 同步算法^[6] 误比特率逐步趋近于理想同步, 但在极低信噪比下仍然存在一定差距。而本文所采用的方法发挥了译码逐次迭代的优势, 取得了良好的同步效果, 使得系统误比特率接近于理想同步情况。

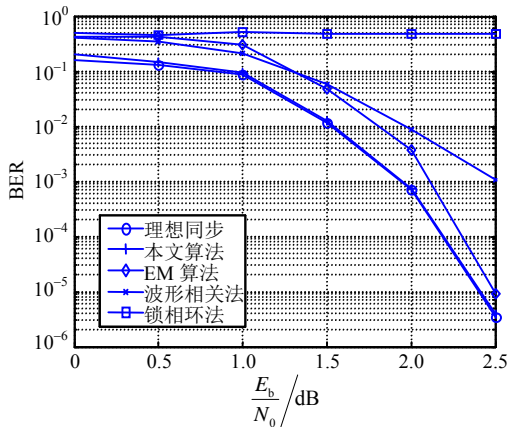


图8 不同同步算法和理想同步的误码性能比较

5 结论

本文采用改进的数据辅助最大似然定时估计算法, 直接利用译码迭代输出的似然函数, 减小了运算复杂度。以定时结果为起始时刻, 根据同步、失步时似然比分布差异, 提出一种码辅助MMLR载波同步算法。该算法充分运用译码器的纠错功能, 将译码信息反馈给同步电路进行同步参数估计, 在极低信噪比环境下, 通信系统取得了近于理想的译码性能, 为Turbo码在窄带低信噪比环境下的应用提供了一种有效的同步方案。

参考文献

- [1] BERRO C, GLAVIEUX A, THITIMASJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes[C]//Proceedings of International Conference on Communications. Geneva: IEEE, 1993: 1064-1070.
- [2] 李金海, 巴晓辉, 陈杰. 三阶卡尔曼滤波数字锁频环设计及性能分析[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(5): 677-680. LI Jin-hai, BA Xiao-hui, Chen Jie. Design and performance analysis of 3rd order Kalman filter digital frequency-locked loop[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(5): 677-680.
- [3] TAN Xiao-heng, WANG Mei-mei. Time and frequency synchronization algorithm using training sequence for OFDM systems[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(8): 955-959.
- [4] SKOG I, HANDEL P. Synchronization by two-way message exchanges: Cramer-Rao bounds, approximate maximum likelihood, and offshore submarine positioning[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(4): 2351-2362.
- [5] HERZET C, NOELS N, LOTTICI V, et al. Code-aided Turbo synchronization[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(6): 1255-1271.
- [6] NOELS N, HERZET C, DEJONGHE A. Turbo synchronization: an EM algorithm interpretation[C]//IEEE International Conference on Communications. Anchorage: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003, 4: 2933-2937.
- [7] HERZER C, RAMON V, VANDENDORPE L. Turbo synchronization: a combined sum-product and expectation-maximization algorithm approach[C]//IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. New York: IEEE, 2005: 191-195.
- [8] LI Zhang, ALISTER G. Iterative carrier phase recovery suited to Turbo-coded systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(6): 2267-2276.
- [9] FREEDMAN A, RAHAMIM Y, REICHMAN A. Maximum-mean-square soft-output (M²S²O): A method for carrier synchronization of short burst Turbo coded signals[J]. IEEE Proceedings on Communications, 2006, 153(2): 245-255.
- [10] 包建荣, 詹亚峰, 陆建华. 高效联合LDPC编码递归MSK调制[J]. 清华大学学报, 2010, 32(3): 633-637. BAO Jian-rong, ZHAN Ya-feng, LU Jian-hua. High efficiently joint LDPC coded recursive MSK modulation[J]. Journal of Tsinghua University, 2010, 32(3): 633-637.
- [11] 裴敏艳, 成文婧, 魏急波. 基于正交训练序列的MIMO系统联合最大似然时频同步和信道估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 633-637. PEI Min-yan, CHEN Wen-jing, WEI Ji-bo. Joint ML time-frequency synchronization and channel estimation for MIMO system using orthogonal training sequences[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 633-637.
- [12] 赵旦峰, 张英, 陶磊岩. Turbo译码中的Log-MAP折线逼近法[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(5): 1364-1368. ZHAO Dan-feng, ZHANG Ying, TAO Lei-yan. Folded linear approach method for Log-MAP Turbo decoding[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(5): 1364-1368.
- [13] NELE N, HEIDI S, MARC M. The cramer-rao bound for phase estimation from coded linearly modulated signals[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 207-209.

编辑 张俊