

文章编号: 1001 - 2486(2011)04 - 0113 - 04

Rayleigh 衰落信道下一种实用的 Turbo 解码算法*

许 可, 万建伟, 王 玲

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:通过理论和仿真实验证明:无论 Rayleigh 衰落信道是否完美估计, Max-Log-MAP 算法都与信噪比无关,而且还与其他信道参数无关。通过缩放 Max-Log-MAP 算法输出软信息的幅度,在没有增加运算量的前提下,解码性能提高到了与 Log-MAP 算法相当的程度。由于缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法不需要任何信道参数估计器,从解码性能,运算量和系统鲁棒性等方面综合比较,使用缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法是 Rayleigh 衰落信道下 Turbo 解码的一种实用方案。

关键词:Turbo 解码; Rayleigh 衰落信道; 信道置信度; Max-Log-MAP 算法; Log-MAP 算法

中图分类号:TN911.23 **文献标识码:**A

A Practical Turbo Decoding Algorithm on Rayleigh Fading Channels

XU Ke, WAN Jian-wei, WANG Ling

(College of Electrical Science and Engineering, National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China)

Abstract: It is confirmed by theoretical analysis and simulation results that, whether the Rayleigh fading channel is perfectly estimated or not, the Max-Log-MAP algorithm is independent of the channel signal-to-noise ratio (SNR),. In addition, the Max-Log-MAP algorithm does not depend on any other channel parameter. By scaling the soft output, the Max-Log-MAP decoder performs nearly as well as the Log-MAP decoder, while this gain is achieved without any complexity increase. As no channel parameter estimator is needed, from a practical point of view, decoding turbo codes on the Rayleigh fading channels with the Scaled Max-Log-MAP algorithm is a good compromise among the performance, the complexity and the system robustness.

Key words: turbo decoding; rayleigh fading channels; channel reliability factor; Max-Log-MAP algorithm; Log-MAP algorithm

1993年由 Berrou 等人提出的 Turbo 码^[1],以接近 Shannon 理论极限的良好纠错性能成为了第三代(3G)移动通信系统标准推荐的差错控制编码之一^[2]。有关 Turbo 码的研究一般都是在加性高斯白噪声(AWGN)信道上进行的:一是因为 AWGN 信道是一种非常典型和简单的信道模型,在数学上易于处理;二是因为其他无线信道上的 Turbo 解码,通过合理的假设或变换,都可以类推利用 AWGN 信道上的有关结论。然而在实际的无线通信环境中,比如闹市或者高层建筑密集区域,由于多径效应的普遍存在,无线信号往往是经过若干反射,折射或散射路径才到达接收机,接收到的信号幅度将发生急剧变化,形成各种衰落。随着社会的飞速发展,无线信道环境会变得更加复杂,但无线通信仍然要求信息传输更快更准确,为使研究更具现实意义,本文探讨了非完美估计 Rayleigh 衰落信道上的 Turbo 解码。

在 Rayleigh 衰落信道上有关 Turbo 解码的研究基本上都是试图将 Rayleigh 衰落信道等效为 AWGN 信道,从而可以直接利用 AWGN 信道上的已有结论。比如假设 Rayleigh 信道衰落因子的幅度和相位完全已知^[3],或者只是假设衰落因子的幅度已知^[4]或者相位已知^[5],都可以将 Rayleigh 衰落信道等效为 AWGN 信道。Frenger 的研究表明,即使衰落因子的幅度和相位都是未知的,同样也可以将 Rayleigh 衰落信道等效为 AWGN 信道。围绕 Frenger 的研究结论,又有研究者提出了在线估计信道置信度的方法^[6],以及简化的信道置信度算法^[7]等。在此需要强调的是:Rayleigh 衰落信道被等效为 AWGN 信道,是指由于接收端对信号进行衰落补偿后,分支度量的表达式与 AWGN 信道上的结论一致,此时 Turbo 解码的算法和架构无需任何改变,重新定义信道置信度后就可以直接利用 AWGN 信道上的有关结论^[8]。

* 收稿日期:2010 - 09 - 20

基金项目:湖南省自然科学基金项目(11JJ3066)

作者简介:许可(1982—),男,博士生。

Turbo 码的解码一般都采用最大后验概率 (MAP) 算法。MAP 算法是码字层级的最优算法, 能够确保解码的误比特率 (BER) 最低, 缺点在于运算量太大, 严重制约了 Turbo 码的实际应用^[9]。现已有一系列改进算法提出, 如 Log-MAP 算法^[10], Max-Log-MAP 算法^[10] 和线性 Max-Log-MAP 算法^[11] 等, 但在实际应用中仍然存在着解码性能和运算量的矛盾。Max-Log-MAP 算法运算量最低但解码性能较差, 而 Log-MAP 算法和线性 Max-Log-MAP 算法与之相反。同时, 在 AWGN 信道或者完美估计的 Rayleigh 衰落信道上, Max-Log-MAP 算法与信噪比 (SNR) 估计值无关, 而 Log-MAP 算法或线性 Max-Log-MAP 算法对信噪比估计偏差比较敏感^[12]。Max-Log-MAP 算法不需要估计信噪比, 不仅意味着解码器架构的简单和运算量的降低, 同时还可以有效避免信噪比估计偏差带来的解码性能下降的风险。

需要指出的是, 假设 Rayleigh 衰落信道完美估计在实际应用中是非常不现实的, 对随机参量的估计总会存在着不确定性, 因此在 Rayleigh 衰落信道下 Turbo 解码的研究应该把衰落信道非完美估计作为合理的假设前提。在这个前提下, Frenger 的研究假设信道置信度是已知的^[8], 文献^[6]利用观测数据的统计特性提出了一种在线估计信道置信度的方法, 文献^[7]利用将信噪比估计偏差固定的思想提出了一种估计信道置信度的简便算法。以上研究都是基于 Log-MAP 算法的, 这样就不可避免运算量和性能之间的矛盾, 而且对信道置信度的估计会带来解码性能下降的风险。

本文的研究基于 Frenger 提出的理论模型, 证明了信道非完美估计时 Max-Log-MAP 算法与所有的信道参数无关。通过引入缩放输出软信息的技术^[13], 较好地解决了 Rayleigh 衰落信道上 Turbo 解码性能和运算量之间的矛盾, 提出了一种基于缩放 Max-Log-MAP 算法软信息的实用解码方案。

1 系统模型

为便于读者研究和比较, 本文基本采用 Frenger 提出的 Turbo 解码模型和符号^[8], 见图 1。Turbo 码发送端采用 BPSK 调制, 传输码字 $c_k \in \{-1, +1\}$, $1 \leq k \leq N/R_c$, N 和 R_c 分别表示数据帧长度和编码码率。假设接收信号在接收端已经完成符号同步和匹配滤波操作, 进入解码器的信号样本可以表示成如下模型^[9]:

$$y_k = a_k c_k + n_k \quad (1)$$

其中 a_k 代表 Rayleigh 信道的衰落因子, n_k 是加性

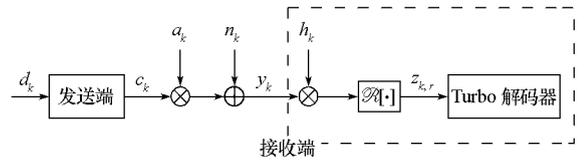


图1 Rayleigh 衰落信道下的 Turbo 解码方案

高斯白噪声。 a_k 和 n_k 都是零均值、独立同分布的复高斯随机变量, 它们的方差定义为 $E[|a_k|^2] = 2\sigma_a^2$ 和 $E[|n_k|^2] = 2\sigma_n^2 = N_0$ 。

为了减少信号在传输过程中产生的突发错误, 需要采用信道交织技术来降低信道的相关性, 本文假设交织深度足够大 (即全交织), 因此 a_k 在不同时刻是相互独立的; 根据中心极限定理, 大量独立同分布随机变量之和趋向于正态分布^[14], 因此对于复杂信道环境而言假设 a_k 服从正态分布是比较合理的, 此时它的幅度服从 Rayleigh 分布。

为了在 Rayleigh 衰落信道中使用 AWGN 信道上 Turbo 解码的架构和算法, 需要对衰落因子 a_k 进行估计:

$$h_k = a_k + m_k \quad (2)$$

估计值 h_k 和估计误差 m_k 也都是零均值的, 独立同分布的复高斯随机变量, 它们的方差定义为 $E[|m_k|^2] = 2\sigma_m^2$ 和 $E[|h_k|^2] = 2\sigma_a^2 + 2\sigma_m^2$ 。

Rayleigh 衰落信道对传输码字的影响可以通过 h_k 来进行补偿^[9], 此时判决变量为:

$$z_k = y_k h_k^* = z_{k,r} + jz_{k,i} \quad (3)$$

其中 $z_{k,r}$ 和 $z_{k,i}$ 分别代表判决变量 z_k 的实部和虚部。在 Frenger 提出的解码方案中, 只有实部 $z_{k,r}$ 被解码器利用。

此时 Turbo 解码的信道置信度需要被重新定义为:

$$L_c^{new} = \frac{4\sqrt{E_s}}{N_0} \sigma_a^2 \left[\sigma_m^2 \left(\frac{2E_s}{N_0} \sigma_a^2 + 1 \right) + \sigma_a^2 \right]^{-1} \quad (4)$$

AWGN 信道上的信道置信度也在这里给出:

$$L_c^{old} = \frac{4\sqrt{E_s}}{N_0} \quad (5)$$

很明显, AWGN 信道上的信道置信度 (式 (5)) 只是 Rayleigh 衰落信道被完美估计 ($\sigma_m^2 = 0$) 时的一个特例 (式 (4))。

2 信道估计误差分析

从前面的分析可知, 当 Rayleigh 信道的衰落因子 a_k 被完美估计时 Turbo 解码的信道置信度和 AWGN 信道上的定义完全一致, Worm 等人从

理论上证明了此时 Max-Log-MAP 算法独立于 SNR 估计值^[12]。下面将要证明,即使衰落因子估计不准确($\sigma_m^2 > 0$),Max-Log-MAP 算法仍然独立于 SNR 估计值,而且也独立于其他信道参数,如 σ_a^2 和 σ_m^2 等。

根据 Max-Log-MAP 算法的定义,如果在初始迭代时设定系统码的先验对数似然比(LLR)为 0,那么所有的中间变量(如前/后向状态度量,分支度量等)都与噪声方差 N_0 成反比,最后的似然比判决表达式也与 N_0 成反比^[12]。由于 N_0 为正数并不会影响似然比判决的结果,所以 Max-Log-MAP 与 N_0 的取值是无关系的。

上述结论成立的前提有三个:第一是初始迭代时设定系统码的先验 LLR 值为 0;第二是在 AWGN 信道或完美估计的 Rayleigh 衰落信道上;第三是噪声方差 N_0 的估计值为正数。当 Rayleigh 衰落信道为非完美估计时,从信道置信度 L_c^{new} 的定义可以看出,“准确的”噪声方差不再是 N_0 ,而是 N_0 的一个线性变换 N'_0 。

$$N'_0 = \frac{\sigma_m^2 + \sigma_a^2}{\sigma_a^2} N_0 + 2E_s \sigma_m^2 \quad (6)$$

如果把 N'_0 看作信道非完美估计时的等效噪声方差,那么此时 Max-Log-MAP 算法与 N'_0 的取值无关。首先,仍然可以设定初始迭代时系统码的先验 LLR 值为 0;其次,把 N'_0 看作等效噪声方差,相当于把 Rayleigh 衰落信道非完美估计等效为完美估计的情况,只不过此时“准确的”噪声方差 N'_0 由 N_0 和 σ_m^2 等共同决定,除此之外 Turbo 解码的算法和架构没有任何改变;最后,等效噪声方差 N'_0 仍然为正数。通过噪声方差的等效变换,满足了 Max-Log-MAP 算法与 N_0 独立的前提条件,因此在 Rayleigh 衰落信道非完美估计时,Max-Log-MAP 算法与 N'_0 独立。进一步,由于 N'_0 是由 N_0 和 σ_m^2 等参数共同决定的,因此它们的估计值也都不会影响 Max-Log-MAP 算法似然比判决的结果。

一般情况下 $N'_0 \geq N_0$,意味着使用 L_c^{new} 的 Log-MAP 算法实质上是对信噪比进行低估,所以 Turbo 解码的最优性能往往出现在信噪比被适当低估的区间,这个低估的具体数值可由 N'_0 的表达式和信噪比的定义计算得到^[7]。

需要说明的是,只有 Log-MAP 算法才需要信道置信度这个参量,Max-Log-MAP 算法是不需要的。为便于程序的开发,本文在仿真实验中用常数 1 来代替 Max-Log-MAP 算法中的信道置信度。

在 Rayleigh 衰落信道非完美估计时,直接使

用 Max-Log-MAP 算法性能较差,因此以往关于 Rayleigh 衰落信道上的 Turbo 解码的大都采用 Log-MAP 算法。为了改善低复杂度次优算法 Max-Log-MAP 算法的性能,Vogt 等人提出了缩放输出软信息的方法^[13]。用一个小于 1 的正常数因子对 Max-Log-MAP 译码器输出的外部软信息进行收缩,通过降低其可靠性值来改善 Max-Log-MAP 算法的性能。这种性能的改善没有以增加运算复杂度为代价,而且也不会改变 Max-Log-MAP 算法独立于 SNR 估计值的特性。

缩放输出软信息的方法已经成功应用于低密度校验码(LDPC)^[15-16],串行级联卷积码(SCCC)^[15]和 Turbo 码^[13,17]等。在 AWGN 信道或完美估计的 Rayleigh 衰落信道上的 Turbo 解码,缩放输出软信息主要是用来改善 Max-Log-MAP 算法的性能,在这里将这种方法推广到 Rayleigh 衰落信道非完美估计的情况。

3 仿真实验

假设 Rayleigh 衰落信道充分交织,方差 $\sigma_a^2 = 1$,分量编码器的生成矩阵为 $[37, 21]_8$,码率为 1/3,数据帧长度为 420bit。在信噪比较高的区间衰落因子的估计质量一般会随之改善,所以本文仍然采用 $\sigma_m^2 = \alpha \sigma_n^2$ 的噪声生成模型^[8]。在本文的所有仿真实验中使用 0.7 为缩放因子,这是因为通过多次仿真和比较发现,当 Rayleigh 衰落信道非完美估计时最佳的缩放因子仍然为 0.7^[13]。

首先验证在 Rayleigh 衰落信道非完美估计时,(缩放软信息的)Max-Log-MAP 算法独立于所有的信道参数。为了图示简洁,用“LM”,“MLM”和“SMLM”分别表示 Log-MAP, Max-Log-MAP 和缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法。

图 2 显示了真实信噪比分别为 3.0dB 和 3.5dB 时算法对信噪比估计偏差的敏感度曲线。很明显看出,在 Rayleigh 衰落信道非完美估计时,(缩放软信息的)Max-Log-MAP 算法与信噪比估计值无关。在这里只讨论了信噪比估计有偏差的情况,因为从式(6)可知,其他信道参数的估计偏差都可以转换为信噪比的估计偏差,因此图 2 的结果同时也证明了缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法与所有的信道参数估计值无关。

由于使用 L_c^{new} 相当于适当低估 SNR,所以图 2 只画出了使用 L_c^{new} 的 Log-MAP 算法的 SNR 敏感度曲线, L_c^{old} 的敏感度曲线可以通过适当左移 L_c^{new} 的曲线得到^[7]。

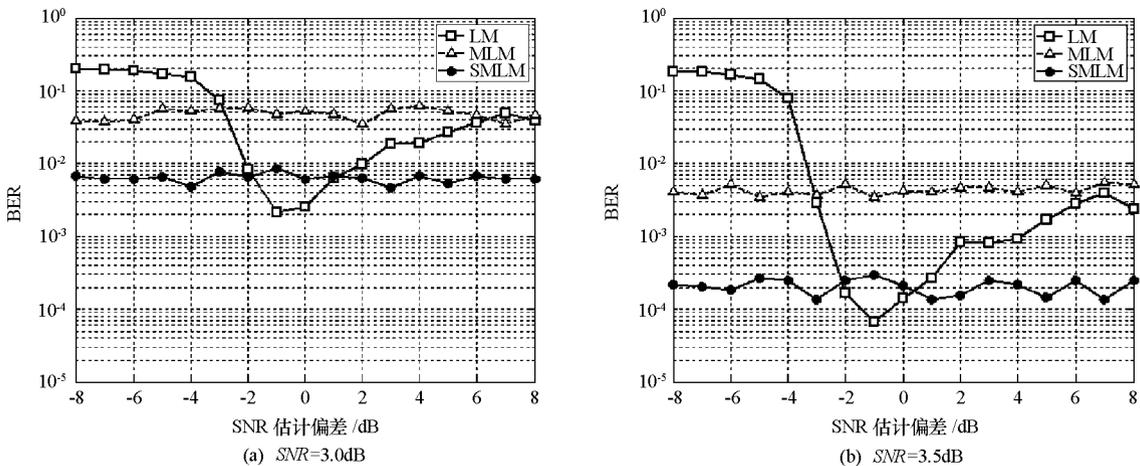


图2 信噪比估计误差对解码性能的影响, $\sigma_m^2 = 0.1\sigma_n^2$, 8次迭代

Fig.2 BER sensitivity to SNR offsets, $\sigma_m^2 = 0.1\sigma_n^2$, after 8 iterations

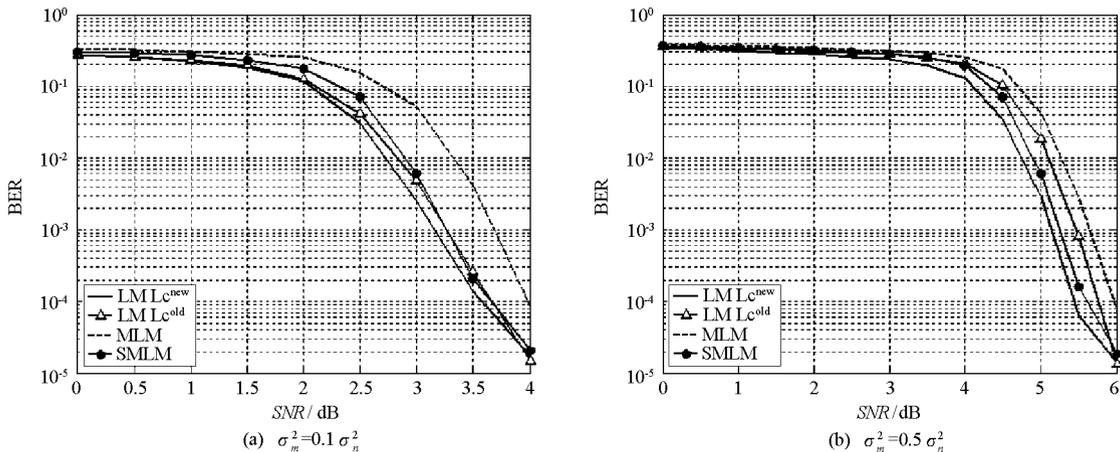


图3 不同算法的误比特率性能曲线, 8次迭代

Fig.3 Turbo decoding performance, after 8 iterations

从图3可以看出,解码性能从优到劣依次是使用 L_c^{new} 的 Log-MAP 算法, 缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法, 使用 L_c^{old} 的 Log-MAP 算法和 Max-Log-MAP 算法。在 Rayleigh 衰落信道完美估计时仍然有类似的结论(此时 L_c^{new} 与 L_c^{old} 相同)。

从追求解码性能的角度出发, 无疑是使用 L_c^{new} 的 Log-MAP 算法为最佳选择, 但在实际应用中还必须综合考虑运算量和系统鲁棒性能等多种因素来进行取舍和折中。从运算复杂度考虑, 缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法相对简单, 不需要任何信道参数估计器, 利于硬件实现; 从系统鲁棒性能考虑, 缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法占有极大优势, 从图2可以看出, 信噪比估计只要有 2dB 左右的误差就会导致使用 L_c^{new} 的 Log-MAP 算法的解码性能迅速退化, 弱于缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法。因此, 当 Rayleigh 衰落信道非完美估计时, 使用缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法是一个比较合理、实用的 Turbo 解码方案。

4 结束语

在 Rayleigh 衰落信道非完美估计的背景下, 本文从解码性能、运算复杂度和系统鲁棒性能三个方面研究和比较了各种 MAP 类的 Turbo 解码算法。从理论上证明了 Max-Log-MAP 算法与信噪比无关的性质在 Rayleigh 衰落信道非完美估计时也成立, 进一步还证明了 Max-Log-MAP 算法与 Rayleigh 衰落信道的其他参数也无关。通过缩放输出的软信息使其解码性能与使用 L_c^{new} 的 Log-MAP 算法基本相当, 而运算量却等同于 Max-Log-MAP 算法。同时缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法不需要任何信道参数估计器, 不仅可以有效降低系统的复杂度和运算量, 还可以降低由于信道参数估计偏差对整体解码性能的影响。从 Turbo 解码的实际应用出发, Rayleigh 衰落信道下使用缩放软信息的 Max-Log-MAP 算法是一种比较实用的选择方案。

信性。论文所提方法为评估分析人员构建 SEOC 幂指数评估模型提供了有效的方法论指导与技术支持,且为从宏观性和相对性的角度快速评估潜艇装备综合作战能力奠定了基础。下一步的主要工作是验证该方法的科学性和提高该方法的易用性。

参考文献:

[1] 国内外现有潜艇作战能力评估方法综合分析研究[R]. 中国国防科学技术报告,2005.

[2] Stockfish J A. Models, Data, and War: A Critique of the Study of Conventional Forces[R]. ADA017609, May 1976.

[3] 徐瑞恩. 武器系统作战能力指数研究情况[J]. 军事系统工程, 1994(3): 33 - 38.

[4] 徐瑞恩. 武器装备效能模型和方法概论[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(1): 1 - 5.

[5] 刘奇志. 武器作战力量化的条件及函数关系[J]. 军事系统工程, 1994(3): 39 - 42.

[6] 刘奇志. 武器作战效能指数模型与量纲分析理论[J]. 军事运筹与系统工程, 2001(3): 15 - 19.

[7] 王希星,尹健. 武器系统效能指数幂函数基本定理的修正[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 15 - 19.

[8] 王文力,等. 基于幂指数法的坦克作战效能评估[J]. 射击

学报, 2007(2): 38 - 40.

[9] 王锐,等. 基于幂指数法和 AHP 的先进战斗机效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(11): 73 - 76.

[10] 韩晓明,等. 基于指数法的航空武器装备对比优势评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1410 - 1414.

[11] Sun S Y, Wang H H, Wang H Y. A Study on the Optimal Design Method of Naval Gun Weapon System[C]//2008 Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2008), 3204 - 3208.

[12] John F S. Command and (Out of) Control: The Military Implications of Complexity Theory [C]//The Complexity, Global Politics and National Security Conference, 1996: 13 - 14.

[13] 许永平,等. 基于模糊积分的潜艇作战能力评估方法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 19 - 23.

[14] Saaty T L. The Analytic Network Process [M]. RWS Publications, Pittsburgh, 1996.

[15] 徐玖平,陈建中. 群决策理论与方法及实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

[16] Robust Decisions Inc. ACCORD (tm) Users Manual[R]. Version 2.5, Corvallis OR, 2008.

[17] Bruce D A. Bayesian Methods for Collaborative Decision-Making[R]. Robust Decisions Inc., 2003.

[18] www.superdecisions.com/~saaty.

[19] 许永平,等. 基于 QFD 与作战仿真的舰艇装备需求分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(1): 167 - 172.

(上接第 116 页)

参考文献:

[1] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes (1) [R]. Geneva, Switzerland, 1993.

[2] Lee L, Hammons A R, Sun F, et al. Application and Standardization of Turbo Codes in Third-Generation High-Speed Wireless Data Services[J]. IEEE Trans. Veh. Technol, 2000, 49(6): 2198 - 2207.

[3] Barbulescu S A. Iterative Decoding of Turbo Codes and Other Concatenated Codes[D]. University of South Australia, 1996.

[4] Hall E K, Wilson S G. Turbo Codes for Noncoherent Channels[R]. Phoenix, 1997.

[5] Hall E K, Wilson S G. Design and Analysis of Turbo Codes on Rayleigh Fading Channels [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun, 1998, 16(20): 160 - 174.

[6] Shin H, Lee J H. Channel Reliability Estimation for Turbo Decoding in Rayleigh Fading Channels With Imperfect Channel Estimates[J]. IEEE Commun. Lett., 2002, 6(11): 503 - 505.

[7] Xu K, Wan J, Xu Z. A Simplified Method for Turbo Decoding over Rayleigh Fading Channels[R]. Beijing, China: 2010.

[8] Frenger P K. Turbo Decoding for Wireless Systems with Imperfect Channel Estimates [J]. IEEE Trans. Commun, 2000, 48(9): 1437 - 1440.

[9] Proakis J G. Digital Communications[M]. 5 ed. McGraw Hill, 2007.

[10] Robertson P, Hoehner P, Villebrun E. Optimal and Sub-Optimal Maximum A Posteriori Algorithms Suitable for Turbo Decoding [J]. Eur. Trans. Telecommun., 1997, 8(2): 119 - 125.

[11] Talakoub S, Sabeti L, Shahrava B, et al. An Improved Max-Log-MAP Algorithm for Turbo Decoding and Turbo Equalization[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2007, 56(3): 1058 - 1063.

[12] Worm A, Hoehner P, Wehn N. Turbo-Decoding Without SNR Estimation[J]. IEEE Commun. Lett., 2000, 4(6): 193 - 195.

[13] Vogt J, Finger A. Improving the Max-log-MAP TurboDecoder [J]. Electron. Lett., 2000, 36(23): 1937 - 1939.

[14] 罗鹏飞, 张文明. 随机信号分析与处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[15] Heo J, Chugg K M. Optimization of Scaling Soft Information in Iterative Decoding Via Density Evolution Methods [J]. IEEE Trans. Commun., 2005, 53(6): 957 - 961.

[16] Heo J. Analysis of Scaling Soft Information on Low Density Parity Check Code [J]. Electron. Lett., 2003, 39(2): 219 - 221.

[17] Chen J, Fossorier M P C. Near Optimum Universal Belief Propagation Based Decoding of Low-Density Parity Check Codes [J]. IEEE Trans. Commun., 2002, 50(3): 406 - 414.