采用 LDPC 码方案的战术数据链系统

李 航 陈 炜

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 战术数据链系统能够提高部队信息化作战能力,其中信道编码技术是保证消息传输可靠性的关键技术之一. 构建了一种新的战术数据链系统,系统采用低密度奇偶校验(LDPC,Low-Density Parity-Check)码方案,LDPC 码是适用于传输可靠性要求高的通信系统的新型码组. 介绍了 LDPC 码方案中的和积算法,描述了系统的传输模型,分析了系统在固定频率和加性白色高斯噪声(AWGN,Additive White Gaussian Noise)信道条件下的链路性能. 利用计算机进行蒙特卡罗仿真,结果表明:在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下,LDPC 编码方案可以有效地降低数据链系统的误比特率,取得比采用里德·所罗门编码的联合战术信息分发系统更好的误码性能. LDPC 码作为信道编码技术的备选码组,为进一步提高战术数据链的可靠性提供了一种解决方案.

关 键 词: 低密度奇偶校验; 战术数据链; 信道编码; 联合战术信息分发系统

中图分类号: TN 919

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1400-04

Tactical data link system with low-density parity-check code scheme

Li Hang Chen Wei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In information warfare, military combat capability can be improved by tactical data link system of which coding is one of crucial techniques of the transmission reliability. A new type of tactical data link system was proposed employing low-density parity-check (LDPC) code scheme, which is a new set of codes for communication systems demanding intensive reliability. The sum-product algorithm of the LDPC code scheme was introduced and the transmission model was described. Then the link performance of the system within the fix frequency over additive white Gaussian noise (AWGN) channel was analyzed. Simulation results with Monte-Carlo method show that the LDPC code scheme can decrease the bit error rate of the tactical data link system effectively. The results also showe that the LDPC-coded data link system achieves better performance than joint tactical information distribution system (JTIDS), which employe Reed Solomon codes as channel coding scheme, over AWGN channel and Rayleigh fading channel. LDPC codes, serving as the alternative codes for channel coding technique, provide possible solutions to enhance the transmission reliability of tactical data link system.

Key words: low-density parity-check(LDPC); tactical data link; channel coding; joint tactical information distribution system (JTIDS)

战术数据链主要负责战术信息交换,在现代复杂的战场环境下扮演着越来越重要的角色. 它的典型应用之一是自动战术数据系统,该系统为战术空中指挥和控制系统(ACCS's,Air Command and Control Systems)而研发,以满足空中影像的实时接入和对空中平台精确控制的要求[1]. 因为

收稿日期: 2010-07-14; **网络出版时间**: 2011-11-23 15:06; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1506.009

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1506.009.html

作者简介: 李 航(1985 -),男,河北承德人,硕士生,david_lihang@ee.buaa.edu.cn.

数据链通常需要工作在恶劣和迅速变化的战场环境中,数据链要具备良好的实时性,高容量,高安全性和强大的生存能力[2].

最具代表性的数据链是战术数据链 J(TADIL J, Tactical Digital Data Link J),也称作 Link 16,或联合战术信息分发系统(JTIDS, Joint Tactical Information Distribution System),或者多功能信息分发系统(MIDS, Multifunctional Information Distribution System). 具体而言,Link 16 是整体系统的名称,而 JTIDS 或 MIDS 特指 Link 16 的硬件实现终端[3]. JTIDS 采用里德·所罗门(RS, Reed Solomon)码作为信道编码方案,用于提高通信效率和达到一定的误比特率. 近期,由于低密度奇偶校验(LDPC, Low-Density Parity-Check)码能够达到接近香农限的性能,当码长足够长时大大优于已知最好的 Turbo 码[4],因此 LDPC 码受到了越来越多的关注. 与此同时,也有学者对 RS 码和 LDPC 码进行了对比研究[5-7],得到了如下结论:非二进制 LDPC 码对抗突发噪声非常有效,并且在一些通信和存储系统中极具取代 RS 码的潜力. 在应用方面,LDPC 码在正交频分多路复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)无线通信系统的应用已经得到了广泛的研究. 文献[8-9]比较了系统在有编码和无编码情况下的误比特率;文献[10]将 LDPC 码与卷积码进行了性能对比. 上述文献均说明 LDPC 码能够提高 OFDM 系统的误码性能.

然而战术数据链并不采用 OFDM 系统,而是扩频通信系统. JTIDS 采用的扩频和调制方案分别是循环码移位键控(CCSK, Cyclic Code Shift Keying)和最小频移键控(MSK, Minimum Shift Keying). 本文提出了一种 LDPC 编码方案,并将该方案应用于战术数据链传输模型,对此系统进行了误码性能分析. 仿真结果说明:新的战术数据链系统在加性白色高斯噪声(AWGN, Additive White Gaussian Noise)信道和瑞利衰落信道下,能够拥有比 JTIDS 型系统更好的误码性能.

本文首先给出了 LDPC 码的编译码方案,之后给出基于 LDPC 编码方案的战术数据链传输模型,并对该模型进行了性能分析,最后通过仿真得到系统传输模型的误码性能曲线.

1　LDPC 码方案

LDPC 码是线性分组码的一种,它的特点是校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 非常稀疏. 特别地,一个(n,ρ,γ)低密度码,其码组长为 n,它的校验矩阵有如下特点:每行中 1 的个数为ρ(行重);每列中 1 的个数为γ(列重);同 n 和 $\boldsymbol{H}$ 的行数相比,ρ 和 γ 非常小[11-12].

LDPC 码的编码过程与一般的分组码相同. 译码过程可采用一种迭代概率算法,亦被称为和积或置信度传播. 这种算法具有软判决和硬判决两种算法的特点,很多文献都有介绍[8-12]. 简言之,和积算法迭代处理接收符号 y_l,用每个译码符号的边缘后验概率、对数似然比(LLR, Log-Likelihood Ratio)或者对应的接收符号值,作为可靠度的量度,并由接收符号的硬判决 $\boldsymbol{z}^{(i)}$ 和 LDPC 码的稀疏奇偶校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 计算得到奇偶校验和,来提高每个译码符号的可靠度,其中 i 为迭代次数. 每次译码迭代结束时,新得到的码符号的可靠度的量度将被用作下一次迭代的输入. 整个译码迭代过程持续进行,直到满足某个特定的停止条件(或准则).

为了从概率计算的角度叙述和积算法译码的步骤,首先做以下定义:

1) 设 $J(l)$ 为校验比特集合,即校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 中第 l 列为 1 的全部校验位;

2) $L(j)$ 为第 j 行稀疏校验式的比特集合,即校验矩阵的第 j 行为 1 的校验位;

3) $J(l)\backslash j$ 代表集合 $J(l)$ 排除掉第 j 个校验位的集合,$L(j)\backslash l$ 为 $L(j)$ 排除掉第 l 个校验位的集合;

4) 令 $q_{j,l}^{x,(i)}$ 为在第 i 次迭代中给定基于 $J(l)\backslash j$ 得到校验和的条件下,发送码比特 s_l 取值为 x(0 或 1)的条件概率;

5) 令 $\sigma_{j,l}^{x,(i)}$ 为给定 $s_l = x$ 和其他码比特可分离分布 $\{q_{j,t}^{s_t,(i)} : t \in L(j)\backslash l\}$ 的条件下,校验和 c_j 正确(即 $c_j = 0$)的条件概率.

迭代算法可以简化如下:

初始化:设定迭代次数 $i = 0$,最大次数 I_{MAX}. 当 $\boldsymbol{H}$ 为 $J \times n$ 的矩阵,$1 \leqslant j \leqslant J$,$1 \leqslant l \leqslant n$ 时,对于满足 $\boldsymbol{H}_{jl} = 1$ 的每组(j,l),设条件概率 $q_{j,l}^{0,(0)} = P(s_l = 0)$,$q_{j,l}^{1,(0)} = P(s_l = 1)$.

① 计算概率 $\sigma_{j,l}^{0,(i)}$ 和 $\sigma_{j,l}^{1,(i)}$.

② 计算 $q_{j,t}^{0,(i+1)}$,$q_{j,t}^{1,(i+1)}$ 和 $P^{(i+1)}(s_l = 0 \mid y)$,$P^{(i+1)}(s_l = 1 \mid y)$ 的值. 构成向量 $\boldsymbol{z}^{(i+1)}$,并测试 $\boldsymbol{z}^{(i+1)}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$. 若 $\boldsymbol{z}^{(i+1)}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} = 0$ 或者迭代次数达到 I_{MAX},则转至③. 否则令 $i = i + 1$,转到①.

③ 输出 $\boldsymbol{z}^{(i+1)}$ 作为译码结果的码字,停止译码过程.

2 传输模型

LDPC 码的战术数据链传输模型见图 1. 尽管有文献[13]对 LDPC 码级联 MSK 调制问题进行了研究,此调制方法更接近 JTIDS 型系统,但是为了更具一般性,本文采用无线通信系统中的直序扩频(DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum)和四相相移键控(QPSK, Quaternary Phase Shift Keying)调制模块. 在发射过程中,消息比特流从数据链上层被发送至物理层后,首先经过 LDPC 编码器;接下来,数据码字将进行分组交织以抵抗突发错误. 扩频和调制部分采用 DS-QPSK 调制器[14],图 2 给出了 DS-QPSK 调制器的功能模块图.

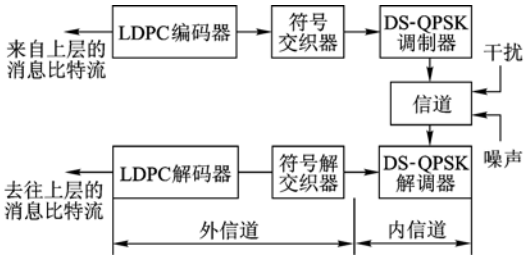

图 1 采用 LDPC 编码方案的战术数据链传输模型

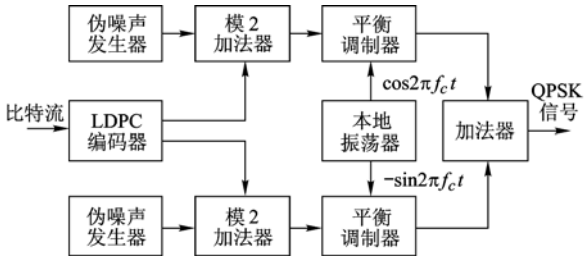

图 2 直接序列扩频 QPSK 调制

接收过程为发射过程的逆过程,接收信号首先通过 DS-QPSK 解调器转换成数字信号,再经过解交织器和 LDPC 解码器恢复出原始消息.

3 性能分析

分析传输性能时只考虑 AWGN 及固定频率的情况.

二进制相移键控调制下误比特率的表达式为

$$P_b = Q(\sqrt{2E_b/N_0}) \tag{1}$$

其中,E_b 为平均每个比特所具有的能量,AWGN 的功率谱密度为 $N_0/2$. 假设接收机对 AWGN 信道同步成功,且信噪比足够大,使得解调器能够恢复受污染的序列,QPSK 调制器具有的误符号性能如式(2)所述[15]:

$$P_s = 1 - (1 - P_b)^2 \tag{2}$$

其中 P_b 为式(1)中的误比特率. 在 DSSS 之后,每个比特由伪随机噪声(PN, Pseudo-random Noise)序列的比特做加性调制. 如果假定 PN 二进制序列的长取 L,PN 序列的比特具有与编码比特相同的能量,那么平均符号能量 E_s 为 $E_s = LE_{b_c} = LrE_b$,其中 E_{b_c} 为每个经编码后的比特的平均能量,r 是编码效率. 因此,当使用前向编码之后,数据链模型的符号错误概率为

$$p_s = 1 - \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2rE_b}{LN_0}}\right)\right]^2 \tag{3}$$

至此,LDPC 解码器的符号错误概率还没有严格地得到,但是可以通过一般分组码的分析结果来估计. 在文献[14]中,准完整码(quasi-perfect code)的译码错误概率在式(4)确定的下界和式(5)确定的上界范围内,即

$$P_e \geqslant \sum_{m=\lfloor d_{\min}/2 \rfloor+1}^{d_{\min}} \binom{d_{\min}}{m} p_s^m (1 - p_s)^{d_{\min}-m} \tag{4}$$

$$P_e \leqslant (2^k - 1) \sum_{m=\lfloor d_{\min}/2 \rfloor+1}^{d_{\min}} \binom{d_{\min}}{m} p_s^m (1 - p_s)^{d_{\min}-m} \tag{5}$$

其中,m 是每组 n 比特中错误比特的个数;k 为每组信息比特的个数,最小距离 $d_{\min}$ 由构造方式决定. 例如在文献[16]中,作者给出了通过渐进边增长(PEG, Progressive Edge-Growth)算法构造的 LDPC 码的最小距离上限.

4 仿真与讨论

系统仿真采用了 Visual Studio 6.0 仿真平台,在新系统方案中,LDPC 编码器采用的是(1 008, 504)码,它的行重 $\rho = 6$,列重 $\gamma = 3$,校验矩阵密度 $r = 0.005\,952$,常用于构造码字方法[16]和编码算法的研究. 图 3 给出了该码字在不同最大迭代次数条件下的误比特率(BER, Bit Error Rate)分布. 从图中可见,随着最大迭代次数的增加,误码性能越好. 但是,迭代次数的增加意味着增大译码器的复杂度和译码延迟. 因此,最大迭代次数应控制在一个合理的范围内,既要满足误码性能要求,也要考虑减小译码延迟.

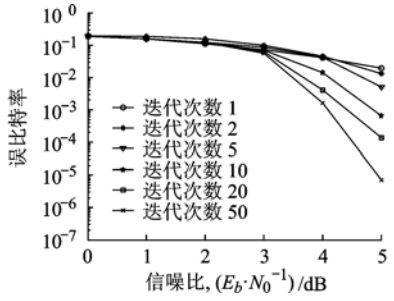

图 3 不同最大迭代次数下的误比特性能

LDPC 编码的数据链系统模型根据图 1 所示的框图建模. 系统的分组交织器交织深度为 16. 为了达到相似的带宽增益,图 2 中 PN 二进制序列的长取 7,即扩频增益为 7,而 JTIDS 型系统的扩频增益值为 32/5 = 6.4. 在 JTIDS 型系统中,每 15 个信息码元采用 RS (31, 15)码进行编码以及码元交织,交织深度也设为 16;这些经过交织的码元进行 CCSK 调制,即由一个长为 32 的码片起始序列,经循环移位,来代表每个长为 5 bit 的码元. 由于 JTIDS 的 MSK 调制方案的误码性能与二进制相移键控(BPSK, Binary Phase Shift Keying)近似[17],因此为了便于实现,在搭建模型时采用 BPSK 调制方式而非 MSK 调制.

图 4 给出了 LDPC 编码的战术数据链系统在 AWGN 信道下的误比特性能. 从图 4 可见,扩频技术对改善系统误码性能的效果显著. 在采用了 LDPC (1 008, 504)编码后,误码性能进一步改善,能够很快地逼近 10^{-5}. 在此误码率下,能够比无编码情况获得约 8 dB 的编码增益.

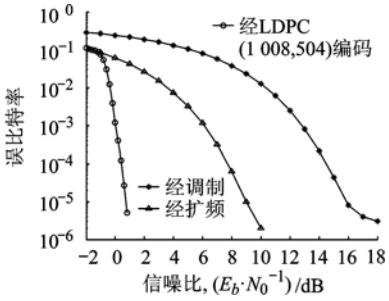

图 4　LDPC 编码的数据链系统的误比特性能

图 5 和图 6 分别给出了 LDPC 编码的数据链系统和 JTIDS 型系统在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下的误比特性能曲线. AWGN 信道下,LDPC (1 008, 504)数据链在 E_b/N_0 大于 −0.6 dB 时误码性能要好于 JTIDS 型系统. 当误比特率为 10^{-5} 时,LDPC 数据链系统具有约 5 dB 的优势;在瑞利衰落信道下,当误码率在 10^{-3} ~ 10^{-5} 范围时,它同样比 JTIDS 型系统具有 2 ~ 4 dB 的优势.

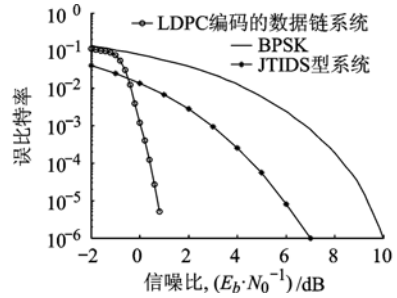

图 5　JTIDS 型系统和 LDPC 编码的数据链系统 AWGN 信道下的误比特性能

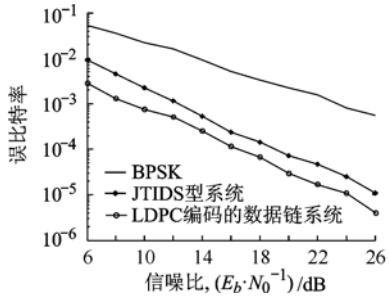

图 6　JTIDS 型系统和 LDPC 编码的数据链系统瑞利衰落信道下的误比特性能

5　结　论

本文提出了一个基于 LDPC 编码的战术数据链系统方案. 根据仿真结果的讨论,LDPC 编码方案可应用于战术数据链,并能够在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下,获得比 JTIDS 型系统更好的误码性能. 由此可见,LDPC 编码方案可提高数据链的传输可靠性,在战术数据链中有一定的应用前景. 需要指出的是,由于战术数据链在实时性、安全性等其他方面同样有着严格的要求,LDPC 编码方案对数据链其它性能需求的影响有待进一步研究.

参考文献 (References)

[1] Golliday C Jr. Data link communications in tactical air command and control systems[J]. IEEE Journal on SelectAreas in Communications, 1985, 3(5): 779 – 791

[2] Wang Hua, Kuang Jingming, Wang Zheng, et al. Transmission performance evaluation of JTIDS[C]//IEEE Military Communications Conference. Atlantic City, NJ: IEEE, 2005, 4: 2264 – 268

[3] Wilson W J. Applying layering principles to legacy systems: Link 16 as a case study[C]//IEEE Military Communications Conference. [S. l.]: IEEE, 2001, 1: 526 – 531

[4] Zhang Yuling, Yuan Dongfeng, Zhang Haigang. Adaptive LDPC for Rayleigh fading channel [C]//Proceeding of IEEE Ninth International Symposium on Computer and Communications. [S. l.]: IEEE, 2004, 2: 651 – 656

[5] Zhou Bo, Zhang Li, Kang Jingyu, et al. Non-binary LDPC codes vs. Reed-Solomon codes[C]//IEEE Information Theory and Applications Workshop. San Diego, CA: IEEE, 2008: 175 – 184

[6] Chen Junbin, Wang Lin, Li Yong. Performance comparison between non-binary LDPC codes and Reed-Solomon codes over noise bursts channels[C]//Proceedings of IEEE Communications Circuits and Systems. [S. l.]: IEEE, 2005, 1: 1 – 4

[7] Cai J, Tomlinson M, Tjhai C, et al. Comparison of concatenated reed-solomon coding with hard-decision to soft-decision LDPC coding for the rayleigh fading channel [C]//IEEE Information Theory Workshop. Chengdu, China: IEEE, 2006: 135 – 139

(下转第 1409 页)

4　结　论

本文通过液晶示温瞬态实验方法研究了在旋转状态下,涡轮叶片前缘的换热特性. 得出以下主要结论:①在冲击气膜复合换热结构中,冲击换热起主导作用,气膜孔的存在改变了流动结构,增强了换热效果. ②旋转对复合换热效果有很大影响,随着旋转数的升高,实验模型的整体换热呈下降的趋势. ③哥氏力的作用加强了射流与周围气体的掺混,减弱了冲击滞止区的换热,同时改变了流动结构,造成了压力面和吸力面上下半区的换热不均. ④哥氏力和离心力的共同作用,使得吸力面的平均换热好于压力面.

参考文献(References)

[1] General Motors Corporation. Laminated porous metal: USA, US3584972 [P]. 1971-06-15

[2] General Motors Corporation. Turbine blade: USA, US3619082 [P]. 1971-11-09

[3] General Motors Corporation. Cooled airfoil: USA, US3732031 [P]. 1973-05-08

[4] General Motors Corporation. Turbine cooling: USA, US3963368 [P]. 1976-06-15

[5] Rolls-Royce Limited. Cooling of aerofoil shaped blades: USA, US3620643 [P]. 1971-11-16

[6] Bunker R S, Metzger D E. Local heat transfer in internally cooled turbine airfoil leading edge regions: part Ⅰ-impingement cooling without film coolant extraction [J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112: 451 – 458

[7] Bunker R S, Metzger D E. Local heat transfer in internally cooled turbine airfoil leading edge regions: part Ⅱ-impingement cooling with film coolant extraction [J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112: 459 – 466

[8] Taslim M E, Pan Y. An experimental study of impingement on roughened airfoil leading edge walls with film holes[J]. ASME Journal, 2001, 123: 767 – 773

[9] Taslim M E, Bakhtari K, Liu H. Experimental and numerical investigations of impingement on a rib-roughened leading edge wall [J]. ASME Journal, 2003, 125: 682 – 691

[10] Hong S K, Lee D H, Cho H H. Effect of jet direction on heat/mass transfer of rotating impingement jet [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14 – 15): 2914 – 2920

[11] 吴宏,陶智,徐国强. 带气膜出流的旋转叶片冲击冷却的实验研究[J]. 航空动力学报,2000,15(4):375 – 380
Wu Hong, Tao Zhi, Xu Guoqiang. Experiments of impinging cooling in leading edges of rotating blades with outflow film [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(4): 375 – 380 (in Chinese)

[12] 王开,徐国强,孙纪宁,等. 冲击与气膜的组合形式对冷却效果的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(7):751 – 754
Wang Kai, Xu Guoqiang, Sun Jining, et al. Effect of combined impingement cooling and film cooling onhybrid cooling effectiveness [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 751 – 754(in Chinese)

[13] 王开,徐国强,陶智,等. 进气方式对冲击与气膜组合冷却效果的影响[J]. 工程热物理学报,2008,29(7):1185 – 1188
Wang Kai, Xu Guoqiang, Tao Zhi, et al. Effect of plenum feed configurations on the cooling effectiveness in the hybrid cooling configuration [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(7): 1185 – 1188(in Chinese)

(编　辑:张　嵘)

(上接第 1403 页)

[8] 丁聪,修春娣,韦志棉,等. LDPC 码在 COFDM 无人机数据链中的性能仿真[J]. 微计算机信息,2010,26(2):128 – 130
Ding Cong, Xiu Chundi, Wei Zhimian, et al. Performance of LDPC code for COFDM-based UAV data link [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(2): 128 – 130(in Chinese)

[9] Futaki Hisashi, Ohtsuki Tomoaki. Performace of low-density parity-check (LDPC) coded OFDM systems [C]//IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE, 2002, 3: 1696 – 1700

[10] Kami Yoshiki, Han Calvin, Miyanaga Yoshikazu. LDPC codes performance based on OFDM wireless communication system [C]//Proceedings of IEEE Intelligent Signal Processing and Communication Systems. [S. l.]: IEEE, 2005: 313 – 316

[11] Lin Shu, Daniel J, Costello Jr. Error control coding: fundamentals and applications [M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004

[12] Gallager R G. Low density parity check codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21 – 28

[13] 包建荣,詹亚锋,陆建华. 高效联合 LDPC 编码递归 MSK 调制[J]. 清华大学学报:自然科学版,2010,50(1):104 – 107
Bao Jianrong, Zhan Yafeng, Lu Jianhua. High efficiently joint LDPC coded recursive MSK modulation [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2010, 50(1): 104 – 107(in Chinese)

[14] John G Proakis. Digital communications [M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009

[15] Andrea Goldsmith. Wireless communications [M]. Beijing: Post and Telecom Press, 2007: 172 – 175

[16] Hu Xiaoyu, Eleftheriou Evangelos, Arnold D Michael. Progressive edge-growth Tanner graphs [C]//IEEE Global Telecommunications Conference. San Antonio, TX: IEEE, 2001, 2: 995 – 1001

[17] Kao Chihan, Kragh Frank, Robertson Clark. Performanceanalysis of a JTIDS/Link-16-type waveform transmitted over Nakagami fading channels with pulsed-noise interference [C]//IEEE Military Communications Conference, San Diego, CA: IEEE, 2008: 1 – 6

(编　辑:娄　嘉)