

基于可变长纠错码和掺杂调制的联合信源信道编码调制方法

包涵^{①②} 涂国防^{*①②} 张灿^② 高绍帅^② 陈德元^②

^①(魏桥国科大高等技术研究院 北京 101408)

^②(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 101408)

摘要: 针对无线通信中存在的频谱资源有限、信道衰落和多径效应等问题, 该文将可变长纠错(VLEC)编码和掺杂调制相结合, 提出一种新的联合信源信道编码调制方法。该方法利用外信息转移(EXIT)图分析系统的迭代译码特性, 优化设计可变长纠错编码和掺杂调制的参数。主要包括: 设计有更大自由距离的可变长码, 使其具有纠错能力; 设计优化掺杂调制的掺杂和映射规则的方法, 使掺杂调制EXIT曲线与可变长纠错编码EXIT曲线匹配, 降低迭代译码收敛所需的信噪比(SNR)。仿真结果表明, 在AWGN信道和瑞利衰落信道下, 该联合信源信道编码调制方法与分离的信源信道编码调制方相比, 迭代收敛所需的信噪比减小了1 dB以上, 相比其他的联合信源信道编码调制方法, 也有更好的误码率性能。在误码率为 10^{-4} 时, 该方法距离AWGN信道和瑞利衰落信道的香农限分别为0.7 dB和1.0 dB。

关键词: 联合信源信道编码; 掺杂调制; 迭代译码; 外信息转移图

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)06-2045-09

DOI: [10.11999/JEIT220531](https://doi.org/10.11999/JEIT220531)

Joint Source-Channel Code Modulation Scheme Based on Variable-length Error-Correct Code and Doping Modulation

BAO Han^{①②} TU Guofang^{①②} ZHANG Can^②
GAO Shaoshuai^② CHEN Deyuan^②

^①(The High Technology Research Institute of Wei Qiao, USCAS, Beijing 101408, China)

^②(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: To deal with effects of limited spectrum, fading and multipath during wireless communication, a new joint source-channel code modulation scheme is proposed. This scheme consists of a Variable-Length Error-Correct (VLEC) code and doping modulation. With the aid of EXtrinsic Information Transfer (EXIT) chart analysis for the iterative decoding characteristics, the parameters of VLEC and doping modulation are designed. The design includes: A variable-length code with large free distance is constructed to provide error correction capability; The doping code and mapping of modulation are optimized to make the EXIT curve of doping modulation match with the EXIT curve of VLEC, and hence the Signal-to-Noise Ratio (SNR) required for iterative decoding convergence is reduced. Simulation results show that over AWGN channel and Rayleigh fading channel, the proposed scheme has more than 1 dB SNR gains compared with the separated source-channel code modulation and has the best performance compared with other joint source-channel code modulation schemes. Also, at the symbol error rate of 10^{-4} , the performance of the proposed system is 0.7 dB and 1.0 dB away from the Shannon limit, respectively.

Key words: Joint source-channel code; Doping modulation; Iterative decoding; EXtrinsic Information Transfer (EXIT) chart

收稿日期: 2022-04-27; 改回日期: 2022-09-18; 网络出版: 2022-10-14

*通信作者: 涂国防 gft@ucas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571416, 61271282), 中国科学院奖励基金(2017-6-17)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571416, 61271282), The Award Foundation of Chinese Academy of Sciences (2017-6-17)

1 引言

传统的无线通信系统依据香农信源信道分离定理^[1],将信源编码、信道编码分离设计,当各部分都达到最优时,可实现系统的全局最优。在实际无线通信系统中,由于时延和复杂度的限制,分离定理的假设前提难以满足,系统无法达到全局最优,因此一些文献提出了联合信源信道编译码方法^[2]。

联合信源信道编译码方法能够根据不同的信源、信道条件,以及资源限制等来优化系统信源编码和信道编码模块参数,提高通信系统的整体性能。其中一个重要研究方向是将可变长码(Variable Length Code, VLC)用于联合信源信道编译码系统。VLC被广泛用在文本、图像和视频的信源压缩编码中,它通过对概率大的信源符号分配短码字,概率小的信源符号分配长码字,提高了信源传输速率。但传统的VLC如Huffman码,不具备纠错能力,信道传输错误会导致VLC译码发生严重的错误扩散,为此,研究人员对使用VLC的联合信源信道编译码系统进行了改进,特别是在VLC编码的鲁棒性和VLC译码性能方面。文献[3–6]提出了更可靠的可变长编码方法,例如可逆变长码(Reversible Variable Length Code, RVLC)^[3]通过双向译码来减轻同步损耗的影响;可变长纠错码(Variable Length Error-correction Code, VLEC)^[4–6]通过加入冗余,提高码字的自由距离,使VLC编码同时具有纠错能力。相比传统可变长熵编码,这些编码方法能够降低信源译码的误码率。另外,为提高VLC的译码性能,文献[7]提出VLC的最大后验概率译码算法,实现了信源符号的软判决译码(Soft Decision Source Decoding, SDDSD)。相比硬判决方法,软译码方法能充分利用信源编码冗余提高译码性能。在此基础上,文献[8]和文献[9]分别研究了VLC与Turbo码和低密度奇偶校验(Low-Density Parity Check, LDPC)码的迭代联合译码系统,将信源软译码与信道软译码相结合,通过迭代交换比特外信息,提高信道纠错译码性能,获得了比分离译码更低的误码率。此外,对于特殊的二进制信源,文献[10]使用双LDPC码同时实现信源压缩与纠错的联合编码。

为进一步提高通信系统的带宽和功率效率,国内外学者结合高效的高阶星座点调制方法,提出了联合信源信道编译码调制方法,将通信系统中的信源编码、信道编码和调制模块进行联合编译码。文献[11,12]提出了一种联合信源信道与多维调制的编译码方法,设计不等概率符号的多维调制规则,通过增大符号之间的欧氏距离提高了符号抗噪性能,

该方法计算复杂度低,但是获得的编码增益有限,无法实现接近信道容量的系统性能。文献[13]针对信源编码、信道卷积码和调制的串联系统,提出了一种新的Turbo迭代译码方法,通过交换信源译码器、信道译码器和解调器三者的外信息,在不扩展带宽的情况下提高了编码增益。文献[14]将VLC与TTCM(Turbo Trellis Coded Modulation)的网格图结合,使符号译码能同时利用信源统计特性和译码外信息,从而提高译码解调性能。文献[15]将VLC与比特交织编码调制(Bit-Interleaved Coded Modulation, BICM)相结合,通过优化调制星座点的映射,降低了迭代译码解调的误码率。文献[16,17]进一步将空时编码与信源信道编码调制结合,以应对信道衰落。但是这些方法并没有考虑发送端信源信道编码器参数的优化设计。对于联合信源信道编码系统,各部分的参数选取都会影响迭代译码性能,于是,文献[18–22]提出使用外信息转移(EXtrinsic Information Transfer, EXIT)图^[23]对编码参数进行联合优化设计的方案。文献[18]在调制前增加了单位速率的预编码,使系统内外编码器的EXIT曲线之间能够形成开放的通道,从而达到使迭代译码收敛,移除较高误码平台的目的。文献[19,20]设计了相匹配的可变长编码和单位速率卷积编码,得到具有较窄的迭代译码通道的EXIT图。文献[21,22]利用EXIT图分析比较了不同参数编码器组成的联合编码调制系统的迭代译码收敛性能,指出提高信源编码的自由距离能获得更大的信源信道迭代译码增益。但是上述方案没有联合考虑调制设计,在采用高阶星座点调制时,信源信道译码器和解调器之间不能通过迭代充分利用对方提供的外信息,造成系统译码的性能损失,无法使系统传输速率更加接近理论信道容量。

针对这一问题,本文将掺杂技术^[24]用于联合信源信道编码调制系统,提出了一种将可变长纠错编码和掺杂调制相结合的联合信源信道编码调制方法,能够根据可变长信源编码特性,联合优化掺杂调制的参数,使系统获得更好的迭代译码解调性能。具体设计包括两点:(1)根据信源符号统计概率,设计具有纠错能力的可变长码,将信源输出的符号直接编码为具有冗余的比特序列,同时实现信源编码和信道编码。使接收端能够通过迭代译码同时利用信源冗余和可变长纠错编码冗余纠正信道噪声和衰落造成的传输错误;(2)利用EXIT图对迭代译码系统的分析,优化掺杂调制参数,实现调制与可变长码译码的EXIT曲线相匹配,降低了译码收敛所需的信噪比。通过这两点,设计后的联合信源信道编码调制系统具有接近信道容量的译码性能。

2 联合信源信道编码调制方法框图

联合信源信道编码调制方法框图如图1所示。发送端首先使用可变长纠错编码将信源符号直接编码为具有冗余的比特序列，然后使用掺杂调制将随机交织后的编码比特映射为调制符号进行发送。接收端使用迭代译码方法实现信源信道与调制联合译码解调，判决后可得到发送端传输的信源符号。

在发送端，通过VLEC编码将信源符号 u_i 依次映射成二进制码字 $\mathbf{c}_i = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}, c_l \in \{0, 1\}$ ，得到比特序列 $\mathbf{c}$ 。VLEC编码是一种联合信源信道编码，它同时具有压缩能力和纠错能力。VLEC编码通过对概率大的符号分配短的码字，概率小的符号分配长的码字，实现信源的压缩；但相比传统的VLC熵编码，如Huffman编码，VLEC编码提高了码字的自由距离，能够纠正码字中的错误。VLEC采用自由距离大于1的码字，增加合法比特序列之间的最小汉明距离，从而达到纠正传输中的错误，降低迭代译码误码率的目的，更加适用于使用迭代译码的通信系统。

VLEC编码输出的比特序列 $\mathbf{c}$ ，经交织器交织后得到比特序列 $\mathbf{d}$ ，然后对比特序列 $\mathbf{d}$ 进行掺杂调制。本文提出的掺杂调制方法结构如图2所示，包括掺杂编码和调制两部分。

掺杂编码采用掺杂比例为 P 的卷积码对比特序列 $\mathbf{d}$ 进行编码，在调制符号之间引入相关性，其中掺杂比例 P 是掺杂调制部分的一个重要参数，取值范围为任意非负整数。具体来说，掺杂编码输出序列的每 m 个连续比特作为一个符号 v_k ，第 k 个符号中的所有比特来自编码比特，其中 $k = lP$ ， $l = 0, 1, \dots$ ，其他符号中的所有比特来自未编码的信息比特。为了使解调的EXIT曲线能达到

(1,1)点，移除迭代解调的错误平台，同时不降低系统传输速率，卷积码一般使用码率为1的递归卷积码。最后，调制部分将掺杂编码后的每个符号 v_k ，根据星座点映射规则 μ 映射为 $M = 2^m$ 元星座图上的点 x_k ，即 $x_k = \mu(v_k)$ ，从而得到调制符号序列 $\mathbf{x}$ ，作为噪声信道输入。

在接收端，掺杂解调和可变长纠错译码通过交换最大对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR)信息实现迭代译码。掺杂解调采用Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv(BCJR)算法，利用接收信号 $\mathbf{y}$ 的条件概率和纠错译码反馈的LLR信息 $L_{a,M}$ ，计算出外信息 $L_{e,M}$ 。解交织后得到的 $L_{a,D}$ 作为VLEC译码的输入。VLEC译码采用比特级网格图的BCJR译码算法^[7]，同时利用信源符号的先验信息 P_s 和解交织的LLR信息 $L_{a,D}$ ，得到译码输出LLR $L_{e,D}$ ，交织后反馈给解调器。两部分之间通过不断交换外信息实现迭代译码，直至外信息收敛或达到规定的迭代次数后，经判决器判决，得到估计的信源符号序列。

在上述联合信源信道编码调制系统中，通过设计发送端可变长纠错码和掺杂调制的参数，能使系统灵活地适应不同的信道和信源特性，从而获得接近信道容量的传输性能。

3 可变长纠错码的设计

VLEC码^[5]是一种结合信源压缩编码和纠错的联合信源信道编码方法。在码字构造方面，VLEC码与经典的可变长熵编码Huffman码相似，短的码字会优先分配给概率大的信源符号。与熵编码不同的是，VLEC编码增加了平均码字长度，具有更大的自由距离，从而具有纠错能力。

3.1 可变长码字的距离特性

自由距离 d_f 是VLC的重要参数，它反映两个等

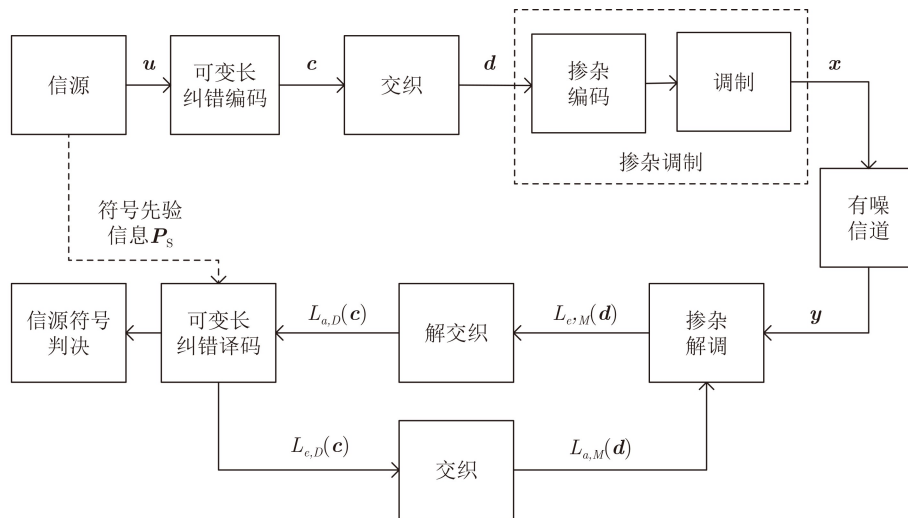


图1 联合信源信道编码调制框图

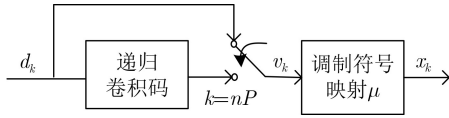


图2 掺杂调制结构

长码字序列之间的最小汉明距离，决定了VLC在高信噪比条件下的纠错能力。自由距离 $d_{\min}$ 取决于VLC码字的距离特性，包括：最小块距离 $b_{\min}$ ，即相同长度码字的最小汉明距离；最小发散距离 $d_{\min}$ ，即不同长度码字前缀的最小汉明距离；最小接近距离 $c_{\min}$ ，即不同长度码字后缀的最小汉明距离，其关系表示为^[5]

$$d_f = \min(b_{\min}, d_{\min} + c_{\min}) \quad (1)$$

对于Huffman编码来说，其码字满足 $b_{\min} = 1$ ， $d_{\min} = 1$ 和 $c_{\min} = 0$ ，可看作一种最小自由距离 d_f 为1的特殊VLC，任意的比特序列都是合法的码字，不具有纠错能力。

本文的联合信源信道编码调制系统中，需要使用具有迭代译码纠错能力的VLC。因此，使用自由距离 $d_f \geq 2$ 的VLEC编码。根据式(1)，为了得到自由距离为 d_f 的VLEC，可以选择码字参数为 $b_{\min} = d_f$ ， $d_{\min} = \lceil d_f/2 \rceil$ 以及 $c_{\min} = d_f - d_{\min}$ ，构造可变长纠错码的码字。

3.2 可变长纠错码的构造

构造VLEC需要找到满足给定距离参数要求的可变长码字，并且将码字从短到长依次分配给按概率从大到小排序的信源符号。本文使用如下算法构造自由距离 d_f 的VLEC：

(1)初始化：根据给定的自由距离 d_f ，计算码字距离参数 $b_{\min}$ ， $c_{\min}$ 和 $d_{\min}$ ；给定一个初始码字长度 L 。

(2)生成长度为 L ，满足最小块距离为 $b_{\min}$ 的码字集合 C 。若集合 C 为空，则码字长度加一 $L \leftarrow L + 1$ 。

(3)从长度为 L 的码字中，选择满足与集合 C 中所有码字距离大于 $d_{\min}$ 的码字，加入集合 W 中。如果集合 W 为空，则删除集合 C 中最后一个码字，重复步骤3。如果集合 W 不为空，则在每个码字之后加一位比特，得到码字数目是原有码字数目两倍的新集合，作为新的集合 W 。

(4)删除集合 W 中与集合 C 中码字不满足最小接近距离 $c_{\min}$ 的码字，保证集合 W 中所有码字都满足距离参数 $b_{\min}, c_{\min}$ 的要求。

(5)选出集合 W 中所有满足最小块距离为 $b_{\min}$ 的码字，加入码字集合 C 中。

(6)若集合 C 中的码字数目大于等于信源符号数目，则码字构造完成，跳转到步骤7；否则，令长度 $L \leftarrow L + 1$ ，重复步骤3—步骤6。

(7)将集合 C 中的码字从短到长依次分配给按概率从大到小排序的信源符号。

通过上述步骤，即可得到满足给定的自由距离 d_f 的可变长纠错码。

4 掺杂调制的设计

本节将利用EXIT图，设计与可变长纠错编码匹配的掺杂参数，从而使迭代译码解调获得接近信道容量的性能。

4.1 EXIT图理论

EXIT图是研究迭代译码性能和设计编码器参数的有效工具，它通过分析软信息输入软信息输出(Soft In Soft Out, SISO)译码器的信息转移特性，来预测译码器迭代译码的收敛情况，而不需要进行实际的迭代译码过程^[21]。EXIT图包括内编码器和外编码器的EXIT曲线。译码器的EXIT曲线 Γ 表示在输入不同先验信息 I_a 时，译码器输出的对应外信息，即

$$I_e = \Gamma(I_a) \quad (2)$$

其中， I_a 是译码器输入先验LLR L_a 与发送端编码器相应比特序列的互信息， I_e 是输出LLR L_e 与相应比特序列的互信息。当对数似然比相互独立且发送端比特 b 等概率时，互信息可由式(3)求得^[21]

$$\begin{aligned} I_a &\triangleq I(L_a, b) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=\pm 1} \int_{-\infty}^{\infty} f_{L_a}(l|b=i) \\ &\quad \times \log_2 \frac{2f_{L_a}(l|b=i)}{f_{L_a}(l|b=1) + f_{L_a}(l|b=0)} dl \end{aligned} \quad (3)$$

和

$$\begin{aligned} I_e &\triangleq I(L_e, b) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=\pm 1} \int_{-\infty}^{\infty} f_{L_e}(l|b=i) \\ &\quad \times \log_2 \frac{2f_{L_e}(l|b=i)}{f_{L_e}(l|b=1) + f_{L_e}(l|b=0)} dl \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $f_{L_a}(l|X=i)$ 和 $f_{L_e}(l|X=i)$ 分别是先验对数似然比 L_a 和外对数似然比 L_e 的条件概率密度函数，可以通过蒙特卡罗仿真得到。

将内译码器的EXIT曲线和外译码器的反向EXIT曲线画在同一图中，即可得到系统的EXIT图。在迭代译码中，一个译码器输出的外信息作为另一个译码器的先验输入，可以通过分析互信息在两条EXIT曲线间的转移过程预测迭代译码的性能。根据文献^[21]，当两条曲线的交点在(1,1)点，并且内译码器的EXIT曲线在外译码器的反向EXIT曲线的

上方时, 使用足够长的交织器能够实现任意低的迭代译码误码率。

4.2 掺杂调制参数的优化

图1所示的联合信源信道编码调制系统是一个串联编码系统, 其中VLEC是外编码器, 掺杂调制是内编码器, 系统的EXIT图包括掺杂解调的EXIT曲线 Γ_M 和VLEC译码的EXIT曲线 Γ_D , 可分别表示为

$$I_{e,M} = \Gamma_M(I_{a,M}|\mathbf{y}) \quad (5)$$

和

$$I_{e,D} = \Gamma_D(I_{a,D}|\mathbf{P}_S) \quad (6)$$

其中, $I_{a,M}$ 是解调输入 $L_{a,M}$ 和比特序列 d 的平均互信息, $I_{e,M}$ 是解调输出 $L_{e,M}$ 和比特序列 d 的平均互信息。同样, $I_{a,D}$ 和 $I_{e,D}$ 分别是VLEC译码输入 $L_{a,D}(c)$ 和输出 $L_{e,D}(c)$ 与比特序列 c 的平均互信息。另外, $\mathbf{y}$ 和 $\mathbf{P}_S$ 分别表示接收序列和信源符号统计概率对平均互信息的影响。

根据4.1节给出的设计原则, 掺杂解调和VLEC译码的EXIT曲线应满足 $\Gamma_M(I) > \Gamma_D^{-1}(I)$, $I \in [0, 1)$, 才能使解调与VLEC迭代译码的误码率无限小。本小节将给出优化掺杂调制参数的方法, 在信噪比尽量小的条件下, 找到与给定VLEC曲线形状匹配的掺杂调制曲线。

图2所示的掺杂调制结构中, 需要优化的参数包括: 卷积码生成多项式 (g_b, g_f) , 掺杂比例 P , 以及映射规则 μ 。通过改变这些参数, 能够得到不同的掺杂解调EXIT曲线。考虑到译码复杂度, 本文限制卷积码的约束长度小于等于4。为了减小掺杂调制参数选取的复杂度, 本文首先固定映射规则 μ , 优化编码参数 (g_b, g_f) 和 P 。确定掺杂编码参数后, 再优化映射。若新的映射能降低曲线间形成译码通道的信噪比, 则保留新的映射, 并重新优化掺杂编码参数。重复这一过程直到设定次数。

在优化映射时, 本文利用自适应二元交换算法(Adaptive Binary Switch Algorithm, ABSA)^[25], 降低映射搜索的复杂度。ABSA的基本思想是通过自适应的调整代价函数(Cost Function, CF), 并交换映射符号最小化CF, 迭代优化映射规则 μ , 使解调的EXIT曲线 Γ_M 与VLEC的EXIT曲线 Γ_D^{-1} 相匹配。本文使用的代价函数为^[25]

$$\varphi = \mathbf{l}^T \mathbf{D} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{D} = [D_0, D_1, \dots, D_m]^T$, D_i 表示在已知有关输入调制符号的 i 比特信息时, 使用规则 μ 将符号映射到星座点的harmonic平均距离^[25], $\mathbf{\lambda} = [\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m]^T$ 为 $\mathbf{D}$ 中各分量的权重, 其值会在优化过程中根据每次得到的EXIT图曲线自适应地调整。

综上, 对于给定的VLEC译码反向曲线 Γ_D^{-1} , 本文提出的掺杂调制参数优化算法如下:

(1) 初始化星座点映射 μ 为格雷映射, 信道信噪比 γ 为香农限, $\mathbf{\lambda}$ 为 $[0, 0, \dots, 0]^T$; 设定搜索次数。

(2) 在信噪比为 γ , 映射为 μ 的条件下, 选取满足曲线 Γ_M 在曲线 Γ_D^{-1} 上方的卷积码生成多项式为 (g_b, g_f) 和掺杂比例 P 的组合, 若不存在这样的组合, 则增大信噪比 $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$, 重复步骤2, 若存在至少一个这样的组合; 选取约束长度最短的卷积码对应的 (g_b, g_f) 和 P , 作为掺杂编码参数。

(3) 降低信噪比 $\gamma \leftarrow \gamma - \Delta\gamma$, 使用ABAS算法, 优化映射规则 μ 。

(a) 通过交换两个输入调制符号的映射, 可以获得新的映射规则。依次交换所有符号, 选取使得代价 $\varphi = \mathbf{\lambda}^T \mathbf{D}_0$ 最小的映射规则 μ' ;

(b) 计算参数为 (g_b, g_f) , P 和 μ' 的掺杂解调曲线 Γ_M , 并根据曲线 Γ_M 自适应地调整代价函数。即若曲线 Γ_M 存在低于曲线 Γ_D^{-1} 的点 $(I_{a,M}, I_{e,M})$, 则令权重 $\lambda_k \leftarrow \lambda_k + 1$, 其中 $k = [I_{a,M} \cdot m + 0.5]$ 。例如当掺杂解调曲线 Γ_M 在先验信息 $I_{M,a} = 0$ 点附近低于 Γ_D^{-1} , 则令 $\lambda_0 \leftarrow \lambda_0 + 1$ 。

(c) 重复步骤(a)、步骤(b)直到形成译码通道。

(4) 重复步骤(2)、步骤(3)直到设定的搜索次数。

在本文提出的优化算法中, 为了达到接近信道容量的迭代译码性能, 进行最优参数搜索前需要将信噪比初始化为香农限, 即给定信道模型和传输速率条件下, 系统能够实现无误传输理论上所需的最小信噪比。调制符号由VLEC码字序列随机交织得到的比特流映射而成, 因此可以认为调制符号均匀分布, 由此得到信道容量的计算公式为

$$C = \log_2 M - \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \mathbb{E} \left\{ \log_2 \sum_{i=0}^{M-1} \exp \left[-\frac{|hx_k + n - hx_i|^2 - |n|^2}{2\sigma^2} \right] \right\} \quad (8)$$

其中, x_i 是调制星座点信号, M 是调制星座点个数, h 是衰落信道系数, n 是信道噪声。本文使用蒙特卡罗仿真方法求解式(8), 得到AWGN信道和瑞利衰落信道条件下不同传输速率对应的香农限。

本文给出了基于16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)掺杂调制在不同信道条件下的参数, 其中信源为英语字母表信源, VLEC的自由距离为 $d_f = 4$, 根据第5节给出的计算可得系统传输速率为2.4 bit/调制符号, 得到信噪比 γ 初始值分别为3 dB和5.2 dB。由上述掺杂调制参数优化方法, 得到与该VLEC编码匹配的调制参数如表1所示。

图3和图4分别画出了表1加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道和瑞利衰落信道的掺杂调制EXIT曲线。作为对比,图中也同时画出了采用直接调制方法和采用单位速率码(Unity-Rate Code, URC)编码后交织调制方法的EXIT曲线。从图中可以看出,在AWGN信道和瑞利衰落信道条件下,采用掺杂调制,当信噪比分别为3.4 dB和5.8 dB时,掺杂调制的EXIT曲线能够与VLEC译码的反向EXIT曲线之间形成译码通道。然而在相同信噪比下,直接调制的EXIT曲线会与VLEC译码曲线分别在 $I_D^c/I_M^a = 0.10$ 和 $I_D^c/I_M^a = 0.38$ 处相交,URC编码调制的EXIT曲线会与VLEC译码曲线分别在 $I_D^c/I_M^a = 0.17$ 和 $I_D^c/I_M^a = 0.14$ 处相交,如图中虚线所示。这意味着,在此信噪比下,使用直接调制以及URC编码调制方法的系统具有很高的误码率。通过提高信噪比,直接调制以及URC编码调制才能够通过迭代译码获得较低的误码率。在AWGN信道和瑞利衰落信道下,当信噪比分别为4.2 dB和6.2 dB时,直接调制曲线与VLEC曲线交点接近(1,1)点;当信噪比分别为4.0 dB和6.4 dB时,URC编码调制曲线能够与VLEC曲线形成译码通道。根据EXIT图对译码性能的预测,当两条曲线间存在译码通道,且交织序列足够长时,在该信噪比下系统迭代译码收敛。可见,本文的掺杂调制方法与VLEC曲线形成译码通道所需的信噪比小于另外两种调制方法,从理论上能够获得更好的迭代译码性能。

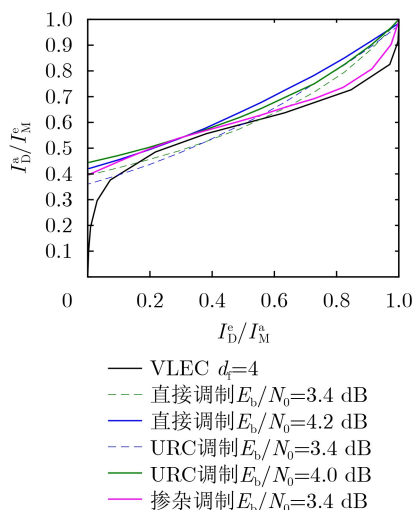


图 3 AWGN信道下VLEC编码和不同调制方法的EXIT曲线

5 仿真实验结果

为了验证本文提出的基于可变长编码和掺杂调制的联合编码调制方法,本文在AWGN信道和瑞利衰落信道条件下仿真了信源符号的误码率(Symbol Error Rate, SER),并与分离的信源信道编码调制方法以及一些经典的联合编码调制方法进行了比较。在实验中,本文采用英语字母表作为信源,即信源包括26个相互独立的不等概率符号,符号的概率分布由文献[5]给出,可以计算出此信源的熵为4.18 bit/符号。实验中所有方法均采用16QAM调制,系统传输速率为 $R = 0.6$,即2.4 bit/调制符号。使用蒙特卡罗仿真可以得出在AWGN信道和瑞利衰落信道下,系统实现可靠传输所需的最小信噪比,即香农限分别为3 dB和5.2 dB,作为衡量系统传输性能的依据。为了与其他文献一致,在相同比特信噪比条件下,比较信源符号误码率。实验中,每帧随机生成5 000个信源符号,最大仿真帧数设为 10^5 帧,接收端迭代译码次数上限为35次。

本文提出的VLEC和掺杂调制的联合信源信道编码调制方法中,选取VLEC的自由距离参数为 $d_t = 4$,根据3.2节的方法构造VLEC码字,得到码字平均长度为7.08 bit,可以计算出相应编码速率为 $R = 4.18/7.08 \approx 0.59$ 。然后,根据第4节的优化调制参数方法,可以得到在AWGN和瑞利衰落信道下与该VLEC编码匹配的掺杂调制参数,如表1所示。作为对比,本文还仿真了采用Huffman码和

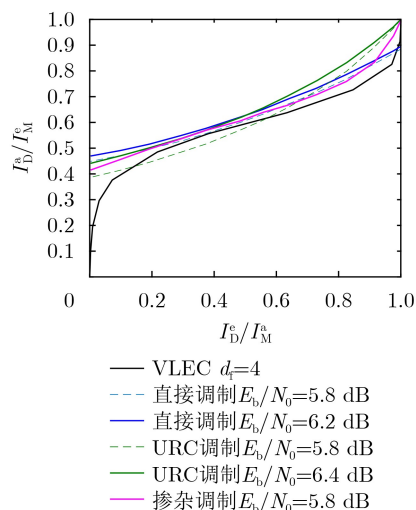


图 4 瑞利衰落信道下VLEC编码和不同调制方法的EXIT曲线

表 1 不同信道条件下的掺杂调制参数

信道	生成多项式	掺杂比例	调制映射
AWGN信道	(3,2)	3	[15,16,14,13,5,6,8,7,3,4,2,1,9,10,12,11]
瑞利衰落信道	(3,2)	3	[15,12,10,13,1,6,7,4,8,3,2,5,9,14,16,11]

码率为3/5的Turbo码的分离信源信道编码调制方法,以及其他几种联合信源信道编码调制方法,包括:VLEC-16QAM, VLEC-URC-16QAM^[19]和FLC-URC-16QAM^[22]。VLEC-16QAM方法直接对VLEC编码的输出进行调制,调制采用性能最优的MSEW映射^[26]方式;在VLEC-URC-16QAM方法中,VLEC编码的输出经过生成多项式为 $(3, 2)_8$ 的URC编码,再通过Gray映射调制。FLC-URC-16QAM方法采用定长码(Fixed-Length Code, FLC)实现联合信源信道编码,长度为7的线性分组码将信源符号编码为比特码字,比特码字交织后作为URC编码调制输入。在AWGN和瑞利衰落信道下,对上述方法仿真得到的SER分别如图5和图6所示。

从图5和图6的误码率曲线可以看出,本文提出的VLEC-掺杂调制方法在AWGN信道和瑞利衰落信道条件下,均有最优的误码率性能。在信噪比为3.7 dB和6.5 dB时就能够实现迭代译码的收敛,与AWGN以及瑞利衰落信道的香农限的距离分别为0.7 dB和1 dB。在误码率为 10^{-4} 时,本方法相比分

离的Huffman-Turbo编码调制方法,获得了1 dB以上的信噪比增益。同时相比其他联合信源信道编码调制方法,本方法的误码率性能也有一定程度的提高。与VLEC-URC-16QAM以及FLC-URC-16QAM方法相比,本方法迭代收敛所需的信噪比在AWGN信道下低0.4 dB左右,在瑞利衰落信道下低0.5 dB左右。这是由于本文联合设计了编码与调制参数,获得更加匹配的EXIT曲线组合,从而降低了迭代译码收敛所需的信噪比。虽然在瑞利衰落信道下,VLEC-16QAM方法与本方法迭代收敛所需的信噪比相近,但是VLEC-16QAM方法存在 10^{-4} 数量级的误码率平台。综上,本文设计的掺杂调制方法,无论在迭代收敛特性方面,还是误码率平台方面都具有更优的性能。

6 总结

本文提出了一种基于可变长纠错编码和掺杂调制的联合信源信道编码调制方法,通过联合设计可变纠错长编码和掺杂调制的参数,提高了系统传输性能。本文首先给出了一种构造满足给定自由距离的可变长纠错码方法。然后,利用EXIT图分析迭代译码性能,确定与可变长编码相匹配的掺杂调制参数。即基于ABSA算法优化了掺杂调制中卷积码的生成多项式、掺杂比例以及映射规则,从而降低掺杂调制EXIT曲线与可变长纠错码EXIT曲线形成迭代译码收敛通道所需的信噪比。仿真结果表明,本方法具有接近信道容量的译码性能,到AWGN信道以及瑞利衰落信道的香农限的距离分别为0.7 dB和1 dB。与分离编码调制方法相比,迭代收敛所需的信噪比减小了1 dB以上;与其他联合信源信道调制方法相比,信噪比性能也有0.4~0.5 dB的提升。

参考文献

- [1] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379–423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [2] SAYOOD K, LIU Fuling, and GIBSON J D. A constrained joint source/channel coder design[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1994, 12(9): 1584–1593. doi: 10.1109/49.339927.
- [3] TAKISHIMA Y, WADA M, and MURAKAMI H. Reversible variable length codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, 43(2/4): 158–162. doi: 10.1109/26.380026.
- [4] HUANG Chun, WU Tingyi, CHEN Poning, et al. An efficient tree search algorithm for the free distance of variable-length error-correcting codes[J]. *IEEE*

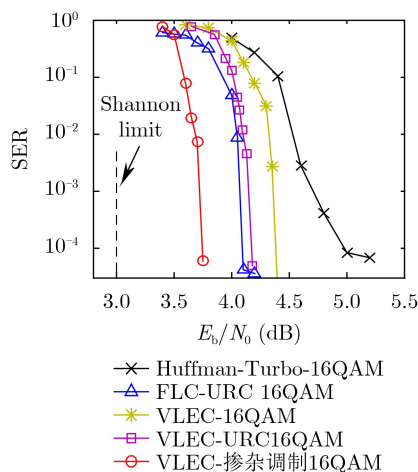


图5 AWGN信道下不同信源信道编码调制方法的SER

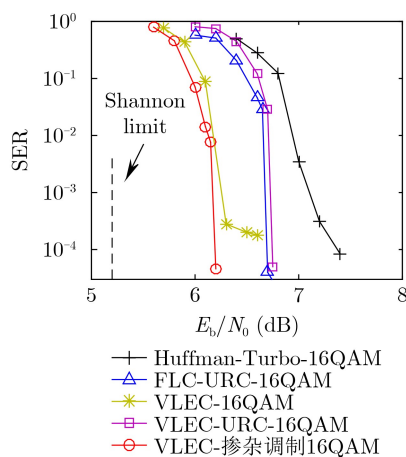


图6 瑞利衰落信道下不同信源信道编码调制方法的SER

- Communications Letters*, 2018, 22(3): 474–477. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2777441](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2777441).
- [5] CHEN Y M, WU F T, LI C P, *et al.* An efficient construction strategy for near-optimal variable-length error-correcting codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(3): 398–401. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2891623](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2891623).
- [6] CHEN Y M, WU F T, LI C P, *et al.* On the design of near-optimal variable-length error-correcting codes for large source alphabets[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(12): 7896–7910. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3024192](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3024192).
- [7] BAUER R and HAGENAUER J. On variable length codes for iterative source/channel decoding[C]. Proceedings DCC 2001. Data Compression Conference, Snowbird, USA, 2001: 273–282. doi: [10.1109/DCC.2001.917158](https://doi.org/10.1109/DCC.2001.917158).
- [8] WU H T, WU Chunfeng, and CHANG W W. Iterative symbol decoding of variable-length codes with convolutional codes[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2016, 18(1): 40–49. doi: [10.1109/JCN.2016.0000007](https://doi.org/10.1109/JCN.2016.0000007).
- [9] ZRIBI A, PYNDIAH R, ZAIBI S, *et al.* Low-complexity soft decoding of Huffman codes and iterative joint source channel decoding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(6): 1669–1679. doi: [10.1109/TCOMM.2012.041212.100330](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2012.041212.100330).
- [10] CHEN Qiwang, LAU F C M, WU Huihui, *et al.* Analysis and improvement of error-floor performance for JSCC scheme based on double Protograph LDPC codes[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 14316–14329. doi: [10.1109/TVT.2020.3036657](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3036657).
- [11] CHENG Chen, TU Guofang, and ZHANG Can. Joint source-channel coded multidimensional modulation for variable-length codes[J]. *Science China, Information Sciences*, 2014, 57(6): 062302. doi: [10.1007/s11432-014-5079-7](https://doi.org/10.1007/s11432-014-5079-7).
- [12] 谢雨, 涂国防, 张灿, 等. 不等概率可变长符号联合信源信道编码的调制[J]. 电子学报, 2021, 49(12): 2372–2380. doi: [10.12263/DZXB.20200169](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200169).
- XIE Yu, TU Guofang, ZHANG Can, *et al.* Joint source-channel coding modulation for non-equiprobable variable-length symbols[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(12): 2372–2380. doi: [10.12263/DZXB.20200169](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200169).
- [13] CLEVORN T, BRAUERS J, ADRAT M, *et al.* Turbo decodulation: Iterative combined demodulation and source-channel decoding[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(9): 820–822. doi: [10.1109/LCOMM.2005.1506714](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2005.1506714).
- [14] ALJOHANI A J, SUN Hua, NG S X, *et al.* Joint source and turbo trellis coded hierarchical modulation for context-aware medical image transmission[C]. 2013 IEEE 15th International Conference on E-Health Networking, Applications and Services (Healthcom 2013), Lisbon, Portugal, 2014. doi: [10.1109/HealthCom.2013.6720627](https://doi.org/10.1109/HealthCom.2013.6720627).
- [15] MINALLAH N, ULLAH K, KHAN I U, *et al.* Efficient Wireless Video Communication Using Sophisticated Channel Coding and Transmitter Diversity Gain Technique[M]. Research Square. 2020. doi: [10.21203/rs.3.rs-35714/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-35714/v1).
- [16] KHAN H U, MINALLAH N, MASOOD A, *et al.* Performance analysis of sphere packed aided differential space-time spreading with iterative source-channel detection[J]. *Sensors*, 2021, 21(16): 5461. doi: [10.3390/s21165461](https://doi.org/10.3390/s21165461).
- [17] MINALLAH N, AHMED I, FRNDA J, *et al.* Averting BER floor with iterative source and channel decoding for layered steered space-time codes[J]. *Sensors*, 2021, 21(19): 6502. doi: [10.3390/s21196502](https://doi.org/10.3390/s21196502).
- [18] BREJZA M F, WANG Tao, ZHANG Wenbo, *et al.* Exponential golomb and rice error correction codes for generalized near-capacity joint source and channel coding[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 7154–7175. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2584982](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2584982).
- [19] MAUNDER R G and HANZO L. Near-capacity irregular variable length coding and irregular unity rate coding[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(11): 5500–5507. doi: [10.1109/TWC.2009.070624](https://doi.org/10.1109/TWC.2009.070624).
- [20] MINALLAH N, ULLAH K, FRNDA J, *et al.* Transmitter diversity gain technique aided irregular channel coding for mobile video transmission[J]. *Entropy*, 2021, 23(2): 235. doi: [10.3390/e23020235](https://doi.org/10.3390/e23020235).
- [21] MINALLAH N, BUTT M F U, KHAN I U, *et al.* Analysis of near-capacity iterative decoding schemes for wireless communication using exit charts[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 124424–124436. doi: [10.1109/access.2020.3006024](https://doi.org/10.1109/access.2020.3006024).
- [22] KHALIL A, MINALLAH N, AWAN M A, *et al.* On the performance of wireless video communication using iterative joint source channel decoding and transmitter diversity gain technique[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, 2020: 8873912. doi: [10.1155/2020/8873912](https://doi.org/10.1155/2020/8873912).
- [23] NGUYEN H V, XU Chao, NG S X, *et al.* Near-capacity wireless system design principles[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 1806–1833. doi: [10.1109/COMST.2015.2464300](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2464300).
- [24] PFLETSCHINGER S and SANZI F. Error floor removal for

- bit-interleaved coded modulation with iterative detection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(11): 3174–3181. doi: [10.1109/TWC.2006.05163](https://doi.org/10.1109/TWC.2006.05163).
- [25] XIE Qiuliang, YANG Zhixing, SONG Jian, *et al.* EXIT-chart-matching-aided near-capacity coded modulation design and a BICM-ID design example for both Gaussian and Rayleigh channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3): 1216–1227. doi: [10.1109/TVT.2012.2228679](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2228679).
- [26] LIU Na, LI Jianping, and CHE Qing. An improved symbol mappings on 16qam constellation for BICM-ID[C]. 2012 International Conference on Communication, Electronics and Automation Engineering, Berlin, Germany, 2013: 175–180. doi: [10.1007/978-3-642-31698-2_25](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31698-2_25).
- 包 涵：女，博士生，研究方向为联合信道调制编译码、编码调制优化映射。
- 涂国防：男，教授，研究方向为数字通信和联合信源信道编译码、信息安全。
- 张 灿：女，教授，研究方向为联合信源信道和空间信道识别编码、移动无线通信。
- 高绍帅：男，教授，研究方向为联合信源信道编解码、分布式编码、网络编码。
- 陈德元：男，副教授，研究方向为图像编码、视频编码、信道编码。
- 责任编辑：马秀强