

基于 SC-LDGM 码的随机混合业务传输方案

王翌昕, 蔡穗华, 马 啸
(中山大学计算机学院, 广东广州 510006)

摘要: 本文研究了一种适用于随机混合业务的传输方案,其可以对随机到达的不同业务实现不等差错保护,从而满足不同业务对于传输质量的不同需求. 该方案的主要优势是,利用一套编译码器满足不同业务基本的质量要求;而对于要求较高的业务,则采用级联外码的技术. 另一个有别于传统方法的创新点是,该方案采用叠加的方式实现业务类型标识比特的传输,既不消耗额外的带宽,也不消耗额外的传输能量. 仿真结果表明,本文所提出的编译码方案能高效准确地对业务类型进行识别,从而有效地实现随机混合业务的不等保护.

关键词: 随机混合业务传输; 不等差错保护; 系统卷积低密度生成矩阵码; 业务类型辨识
中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)10-2305-06
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20201315

A Scheme for Transmission of Random Hybrid Services Based on SC-LDGM Codes

WANG Yi-xin, CAI Sui-hua, MA Xiao
(School of Computer Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: In this paper, a scheme for transmission of random hybrid services is studied, which, to meet the different transmission quality required by different services, realizes unequal error protection (UEP) for randomly arrived services. The main advantage of this scheme is that the basic quality required by all services is guaranteed by the same set of codec, while the service with higher quality requirement is further protected by an outer algebraic code. Another novelty compared with the conventional method is that the scheme uses the superposition method to transmit the identification bits for distinguishing the services, which consumes neither extra bandwidth nor extra transmission energy. The simulation results show that the proposed coding and decoding scheme can identify the service types efficiently and accurately, and can achieve effectively the unequal protection of random hybrid services.

Key words: transmission of random hybrid services; unequal error protection; systematic convolutional low density generator matrix codes; service identifying

1 引言

随着通信技术在更广泛领域的发展,在通信系统中传输业务的种类日益丰富. 不同类型的业务的重要程度不同,因此对传输性能误比特率(Bit Error Rate, BER)要求不同. 信道编码是保障通信系统可靠传输的关键技术之一. 文献[1]针对同一个码字中的不同比特需要的错误保护级别不同,提出不等差错保护(Unequal Error Protection, UEP)的信道编码方案,该方案被广泛应用于各种数据传输方案中. 在文献[2,3]中,作者研究了针对 JPEG2000 图像各个不同重要程度数据

的 UEP 方案,方案表明,UEP 为保证压缩图像中重要数据的传输质量提供了一种有效的方法. 文献[4]提出了针对航空遥感图像各个部分数据的 UEP 方案. 文献[5]研究了基于 H.265 视频压缩标准的 UEP 视频传输方案,该方案对加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道和瑞利衰落信道下的视频传输有很好的性能. 文献[6]根据双用户高斯广播信道中两个用户信道条件不同,提出对不同信道条件的用户数据的 UEP 编码调制方案.

在上述方案中,均假设接收方已知所接收序列中

对应位置数据的不同重要性. 但是, 在无线通信网等实际应用场景中, 不同类型的业务数据的到达是不确定的, 往往采用概率模型进行刻画. 此时, 为了使接收方获悉所接收的业务类型, 可采用类型标识比特来识别这些不同类型的业务. 然而, 这就要求标识比特的传输具有较高的可靠性. 因此通常的做法是采用额外的信道资源来传输这些标识比特. 但这种做法的一个较大的缺点就是发送标识比特需要占用额外的能量和带宽. 另一种做法是将标识比特在编码时通过某种方式叠加到传输的业务数据中, 使额外比特在发送时不占用额外能量和带宽, 同时还能被接收端识别. 针对第二种做法, 文献[7]提出了通过不同的交织器实现在传输数据的同时额外传输一个比特; 文献[8,9]提出用不同星座来传输额外的比特; 文献[10]提出在无授权随机接入网络中, 在传输的数据中嵌入短消息的方法.

系统卷积低密度生成矩阵(Systematic Convolutional Low Density Generator Matrix, SC-LDGM)码^[11,12]是一种可迭代译码的信道编码. SC-LDGM码具有码率可调、误码性能可预测、适用场景广等优点. 例如, 文献[13]研究了三元 SC-LDGM 码在高斯信源传输中的应用; 文献[14]研究了 SC-LDGM 码在瑞利衰落非高斯脉冲噪声信道上的编码传输方案.

本文提出了基于 SC-LDGM 码的随机混合业务传输方案. 与通常做法相比, 主要优点在于: 所提传输方案将 UEP 与叠加传输额外比特进行结合, 在不消耗额外能量和带宽的情况下, 既能够对于两种不同的业务实施不等差错保护, 又能够使接收端可靠地识别两种不同的业务类型. 在发送端, 先对高可靠业务的信息进行代数码编码保护, 再一并与低可靠业务的信息进行 SC-LDGM 码编码. 然后, 将一个类型标识比特采用叠加技术嵌入发送码字中进行传输. 在接收端, 首先利用基于统计学习的方法识别出额外传输的标识比特, 然后消去额外比特的叠加干扰, 进行 SC-LDGM 码译码, 最后根据业务的类型再进行相应的译码. 针对上述随机混合业务传输方案, 本文还提出了其精灵辅助(Genie-Aided, GA)等效系统来分析系统的误码率性能. 仿真实验表明, 在不同的信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)下所提方案能准确地识别不同业务, 并且有效地实现不等差错保护. 所提出的 GA 等效系统能快速预测误码率性能下界, 且在高信噪比时, 仿真性能与下界相吻合.

2 随机混合业务传输方案

2.1 随机混合业务传输编译码方案

假设需要发送随机到达的两种类型的业务: 一种是高可靠业务(More Important Service, MIS), 对传输性能 BER 的要求更高; 另一种是低可靠业务(Less Impor-

tant Service, LIS), 对传输性能 BER 的要求较低. 令 $I^{(l)} \in \mathbb{F}_2$ 为业务类型标识比特, 其中 \mathbb{F}_2 表示二元域, $I^{(l)} = 1$ 表示 MIS, $I^{(l)} = 0$ 表示 LIS.

在发送端, 随机混合业务编码框架如图 1 所示, 采用码率不同的信道编码进行数据的不等保护. 设 $d^{(l)}$ 为即将编码的某个业务数据块, 对于 MIS, 消息长度为 k_1 , 对于 LIS, 消息长度为 k_2 ($k_1 < k_2$). 编码时, 首先对 MIS 消息进行外码编码, 本文以 BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) 码^[15,16]为例得到长度为 k_2 的外码码字 $u^{(l)} \in \mathbb{F}_2^{k_2}$, 而对 LIS 则不进行外码编码, 即当 $I^{(l)} = 0$ 时, $u^{(l)} = d^{(l)} \in \mathbb{F}_2^{k_2}$. 然后, 将 $u^{(l)}$ 输入 SC-LDGM 码编码器进行编码, 得到长度为 n 的码字 $c^{(l)} = (u^{(l)}, p^{(l)}) \in \mathbb{F}_2^n$, 其中 $p^{(l)} \in \mathbb{F}_2^{n-k_2}$ 是编码得到的校验部分. 为了让接收端识别这两种不同业务, 对 MIS 编码得到的校验序列 $p^{(l)}$ 进行翻转, 而对于 LIS, 则不做操作. 从而得到发送码字 $s^{(l)} = (u^{(l)}, v^{(l)})$, 即

$$v^{(l)} = \begin{cases} \overline{p^{(l)}} & I^{(l)} = 1 \\ p^{(l)} & I^{(l)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\overline{p^{(l)}}$ 表示将 $p^{(l)}$ 中的比特按位翻转. 最后, 对码字 $s^{(l)}$ 进行二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)映射, 将比特 0 映射为 +1, 比特 1 映射为 -1, 得到 $x^{(l)}$, 发送到信道.

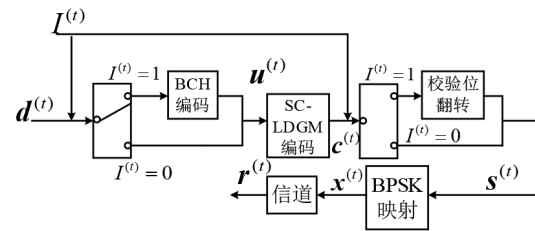


图 1 随机混合业务编码框架

在接收端, 接收到来自信道的 $r^{(l)}$, 随机混合业务译码框架如图 2 所示. BPSK 解映射后得到对应于 $s^{(l)}$ 的软信息 $y^{(l)} = (Q_{v^{(l)}}, Q_{p^{(l)}})$, 其中 $Q_{v^{(l)}}$ 和 $Q_{p^{(l)}}$ 分别表示从信道接收的信息位和校验位的后验概率序列. 首先根据 $y^{(l)}$ 进行标识比特识别, 得到估计的 $\hat{I}^{(l)}$. 然后根据识别的结果对校验位进行翻转, 得到对应于 SC-LDGM 码字 $c^{(l)}$ 的软信息 $\tilde{y}^{(l)}$, 即

$$\tilde{y}^{(l)} = \begin{cases} (Q_{v^{(l)}}, \overline{Q_{p^{(l)}}}) & \hat{I}^{(l)} = 1 \\ (Q_{v^{(l)}}, Q_{p^{(l)}}) & \hat{I}^{(l)} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\overline{Q_{p^{(l)}}}$ 表示将序列 $Q_{p^{(l)}}$ 中的概率翻转. 接着, 将 $\tilde{y}^{(l)}$ 输入 SC-LDGM 码译码器得到 $\hat{u}^{(l)}$. 最后, 若 $\hat{I}^{(l)} = 1$, 则将 $\hat{u}^{(l)}$ 输入 BCH 码译码器进行外码译码得到 $\hat{d}^{(l)}$. 若 $\hat{I}^{(l)} = 0$, 则输出 $\hat{d}^{(l)} = \hat{u}^{(l)}$.

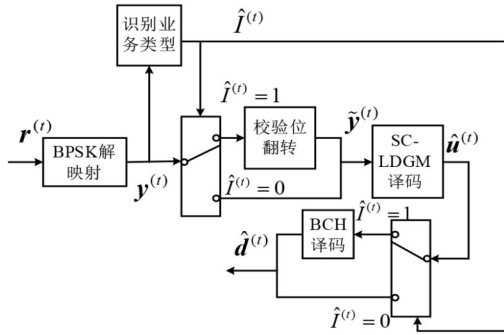


图2 随机混合业务译码框架

2.2 基于 SC-LDGM 码的随机混合业务编码算法

下面给出基于 SC-LDGM 码的具体的随机混合业务编码算法。

假设 $d=(d^{(0)}, d^{(1)}, \dots, d^{(L-1)})$ 是待传输的 L 个业务数据块, 对于 $0 \leq t \leq L-1$, 记忆长度为 m 的混合业务编码过程如图 3 所示. 其中 D 表示寄存器, P_l 表示 SC-LDGM 码编码系统中的第 l 个 ($0 \leq l \leq m$) 稀疏生成矩阵, C 为外码 BCH 码 (码长为 k_2 , 维数为 k_1) 编码器, τ 为比特翻转器. 基于 SC-LDGM 码的随机混合业务编码算法如算法 1 所示.

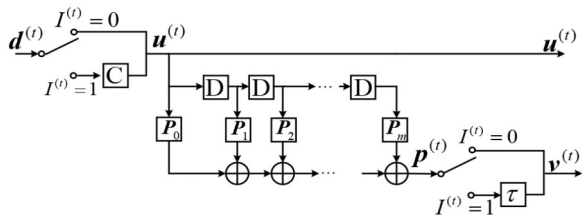


图3 记忆长度为 m 的混合业务编码过程

算法 1 基于 SC-LDGM 码的随机混合业务编码算法

输入: $d^{(t)}, I^{(t)}$.

输出: $s^{(t)}=(u^{(t)}, v^{(t)})$.

- 1 初始化. 当 $t < 0$ 时, 初始化 $d^{(t)}=0, I^{(t)}=0$.
- 2 编码. 当 $t=0, 1, \dots, L-1$ 时,
 - 2.1 若 $I^{(t)}=1$, 将 $d^{(t)}$ 用 BCH 码编码, 得到 $u^{(t)}$; 若 $I^{(t)}=0$, 则 $u^{(t)}=d^{(t)}$.
 - 2.2 对于 $0 \leq i \leq m$, 计算 $w^{(t,i)}=u^{(t-i)}P_i$, 并计算校验序列 $p^{(t)}=\sum_{i=0}^m w^{(t,i)}$, 得到 $c^{(t)}=(u^{(t)}, p^{(t)})$.
 - 2.3 由 $c^{(t)}$ 计算发送码字 $s^{(t)}=(u^{(t)}, v^{(t)})$, 其中 $v^{(t)}$ 的计算由式(1)给出.
- 3 结尾. 当 $L \leq t \leq L+m-1$ 时, 令 $d^{(t)}=0, I^{(t)}=0$, 并根据前面的步骤 2 计算 $s^{(t)}$.

2.3 随机混合业务译码算法

接收端得到信息 $y^{(t)}$, 首先识别标识比特, 并对校验序列进行相应的操作. 接着进行迭代译码. 识别标识比特和迭代译码使用基于正规图^[17]的消息传递算法.

在消息传递译码算法中, 图中的边表示消息变量, 节点表示消息的约束关系, 传递的消息是各个边上的软信息 (本文中取各个变量为 0 的概率). 图 4 是 $L=4, m=2$ 的译码正规图. 该正规图可以分成多个译码层, 每个译码层包含的内容如图 4 中所示虚线框中的边和节点. 正规图中包含多个节点, 分别是 “=” 节点, “+” 节点, P_l 节点, τ 节点, 分别表示下述约束.

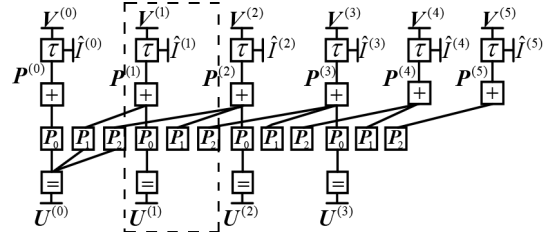


图4 $L=4, m=2$ 的译码正规图

节点 “=” 表示重复码约束, 即所有与 “=” 节点相连的边表示的变量的取值相等. 译码时, 其处理算法与低密度奇偶校验 (Low Density Parity Check Code, LDPC) 码的变量节点相同, “=” 节点下方的边将输入从信道得到的信息序列的消息.

节点 “+” 表示单奇偶校验约束, 所有与 “+” 节点相连的边表示的变量在 F_2 中的加法运算下和为 0. 译码时, 其处理算法与 LDPC 码的校验节点相同.

节点 P_l 表示稀疏生成矩阵码约束, 即与之相连的两条边满足生成矩阵 P_l 的约束. 在译码时, 对应前面所述编码算法中的生成矩阵 P_l 所表示码的软输入软输出译码器.

节点 “ τ ” 表示选择翻转. 在译码时用于识别标识比特, 即根据与之相连的两条边的消息来估计 $\hat{I}^{(t)}$, 并根据估计出的 $\hat{I}^{(t)}$, 对消息进行翻转. 与 “ τ ” 节点上方相连的边将输入从信道估计得到的校验序列的消息.

译码延迟为 d 且译码窗口大小为 $d+1$ 的译码算法如算法 2 所示.

2.4 精灵辅助下界

对于本方案中 MIS 和 LIS 的传输性能 BER, 可采用 GA 等效系统估计性能下界^[18]. GA 性能下界的基本思想是: 当接收端译码 $y^{(t)}$, 译码器在识别类型标识比特时已知 $I^{(t)}$, 这样就能正确地消去额外比特的叠加干扰; 同时, 在译码时已知以及其他所有 $d^{(l)}(0 \leq l \leq L-1, l \neq t)$, 这样就相当于将 $d^{(t)}$ 被重复传输 $m+2$ 次, 得到等效 GA 系统的性能. 通过等效 GA 系统得出的 MIS 和 LIS 的 BER 性能即为传输方案中 MIS、LIS 的性能下界. 由于方案中级联了两种不同码, 而两种码间传输比特的错误分布可能不均匀, 因此无法准确地通过公式预测性能的下界, 目前性能下界是通过仿真得出.

算法2 随机混合业务译码算法

输入: $y^{(l)}$.

输出: $\hat{d}^{(l)}$.

1 初始化. 当 $0 \leq t \leq L-1$ 时, 将 $y^{(l)}$ 中信息序列输入与等号下方相连的边, 将校验序列输入与 τ 节点相连的半边. 按照均匀分布初始化所有第 t 层内的其他边上的消息以及与当前层相连的所有边上的消息.

2 消息传递. 当 $0 \leq t \leq L-1$ 时, 进行消息传递.

2.1 在第 t 层内进行消息传递, 消息传递的顺序是

$$\Rightarrow P$$

2.2 当 $t > 0$ 时, 对于 $i = \min(m, t), \dots, 2, 1$, 在 $t-i$ 层内消息传递的顺序是

$$+ \rightarrow P \rightarrow \Rightarrow P$$

3 识别标识比特. 在第 t 层内计算并识别标识比特.

3.1 在“+”节点, 根据 P_i 节点到“+”节点的边上变量 $W^{(t,d)}$ 的分布律函数 $Q_{W^{(t,d)}}^{(P_i \rightarrow +)}(\cdot)$, 由式(3)计算“+”节点给 τ 节点的消息, 即

$$Q_{P_i}^{(+ \rightarrow \tau)}(0) = \sum_{e_0+e_1+\dots+e_{m+1}=0} \prod_{l=0}^{m+1} Q_{W_l^{(t,d)}}^{(P_i \rightarrow +)}(e_l) \quad (3)$$

在 τ 节点, 根据信道到节点到 τ 节点的边上变量 $V^{(l)}$ 的分布律函数 $Q_{V^{(l)}}^{(\tau \rightarrow \cdot)}(\cdot)$, 以及“+”节点到 τ 节点的边上变量 $P^{(l)}$ 的分布律函数 $Q_{P^{(l)}}^{(+ \rightarrow \tau)}(\cdot)$, 计算对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR), 即

$$\lambda = \sum_{l=0}^{n-k_2} \log \frac{Q_{P_i}^{(+ \rightarrow \tau)}(0) Q_{V_i^{(l)}}^{(\tau \rightarrow \cdot)}(0) + Q_{P_i}^{(+ \rightarrow \tau)}(1) Q_{V_i^{(l)}}^{(\tau \rightarrow \cdot)}(1)}{Q_{P_i}^{(+ \rightarrow \tau)}(0) Q_{V_i^{(l)}}^{(\tau \rightarrow \cdot)}(1) + Q_{P_i}^{(+ \rightarrow \tau)}(1) Q_{V_i^{(l)}}^{(\tau \rightarrow \cdot)}(0)} \quad (4)$$

对数似然比可以很好地反映 $Q_{P_i}^{(+ \rightarrow \tau)}(\cdot)$ 和 $Q_{V_i^{(l)}}^{(\tau \rightarrow \cdot)}(\cdot)$ 这两个分布律函数的相似程度.

3.2 由式(5), 用 λ 对 $\hat{I}^{(l)}$ 进行判决, 即

$$\hat{I}^{(l)} = \begin{cases} 0, & \lambda > 0 \\ 1, & \lambda < 0 \end{cases} \quad (5)$$

λ 的绝对值越大, 表明判决出的结果越可靠. 根据式(2)对消息 $y^{(l)}$ 进行处理, 并且在接下来的步骤中去掉该层正规图中的 τ 节点, 将连接信道的半边直接与“+”节点相连.

4 迭代译码初始化. 若 $t \leq d$, 返回步骤1继续接收下一层; 若 $t > d$, 设置最大迭代次数 $J_{\max} > 0$, 以及设定阈值 $\delta > 0$, 并且初始化熵率 $H_0(\mathbf{Y}^{(l)})$ 为 0, 其中 $\mathbf{Y}^{(l)}$ 是与 $y^{(l)}$ 有关的向量.

5 迭代译码. 对于 $0 \leq t \leq L-1$,

5.1 对于 $J=0, 1, 2, \dots, J_{\max}$,

5.1.1 对于 $i=0, 1, 2, \dots, \min(d, L+m-1-t)$, 在第 $t+i$ 层内按照以下顺序进行消息传递:

$$+ \rightarrow P \rightarrow \Rightarrow P$$

5.1.2 对于 $i = \min(d, L+m-1-t), \dots, 2, 1, 0$, 在第 $t+i$ 层内按照以下顺序进行消息传递:

$$\Rightarrow P \rightarrow + \rightarrow P$$

5.1.3 对于迭代得到的信息进行硬判决, 得到 $\hat{\mathbf{u}}^{(l)}$. 根据基于熵的迭代终止准则^[18], 估算熵率 $H_J(\mathbf{Y}^{(l)})$, 若 $|H_J(\mathbf{Y}^{(l)}) - H_{J-1}(\mathbf{Y}^{(l)})| \leq \delta$, 则终止迭代, 并将估计的信息序列 $\hat{\mathbf{u}}^{(l)}$ 输出为译码结果.

5.2 为了消除译码完的层对其他译码层的干扰, 需要对于相应译码层的与信道相连半边中的消息进行更新, 并且删除其他层与当前层连接的所有边.

6 外码译码. 若 $\hat{I}^{(l)} = 1$, 将 $\hat{\mathbf{u}}^{(l)}$ 输入 BCH 译码器进行译码, 得到 $\hat{d}^{(l)}$; 若 $\hat{I}^{(l)} = 0$, $\hat{\mathbf{u}}^{(l)} = \hat{d}^{(l)}$.

3 仿真结果及分析

本节将给出第2节提出的方案中的误码性能仿真结果及分析. 在方案中, SC-LDGM 码信息序列长度 $k_2 = 1\,023$, 码长 $n = 2\,006$, 记忆长度 $m = 3$, 译码延迟 $d = 9$, 每发送 $L = 100$ 个数据分组结尾一次. 生成矩阵 \mathbf{P}_l 是由一个稀疏的、行重为 10 的随机矩阵 \mathbf{P} 随机分裂生成. 在随机分裂的过程中, \mathbf{P} 中的非 0 元素以 $1/(m+1)$ 的概率分裂到 \mathbf{P}_l 中. 滑窗译码最大迭代次数 $J_{\max} = 20$, 译码熵终止门限 $\delta = 10^{-5}$. 采用码长 $k_2 = 1\,023$, 纠错个数位 2 的 BCH 码, 信息序列长度 $k_1 = 1\,003$. 对于 MIS, 编码码率为 0.5, 对于 LIS, 编码的码率为 0.51. 采用 BPSK 映射, 信道模型为 AWGN 信道, 方案中两种不同业务的到达过程为伯努利过程.

例1 图5给出了在接收端用算法2中步骤1~3识别类型标识比特在不同 SNR 下的性能. 对于每个 SNR, 都仿真了 10^6 个随机产生两种业务的数据块, 并且在仿真过程中, 假设 MIS 和 LIS 的到达概率相等. 从仿真结果可以看出, 随着 SNR 的增大, 识别标识比特错误的概率在下降. 此外, 识别业务类型算法在 0.8 dB 后具有非常高的可靠性. 特别地, 对 SNR 大于 1 dB 的区域, 仿真中没有发现错误识别的情况. 因此对码本身的性能影响非常小, 这也能够保证方案在传输业务数据时达到比较好的误码性能.

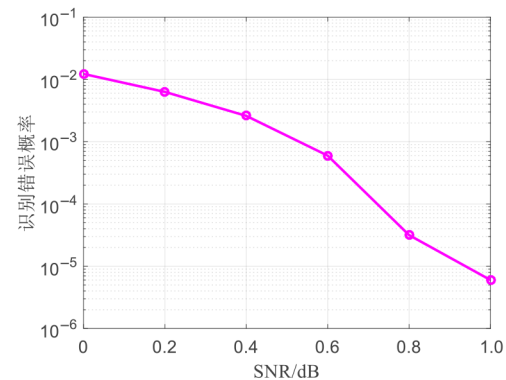


图5 算法2中识别类型标识比特在不同 SNR 下的仿真性能曲线

例2 图6给出了在提出的方案中分别统计传输 MIS 和 LIS 数据的 BER 仿真性能, 以及给出了它们 GA 等效系统的性能下界. 在仿真中, 假设 LIS 和 MIS 的到达概率相等. 从仿真结果可以看出, 与 LIS 的误码性能相比, 对 MIS 采用级联外码的技术, 能够有效地降低错误平层. 此外, 仿真中得到的两种业务的 BER 性能在 1 dB 时, 由于有标识类型比特识别错误的情况发生, 仿真的性能与 GA 等效系统性能下界之间还有些差距, 在大于 1 dB 的区域都能够很好地贴合 GA 等效系统性能下界, 因此, 在高 SNR 区域, 额外传输 1 个类型

标识比特,对业务数据本身传输的性能影响可以忽略不计.

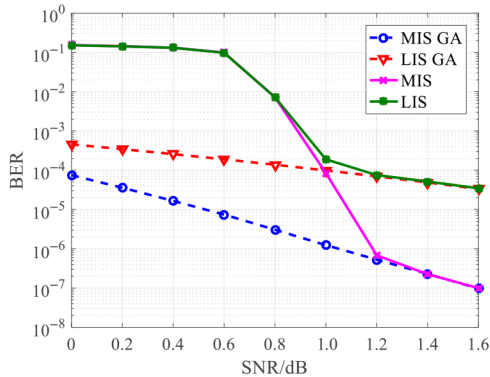


图6 MIS和LIS的BER性能曲线以及各自GA下界BER性能曲线

例3 图7给出了方案中假设在MIS的到达概率分别是0.5,0.4,0.6,0.3,0.8的伯努利过程中,MIS的BER性能仿真曲线,以及MIS的BER性能GA下界.从图中可以看到,对于两种业务不同的到达概率,MIS的误码性能之间相近,并且在高SNR区域,BER性能都能贴合GA下界.

图8给出了假设在MIS的到达概率分别是0.5,0.4,0.6,0.3,0.8的伯努利过程中,LIS的BER性能仿真曲线

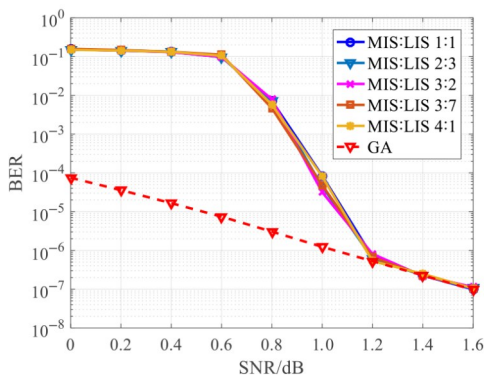


图7 MIS和LIS不同到达比例下MIS的误码性能

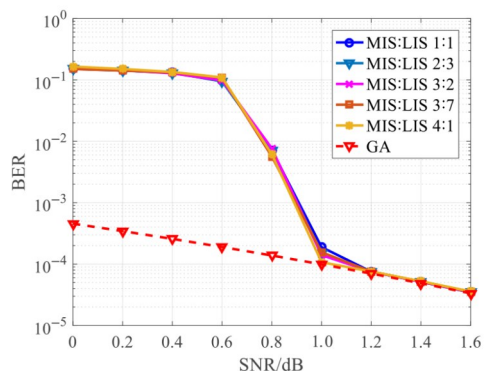


图8 MIS和LIS不同到达比例下LIS的误码性能

线,以及LIS的BER性能GA下界.由仿真结果可以看出,对于不同到达概率,LIS的误码性能也都是相近的,并且在高SNR区域,BER性能都能贴合GA下界.

4 结束语

本文研究了一种基于SC-LDGM码的适用于随机混合业务传输方案.在发送端,使用不同码率的对不同的业务进行不等差错保护,将最终码字的校验部分是否翻转当做标识业务类型的额外比特;在接收端,识别标识比特并进行相应的译码.同时,提出了GA等效系统分析方案的误码性能下界.数值仿真结果表明,所提出的方案在不同的SNR下能准确地识别不同类型业务,从而有效地对不同业务实现不等差错保护.在高信噪比区域,仿真性能与GA下界相吻合.对于不同MIS到达概率的伯努利过程,业务的误码性能相近.

参考文献

- [1] MASNICK B, WOLF J. Linear unequal error protection codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1967, 13(4): 600-607.
- [2] PU L L, MARCELLIN M W, VASIC B, et al. Unequal error protection and progressive decoding for JPEG2000[C]// IEEE International Conference on Image Processing. Genova: IEEE, 2007: 896-900.
- [3] 王翊,谢廷俊,陆建华.基于抗差错算术编码的不等差错保护图像传输方法[J].电子学报, 2008,36(4):685-689. WANG X, XIE T J, LU J H. An unequal error protection scheme for image transmission based on error resilient arithmetic codes[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 685-689. (in Chinese)
- [4] 李群迎,张晓林.基于多描述和不等差错保护的航空遥感图像传输方法[J].电子学报, 2010, 38(11): 2655-2659. LI Q Y, ZHANG X L. Aerial remote sensing image transmission using multiple description coding and unequal error protection[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2655-2659. (in Chinese)
- [5] HUANG Y K, JI M Y, SUN J C, et al. An unequal coding scheme for H.265 video transmission[C]//2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Seoul: IEEE, 2020: 1-6.
- [6] ABOTABL A A, NOSRATINIA A. Broadcast coded modulation: Multilevel and bit-interleaved construction[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3): 969-980.
- [7] LARSSON E G, MOOSAVI R. Piggybacking an additional lonely bit on linearly coded payload data[J]. IEEE Wire-

- less Communications Letters, 2012, 1(4): 292-295.
- [8] YAN Y, JUN L, DUAN W, et al. A novel transmission scheme for STBC with one additional bit based on labeled MPSK constellation[C]//International Conference on Electrical & Control Engineering. Yichang: IEEE, 2011: 5687-5690.
- [9] HONG S W, KANG E S, HAN D S. Additional data transmission with rotated QPSK constellation[J]. Electronics Letters, 2015, 51(5): 394-395.
- [10] SENEL K, LARSSON E G. Grant-free massive MTC-enabled massive MIMO: A compressive sensing approach [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(12): 6164-6175.
- [11] MA X. Coding theorem for systematic low density generator matrix codes[C]//2016 9th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC). Brest: IEEE, 2016: 11-15.
- [12] CAI S H, LIN W C, YAO X Y M, et al. Systematic convolutional low density generator matrix code[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2021, 67(6): 3752-3764.
- [13] WU Q Q, JI M Y, SUN J C, et al. Transmission of gaussian source using ternary convolutional low density generator matrix codes[C]//2018 IEEE International Conference on Communication Systems. Chengdu: IEEE, 2018: 231-235.
- [14] JI M Y, CHEN S X, MA X. Performance of systematic convolutional low density generator matrix codes over rayleigh fading channels with impulsive noise[C]//2018 International Conference on Space Information Network. Changchun: Springer, 2018: 89-98.
- [15] BOSE R C, RAYCHAUDHURI D K. On a class of error correcting binary group codes[J]. Information and Control, 1960, 3(1): 68-79.
- [16] HOCQUENGHEM A. Codes correcteurs d'erreurs[J]. Chiffres, 1959, 2(1): 147-156.
- [17] FORNEY G D. Codes on graphs: Normal realizations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 520-548.
- [18] MA X, LIANG C L, HUANG K C, et al. Block markov superposition transmission: Construction of big convolutional codes from short codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(6): 3150-3163.

作者简介



王翌昕 男, 1996年生, 福建龙岩人. 中山大学硕士研究生. 主要研究方向信道编码技术在光纤通信中的应用.
E-mail: wangyx58@mail2.sysu.edu.cn



蔡穗华 男, 1988年生, 广东广州人. 中山大学计算机学院博士后. 主要研究方向为信息论与信道编码, 及其在光纤通信、无线通信中的应用.
E-mail: caish23@mail.sysu.edu.cn



马 啸(通讯作者) 男, 1968年生, 河南焦作人. 博士. 中山大学教授、博士生导师. 主要研究方向为信息与编码理论、编码调制技术、无线通信、光通信等.
E-mail: maxiao@mail.sysu.edu.cn