

## 基于规则变量节点度和扩展窗喷泉码的不等差错保护算法

黄太奇 易本顺\* 姚渭菁 方华猛 李卫中  
(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

**摘要:** 该文提出了一种可适用于加性高斯白噪声(AWGN)信道的融合扩展窗喷泉码(Expanding Window Fountain, EWF)和规则变量节点度 LT 码(Regularized variable-node Luby Transform, RLT)策略的不等差错保护(UEP)算法,称为 EWF-RLT 编码算法。首先利用扩展窗口技术给不同重要等级的数据加窗,编码时让较高重要等级数据以更高的概率参与编码;同时,结合规则变量节点度算法,改变传统 LT 码编码过程中随机选取邻居节点的编码方式,使较高重要等级的数据具有较大的最小变量节点度,改善错误平层现象。分析和仿真结果表明,该文提出的 EWF-RLT 算法与传统算法相比,能对较高重要等级数据进行更强的保护,提升网络传输质量;在 UEP 方案设计中,加入 RLT 码编码参数,使得该文方案更加灵活与适用。

**关键词:** 喷泉码; 加性高斯白噪声信道; 不等差错保护; 扩展窗喷泉码; 规则变量节点度

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)08-1931-06

DOI: 10.11999/JEIT141530

## Novel Scheme of Unequal Error Protection Based on Regularized Variable-node and Expanding Window Fountain Codes

Huang Tai-qi Yi Ben-shun Yao Wei-qing Fang Hua-meng Li Wei-zhong  
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A novel scheme named EWF-RLT codes, which produces Unequal Error Protection (UEP) for Luby Transform (LT) codes over Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel by using a windowing technique before regularizing variable-node distribution, is proposed in this paper. Firstly, the idea of “windowing” the data sets according to their protection requirements is applied to allow coded symbols to make more edge connections with more important parts of the information bit stream with high probability. Then, variable-node degree distribution is exploited to improve the error floor and ensure the more important class of information bit stream have a higher minimum variable-node degree by modifying the traditional method of choosing neighbor nodes randomly in encoding. Compared with the conventional UEP scheme, what is confirmed both theoretically and experimentally is that the proposed approach can provide significant performance improvement in the most important bits class and improve network transmission performance. Furthermore, the proposed scheme introduces additional parameters in the UEP LT code design, making it more general and flexible in terms of the realization of UEP scheme.

**Key words:** Fountain codes; Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel; Unequal Error Protection (UEP); Expanding Window Fountain (EWF); Regularize variable-node

### 1 引言

喷泉码作为一种无需反馈重传的无速率码,能有效在信道恶劣情况下完成数据的可靠传输,日益成为研究热点<sup>[1,2]</sup>,数字喷泉码在云存储<sup>[3]</sup>、3D 视频应用<sup>[4]</sup>以及图形压缩传输<sup>[5]</sup>中获得了越来越多的支持与采纳。数字喷泉码起初主要应用在删余信道,后来被扩展应用到噪声信道<sup>[6]</sup>,例如瑞利衰落信道<sup>[7]</sup>。

在一些实际应用中,有些数据比其他的数据需要更高等级的保护,例如,在无线网络中,控制信号往往比负载的用户数据更为重要。此时,等差错保护(Equal Error Protection, EEP)编码方案已经不再适用,而需要发展具有不等差错保护(Unequal Error Protection, UEP)能力的编码技术。2007年文献[8]提出了一种基于“权重”(Weight Approach)的编码方法,通过让较高重要等级的数据以更高的概率参与编码来实现不等差错保护。文献[9]通过给不同重要等级的数据加“窗”,设计出一种基于“扩展窗”的喷泉码编码方法来实现不等差错保护,该方法编码更加灵活,UEP性能更优。文献[10]提出

2014-12-02 收到, 2015-03-09 改回, 2015-06-09 网络优先出版

国家自然科学基金(61371125)资助课题

\*通信作者: 易本顺 yibs@whu.edu.cn

一种改进的基于“权重”的编码方式,即利用伯努利实验的方法来选择不同重要等级的邻居节点,解决了传统 UEP 方案中由于不能按照实际 UEP 需求拆分度(splitting degree)而造成的 UEP 性能下降的问题。文献[11]从系统编码冗余度和次重要等级数据译码成功率角度考虑,通过给发送端发送反馈信号,降低了系统冗余度,提高了次重要等级数据的译码成功率。文献[12]通过给不同重要等级数据分配不同的度分布,设计了一种能满足任意 UEP 需求的编码方案。

上述算法都是基于删余信道设计的,由于解码方法不一样,这些算法不能直接应用于噪声信道中<sup>[13-15]</sup>。文献[13]利用模拟喷泉码编码方法,实现了噪声信道上的不等差错保护,但该方法编码复杂度高,实际应用中不易推广。文献[15]在文献[14]的研究基础上,利用规则变量节点度 LT 码(Regularized variable-node Luby Transform, RLT)的方法,在 AWGN 信道上对较高重要等级数据进行更强的保护,该编码算法虽然复杂度不高,但在选择邻居节点进行编码时,由于采用了传统的基于权重的编码算法,因此导致实现 UEP 方式不够灵活<sup>[9]</sup>。

本文在分析现有 UEP 算法的基础上,提出了一种融合扩展窗喷泉码(Expanding Window Fountain (EWF))编码算法和规则变量节点度变换算法并能应用于 AWGN 信道的 UEP 方案,简称为 EWF-RLT 编码设计方案。该方案首先利用加窗技术,给不同重要等级数据分别加窗,再结合规则变量节点度变换(RLT)算法,在编码时分别设置不同窗口数据的最小变量节点度。EWF-RLT 编码算法实现灵活,能在几乎不增加编码复杂度的基础上,进一步加强对重要数据的保护。理论分析和仿真结果表明,本文提出的 EWF-RLT 算法与传统算法比较,能对无线噪声信道中较高重要等级数据加以更强的保护,从而提升多媒体通信质量。

## 2 传统 LT 码编译码算法

LT 码是一种不规则的非系统的具有低密度生成矩阵(LDGM)的码<sup>[16]</sup>。假设  $K$  bit 的输入信息符号为  $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_K]$ , 度分布函数为  $\Omega(x) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \Omega_i x^i$ , 其中  $\sum_{i=1}^{i_{\max}} \Omega_i = 1$ , 且  $0 \leq \Omega_i \leq 1$ ,  $\Omega_i$  为度为  $i$  的概率,  $i_{\max}$  为最大的度值。要生成一个编码符号,首先根据度分布函数选择一个度  $d$ , 然后随机等概率地选择  $d$  个信息符号,最后将所选择的  $d$  个信息符号异或求和得到一个编码符号。发送端源源不断地进行编码,直到接收端能够完全译码成功。

在 AWGN 信道情况下,假设发送端在某一时刻

生成  $N$  个编码符号  $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_N]$ , 对这  $N$  个编码符号进行 BPSK 调制,经过 AGWN 信道传输后,接收到的信息为  $\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{n}$ ; 其中,  $\mathbf{x}$  为调制后的编码符号,  $\mathbf{n}$  为均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2 = N_0/2$  的高斯白噪声,其中  $N_0$  为单边噪声功率谱密度。

信号在 AWGN 信道传输的过程中会受到噪声的影响,无法保证译码的准确性,尤其当信道条件较差时使用硬判决会引入很多错误,因此适合采用软判决置信传播迭代译码算法,以实现可靠译码。迭代过程是通过校验节点到变量节点以及变量节点到校验节点之间的信息传递来完成的,在第 1 次迭代时,除信道信息以外,其余所有似然值初始化皆为 0。当第  $l$  次迭代时,从校验节点  $j$  到变量节点(信息节点)  $i$  的更新规则为

$$L_{c_j \rightarrow v_i}^{(l)} = 2 \tanh^{-1} \left( \tanh \left( \frac{L_{c_j}^{(l)}}{2} \right) \prod_{i' \in N(j) \setminus (i)} \tanh \left( \frac{L_{v_{i'}}^{(l)}}{2} \right) \right) \quad (1)$$

式中,  $N(j)$  表示与校验节点  $j$  相连的所有变量节点集合,  $i' \in N(j) \setminus (i)$  表示与第  $j$  个校验节点相连的除第  $i$  个变量节点以外的其余所有变量节点的集合,双曲正切函数  $\tanh(\pm\infty/2) = \pm 1$ 。

从变量节点  $i$  到校验节点  $j$  的更新规则:

$$L_{v_i \rightarrow c_j}^{(l)} = \sum_{j' \in N(i) \setminus (j)} L_{c_{j'} \rightarrow v_i}^{(l-1)} \quad (2)$$

其中,  $N(i)$  表示与变量节点(信息节点)  $i$  相连的校验节点的集合,  $j' \in N(i) \setminus (j)$  表示与第  $i$  个变量节点(信息节点)相连的校验节点集合,其中不包括第  $j$  个校验节点。

最后接收端通过似然值

$$L(\hat{v}_i) = \sum_{j \in N(i)} L_{c_j \rightarrow v_i} \quad (3)$$

来估计恢复出原始信息。

## 3 EWF-RLT 编码设计方案

### 3.1 传统 EWF 编码算法

文献[9]提出的是一种利用窗口技术实现 UEP 性能的喷泉码设计方案,假设需要传输的数据是长度为  $K$  bit 的二进制符号,分为  $r$  个不同的重要等级。按不同重要等级将这  $K$  bit 数据分为  $r$  部分  $s_1, s_2, \dots, s_r$ , 每部分大小分别为  $\alpha_1 K, \alpha_2 K, \dots, \alpha_r K$ , 其中,  $s_1$  部分为最重要等级数据,  $s_2$  部分为次重要等级数据,依次类推,  $s_j$  部分为第  $j$  重要等级数据。

EWF 的编码方法是用窗  $W_i$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) 覆盖所有的数据,窗  $W_i$  包含  $s_1, s_2, \dots, s_i$  中的所有数据,对应的度分布函数为  $\Omega_i(x)$ 。编码时,首先以概率  $\Gamma_i$  选取窗  $W_i$ ,再根据度分布函数  $\Omega_i(x)$  选取一个度  $d$ , 然

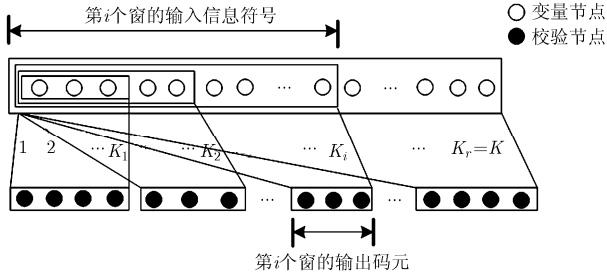


图 1 EWF 的编码示意图

后在选到的窗  $W_i$  中等概随机选取  $d$  个符号相异或，最终得到一个编码符号。这样不断重复生成编码符号，直到编码完成，如图 1 所示。图 1 中， $K_i = \sum_{j=1}^i s_j$ ，第  $i$  个窗口的输出码元由包含在第  $i$  个窗的  $K_i$  个信息比特生成。整个编码过程可以看成是一个二部图，其中输入符号可以看为变量节点，编码符号可以看为校验节点。假设接收端接收到  $N$  个编码符号，由于是等概率随机选取信息比特参与编码， $s_j$  中的变量节点的度是  $i$  的概率为

$$\Delta_i^{(j)} = C^i \prod_{L=j}^r \frac{\alpha_j K}{\alpha_j K} \mu_L N \Gamma_L^{-i} \left( 1 - \frac{1}{\alpha_j K} \right)^{\sum_{L=j}^r \frac{\alpha_j K}{K_L} \mu_L N \Gamma_L^{-i}} \quad (4)$$

显然当  $K$  和  $N$  趋于无穷大时， $s_j$  中变量节点度服从泊松分布：

$$\Delta_i^{(j)} \approx \frac{e^{-\mu_{\text{var}}^{(j)}} (\mu_{\text{var}}^{(j)})^i}{i!} \quad (5)$$

其中

$$\mu_{\text{var}}^{(j)} = N \sum_{L=j}^r \frac{\mu_L \Gamma_L}{K_L}, \quad \mu_L = \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} i \Omega_i \quad (6)$$

于是， $s_j$  中变量节点度分布函数可以表述为

$$\Delta^{(j)}(x) = \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} \Delta_i^{(j)} x^i \quad (7)$$

其中  $i_{\text{max}}$  为  $s_j$  中的最大的变量节点度。

由文献[2]可知，当  $s_j$  中的信息码元等概率随机参与编码，且  $K$  趋于无穷大时， $s_j$  中变量节点没有参与编码的概率为  $e^{-\mu_{\text{var}}^{(j)}}$ ，这意味着， $s_j$  中变量节点误码率(BER)始终大于  $e^{-\mu_{\text{var}}^{(j)}}$ ，且当  $j > m$  时， $s_m$  变量节点没有参与编码的概率为  $e^{-\mu_{\text{var}}^{(m)}} > e^{-\mu_{\text{var}}^{(j)}}$ ，所以  $s_m$  的误码率比  $s_j$  的误码率高，实现了不等差错保护。由以上分析可知，在 AWGN 信道中，利用传统 EWF 算法，同样能够使较高重要等级的数据  $s_j$  比次要等级数据  $s_m$  得到更强的保护，所以该方法能够应用到 AWGN 信道中。在 AWGN 信道中，根据文献[14]可以计算， $s_j$  的 BER 的下界为

$$\text{Pro}_{\text{LT}}^{(j)} \geq \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} \Delta_i^{(j)} Q\left(\frac{g_i}{\Phi_i}\right) \quad (8)$$

其中

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2} dy \quad (9)$$

式中， $i_{\text{max}}$  为  $s_j$  中的最大变量节点度， $g_i = 2i/\sigma_n^2$ ， $\Phi_i^2 = 4i/\sigma_n^2$ 。

### 3.2 本文 EWF-RLT 码编码设计方案

3.1 节分析了将传统 EWF 算法应用到 AWGN 信道上的可行性并给出了其在 AWGN 信道上的 BER 下界，但存在由于随机选取邻居节点方式导致的错误平层现象。文献[14]和文献[17]分析指出在 AWGN 信道中，随着最小变量节点度值的增加，LT 码的 BER 值会降低，而文献[15]在此基础上通过规则变量节点度分布的方法，有效地降低了 LT 码的误码率。受此启发，为了解决传统 EWF 算法存在的错误平层现象，结合 EWF 编码算法特点，本文将规则变量节点度算法与 EWF 编码算法结合，对于窗口  $W_1, W_2, \dots, W_r$ ，预先设置不同的窗最小变量节点度  $V_{\text{min}}^{(W_1)}, V_{\text{min}}^{(W_2)}, \dots, V_{\text{min}}^{(W_r)}$ ，通过这样的处理，当  $j$  大于  $m$  时， $s_j$  中的最小变量节点度  $D_{\text{min}}^{(j)} = \sum_{i=1}^j V_{\text{min}}^{(W_i)}$  大于  $s_m$  中的最小变量节点度  $D_{\text{min}}^{(m)} = \sum_{i=1}^m V_{\text{min}}^{(W_i)}$ ，于是  $s_j$  比  $s_m$  得到更高等级的保护，且由于增加了编码参数，本文算法可以通过改变  $V_{\text{min}}^{(W_1)}, V_{\text{min}}^{(W_2)}, \dots, V_{\text{min}}^{(W_r)}$  更加灵活地实现不等差错保护。其实现步骤为

- (1) 首先将  $K$  bit 信息数据按照重要等级分为  $s_1, s_2, \dots, s_r$ ，并依次用窗  $W_i$  覆盖  $K_i = \sum_{j=1}^i s_j$  的数据；
- (2) 根据概率  $\Gamma_i$  选取窗  $W_i$ ，并根据度分布函数  $\Omega_i(x)$  和变量节点度分布函数式(4)设置合适的最小变量节点度  $V_{\text{min}}^{(W_i)}$ ；
- (3) 根据选取窗  $W_i$  的校验节点度分布函数  $\Omega_i(x)$ ，选取一个度  $d$ ；
- (4) 在所选窗  $W_i$  中选取  $d$  个信息符号，在选取的过程中，确保  $W_i$  中的变量节点度不小于  $V_{\text{min}}^{(W_i)}$ ，将选取的  $d$  个信息符号异或得到一个编码符号；
- (5) 重复步骤(3)，步骤(4)，直到编码完成。

当然，编码过程中还需要  $r$  个内存单元，其大小分别为  $K_1, K_2, \dots, K_r$  的变量节点度查询表  $\text{Tab}_1, \text{Tab}_2, \dots, \text{Tab}_r$ ，一次编码完成后，更新这  $r$  个变量节点度查询表。在 AWGN 信道中， $s_j$  部分的误码率下界为

$$\text{Pro}_{\text{Ger}}^{(j)} = \sum_{i=D_{\text{min}}^{(j)}}^{i_{\text{max}}^{(j)}} \Delta_{\text{Ger},i}^{(j)} Q\left(\frac{g_i}{\Phi_i}\right) \quad (10)$$

其中， $i_{\text{max}}^{(j)}$  为  $s_j$  中的最大变量节点度， $\Delta_{\text{Ger},i}^{(j)}$  为  $s_j$  中变量节点度为  $i$  的概率。

### 3.3 本文 EWF-RLT 码渐进性能仿真

首先比较本文算法与文献[9]和文献[15]提出算法的渐进 BER 性能。假设信息数据包括 MIB(Most Important Bit)和 LIB(Least Important Bit)两个重要等级的数据,其中 MIB 数据占整个数据的比重为  $\alpha=0.1$ , LIB 数据占整个数据的比重为  $1-\alpha$ , 校验节点度分布函数将参考文献[18]。本文算法和文献[9]中第 1 个窗选取的概率  $\Gamma_1=0.2$ , 文献[15]MIB 数据被选择参加编码的概率为  $p_1=0.2$ [15]。它们的渐进 BER 可分别由式(8)和式(10)计算,如图 2 所示,其中,  $E_b$  为信息比特能量,  $N_0$  为单边噪声功率谱密度。

由图 2(a)可以看到,在冗余度为 2 时, MIB 和 LIB 数据的 BER 都随着  $E_b/N_0$  的增大而减小。本文算法和文献[9],文献[15]提出的算法相比,在对 MIB 数据的保护上,性能更优。例如当  $E_b/N_0=0$  dB 时,本文算法的 MIB 误码率为  $4.278e-06$ ,文献[9]和文献[15]的 MIB 误码率为  $4.538e-05$  和  $8.442e-05$ 。另一方面,如图 2(b)所示,在相同信噪比(设置为  $E_b/N_0=1$  dB),不同冗余度的情况下,随着冗余度的增大, MIB 数据和 LIB 数据的 BER 都下降,且同文献[9],文献[15]算法相比,本文算法能对 MIB 数据进行更好的保护。

## 4 实际仿真结果与分析

本节通过仿真分析本文算法在 AWGN 信道下的 UEP 性能,并与传统算法进行比较。为了便于比较分析,假设输入的信息数据为  $K=5000$  bit 且只包含两个重要等级的数据,其中 MIB 数据比重为  $\alpha=0.1$ , LIB 数据占整个数据的比重为  $1-\alpha$ , 校验节点度分布参照文献[18]。

首先比较本文算法与文献[9]和文献[15]算法在冗余度为 2,不同  $E_b/N_0$  下的 BER 性能,其中在本文算法和文献[9]提出算法中,第 1 个窗口选择概率  $\Gamma_1=0.2$ ,在文献[15]中,重要等级数据的选择概率为  $p_1=0.2$ [15]。在编码时,本文算法第 1 个窗具有规则变量节点度,而当选择第 2 个窗里的信息数据进行

编码生成一个编码符号时,还是采用等概率随机选取的原则。如图 3(a)所示,为了说明本文算法实现了不等差错保护,这里将传统 EEP 下的 BER 性能作为参考。从图 3(a)可以看到,本文算法在 AWGN 信道上能实现不等差错保护,且相对传统 UEP 算法,能对较高重要等级的数据进行更好的保护,例如当信噪比  $E_b/N_0=2$  dB 时,本文算法的 MIB 误码率为  $5.6667e-04$ ,而文献[9],文献[15]算法 MIB 误码率分别为  $1.6200e-03$  和  $0.0577$ 。另一方面,本文算法只是稍微降低了次重要等级数据的误码率性能,由于在通信系统中, MIB 比 LIB 更为重要,故存在少量的性能差距仍可接受[9]。

然后比较本文算法与文献[9]和文献[15]算法在  $E_b/N_0=1$  dB,不同冗余度下的 BER 性能,如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以看到随着码率的增大, BER 下降,且对高重要等级数据的保护上,本文算法性能更优。

最后比较第 1 个窗口选择概率  $\Gamma_1$  对 UEP 性能的影响,其中 MIB 数据比重为  $\alpha=0.2$ ,其它参数设置同上,如图 4 所示。

由图 4(a)可知,在冗余度为 2,同一  $E_b/N_0$  下,不同  $\Gamma_1$ , UEP 性能表现不一样,  $\Gamma_1=0.1$  时, MIB 数据的误码率最大, LIB 数据的误码率最小,随着  $\Gamma_1$  的变大, MIB 数据能得到更好的保护,但 LIB 数据的成功译码率会越来越低;图 4(b)中,在  $E_b/N_0=1$ ,同一冗余度下,  $\Gamma_1=0.3$  时, MIB 数据得到更好的保护,但 LIB 数据译码成功率最低。

## 5 结束语

本文在分析传统 EWF 算法基础上,提出了一种基于 AWGN 信道的不等差错保护方案。该方案融合了传统的 EWF 编码技术和 RLT 编码算法,在设计 UEP 方案时更加灵活,能对较高重要等级数据进行更强的保护。该算法首先利用 EWF 编码技术,使较高重要等级的数据以更高的概率参与编码;再结合 RLT 算法,使得较高重要等级的数据具有较大的最小变量节点,改善传统 UEP 算法中的错误平层

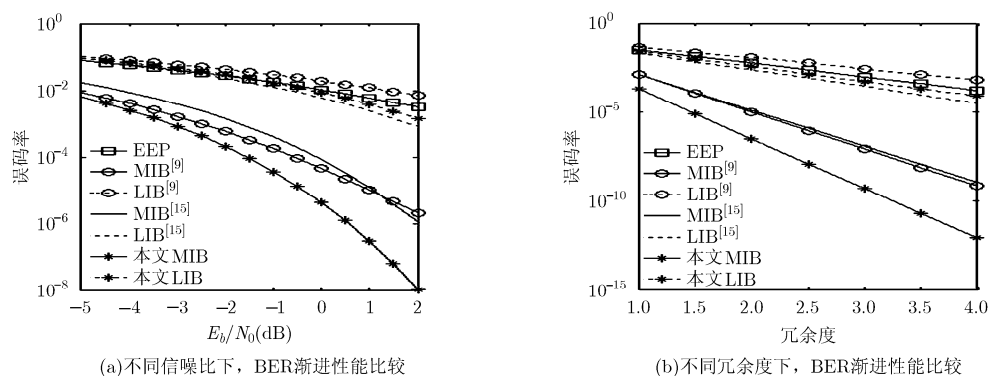


图 2 本文算法与传统算法渐进性能比较

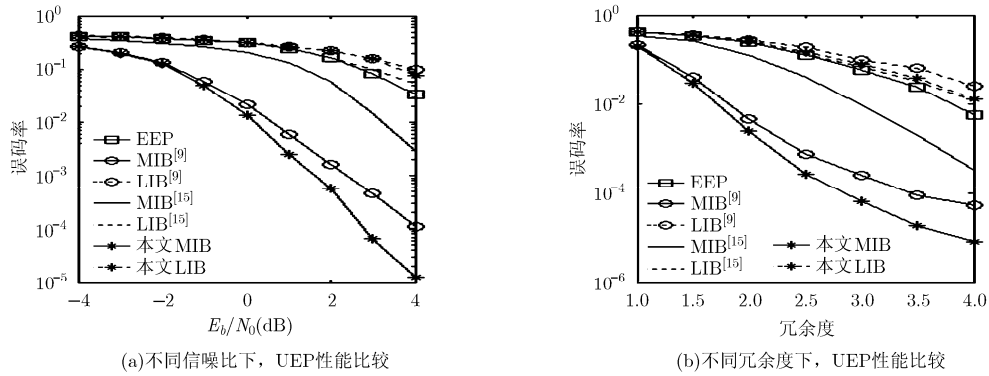


图 3 本文算法与传统算法 UEP 性能比较

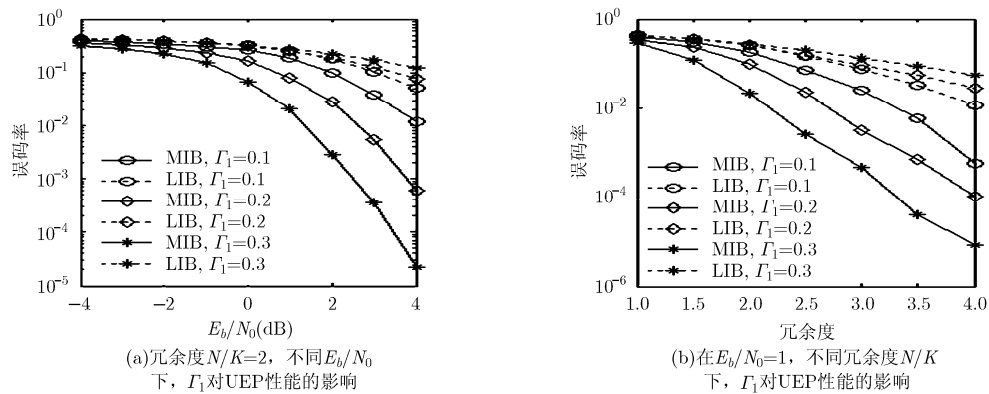


图 4 不同窗口选择概率  $\Gamma_1$  对 UEP 性能的影响

现象。理论分析和仿真结果表明，在 AWGN 信道上，本文算法能对高重要等级数据加以更强的保护，可提升无线网络通信质量。

参考文献

[1] Luby M. LT codes[C]. Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Vancouver, Canada, 2002, 43: 271-280.

[2] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 58(4): 2551-2567.

[3] Anglano C, Gaeta R, and Grangetto M. Exploiting rateless codes in cloud storage systems[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, (99): 1-11.

[4] Blatsas M, Politis I, Kotsopoulos S A, et al. A performance study of LT based unequal error protection for 3D video streaming[C]. Digital Signal Processing (DSP) of the 18th International Conference, Santorini, Greece, 2013, 1(6): 1-3.

[5] 刘国, 于文慧, 吴家骥, 等. 基于系统 Raptor 码不等差错保护的图像压缩传输[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(11): 2554-2559.

Liu Guo, Yu Wen-hui, Wu Jia-ji, et al. Compressed image transmission based on systematic Raptor codes with unequal error protection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2554-2559.

[6] Palanki R and Yedidia J. Rateless codes on noisy channels[C]. Proceedings of the International Symposium on Information Theory (ISIT), Chicago, USA, 2004: 37.

[7] 陈月云, 刘伟. 基于新型随机度分布的压缩喷泉码[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1185-1190.

Chen Yue-yun and Liu Wei. Compressed fountain codes based on new random degree distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1185-1190.

[8] Rahnavard N, Vellambi B, and Fekri F. Rateless codes with unequal error protection property[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(4): 1521-1532.

[9] Sejdinovic D, Vukobratovic D, Doufexi A, et al. Expanding window fountain codes for unequal error protection[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2009, 57(9): 2510-2516.

[10] Tu Kun, Zhang Zhao-yang, Yao Chuang-mu, et al. Rateless codes with unequal error protection based on improved weighted selection[C]. IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, United Kingdom, 2013, 342(347): 8-11.

[11] Sorensen J H, Popovski P, and Ostergaard J. UEP LT codes with intermediate feedback[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(8): 1636-1639.

- [12] Yue Jing, Lin Zi-huai, Ba Bao-ming, *et al.*. Performance analysis of unequal error protection distributed network coding based on fountain codes[J]. *Wireless Communications Letters*, 2014, 3(3): 285–288.
- [13] Mahyar Shirvanimoghaddam, Li Yong-hui, and Branka Vucetic. Analog fountain codes with unequal error protection[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, NSW, Australia, 2014: 2033–2038.
- [14] Hussain I, Xiao M, and Rasmussen L K. Error floor analysis of LT codes over the additive white Gaussian noise channel[C]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, USA, 2011: 1–5.
- [15] Hussain I, Xiao M, and Rasmussen L K. Unequal error protection of LT codes over noisy channels[C]. Proceedings of the IEEE Communication Technologies Workshop (SweCTW), Lund, Sweden, 2012: 24–26.
- [16] Garcia-Frias J and Zhong W. Approaching Shannon performance by iterative decoding of linear codes with low-density generator matrix[J]. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(6): 266–268.
- [17] Hussain I, Xiao M, and Rasmussen L K. Regularized variable-node LT codes with improved erasure floor performance[C]. Proceedings of the IEEE Information Theory and Applications (ITA) Workshop, San Diego, USA, 2013: 1–8.
- [18] Hussain I, Xiao M, and Rasmussen L K. Serially concatenated LT code with DQPSK modulation[C]. Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC), Cancun, Mexico, 2011: 1811–1816.
- 黄太奇: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为无线通信、多媒体网络通信。
- 易本顺: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事多媒体网络通信、信源信道编码、无线通信等方面的研究。
- 姚渭箐: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为无线通信、信源信道编码。