

基于 LT 码的 LBCMP 迭代纠错方法

牛芳琳^{1,2}, 王洪玉¹, 陈 雷^{1,3}, 祝开艳⁴

(1. 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁大连 116023; 2. 辽宁工业大学电子与信息学院, 辽宁锦州 121001;
3. 中国刑事警察学院公安情报系, 辽宁沈阳 110035; 4. 大连海洋大学信息工程学院, 辽宁大连 116023)

摘 要: 针对删除信道中发生错误的数据包, 提出联合信道编码的 LBCMP 迭代纠错方法, 该方法充分利用错误数据包中含有的正确信息, 将 LT 编码包作为冗余纠错包与线性分组码相结合, 并采用 MP 迭代译码方法进行纠错. 理论分析及实验结果表明, 采用 LBCMP 迭代方法可以减少为恢复错误数据包所需要的信源编码包数量.

关键词: MP 迭代译码; 喷泉码; RSD; 线性分组码

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)01-0027-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.005

LBCMP Iterative Decoding Error Correction with LT Codes

NIU Fang-lin^{1,2}, WANG Hong-yu¹, CHEN Lei^{1,3}, ZHU Kai-yan⁴

(1. School of Electronics and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China;

2. Electronic & Information Engineering College, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China;

3. Department of Public Security Intelligence, National Police University of China, Shenyang, Liaoning 110035, China;

4. Institute of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Due to the problem of error data packets in erasure channel, line block code message propagation (LBCMP) iteration error correction scheme is proposed. This scheme is a combination of linear block code and LT codes. By taking Luby Transform (LT) encoding packets as the redundant correcting packets, it makes use of the correct symbol of linear block code to recover all error packets with elimination method. Our analysis and experiments show that LBCMP iteration error correction scheme reduces the encoding packets of the source for recovering all errors.

Key words: message propagation (MP) iterative decoding; fountain code; robust soliton distribution (RSD); line block code (LBC)

1 引言

在数据通信中, 数据包在传输过程中经常会出现发生错误无法恢复的情况, 传统的方法是采用前向纠错 (Forward Error Correction, FEC) 和检错重发 (Automatic Repeat Request, ARQ) 的方法对发生错误的数据包进行恢复. 采用前向纠错技术无需利用反馈信道和重传应答机制, 不会产生重传等待应答带来的时延, 但过多的前向纠错编码会使传输效率变低, 译码器的复杂性也相应的增加, 在带宽和功率方面也需要付出更多的代价. 而 ARQ 传输机制中, 当信道删除概率较大的时候, 发送端发送反馈的次数就会增加, 导致传输效率下降和信息传输的时延增加. 混合自动重传请求 (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ) 的传输方案结合 ARQ 和 FEC 的特点, 与 ARQ 相比可以减少反馈重传次数. 与 HARQ 相比,

喷泉码^[1]是一种不需要接收端发送反馈重传信息对发生错误数据包进行纠错的方法, 其传输特点是接收到的编码包是发生错误则丢弃, 如果是正确的, 则参与到 MP (Message Propagation) 迭代译码中, 直到译出所有的信源信息为止, 由于不需要重传机制, 减少通信资源的占用, 适用于在删除信道中使用. 目前这种编码方法已经应用到无线广播系统^[2]和协作中继网络中^[3].

在错误的数据包中, 发生错误的符号只占其中的一部分, 依旧存在一定数量正确的符号, 进一步利用这些正确的符号, 则可以更有效的恢复错误数据包, 以减少通信中恢复错误所需要数据包的数量, 提高通信质量. 文献[4~11]等提出了网络信道联合编码方案, 与仅依靠网络编码纠错相比进一步提高恢复信息的能力, 同时也提高网络传输的吞吐量.

本文利用喷泉码和信道编码的特点, 将喷泉码编

码包作为恢复错误数据包的冗余信息,提出一种与线性分组码相结合的 MP 迭代译码(Line Block Code Message Propagation, LBCMP)迭代纠错方法,对于接收端接收到的错误数据包进行纠错。

2 反馈 SRSD 度分布函数

LT 码^[12]是一种喷泉码,编码方法是按照鲁棒孤子(Robust Soliton Distribution, RSD)度分布函数从 k 个符号中随机选取 i 个符号进行异或(XOR)得到编码符号,这些编码符号源源不断的从信源发送出去,接收端将接收到的符号采用 MP 迭代译码,经过迭代后编码符号相邻的个数为 1 则解出未知符号,当接收端译出所有的信源信息,向信源发送一个收到确认信息(Acknowledgement, ACK)反馈信息,信源停止传送 LT 编码符号,完成了 LT(Luby Transform)编码传送过程。随机选取 i 个符号的概率分布称为度分布函数,一个适合的度分布函数可以有效的降低译码开销,如文献[12, 13]中都提出了较好的喷泉码的度分布函数。文献[14~20]中,提出了基于反馈信息的 Shifted LT(SLT)编码,当接收端已经恢复部分信息,则将其反馈给信源,信源依据反馈信息对 RSD 度分布函数进行修正,用以进行 LT 编码。

对于反馈 SLT 编码,信源依据接收端已经恢复 n 个度为 1 的符号,对 RSD 进行偏移,得到基于部分已知信息 n 的 SRSD(Shifted RSD)^[14]分布,如式(1)所示

$$r(j) = \mu_{\text{RSD}(k-n)}(i) \quad (1)$$

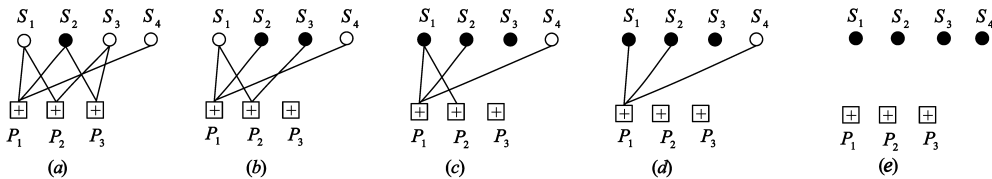


图1 已接收到部分正确数据包的MP迭代纠错过程

设接收端接收到数据包 S_1, S_2, S_3 和 S_4 , 经过校验得知仅 S_2 正确。采用 LT 编码包纠错,首先接收到 $P_1 = S_1 + S_2 + S_4$ 度为 3 的编码包, S_2 已知,则迭代后 $P_1' = S_1 + S_4$, 这时 P_1' 相邻边个数为 2, 显然不能恢复 S_1, S_4 错误数据包;继续接收 $P_2, P_2 = S_1 + S_3$, 由于 S_1 和 S_3 均为未知,所以也无法求解;继续接收 $P_3, P_3 = S_2 + S_3, S_2$ 为已知,可以解出 S_3 ;继而由 P_2 求出 S_1 ,最后由 P_1' 解出 S_4 ,完成恢复所有错误数据包的过程。

3.2 LBCMP 迭代纠错实现方法

3.2.1 删除法纠错

采用传统的 MP 迭代译码方法纠错,编码包与 1 个错误数据包相邻的时候,错误数据包才能被恢复,当相邻错误数据包个数 $l > 1$,则无法恢复 l 个错误数据包。接收端接收到正确的 LT 编码包 P 与相邻的已知数据

$$\text{其中 } j = \text{round}\left(\frac{i}{1 - n/k}\right),$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, k; n = 1, 2, 3, \dots, k - 1$$

其中, k 表示信源需要发送的数据包个数; n 表示接收端恢复的正确数据包个数; $\mu_{\text{RSD}(k-n)}(i)$ 表示 RSD 度分布函数。

本文对式(1)进行归一化,得到式(2)

$$R_{\text{SRSD}}(j) = \frac{r(j)}{\sum_j r(j)} \quad (2)$$

式(2)中对式(1)进行归一化处理,因此

$$\sum_{j, j \neq 1} R_{\text{SRSD}}(j) = 1, \text{服从概率分布。}$$

3 LBCMP 迭代纠错

3.1 MP 迭代纠错

对于需要传输的消息符号,将其分为 k 组,每组 k_1 个消息符号,采用 (n_1, k_1, d) ^[21]线性分组码分别对每组消息码元进行编码,得到长度为 n_1 的生成码字,为具有校验功能的数据包, d 表示码距。将 k 个数据包 $\{S_1, S_2, S_3, \dots, S_k\}$ 按顺序发送给接收端,受到信道噪声的干扰,在接收端部分数据包发生错误,本文将 LT 编码包与接收到的正确数据包相结合,采用 MP 迭代方法纠错,对发生错误的数据包进行恢复,直到恢复所有错误的数据包为止。对于已经含有部分正确数据包的 MP 迭代纠错方法如图 1 所示,其中黑色圆圈表示接收端接收到正确的数据包,白色表示发生错误数据包,正方形表示 LT 编码包 P 。

包 XOR 运算后,能够得到迭代后的 LT 编码包 P' , 其与相邻的 l 个错误数据包 S_i 之间满足式(3)

$$P' = S_1 + S_2 + \dots + S_i + \dots + S_l \text{ mod}(2) \quad (3)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, l$ 。

S_i 为通过监督矩阵 H 校验出来发生错误的数据包,则发生错误符号个数 e 满足 $e \leq d - 1$, 数据包中还存在 $n_1 - e$ 个正确的符号,可以利用这些正确的符号实现 1 个正确的 LT 编码包恢复多个相邻的错误数据包,提高 LT 编码包的纠错能力。

由文献[4~10]可知网络-信道联合编码译码方案,与传统的网络编码纠错相比,降低了误码率,提高了网络传输的吞吐量,这些方案均是在软判决情况下采用迭代方法进行译码,软判决获取不到 LT 编码包携带的编码信息,因此不适合应用在本方案。如果采用硬

判决获取二进制码元符号,然后对接收到的 LT 编码包判断是否正确,从正确的 LT 编码包中获取相邻节点信息,则能够实现 MP 迭代译码工作.文献[11]中提出基于硬判决的网络信道联合译码的方法,信号经过硬判决后,检验出发生错误的数据包,利用网络编码矩阵对得到的码字矩阵进行校验,删除掉发生错误的列,解出消息码字,由于受到 GF(2)的限制,存在解出错误消息码字的情况,需要继续采用错误位置替换法对解出的码字进行校验,以判断解出的码字是否正确.

只有经过校验正确的 LT 编码包,才能参与到 MP 迭代译码,本文将文献[11]硬判决条件下网络信道删除法引入到 MP 迭代纠错中,提出基于线性分组码的 LBCMP 迭代纠错算法,以实现利用 1 个正确迭代 LT 编码包恢复多个错误数据包的目的,即迭代后的 LT 编码包 P' 满足式(3)结构,对 l 个错误数据包进行纠正.

由式(3),LT 编码数据包与相邻的错误数据包 S_i 之间满足一定的校验关系,将 P' 与 S_i 组成码字矩阵 S ,如式(4)所示

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_l \\ P' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1,0} & \cdots & C_{1,j} & \cdots & C_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{l,0} & \cdots & C_{l,j} & \cdots & C_{l,n-1} \\ C_{p,0} & \cdots & C_{p,j} & \cdots & C_{p,n-1} \end{bmatrix}_{(l+1) \times n} \quad (4)$$

设 i 表示数据包的位置, j 表示对数据包或编码中码元符号对应位置.如果码元符号没有发生错误,所有相同位置的码元符号之和应为 0,即在第 j 个位置所有码元符号 $\sum_{i=1}^{l+1} C_{i,j} = 0$.当 $\sum_{i=1}^{l+1} C_{i,j} \neq 0$,第 j 个列一定有码元符号发生错误;如果 $\sum_{i=1}^{l+1} C_{i,j} = 0$,受到 GF(2)的限制,当发生错误码元符号的个数为偶数的时候,则存在不能校验出来的错误,因此第 j 个位置的符号存在发生错误的概率,需要采用错误位置替换的方法对每一个恢复的数据包进行校验,判断是否正确.

以图 1(a)为例,说明将删除法引入 MP 迭代纠错的解码过程,信道编码选择 (31,21,5) 线性分组码的系统码编码.接收端接收到 LT 编码包 P_1 ,经过迭代后得到 P'_1 , P'_1 与 S_1 、 S_4 满足式(5)

$$P'_1 = S_1 + S_4 \text{ mod}(2) \quad (5)$$

由式(5),将 P'_1 、 S_1 和 S_4 组成具有校验关系的码字矩阵 S ,如图 2 所示,其中含有阴影的方格表示发生错误的码元符号.

对图 2 中的每列分别进行校验,判断是否满足 $P'_1 + C_{1,j} + C_{4,j} = 0$, ($j=1,2,\dots,31$) 当 $P'_1 + C_{1,j} + C_{4,j} \neq 0$ 时候,则第 j 列中一定存在错误符号;记录所有发生错误码元符号的位置,删除掉所有发生错误的列的码元符号和对应系统

生成矩阵 G 的列分别得到 S'_i 和 G' ,判断每个错误数据包中剩余的码元符号的个数 m ,当 $m < k_1$ 则无解.如果 $m \geq k_1$,则判断 G' 的秩 $\text{rank}(G')$,当 $\text{rank}(G') < k_1$,则不能解出消息码字,而当 $\text{rank}(G') \geq k_1$,可以利用增广矩阵,将其组成

$$\begin{bmatrix} I' & X' \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

形式,判断 I' 是否为单位矩阵或 $I' = [I \ 0]$,并且同时满足 X' 为整数,如果不满足这些条件,不能解出消息码字;如果 I 是为 $k_1 \times k_1$ 单位矩阵,且 X' 为整数,则 X' 中的符号进行 mod(2) 运算,选取前 k_1 位得到消息码字 m_i .在这种删除法中,列中错误符号个数为偶数的时候,存在不能校验出的错误,解出的消息码字有可能是错误的,需要对解出的消息码字再次进行校验,校验方法即为文献[11]提到的错误位置替代法,将得到的消息码字进行 (31,21,5) 线性分组码系统码编码,得到一个新的系统生成码字 S'_i ,找到对应的发生错误位置的码元符号,与对应的 S_i 中的判断出发生错误位置的符号进行替换,再次得到一个新的数据包 S'_i ,通过校验矩阵 H 进行校验,如果 $S'_i H^T = 0$,则表明得到的 S'_i 为正确数据包,如果 $S'_i H^T \neq 0$,则得到的数据包 S'_i 为错误数据包.

3.2.2 LBCMP 纠错实现方法

本文将删除法与 MP 迭代纠错方法相结合,提出 LBCMP 迭代纠错方法,设信源需要发送 k 个具有校验功能的线性分组码数据包, l_{\max} 为 1 个迭代编码包 P' 能够恢复的最大相邻错误数据包个数, l 表示相邻的错误数据包个数且满足 $l \leq l_{\max}$ ($l=1,2,\dots,l_{\max}$, $l_{\max}=1,2,3,\dots$).其实现方法如下:

步骤 1 接收端对于按时间顺序接收到的 k 个数据包分配地址并进行校验,统计接收到正确数据包的个数 n ,将 n 反馈给信源,由式(2)得到修正后的 SRSD 度分布,对 k 个数据包进行 LT 编码发送给接收端;

步骤 2 接收端设定 l_{\max} .对接收到正确的 LT 编码包,根据携带的编码地址与相邻的正确的数据包进行 XOR 迭代运算得到 P'_i ,与 P'_i 相邻错误数据包个数满足 $l \leq l_{\max}$ 得到式(3).当相邻错误数据包个数为 $l=1$,则直接解出错误数据包;当相邻错误数据包个数 $2 \leq l \leq l_{\max}$,则 P'_i 与 l 个错误包组成码字矩阵 S 如式(4)所示,采用删除法进行译码,然后利用错误位置替换法进行校验,得到正确的数据包,如果得到的消息码字是错的,则需要继续等待新的 P'_i 进行纠错;

步骤 3 当接收端恢复所有错误数据包后,发送一个 ACK 给信源,信源停止发送 LT 编码包,纠错过程结束.

3.3 LBCMP 迭代纠错性能分析

由 3.1 节可知,当 P' 与 l 个错误数据包相邻的时候,存在恢复 l 个错误数据包的概率,将这个概率称为纠错概率,用 $P_s^{(l,l_{\max})}$ 表示,其中 $l \leq l_{\max}$, l 与 l_{\max} 的变化会

影响到 $P_s^{(l,l_{\max})}, P_s^{(l,l_{\min})}$ 的大小影响到恢复信源信息所需要编码包的个数。

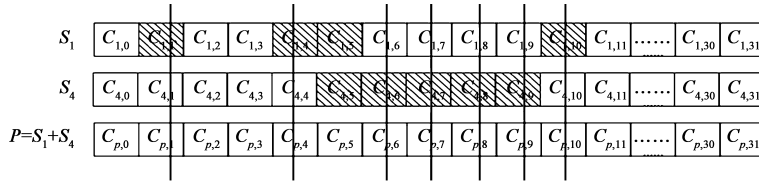


图2 (31,21,5)的删除译码法

首先,分析 l 对纠错概率的影响. 式(4)中每列中都存在 $l+1$ 个码元符号,只要有 1 列的码元符号同时发生偶数个错误,则可能存在部分错误数据包不能被恢复, $P_{e(l)}$ 表示不能校验出来的概率,如式(6)所示

$$P_{e(l)} = \sum_{i=1}^{\lfloor L/2 \rfloor} C_l^i p_e^{2i} (1 - p_e)^{L-2i}, l \geq 2 \quad (6)$$

其中: p_e 表示信道误码率.

由式(6)可知, $p_{e(l)}$ 与 l 的大小有关,当 l 较小的时候,列中同时发生偶数个错误符号的概率 $p_{e(l)}$ 较低,采用删除法解出消息码字的概率较大,当 l 较大的时候, $p_{e(l)}$ 较大,则很难采用删除法恢复发生错误的消息码字.

采用删除法恢复 l 个错误数据包,比较在不同信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)情况下纠错概率 $P_s^{(l,l_{\max})}$. 设 $k=200$, l 分别选取 2、3,信道编码采用(31,21,5)线性分组码的系统码编码,信道选取产生误码率较高的瑞利衰落信道,二进制相移键控调制,采用 Matlab 进行仿真实验,运行次数 1000.

实验结果如图 3 所示,信噪比 0-14dB 变化过程中, P' 纠正 2 个错误数据包的概率 $P_s^{(2,l_{\max})}$ 变化范围为 0.2028-0.6596,同时纠正 3 个错误数据包的概率 $P_s^{(3,l_{\max})}$ 变化范围为 0.027-0.3052, $l=2$ 的纠错概率大于 $l=3$.

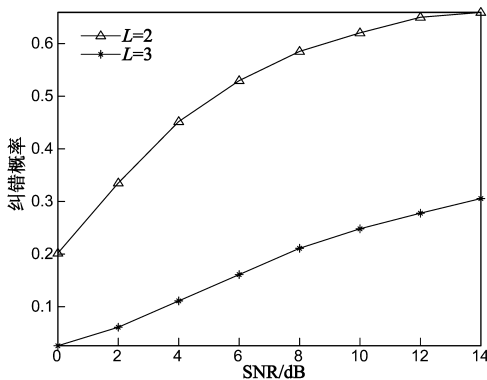


图3 不同信噪比条件下,纠正1个错误数据包的纠错概率

显然,SNR 比较高的时候,符号误码率 p_e 较小,使纠错概率增加. 当 l 增加的时候,由式(6)可以知,列中存在同时发生偶数个错误符号的概率 $P_{e(l)}$ 增加,无法校验出错误的概率也增加, l 越大,无法校验出来的列就越多,纠错能力越低,使纠错概率下降 $P_s^{(l,l_{\max})}$,实验结

果与理论分析结论一致.

其次讨论 l_{\max} 对编码包个数的影响,过大的 l 会导致纠错能力下降,因此 l_{\max} 也不宜选取太大.

与 P' 相邻 $l \leq l_{\max}$ 个错误数据包均能被恢复即 $P_s^{(l,l_{\max})} = 1$,所需要恢复错误的编码包个数最少,本文将这种情况下所需要的编码包个数称为 Channel Code MP (l_{\max}, n) 下限,缩写为 CCMP(l_{\max}, n),表示 LBCMP 迭代纠错的理想情况. 设理想状态, l_{\max} 分别选取 1、2 和 3,观察 l_{\max} 变化对编码包个数的影响,其中, $l_{\max} = l = 1$ 即为文献[14]传统 MP 迭代译码方案. 在信源将 SRSD 作为度分布进行 LT 进行编码,其中 $c = 0.03, \delta = 0.5$,采用 Matlab 进行仿真实验得到的 $l=1$ 、CCMP(2, n) 和 CCMP(3, n) 下限曲线, n 取值范围 0-200,步长 50,仿真实验结果如图 4 所示.

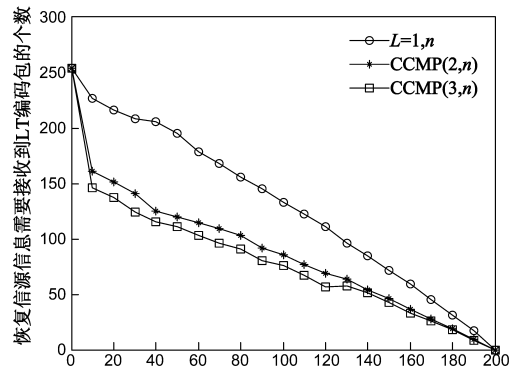


图4 CCMP(l_{\max}, n)曲线

实验结果显示,在 n 取值范围内, $l=1$ 恢复错误数据包所需要编码包个数最多,随着 l_{\max} 的增加,恢复信源信息所用的编码包个数下降,但是其下降速度减少.

当 l_{\max} 变化的时候,恢复信源信息所需要编码包数量变化情况如下:

(1) $l=1, P'$ 已知,由式(3)可知, $P' = S_1$,可以直接恢复 $S_1, p_s^{(1,l_{\max})}$ 概率永远等于 1;

(2) $l_{\max} = 2, P'$ 与相邻错误数据包个数为 $l=1$ 或 $l=2$ 的时候可以恢复错误. 当 $P_s^{(2,2)} = 0$,即 P' 与 2 个错误数据包相邻的时候不能恢复错误数据包,只有与 1 个错误数据包相邻的时候能够恢复错误,这时候其纠

错能力与 $l=1$ 相同;当 $p_s^{(2,2)}=1$,与 P' 相邻的错误数据包均可以被恢复,此时所需要编码包个数最少,为 CCMP(2, n) 下限,所以当 $p_s^{(2,2)}$ 在 $[0, 1]$ 范围变化的时候,编码包个数变化范围在 $l=1$ 与 CCMP(2, n) 之间;

(3) $l_{\max}=3$,当 $p_s^{(2,3)}$ 与 $p_s^{(3,3)}$ 同时等于 0 时候,不存在同时恢复 2 个或者 3 个错误数据包的情况,只有与 P' 相邻 1 个错误数据包能被恢复,其纠错能力与 $l=1$ 相同;当 $p_s^{(2,3)}$ 与 $p_s^{(3,3)}$ 同时等于 1,与 P' 相邻 1、2 或 3 个错误数据包均能被恢复,恢复信源信息所需要的编码包个数最少,为 CCMP(3, n) 下限,因此 $p_s^{(2,3)}$ 、 $p_s^{(3,3)}$ 在 $[0, 1]$ 范围变化的时候,所需要编码包个数变化范围在 $l=1$ 与 CCMP(3, n) 之间。

由以上分析,当满足 $l_{\max} \geq 2$ 且 $p_s^{(l, l_{\max})}$ 不同时为 0,则 LBCMP 迭代联合纠错效果要优于传统的 MP 迭代方法。

4 仿真结果及分析

在瑞利信道中,受到删除法纠错能力的限制,与 P' 相邻的错误数据包不一定都能被恢复,因此将本文的 LBCMP 迭代纠错方法与文献[14]比较恢复错误数据包信源所需要发送编码包个数。

设信道编码选取(31, 21, 5),接收端已经接收到 $k =$

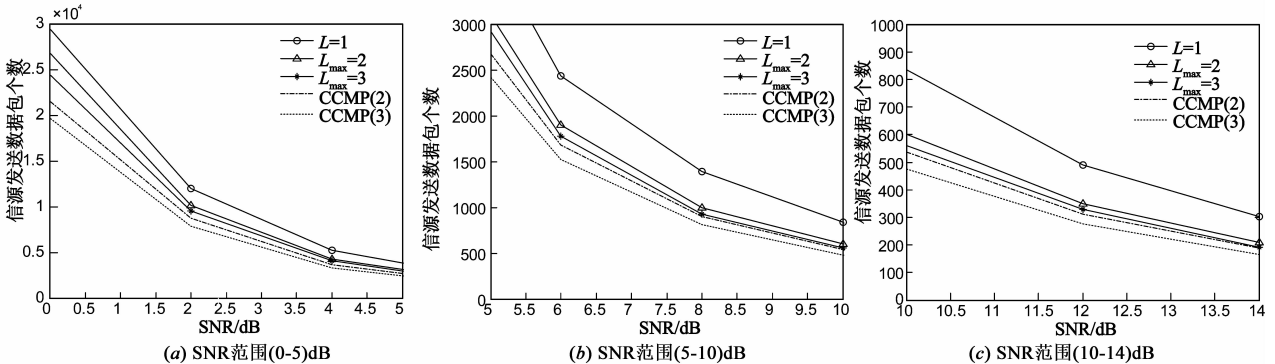


图5 恢复错误数据包需要信源发送LT编码包个数与SNR关系

5 结论

采用喷泉码编码包作为冗余信息,对错误数据包进行纠正,传统的 MP 迭代译码方法中 1 个迭代编码包最多恢复 1 个错误数据包,本文提出的 LBCMP 迭代纠错方法,实现了 1 个迭代编码包同时恢复多个错误数据包,使信源发送的 LT 编码包的数量减少;反馈给信源对度分布函数进行修正的 n 仅是一个数值,需要较短的字节即可实现,不会占用过多的通信资源,因此,本文提出的方案可以有效的提高通信质量。

参考文献

[1] Byers J W, Luby M, Mitzenmacher M, et al. A digital fountain

1000 个数据包,部分数据包发生错误.信源采用 SRSD 度分布函数进行 LT 编码,将文献[14]方案即 $l=1$ 、LBCMP 迭代中 $l_{\max}=2$ 和 $l_{\max}=3$ 、CCMP(2, n)、CCMP(3, n) 相比较。

仿真实验结果如图 5 所示,其中图 5(a) 中 SNR 选取的范围为(0-5)dB,图 5(b)的 SNR 选取范围为(5-14)dB,图 5(c)的 SNR 选取范围为(10-14)dB。

从图 5(a)、(b)和(c)中可以看出,LBCMP 迭代纠错方法与文献[14]中采用传统的 MP 迭代($l=1$)相比较,恢复错误数据包所需要的编码包个数下降很多,随着 l_{\max} 的增加,信源需要发送编码包个数下降的幅度减少.当 SNR 较高的时候,则 $l_{\max}=2$ 曲线接近于 CCMP(2)、 $l_{\max}=3$ 曲线接近于 CCMP(3);在 SNR 较低的时候, $l_{\max}=2$ 曲线远离 CCMP(2)、 $l_{\max}=3$ 曲线远离 CCMP(3)。

由以上实验结果可知,SNR 较高的时候,误码率较小,删除法进行 LBCMP 迭代纠错能力接近于理想情况;反之,SNR 较小的时候,误码率较高,删除法纠错能力变差,其结果偏离理想情况.此外,这种迭代纠错方法中存在可以恢复 $l \leq l_{\max}$ ($l \geq 1$) 个相邻错误, $l=1$ 为文献[14]传统的 MP 迭代译码方案,为其纠错方法的一种情况,因此无论 SNR 为何值,本文纠错方案均优于文献[14]。

approach to reliable distribution of bulk data[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28 (4) : 56 - 67.

[2] 慕建君,焦晓鹏,曹训志.数字喷泉码及其应用的研究进展与展望[J].电子学报,2009,37(7):1571-1577.

Mu Jian-jun, Jiao Xiao-peng, Cao Xun-zhi. A survey of digital fountain codes and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7) : 1571 - 1577. (in Chinese)

[3] 雷维嘉,谢显中,李广军.采用数字喷泉码的无线协作中继方案及其性能分析[J].电子学报,2010,38(1):228-233.

Lei Wei-jia, Xie Xian-zhong, Li Guang-jun. The scheme and performance of wireless cooperative relay system using digital fountain codes[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1) : 228 - 233. (in Chinese)

- [4] Rebelatto J L, UchØa-Filho B F, Li Y, et al. Adaptive distributed network-channel coding [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(9): 2818 – 2822.
- [5] Iscan O, Hausl C. Iterative network and channel decoding for the relay channel with multiple sources [A]. *Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Fall)* [C]. San Francisco: IEEE, 2011. 1 – 5.
- [6] Hausl C, Dupraz P. Joint network-channel coding for the multiple-access relay channel [A]. *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'06)* [C]. Reston, VA: IEEE, 2006. 817 – 822.
- [7] Slimane S B. A joint channel-network coding based on product codes for the multiple-access relay channel [J]. *ISRN Communications and Networking*, 2012, 2012 (Article ID 837815): 1 – 13.
- [8] Zhang Y, Zhang Z, Yin R, et al. Joint network-channel coding with rateless code in two-way relay systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12 (7): 3158 – 3169.
- [9] Zhang Y, Zhang Z. Joint network-channel coding with rateless code over multiple access relay system [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(1): 320 – 332.
- [10] 陈婧文, 仰帆帆. 基于非正规 LDPC 码的中继协作通信及其联合迭代译码的性能研究 [J]. *电子学报*, 2010, 38(7): 1536 – 1540.
Chen Jing-wen, Yang Feng-fan. Study on the irregular-LDPC-based relay cooperation and performance of joint iterative decoding [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(7): 1536 – 1540. (in Chinese)
- [11] 牛芳琳, 张兴, 王冬霞. 无线通信中二进制网络-信道联合删除译码法 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2013, (6): 567 – 572.
Niu Fang-lin, Zhang Xing, Wang Dong-xia. A scheme of joint network-channel erasure correction decoding with binary for wireless communication [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2013, (6): 567 – 572. (in Chinese)
- [12] Luby M. LT codes [A]. *Proceedings of the 43rd Symposium Foundations of Computer Science* [C]. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2002. 271 – 282.
- [13] Lei W J, Liu H F, Xie X Z. Switch degree distribution: an improved degree distribution for LT digital fountain code [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 24(1): 34 – 38.
- [14] Agarwal S, Hagedorn A, Trachtenberg A. Adaptive rateless coding under partial information [A]. *Proceedings of Information Theory and Applications Workshop* [C]. San Diego, CA: IEEE, 2008. 5 – 11.
- [15] Hagedorn A, Agarwal S, Starobinski D, et al. Rateless coding with feedback [A]. *Proceedings of INFOCOM 2009* [C]. Rio de Janeiro: IEEE, 2009. 1791 – 1799.
- [16] Yue G, Uppal M, Wang X. Doped LT decoding with application to wireless broadcast service [A]. *Proceedings of Communications (ICC)* [C]. Kyoto: IEEE, 2011. 1 – 5.
- [17] Sorensen J H, Koike-Akino T, Orlik P. Rateless feedback codes [A]. *Proceedings of Information Theory Proceedings (ISIT)* [C]. Cambridge, MA: IEEE, 2012. 1767 – 1771.
- [18] Sorensen J H, Popovski P, Ostergaard J. Feedback in LT codes for prioritized and non-prioritized data [A]. *Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Fall)* [C]. Quebec City: IEEE, 2012. 1 – 5.
- [19] Zhang L, Liao J, Wang J, et al. Diversified SLT codes based on feedback for communication over wireless networks [A]. *Proceedings of Global Information Infrastructure Symposium* [C]. Trento: IEEE, 2013. 1 – 6.
- [20] Talari A, Rahnavard N. LT-AF codes; LT codes with alternating feedback [A]. *Proceedings of Information Theory Proceedings (ISIT)* [C]. Istanbul: IEEE, 2013. 2646 – 2650.
- [21] 王新梅, 肖国振. 纠错码-原理与方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.

作者简介



牛芳琳 女, 1971 年 11 月出生, 辽宁锦州人。1996 年毕业于大连理工大学电子工程系获工学学士学位, 2008 年于大连海事大学信息科学学院获工程硕士学位。现在辽宁工业大学电子与信息工程学院工作。2010 进入大连理工大学电子信息与电气工程学部, 现为博士研究生, 从事信息论、信道编码、无线通信技术等方面的工作研究。 E-mail: niufanglin@sina.com



王洪玉 男, 1968 年 6 月出生, 吉林长春人, 教授、博士生导师、中国电子学会高级会员、IEEE 会员。1990 年、1993 年和 1997 年分别在吉林工业大学、中国科学院长春光机所和天津大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位。现为大连理工大学教授, 主要从事移动通信技术、无线网络技术等方面的工作。