

DOI: 10.7652/xjtuxb201802011

突发错误检测重数分配算法及其电路设计

胡岩, 张为, 王令宇, 王旸
(天津大学微电子学院, 300072, 天津)

摘要: 为解决突发错误信道下里德所罗门码译码复杂度高与性能差的问题,提出了一种突发错误检测的重数分配算法(BD-RCMA)。首先计算信道突发噪声占比参数,根据该参数对包含随机错误与突发错误的混合信道进行数学建模,以便从信道中获取信道软信息;然后基于子码的电平计算每一符号的可靠度与突发度并确定突发度阈值,并比较突发度与阈值得到突发错误的精确位置,实现对突发错误的检测;最后对BD-RCMA算法进行电路设计并将其应用于基于硬判决的突发错误软判决译码器架构中。仿真结果表明,BD-RCMA算法可以精确定位突发错误位置,在突发错误所包含的子码数为65~71、信道信噪比为5~9 dB情况下,与低复杂度重数分配算法相比,误帧率可降低15%~45%。

关键词: 里德所罗门码;重数分配;混合信道建模;突发错误;电路设计

中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0070-06

An Assignment Algorithm of Multiplicity for Burst-Error Detection and Design of Its Circuit

HU Yan, ZHANG Wei, WANG Lingyu, WANG Yang
(Institute of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An assignment algorithm of multiplicity for burst-error detection (BD-RCMA) is proposed to solve the high complexity and poor performance of Reed-Solomon decoder under bursty channel. Firstly, the channel noise ratio is computed and a new hybrid channel model based on the ratio is proposed to obtain the soft information from channel. Then the reliability and bursty magnitude are computed for every symbol based on the information subcode level. The location of a burst symbol is determined by comparing the bursty magnitude and the threshold which realizes the detection of the burst. Finally, the circuit of the proposed algorithm is designed and applied in an architecture of burst-correction hard decision decoding-low complexity chase. Simulation results show that the new algorithm accurately locates the bursty symbol. A comparison with the RCMA algorithm shows that the symbol error rate reduces by 15% to 45% when the subcode number contained in burst error is between 65 and 71 and the signal noise ratio varies from 5 dB to 9 dB.

Keywords: Reed-Solomon code; multiplicity assignment; hybrid channel model; burst error; circuit design

差错控制编码是使用信道编译码技术对信道噪声产生的错误进行控制纠正以提高数字信息传输准

收稿日期: 2017-04-26。 作者简介: 胡岩(1993—),女,硕士生;张为(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61474080)。

网络出版时间: 2017-12-06 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171206.2219.008.html>

确性的基本方法,目前广泛应用的差错控制编码主要有 Turbo 码、低密度奇偶校验码、极化码和里德-所罗门(Reed-Solomon, RS)码^[1]等,其中 RS 码因其能够纠正随机错误和突发错误的特性而被广泛应用。RS 码的译码算法直接决定了信息传输的准确性,目前,RS 译码算法主要分为两种,分别是硬判决译码(hard decision decoding, HDD)^[2]和代数软判决译码(algebraic soft decoding, ASD)^[3],相比较于 HDD, ASD 译码算法能够获得更加显著的译码增益和更好的译码性能,软判决译码算法中,低复杂度蔡斯(low-complexity chase, LCC)^[4]算法因为其重数为 1、计算简单而得到广泛研究。

近几年来,高速数字通信系统中随机错误译码算法取得了很多突破性的进展^[5],然而,突发错误译码算法的研究仍然被复杂的计算和结构所限制。最近,有研究者提出了新的纠正突发错误的译码算法并取得了广泛的关注^[6-9],其中,改进于突发错误纠正(burst-error correction, BC)算法^[6]的新型无逆突发错误纠正(reformulated inversionless BC, RiBC)^[7]算法已经取得实际应用,但该算法为硬判决译码算法,没有充分利用信道软信息,译码复杂度;改进于基于硬判决的 LCC(HDD-LCC)算法^[10]与 RiBC 的 BCHDD-LCC 算法^[11]将突发错误译码和随机错误译码相融合,取得了更好的译码性能,但该算法中采用的信道模型不能完成对随机错误信道与突发错误信道的识别,此外,采用的突发错误预判断机制缺乏理论依据,且对突发错误位置的判断范围较大,准确度差。

为解决上述问题,从信道中获取突发错误软信息并且将突发错误信道与随机错误信道相结合,实现两种信道的识别和转换以便更加有针对性地进行译码,本文提出了一种新的混合信道模型,从该模型出发提出了基于突发错误检测的新型重数分配(BD-RCMA)算法,通过在传统 RS 码软判决获得的信道软信息中,充分挖掘符号中各子码的电平信息,获取突发错误的准确位置,降低后续译码的迭代次数,充分发挥 RS 码纠正突发错误的能力。与现有算法相比,该算法能够显著提高突发错误信道下的译码性能。

1 混合信道模型

随机噪声指的是通信系统中的加性白噪声,而突发噪声通常由脉冲干扰和多径衰落的原因引入。经随机噪声与突发噪声干扰的 RS 码编译码的数字

通信系统框图如图 1 所示。图 1 中的数字信道由随机噪声源 $n_g(n)$ 和突发噪声源 $n_b(n)$ 组成。对于 RS(n, k)码, $n=2^q-1$, 一个编码后的 RS 码符号由 q 个子码组成,因此信息传输的基本单元是子码而非编码后的符号。对于子码进行研究,可以在仅增加少量计算量的条件下更好地反映信道噪声对电平的作用与影响,因此本文以子码作为研究信道噪声的基本单元,突发错误是指由突发噪声脉冲干扰造成的连续子码错误。为简化模型建立,首先做几点合理性假设:

(1)随机噪声 $n_g(n)$ 、突发噪声 $n_b(n)$ 与信道噪声 $n_c(n)$ 分别用方差为 σ_{nb}^2 、 σ_b^2 ($\sigma_b^2 > \sigma_{nb}^2$) 与 σ_c^2 ($\sigma_{nb}^2 < \sigma_c^2 < \sigma_b^2$) 的高斯白噪声描述;

(2)突发噪声脉冲到来的概率为泊松分布,泊松到达率为 τ ^[12];

(3)突发噪声脉冲具有固定长度其造成的突发错误所包含的子码数量为 L ^[13]。

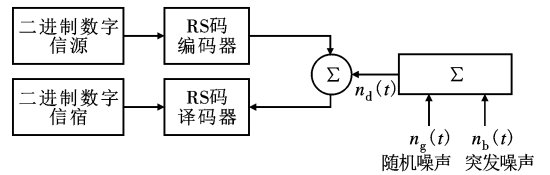


图1 有噪声干扰的 RS 码数字通信系统框图

1.1 噪声占比参数

分别用 $a_j(n)$ 与 $a_i(n)$ 描述均值为 0、方差为 σ_{nb}^2 和 σ_b^2 的加性高斯序列,用 $[n_i]$ 描述平均到达率为 τ 的泊松点的位置, $\Pi(n/L)$ 描述中心在 $n=0$ 、宽度为 L 的单位幅度脉冲,则随机噪声分量 $n_g(n)$ 和突发噪声分量 $n_b(n)$ 可以分别表示为

$$n_g(n) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} a_j(n) \quad (1)$$

$$n_b(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} a_i(n) \Pi((n - n_i - L/2)/L) \quad (2)$$

假设在 1 s 内通过方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(AWGN)信道传输 f 个子码,则译码器在 1 s 内收到的子码序列为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_f]$,且期望 $E(\mathbf{x}) = 0$,方差 $D(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x}^2) = \sigma^2$,该子码序列的能量 E 为每一个子码的电平的平方和

$$E = \sum_1^f |\mathbf{x}_n|^2 = fE[\mathbf{x}_n^2] = f\sigma^2 \quad (3)$$

由此可得

$$E_g = f\sigma_{nb}^2 \quad (4)$$

$$E_b = \tau L f \sigma_b^2 \quad (5)$$

$$E_c = f\sigma_c^2 \quad (6)$$

式中: E_g 、 E_b 与 E_c 分别为受随机噪声 $n_g(n)$ 、突发噪声 $n_b(n)$ 与信道噪声 $n_c(n)$ 干扰后的子码的能量。由于信息发送端发送功率保持不变,因此在给定信道信噪比 R_{SN} 的条件下,信道的噪声能量为常数,从而有

$$\tau L \sigma_b^2 + \sigma_{nb}^2 = \sigma_c^2 \quad (7)$$

则突发噪声的能量越大,随机噪声的能量就越小,据此定义信道噪声占比参数

$$\psi = E_b / (E_b + E_g) = (\tau L \sigma_b^2) / (\tau L \sigma_b^2 + \sigma_{nb}^2) = (\tau L \sigma_b^2) / \sigma_c^2 \quad (8)$$

参数 ψ 反映了在信道噪声中突发噪声的占比情况,仿真给出了当 $R_{SN} = 5$, $\psi = 0.2 \sim 1.0$ 时,信道中突发噪声与随机噪声的干扰造成的子码电平波动如图2所示。从图2可以发现,当 $\psi \geq 0.4$ 时,受突发噪声干扰的子码电平值通常是受随机噪声干扰的子码电平值的3倍或更多,此时,子码错误通常成串出现,所以通过参数 ψ 来区分信道状态。当 $\psi \geq 0.4$ 时,信道被认为是突发错误信道,此时引入马尔科夫转状态移链(MC)模型^[11]来描述错误内部特性,反之则认为是随机错误信道,用 AWGN 信道进行描述。

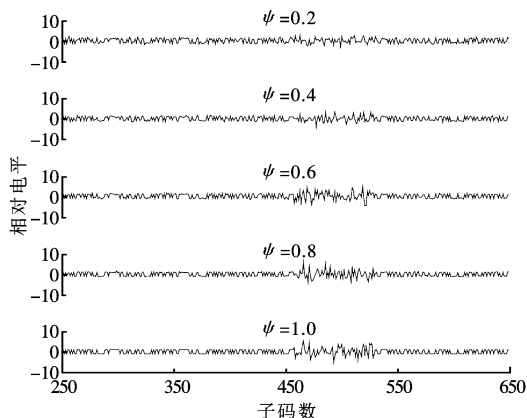


图2 信道传输后的子码电平

1.2 马尔科夫状态转移链模型

当 $\psi \geq 0.4$ 时,为了描述突发错误内部特性,引入 MC 模型^[11]描述突发错误的记忆特性,模型如图3所示。由于突发噪声所能干扰的子码数为 L ,因此 MC 模型有 $L+1$ 个状态,每一次状态转移对应每一个子码到来。

综上所述,整个数字通信信道只需要4个参数 σ_b^2 、 σ_c^2 、 L 、 τ 来描述,首先由4个参数计算出信道噪声占比参数 ψ ,通过 ψ 即可判断信道状态,若为随机错误信道,则用方差为 σ_c^2 的 AWGN 信道描述,若为突发错误信道,则用图3所示的子码级 MC 模型描述。

新型混合信道模型实现了随机错误信道与突发

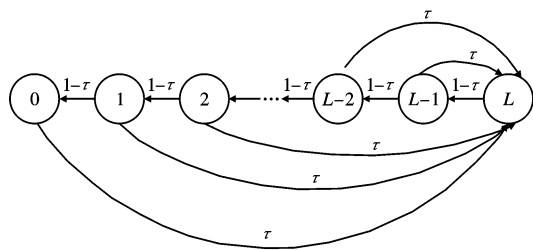


图3 马尔科夫状态转移链模型

错误信道的一体化建模,并通过噪声占比参数实现了2种信道的识别与转换方式,根据信道下译码方式的相似性实现译码算法的结合和译码器结构的复用,相较于传统的随机错误信道或突发错误信道单一建模的方式更加接近实际信道随机噪声与突发噪声共同存在的环境,在此新型混合信道下进行合理性研究可以充分发挥 RS 码纠正随机错误与突发错误的能力,相较于针对单一高斯分布随机错误^[14]或突发错误的译码方式具有更加优异的性能。

2 新型重数分配算法

2.1 RCMA 算法

在 $RS(n, k)$ 码译码条件下,RCMA 算法^[15]的伪代码如下。

- 1 Input:接收电平 $r_{i,k}$ 与插值点个数 η ;
- 2 对于每一个符号 $i(0 \leq i \leq n-1)$ 与其第 $t(0 \leq t \leq q-1)$ 个子码,计算

$$\text{硬判决值 } y_{i,k}^{\text{HD}} = \begin{cases} 0, & r_{i,k} \leq 0 \\ 1, & r_{i,k} \geq 0 \end{cases};$$

$$\text{最小子码电平绝对值 } \gamma_i = \min_{0 \leq k \leq q-1} \{|r_{i,k}|\};$$

$$\text{最小子码位置 } \delta_i = \arg \min_{0 \leq k \leq q-1} \{|r_{i,k}|\};$$

- 3 选取 η 个最小 γ_i 的符号组成不可靠集合 $\bar{R}$;

- 4 for $i=0:n-1$

- 5 begin

- 6 if $i \in \bar{R}$

- 7 反转 y_i^{HD} 的第 δ_i 个子码形成 $y_i^{2\text{HD}}$, 并分配2个插值点 $(\alpha_i, y_i^{\text{HD}})$ 和 $(\alpha_i, y_i^{2\text{HD}})$;

- 8 if $i \notin \bar{R}$

- 9 分配一个插值点 $(\alpha_i, y_i^{\text{HD}})$;

- 10 end

- 11 Output: 2^η 个测试向量。

该算法经过理论推导得出结论:符号的可靠度仅与该符号内电平绝对值最小的子码有关,即

$$\Gamma_i = -\frac{2 |r_{i,k}|}{\sigma^2} \lg e \quad (9)$$

式中: Γ_i 为第 i 个符号的可靠度; $|r_{i,k}|$ 为第 i 个符号

第 k 个子码接收电平绝对值, $|r_{i,k}|$ 越小, 则 Γ_i 越大, 该符号越不可靠。

算法输入为接收电平 $r_{i,k}$ 以及插值点个数 η , 对于每一个符号 i 以及它的第 k 个子码, 首先计算该符号的第一硬判决值 y_i^{HD} , 该符号内比特电平绝对值最小的值 γ_i 及其位置 δ_i , 选取 η 个最小 γ_i 的符号位置组成最不可靠集合 $\bar{R}$, 对于 $\bar{R}$ 内的符号, 反转其 δ_i 位置的判决值形成第二硬判决值 $y_i^{2\text{HD}}$, 从而获得 2 个插值点 $(\alpha_i, y_i^{\text{HD}})$ 与 $(\alpha_i, y_i^{2\text{HD}})$, 对于 $\bar{R}$ 外的符号则只取一个插值点 $(\alpha_i, y_i^{\text{HD}})$ 。

2.2 BCHDD-LCC 译码算法

BCHDD-LCC 译码算法由重数分配 (MA)、校验子计算 (SC)、校验子更新 (SU)、关键方程求解 (KES)、多项式选择 (PS)、钱搜索和福尼算法 (CS-FA) 6 个模块组成。该算法是通过将 KES 模块中求解随机错误的 RiBM 算法与求解突发错误的 RiBC 算法相结合, 通过 2 种算法迭代的相似性复用译码器单元, 从而实现对信道中产生的随机错误与突发错误进行纠正。该算法产生 2 个关于突发错误的信号变量 b 和 p , 分别表示是否有突发错误产生以及突发错误的大致位置。若 b 为 1, 代表有突发错误产生, 则采用 RiBC 算法进行关键方程求解, 反之采用 RiBM 算法求解。RiBC 算法只在产生突发错误并且突发错误所包含的子码数在码字纠错范围内时应用, 而在其他情况下则使用求解随机错误下关键方程的 RiBM 算法。

在采用 RiBC 算法纠正突发错误时, 需要对突发错误位置进行预判断, 用 b 进行记录并作为 RiBC 算法的输入, 这将在 MA 模块中进行。MA 模块为后续模块提供插值点和突发错误位置信息, BCHDD-LCC 译码器中采用的获取插值点的算法是 RCMA 算法, 而获取突发错误位置的方法是根据经验确定一个阈值, 使得随机错误位置处的电平在该阈值以下, 而突发错误位置处的电平在该阈值以上, 并据此给出突发错误位置信息。

2.3 BD-RCMA 算法

由于 BCHDD-LCC 译码算法中获取突发错误位置的经验阈值方法缺少一定的理论基础, 对于突发噪声下频繁变动的子码电平很难给出准确的突发错误位置信息, 因此本文提出基于突发错误检测的新型重数分配算法, 将获取插值点与突发错误位置统一于重数分配算法中, 在提高算法性能的同时降低运算复杂度。

由图 1 可知, 随机噪声与突发噪声将导致子码

电平产生不同的波动, 突发错误信道下突发噪声的影响较大, 导致子码电平的波动较大, 且通常为连续波动, 而随机噪声对子码电平波动的影响较小, 因此可根据符号内子码电平的波动情况获取突发错误位置。符号内子码电平波动越大即电平绝对值越大, 则该符号越有可能处于突发错误状态。用 $|r_{i,l}|$ 表示第 i 个符号的第 l 个子码接收电平的绝对值, 该子码为该符号内接收电平绝对值最大的子码。类似于符号可靠度, 定义突发错误状态的可能性即突发度为

$$B_i = -\frac{2|r_{i,l}|}{\sigma^2} \lg e \quad (10)$$

由式 (10) 可知, $|r_{i,l}|$ 越大, B_i 越小, 该符号越有可能为突发错误位置。

已知信道是均值为 0、方差为 σ_c^2 的高斯白噪声信道, 由高斯分布的 3σ 原则可知, 信道中子码电平位于区间 $(\mu - 3\sigma_c, \mu + 3\sigma_c)$ (μ 为发送端未经信道噪声干扰的子码的电平值) 的概率为 0.997 4, 而位于该区间外的概率只有 0.002 6, 可以忽略不计。因此, 受随机噪声扰的随机错误处的子码电平位于区间 $(\mu - 3\sigma_c, \mu + 3\sigma_c)$ 之外的概率极小, 即可认为子码电平位于该区间外的子码为突发错误位置子码, 由此定义突发错误阈值

$$B_{\text{TH}} = -\frac{2\kappa_{\text{TH}}}{\sigma^2} \lg e \quad (11)$$

式中: $\kappa_{\text{TH}} = \max\{|\mu - 3\sigma_c|, |\mu + 3\sigma_c|\}$ 对于第 i 个符号, 若 $|r_{i,l}| \geq \kappa_{\text{TH}}$, 即 $B_i \leq B_{\text{TH}}$, 该符号为突发错误位置, 反之则为随机错误位置。综上, BD-RCMA 算法的伪代码如下:

- 1 Input: 子码接收电平 $r_{i,k}$ 与插值点个数 η ;
- 2 对于每一个符号 i ($0 \leq i \leq n-1$) 与其第 k 个子码 ($0 \leq k \leq q-1$), 计算:

硬判决值 $y_{i,k}^{\text{HD}} = \begin{cases} 0, & r_{i,k} \leq 0 \\ 1, & r_{i,k} \geq 0 \end{cases}$;
 最小子码电平绝对值 $\gamma_i = \min_{0 \leq k \leq q-1} \{|r_{i,k}|\}$;
 最小子码位置 $\delta_i = \arg \min_{0 \leq k \leq q-1} \{|r_{i,k}|\}$;
 最大子码电平绝对值 $\kappa_i = \max_{0 \leq k \leq q-1} \{|r_{i,k}|\}$;
 突发阈值 $\kappa_{\text{TH}} = \max\{|\mu - 3\sigma^2|, |\mu + 3\sigma^2|\}$;
- 3 选取 η 个最小 γ_i 的符号组成不可靠集合 $\bar{R}$;
- 4 for $i = 0 : n-1$
- 5 begin
- 6 if $i \in \bar{R}$
- 7 反转 y_i^{HD} 的第 δ_i 个子码形成 $y_i^{2\text{HD}}$, 并分配 2 个插值点 $(\alpha_i, y_i^{\text{HD}})$ 和 $(\alpha_i, y_i^{2\text{HD}})$;

8 if $i \notin \bar{R}$
9 分配一个插值点 $(\alpha_i, y_i^{\text{HD}})$;
10 if $\kappa_i > \kappa_{\text{TH}}$
11 $\kappa_i \in$ 突发错误位置集合 $\bar{B}$;
12 end
13 Output: 2^7 个测试向量, 突发错误位置集合 $\bar{B}$.

BD-RCMA 算法的输入同 RCMA 算法, 对于每一个符号 i 以及它的第 k 个子码, 在 RCMA 基础上计算该符号内子码电平绝对值的最大值 κ_i 与突发阈值 κ_{TH} , 如果 $\kappa_i \geq \kappa_{\text{TH}}$, 则 i 为突发错误位置, 反之则不是。BD-RCMA 算法在获取插值点的同时更精确地获取突发错误位置信息, 最后输出突发错误位置信息到 KES 模块进行突发错误译码。

3 译码器架构与仿真结果

3.1 BD-RCMA 算法的硬件实现

由于 BD-RCMA 与 RCMA 算法具有相似性, 因此可以在 RCMA 的硬件实现基础上增加突发错误检测模块 (burst detection module, BD) 来追踪突发错误的位置信息。BD 模块的电路结构如图 4 所示。

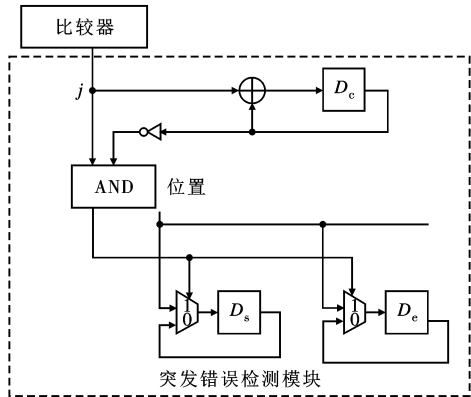


图 4 BD 模块的电路结构

BD 模块主要由 D_c 、 D_s 与 D_e 3 个寄存器组成, D_c 存储突发错误符号的数量, D_s 与 D_e 分别存储突发错误的起始位置与结束位置。对于第 i 个符号, $\{|\tilde{r}_{i,0}|, |\tilde{r}_{i,1}|, \dots, |\tilde{r}_{i,q-1}|\}$ 通过比较器找到其最小绝对值子码 γ_i 与位置 δ_i 的同时, 还要找到其最大绝对值 κ_i , 将 κ_i 与 $\kappa_{\text{TH}} = \max\{|\mu - 3\sigma^2|, |\mu + 3\sigma^2|\}$ 进行比较, 若 $\kappa_i \geq \kappa_{\text{TH}}$, 说明此符号为突发错误位置, 用变量来跟踪其位置, $j=1$ 表示当前符号为突发错误位置, 反之则不是突发错误位置。

本文 BD-RCMA 算法可以与校验子计算 (SC) 模块同时工作, 而后续的校验子更新 (SU)、关键方程求解 (KES)、钱搜索与福尼算法 (CSFA) 等模块

则是采用 BCHDD-LCC 译码器的串行流水线结构。将 BD-RCMA 模块应用在 BCHDD-LCC 译码器架构中, 得到如图 5 所示的 BD-BCHDD-LCC 译码器, 采用该译码器对 RS(255, 239) 码进行译码, 在 $\eta=3$ 条件下采用 Verilog HDL 语言进行建模, 并采用 SMIC 0.13 μm 工艺下的 Design Compiler 进行综合, 得到该译码器的总面积为 0.49 mm^2 (47 050 个异或门), 最大频率为 143 MHz, 由此计算得到该译码器的吞吐率为 1.14 Gbit/s。

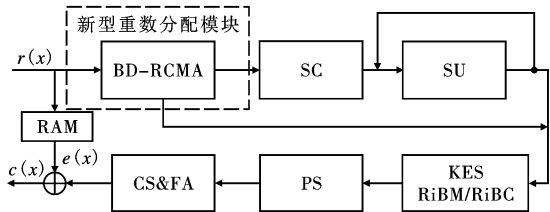
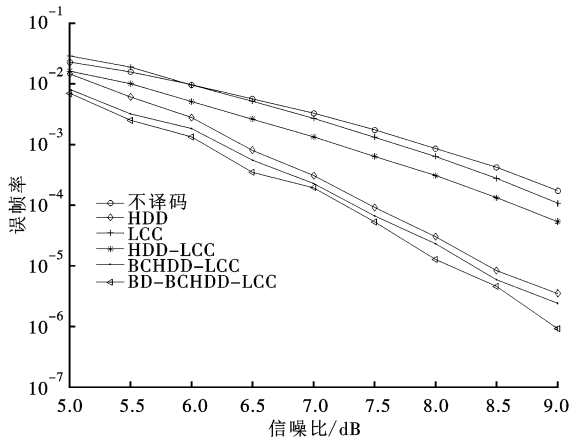


图 5 BD-BCHDD-LCC 译码器流水线架构

3.2 仿真结果

混合信道模型由随机噪声方差、突发噪声方差、突发脉冲的泊松到达率与突发错误包含的子码数这 4 个参数唯一确定。

在上述混合信道模型下, 设置信道总信噪比为 5~9 dB, 设置突发噪声方差为 10 倍随机噪声方差, 突发脉冲的泊松到达率可由泊松分布公式唯一确定。仿真实验分析表明, 对于 RS(255, 239) 码, 当突发错误包含的子码的数量大于 RS 码的纠错半径 64 时, RiBM 算法与 RiBC 算法的译码性能开始产生较大差异。因此, 在 64 到 RiBC 算法的译码数量极限之内选取 $L=65$ 与 $L=71$ 进行仿真分析, 计算得到噪声占比参数 ψ 大于突发信道阈值, 仿真信道状态为突发错误信道。每组环境下设置 10 000 次差异信息作为数据输入, 经仿真实验得到误帧率与信噪比的关系如图 6 所示。由图 6 可以看出, 当信道信



(a) $L=65$ bit

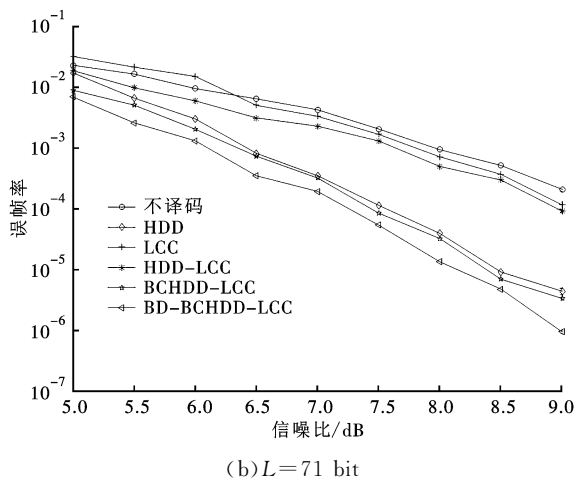


图6 5种译码算法对RS(255,239)码的仿真结果

噪比一定时,BD-BCHDD-LCC译码器的译码性能要好于原始BCHDD-LCC译码器以及传统的针对随机错误的RS码译码器。当突发错误包含的子码数增加时,采用BD-RCMA算法的译码性能要更好,这是因为突发错误所包含的子码数越多,则BD-RCMA算法根据电平信息提取突发错误位置的效果就越好,而原始BCHDD-LCC算法对于突发错误位置的判断越不准确,误码率也就越高。

4 结 语

论文提出了一种结合随机错误信道与突发错误信道的新型突发错误信道,基于该信道中所传输的子码的电平特性提出了基于突发错误检测的重数分配算法——BD-RCMA,采用该算法可以在获取信息可靠度的同时精确地定位突发错误的位置。对该算法采用硬件电路实现并应用在BCHDD-LCC译码器架构中,仿真结果表明,采用BD-RCMA算法的译码器可显著提高该译码器纠正突发错误的性能。

参考文献:

- [1] REED G, SOLOMON I. Polynomial codes over certain finite fields [J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1960, 8(2): 300-304.
- [2] SARWATE D V, SHANBHAG N R. High-speed architectures for Reed-Solomon decoders [J]. Very Large Scale Integration Systems IEEE Transactions on, 2001, 9(5): 641-655.
- [3] LI X, ZHANG W, LIU Y. Efficient architecture for algebraic soft-decision decoding of Reed-Solomon codes [J]. Communications IET, 2014, 9(1): 10-16.
- [4] BELLOADO J, KAVCIC A. A low-complexity method for chase-type decoding of Reed-Solomon codes [C]

//IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 2037-2041.

- [5] 白婷婷. 高速通信系统中RS编解码的应用 [J]. 电子测试, 2015(23): 57-59.
- BAI Tingting. Application of RS code in high speed communication system [J]. Electronic Test, 2015 (23): 57-59.
- [6] YIN L, LU J, LETAIEF K B, et al. Burst-error-correcting algorithm for Reed-Solomon codes [J]. Electronics Letters, 2001, 37(11): 695-697.
- [7] WU Yingquan. Novel burst error correction algorithms for Reed-Solomon codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 519-529.
- [8] 季文洁. 可重构的环境自适应RS码软判决译码器设计 [D]. 天津: 天津大学, 2015: 47-53.
- [9] WU Yingquan. New scalable decoder architectures for Reed-Solomon codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(8): 2741-2761.
- [10] 张为, 潘博阳, 王皓. 一种基于LCC算法的新型RS码译码器 [J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 276-279.
- ZHANG Wei, PAN Boyang, WANG Hao. A novel RS decoder based on LCC algorithm [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(3): 276-279.
- [11] WANG Lingyu, ZHANG Wei, WANG Yang, et al. Multiple channel error-correction algorithms for LCC decoding of Reed-Solomon codes and its high-speed architecture design [J]. IET Communications, 2017, 11 (9): 1407-1415.
- [12] HAN Gang, LU Jia, WANG Junhui, et al. MIM: A new class of hybrid channel error model [C]// IEEE Third International Conference on Information Science and Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1182-1185.
- [13] BERMAN T, FREEDMAN J. Non-interleaved Reed-Solomon coding over a bursty channel [C]// Military Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992(2): 580-583.
- [14] FOSSORIER M. Gaussian elimination decoding of error correcting Reed-Solomon codes in steps and complexity [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19 (7): 1101-1104.
- [15] PENG Xingru. Reduced-complexity multiplicity assignment algorithm and architecture for low-complexity chase decoder of Reed-Solomon codes [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1-4.

(编辑 刘杨)