

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108060

# VDE-TER 信道中基于先验修正因子的 Turbo 码译码改进算法\*

胡青 赵晨淞

(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116033)

**摘要:** 甚高频数据交换系统是国际海事组织主导 e-航海战略中的主要通信方式之一。其中, VDE-TER 业务根据物理信道特性划分了多种业务逻辑信道。为保证 VDE-TER 信道传输质量前提下提升数据传输效率, 本文在深入分析 VDE-TER 不同业务逻辑信道下 Turbo 编译码算法基础上, 提出了一种基于先验修正因子的 Max-Log-Map 改进算法。该算法针对 VDE-TER 不同业务逻辑信道 Turbo 编码特性, 通过仿真和实际物理信道大样本性能测试, 实现了 VDE-TER 特定逻辑信道的最优修正因子值确定。结果表明, 加入修正因子的译码算法与传统译码算法相比, 性能提升 0.6~0.8 dB 增益, 为高性能 VDES 产品研制奠定了理论技术基础。

**关键词:** VDES; Turbo 码; VDE-TER; Max-Log-Map 算法

**中图分类号:** TN911.21 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

## Improved Turbo code decoding algorithm based on prior correction factor in VDE-TER channel

Hu Qing Zhao Chensong

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116033, China)

**Abstract:** VHF data exchange system is one of the main communication methods in the e-navigation strategy led by the international maritime organization. Among them, VDE-TER business divides many kinds of business logical channels according to physical channel characteristics. In order to improve the data transmission efficiency under the premise of ensuring the transmission quality of the VDE-TER channel, this paper proposes an improvement of Max-Log-Map based on a priori correction factor based on an in-depth analysis of the Turbo encoding and decoding algorithms under different service logic channels of the VDE-TER algorithm. According to the Turbo coding characteristics of VDE-TER different service logical channels, the algorithm realizes the determination of the optimal correction factor value of the specific logical channel of VDE-TER through simulation and the performance test of large samples of actual physical channels. The results show that the performance of the decoding algorithm with correction factor is improved by 0.6~0.8 dB gain compared with the traditional decoding algorithm, which lays a theoretical and technical foundation for the development of high-performance VDES products.

**Keywords:** VDES; Turbo code; VDE-TER; Max-Log-Map algorithm

### 0 引言

船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 自 21 世纪以来, 在维持海上交通秩序、保障船舶航行安全发挥了重要作用。但随着海事通信需求的不断增大, AIS 频段的频谱资源已经严重不足, AIS 系统数据链超负荷使用, 造成信息传输阻塞, 对海上航行安全产生不利影

响<sup>[1]</sup>。因此, VDES 的概念应运而生, 与 AIS 相比, VDES 能够提供更大的信道容量和更高的通信速率, 通信性能要求也相应提高。但是, 由于海上通信信道条件较差, 信号在传输过程中损耗较大, 接收端收到的信号很可能存在干扰、时延、频偏、相移等问题, 为了保证信息传输的有效性和可靠性, 研究与海上信道适配的信道编译码算法和调制解调技术是十分必要的<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2021-10-11

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3901501, 2021YFB3901502, 2021YFC2801002)、辽宁省科学技术计划项目(2021JH1/10400008)资助

自 1993 年 Berrou 等首先提出了 Turbo 码并行级联编解码方案<sup>[3]</sup>以来。如今, Turbo 码已成为 3G 移动通信的主要编码方式之一。目前,在 Turbo 码译码算法的改进方面涌现大量研究成果。文献[4]提出了一种基于线性估算的 Turbo 码译码器结构,可有效减少状态度量缓存访问造成的功率损失问题。文献[5]提出了一种 Max-Log-Map 译码器外部信息缩放方案,该算法具有接近 Log-Map 的译码增益,同时保持了与 Max-Log-Map 几乎相同的计算复杂度。文献[6]提出了一种归一化对数映射译码算法,并由此设计了 LUT-Nor-Log-Map 算法,该算法可节省约 2.1% 的逻辑资源,且与 Max-Log-Map 算法相比,译码性能提高了约 0.25~0.5 dB。文献[7]提出了一种适用于高速率、高吞吐量的双最大对数映射算法,显著降低了译码器的复杂度。文献[8]设计了一种通用的低复杂度非均匀星座解映射算法,该算法可在性能损失很小的情况下,大大降低非均匀星座的解映射复杂度。文献[9]提出了带 CRC 校验终止机制的 Turbo 码译码算法,在迭代译码过程,利用 CRC 校验提前终止迭代,减少了进行不必要迭代运算,译码速度得到了很大的提高。文献[10]提出了一种基于 Turbo 码和正交二分峰差(orthogonal dichotomous peak difference, ODPD)判决法的 LoRa 改进方法,可使接收机灵敏度提高约 3 dB。

目前, Turbo 码作为一种优秀的编码技术,应用十分广泛。上述文献中对 Turbo 码译码算法在不同应用场景的算法改进做了大量研究工作,但特定于 VDES 信道下的研究工作很少。受文献[11]启发,为提高 VDES 系统的通信质量和性能,本文针对 VDE-TER 信道特征,对 Max-Log-Map 译码算法加入了双修正因子进行改进,并仿真出了适用于不同链路 ID、不同信噪比下实现误码率最低的修正因子。在第 2 节中,设计了基于 VDE-TER 信道特征的 Turbo 编码模型。在第 3 节中,详细阐述了 VDE-TER 信道模型下译码算法的改进原理。在第 4 节中,仿真并整理了不同链路 ID 下的修正因子。最后,在第 5 节中给出结论。结果表明,加入修正因子的译码算法与传统译码算法相比,性能提升可达到 0.6~0.8 dB 的增益,弥补了针对 VDES 系统下, Turbo 码改进译码算法研究的不足。

## 1 VDE-TER 模型

### 1.1 VDE-TER 信道配置模型

基于协议 1139-Ed. 2 和协议 R-REC-M. 2092, VDE-TER 平台不同的信道配置取决于不同的链路配置 ID。本文根据 VDE-TER 信道特征,设计了 VDE-TER 信道配置模型。

VDE-TER 的不同信道的码率的选择由式(1)和(2)确定。

$$R_c = (k_{id} - 11) \bmod 3 \quad (1)$$

其中,  $k_{id} \in [11, 19]$  表示链路配置 ID,  $(k_{id} - 11) \bmod 3$  表示求  $(k_{id} - 11)$  除以 3 的余数,  $R_c$  用于码率  $\eta$  的选

择,如式(2)所示。

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{2}, & R_c = 0 \\ \frac{3}{4}, & R_c \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

VDE-TER 的不同信道的调制方式由式(3)确定。

$$k = \begin{cases} 2, & R_c = 0 \\ 3, & R_c = 1 \\ 4, & R_c = 2 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $k$  用于表示不同的调制方式,并确定相应调制方式下映射一个符号需要的比特数。当  $k = 2$  时,表示  $\pi/4$  QPSK 调制,映射一个符号需要 2 个比特;当  $k = 3$  时,表示 8 PSK 调制,映射一个符号需要 3 个比特;当  $k = 4$  时,表示 16 QAM 调制,映射一个符号需要 4 个比特。

### 1.2 基于 VDE-TER 信道特征的 Turbo 编码模型

基于协议 1139-Ed. 2 和协议 R-REC-M. 2092,搭建了 VDE-TER 平台的 Turbo 编码模型:

Turbo 码的编码器结构如图 1 所示。编码器由两个并联的递归系统卷积编码器组成。每个编码器输入位产生 3 个输出位。第 1 个 RSC 编码器产生位  $X, Y_0$  和  $Y_1$ , 而第 2 个编码器产生位  $X', Y'_0$  和  $Y'_1$ 。

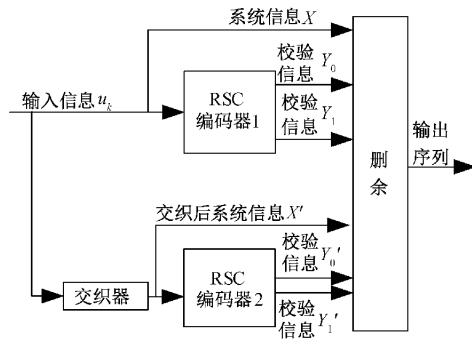


图 1 Turbo 码编码器结构

编码器的定义如图 2 所示。开关处于位置(a)时信息被输入到编码器中;在最后的 6 个时钟周期中,开关移动到位置(b)进行尾比特处理,保持 RSC 网格收敛,即 3 个寄存器清零。

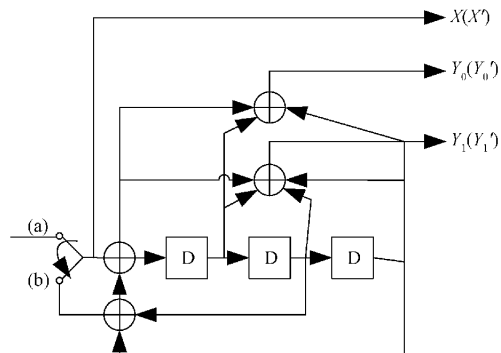


图 2 RSC 编码器结构

1.3 基于 VDE-TER 信道特征的 Turbo 删余及补零模型

Turbo 码的删余操作是指按照一定规则对编码器输出的特定比特周期性删除后进行传输,来减少信息的冗余度,提高码率,其目的是牺牲一定的可靠性来换取有效性。对于迭代译码而言,一般可以删除 RSC1 的所有偶数校验比特,删除 RSC2 所有奇数校验比特。本文仅研究的 VDE-TER 系统的 Turbo 码模型,其对应码率,数据位和尾比特删余模式如表 1、2 所示。

表 1 数据位的删余模式

码率	$(X; Y_0; Y_1; X'; Y'_0; Y'_1   X; Y_0; Y_1; X'; Y'_0; Y'_1   \dots)$
1/2	1; 1; 0; 0; 0; 0   1; 0; 0; 0; 1; 0
3/4	1; 0; 1; 0; 0; 0   1; 0; 0; 0; 0; 0   1; 0; 0; 0; 0; 0   1; 0; 0; 0; 0; 0   1; 0; 0; 0; 0; 0   1; 0; 0; 0; 0; 1

表 2 尾比特位的删余模式(最后 6 个时钟)

码率	$(X; Y_0; Y_1; X'; Y'_0; Y'_1   X; Y_0; Y_1; X'; Y'_0; Y'_1   \dots)$
1/2	1; 1; 0; 0; 0; 0   1; 1; 0; 0; 0; 0   1; 1; 0; 0; 0; 0   0; 0; 0; 1; 1; 0   0; 0; 0; 1; 1; 0   0; 0; 0; 1; 1; 0
3/4	1; 0; 1; 0; 0; 0   1; 0; 1; 0; 0; 0   1; 0; 1; 0; 0; 0   0; 0; 0; 1; 0; 1   0; 0; 0; 1; 0; 1   0; 0; 0; 1; 0; 1

在删余模式中,“0”表示符号应该被删除,“1”表示符号应该被传递。

2 基于 VDE-TER 信道模型的 Turbo 码译码原理

2.1 3 种传统译码算法

Turbo 码译码器是通过信息的迭代进行译码,VED-TER 译码器的基本结构如图 3 所示。

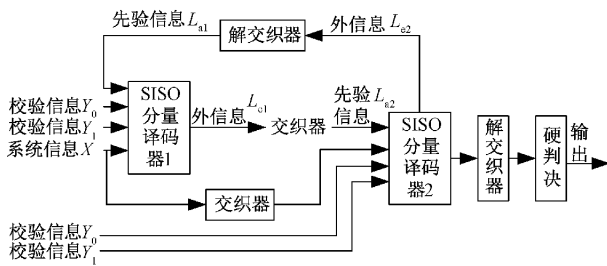


图 3 Turbo 码译码器结构

在图 3 中,SISO 分量译码器 1 和 SISO 分量译码器 2 分别对应编码器中的 RSC1 和 RSC2。基本的译码过程为:系统信息 X、校验信息 Y<sub>0</sub>、校验信息 Y<sub>1</sub> 和先验信息 L<sub>a1</sub> 进入 SISO 分量译码器 1,经过译码器的迭代译码后,产生外信息 L<sub>c1</sub>,L<sub>c1</sub> 经过交织器后作为 SISO 分量译码器 2 的先验息 L<sub>a2</sub>。L<sub>a2</sub> 和交织后的系统信息 X'、校验信息 Y'<sub>0</sub>、校验信息 Y'<sub>1</sub> 进入 SISO 分量译码器 2 进行迭代译码并产生外信息 L<sub>c2</sub>,L<sub>c2</sub> 经过解交织器后作为 SISO 分量译码器 1 的先验信息 L<sub>a1</sub>。如此循环往复,进行迭代译码。当迭代次数

完成或达到其他判决条件时,SISO 分量译码器 2 输出软信息 L(u<sub>k</sub> | Y),再对软信息 L(u<sub>k</sub> | Y) 进行硬判决就得到最终译码输出序列<sup>[12]</sup>。

常用的译码算法大致有 3 种,分别为:Map 算法、Log-Map 算法和 Max-Log-Map 算法<sup>[13]</sup>。其中,最大后验概率算法,也称 BCJR 算法是 Map 类算法的基础,它可以给出序列的估计值和每个符号译码后正确的概率。Map 算法通过前向、后向的所有序列进行遍历,从而得到每个译码符号的正确概率。

为方便描述,对本文的变量规则说明:k 表示时刻;S<sub>k</sub> 表示 k 时刻 RSC 编码器的寄存器状态;u<sub>k</sub> (0 或 1)表示编码器输入的信息位,即 X 或 X';x<sub>k</sub><sup>s</sup> = u<sub>k</sub> 对应编码器 k 时刻输出的信息位;x<sub>k</sub><sup>p</sup> 表示编码器 k 时刻输出的校验位,即 Y<sub>0</sub>、Y<sub>1</sub> 或 Y'<sub>0</sub>、Y'<sub>1</sub>;X = {x<sub>k</sub>} 表示编码器输出的符号序列;y<sub>k</sub><sup>s</sup> 和 y<sub>k</sub><sup>p</sup> 分别表示 k 时刻输入译码器的信息位和校验位;Y = {y<sub>k</sub>} 表示接收的符号序列;译码器输出的软信息 L(u<sub>k</sub> | Y),也就是最后判决输出比特为 0 或 1 的概率值,用后验对数似然比(log-likelihood ratio,LLR)表示为:

$$L(u_k | Y) = \ln \left( \frac{p(u_k = 1 | Y)}{p(u_k = 0 | Y)} \right) \quad (4)$$

L(u<sub>k</sub> | Y) 可以表示为:

$$L(u_k | Y) = L_c y_k^s + L_a(u_k) + L_e(u_k) \quad (5)$$

其中,u<sub>k</sub> 表示编码器输入的信息位,y<sub>k</sub><sup>s</sup> 和 y<sub>k</sub><sup>p</sup> 分别表示 k 时刻输入译码器的信息位和校验位;L<sub>c</sub> = 4a  $\frac{E_b}{\sigma^2}$ ,E<sub>b</sub> 为每比特的能量,σ<sup>2</sup> 为噪声方差,a 为信道的衰落幅度,L<sub>c</sub> 为信道可靠性;L<sub>a</sub>(u<sub>k</sub>) =  $\ln \left( \frac{p(u_k = 1 | Y)}{p(u_k = 0 | Y)} \right)$  为先验对数似然比,表示先验信息;L<sub>e</sub>(u<sub>k</sub>) 为外信息。因此,外信息可由式(6)计算得到,并作为下一个分量译码器的先验信息输入<sup>[11]</sup>。

$$L_c(u_k) = L(u | Y) - L_a(u_k) - L_e y_k^s \quad (6)$$

根据 Map 算法后验对数似然比表示为:

$$L(u_k | Y) = \ln \left( \frac{\sum_{(s',s) \Rightarrow u_k=1} \alpha_{k-1}(s') \gamma_k(s',s) \beta(s)}{\sum_{(s',s) \Rightarrow u_k=0} \alpha_{k-1}(s') \gamma_k(s',s) \beta(s)} \right) \quad (7)$$

其中,(s',s) ⇒ u<sub>k</sub> = 1 表示当输入 u<sub>k</sub> = 1 时,所对应的状态 S<sub>k-1</sub> = s' 到状态 S<sub>k</sub> = s 的所有分支转移,(s',s) ⇒ u<sub>k</sub> = 0 同理。

α<sub>k</sub>(s) 和 β<sub>k</sub>(s) 由递推公式可得:

$$\alpha_k(s) = \sum_{s'} \gamma_k(s',s) \alpha_{k-1}(s') \quad (8)$$

$$\beta_{k-1}(s) = \sum_s \gamma_k(s',s) \beta_k(s) \quad (9)$$

因此可得,有帧结尾时的初始条件:

$$\begin{cases} \alpha_0(s=0) = 1, & \alpha_0(s \neq 0) = 0 \\ \beta_N(s=0) = 1, & \beta_N(s \neq 0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

无帧结尾时的初始条件:

$$\begin{cases} \alpha_0(s=0) = 1, \alpha_0(s \neq 0) = 0 \\ \beta_N(s) = 1/2^v \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $2^v$  为状态总数。

分支转移概率  $\gamma_k(s', s)$  的计算式为:

$$\gamma_k(s', s) = p(y_k | x_k) p(u_k) \quad (12)$$

其中:

$$p(u_k) = \frac{\exp(u_k \cdot L_a(u_k))}{1 + \exp(L_a(u_k))} \quad (13)$$

$$p(y_k | x_k) = p(y_k^s, y_k^p | x_k^s, x_k^p) = C_1 \exp\left(\frac{x_k^s y_k^s + x_k^p y_k^p}{\sigma^2}\right) \quad (14)$$

其中,  $x_k^s = u_k$  对应编码器  $k$  时刻输出的信息位, 且  $C_1$  表达式如下

$$C_1 = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(y_k^s)^2 + (y_k^p)^2 + (x_k^s)^2 + (x_k^p)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

$\alpha_k(0)$  和  $\beta_k(0)$  递推公式计算如图 4 所示。

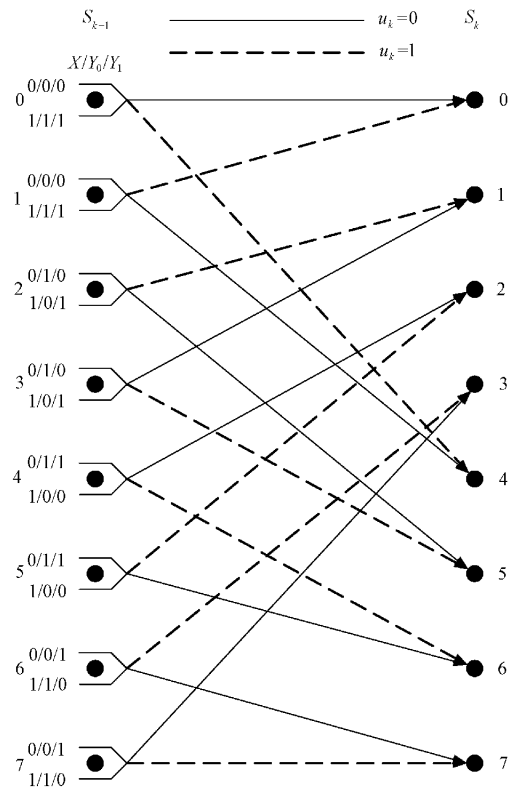


图 4  $\alpha_k(0)$  和  $\beta_k(0)$  递推计算

由此可知, Map 算法具有许多乘除法运算和指数、对数等运算, 运行时间较长, 对算力的要求较大。由此, 提出了 Log-Map 算法对其进行运算简化。

定义:

$$A_k(s) = \log(\alpha_k(s)) \quad (16)$$

$$B_k(s) = \log(\beta_k(s)) \quad (17)$$

$$\Gamma_k(s) = \log(\gamma_k(s)) \quad (18)$$

$$\max^*(s) = \ln(e^x + e^y) = \max(x, y) + \ln(1 + e^{-|x-y|}) \quad (19)$$

则有:

$$A_k(s) = \max_{s'} [A_{k-1}(s') + \Gamma_k(s', s)] \quad (20)$$

$$B_{k-1}(s) = \max_s [B_k(s) + \Gamma_k(s', s)] \quad (21)$$

$$\Gamma_k(s', s) = C_2 + \frac{1}{2} u_k L_a(u_k) + \frac{1}{2} L_c(x_k^s y_k^s + x_k^p y_k^p) \quad (22)$$

其中,  $C_2$  视为常数, 可以忽略。

$$L(u_k | Y) = \max_{(s', s) \Rightarrow u_k=1} [A_{k-1}(s') + \Gamma_k(s', s) + B_k(s)] - \max_{(s', s) \Rightarrow u_k=0} [A_{k-1}(s') + \Gamma_k(s', s) + B_k(s)] \quad (23)$$

忽略式(16)中的矫正项  $\ln(1 + e^{-|x-y|})$  则为 Max-Log-Map 算法。Max-Log-Map 算法结构得到了很大简化, 减少了算力压力, 同时性能损失相对较小。

Turbo 码译码器的核心部分是实现式(17)~(20)。由式(17)前向递推公式计算出  $A_k(s)$ , 由式(18)后向递推公式计算出  $B_k(s)$ , 由式(19)计算出分支度量  $\Gamma_k(s', s)$ , 由式(20)计算出后验对数似然比  $L(u_k | Y)$ 。最后, 由式(3)计算出外信息  $L_c(u_k)$  作为下一个译码器的先验信息进行下一次的迭代运算<sup>[15]</sup>。

### 2.2 基于先验修正因子的 Max-Log-Map 改进算法

式(20)~(23)通过最大值逼近法得到了 Max-Log-Map 算法。此算法忽略了矫正项  $\ln(1 + e^{-|x-y|})$ , 因此具有较小的计算复杂度, 但译码效果变为次优。

在外信息结果输出公式乘以修正因子的方案是对 Max-Log-Map 算法的直接修正, 其独立于后验信息。因此, 它的计算复杂度几乎与 Max-Log-Map 相同。对于 Max-Log-Map 的常规修正因子方案, 其修改因子只是一个乘数  $\delta$ 。由于信道可靠性估计值的不准确, 会导致外部信息值偏高, 进而在每次迭代运算时累积误差。因此在结果输出公式加入修正因子  $\delta$  能够实现一定程度的抑制外部信息值偏大, 从而使误码率稍微降低。在最佳修正因子下(通常取 0.7), 译码性能可提高 0.2~0.4 dB。修正公式如下:

$$L_c(u_k) = \delta(L(u | Y) - L_a(u_k) - L_c y_k^s) \quad (24)$$

### 2.3 双因子修正法

导致 Max-Log-Map 算法性能不佳的失真原因主要有两个: 1) 外部信息与先验信息在交织器作用下的互相影响; 2) 信道可靠性  $L_c$  的估计值往往比实际值要高, 造成乐观估计。在这两种失真中, 译码性能受到乐观估计的影响最大。为减轻这种失真的影响, 通过加入适当的修正因子缩放先验信息  $L_a(u_k)$  进而对外信息  $L_c(u_k)$  补偿。对于式(6), 外信息  $L_c(u_k)$  的信息熵与其方差密切相关, 适当缩放先验信息  $L_a(u_k)$  有助于在迭代过程中更快收敛。受常规修正因子方案的启发, 对译码器中的先验信息  $L_{a1}$  和  $L_{a2}$  加入修正因子, 进而得到改进算法 SF-Max-Log-Map 以及式(25):

$$L_{a1\_new} = L_{a1} \times sf1 \quad (25)$$

$$L_{a2\_new} = L_{a2} \times sf2$$

对于译码器1可得结果输出公式:

$$L_e(u_k) = L(u|Y) - L_{a1\_new}(u_k) - L_c y_k^s \quad (26)$$

对于译码器2可得结果输出公式:

$$L_c(u_k) = L(u|Y) - L_{a2\_new}(u_k) - L_c y_k^s \quad (27)$$

其中,  $sf1$  和  $sf2$  称为比例因子, 默认最大值为1;  $L_{a1\_new}$  和  $L_{a2\_new}$  分别为译码器1、2内部的先验信息修正值, 参与迭代译码的计算。对于给定的SNR, 当得

到最小误码率时, 则认为相对应的校正因子为最优  $sf$  对。

### 3 性能分析

除非有特殊说明, 本文的改进算法仿真结果仅适用于VDES平台系统。本次仿真, 采用协议ITU-R M. 2092-0. 2020对各个参数进行设置, 参照表3。

表3 VDE-TER信道配置ID表

配置ID	11	12	13	14	15	16	17	18	19
信道带宽		25			50			100	
符号速率		19.2			38.4			76.8	
数据长度	432	972	1 296	896	2 016	2 688	1 792	4 032	5 376
编码速率	1/2	3/4	3/4	1/2	3/4	3/4	1/2	3/4	3/4

其中, 链路  $LCID \in \{11, 14, 17\}$  的调制方式为  $\pi/4$  QPSK, 链路  $LCID \in \{12, 15, 18\}$  的调制方式为 8 PSK, 链路  $LCID \in \{13, 16, 19\}$  的调制方式为 16 QAM。采用AWGN信道传输信息, 且误码率结果均是超过100个数据包的仿真所得。对于译码器, 最大迭代次数为7, 且假设信噪比匹配。本文将从译码性能和计算复杂度两个方面对仿真结果进行比较。

由表3可知, VDES系统的链路配置  $LCID \in [11, 19]$ , 各个链路配置参数的主要区别为码率与调制方式不同。对于Turbo译码而言, 进入译码器的系统信息  $X$ 、校验信息  $Y$  (或  $Y'$ ) 以及外信息  $L_e$  都是软信息, 而软信息为正数代表原位为1, 负数代表原位为0, 绝对值大小代表置信度(即该位为1或0的可能性, 绝对值越大置信度越高), 因此经过软解调后所得的信息特征与调制方式并无太大关联。VDES系统有1/2和3/4两种码率可供选择。根据表1、2对于不同的码率有着不同的删余规则, 且补0后进入译码器的数据排列特征也不一样, 外信息  $L_e(u_k)$  的方差也有很大不同, 所以不同链路ID的不同码率是修正因子适应的重点。本文选取链路  $LCID \in \{17, 18, 19\}$  为仿真案例, 仿真其在不同修正因子和不同信噪比下的性能特性并作出分析。

当修正因子  $sf1 = 1$  和  $sf2 = 1$  时, 误码率性能是次优的, 因此可以采用遍历法找到实现最佳误码率的修正因子。第1种情况,  $sf2 = 1$  且  $sf1 \in (0, 1]$ ; 第2种情况,  $sf1 = 1$  且  $sf2 \in (0, 1]$ , 结果如图5和9所示。第3种情况,  $sf1$  设置为最佳值, 且  $sf2 \in (0, 1]$ ; 第4种情况,  $sf2$  设置为最佳值, 且  $sf1 \in (0, 1]$ 。以图5~7一组为例, 3个仿真图展示了链路17最佳双修正因子的选择过程。如图5所示, 当一个修正因子确定时, 另一个修正因子的最佳值即可最低误码率位置的对应值; 选取  $sf2 = 1$  且  $sf1 \in (0, 1]$  和  $sf1 = 1$  且  $sf2 \in (0, 1]$  两种情况, 可得当  $sf2 = 1$  时,  $sf1 = 0.8$  最优, 当  $sf1 = 1$  时,  $sf2 = 0.8$  最优。因此, 如图6所示, 设定  $sf2 = 0.8$  且  $sf1 \in (0, 1]$  和

$sf1 = 0.8$  且  $sf2 \in (0, 1]$  两种情况, 可进一步确定另一个修正因子的最佳值, 进而得到结果如图7所示。由图7可知, 对于双因子修正算法, 当  $sf1 = 1, sf2 = 0.8$  时译码算法的性能最好。通过上述方式, 可仿真出图8~11, 得到链路18和链路19的最佳修正因子值, 如式(28)~(30)所示。

$$\{sf1 = 1, sf2 = 0.8\}_{LCID=17} \quad (28)$$

$$\{sf1 = 0.6, sf2 = 0.75\}_{LCID=18} \quad (29)$$

$$\{sf1 = 0.7, sf2 = 0.4\}_{LCID=19} \quad (30)$$

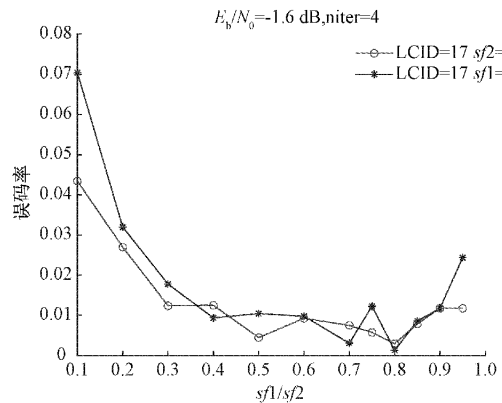


图5 比例因子对译码性能的影响

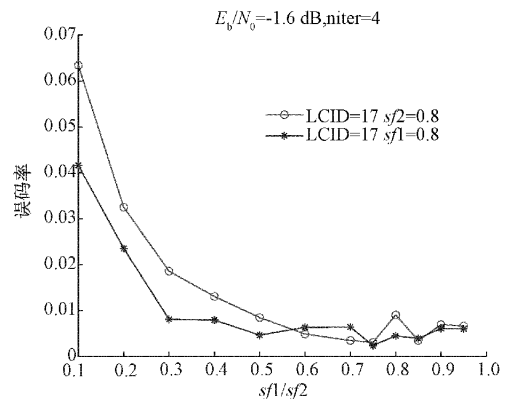


图6 比例因子对译码性能的影响



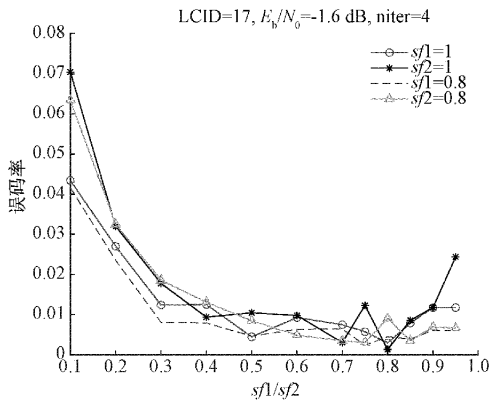


图 7 比例因子对译码性能的影响

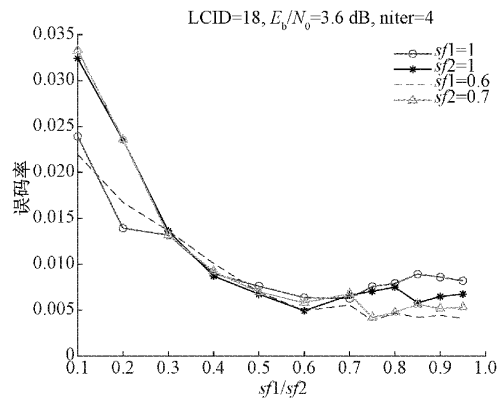


图 10 比例因子对译码性能的影响

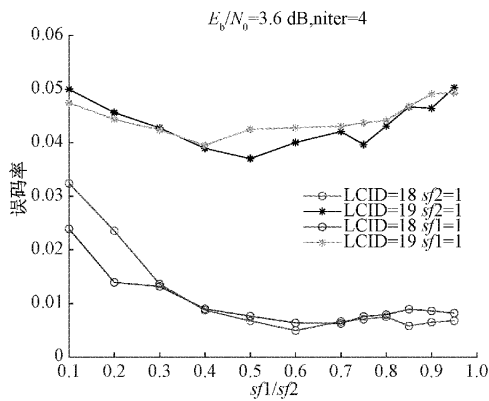


图 8 比例因子对译码性能的影响

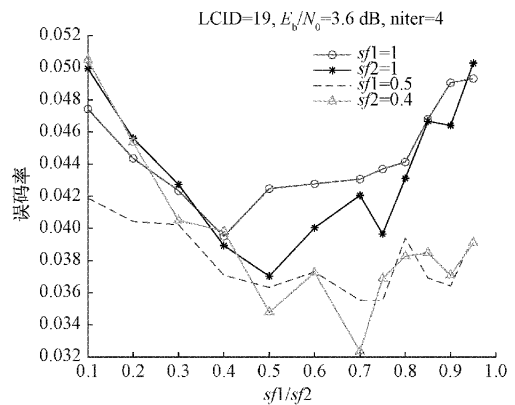


图 11 比例因子对译码性能的影响

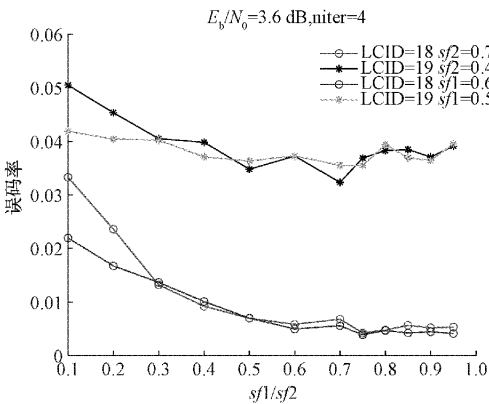


图 9 比例因子对译码性能的影响

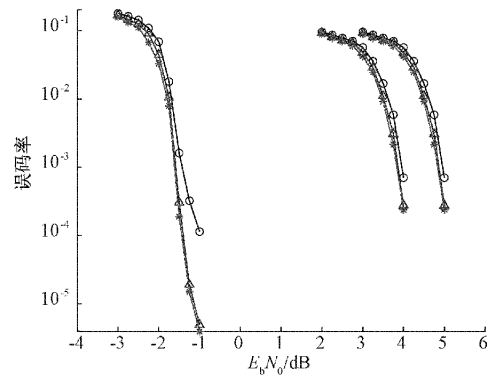


图 12 3 种译码算法的译码性能比较

将传统 Max-Log-Map 算法、单因子修正算法、双因子修正算法 SF-Max-Log-Map 进行仿真并比较可得图 12。在图 12 中,3 组曲线簇按从左到右的顺序,分别为链路 17、链路 18 和链路 19 在 3 种 Turbo 译码算法下的误码率曲线图。其中,曲线“—○—”代表传统译码算法 Max-Log-Map,曲线“—△—”代表常规单因子修正算法,曲线“—\*—”代表双因子修正算法 SF-Max-Log-Map。(即性能较差的为 Max-Log-Map 算法,性能居中的为单因子修正算法、性能最好的为

双因子修正算法 SF-Max-Log-Map)由图 12 可知,对于链路配置的逻辑信道下,单因子修正法相对于传统算法译码性能提高了 0.2~0.4 dB,而双因子修正算法相对于单因子算法译码性能提高了 0.4~0.6 dB 左右。综上所述,双因子修正算法 SF-Max-Log-Map 在特定修正因子下可以有效提高 VDES 系统不同链路配置下的译码性能,进而提高传输效率。综上所述,可仿真出每个链路信道的最佳修正因子,如表 4 所示。

表4 VDE-TER信道最佳修正因子表

配置ID	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<i>sf1</i>	0.70	0.70	0.60	0.75	0.55	0.60	0.80	0.60	0.40
<i>sf2</i>	0.80	0.80	0.70	0.80	0.85	0.60	0.75	0.75	0.70

## 4 结 论

VDES系统是未来海上通信的重要工具,作为AIS系统的加强版,VDES系统具有强大的数据交互能力,能够有效缓解AIS系统中数据链过载的问题。而Turbo码作为一种高效的纠错码,能够有效提升VDES系统的通信效率。其中,Max-Log-Map算法通过忽略矫正项 $\ln(1 + e^{-\lambda \gamma})$ 简化计算,具有计算开销低、译码性能损失少等特点;常规单因子修正法通过比例因子 $\delta$ 和对外部信息进行缩放,抑制了外部信息似然比估计值过于乐观的情况,从而提升了译码性能;而改进算法SF-Max-Log-Map加入了两个比例因子 $sf1$ 和 $sf2$ 分别对两个译码器的外部信息 $L_e$ 进行缩放,对外部信息 $L_e$ 的缩放调节更加细致,从而获得最佳的译码性能。

本文基于VDES系统,通过不同译码算法研究仿真分析仿真,简要阐述了不同译码算法的比例因子和信道配置对实际通信误码率的影响。缺陷在于双因子需要大量的仿真实验才能得到可靠结果,运算量较大。在未来的工作中,可以加入机器学习算法对双因子进行自适应修正,使双因子修正算法模型能够适应任意的应用环境。由于工程实现中有很多不确定因素影响系统性能,本文的理论仿真结果仅供参考。

## 参考文献

- [1] 刘媛美. VDES信道建模技术研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [2] 王硕同,王建新. 8PSK与16QAM调制信号的Turbo码译码研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(9): 29-34.
- [3] HU Q, JING X, HUANG J, et al. Performance specifications for the roll-off factor and filter order for filtered multitone modulation in the maritime VHF data exchange system [J]. Mobile Networks and Applications, 2020, 25(1): 142-150.
- [4] 罗小红. 基于反向蝶形计算的低存储容量Turbo码译码器设计及FPGA实现[D]. 重庆:西南大学, 2020.
- [5] SUN L, WANG H. Improved Max-Log-MAP turbo decoding by extrinsic information scaling and combining [C]. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems.

Springer, Singapore, 2018: 336-344.

- [6] LI J, WANG X, HE J, et al. Turbo decoder design based on an LUT-normalized Log-MAP algorithm[J]. Entropy, 2019, 21(8): 814.
- [7] LE V H S, NOUR C A, DOUILLARD C, et al. A low-complexity dual trellis decoding algorithm for high-rate convolutional codes [C]. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE, 2020: 1-7.
- [8] WANG H, LI M, WANG C. A universal low-complexity demapping algorithm for non-uniform constellations[J]. Applied Sciences, 2020, 10(23): 8572.
- [9] 殷璐. 带CRC校验终止机制的Turbo码性能仿真分析[J]. 通信技术, 2017, 50(7): 1371-1374.
- [10] 徐浪,陈小莉,田茂,等. sss基于Turbo码和ODPD判决法的LoRa改进方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 142-147.
- [11] PRADEEP N S, AARTHI V, DHULIPALA V R. Upgraded Max-Log-MAP algorithm using adaptive correction factors for decoders in AWGN and fading channel [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021: 1-11.
- [12] 陈为刚,李思,赵干,等. 基于软件无线的Turbo码编解码通信系统实现[J]. 电子测量技术, 2013, 36(11): 110-114.
- [13] 朱胜利. 基于FPGA的Turbo码快速实现算法[J]. 通信技术, 2021, 54(10): 2326-2333.
- [14] 付婉,杨茂辉,胡明亮,等. sssTurbo码译码算法理论推导及误码性能分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(11): 10-14.
- [15] 郭臣,付高原,杨茂辉. sss基于FPGA的Turbo码数据传输系统的实现[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 221-225.

## 作者简介

胡青(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为海上通信导航技术、船联网和e-航海战略。

E-mail: hq0518@qlmu.edu.cn

赵晨淞,硕士研究生,主要研究方向为VDES系统Turbo码编解码的改进。

E-mail: zcs450432182@163.com