

基于 RCS2 的 Turbo 并行译码算法研究

孙万海¹ 王 沛¹ 乔少波¹ 李元洁¹ 高 杨¹ 李佳立¹

SUN Wanhai WANG Pei QIAO Shaobo LI Yuanjie GAO Yang LI Jiali

摘 要

针对 DVB-RCS2 标准中的双二元 Turbo 码,传统的最大后验概率(MAP)译码算法存在运算量、存储量大和译码延时长的问题,文章基于分支度量拆分,提出一种双向并行和分段并行结合的高速并行 Turbo 译码算法。计算机仿真结果表明,在译码时延和译码性能的表现之间,该算法是良好的折中。

关键词

Turbo 码; MAP 译码算法; 译码时延; 并行译码

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.024

0 引言

第二代卫星回传信道数字视频广播标(digital video broadcasting return channel via satellite-second generation, DVB-RCS2),主要是为实现卫星链路双向通信的高效、可靠提供保障。与传统的卫星通信回传技术相比,DVB-RCS2 在传输速率、资源利用率、业务多样性等方面优势明显。对比早期回传技术固定调制、固定资源分配的特点,DVB-RCS2 能够实现资源的动态调整,同等卫星资源的条件下速率能够达到传统技术的数倍值,而且能够更好适应多场景、多复杂业务,满足对高速率的要求。DVB-RCS2 相较于 DVB-RCS2,主要是在编码技术方面得到提升。

Turbo 码^[1],又称为并行级联卷积码,在 DVB-RCS2 标准中,是用于前向纠错(FEC)的一种编码技术。最早由 C.Berrou 和 Glavieux 于 1993 年联合提出,主要是将卷积码与随机交织器结合起来,通过迭代译码算法能实现接近香农极限的性能,大大提高了数据传输的可靠性;同时,采用软输出的迭代译码,无线接近最大似然译码^[2]。通过仿真,码率为 1/2 的 Turbo 码使用随机交织器,大小为 65 535,并经过 18 次迭代,就可以在 AWGN 信道上实现接近 Shannon 限的性能。而后,学者提出的非二进制卷积码 Turbo 码,常见的是双二进制卷积码(double binary convolutional turbo code, DBCTC),与传统的卷积码不同之处在于,有较高的编码效率、较小的译码延时、更大的最小自由距离以及能够降低误码平层。

Turbo 码在 DVB - RCS2 中的作用,主要有以下几个方面的特征:

(1) 提高传输可靠性:卫星通信链路传输存在噪声、

衰落等干扰因素对信号质量的影响。通过编码增益,Turbo 码能够提高信号的抗干扰能力,使信号传输过程处于低信噪比(SNR)情况下,从而有效地降低误码率。例如,在卫星资源有限、通信链路紧张的情况下,Turbo 码可以实现可靠的信号传输,在接收端更好地恢复从发送端传输过来的原始数据,保证高质量的通信保障。

(2) 高效率纠错性能:Turbo 码采用的是 PCCC 结构,该结构是一种并联级联的卷积码。信息序列经过多个编码器进行编码,并且在编码过程中加入交织器,打乱信息序列的顺序,使编码后的码字具有更好的随机性和纠错性能。在 DVB - RCS2 的回传链路中,传输数据出现随机错误时,Turbo 码能够通过迭代译码等方式有效地纠正这些错误。

常见的 Turbo 码译码算法包括:(maximum a posteriori, MAP)、Log-MAP^[3]、MAX-Log-MAP 以及 SCALE-MAX-log-MAP 算法。其中,表现最好的译码算法为 MAP 演算法,但该算法也存在一定的问题,例如大量的乘除法、指数运算,计算复杂度成本较高;LOG-MAP 算法虽然没有 MAP 算法较高的计算复杂度,译码性能的损失也较小,但存在的主要问题是硬件不太容易实现;作为 LOG-MAP 算法的改进算法 MAX-LOG-MAP,由于没有了修正项计算,计算量大大降低,但与之相对应的是,在译码性能上也存在一定的损耗;SCALE-MAX-LOG-MAP 算法是在 MAX-LOG-MAP 算法的基础上,对 MAX-LOG-MAP 算法进一步简单的修正处理,对译码性能进行补偿,而不增加计算复杂度。

本文基于 MAX-LOG-MAP 算法,在分支度量拆分的基础上做了改进,提出了一种基于 DVB-RCS2 的计算和存储的高速并行 Turbo 译码算法,并模拟验证了所提到的算法的有效性。

传统的 Turbo 译码方案均是以收到整个码块为单元进行处理^[4],这样处理的缺点就是导致译码延时大。对时延敏感、

1. 航天恒星科技有限公司 北京 100010

[基金项目] 课题号: D010203

性能要求较高的高速系统,减小译码时延很有必要,因此提出并行 Turbo 译码算法减少计算量和所使用的存储空间,同时降低译码延时。

1 编解码原理

Turbo 码的编码主要由两个递归系统卷积码和一个交织器构成。首先,信息序列通过 RSC 编码器输出一组校验序列,然后,经过交织器信息序列打乱顺序后再进入另一个 RSC 编码器,从而输出另一组校验序列。最终,得到两组校验序列:原始数据序列和校验数列。DVB-RCS2 算法中,可以根据信道传输质量和通信系统要求动态调整编码率等参数。

Turbo 码采用迭代译码算法,收到编码指令,译码器开始进行迭代。一次迭代过程中,一个解码器通过对最优译码结果的多次迭代逐步接近,利用另一台解码器提供的外部信息来更新自身的译码结果,从而提高纠错能力。在 DVB-RCS2 的接收端,这种迭代译码过程能够有效应对卫星信道中的各种干扰,准确恢复发送的数据。

双二元 Turbo 编码器结构^[5],如图 1 所示。

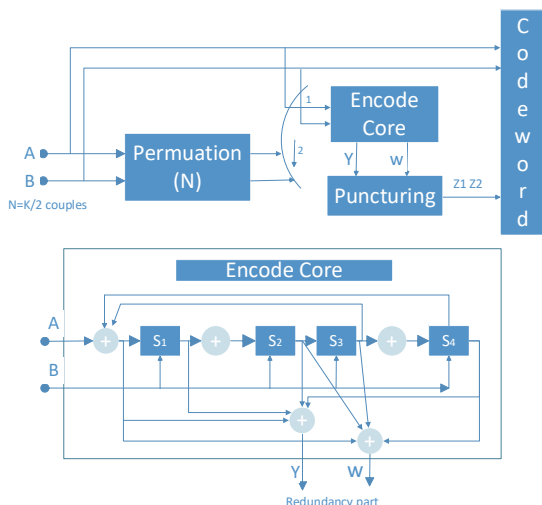


图 1 双二元 Turbo 编码器结构

图 1 中的编码过程可以看出,进入编码器的序列有两种,自然序列和交织序列,且编码时,每个序列进行一次,由开关 1、2 切换。当双路开关在“1”位置闭合时,信息序列(A,B)输入分量编码器做 C_1 编码。序列比特对(A,B)被直接输出,形成系统位,而分量编码器则输出 Y_1 和 W_1 作为校验位。当开关在“2”位置时,首先,信息序列(A,B)会经过交织处理生成交织序列,然后,再传递给分量编码器进行 C_2 编码。

Turbo 码译码器,是一种软输入、软输出的迭代译码算法。Turbo 码译码器由两部分组成:两个与分量码对应的译码单元、交织器与解交织器。将一个译码单元的软输出信息作为下一个译码单元的输入;基于此原理,该过程经过反复几次,最终能够获得最佳的译码性能。

2 改进 Turbo 译码算法

传统的 Turbo 译码时延^[6]主要分两部分:译码计算时延、译码等待时延。前者因为计算复杂度高,计算量越大,时延越大;后者串行译码器的译码,需要等到整个数据块结束后才能够进行。针对 Turbo 两大问题,主要解决方式如下:

(1) 双向并行迭代:在不增加计算量的基础上计算时延,通过分支度量拆分和双向并行的原理,采取分量译码器内部,正向递归计算和反向递归并行计算的方法,在计算量不大的情况下降低时延。

(2) 分段并行机制:等待时延问题可由串行改分段并行的方式减少等待时间,通过分量译码器内部,译码信息序列分段并行译码,从而减少译码等待时延。

2.1 双向并行译码

双向并行译码是一种改进的译码技术。和传统的单向译码不同的地方是,该译码算法是从码序列两端的两个方向并行进行译码的操作。

基于 Max-Log-MAP 算法^[7]、双二元卷积 Turbo 码^[8]的特点,前向状态度量、后向状态度量的递推是互不干扰的。前向和后向因子矩阵从相反的两个方向并行计算一半($N/2$)的前向度量和后向度量,这种前向与后向因子矩阵可以相互构造,在 Turbo 译码时不需要记录 16 个分支度量,转而储存 8 个对应时刻的分拆因子;再利用这些因素把另一半的前向度和后向度,用这些因素进行并行计算,从而得到结果。为了能够提高译码速度,可以将状态度量的正向递归和反向递归采用并行处理的办法。

图 2 为双二元 Turbo 码的双向并行译码结构,其中 $P_0 \sim P_{N/2-1}$ 和 $P_{N/2} \sim P_{N-1}$ 为信息因子, $Q_0 \sim Q_{N/2-1}$ 和 $Q_{N/2} \sim Q_{N-1}$ 为校验因子。算法以虚线箭头为计算的方向,以中间虚线为界将运算分成两个部分。

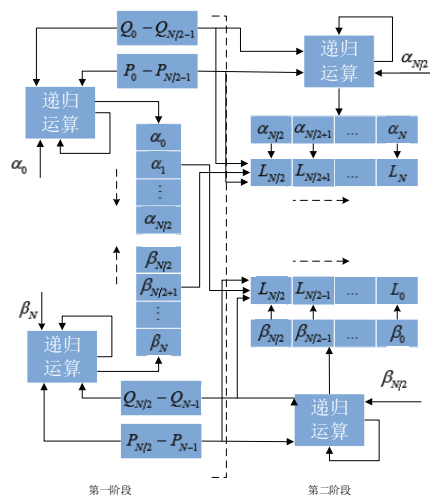


图 2 双二元 Turbo 码的双向并行译码结构

双向并行译码算法的具体操作是:

(1) 初始化

如果当前是第一次迭代, α_0 和 β_N 都是初始化等概率, 如果不是第一次, 则是初始化的边界度量, 通过相邻窗口传递。

(2) 第一个半程迭代

信息因子和校验因子的计算分为前 $N/2$ 个时刻部分和后 $N/2$ 个时刻部分。其中, 前 $N/2$ 个时刻是通过正向递归的方法得到前向递归并记录结果; 同时, 后 $N/2$ 个时刻是通过反向递归的方法得到后向递归并记录。

(3) 第二个半程迭代

①通过第一半程迭代得到的后 $N/2$ 个时刻的信息因子和校验因子, 再利用正向递归的方法, 计算得到后 $N/2$ 个时刻的前向递归和似然比信息;

②与此同时, 通过第一半程迭代得到的前 $N/2$ 个时刻的信息因子和校验因子, 再利用反向递归的方法, 计算得到前 $N/2$ 个时刻的后向递归和似然比信息。

由上可以得出, 当时钟频率为 f_c 时, 双向并行译码算法:

(1) 译码时延由 $2N/f_c$ 减少到 N/f_c , 时延减少一半。

(2) 记录状态度量和存储分支度量的存储器减少一半。

(3) 因为双向并行译码并没有改变 MAX-Log-MAP 算法的计算逻辑, 所以在译码性能方面, 与原算法并没有差别。

2.2 分段并行译码

分段并行译码是一种译码策略, 在面对长 Turbo 码序列时, 将整个码序列划分成多个较短的段, 然后对这些段同时进行译码操作。

双向并行算法相比较于传统的 Turbo 码译码算法, 优点是运算量减少、运算速度有一定的提高, 同时译码时延降低。但是, 该算法仍需要等待超过 $2I_{\max}N/f_c$ 的时延, 其中 $I_{\max}$ 为最大迭代次数, f_c 为时钟频率。如果要在等待时延上, 使其较大程度地降为 $2I_{\max}N/(f_c n)$, 则要考虑将 Turbo 码划分为 n 段并行译码。

双二元 Turbo 码译码原理是, 将长度为 n 的双二元比特数列分割成 n 段, 并且每段的译码互相没有影响, 采用并行方式进行处理。如图 3 所示, 边界前向状态度量的传递用实线箭头的方向代表, 后向状态度量的传递用虚线箭头的方向代表。首次迭代, 黑色方框部分的状态度量是由等概率状态初始化, 而后, 状态度量不断递归得到新的边界状态量, 再对码块上的边界状态量进行更新。步骤如下:

(1) 将码长 N 等分: 将码长为 N 的码字分成 n 等分, 如果不能够等分, 最后一段的长度可与前面不同。

(2) 状态度量初始化: 采用等概率初始化的方式, 对各段状态量的初始化过程进行第一次迭代。

(3) 各段独立计算似然比信息: 每个译码段按下式计算状态度量, 供以后各段独立计算似然比信息时使用。同时, 计算得到的边界状态会在这一次迭代结束后, 对下一次迭代进行初始化的前向/后向状态度量进行初始化, 这样再循环进行递归迭代更新。

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}_k(S) &= \ln \left(\sum_{S', S \in \Omega} \exp(\tilde{\alpha}_{k-1}(S') + \tilde{\gamma}_k(S', S)) \right), k=1, \dots, N \\ \tilde{\beta}_k(S') &= \ln \left(\sum_{S, S \in \Omega} \exp(\tilde{\beta}_{k+1}(S) + \tilde{\gamma}_k(S', S)) \right), k=0, 1, \dots, N-1\end{aligned}\quad (1)$$

(4) 分割的 N 段, 每个段在计算似然信息时, 通过使用上述的算法, 计算各段的前向状态度量、后向状态度量以及分支度量后, 从而结束此次迭代。

(5) 不断进行上述第 (3) 步、第 (4) 步, 达到预设的最大迭代次数则停止。

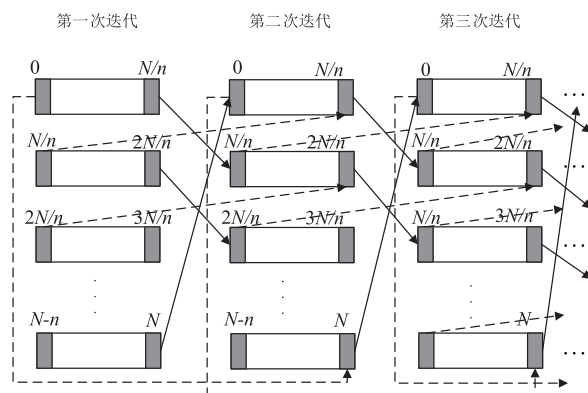


图 3 双二元 Turbo 码的分段并行译码结构

2.3 实验结果分析

图 4 是双二元 Turbo 码在平移译码时的误比特性能曲线, 分为 2 段、16 段和 80 段。

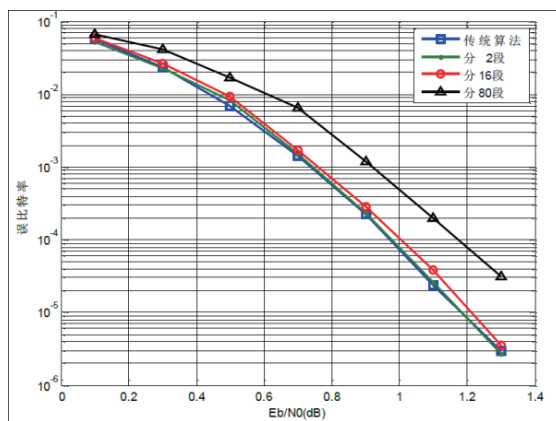


图 4 不同分段数下的误比特性能

从图中可以看出, 2 段并行码与传统译码的表现形式基本一致, 而 16 段并行码与传统译码相比, 误比特表现差 0.02 dB。假设设定迭代次数为 8 次, 就可以得到这些性能曲线, 如果增加了迭代次数, 多分段并行迭代的性能, 可以实现大幅提高。

分段式多段并行译码（假设 80 段），首次迭代时，每一个分段式都会将各端点对应的状态度量进行初始化，是以等待概率状态，接下来的迭代中，虽然会更新这些初始化的状态度量，但是如果有过多分段式，迭代次数过少，分段式并行译码性能也会因此有所损耗。所以通过恰当地提高迭代次数，能够提升多分段并行译码的表现。图 5 为 Turbo 分成 80 个分段后进行并行译码，图中 3 条曲线分别是传统 8 次迭代、分 80 段 16 次迭代和分 80 段 8 次迭代的性能曲线。

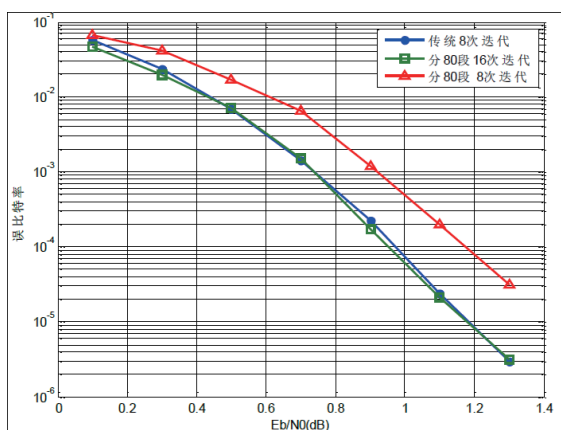


图 5 分段并行与迭代次数的关系

由图 5 可以得出，采用 16 次迭代 80 分段实验结果稍微优于 8 次迭代的传统算法，而译码时延约为 $16N/(80f_c)$ ，译码时延只有传统算法的 1/5。

3 结语

本文提出的并行算法从降低运算量和改进译码机制多个维度，最终实现保证译码性能的前提下降低 Turbo 译码时延的目的。对比总结并行算法的时延情况，其中 f_c 为时钟频率， $I_{\max}$ 为初设的迭代次数， N 为双二元比特序列长度， n 为分段并行译码的分段数。

(1) 双向并行算法在分支度量拆分的基础上，降低运算量、不损失译码性能的同时降低了译码时延。

(2) 分段并行算法在稍增加运算量、相对牺牲译码性能的基础上可大幅降低译码时延至 $2I_{\max}N/(nf_c)$ 。

(3) 改进算法通过有效的纠错减少了因错误重传而占用的额外带宽，一定程度上可以帮助优化带宽利用。在 DVB-RCS2 的卫星通信系统中，对于带宽资源紧张的应用场景，如在一些偏远地区的卫星通信网络，这种带宽效率的优化尤为重要。

(4) 改进算法提高了传输的可靠性，间接支持了更高的数据速率。在给定的信道条件和信号质量下，由于误码率降低，系统可以采用更高效的调制方式和更高的编码率来提

高数据传输速率，满足 DVB-RCS2 系统对于回传链路的数据速率要求。

参考文献：

- [1] Digital video broadcasting (DVB); second generation DVB interactive satellite system (DVB-RCS2); part 2: lowerlayers for satellite standard: DS/EN 301545-2 V1.1.1[S]. Nice, France: European Telecommunications Standards Institute, 2012.
- [2] 张昊, 陆凯, 李歆昊. Turbo 编码类型的盲识别方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 701-707.
- [3] 刘东华. Turbo 码关键技术及 Turbo 原理的应用研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [4] 卜祥元, 杨行, 邱源, 等. 一种改进的 Turbo 码译码算法及其 FPGA 实现 [J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(10): 1077-1081.
- [5] 甫榆. 高吞吐率 Turbo 译码器设计与实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [6] 陈沛, 黄焱, 张白愚, 等. 基于 nSnOEE 的低复杂度串行级联 CPM 解调算法 [J]. 信息工程大学学报, 2014, 15(6): 702-707.
- [7] 刘建军. 基于 Turbo 码的联合信源信道编译码方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [8] 马媛媛, 彭娜. Turbo 码的编译码及其性能仿真 [J]. 数学技术与应用, 2018, 36(12): 110-112.

【作者简介】

孙万海（1984—），男，山东德州人，硕士，工程师，研究方向：卫星通信系统及网络协议化。

王沛（1989—），男，陕西榆林人，硕士，工程师，研究方向：卫星通信系统及网络协议化。

乔少波（1983—），男，陕西渭南人，本科，工程师，研究方向：卫星通信系统及网络协议化。

李元洁（1988—），女，陕西西安人，硕士，工程师，研究方向：卫星通信终端及计算机技术应用。

高杨（1988—），男，河南信阳人，硕士，工程师，研究方向：卫星通信终端及计算机技术应用。

李佳立（1988—），女，河北三河人，硕士，高级工程师，研究方向：卫星通信系统及网络协议化。

（收稿日期：2024-12-08）