

高阶调制系统中 Turbo 码改进译码算法^{*})

刘文明 朱光喜 罗绮丽

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 本文对多进制调制与 Turbo 编码相结合的问题进行了研究,并结合软解调的特点,提出了一种改进的迭代译码算法。仿真结果表明该算法能得到较好的性能。

关键词 Turbo 码,高阶调制,T-TCM,PT-TCM

Improved Turbo Decoding Algorithm in High Order Modulation System

LIU Wen-Ming ZHU Guang-Xi LUO Qi-Li

(Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Relying on the characteristic of soft demodulation and the investigation of the ability of Turbo codes combined with multilevel modulations. We proposed an improved iterative decoding algorithm. Simulation results show that the method can obtain better performance.

Keywords Turbo codes, High order modulation, T-TCM, PT-TCM

1 引言

1993年,C. Berrou 等人提出了一种新型的纠错码——Turbo 码^[1],它采用并行级联的方法实现编码,软输入软输出(Soft input Soft output)的迭代译码方法进行译码,可以得到接近 Shannon 限的性能,得到了广泛的关注与研究。

Turbo 码是一种并行级联卷积码,其优异的性能来自于以下几个方面^[2,3]:1.成员编码器采用迭代系统卷积码;2.交织器的引入,改善了编码器的距离谱特性;3.软输入软输出的迭代译码方式。

为了提高频带利用率,在 Turbo 码的应用中,提出了 Turbo 码与高阶调制相结合的使用方法。Turbo 码与高阶调制的结合方式主要有以下二种:1.联合编码调制设计。采用与 TCM 近似的思路^[4~6],通过星座扩展与子集划分,再加上特殊的编码设计,达到很好的性能。2.编码与调制分开设计^[7,8],采用二进制编码直接加上多进制调制,也能达到很好的性能,仿照文^[8]中的说法,称为 PT-TCM(Pragmatic turbo trellis coded modulation)。

传统的观点认为联合设计的性能优于分别独立设计的性

能,但通过对 Turbo 码与多进制调制相结合的文^[5~7]的比较可以发现,两者的实际性能相差不大。T-TCM 中,信息比特和校验比特组合后映射为信道符号,信道检测器一般不对这些调制比特进行分离,否则信息损失非常严重。由于无法单独计算信息比特的似然值,而将整个传输符号的似然值一同传递给 Turbo 译码器,针对符号进行译码,因此其译码器的设计比较复杂。而简单级联系统的编译码设计比较简单、速率灵活,能适应多种传输速率的要求,并且其性能与联合设计的性能相差不大。针对这种特点,本文设计了一种 Turbo 码与高阶调制相结合的通信系统,并根据外信息的特性,提出了一种高阶解调与译码相结合的自适应算法,仿真表明该方法可以得到较好的性能。

2 系统结构和工作原理

本文采用的 Turbo 编码与多进制调制相结合的模式如图 1 所示。信息比特经 Turbo 编码后,进行符号映射,进入高斯信道(AWGN),接收端对接收的符号进行软解调,软解调信息进入 Turbo 译码器进行迭代译码,通过硬判决得到比特信息值。

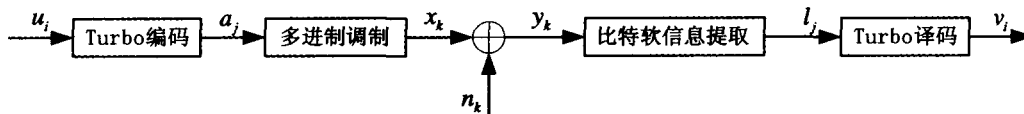


图 1 Turbo 编码与多进制调制级联的原理框图

2.1 Turbo 编码器结构

图 1 中 Turbo 编码器为速率可变的编码器, Turbo 码采用相同的成员编码器,传输函数为:

$$G(D) = \left[1, \frac{1+D+D^3}{1+D^2+D^3} \right],$$

其 8 进制表示为(13, 15),如图 2 所示。为了调整编码效率,编码产生的信息比特与校验比特经过删除器,有选择地删除

一些校验比特。两个编码器都采用尾比特进行状态归零。Turbo 码中交织器为 CDMA2000 中的交织器。

2.2 多进制调制与解调

多进制调制采用 QPSK、16QAM、64QAM 等正方形的 M-QAM 调制方式。M=2^m, m=2ρ, ρ 是整数,即 m 为偶数。

设任意的 M 进制星座图 C={c₁, c₂, ..., c_m} ,调制器把二进制向量 a={a₁ a₂ ... a_m} 映射为星座点 x∈C,采用 Gray 映射

^{*})基金项目:国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统基础理论与技术研究”(No. 60496315);国家高技术研究发展计划(863 计划)(No. 2003AA12331005)。

方式,有:

$$I(v, x) = \begin{cases} 1, & a_v = 1 \\ 0, & a_v = 0 \end{cases} \quad (1)$$

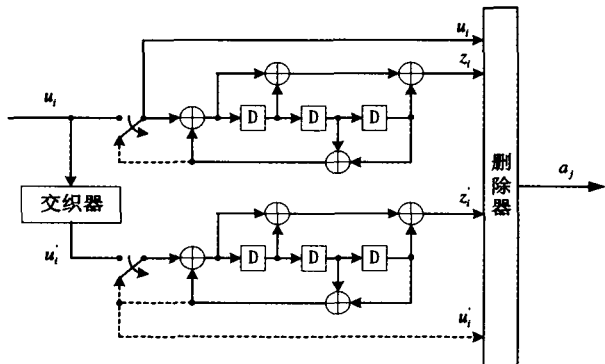


图2 Turbo码编码器原理框图

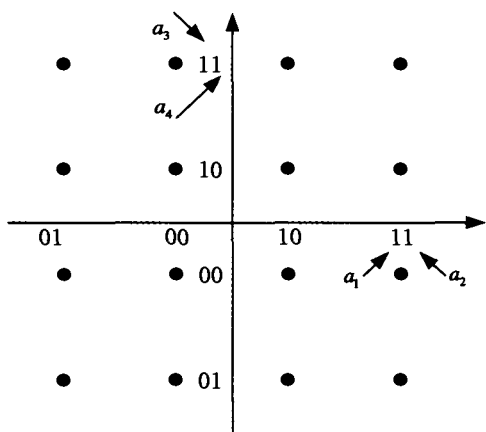


图3 Gray编码的16QAM调制方式

星座图中对应 $a_v=1$ 的点的集合为 $C_1(v)$, 即 $C_1(v) = \{x : x \in C, I(v, x) = 1\}$, 对应 $a_v=0$ 的点的集合为 $C_0(v)$, 即 $C_0(v) = \{x : x \in C, I(v, x) = 0\}$ 。图3为采用Gray编码方式的16QAM的星座图。 $C_0(v)$ 和 $C_1(v)$ 各包含8个元素。

符号 $x = x_I + jx_Q$ 在信道中通过 I、Q 两路进行传输, 经过高斯白噪声信道后得到

$$y = y_I + jy_Q = x + n \quad (2)$$

其中, n 为复数值的零均值高斯噪声, n 的实部、虚部独立, 方

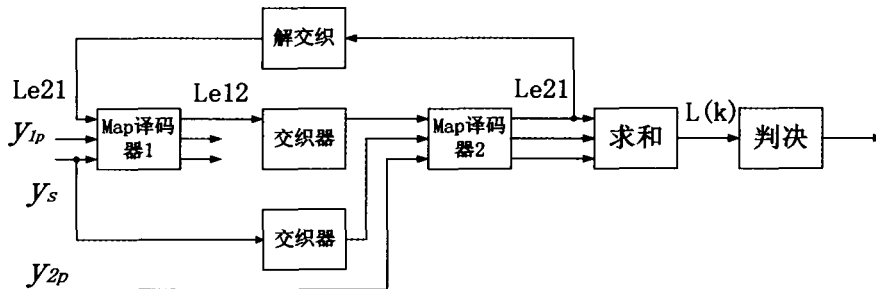


图4 Turbo码的迭代译码原理框图

对于每个子译码器其表达式为:

$$L(k) = L_c(y_s) + L(u) + L_e(\hat{u}) \quad (9)$$

式(9)表明, 系统译码器的输出对数似然比(LLR)由三个LLR元素组成, 即信道度量、先验信息、以及从成员译码器得

差均为 $\frac{\sigma^2}{2}$ 。也即 n 的方差是 σ^2 , 信噪比为 $\delta = \frac{E|x|^2}{\sigma^2}$, E 为期望值计算。在最佳接收条件下, 有 $\frac{E_s}{N_0} = \frac{E|x|^2}{\sigma^2} = \delta$, 其中 N_0 为信道白高斯噪声的单边功率谱密度, E_s 为发送端符号的平均信号能量。

假设符号 x 对应的比特为 $a = \{a_1 a_2 \dots a_m\}$, 则经过信道解调器后, 输出每个比特的对数似然比, 即软信息 $L = \{l_1 l_2 \dots l_m\}$, 其中 l_v 是比特 a_v 在接收到 y 后的对数后验概率比,

$$l_v = \log \frac{p(a_v=1/y)}{p(a_v=0/y)} \quad 1 \leq v \leq m \quad (3)$$

通常假设星座图中各点出现的概率是相等的, 于是

$$l_v = \log \frac{p(a_v=1/y)}{p(a_v=0/y)} = \ln \frac{\sum_{x \in C_1(v)} p\{x/y\}}{\sum_{x \in C_0(v)} p\{x/y\}} = \ln \frac{\sum_{x \in C_1(v)} p\{x/y\}}{\sum_{x \in C_0(v)} p\{x/y\}} \quad (4)$$

因 $y = y_I + jy_Q$, n 的实部虚部相互独立, $p(y/x)$ 正比于:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(y_I - x_I)^2}{\sigma^2}} \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(y_Q - x_Q)^2}{\sigma^2}} = \frac{1}{\pi\sigma^2} e^{-\frac{|y-x|^2}{\sigma^2}} \quad (5)$$

$$l_v = \log \frac{p(a_v=1/y)}{p(a_v=0/y)} = \frac{\sum_{x \in C_1(v)} \frac{1}{\pi\sigma^2} e^{-\frac{|y-x|^2}{\sigma^2}}}{\sum_{x \in C_0(v)} \frac{1}{\pi\sigma^2} e^{-\frac{|y-x|^2}{\sigma^2}}} \quad (6)$$

(6)式的计算量较大, 我们采用其简化算法^[7],

$$\begin{aligned} l(1) &= |x_I| - 2^{\rho-1} \\ l(i) &= |l(i-1)| - 2^{\rho-i}, i=2, \dots, \rho-1 \\ l(p) &= x_I \end{aligned} \quad (7-a)$$

以及

$$\begin{aligned} l(\rho+1) &= |x_Q| - 2^{\rho-1} \\ l(\rho+i) &= |l(i-1+p)| - 2^{\rho-i}, i=2, \dots, \rho-1 \\ l(2\rho) &= x_Q \end{aligned} \quad (7-b)$$

显然, 上式对应于图3所示的映射方式的软解调方式。假设 E_b 为每个信息比特的能量, N_0 为信道白高斯噪声的单边功率谱密度, 则

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{(M-1)}{3 \log_2 M} \frac{1}{\sigma^2/2} \quad (8)$$

2.3 改进的 Turbo 译码算法

Turbo 译码采用软输入软输出(SISO)的迭代译码方式, 其迭代译码流程图如图4所示。

到的非本征 LLR。对应于每个译码器, 可以用下式表示。

$$L(k) = L_c^* y_s(k) + Le21(u(k)) + Le12(u(k)) \quad (10)$$

对于译码器1, $Le21(u(k))$ 为外信息, 即译码器2传递过

(下转第88页)

根据对象访问的特性,提出了统一对象存储访问模型(如图3所示)。在SSBDO中,统一对象访问模型为三层,上层为Upper_Object_Template,依据存储设备对象接口、状态以及属性,以提供满足存储需求的存储设备对象,它由MDS负责接收请求,并把其转化为对象请求接口,然后交给存储对象中间层来处理。对象中间层Mid_Object_Template由Client负责,填充对象方法的描述,并将其转化为具体实施对象,中层是统一对象访问模型的核心,关系到如何将具体实施上层的对象请求与实现。对象下层Lower_Object_Template则是接收来自中间层的对象具体服务,根据不同的服务方法,由SDO完成相应的功能,它不仅需定义内部接口和服务,还为对象分配存储空间。

由上述可知,不论是SCSI协议、RAID协议,还是SCSI OSD-2草案协议,都可采用统一对象访问模型,它们均保留了对象模型中的上层和下层,仅仅修改具体实施方法。这样,不论OSD为何种类型的设备,基于对象存储系统中统一的存储对象模型。

结束语 本文通过分析三种网络存储系统的访问模式,

在基于对象存储的基础上提出了统一对象存储访问模型,它给出了网络存储系统中一般性接口的定义。不论随机存储还是顺序存储,不论是硬盘还是阵列,不论是NAS还是OBS,对每一种存储设备对象都有其相对应的接口,使其更具有普适性。

参考文献

- 1 Mesnier M, Ganger G R, Riedel E. Object-based storage. Communications Magazine, IEEE, Aug. 2003, 41(8): 84~90
- 2 Intel Corporation. Object-Based Storage: The Next Wave of Storage Technology and Devices. January 2004, accessible from <http://www.intel.com/labs/storage/osd>
- 3 Panasas white paper, Object Storage Architecture: Defining a new generation of storage systems built on distributed, intelligent storage devices. <http://www.panasas.com>, Sep. 2003
- 4 Feng Dan, Qin Ling-jun, Zeng Ling-Fang, Liu Qun. A Scalable Object-based Intelligent Storage Device [C]. In: Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 26-29 August 2004. 387~391
- 5 T10/1731-D Revision 0. SCSI Object-Based Storage Device Commands -2(OSD-2). <http://www.t10.org>, October 2004
- 6 Azagury A, Dreizin V, Factor M, et al. Towards an Object Store. In: Proceedings of the 20th IEEE/11th NASA Goddard Conference on Mass Storage Systems and Technologies(MSS'03), 2003

(上接第81页)

来的关于信息比特 $u(k)$ 的对数似然值。同样,对于译码器2, $Le_{12}(u(k))$ 为外信息,即译码器1传递过来的关于信息比特 $u(k)$ 的对数似然值, Turbo译码就是通过两个译码器之间相互交换外信息,迭代译码。

在以往的迭代译码过程中,由于仅接收到受干扰的信息,得不到信息的似然值,一般,我们认为信息比特取0与1的概率相等,则 $Le_{21}(u(k))=0$ 。即第一次迭代译码的外信息我们设置为0。而通过软解调,我们得到传输比特的软信息,即传输信息的对数似然比,在第一次迭代译码时,可以将其视为MAP译码器1的先验信息。即

$$Le_{21}(u(k))=l(u(k)) \quad (11)$$

3 性能仿真

我们采用如图1所示的仿真原理框图,对高阶调制的Turbo译码进行了性能仿真,采用加性高斯白噪声信道。Turbo码的成员编码器采用3个寄存器的(13,15)RSC编码器,编码长度为 $N=417$,编码效率为 $R=1/3$ 。采用16QAM的调制方式,解调采用式(7)所示的简化软解调算法, Turbo译码采用MAP译码方式,迭代次数为4次。其性能仿真曲线如图5所示。

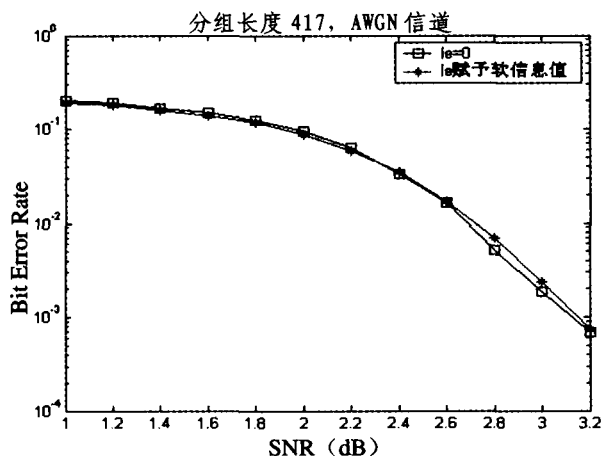


图5 分组长度 $N=417$, $R=1/3$,16QAM调制方式的性能曲线图

结论 可以看到,在低信噪比的时候,采用(11)式对译码器1赋值,可以提高译码器的性能,而在信道环境较好时,未预先赋值的译码性能比较好,通过比较可以看到:在低信噪比时,将软解调信息作为先验信息参于迭代译码能带来0.1dB的增益,而在高信噪比时,不采用软解调信息比采用解调信息有0.1dB的增益。在低信噪比时,由于信道对信息的影响较大,信息的失真较大,采用解调的信息作为先验信息对传输信息进行了有益的补充,可以提高系统的性能,而在信道环境较好时,传输信息受到的干扰很小,采用软解调信息作为先验信息会干扰译码器的译码。因此,在系统中,我们可以采用一种自适应的调制与译码方式,在信噪比较低时,采用软解调信息补偿的迭代译码方法,而在高信噪比时,不进行信息的补偿。采用这种自适应的方法能够提高高阶调制的Turbo码的译码性能。

参考文献

- 1 Berrou C, Thitimajshima P. Near Shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo codes [A]. In: Proc. ICC'93 [C]. Geneva, Switzerland: ICC, 1993. 1064~1070
- 2 Benedetto S, Montorsi G. Unveiling, Turbo codes: Some results on parallel concatenated coding schemes. IEEE Trans. Information Theory, Sept. 1995
- 3 Benedetto S, Montorsi G. Design of Parallel concatenated convolutional codes. IEEE Trans. Commun., 1996, 44: 591~600
- 4 Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signals [J]. IEEE Trans Inform Theory. 1982, T-28: 55~67
- 5 Robertson P, Woz T. A novel bandwidth efficient coding scheme employing Turbo codes [A]. In: Proc. ICC'96 [C]. 1996. 962~967
- 6 Robertson P, Woz T. Bandwidth-efficient turbo trellis-coded modulation using punctured component codes. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1998, 16(2): 206~218
- 7 Goff S L, Glavieux A, Berrou C. Turbo-codes and high spectral efficiency modulation [A]. In: Proc. ICC'94 [C]. 1994. 645~649
- 8 Viterbi A J, Jack K, Wolf, et al. A pragmatic approach to trellis-coded modulation [J]. IEEE Communication Magazine, 1989, 27(7): 11~19