

水下数据传输 Turbo 码译码系统的实现

高春仙, 刘 慧

(厦门大学 通信工程系, 教育部水声通信与海洋信息技术重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了在恶劣的水声信道中确保数据的可靠传输, 采用性能优异的 Turbo 码, 以 6711DSP 为核心处理单元构建译码系统。系统采用戈泽尔算法进行跳频的软解调, 迭代的软输出维特比译码算法(SOVA)进行译码。系统经过实验室水池的试验, 证实能保证译码的实时性及其在恶劣信道中数据传输的正确性, 具有相当优异的性能。

关键词: Turbo 码; 迭代译码; 频谱分析; 水声信道

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)10-0055-06

水声信道是一个空间与频率响应随机快速变化的传输信道, 存在窄带、高噪及强多途干扰, 是除深空通信外最复杂的信道^[1]。在这样恶劣的信道中确保数据的可靠传输, 信道纠错是其中的关键技术之一。

1993 年提出的 Turbo 码, 巧妙地将卷积码和交织器结合在一起, 实现了随机编码的思想, 并采用迭代译码来逼近最大似然译码; 在低信噪比处, 获得了相当优异的性能, 极大程度地逼近 Shannon 极限。性能优异的 Turbo 码可有效地保障恶劣信道下数据的可靠传输, 基于 Turbo 码的水声数据传输模式引起人们广泛的兴趣。

基于 Turbo 码的通信系统, 译码端码元序列软判决信息的获取方式、迭代算法的选取, 在很大程度上决定了通信的实时性与误码率, 是系统设计的关键部分。本文介绍与实现了一种应用于水声跳频通信的 Turbo 码译码系统, 系统采用 TI 公司的 TMS320C6711DSP 作为核心算法处理芯片, 89C51 单片机作为控制单元; 以戈泽尔(Goertzel)算法来实现译码系统跳频的软解调并获得接收码元序列的软判决信息; 软输出维特比译码算法(SOVA)作为 Turbo 码的迭代译码的核心算法。译码系统在实验水池进行了实际测试, 证实系统能满足数据实时通信的要求并极大程度上降低了误码率, 具有相当优异的性能。

1 译码系统的构建

本文 Turbo 码编码结构采用两个分量并行的编码结构。分量编码器采用递归系统卷积码, 生成多项式为 $[1g_1/g_2]$ $g_1 = 561$, $g_2 = 753$ 。不进行删余处理,

即码率 $R = 1/3$ 。交织器采用 192 比特伪随机交织方式, 具体映射关系参见文献[2]。数据帧为 24 个字节, 其中 23 个字节为有效数据, 剩余的 8 个比特作为卷积码寄存器的归零比特。系统调制方式采用 16 个频点的快速跳频调制, 占用的频率带宽为 12 kHz 到 18 kHz, 每个码元调制 5 ms 的时间。以三重时频联合分集作为数据的帧同步信号。

译码系统组成如图 1 所示。发射端发射出来的信号, 经过水声信道传输后到达接收端换能器。换能器感应出来的微弱电信号经过放大滤波电路后分别进入同步电路与 A/D 转换器。同步电路在单片机的控制下对数据帧同步信号进行检测和时间相关处理。在捕获到同步信号后, 单片机启动 A/D(Max150)转换器对接收信号进行数据采集, 每一码元采样 1 ms, 数据暂存在外部扩展存储空间(62256)中。当完成一个码元采集, 单片机通过 DSP 的外部中断 INT4 向 DSP 申请中断。DSP 响应中断后, 通过外部存储接口(EMIF)将数据读入内部存储空间。DSP 对每个码元数据进行戈泽尔频谱分析、计算与记录该码元的软判决信息。在接收完整的一帧数据后, 在 DSP 中进行 SOVA 迭代译码、信息判决及数据重构。最后通过串行接口将数据送到 PC 机进行显示与存储。

收稿日期: 2007-04-16; 修回日期: 2007-07-31

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0410003)

作者简介: 高春仙(1978), 男, 福建屏南人, 博士, 主要从事水下通信样机的研制工作, 电话: 0592-2580107, E-mail: chunxiangao@126.com

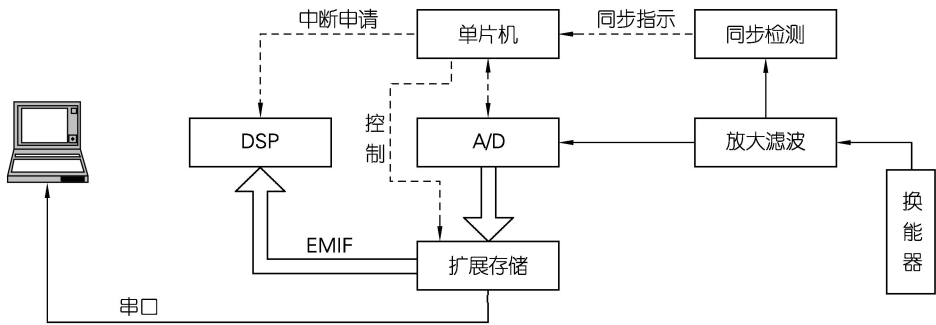


图1 译码系统组成框图

Fig. 1 Diagram of decoding system

2 数据帧同步检测

数据帧同步检测是水声数字通信中的关键部件。要实现收发端的正确通信,必须保证两者间正确、稳定的同步。本文通信系统中,接收端以码元宽度为间隔对每个码元进行解调,如果同步不正确,则会发生码元的丢失及误判,给数据通信带来灾难性的后果。本文采取三重时频联合分集,以三中取二来

接收端必须根据所发送时频分集信号的特点,来进行帧同步的捕捉。由于在锁定帧同步以前,接收端没有任何的时间参考基准,必须使用3个并行的通道进行同步频点的捕获,然后通过同步判决器(89C51单片机)来判断3个通道输出信号的相互关系。如果两路以上信号有效并满足时间约束关系就认为是有效帧同步信号到来,否则继续处于搜索同步状态。

图3为数据帧同步捕获的实现框图,3个窄带滤波器的中心频率分别与发送端的3个同步频点相对应。包络检测和脉冲形成电路将滤波出来的信号进行幅度判决并形成单片机的INT0中断的触发信号。单片机INT0中断程序纪录触发中断的通道号并进行时间相关性的检测,最终获得数据帧同步的指示。图4为单片机同步捕获的程序流程图。

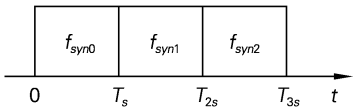


图2 帧同步时序图

Fig. 2 Diagram of frame synchronization

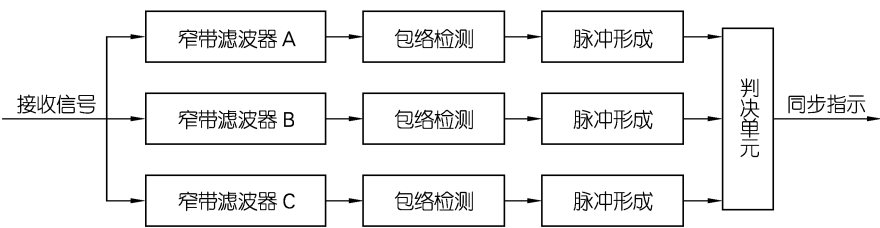


图3 数据帧同步捕获实现框图

Fig. 3 Diagram of frame synchronization acquisition

3 码元软判决信息

码元软判决信息获取方式与系统调制方式密切相关。对于跳频制式,由于数据信息是载荷在频率上的,对接收信号进行瞬时频谱分析就可以获得接收的频率信息,进而实现跳频系统的软解调。

依据系统的跳频图案,本文每一跳频时点有两个频率 f_{i1} 与 f_{i0} 分别对数据比特“1”和数据比特“0”进行频率调制。译码系统在捕获到跳频同步后,对接收码元信号进行快速数据采集并进行瞬时频谱分析,计算出该时刻约定使用的两个频点 f_{i1} 与 f_{i0} 的频谱值,并基于下式计算码元的软判决信息:

$$L_i = \left[\frac{F_{i1} - F_{i0}}{\max(F_{i1}, F_{i0})} \times 10 \right] \quad (1)$$

式中 F_{i1} 与 F_{i0} 分别为频率 f_{i1} 与 f_{i0} 相应的频谱值。

从式 1 中可以看出在未发生传输错误时, 比特“1”对应的软判决信息为正值, 而比特“0”对应的软判

决信息为负值; 系统软判决信息值落在 $(-10, 10)$ 区间, 有近 4 个比特的量化精度, 完全可以满足软译码的精度要求^[3]。

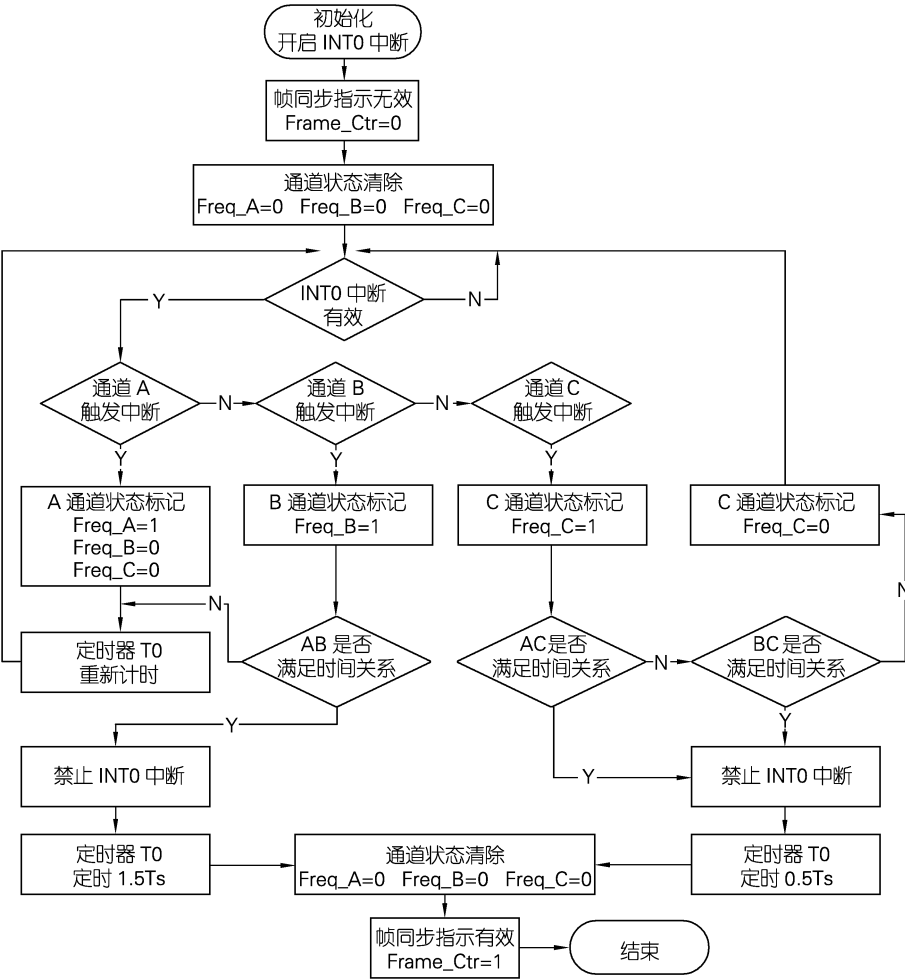


图 4 单片机同步捕获的程序流程图

Fig. 4 State flow of synchronization acquisition

瞬时频谱分析目前主要有两种实现形式: 快速傅立叶变换(FFT)与戈泽尔(Goertzel)算法。两种方法各有优缺点, 快速傅立叶变换算法必须计算信号中所有频谱值, 可一次性获得信号的完整频谱, 相应计算复杂度与内存占用较大; 戈泽尔算法可以单独地计算特定频率上的频谱值, 计算复杂度与内存占用都相对较小^[4]。由于本文系统针对每个码元只需要计算两个频点的频谱值, 因而本文瞬时频谱分析采用戈泽尔算法。

4 基于 SOVA 算法的 Turbo 码译码

4.1 Turbo 码译码原理

基于 SOVA 算法的两分量 Turbo 码迭代译码流程如图 5 所示, 它由两个软输入软输出(SISO)译码器 DEC1 和 DEC2 级联与反馈来完成迭代译码。译码器 DEC1 结合先验信息对编码支路 1 进行 SOVA 译码, 并将产生的外信息交织后送给译码器 DEC2,

作为 DEC2 的先验信息; DEC2 结合先验信息对编码支路 2 进行 SOVA 译码, 同样将产生的外信息解交织后反馈给 DEC1, 即可完成一次迭代译码。经过多

次迭代, DEC1 与 DEC2 的外信息收敛到一个稳定值, 对此信息进行判决, 即可以获得最佳估值序列, 完成 Turbo 码的迭代译码。

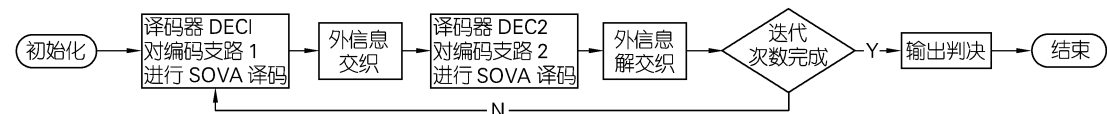


图 5 SOVA 算法的 Turbo 码迭代译码流程图

Fig. 5 State flow of Turbo iterative SOVA arithmetic decoder

译码的迭代次数影响译码运算量、延时量及纠错的性能, 合适的迭代次数可以保证译码性能并降低译码运算量、减小译码所造成的时延量。为提高系统纠错性能、确保接收的实时性, 本文参考文献[5, 6]提出的 Turbo 码译码迭代中止准则, 将译码迭代次数设定为 3 次。

4.2 SOVA 算法

Turbo 码的译码算法总体上可分为基于逐符号的 MAP 算法和基于序列的最大似然 SOVA 算法两大类。SOVA 算法是 Hagenauer 于 1989 年提出的一种基于序列的最大似然译码算法^[7]; 在 AWGN 信道中 SOVA 算法的性能与 MAP 算法相比下降

0.5 dB^[3]。然而 SOVA 算法相对简单, 运算复杂度与所需存储量都相对较低, 易于工程实现; 并可采用滑动窗法进行提早判决, 可有效降低系统译码的延时量。SOVA 算法可在减小系统的复杂度的情况下保证译码的实时性, 成为本文采用该算法的主要原因。

SOVA 算法与卷积码 Viterbi 译码是类似的, 分为 3 个步骤完成: (1) 计算各时点状态的路径度量与度量差, 保存幸存路径; (2) 获得一帧数据的幸存路径后, 以回溯操作更新幸存路径各时刻点的可靠性度量; (3) 计算与输出译码的外信息值。SOVA 算法的流程图如图 6 所示。

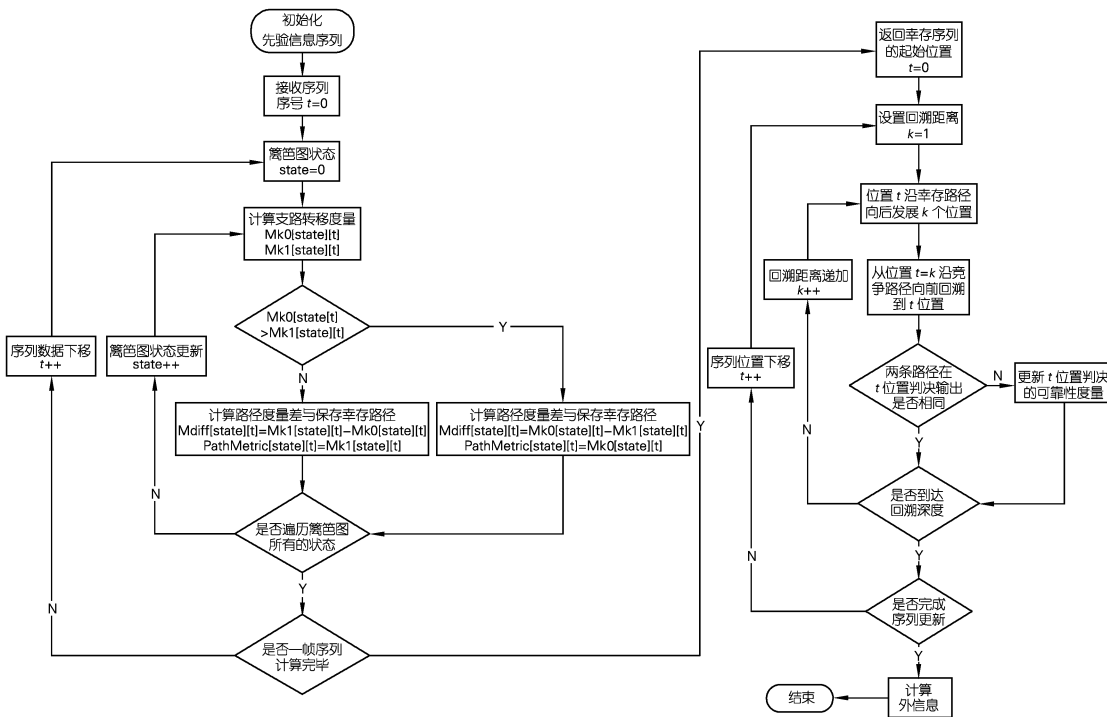


图 6 SOVA 算法程序流程图

Fig. 6 State flow of SOVA arithmetic

5 试验数据及结论

本文的系统在实验室水池(8 m × 2 m × 2 m, 非

消声水池) 中进行了多次试验, 所传的信息为文本数据信息, 系统支持整幅文档的传输。下图为系统接收的计算机界面。

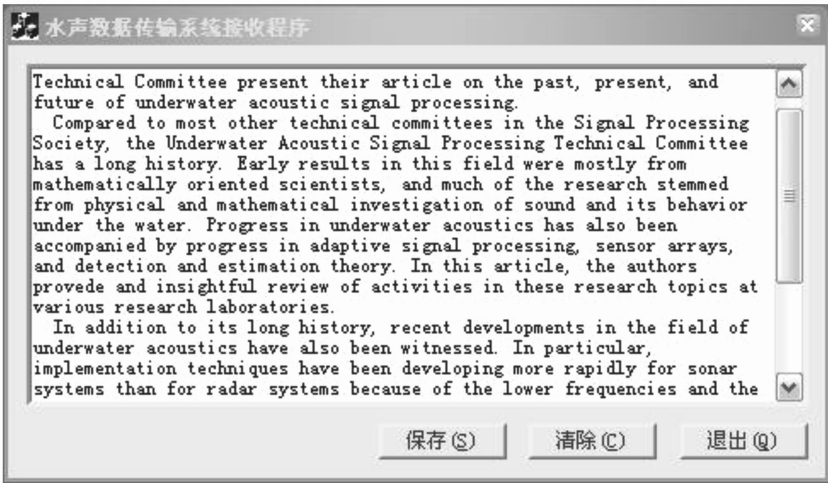


图 7 系统接收界面
Fig. 7 Data receiving interface

实验室水池试验中接收的文档与原件的比对中尚未发现错误。为了进一步评估系统的性能、验证系统方案的可行性, 本文对系统测试帧的译码过程进行了跟踪统计。系统的测试帧序列为“uwa experiment test! @# \$”。由于系统的传输误码率与发送接收换能器所处的环境有关, 本文在保持换能器水平距离(6 m) 不变的情况下, 改变收发换能器的相对深度, 对传输误码进行了统计平均, 得出系统传输误码率约为“uwa experiment test! @# \$”。表 1 为接

收的典型试验数据与相应的各次迭代译码输出(完整的数据参照文献[3])。比特序号一栏为所列出的数据在编码后所处的位置序号; 发送比特为相应的发送比特值; 软判决信息为接收端瞬时频谱分析后计算出的软判决信息; 译码前输出为未进行译码而单纯对软判决信息进行比特判决的输出; 各次迭代栏为各次迭代译码输出的软信息; 译码后输出则为三次迭代译码后比特判决的输出。

表 1 部分试验数据
Tab. 1 Experiment data

发送序号	发送数据	接收软判决信息	译码前输出	迭代译码各次判决信息输出			译码判决输出
				第一次	第二次	第三次	
2	1	- 3	0	7. 7	9. 3	9. 7	1
8	1	- 3	0	6. 7	9. 2	9. 8	1
9	1	0	无法判决	6. 7	9. 5	9. 8	1
22	1	- 3	0	7. 2	9. 0	9. 7	1
32	0	3	1	- 7. 5	- 8. 8	- 9. 5	0
52	1	1	1	8. 3	9. 0	9. 6	1
95	0	- 2	0	- 8. 1	- 8. 9	- 9. 6	0

从表中可以看出发送数据序号 2, 8, 22, 32 处, 接收的软判决信息由于信道的干扰与实际发送的数据不相符合, 如直接判决则出现误码, 译码算法经过一次迭代译码就纠正该错误, 输出正确的判决信息。序

号 9, 52, 95 处, 相应的软判信息值偏低, 直接判决的可信度不高, 造成随后译码性能的下降, 而通过迭代译码后判决信息变得明确起来, 减少了判决的模糊度。对比三次迭代的数据可以看出, 随着迭代的进

行,判决信息变的越来越明确。

从实验室水池的试验数据可以看出, Turbo 码在对抗信道干扰具有极佳的性能,可极大程度地降低传输误码带来的影响,确保水下数据的正确传输,基于 Turbo 码的水声传输系统是可行的并具有优异的性能。

本文所构建的 Turbo 码译码系统通过实验室水池实际水声信道的测试,可有效可靠地保证复杂水声环境下数据传输的要求。本文码元序列软判决信息的获取方式、所选择的译码算法是恰当的;系统的硬件框架是合理有效的;系统具有相当优异的性能。

参考文献:

[1] Vaccaro R J. The past, present, and future of underwater acoustic signal processing [J]. *IEEE Signal Pro-*

cessing Magazine, 1998, 15(4): 21-25.

- [2] 高春仙. Turbo 码在水声数据通信中的应用研究[D]. 厦门: 厦门大学通信工程系, 2004.
- [3] 王新梅. 肖国镇. 纠错码-原理与方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [4] 奥本海姆 A V, 谢弗 R W, 巴克 J R. 离散时间信号处理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [5] Shao R Y, Lin Shu, Fossorier M P C. Two simple stopping criteria for turbo decoding [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(8): 1117-1120.
- [6] 刘星成, 张光昭, 印鉴. 新的 Turbo 码迭代译码停止判据[J]. 通信学报, 2001, 22(9): 13-19.
- [7] Hagenauer J, Hoehner P. A viterbi algorithm with soft decision outputs and its applications [J]. *Global Telecommunications Conference*, 1989, 3: 1680-1686.

Design and implementation of Turbo decoding system in underwater acoustic communication

GAO Chur xian, LIU Hui

(Key Laboratory for Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, Communication Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Received: Apr. , 16, 2007

Key words: Turbo code; iterative decoding; spectral analysis; underwater acoustic(UWA)

Abstract: In this issue, an excellent performed Turbo code was introduced into underwater acoustic (UWA) channel. A Turbo decoder based on 6711DSP was constructed, employing Goertzel arithmetic to realize soft Frequency hopped demodulation, iterative soft output Viterbi arithmetic(SOVA) arithmetic as the core decoding arithmetic. The decoder system was tested under the real UWA channel.

(本文编辑: 刘珊珊)