

水声 OFDM 系统中卷积码译码设计及其 DSP 实现*

肖 静, 胡晓毅, 王德清, 郑少语

(厦门大学 水声通信与海洋技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 纠错编码是水声 OFDM 通信系统必须采用的关键技术。本文从译码性能和工程实现角度出发, 采用卷积交织、卷积编码和 Viterbi 软译码相结合的差错控制方案, 通过仿真和水池实验确定其参数, 并在 TMS320DM642 上实现。在 DSP 实现时, 卷积交织采用查表法, Viterbi 译码采用蝶形运算宏定义等处理方法, 极大地提升了运算速度, 保证了卷积码的实时性。最后通过海洋实验验证了其译码性能。

关键词: 水声通信; OFDM; 卷积码; DSP

中图分类号: TN914.3

文献标识码: B

文章编号: 0258-7998(2011)02-0036-03

Convolutional decoder design and DSP implementation of underwater acoustic OFDM system

Xiao Jing, Hu Xiaoyi, Wang Deqing, Zheng Shaoyu

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

Abstract: Error correction coding is a key technology in underwater acoustic OFDM communication system. Convolutional interleaving, convolutional coding and Viterbi soft decoding are implemented on TMS320DM642 in underwater acoustic OFDM system. Look-up table method used in convolutional interleaving and definition of butterfly macro in Viterbi decoding improve DSP computing speed and ensure real-time communication. Finally, the performance of the decoder in sea test is given.

Key words: Under water acoustil communication; OFDM; convolutional code; DSP

水声信道可用频带窄, 具有强多途、高噪声, 同时伴有明显的随机包络起伏。这些特性使水声信道具有典型的频率选择性衰落和时间选择性衰落的特点。信号经过复杂的水声信道会出现随机错误和突发错误。因此需要加入纠错编码与交织相结合的时频编码方案进行错误纠正^[1]。在水声通信中, 纠错编码是不可或缺的技术之一。

目前通常采用的编码方案有卷积码、Turbo 码和 LDPC 码等。后两者具有接近香农限的性质, 在水声 OFDM 系统中都表现出很好的纠错特性。在编码增益上, 卷积码比 Turbo 码和 LDPC 码分别低 3.8 dB 和 4 dB^[2], 但其实现简单, 实时性好。因此从水声 OFDM 系统硬件实现的角度综合考虑, 本文采用卷积码作为系统的差错控制方案。

为提高系统性能和实时性, 本文在方案中采用了卷积交织和 Viterbi 软译码等方法。经过大量仿真及水池实验, 确定了交织和编译码的最佳参数。在 TMS320DM642 上实现时, 通过采用蝶形运算等优化方法减少了译码复杂度, 提高了运算速度。最后通过海洋实验验证了其性能。

1 水声 OFDM 通信系统原理及编译码方案确定

图 1 为水声 OFDM 基带通信系统图^[3]。由于水声信道存在严重的频率选择性衰落, 采用卷积编码实现各个子载波上的纠错。为了抵抗由于时变带来的突发错误, 采用交织技术将突发错误打散为随机错误。对卷积交织后的串行数据流进行 DQPSK 映射、IFFT、插入循环前缀以及并串转换后形成 OFDM 符号, 加入同步前导符号后经水声信道发送出去。在接收端提取同步信息

* 基金项目: 国家自然科学基金资助(No.60772141)

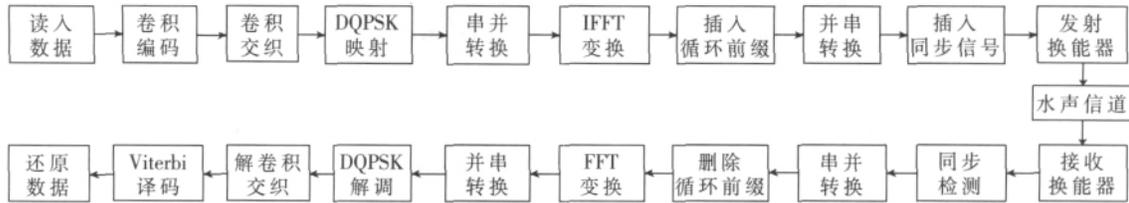


图1 水声 OFDM 系统框图

后，经过一系列与发送端相反的逆过程实现 OFDM 解调，解调后的数据流再经过解交织和 Viterbi 译码后还原数据信息。

卷积码码型的选择主要根据系统的相干带宽和相干时间来确定。为了提高水声信道的频带利用率，通常采用 1/2 码率的卷积码。约束长度的选择以不同信噪比条件下卷积码性能为参考。仿真和水池实验结果表明：信噪比较高时，约束长度越大卷积码性能越好；信噪比较低时，约束长度越小卷积码性能越好。由于水声信道的信噪比较低，本文最终确定使用生成矩阵为 [7, 5] 的 (2, 1, 3) 卷积码，从复杂度与性能上折中考虑，译码回溯深度定为 16，Viterbi 软译码量化级数定为 3bit 均匀量化。交织长度和深度的确定要综合考虑实时性和译码性能，仿真结果表明交织长度为 4 个 OFDM 符号时，最佳交织深度为 96。

该系统在 Matlab 平台上进行水池实验，实验结果如图 2 所示。实验中对采用三个不同方案的 OFDM 系统进行了性能比较，以示波器观测到的接收端信号幅度作为 SNR 大小的参照。实验中噪声幅度约为 150 mV。从图中可以明显看出 Viterbi 软译码性能最佳。

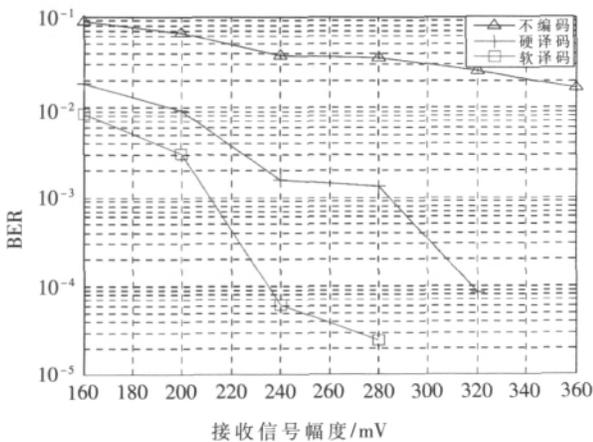


图2 水池信道中(2, 1, 3)卷积码硬软译码性能图

2 DSP 优化实现

2.1 交织的优化

硬件实现时需考虑所使用的交织器类型。常见的交织器主要有块交织器、卷积交织器和随机交织器。在相同的交织长度和交织深度下，卷积交织器与块交织相比延时小，与随机交织相比硬件复杂度低，是较实用的类型。

《电子技术应用》2011年 第37卷 第2期

根据卷积交织原理^[4]，在 DSP 上实现时，如果采用一般算法，则需要用到二维数组和多重嵌套循环，DSP 处理将耗费大量时间和存储空间。交织的实质是改变原始序列中数据的顺序，一旦交织深度和宽度确定，其数据的顺序改变规律即可相应确定。因此为了节省处理时间和片内存储空间，本文采用查表的方法实现卷积交织。

2.2 Viterbi 译码器的优化

实现 Viterbi 译码可以分为初始化、度量值更新和回溯跟踪三部分，其中最复杂的是第二部分。本文从两个方面进行了优化：一是对计算量最多的蝶形运算采用宏定义的方式，并在记录度量长度时采用双数组，能够加快译码计算速度；二是定义了一种软判决度量，减少计算复杂度。

2.2.1 蝶形运算

在 Viterbi 译码程序设计中，使用对称的蝶形运算实现。(2, 1, 3)卷积码的蝶形结构如图 3 所示。每一个蝶形包括当前状态为 $i(i=0, 1)$ 和 $i+2$ 的两个节点的加_比较_选择运算，它们的 0 和 1 分支在篱笆图的下一个节点合并。为了加快运算速度，程序设计上对蝶形运算采用宏定义的方式，定义两个蝶形运算的宏^[5]。一个设当前度量为 $old_pm[]$ ，经过分支度量计算后得到下一状态度量 $new_pm[]$ 。另一个则从下一状态 $new_pm[]$ 开始，经过分支度量计算后得到 $old_pm[]$ 。

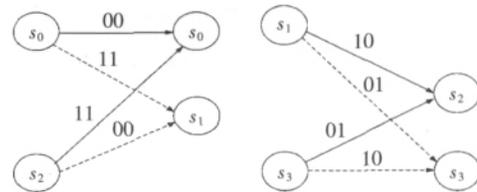


图3 (2, 1, 3)卷积码蝶形结构

通过宏定义，大量的蝶形运算在编译时间里进行展开代入表达式，这样运算速度会比子程序设计快，而且不需要大量的寄存器变量。程序中还定义了两个记录度量长度的数组，循环进行数组更新，不需要再定义中间变量或指针进行数组的更新，可以提升 DSP 运算速度。

2.2.2 软判决度量

计算接收到的比特与理论输出比特的距离度量公式为： $bm[i_0 i_1] = metric[i_0 r_0] + metric[i_1 r_1]$ 。其中 i_0, i_1 为理论输出数据， r_0, r_1 为接收到的数据， $metric[]$ 为分支度量。软判决的分支度量值为欧氏距离，即 $metric[AB] =$

$\sqrt{(A+B)^2}$, 如果直接计算, 将大大增加计算复杂度。从 DSP 实现角度考虑, 用另一个软判决量度来代替欧氏距离。此量度必须满足两个要求: (1) 其大小要体现欧氏距离的大小; (2) 计算简单, 易于 DSP 实现。可以用欧氏距离平方代替欧氏距离, 即 $metric[A B] = (A+B)^2 = A^2 + B^2 + 2AB$ 。由于 i_0, i_1 的值为 1 或 -1, 可以证明, 对于给定的 r_0, r_1 , 不同的 i_0, i_1 , 计算 $bm[i_0 i_1] = metric[i_0 r_0] + metric[i_1 r_1]$, 其分解后的平方项都是相等的, 区别仅在于 $2r_0, 2r_1$ 项前符号的正负。因此可以将软判决距离度量公式修改为 $bm[i_0 i_1] = i_0 \times r_0 + i_1 \times r_1$ 。

优化后的程序流程如图 4 所示。先对译码器的各种参数初始化, 然后读入输入字节, 每次取两位计算分支度量, 进行加_比较_选择, 从当前度量 $old_pm[]$ 计算后得到下一状态度量 $new_pm[]$, 再读取两位计算分支度量, 调用蝶形运算 2, 从 $new_pm[]$ 计算后得到 $old_pm[]$ 。循环进行上述数组更新运算, 直到所有输入字节处理结束。中间加入一些判断语句以控制程序进行回溯, 将得到的译码输出位存储到输出字节^[5]。

比较 Viterbi 译码 DSP 优化前后所需时钟周期数, 以发送 1 个 OFDM 符号为参考, 如表 1 所示。由表中数据可知, 优化后发送接收一个 OFDM 符号节省了 1 027 692 个时钟周期。TMS320DM642 主频 600 MHz, 可以计算出

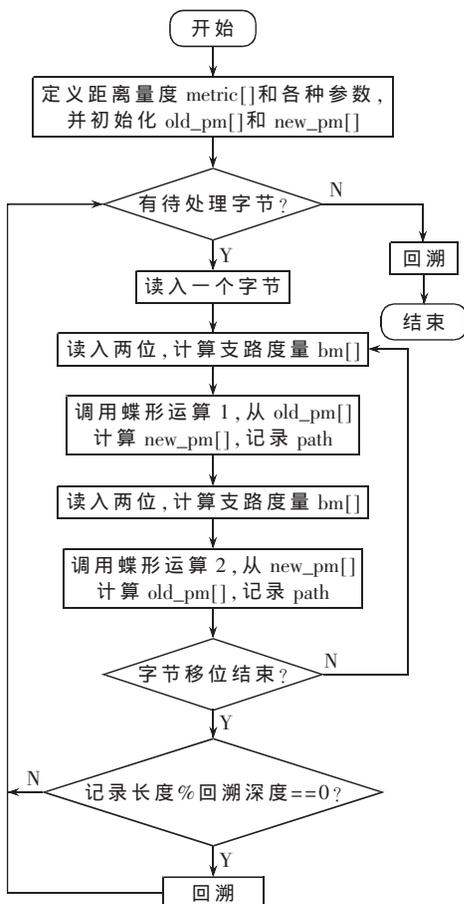


图 4 Viterbi 译码程序流程图

表 1 DSP 优化前后时钟周期数对比

优化措施	一般算法	优化算法
查表交织	695 000	35 000
蝶形运算宏定义	342 720	16 320
双数组循环更新	14 688	4 896
总计	1 052 408	24 716

所节省的时延为 1.7 ms。

3 海洋实验

该 DSP 系统在厦门五缘湾海域进行点对点通信实验, 通信距离为 800 m, 收发换能器距海面 2.5 m。海洋实验发送的总数据量为 32 640 bit, 选取了 3 组典型数据, 将 DSP 译码结果与 Matlab 译码结果进行对比, 如表 2 所示。

表 2 DSP 与 Matlab 译码误码个数对比

译码前	DSP 硬译码	Matlab 硬译码	DSP 软译码	Matlab 软译码
3 078	850	856	667	653
2 910	762	760	488	480
2 899	680	675	467	461

由表 2 可以看出, 原始误码个数在 2 800~3 100 范围内时, DSP 硬译码纠错个数为 2 200 左右, 软译码纠错个数为 2 400 左右, 并且 DSP 译码与 Matlab 译码性能相当。

本文将卷积交织、卷积编码和 Viterbi 译码引入了水声 OFDM 系统, 根据水声信道特点和多次水池实验确定其参数。在 TMS320DM642 上实现时, 对于卷积交织采用查表法, 对于 Viterbi 译码采用蝶形运算宏定义和双数组循环更新以减小时延, 保证了译码实时性。通过海洋实验验证了 DSP 实现软硬译码的性能。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 吴沫, 杨华, 卢伟. 几种信道编码方式的编码增益比较分析[J]. 通信技术, 2007, 40(11).
- [3] 王德清. OFDM 高速水声通信系统的 DSP 实现及同步技术研究[D]. 厦门大学学报, 2005(6).
- [4] 吴子彧, 余松煜, 管云峰, 等. 基于卷积交织的 SDRAM 控制器的设计[J]. Circuits and their applications, 2006(12).
- [5] 张海勇. 一种卷积码维特比译码算法的软件实现[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(6).

(收稿日期: 2010-07-29)

作者简介:

肖静, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: OFDM、水声通信。

胡晓毅, 女, 1966 年生, 教授, 主要研究方向: OFDM、水声通信、单片机与嵌入式系统。