

浅海水声信道中的一种带循环均衡的 Turbo 译码结构^①

刘胜兴^② 许肖梅

(厦门大学海洋与环境学院 厦门 361005)

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

摘 要 针对浅海水声信道长时延、强多途干扰的特点,建立了一种新的带自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构,并对其性能进行了仿真研究。该结构对典型的 Turbo 译码器进行了改进,使之不但能输出信息比特,同时又能输出校验比特,这些比特经硬判决、符号映射及信道交织后反馈回判决反馈均衡器,构成带自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构。厦门港实测 5 途浅海水声信道仿真结果显示,该结构具有优良的抗多途性能,信噪比大于 4dB 时,误比特率小于 10^{-5} ,比联合判决反馈均衡的 Turbo 译码结构提高了约 2.5dB。

关键词 浅海水声信道, Turbo 码, 循环判决反馈均衡器, 多途

0 引 言

多途干扰是水声数据可靠传输的主要障碍,也是水声通信中迫切需要解决的一个关键技术问题。与无线信道相比,由于浅海水声信道中声速比电磁波速度小很多,经海底、海面或其它介质反射后的声波与直达声波之间的声程差又较大,因此多途干扰一般具有较长的时延扩散,可长达几十毫秒,甚至上百毫秒;浅海水声信道存在各种噪声源,有效带宽和发送功率有限,并且由于载体、信道界面及介质的运动,将产生多普勒频移和扩散;浅海水声信道的传输特性随时间、地点和频率的不同而快速变化。由于上述特点,无线信道中常用的通信方法或技术需加以改进才能应用于浅海水声信道。

目前,水声高速数据传输一般采用相干通信技术,发送多相移键控(m-ary phase shift keying, MPSK)信号,采用由二阶数字锁相环和自适应判决反馈均衡器(decision feedback equalizer, DFE)构成的相干接收机接收,以补偿浅海水声信道的长时延扩散和多普勒频移^[14]。由于浅海水声信道的复杂性和多变性,采用上述方法和技术仍不能获得足够低的误比特率,一般还需要采用信道纠错编解码技术。Turbo 码是 Berrou 等人在 1993 年的国际通信会议(ICC'93)上提出的一种并行级联结构的反馈卷积码^[5],由

于采用递归系统卷积(recursive systematic convolutional, RSC)编码、交织和软输入软输出(soft-in-soft-output)迭代译码等技术,因此其纠错性能得以极大的提高,在加性高斯白噪声(AWGN)信道中几近 Shannon 理论极限。近年来, Turbo 码开始应用于水声相干通信,并将自适应判决反馈均衡器与 Turbo 译码器进行级联、迭代运算,构成联合判决反馈均衡的 Turbo 译码器及 Turbo 均衡器等译码结构^[6-8]。前一种结构算法简单、易实现,但纠错性能较差,后一种结构性能较优,但算法复杂度高、计算量大,因此在实际工程应用中存在一定的困难。针对该问题,本文建立了一种新的带自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构,该结构采用自适应循环判决反馈均衡和 Turbo 迭代译码策略,译码时采用基于软输入软输出的最大后验概率(maximum a posteriori, MAP)算法,信道均衡时采用硬判决算法,因此既保证了较高的性能,又简化了算法复杂度。

1 系统结构

图 1 为带 Turbo 纠错编译码的水声通信系统结构图。信息比特 $d(n)$ 经 Turbo 编码,信道交织和符号映射后调制,调制后生成的信号 $x(t)$ 通过水声换能器转换成声波在水声信道中传播。由于浅海水声信道多途及海洋环境噪声 $w(t)$ 的干扰,接收到的

① 国家自然科学基金(40776022)和 863 计划(2006AA09Z108)资助项目。

② 男,1972 年生,博士,讲师;研究方向:水声通信;联系人, E-mail: liusx@xmu.edu.cn
(收稿日期:2008-06-02)

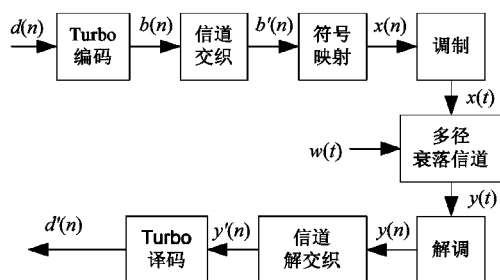


图1 带 Turbo 纠错编译码的水声通信系统结构图

信号 $y(t)$ 将被严重污染,因此解调后生成的符号序列 $y(n)$ 与发送符号序列 $x(n)$ 差别较大,它们之间的关系可表示为

$$y(n) = \sum_{i=1}^L h_i(n)x(n - n_i) + w(n) \quad (1)$$

式中 $h_i(n)$ 为第 i 途时变脉冲响应因子, n_i 为第 i 途延迟时间, $w(n)$ 为高斯噪声, L 为多途数。仿真时主要考虑多途干扰的影响,因此假设 $h_i(n)$ 不随时

间变化,为 h_i , 调制方式为 BPSK, 即 $x(n)$ 为 $+1$ 或 -1 。

2 带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构

2.1 Turbo 编码和发射结构

图2为 Turbo 编码、发射结构示意图,信息比特 $d(n)$ 经卷积编码后生成校验比特 $c^{p1}(n)$, 经交织、卷积编码后生成校验比特 $c^{p2}(n)$, 根据编码码率,对校验比特和信息比特进行删余复用后输出编码序列 $b(n)$, $b(n)$ 经信道交织和符号映射后,转换成符号序列 $x(n)$ 在水声信道中传输。图中两个卷积编码器采用相同的4级移位寄存器结构,其生成多项式为 $g(17,15)$ (八进制数)。从编码过程来看, Turbo 码由两个相对独立的卷积编码器联合构成,而每一个编码器都是一个马尔可夫过程,因此它是一个联合的马尔可夫过程。

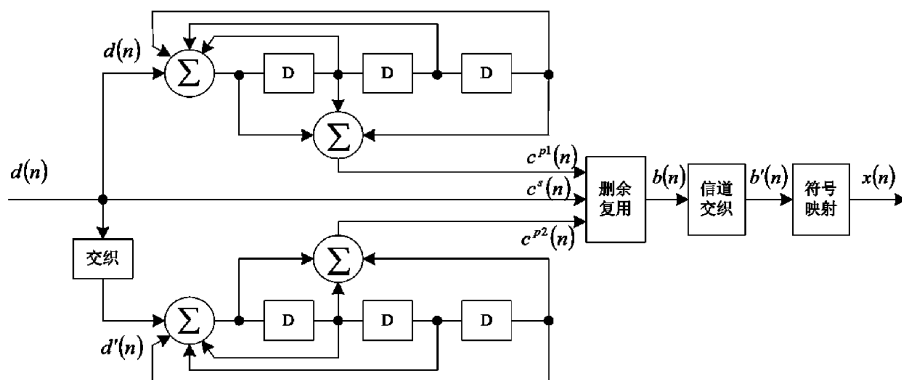


图2 Turbo 编码、发射结构

2.2 带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构

典型的自适应判决反馈均衡器一般由前馈横向滤波器、反馈横向滤波器和符号判决器等三部分组成。若用 Turbo 译码器替代符号检测器,并对传统的 Turbo 译码器进行改进,使之同时输出信息和校验序列,便得到一种新的带自适应循环判决反馈均

衡的 Turbo 译码结构,如图3。新结构译码过程描述如下:解调后的符号序列 $y(n)$ 从前馈横向滤波器输入,输出序列 $\hat{x}(n)$ 经信道解交织后进入 Turbo 译码器,译码后输出信息序列 b_k 和校验序列 p_{1k} 、 p_{2k} , 然后根据码率对 b_k 、 p_{1k} 和 p_{2k} 进行合成,合成后的序列经符号映射和信道交织后输入反馈横向滤波

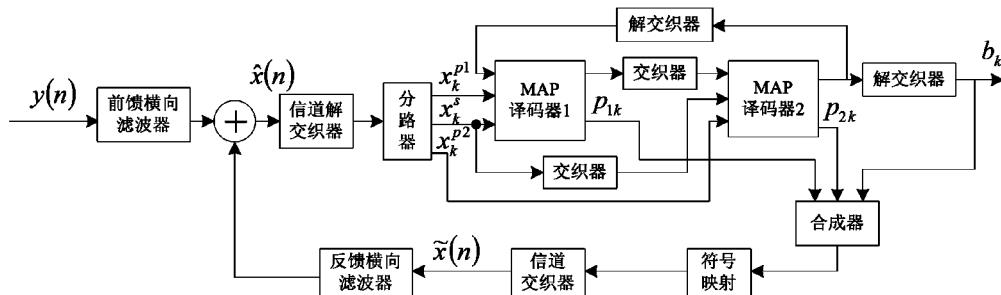


图3 带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构

器,构成自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 迭代译码结构。迭代译码过程中,由于 Turbo 译码器的输入为多途时延补偿后的输出,而自适应判决反馈均衡器的反馈输入为 Turbo 纠错译码后的输出,因此随着迭代的进行,该结构总的抗多途及抗噪声性能将得到最大优化。

判决反馈均衡器前馈、反馈横向滤波器的系数分别表示为

$$w_f = [w_0^f \quad w_1^f \quad \cdots \quad w_{l_f-1}^f] \quad (2)$$

$$w_b = [w_0^b \quad w_1^b \quad \cdots \quad w_{l_b-1}^b] \quad (3)$$

式中 l_f 和 l_b 分别为前馈、反馈横向滤波器的抽头数,由于浅海水声信道具有较长的多途时延扩散,因此 l_f 和 l_b 应取较大数值。判决反馈均衡器的软输出序列 $\hat{x}(n)$ 为

$$\hat{x}(n) = w_f^T(n)y(n) - w_b^T(n)\hat{x}(n) \quad (4)$$

式中 $y(n)$ 为输入序列, $\hat{x}(n)$ 为上次 Turbo 译码输出序列,上标^T表示求矩阵的转置。判决反馈均衡器系数 w_f 和 w_b 的取值应满足信号差

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (5)$$

最小,其中 $x(n)$ 为训练序列。横向滤波器系数更新算法采用收敛速度较快的递归最小二乘法(RLS),递推公式如下:

$$\begin{aligned} k(n) &= \frac{P(n-1)y(n)}{\lambda + y^T(n)P(n-1)y(n)} \\ l(n) &= x(n) - (w_f^T(n-1)y(n) - w_b^T(n-1)\hat{x}(n)) \\ w_f(n) &= w_f(n-1) + k(n)l(n) \\ w_b(n) &= w_b(n-1) + k(n)l(n) \\ P(n) &= \lambda^{-1}(P(n-1) - k(n)y^T(n)P(n-1)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 λ 为小于并接近 1 的常数,称遗忘系数, $k(n)$ 和 $P(n)$ 为中间变量。

Turbo 迭代译码过程中,输出信息比特 b_k 的对数似然比(LLR)为^[5]

$$L(b_k) = \ln \frac{\sum_{(m,n) \in B^1} \alpha_{k-1}(n) \gamma_k(n,m) \beta_k(m)}{\sum_{(m,n) \in B^0} \alpha_{k-1}(n) \gamma_k(n,m) \beta_k(m)} \quad (7)$$

式中 $\gamma_k(n,m)$ 称为边的度量,表示给定输入 $u_k = (x_k^s, x_k^p)$ 时,从状态 n ($k-1$ 时刻)转移到状态 m (k 时刻)的转移概率; $\alpha_{k-1}(m)$ 为 $k-1$ 时刻,给定接收序列 $\{u_1, \dots, u_{k-1}\}$ 时处于 m 状态的概率; $\beta_k(n)$ 为 k 时刻,给定接收序列 $\{u_{k+1}, \dots, u_N\}$ 时处

于 n 状态的概率。 $\alpha_k(m)$ 由前向递归公式计算得到:

$$\alpha_k(m) = \sum_{n=0}^{M-1} \alpha_{k-1}(n) \gamma_k(n,m) \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

式中 M 为状态数。 $\beta_k(n)$ 由后向递归公式计算得到:

$$\beta_k(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \beta_{k+1}(m) \gamma_k(n,m) \quad n = 0, 1, \dots, M-1 \quad (9)$$

输出校验比特 p_k 的对数似然比(LLR)为

$$L(p_k) = \ln \frac{\sum_{(m,n) \in P^1} \alpha_{k-1}(n) \gamma_k(n,m) \beta_k(m)}{\sum_{(m,n) \in P^0} \alpha_{k-1}(n) \gamma_k(n,m) \beta_k(m)} \quad (10)$$

式中 $\gamma_k(n,m)$, $\alpha_{k-1}(n)$ 和 $\beta_k(m)$ 与(7)式相同。由(7)和(10)式可见, Turbo 译码时的主要工作是计算 $\gamma_k(n,m)$, $\alpha_{k-1}(n)$ 和 $\beta_k(m)$, 因此只要对典型的 Turbo 译码算法稍作改进,增加少量的运算便可同时输出信息和校验比特。

3 仿真结果

以厦门港实测 5 途浅海水声信道为例,对带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构误比特性能进行了仿真研究。仿真参数如下: Turbo 编码器生成多项式 $g(17, 15)$ (八进制数), 编码码率 1/3, 码元周期 0.4ms, 判决反馈均衡器前馈和反馈横向滤波器长度均 50, 循环次数 5, 多途参数如表 1 所示^[9]。

表 1 厦门港实测 5 途浅海水声信道各途参数

途数	1	2	3	4	5
幅度	0.2378	0.1647	0.2554	0.2100	0.1283
延迟时间 (ms)	0.0454	0.6803	1.5420	1.5646	2.0635
相位	0	0	180	180	180

图 4 给出了新结构误比特率(BER)随信噪比(E_b/N_0)的变化曲线,同时给出判决反馈均衡器、Turbo 译码器、联合判决反馈均衡的 Turbo 译码器的对应曲线。由图可见:既不采用判决反馈均衡器,又不采用 Turbo 译码器时,误比特率随信噪比的提高基本保持不变(约 3.9×10^{-1}),可见这部分的误比特率主要由多途干扰决定,而与噪声基本无关;采用判决反馈均衡器时,误比特率随信噪比的提高而下

降,但下降速度较慢,当信噪比为 8dB 时仍维持在较高水平(约 10^{-2});采用 Turbo 译码器时,误比特率随信噪比的提高一直保持 3.9×10^{-1} 左右,表明在多途干扰严重的情况下,仅采用 Turbo 译码器不能实现可靠的数据传输;采用联合判决反馈均衡的 Turbo 译码器时,误比特率随信噪比的提高,先缓慢下降,当信噪比大于 4dB 时,则快速下降,并在信噪比为 5dB 时达 10^{-5} ,基本可实现无差错传输;采用新结构时,误比特率随信噪比的提高先缓慢下降,当信噪比大于 2.5dB 时,则快速下降,并在信噪比大于 4dB 时达 10^{-6} ,其性能比联合判决反馈均衡的 Turbo 译码器提高了约 2.5dB。

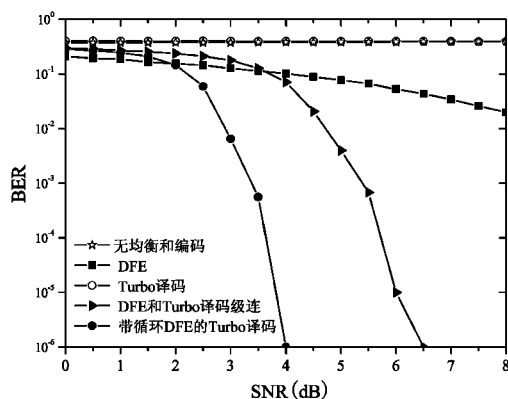


图4 带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构误比特率随信噪比的变化

图5给出了不同循环次数时,新结构误比特率随信噪比的变化曲线。可见,新结构的误比特性能

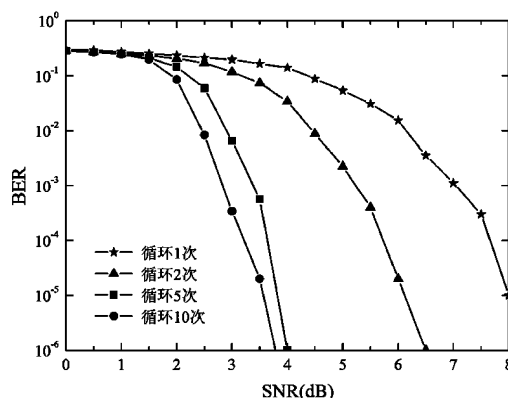
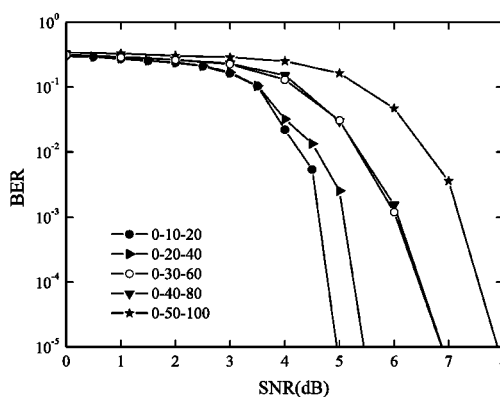


图5 循环次数对带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构性性能影响

随循环次数的增大而提高,并且当循环次数较小时,增加循环次数得到的性能提高较多,如循环次数由 1 提高到 2 时,性能提高约 2dB,循环次数由 2 提高

到 5 时,性能提高约 2.5dB;当循环次数较大时,增加循环次数得到的性能提高明显减少,如循环次数由 5 提高到 10 时,性能提高仅约 0.2dB。实际应用中应综合性能、计算量及实时性等因素选择合适的循环次数,一般选取为 4~5 次较合适。

为分析多途时延的影响,图6给出了 3 途浅海水声信道中(功率分配分别为 0dB、-3dB 和 -6dB)不同时延误比特率随信噪比的变化曲线。可见,新结构性能随多途时延的增大而下降。



(不同情况下各途延迟时间分别表示为第1途-第2途-第3途,单位为码元周期)

图6 多途时延对带循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构性性能影响

4 结论

浅海水声信道是一种极复杂的长时延、强多途干扰信道,需要采用信道均衡、信道纠错编码及时空分集等复杂算法或技术才能实现可靠的数据传输。本文将判决反馈均衡器和 Turbo 译码器级联,构成一种新的带自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 迭代译码结构。迭代译码过程中, Turbo 译码器采用软输入软输出的 MAP 算法,而信道均衡器则采用硬判决递归最小二乘算法,即保证了较优的性能,又简化了算法复杂度。厦门港实测 5 途浅海水声信道仿真结果显示:新结构具有较优的抗多途及抗噪声性能,在多途干扰严重的情况下,信噪比大于 4dB 时,误比特率小于 10^{-5} ,比联合判决反馈均衡的 Turbo 译码器提高了约 2.5dB 左右;新结构误比特性能随循环次数的增大而提高,并且当循环次数较小时,增大循环次数得到的性能提高较多,循环次数较大时,增大循环次数得到的性能提高较少。

参考文献

- [1] Stojanovic M, Catipovic J, Proakis J G. Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications. *J Acoust Soc Am*, 1993, 94(3):1621-1631
- [2] Kilfoyle D B, Bageroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *J Oceanic Eng*, 2000, 25(1):4-27
- [3] Oberg T, Nilsson B, Olofsson N, et al. Underwater communication link with iterative equalization. *OCEANS*, 2006(9):1-6
- [4] Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications. *IEEE J Oceanic Eng*, 1996, 21(2):125-136
- [5] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications 93, Geneva, Switzerland, 1993. 1064-1070
- [6] Sozer E M, Proakis J G, Blackmon F. Iterative equalization and decoding techniques for shallow water acoustic channels. In: Proceedings of OCEANS 2001 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Hawaii, USA, 2001. 4. 2201-2208
- [7] Raphaeli D, Zarai Y. Combined turbo equalization and turbo decoding. *IEEE Communication letters*, 1998, 2(4):1634-1638
- [8] 高路, 贺志强, 田宝玉. 高速水声通信系统仿真研究. *声学学报*, 2003, 28(1):33-39
- [9] 童峰, 许肖梅, 方世良. 一种单频水声信号多径时延估计算法. *声学学报*, 2008, 33(1):62-68

A Turbo decoding structure with iterative equalization for shallow water acoustic channels

Liu Shengxing^{* **}, Xu Xiaomei^{* **}

(^{*} College of Oceanography and Environmental Science of Xiamen University, Xiamen 361005)

(^{**} Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology (Xiamen University), Ministry of Education, Xiamen 361005)

Abstract

A new Turbo decoding structure with an iterative decision feedback equalizer (DFE) for shallow water acoustic channels was built based on the consideration of the channels' characteristics of long time-delay and strong multipath, and its performances were simulated. In this new structure, the conventional Turbo decoder is modified to generate both information and parity bits, and these bits are first passed to the hard-decision, the symbol mapping, then channel interleaving, and then fed back to the DFE to implement the new Turbo decoding structure with the iterative DFE. The simulations show that the new structure can improve the anti-multipath performance of the system. When signal to noise ratio (SNR) is greater than 4 dB, the bit error rates (BER) is less than 10^{-5} , and the gain in SNR achieved is 2.5 dB greater compared to the conventional structure of the Turbo decoder with DFE in five-path shallow water acoustic channel of the Xiamen harbor.

Key words: shallow water acoustic channel, Turbo code, iterative decision feedback equalizer, multipath