

## 用于盲接收的 turbo 均衡与迭代信道估计

李 静 彭 华 葛临东  
(信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

**摘 要:** Turbo 均衡是一种将信道均衡和差错控制译码联合迭代处理的均衡机制, 与传统的均衡器相比, 能在更低的信噪比条件下克服严重信道失真导致的符号间干扰(ISI)。该文提出一种用于盲接收的 turbo 均衡和迭代信道估计方案, 不依赖于训练序列或发送符号的先验知识, 采用初始盲均衡处理来启动迭代信道估计和 turbo 均衡。在该方案中, 初始盲均衡算法的选择是十分关键的, 它需要在恶劣的信道条件为后续迭代处理的启动提供足够的先验信息。该文根据 turbo 均衡的特点, 选择了超指数算法作为初始盲均衡。仿真结果表明, 该文提出的用于盲接收的 turbo 均衡方案是有效的。

**关键词:** 盲接收; 迭代处理; Turbo 均衡; 信道估计

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1887-04

## Turbo Equalization and Iterative Channel Estimation for Blind Receiver

Li Jing Peng Hua Ge Lin-dong

(Information Engineering Institute of Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A turbo equalizer is able to overcome severe inter-symbol-interferences because it benefits from the channel decoding gain by iteratively performing equalization and channel decoding. This paper proposes a scheme of turbo equalization and iterative channel estimation for blind receiver. The scheme exploits a conventional blind equalizer to bootstrap the iterative process and thus is independent of training sequence and a priori information of the transmitted symbols. In such a scheme, the initial blind equalization algorithm is critical and should be able to provide enough information for the following turbo equalization and channel estimation even when channel distortion is severe. Based on analysis of characteristics of turbo equalization, the super exponential algorithm is chosen as the initial blind equalization. Simulation results illustrating performance of the proposed scheme are also given.

**Key words:** Blind receiver; Iterative detection; Turbo equalization; Channel estimation

### 1 引言

Turbo 均衡(Turbo Equalization, TE)是基于软信息的迭代处理思想在均衡技术中的成功应用, 是文献[1]将 turbo 译码的思想引申到均衡中而提出的。Turbo 均衡使用了软输入软输出(SISO)均衡与 SISO 信道译码的迭代处理, 能够在较低的信噪比下很好地克服严重的信道失真。

文献[1-3]分别给出了几种不同的 turbo 均衡方法, 其主要差别在于所使用的 SISO 均衡算法不同。其中文献[1]采用了最大后验概率(MAP)算法, 虽然性能最优但复杂度很高。文献[2]采用的是一种最小均方误差(MMSE)线性均衡器, 复杂度比 MAP 均衡有了很大的降低, 即使在很严重的信道失真条件下也能获得较好的性能。文献[3]提出采用 MMSE 符号间干扰抵消线性均衡器(IC-LE), 其复杂度进一步降低, 而性能则比文献[2]中的方法稍差。文献[4]还提出一种用于 turbo 均衡的联合高斯均衡器, 并给出一种低复杂度实现方法, 仿真性能优于文献[2]。

文献[1-4]对 turbo 均衡的讨论均是在信道响应精确已知的假设条件下进行的。在实际应用中, 必须首先进行信道估计。在 turbo 均衡中, 比较简单的做法是在开始均衡前进行一次信道估计, 此后每次迭代都使用同样的信道估计结果。效果更好的做法则是在均衡与译码迭代的同时, 利用从译码器得到的软信息不断更新信道估计。这种方法称为迭代信道估计。

信道估计通常使用自适应滤波算法, 通过使定义的代价函数最小来求得信道的估计值。自适应滤波器的输入信号一般有 3 种, 即发送符号序列的真实值、硬判决及软判决。文献[5,6]讨论了硬判决引导的迭代信道估计。与非迭代信道估计方法不同的是, 这里的硬判决是从译码器输出得到的, 而不是均衡器输出得到的。为避免硬判决造成的信息损失, 文献[7,8]讨论了软判决引导的迭代信道估计, 其中文献[7]采用的是 Kalman 滤波算法, 而文献[8]则采用了 RLS 算法。不过这些方法一般都需要已知训练序列或发送序列的先验信息来启动迭代信道估计, 因而不适用于训练序列和先验信息均未知的盲接收应用场合。

文献[9]提出一种 SISO 盲均衡方法, 利用一种基于 Monte Carlo 计算思想的 Gibbs 样本法来计算未知信道与发送比特的后验概率, 并将这种 SISO 盲均衡方法用于 turbo 均衡, 实现了盲 turbo 均衡。不过, 基于 Gibbs 样本法的 SISO 盲均衡存在时延模糊与相位模糊的问题, 并且当信道响应存在逼近单位元的零点时收敛比较困难。

本文提出一种适于盲接收的 turbo 均衡和迭代信道估计方案。在该方案中, 启动迭代信道估计和 turbo 均衡所需要的先验信息不是来自于训练序列或事先具备的先验知识, 而是来自于初始盲均衡处理。根据 turbo 均衡的特点, 本文给出了适当的初始盲均衡算法, 该盲均衡处理即使在恶劣的条件下也能为信道估计和 turbo 均衡提供充分的先验信息, 从而有效地实现 turbo 均衡。

### 2 Turbo 均衡

考虑如图 1 所示的基带等效编码数据传输系统。发送信息比特  $b_m$  组成信息帧后经信道编码得到  $d_n$ 。  $d_n$  经过交织器  $\Pi$  后由  $M$  进制调制映射形成发送符号  $x_k$ 。发送符号经过信道后得到接收信号  $y_k$ 。

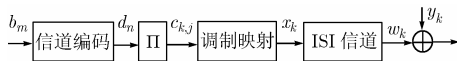


图 1 基带等效数据传输模型

图 2 给出了 turbo 均衡的构成框图。其中 SISO 均衡利用信道输出和发送符号的先验信息计算发送符号的估计值  $\hat{x}_k$ 。SISO 逆映射则根据  $\hat{x}_k$  计算均衡器的外信息序列  $L_e^{eq} = \{L_e^{eq}(c_{k,j})\}$ , 该外信息经过过去交织后作为编码比特的先验信息  $L_a^{dec} = \{L_a^{dec}(d_n)\}$  输入到译码器。译码器根据  $L_a^{dec}$  计算编码比特的后验对数似然比。利用该后验似然比和输入的先验信息, 可计算译码器的外信息  $L_e^{dec} = \{L_e^{dec}(d_n)\}$ 。  $L_e^{dec}$  经过交织后得到均衡器的先验信息序列  $L_a^{eq} = \{L_a^{eq}(c_{k,j})\}$ 。SISO 映射模块将  $L_a^{eq}$  转化为 SISO 均衡算法所需的发送符号的先验统计量, 如均值、方差等。

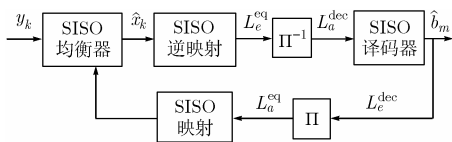


图 2 Turbo 均衡的构成框图

在迭代开始时, SISO 均衡一般没有可利用的先验信息。但从第二次迭代开始, SISO 均衡器就有了可利用的先验信息, 因此均衡性能将得到改善, 并进而使后续的译码输出变得更可靠, 从而为下一次迭代提供更充分的先验信息。当迭代结束时, SISO 译码器输出的后验似然比就可以送入判决模块得到对发送信道比特的估计值  $\hat{b}_m$ 。

SISO 译码器通常采用 MAP 算法或 Max-log-MAP 算法计算发送比特的后验对数似然比(LLR)  $L(d_n)$ 。与用于差错控制的信道译码不同, turbo 均衡中的译码器不但需要计算

信息比特的 LLR, 同时也需计算校验比特的 LLR<sup>[10]</sup>。译码器向均衡器输出的外信息的定义为  $L_e^{dec}(d_n) = L(d_n)$ <sup>[3]</sup>。

### 3 盲接收中的 turbo 均衡与迭代信道估计

常用的 turbo 均衡算法均假设信道响应精确已知。在实际应用中, 在均衡之前还需进行信道估计。在 turbo 均衡中, 通常采取软判决引导算法来实现信道估计。由于软判决随着迭代的进行不断得到更新, 因此每次迭代都进行一次信道估计, 即迭代信道估计。

信道估计所需要的软判决是用发送符号的先验信息得到的。在现有的 turbo 均衡与迭代信道估计方法中, 通常假设第一次迭代时已具备了一定的发送符号的先验信息。但在盲接收应用中一般并不具备任何发送符号的先验信息, 此时实现 turbo 均衡的关键在于如何在没有训练序列和先验信息的条件下获得信道估计算法所需的软判决。为此, 本文提出采用初始盲均衡方法来代替 turbo 均衡第一次迭代中的 SISO 均衡, 即首先进行盲均衡、译码, 得到发送序列的先验信息, 然后在此基础上进行软判决引导的迭代信道估计和均衡。基于这一思想的 turbo 均衡与迭代信道估计方案如图 3 所示。

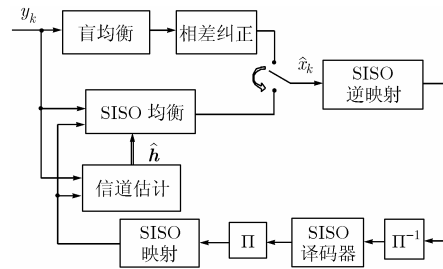


图 3 用于盲接收的 turbo 均衡与迭代信道估计方案

#### 3.1 迭代信道估计

本文采用 RLS 算法实现软判决引导的迭代信道估计。其中软判决指由先验信息得到的发送符号的均值  $\bar{x}_k = E[x_k]$ 。设自适应滤波器的长度为  $L = L_1 + L_2 + 1$ ,  $k$  时刻自适应滤波器的输入信号向量为  $\bar{x}_k = [\bar{x}_{k+L_2}, \dots, \bar{x}_k, \dots, \bar{x}_{k-L_1}]^T$ , 滤波器权向量即信道响应向量的估计值为  $\hat{h} = [\hat{h}_{-L_2}, \dots, \hat{h}_0, \dots, \hat{h}_{L_1}]^T$ 。算法的具体描述如下。

令  $P_0 = \delta^{-1} \cdot I$ 。当  $k > 0$  时,

$$g_k = \frac{\lambda^{-1} P_{k-1} \bar{x}_k^*}{1 + \lambda^{-1} \bar{x}_k^T P_{k-1} \bar{x}_k} \tag{1}$$

$$\hat{h}_k = \hat{h}_{k-1} + g_k [y_k - \hat{h}_{k-1}^T \cdot \bar{x}_k] \tag{2}$$

$$P_k = \lambda^{-1} [P_{k-1} - g_k \bar{x}_k^T P_{k-1}] \tag{3}$$

当递归计算结束时, 该时刻的  $\hat{h}_k$  即为信道估计值  $\hat{h}$ 。根据  $\hat{h}$  即可进行信道响应已知条件下的 SISO 均衡。

#### 3.2 初始盲均衡

由于 turbo 均衡是按数据帧进行的, 因此类似基于自适应滤波的、需要一定收敛时间的盲均衡算法是不适于进行初始盲均衡的。另外, 初始盲均衡算法应该在严重频率选择

性失真信道下也能取得较好的性能。否则在恶劣信道下将无法通过初始化得到足够的先验信息,无法启动 turbo 均衡,从而使 turbo 均衡失去抗恶劣信道失真的优势。

文献[11]提出一种基于高阶统计量的盲均衡算法,称为超指数(super-exponential)算法。与常见的自适应盲均衡算法不同,超指数算法对均衡滤波器系数的迭代调整不是按采样间隔进行的,而是以一幅数据为基础。文献[12]讨论了超指数盲均衡算法的性能,指出无论信道传输函数是否具有位于或接近单位圆的零点,该算法都能够收敛。不过,由于超指数均衡器是基于线性滤波的,它在补偿信道响应中的强频率凹陷的同时,对信道噪声有严重的放大,因此若独立应用只能用于信噪比较高的情形。但是,如果将该算法作为 turbo 均衡的初始化算法,即使是在较低的信噪比下它也有可能为后续的迭代信道估计和 turbo 均衡提供一定的先验信息。

综上,超指数盲均衡算法十分符合盲接收中 turbo 均衡对初始算法的要求。因此,本文选择超指数算法作为图3所示方案的初始盲均衡。下面给出超指数盲均衡算法的描述。

超指数盲均衡是一种基于线性滤波的均衡算法。设均衡滤波器的长度为  $N_w$ , 在第  $n$  次迭代时的权向量为  $\mathbf{w}_n = [w_0, w_1 \dots w_{N_w-1}]^T$ 。  $k$  时刻均衡滤波器的输入信号向量为  $\mathbf{y}_k^{SE} = [y_k, y_{k-1} \dots y_{k-N_w+1}]^T$ , 输出信号为  $\hat{x}_k^n$ , 则

$$\hat{x}_k^n = \mathbf{y}_k^{SE} \cdot \mathbf{w}_n^T \quad (4)$$

定义  $N_w \times N_w$  维矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$ , 它的第  $i$  行第  $j$  列元素为

$$R_{i,j} = \frac{\text{cum}\{y_{k-i}; y_{k-j}^*\}}{\text{cum}\{x_k; x_k^*\}} \quad (5)$$

式中  $\text{cum}\{\}$  表示求累积量。滤波器权向量  $\mathbf{w}_n$  的更新按如下步骤进行。

初始化:  $\mathbf{w}_0 = [0, 0 \dots 1, 0 \dots 0]^T$ ,  $\hat{x}_k^0 = \mathbf{y}_k^{SE} \cdot \mathbf{w}_0^T$ 。

对  $n = 0, 1, 2, \dots$ ,

(1) 计算  $N_w \times 1$  维列矢量  $\hat{\mathbf{d}}_n$ , 其中第  $i$  个元素为

$$d_{n,i} = \frac{\text{cum}\{\hat{x}_k^n; \hat{x}_k^n; \hat{x}_k^{n*}; y_{k-i}^*\}}{\text{cum}\{x_k; x_k; x_k^*\}};$$

(2)  $\mathbf{w}'_{n+1} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{d}}_n$ ,  $\mathbf{w}_{n+1} = \frac{\mathbf{w}'_{n+1}}{\sqrt{\mathbf{w}'_{n+1} \cdot \hat{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{w}'_{n+1}}}$ ;

(3)  $\hat{x}_k^{n+1} = \mathbf{y}_k^{SE} \cdot \mathbf{w}_{n+1}^T$   $k = 0, 1, \dots$ ;

(4)  $n = n + 1$ 。

随着迭代次数的增加,超指数均衡器的系数逐渐收敛到稳态值。当信道失真比较严重时,超指数均衡的迭代次数越多,它对噪声的放大越严重。作为 turbo 均衡的初始均衡,超指数均衡一般只需进行二至三次迭代。上述超指数均衡算法描述表明,该算法的运算量主要是由一次  $N_w \times N_w$  维矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  和  $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$  的计算以及每次迭代中  $N_w \times 1$  维矢量  $\hat{\mathbf{d}}_n$  的计算造成的。当迭代次数较少、 $N_w$  较小时,该算法并不会造成太大的运算负担。可见,与训练序列已知或发送符号先验信息已知条件下的 turbo 均衡与迭代信道估计相比,图3所示的用于盲接收的 turbo 均衡方案所增加的运算量是可以接受的。

由于超指数均衡器属于恒模算法,它对信号的相位偏差并不敏感,这使得均衡器输出的信号中可能含有未知的相位偏差。因此,超指数均衡器的输出必须先经过相位纠正后才能输入给 SISO 逆映射模块计算发送比特的 LLR。在进行相位偏差纠正后,可假设  $p(\hat{x}_k | x_k = \alpha)$  服从均值为  $\alpha$  方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。为方便计,不考虑  $\hat{x}_k$  中残存的 ISI,只考虑信道噪声通过线性均衡器后的输出噪声,于是可近似得到  $\sigma^2 = \mathbf{w}^H \mathbf{w} \cdot \sigma_w^2$ 。将  $\hat{x}_k$  与  $\sigma^2$  输入 SISO 逆映射模块,就可得到盲均衡器输出的发送比特的外信息。

### 4 仿真

通过仿真考查了上述 turbo 均衡方案的性能,其中 SISO 均衡采用先验信息已知条件下 MMSE 线性均衡<sup>[2]</sup>。仿真中使用了码率  $R$  为 1/2 的自回归系统卷积码,其生成多项式为  $(1 + D^2, 1 + D + D^2)$ 。对每一数据帧独立生成一个随机的交织器。采用 QPSK 和 8PSK 调制,数据帧长为 2048 个符号。SISO 译码器采用 log-MAX-MAP 算法。基带等效信道模型采用文献[13]中的 B 信道和 C 信道,其信道响应向量分别为  $\mathbf{h}_B = [0.407, 0.815, 0.407]$  和  $\mathbf{h}_C = [0.227, 0.46, 0.6888, 0.46, 0.227]$ 。信道噪声为零均值方差为  $\sigma_w^2$  且实部与虚部独立的复高斯加性白噪声。 $E_b/N_0$  的定义为

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_w^2 \cdot Q \cdot R} \quad (6)$$

其中  $\sigma_s^2$  为发送符号的平均功率,  $Q$  为每符号的比特数。

图4和图5分别给出了采用 QPSK 和 8PSK 调制时盲接收 (blind) turbo 均衡在 B 信道(CH B)与 C 信道(CH C)下经过初始盲均衡和 7 次迭代后输出的误码率。作为参考,图中还给出了 AWGN 信道和信道响应精确已知条件下 (nonblind) turbo 均衡的误码率曲线。当信道响应精确已知时, turbo 均衡也进行 7 次迭代,并采取文献[3]提出的译码器外信息计算方法。

可以看到,对 B 信道下的 QPSK 调制,当  $E_b/N_0$  在 5dB 以上时,盲接收 turbo 均衡的性能与已知信道条件下的 turbo 均衡基本相当,并十分接近于 AWGN 信道下的性能。这说明通过迭代处理,信道失真所导致的符号间干扰已经完全消

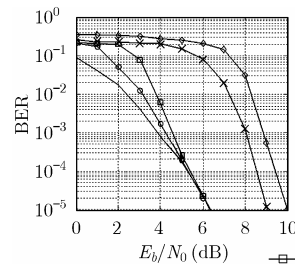


图4 QPSK turbo 均衡误码率曲线

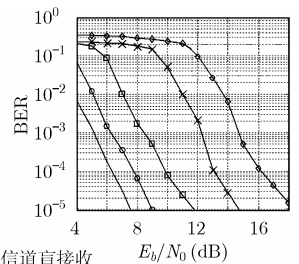


图5 8PSK turbo 均衡误码率曲线

除。对于 C 信道，盲 turbo 均衡的性能比信道已知的 turbo 均衡差约 1dB。对 8PSK 调制，在两种不同信道条件下，盲接收 turbo 均衡的性能比信道已知时差约 3dB。

图 6 给出了 C 信道下采用 8PSK 调制时信道估计的均方误差(MSE)随迭代进行的变化情况。其中 MSE 的定义为

$$\text{MSE} = \text{E} \left\{ \sum_{l=-L_2}^{L_1-1} |h_l - \hat{h}_l|^2 \right\} \quad (7)$$

可以看到，随着迭代次数的增加，信道估计的均方误差不断减小，信道估计值逐渐逼近真实的信道响应。

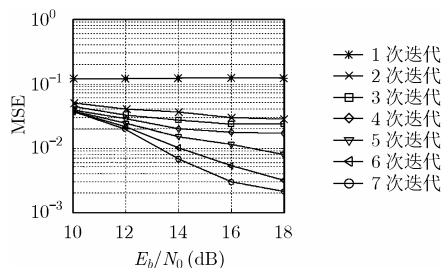


图 6 迭代信道估计的均方误差 (8PSK)

## 5 结束语

本文提出一种适于盲接收应用的 turbo 均衡与迭代信道估计方案，利用初始盲均衡来获得启动迭代处理所需的先验信息。通过分析，选择了超指数算法作为初始盲均衡算法。该算法按数据块运算的特点与 turbo 均衡按数据帧迭代处理的特点十分吻合。另外，该算法对恶劣信道失真有较强的均衡能力，因而有助于保持 turbo 均衡在恶劣信道条件下的性能优势。而该算法对信道噪声放大较严重的缺点则可以通过 turbo 均衡的迭代处理加以克服。仿真结果表明，本文提出的方案在没有训练序列和发送符号先验信息的条件下，能够在较低的信噪比下克服严重的信道失真。在相同的信道条件下，其性能与信道精确已知时的 turbo 均衡十分接近。

## 参 考 文 献

- [1] Douillard C, Picart A, and Didier P, *et al.* Iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization. *European Trans. on Telecommun.*, 1995, 6(5): 507-511.
- [2] Tuchler M, Singer A C, and Kotter R. Minimum mean squared error equalization using a priori information. *IEEE*

- Trans. on Signal Processing*, 2002, 50(3): 673-683.
- [3] Laot C, Bidan R, and Leroux D. Low complexity MMSE turbo equalization: A possible solution for EDGE. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 965-974.
- [4] 江森, 孙洪, 李坪. 一种新颖的用于 Turbo 均衡的均衡器. *通信学报*, 2003, 24(12): 9-14.
- [5] Nefedov N and Pukkila M. Turbo equalization and iterative (turbo) estimation techniques for packet data transmission. *Proc. 2nd Int. Symp. on Turbo Codes & Related Topics*, Brest, France, Sept. 2000: 423-426.
- [6] Visoz R, Berthet A O, and Saadani A, *et al.* Turbo equalization and incremental redundancy for advanced TDMA systems [A]. *IEEE VTC' 2001*, Rhodes Greece, May 2001: 1629-1633.
- [7] Song S, Singer A C, and Sung K M. Soft input channel estimation for turbo equalization. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(10): 2885-2894.
- [8] Otnes R and Tuchler M. Iterative channel estimation for turbo equalization of time-varying frequency-selective channels. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(6): 1918-1923.
- [9] Wang X and Chen R. Blind turbo equalization in Gaussian and impulsive noise. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2001, 50(4): 1092-1105.
- [10] 李静, 彭华, 葛临东. 用于 turbo 均衡的 MAP 卷积译码算法. *军事通信技术*, 2005, 26(3): 1-4.
- [11] Shalvi O and Weinstein E. Super-exponential methods for blind deconvolution. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1993, 39(2): 504-519.
- [12] Chi C Y, Feng C C, and Chen C Y. Performance of Super-exponential algorithm for blind equalization[A]. *IEEE VTC'2000-Spring*, Tokyo, 2000: 1864-1868.
- [13] Proakis J G. *Digital Communications*. New York: McMrw-Hill, 3rd edition, 1995: 616-617.

李 静: 女, 1972 年生, 讲师, 研究方向为通信信号处理。  
 彭 华: 男, 1973 年生, 副教授, 研究方向为盲信号处理。  
 葛临东: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为软件无线电。