

## 一种水声通信 Turbo 均衡中的软迭代信道估计算法

唐怀东<sup>①②</sup> 朱敏<sup>\*①</sup> 武岩波<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院声学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要:** Turbo 均衡技术是水声相干通信克服信道多径、消除码间干扰(ISI)的有效工具。Turbo 均衡实际使用时需要对时变、多径信道进行良好的估计。为了提高信道估计的效果,该文基于时变横向滤波和相位旋转信道模型,提出一种水声通信 Turbo 均衡中的软迭代信道估计算法。该算法采用快速自优化最小均方算法得到各数据符号处的横向滤波器系数矢量并与二阶锁相环联合优化计算。通过仿真比较,该算法明显优于硬迭代信道估计算法,且相位估计性能优于其他文献中的软迭代信道估计算法。在海上试验中,水声通信距离 5 km,方向近似垂直,接收阵起伏周期 10 s,起伏幅度 5 m 左右,在此情况下进行数据采集。将该算法用于对海试数据的单通道 Turbo 均衡处理,实现无误码输出,验证了所提算法在软迭代信道相位估计方面的优势。

**关键词:** 水声通信; Turbo 均衡; 信道估计; 快速自优化最小均方算法; 锁相环

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0677-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00820

## An Algorithm of Soft Iterative Channel Estimation for Turbo Equalization of Underwater Acoustic Communication

Tang Huai-dong<sup>①②</sup> Zhu Min<sup>①</sup> Wu Yan-bo<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Turbo equalization is the effective method to overcome multipath fading and eliminate Inter-Symbol Interference (ISI) for underwater acoustic coherent communications. In practice, turbo equalization estimates information of time-varying and multi-path channel. In order to improve the performance of channel and phase estimation, an algorithm of combining soft iterative channel and phase estimation for turbo equalization is proposed based on channel mode of time-varying transversal filter and phase rotation. The algorithm adopts soft iterative fast self-optimized LMS to get transversal filter coefficients vector for every symbol and combing it and second-order phase-locked loop for optimization. Through simulation, the proposed algorithm is better than conventional hard decision channel and phase estimation algorithm. As to performance of phase estimation, the proposed algorithm is better than soft iterative channel estimation raised in other references. During the sea experiment, underwater acoustic communication distance is 5 m, approximately in vertical direction and the fluctuation period of receiver array is 10 s. The algorithm is adopted for single-channel Turbo equalization on sea experiment data, which can output error-free symbols. The result verifies the advantage of all of the algorithms in the soft channel estimation.

**Key words:** Underwater acoustic communication; Turbo equalization; Channel estimation; Fast self-Optimized LMS (FOLMS); Phase lock loop

### 1 引言

单载波相干水声通信的主要是如何消除信道多径造成的码间干扰(ISI)。目前针对该问题的研

究热点是 Turbo 均衡技术<sup>[1,2]</sup>。在 Turbo 均衡接收机中,均衡器和译码器之间迭代处理,可以获得更好的性能。实际使用中,需要对时变、多径信道参数进行良好的估计。为了提高信道估计的效果,信道估计的计算参与上述迭代过程,称为迭代信道估计。根据译码器对信道估计器的反馈信息不同,迭代信道估计可以分为硬迭代信道估计算法<sup>[3]</sup>以及软迭代信道估计算法<sup>[4-6]</sup>,后者的性能优于前者。

2012-06-27 收到, 2012-10-22 改回

国家 863 计划项目(2002AA401004, 2009AA093301, 2009AA093601)

资助课题

\*通信作者: 朱敏 zhumin@mail.ioa.ac.cn

相对于无线电通信,水声通信信道的多普勒效应非常严重。在水声通信中需要对信道相位的变化单独考虑,有效的做法是把水声信道建模成时变横向滤波和相位旋转的组合,基于此模型的自适应判决反馈均衡器在水声通信中有较好的效果<sup>[7]</sup>。目前应用于 Turbo 均衡的迭代信道估计算法<sup>[4-6]</sup>,均没有考虑到信道相位快速变化的情况,因而不能直接应用于水声通信中。本文提出一种基于时变横向滤波和相位旋转信道模型的软迭代信道估计,特点是:(1)在迭代过程中利用译码器输出的软信息和接收到的符号序列,采用快速自优化最小均方算法,得到各数据符号处的横向滤波器系数矢量。(2)对于信道的相位旋转,采用二阶锁相环进行跟踪,横向滤波器系数和信道相位的估计联合优化计算。(3)迭代信道估计的结果为软输出的形式,即给出时变信道参数期望值的同时,还给出各符号位置处信道参数的方差,作为均衡器信道参数的软输入。

文中第4节仿真分析部分给出基于时变横向滤波和相位旋转信道模型的软迭代信道估计与硬迭代信道估计的性能比较,同时,也给出了与传统无线电通信中的不带相位估计器的软迭代信道估计算法的性能比较,从仿真结果来看,本文提出的软迭代信道估计算法明显优于同等条件下的其他两种信道估计算法。

文中第5节海试数据处理部分,均衡算法采用基于先验信息 MMSE 准则的线性 Turbo 均衡算法,而信道估计采用基于时变横向滤波和相位旋转信道模型的软迭代信道估计。最后的均衡效果进一步验证了本文提出的软迭代信道估计算法很好地适用于水声 Turbo 均衡中。

## 2 带有信道与相位估计的 Turbo 均衡水声通信系统模型

图1为带有信道与相位估计的 Turbo 均衡水声相干通信系统模型。

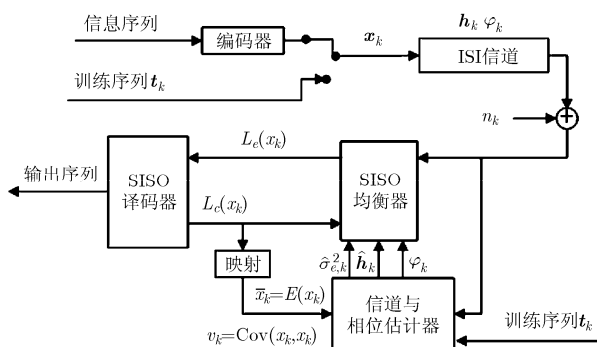


图1 带有信道与相位估计的 Turbo 均衡水声相干通信系统传输模型

### 2.1 发送端

信息比特通过并行级联 Turbo 编码器,分量编码器为递归卷积码,系数为(23, 35),经过删余后码率为 1/2。编码器输出比特经过映射后得到 QPSK 符号序列,产生编码 QPSK 符号序列,和训练序列  $t_k$  一起构成  $x_k, k = 1, 2, \dots, N_S$  经过调制后进行水声信号输出。

### 2.2 基于时变横向滤波和相位旋转信道模型

水声信道建模成时变横向滤波和相位旋转的组合。 $x_k$  在此信道中传输,因此接收符号表示为

$$z_k = \mathbf{h}_k^T \mathbf{x}_k \exp\{j\varphi_k\} + n_k, \quad k = 1, 2, \dots, N_S \quad (1)$$

其中  $\mathbf{h}_k = [h_{k,0}, h_{k,1}, \dots, h_{k,M-1}]$  为长度为  $M$  的时变横向滤波器抽头系数,  $\varphi_k$  为相位估计值,而  $\mathbf{x}_k = [x_k, \dots, x_{k-M+1}]$  为发送符号,  $n_k$  为  $k$  时刻均值为零方差为  $\sigma_{n,k}^2 = E\{n_k n_k^*\}$  的高斯白噪声。

### 2.3 接收端

均衡器和译码器通过外部信息的传递来进行迭代均衡译码。均衡器在处理完符号序列  $z_k$  后,输出软信息  $L_e(x_k)$  作为译码器的输入。然后,译码器通过计算输出关于数据符号的软信息  $L_c(x_k)$ , 并反馈到均衡器中,如此循环迭代多次,最终由译码器输出判决符号。信道与相位估计器为上述迭代均衡器提供横向滤波器系数矢量、各符号处信道参数的方差以及各个符号处的估计相位值。

### 2.4 软迭代信道估计器

信道与相位估计器,利用译码器反馈的软信息  $\bar{x}_k, v_k$ , 训练序列  $t_k$  以及接收序列  $z_k$  来进行信道估计与相位估计,并加入均衡器和译码器构成的迭代回路中,通过迭代来提升估计性能。从图1中可以看出,均衡算法依赖于信道估计与相位估计器提供的  $\hat{\mathbf{h}}_k, \hat{\sigma}_{e,k}^2$  和  $\hat{\varphi}_k$ , 信道与相位估计算法的性能对均衡算法的效果有着很大的影响,因此,本文提出一种针对水声信道 Turbo 均衡中的软迭代信道估计算法。

## 3 软迭代信道估计算法

### 3.1 软迭代快速自优化最小均方算法(FOLMS)横向滤波器系数估计算法

文献[7]给出了 FOLMS 信道均衡算法,本文在此基础上,将此算法用于横向滤波器抽头系数估计并采用软迭代技术来提高算法的性能。

接收到的符号如式(1),其估计值为

$$\bar{z}_k = \hat{\mathbf{h}}_{k-1}^T \bar{x}_k \exp\{j\hat{\varphi}_{k-1}\} \quad (2)$$

其中  $\bar{\mathbf{x}}_k = [\bar{x}_k, \dots, \bar{x}_{k-M+1}]^T$  为利用译码器反馈的软信息估计的软符号序列,  $\hat{\mathbf{h}}_{k-1}$  为  $k-1$  时刻横向滤波器的抽头系数。  $\hat{\varphi}_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的相位估计值。

横向滤波器的抽头系数更新方程为

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \hat{\mathbf{h}}_{k-1} + \mu_k \bar{\mathbf{x}}_k^* e_k \quad (3)$$

其中  $e_k = z_k - \bar{z}_k$ 。

$$\begin{aligned} \mu_k &= \mu_{k-1} - \beta \frac{\partial E | e_k |^2}{\partial \mu} \\ &= \mu_{k-1} - \beta \operatorname{Re} \left[ \bar{\mathbf{x}}_k^H \exp \{ -j \hat{\varphi}_k \} G_{k-1} e_k \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\beta$  为步长因子且

$$G_k = (I - \mu_k \bar{\mathbf{x}}_k^* \bar{\mathbf{x}}_k^T) G_{k-1} + \bar{\mathbf{x}}_k^* e_k \quad (5)$$

文献[7]指出, 步长因子  $\beta$  可以选择的范围非常大且性能基本没有损失。在实际应用当中, 为了系统的稳定性,  $\mu_k$  一般限定在其最大值与最小值之间。式(2), 式(3), 式(4)和式(5)构成软迭代横向滤波器抽头系数估计算法。

### 3.2 二阶锁相环相位估计器

文献[8]给出二阶锁相环在水声通信系统的鉴相器方程为

$$\hat{\varphi}_k = \hat{\varphi}_{k-1} + K_1 \theta_{k-1} + K_2 \sum_{i=0}^{k-1} \theta_i \quad (6)$$

式中  $\theta_k = \operatorname{Im} [\bar{z}_k z_k^*]$ ,  $K_1$  和  $K_2$  为二阶锁相环参数<sup>[9]</sup>,  $K_1 = 2\xi\omega_c$ ,  $K_2 = \omega_c^2$ ,  $\xi$  为环路阻尼系数,  $\xi > 1$  比  $\xi < 1$  系统更稳定, 但是对输入变化的响应迟缓, 为了平衡稳定性和响应速度, 二阶锁相环通常取  $\xi \approx 1/\sqrt{2}$ 。而  $\omega_c$  为归一化自然角频率, 例如  $\omega_c = 0.001$ , 则:  $K_1 = 1.4 \times 10^{-3}$ ,  $K_2 = 1 \times 10^{-6}$ 。

### 3.3 方差估计

由于信道估计算法采用软迭代技术, 因此方差  $\hat{\sigma}_{e,k}^2 = E(e_k e_k^*)$  没有一个封闭计算公式, 文献[10]给出一种一阶递归方程。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{e,k-1}^2 &= \mu e_k e_k^* + (1 - \mu) \hat{\sigma}_{e,k-1}^2, & \text{训练序列时} \\ \hat{\sigma}_{e,k-1}^2 &= \mu (e_k e_k^* - \hat{\mathbf{h}}_{k-1}^T \exp \{ j \varphi_{k-1} \} \mathbf{V}_k \hat{\mathbf{h}}_k^* \\ &\quad \cdot \exp \{ -j \varphi_{k-1} \}) + (1 - \mu) \hat{\sigma}_{e,k-1}^2, & \text{数据序列时} \end{aligned} \right\} (7)$$

其中  $\mathbf{V}_k$  为数据符号的协方差矩阵。  $\hat{\sigma}_{e,k}^2$  包含信道方差和数据符号的方差, 因此在求信道方差时要出去数据符号的方差。由于训练序列为已知序列, 因此  $\mathbf{V}_k = 0$ 。综合式(2)~式(7), 即是本文提出的软迭代信道估计算法。

## 4 仿真分析

本文软迭代信道估计算法的仿真信道基于时变横向滤波和相位旋转信道模型如式(1)。时变横向滤波的阶数为 5, 各抽头系数为独立的高斯随机过程,

每阶系数采用白噪声作为激励的一阶自回归模型产生。生成公式为

$$\mathbf{h}_k = (\rho \mathbf{h}_{k-1} + \sqrt{1 - \rho^2} [q_{k,0}, \dots, q_{k,4}]^T) \quad (8)$$

其中  $\rho = \sqrt{0.999}$  为衰落因子。  $q_{k,i}$  是均值为零方差为 1/5 的高斯随机变量, 因此可以保证信道冲击响应的平均能量为一。信道冲击响应初始化为  $\mathbf{h}_0 = [1, 1, \dots, 1]/\sqrt{5}$ 。对于相位旋转部分, 通过对以往海试数据处理分析可知, 由于船体随着波浪作类似简谐运动, 因此相位也呈现出类似的变化规律:

$$\varphi = \frac{2\pi A}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (9)$$

其中  $A$  为船体运动的最大振幅,  $\lambda$  为波长,  $T$  为周期。对于 7000 m 载人潜器的通信系统以及 20110730002719 海试数据的海况来说,  $A = 5$  m,  $\lambda = c/f_c = 1500/10000 = 0.15$  m, 其中,  $c$  为声速,  $f_c$  为载波频率,  $T = 10$  s。海试数据在进入均衡器之前通常需要对其进行线性多普勒补偿, 图 2 为式(9)经过线性多普勒补偿之后残留的相位变化曲线。本文选取变化幅度最大的一个相位变化曲线作为本文信道相位仿真模型, 并建模成正弦函数来简化仿真。

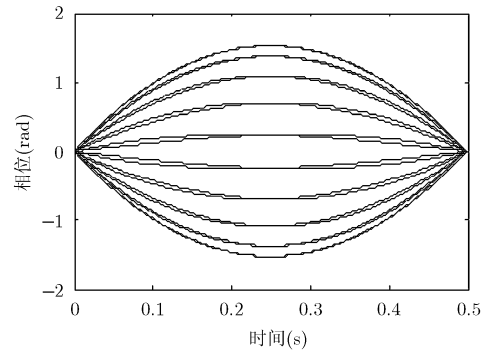


图2 线性多普勒补偿后相位变化曲线

仿真参数设置如下: 训练符号序列  $t_k$  和通过(23, 35)Turbo 码生成的数据符号序列一起构成发送符号序列  $\mathbf{x}_k$ 。一帧数据包含长度为 200 个符号的初始化训练序列, 以及 9 个长度为 150 的数据符号和长度为 50 的内插训练符号。每一个传输符号  $x_k$  的能量  $E_s$  都被归一化。

为了独立于 SISO 均衡器以及译码而单独进行软迭代信道估计与相位估计联合算法的仿真, 将译码器反馈的外部信息  $L_e(c_k)$  建模成均值为  $c_k \sigma_L^2/2$  以及方差为  $\sigma_L^2$  的高斯随机变量。随着  $\sigma_L$  的增大, 互信息也随之增大, 这表示译码器反馈的软信息也越可靠。每一种信道估计算法都产生长度为  $M = M' + 2 = 7$  的时变信道冲击响应的估计值  $\hat{\mathbf{h}}_k$  (因为在信道估计的时候并不知道信道冲击响应  $M'$  的确切

值), 方差的估计值  $\hat{\sigma}_e^2$  以及相位的估计值  $\hat{\varphi}_k$ 。本文的仿真在信噪比  $E_b/N_0 = 10$  dB 的条件下, 执行 1000 帧。

#### 4.1 硬迭代信道估计算法与软迭代信道估计算法比较

传统信道估计算法引入迭代并将译码器判决的符号作为信道估计的期望符号, 从而形成硬迭代信道估计算法。为了对比软迭代与硬迭代信道估计算法的性能, 图 3 给出了在  $\sigma_L = 1$  时硬迭代信道估计算法与软迭代信道估计算法比较结果, 下面从两个方面对图 3 所示的仿真结果加以分析。在相位估计方面, 不论是单独的二阶锁相环的相位估计值还是总的相位估计值(二阶锁相环相位估计值+横向滤波器抽头系数中的相位值), 软迭代信道估计算法都优于同等条件下的硬迭代信道估计算法。在信道方差  $\sigma_e^2$  估计方面, 不论是软迭代信道估计算法还是硬迭代算法, 当使用训练序列进行信道与相位估计时,  $\sigma_e^2$  值随着训练序列长度的增加而下降, 而当使用数据符号时,  $\sigma_e^2$  随之增大。但是通过对整帧数据的观察可知, 除去初始训练序列外, 在数据符号序列时, 软迭代信道估计算法估计的方差  $\sigma_e^2$  要明显优于硬迭代信道估计算法的方差估计值。

#### 4.2 有无相位估计器的信道估计算法比较

在无线电通信中, 信道估计算法相比于本文基于的时变横向滤波和相位旋转信道模型没有对信道相位的变化单独考虑。图 4 给出了基于这两种信道模型的信道估计算法的比较。

比较图 4(a)和图 4(b), 带相位估计器的软迭代信道估计算法的相位跟踪与估计能力要明显好于不带相位估计器的软迭代信道估计算法。而图 4(c)从估计信道方差估计的角度可以看出, 带相位估计器的软迭代信道估计算法比不带相位估计器的软迭代信道估计算法的方差小。

### 5 海试数据处理

为了验证本文提出的软迭代信道估计与相位估计联合算法对水声信道的估计性能, 本文对 7000 m

载人潜器 20110730002719 海试数据进行处理并分析。此数据的产生条件为: 通信距离为 5570 m, 潜水器在海底附近, 潜器深度为 5180 m, 声呐阵入水深度为 150 m, 潜器与声呐的水平距离为 2393 m, 垂直距离为 5030 m, 对数据处理时, 均衡以及信道估计算法参数设定如表 1。

7000 m 载人潜器传输 1 幅图像需要多帧数据, 每一帧数据中包含 200 个训练符号以及 1936 个数据符号。本文采用对每 1 帧单独处理方式。图 5(a)和图 5(c)为第 1 帧数据的估计信道方差以及估计相位。从图 5(a)中可以看出, 在迭代 1 次的情况下,  $\sigma_e^2$  处于 0.1 附近, 并且很稳定, 之所以  $\sigma_e^2$  没有趋于零, 是因为  $\sigma_e^2$  还包含传输信道本身噪声的方差。

图 5(b)为第 1~第 14 帧数据的估计信道方差, 由于每 1 帧都做单独处理, 因此变化规律和第 1 帧基本一致。图 5(d)给出了第 1~第 14 帧数据的估计相位, 其变化规律与图 2 基本一致, 但是有一点不同, 图 5(d)的相位最终没有回归到零, 分析原因有两个: (1)在对水声信道进行估计时, 本文基于时变横向滤波和相位旋转模型, 因此, 时变横向滤波器的抽头系数也会带有一定的相位信息。(2)图 2 的模型假定的是帧与帧之间是没有空隙的, 但是在 7000 m 载人潜器通信系统中, 帧与帧之间是有固定的时间空隙。这也一定程度上导致了图 5(d)中相位最终没有回归到零。

通过图 6(a), 图 6(b)以及图 6(c)的基于本文信道估计与相位估计算法的 MMSE-TE 的均衡输出星座图比较可以看出, 随着迭代次数的增加, 均衡器

表1 参数设定

编码方式	调制方式	均衡算法	信道估计与相位估计算法
Turbo	QPSK	基于先验信息 MMSE 的线性 均衡( $N=20$ )	软迭代 FOLMS +二阶锁相环 ( $M=20$ )

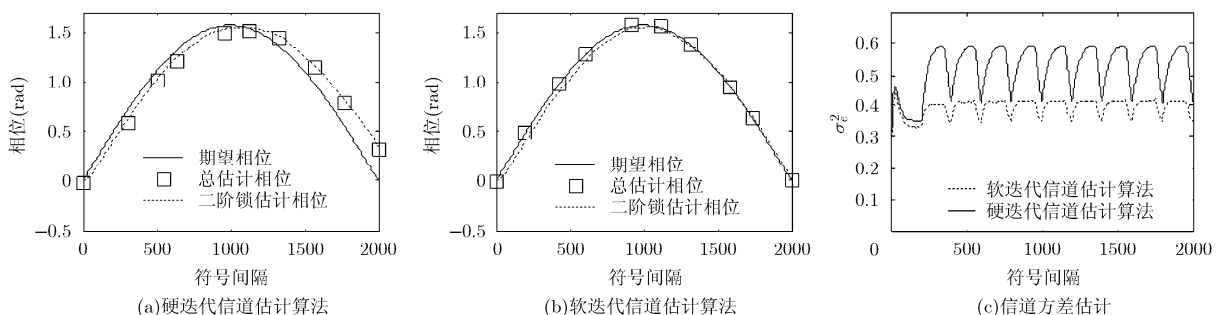


图3  $\sigma_L = 1$  时硬迭代与软迭代信道估计算法比较

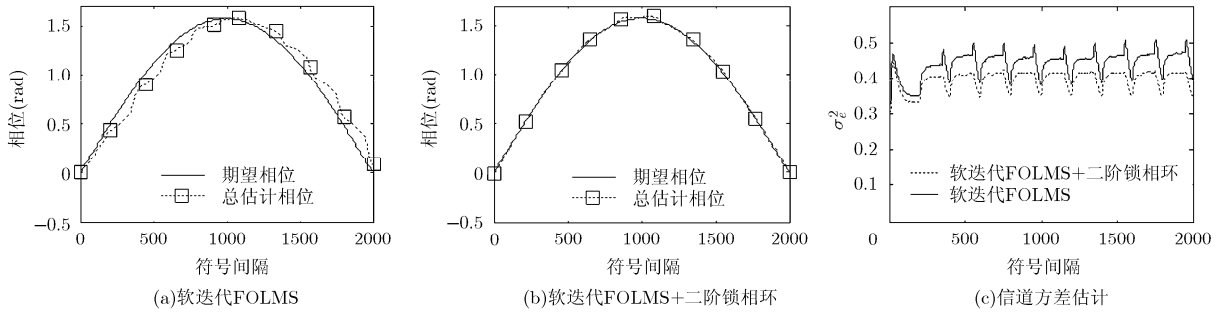


图 4  $\sigma_L = 1$  时有无相位估计器的信道估计算法比较

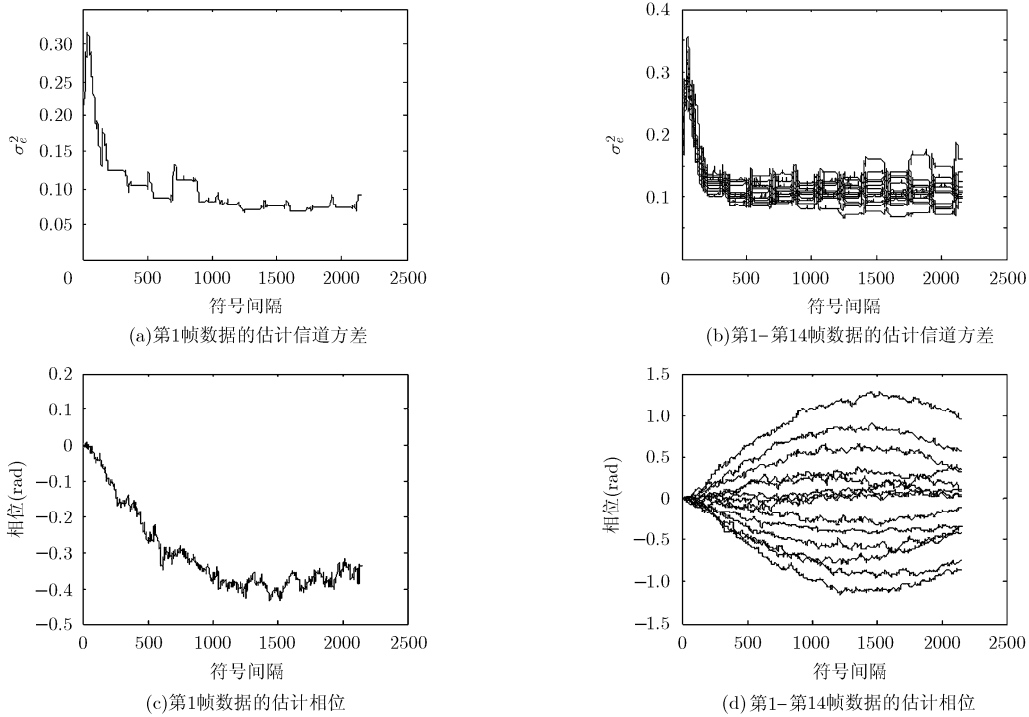


图 5 迭代 1 次时信道估计误差的方差与估计相位

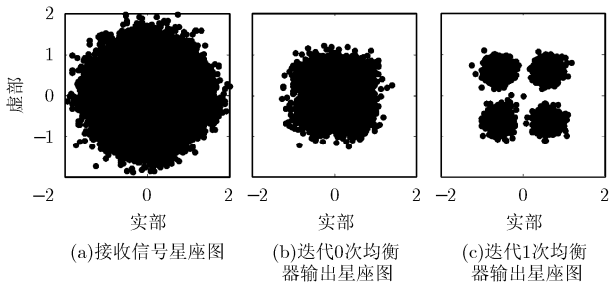


图 6 基于本文信道估计与相位估计算法的 MMSE-TE 的均衡输出星座图比较

的性能越好, 当迭代 1 次时, 均衡器输出信息经过 Turbo 译码器可以实现无差错译码。

### 6 结论

针对水声通信信道相位时变的特性, 本文在文

献[4]的基础上提出一种水声 Turbo 均衡中的软迭代信道估计算法。该算法采用软迭代快速自优化 LMS 跟踪和更新信道冲击响应, 以及二阶锁相环跟踪和估计相位变化, 软迭代信道估计算法相比于文献 [3-5]中提出的算法, 在不增加运算量的前提下, 改善了信道估计的收敛速度并提供良好的相位估计能力。由仿真结果可知, 本文提出的软迭代信道估计算法的信道估计与相位估计的性能明显优于硬迭代信道估计与相位估计联合算法, 在相位估计方面, 本文提出的软迭代信道估计算法的性能要远远优于不带相位估计器的软迭代信道估计算法。从海试数据处理中可以看出, 本文提出的算法能够为 Turbo 均衡器提供可靠的时变横向滤波器系数矢量、各个符号处的相位以及信道方差, 从而大大提高 Turbo 均衡器的性能。

## 参考文献

- [1] Tuchler M and Singer A C. Turbo equalization: an overview[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(2): 920-952.
- [2] Lou H and Xiao C. Soft-decision feedback turbo equalization for multilevel modulations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 186-195.
- [3] Nefedov N, Pukkila M, Visoz R, *et al.* Iterative data detection and channel estimation for advanced TDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(2): 141-144.
- [4] Otnes R and Tuchler M. Iterative channel estimation for turbo equalization of time-varying frequency-selective channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(6): 1918-1923.
- [5] Sandell M, Luschi C, Strauch P, *et al.* Iterative channel estimation using soft decision feedback[C]. *IEEE Global Telecommunications Conference*, Sydney, 1998, 6: 3728-3733.
- [6] Qi Chen-hao, Wang Xiao-dong, and Wu Le-nan. Underwater acoustic channel estimation based on sparse recovery algorithms[J]. *IET Signal Processing*, 2011, 5(8): 739-747.
- [7] Geller B, Capellano V, Brossier J M, *et al.* Equalizer for video rate transmission in multipath underwater communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1996, 21(2): 150-155.
- [8] Stojanovic M, Catipovic J A, and Proakis J G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1994, 19(1): 100-111.
- [9] Stephens D R. *Phase-Locked Loops for Wireless Communications: Digital, Analog, and Optical Implementations*[M]. New York: Springer, 2002: 30-34.
- [10] Otnes R. Improved receivers for digital high frequency communications: iterative channel estimation, equalization, and decoding (adaptive turbo equalization)[D]. [Ph.D. dissertation], Norwegian University of Science and Technology, 2002.
- 唐怀东: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为水声通信、信道均衡.
- 朱敏: 男, 1971年生, 研究员, 研究方向为海洋声学及其技术.
- 武岩波: 男, 1982年生, 副研究员, 研究方向为海洋声学及其技术.