

一种信道估计动态更新的逐幸存路径处理算法

黄建纯^{1,2}, 郭圣明¹, 贾宁¹, 郭中源¹, 郭海波³

(1. 中国科学院声学研究所水声环境特性实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190;
3. 国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心, 北京 100190)

摘要: 水声信道复杂的时变特性会影响水声通信系统的性能, 在设计时需要进行特殊考虑。利用逐幸存路径处理算法在无需插入训练序列的情况下即可同时进行信道估计和数据检测的特点, 提出了一种信道估计动态更新的算法。该算法通过比较当前时刻各条幸存路径的分支量度来判断信道变化的情况, 从而决定信道估计更新的时刻, 达到动态更新信道估计的目的。仿真结果表明, 所提出的基于信道估计动态更新的逐幸存路径处理算法能有效地跟踪信道变化的情况, 在时变信道中使用能获得较好的性能。

关键词: 时变信道; 逐幸存路径处理; 信道估计动态更新

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-03-0265-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.03.016

A per-survivor processing algorithm based on data-depended updating of channel estimation

HUANG Jian-chun^{1,2}, GUO Sheng-ming¹, JIA Ning¹, GUO Zhong-yuan¹, GUO Hai-bo³

(1. Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

3. Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, State Intellectual Property Office, Beijing 100190, China)

Abstract: Measures should be taken to overcome the time-variability of underwater acoustic channel, which will degrade the performance of underwater communication systems. Per-survivor processing is an approximation of maximum likelihood sequence estimation, and it provides a solution to carry out channel estimation and information detection at the same time without using training data. An algorithm is proposed in this paper that the channel estimations are updated depending on the received data. By comparing the current costs in different survivor paths, the variation of channel is measured, hence whether to update the channel estimation or not is decided. Simulation result shows that the per-survivor processing algorithm based on data-depended updating of channel estimation is a good solution to underwater communication system in time-varying channels.

Key words: time-varying channel; per-survivor processing; data-depended updating of channel parameters

0 引言

水声信道具有复杂的时变特性, 收发平台的运动以及传播环境的改变(如海面的波动、水中物体的移动、非均匀水团的运动等)都会导致信道结构的变化。如果这种变化比较剧烈, 在设计水声通信接收机的时候就需要进行特殊的考虑。

传统接收机利用训练序列进行信道估计, 通过改变相邻训练序列的时间间隔来控制信道估计更新的频率。如果信道估计更新的频率过低, 则无法

跟踪信道的变化; 更新的频率过高又会影响系统的有效传输速率。逐幸存路径处理(Per-Survivor Processing, PSP)^[1,2]是一种逼近最大似然序列估计(Maximum Likelihood Sequence Estimation, MLSE)的信号处理框架, 将传输系统看成一个用网格图表示的有限状态机, 对网格图中的每一条状态转移路径进行数据检测并做出判决。该算法在进行信道估计时会对所有的状态都进行计算, 信道估计使用的发射序列由已判决的幸存路径决定, 无需事先插入训练序列进行辅助, 从而实现了信道估计和数据检测同步进行, 在复杂时变信道中使用可以有效跟踪信道的变化。

PSP 在无线电通信中已经得到广泛的应用^[3-6], 但在水声通信中的应用并不多见。X. Xu 等人^[7]将该框架应用到水声直接序列扩频通信中, 并结合

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61102152)。

作者简介: 黄建纯(1983—), 男, 广东惠州人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 黄建纯, E-mail: jasonbarca@gmail.com

稀疏信道估计算法, 获得了优于传统 RAKE 接收机的性能。但是文中对信道估计的更新是固定时间间隔的, 在时变信道下性能有明显的下降。本文利用 PSP 可以同步进行信道估计和数据检测的优势, 针对时变信道, 提出了一种信道估计动态更新的算法, 该算法通过比较当前时刻各条幸存路径对应的分支量度来判断信道变化的情况, 当信道的变化大于设定阈值时则进行信道估计。仿真结果表明, 文中提出的算法在时变信道中有良好的性能。

1 信道与信号模型

系统采用直接序列扩频的通信方式, 假设选取的扩频序列为 $c(l), l=1, \dots, L_c$, 传输的符号序列为 $d(k)$, 则发射信号可以表示为

$$\tilde{x}(t) = \text{Re} \left\{ \left[\sum_k d(k) \sum_{l=0}^{L_c-1} c(l) q(t - kT_b - lT_c) \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (1)$$

其中: T_c 为码元长度; $T_b = L_c T_c$ 为一个扩频符号的长度; $q(t)$ 是脉冲成形器。考虑一个具有 N_p 条多径的时变频率选择性衰落信道, 其信道的时域冲激响应可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{p=1}^{N_p} A_p(t) \delta(\tau - \tau_p(t)) \quad (2)$$

每条径的幅度 $A_p(t)$ 和时延 $\tau_p(t)$ 都是随时间变化的, 于是接收信号为

$$\tilde{y}(t) = \tilde{x}(t) \otimes h(t, \tau) + \tilde{w}(t) = \sum_{p=1}^{N_p} A_p(t) \tilde{x}(t - \tau_p(t)) + \tilde{w}(t) \quad (3)$$

2 基于信道估计动态更新的逐幸存路径处理算法

逐幸存路径处理将传输系统看成一个有限状态机, 状态机的各个状态由所有可能的发射序列构成, 其长度与信道的符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)有关。假设信道的最大时延扩展为 τ_{\max} , 则 ISI 的长度为 $L = \lceil \tau_{\max} / T_b \rceil$ 。从而可以定义系统的状态机为 $\Lambda = \{d(1), \dots, d(L)\}$, 若系统的调制阶数为 M , 则一共有 $I = M^L$ 个状态。

以时间为序, 可以建立逐幸存路径处理的网格图, 如图 1 所示。图中横向为时间, 纵向列出了状态机的所有 I 个状态。由于状态机定义了所有可能的发射序列, 因此从 $k-1$ 时刻有 M 个状态 ($S_{n_1}, S_{n_2}, \dots, S_{n_M}$) 可以跳转到 k 时刻的状态 S_m 。用一个分支量度来代表每次状态跳转的代价, 可以定义为 $\gamma(S_{n_i}, S_m, k)$, 每条路径都有对应的累积路径量度,

记为 $\Gamma_i(S_m, k) = \Gamma(S_{n_i}, k-1) + \gamma(S_{n_i}, S_m, k)$, 其中 $\Gamma(S_{n_i}, k-1)$ 表示 $k-1$ 时刻状态 S_{n_i} 对应的累积路径量度。系统保留累积路径量度最小的那条跳转路径, 如图中的实线箭头所示, 此路径称之为幸存路径, 虚线箭头是被舍弃的路径, 称为竞争路径。逐幸存路径处理在每个时刻对每个状态都只保留对应的幸存路径, 从而 I 个状态对应了 I 条幸存路径, 当前时刻累积路径量度最小的那条幸存路径就是似然度最大的状态跳转路径, 从这条幸存路径的跳转情况中就可以确定系统的发射序列。

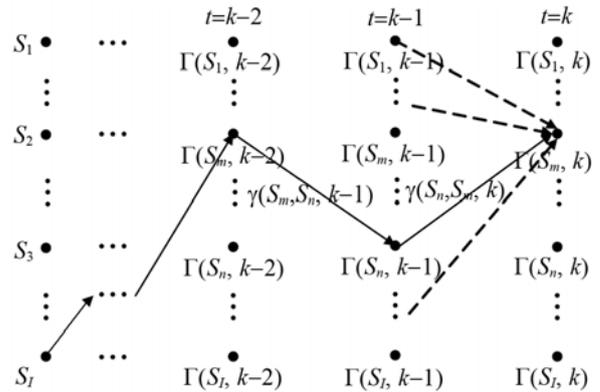


图 1 逐幸存路径处理的网格图
Fig.1 Framework of per-survivor processing

分支量度计算是逐路径处理的重要步骤, 系统根据实际接收信号 $z(k) = \{y((k-1)L_c + 1), \dots, y(kL_c)\}$ 及其估计值 $\hat{z}(S_n, S_m, k)$ 之间的差值来确定分支量度, 即

$$\gamma(S_n, S_m, k) = \|z(k) - \hat{z}(S_n, S_m, k)\|^2 \quad (4)$$

$\hat{z}(S_n, S_m, k)$ 表示利用 k 时刻从 S_n 到 S_m 的状态跳转信息计算出来的接收信号, 由发射符号和估计出来的信道参数进行计算, 发射符号可以由状态 S_m 对应的已判决的幸存路径确定, 而信道参数则从 $k-1$ 时刻的状态 S_n 对应的幸存路径中获得。估计出来的信道参数将沿着幸存路径的方向从前一时刻的状态向下一时刻的状态传递, 直至系统对信道估计进行更新。

系统利用稀疏信道估计算法^[8,9]对信道参数进行估计。该算法首先设定信道多径时延和多普勒系数的估计范围, 并对这两个参数的估计范围进行量化, 假设量化的结果如下: 时延范围为 $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{N_1}\}$, 多普勒系数范围为 $\{a_1, a_2, \dots, a_{N_2}\}$, 于是可以得到 $N_1 N_2$ 个时延和多普勒系数的组合。对于某一个确定的组合 $\{\tau_i, a_j\}$, 可得到对应的接收信号为 $x_{i,j}(S_m)$ (即为状态 S_m 对应的发射信号 $\tilde{x}(t)$ 经过时延 τ_i 处理并按多普勒系数 a_j 重采样后得到的列向量)。对于所有的时延多普勒系数组合一共有 $N_1 N_2$ 个对应的接收信号 $x_{i,j}(S_m)$, 于是可将实际的接收信号表示为

$$\mathbf{z}(S_m) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \varepsilon_{i,j} \mathbf{x}_{i,j}(S_m) \quad (5)$$

其中 $\varepsilon_{i,j}$ 是路径 $\{\tau_i, a_j\}$ 的复幅度。由于水声信道的多径数目是有限的，因此在这 $N_1 N_2$ 个幅度中大部分的数值都是 0，这是一个典型的稀疏向量估计问题。将字典中所有可能的路径写成矩阵形式如下：

$$\mathbf{A} = [\mathbf{x}_{1,1}(S_m), \dots, \mathbf{x}_{N_1,1}(S_m), \mathbf{x}_{1,2}(S_m), \dots, \mathbf{x}_{N_1, N_2}(S_m)] \quad (6)$$

于是可以将式(5)表示成以下形式

$$\mathbf{z}(S_m) = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{w} \quad (7)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为复幅度 $\varepsilon_{i,j}$ 构成的列向量，考虑信道多径个数的稀疏特点，对该向量的求解可以归结为以下优化问题

$$\min \|\boldsymbol{\varepsilon}\|_0 \quad \text{subject to} \quad \|\mathbf{z}(S_m) - \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 \leq \delta \quad (8)$$

用正交匹配跟踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)对式(8)进行求解^[10]可以得到 $\boldsymbol{\varepsilon}$ ，其中包含 N_p 个非零值 $\{\varepsilon_p | p=1, \dots, N_p\}$ ，由此可以得到接收信号的估计为

$$\mathbf{z}(S_m) = \sum_{p=1}^{N_p} \varepsilon_p \mathbf{x}_{p,j_p}(S_m) \quad (9)$$

由于以上算法估计信道时使用的发射序列可直接从已判决的幸存路径中获取，无需事先插入训练序列进行辅助，因此可以实现信道估计和数据检测同步进行，在复杂时变信道中应用时可以根据信道的变化情况随时更新信道估计。

PSP 处理框架结合稀疏信道估计的算法在静态信道和各条路径多普勒系数相同的信道下，具有优于传统 RAKE 接收机^[7]的性能。但是如果算法中信道估计的更新是固定间隔的，在时变信道下其性能会有所下降。本文利用 PSP 可同步进行信道估计和数据检测的优势，针对时变信道，提出了一种信道估计动态更新的算法。该算法通过比较 k 时刻各条幸存路径对应的分支量度来判断信道变化的情况，决定是否对当前的信道估计进行更新。当 k 时刻的所有 $I = M^L$ 个状态的幸存路径确定下来以后，将当前时刻所有状态对应的分支量度记为 $\{\gamma(S_{n_1}, S_1, k), \gamma(S_{n_2}, S_2, k), \dots, \gamma(S_{n_I}, S_I, k)\}$ 。在这 I 条幸存路径中，只有一条与实际的发射符号相同，当信道估计能准确描述当前信道时，其对应的分支量度(设为 $\gamma(S_{n_j}, S_j, k)$)应该是最小的，而其他不匹配路径的分支量度与其相差较大；如果信道估计不能准确描述信道的实际情况，则 $\gamma(S_{n_j}, S_j, k)$ 与其他分支量度之间的差值会减小。本文选取这个最小的分支量度与其余 $I-1$ 个分支量度平均值的比值作为判断的量度：

$$\delta_k = \frac{\gamma(S_{n_j}, S_j, k)}{\text{mean}\{\gamma(S_{n_i}, S_i, k) | i=1, \dots, I; i \neq j\}} \quad (10)$$

当 δ_k 小于设定的阈值时，说明估计信道能正确描述信道的特性，无需进行更新；当 δ_k 大于设定的阈值时，则说明信道已发生变化，之前估计的信道不再适用，需要重新估计信道，从而实现根据接收信号的情况对信道估计进行动态更新。

3 系统仿真

仿真中选用中心频率为 6 kHz 的信号，有效带宽为 2 kHz，采用 BPSK 调制，扩频因子 $L_c=31$ ，因此符号周期为 $T_b=15.5 \text{ ms}$ 。每帧信号长度为 1.55 s，包含 100 个符号。多径信道如式(2)所示，多径个数 N_p 设为 5，多径时延和幅度都是时变的，下面将根据不同情况对这两个参数进行不同的设置。仿真首先设定信道参数满足的分布条件，根据参数分布随机选取 5 条多径的具体取值，得到某个满足条件的信道实例，仿真是针对信道实例进行的，对若干个实例的仿真结果进行平均得到最终的误码率曲线。为了与信道估计动态更新算法(以下简称动态更新算法)的性能对比，仿真中还提供了每 20 个符号更新一次信道估计时系统的性能，在这种情况下信道估计更新的频率是固定的(以下简称固定更新算法)。

3.1 多径时延时变的情况

假设信道的幅度不随时间变化，多径时延随时间线性变化，即 $\tau_p(t) = \tau_p - at$ ，则信道的时域冲激响应可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{p=1}^{N_p} A_p \delta(\tau - \tau_p + a_p t) \quad (11)$$

在仿真中，假设每条径的时延变化情况(即多普勒系数 a_p)不一样，于是不同多径被拉伸或者压缩的程度就不同，从而造成了信道结构随时间的变化。C. R. Berger 等人^[9]在进行信道估计时进行了这样的假设，在对海试数据的处理中得到了优于传统算法的结果，由此也可见这种假设具有一定的合理性。几个主要参数按如下分布取值：多径的幅度 A_p 服从高斯分布；固定时延 τ_p 在 $[0, \tau_{\max}]$ 之间服从均匀分布， τ_{\max} 设为 25 ms，从而确定符号间干扰 $L=2$ ，网格的状态数为 $M^L=4$ ； a_p 则在 $[-v_{\max}/c, v_{\max}/c]$ 之间服从均匀分布， v_{\max} 的取值为 4 m/s 和 1 m/s，分别代表信道快速变化和缓慢变化两种情况，得到的性能曲线如图 2 所示。动态更新算法可以根据信道变化的快慢情况来确定信道估计更新的频率，并且在遇到突发错误以后能快速纠正过来，不会造成后续符号的连环错误，因此其性能要优于固定更新算

法的性能。从图 2 中可以看出,在慢变信道下,动态更新和固定更新的算法的性能相差不大,当误码率小于 10^{-3} 时所需信噪比仅相差 1 dB 左右;在快变信道下,两种算法的性能出现较大的区别,动态更新算法有较好的性能,其变化趋势与慢变信道的情况大致相同,但固定更新算法的性能则有明显的损失,信噪比为 0 dB 时误码率为 2×10^{-3} ,与动态更新算法相比高了一个数量级,且出现了错误平台的情况。

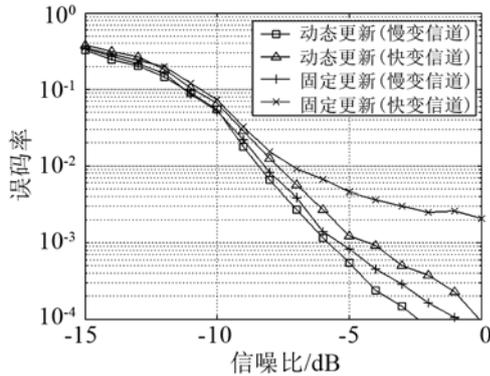


图 2 多径时延随时间变化时算法的性能
Fig.2 System performance with a varying multipath delay

3.2 多径幅度时变的情况

考虑信道的多径时延不随时间变化,信道的幅度为复值,假设其相位以周期 T_p 变化,即 $A_p(t) = A_p e^{-j2\pi t/T_p}$,则信道的时域冲激响应可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{p=1}^{N_p} A_p e^{-j2\pi t/T_p} \delta(\tau - \tau_p) \quad (12)$$

在仿真中,多径时延 τ_p 在 $[0, \tau_{\max}]$ 之间服从均匀分布, τ_{\max} 设为 25 ms;幅度模值 A_p 服从高斯分布,相位变化周期 T_p 的取值设为 2 s 和 6 s,分别代表信道快速变化和缓慢变化两种情况,得到的性能曲线如图 3 所示。由图 3 可见,在慢变信道的情况下,两种算法的性能几乎一致,看不出什么差别;在快变信道的情况下,固定更新算法的性能有一定

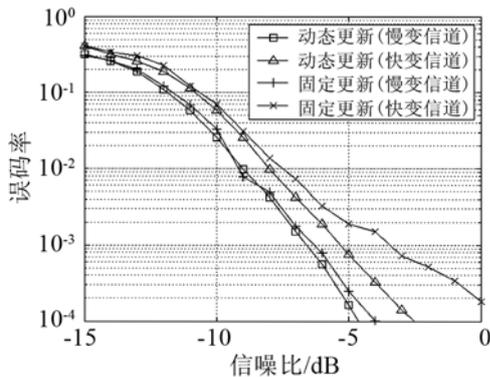


图 3 多径幅度随时间变化时算法的性能
Fig.3 System performance with a varying multipath amplitude

的损失,当误码率为 10^{-3} 时,两者所需的信噪比相差 2 dB,而且这个差距随误码率的降低也越来越大。

3.3 多普勒系数随时间变化的情况

假设信道的多普勒系数随时间线性变化,则多径时延表示为 $\tau_p(t) = kt^2/2 + \tau_p$,此时多普勒系数的初始值为 0,且随时间变化的斜率为 k ,信道的时域冲激响应可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{p=1}^{N_p} A_p \delta(\tau - \tau_p - kt^2/2) \quad (13)$$

这种信道变化容易在收发平台之间存在加速运动的情况下出现。仿真中 A_p 服从高斯分布; τ_p 在 $[0, \tau_{\max}]$ 之间服从均匀分布, τ_{\max} 设为 25 ms;多普勒系数随时间变化的斜率 k 的取值为 $1/1500 \text{ s}^{-1}$ 和 $4/1500 \text{ s}^{-1}$,分别代表信道随时间缓慢变化和快速变化的两种情况,得到的性能曲线如图 4 所示。

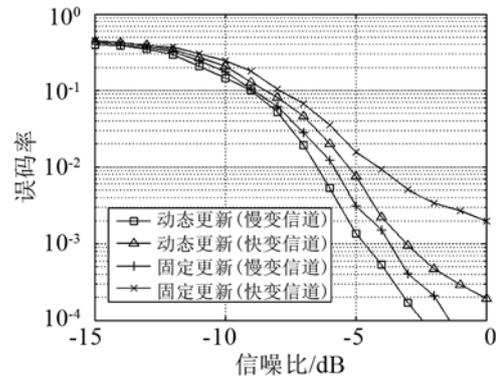


图 4 多普勒系数随时间变化时算法的性能
Fig.4 System performance with a varying Doppler coefficient

由图 4 可见,当信道缓慢变化时,系统保持较好的性能,信道估计固定更新和动态更新两种算法的区别并不大,当误码率在 10^{-3} 到 10^{-4} 之间的条件下,两者所需的信噪比大致相差 1 dB 左右。当信道快速变化时,两者的性能差别则较为明显,当信噪比为 0 dB 时,动态更新算法的误码率为 2×10^{-4} ,而固定更新频率算法的误码率则为 2×10^{-3} ,两者相差一个数量级。

从以上三组仿真结果我们可以得到以下结论:当信道缓慢变化时,动态更新算法和固定更新算法的性能相近,说明两者都能很好地跟踪信道变化的情况;当信道快速变化时,动态更新算法有较好的性能,其性能曲线的变化趋势与信道缓慢变化时大致相同,保持了瀑布状的变化趋势,而固定更新算法的性能则出现了较大的损失,甚至出现了错误平台的现象,可见此时信道估计的更新速度无法跟踪信道的变化。通过两者的比较,可见动态更新算法在时变信道中应用能很好地跟踪信道的变化,具有

较大的优势。

4 结论

水声通信中收发平台的运动和传播环境的变化造成信道结构的时变特性，影响水声通信系统的性能，需要在设计时对其进行特殊考虑。本文利用PSP无需插入训练序列就可以同时进行信道估计和数据检测的特点，提出了信道估计动态更新的算法，该算法通过比较当前时刻各条幸存路径对应的分支量度来判断信道变化的情况，从而决定信道估计更新的时刻，达到动态更新信道估计的目的。本文对该算法在时变信道下的性能进行了仿真，分别选取了多径时延、多径幅度和多普勒系数随时间变化等三种时变信道，并将结果与每20个符号进行一次信道估计更新时的性能进行对比。

仿真结果表明，当信道缓慢变化时，动态更新算法和固定更新算法的性能没有明显的区别；当信道快速变化时，固定更新算法的更新速度无法跟踪上信道变化的情况，因此性能出现了明显下降，而动态更新算法则保持了较好的性能，从而证明了其在时变信道中应用的优势。

参 考 文 献

- [1] Raheli R, Polydoros A, Tzou C K. Per-survivor processing: a general approach to MLSE in uncertain environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2): 354-364.
- [2] Zhu Z, Sadjadpour H R. An adaptive per-survivor processing algorithm[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(11): 1716-1718.
- [3] Tzou C K, Raheli R, Polydoros A. Applications of per-survivor processing to mobile digital communications. Proceeding of GLOBECOM Communications[C]// Theory Mini-Conf. '93, Nov. 1993: 77-81.
- [4] 薛义生, 朱雪龙. 基于双向逐幸存路径处理的空时格形码软判决自适应解码[J]. 电子学报, 2000, 28(11): 80-82.
XUE Yisheng, ZHU Xuelong. Soft-decision adaptive decoding of space-time trellis code based on bi-directional Per-survivor-Processing[J]. ACTA Electronica Sinica, 2000, 28(11): 80-82.
- [5] 向倩, 孙洪, 茹国宝, 等. 一种短波信道自适应均衡算法的研究[J]. 电波科学学报, 2005, 20(2): 212-215.
XIANG Qian, SUN Hong, RU guobao, et al. Adaptive receivers for digital transmissions over HF channels[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(2): 212-215.
- [6] 茹国宝, 张永强, 杨浩, 等. 一种用于无线信道的逐幸存路径处理均衡器[J]. 信息与电子工程, 2005, 3(1): 6-9.
RU Guobao, ZHANG Yongqiang, YANG Hao, et al. Equalization Based on Per-Survivor Processing for Wireless Channel[J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(1):6-9.
- [7] Xu X, Zhou S, Morozov A K, et al. Per-survivor processing for underwater acoustic communications with direct-sequence spread spectrum[J]. J. Acoust. Soc. Am. 2013, 133(5): 2746-2754.
- [8] Li W C, Preisig J C. Estimation of rapidly time-varying sparse channels[J]. IEEE Journal on Oceanic Engineering, 2007, 32(4): 927-939.
- [9] Berger C R, Zhou S, Preisig J, et al. Sparse channel estimation for multicarrier underwater acoustic communications: From subspace methods to compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1708-1721.
- [10] Tropp J A, Gilbert A. C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.