

地空通信中基于贪婪算法的 SC-FDE 系统稀疏信道估计

王宁, 郭英, 张东伟, 张坤峰, 李红光

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 针对在地空频率选择性衰落信道中, 信道冲激响应具有时域稀疏特性的情况, 提出了基于贪婪算法的单载波频域均衡(SC-FDE)系统稀疏信道估计方法。Chu序列是SC-FDE中常用的导频序列, 对其进行分析并证明了将Chu序列进行循环移位所构造的导频矩阵满足RIP条件, 将导频矩阵作为测量矩阵, 把地空信道估计问题建模为稀疏重构模型, 采用贪婪算法中的OMP和CoSaMP算法对信道进行稀疏重构, 仿真验证了所得信道估计较传统最小二乘(LS)信道估计方法更加准确。在相同的训练序列长度和信道环境下, 利用所得信道估计对接收信号进行最小均方误差(MMSE)均衡, 蒙特卡罗仿真结果表明, 所提方法与传统LS信道估计方法相比, 系统误码性能提高2~3 dB。

关键词: 稀疏信道估计; 地空通信; 单载波频域均衡; 贪婪算法

中图分类号: TN912.32

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)09-0055-05

Greedy Algorithm Based Sparse Channel Estimation for SC-FDE System in Air-Ground Communication

WANG Ning, GUO Ying, ZHANG Dong-wei, ZHANG Kun-feng, LI Hong-guang

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In the air-ground frequency selective fading channel, the channel impulse response has the time-domain sparse characteristic. In the light of the discovery mentioned above, the greedy algorithm based sparse channel estimation method for Single-Carrier Frequency-Domain Equalization (SC-FDE) system is proposed in this paper. Chu sequence, the pilot sequence commonly used in SC-FDE is analyzed, and it is proven that the pilot matrix constructed by the cyclic shift of Chu sequence has satisfied RIP condition. Thus, the pilot matrix is used as a measurement matrix, the air-ground channel estimation issue is modeled as a sparse reconstruction model, and sparse reconstruction of the channel is performed with OPM and CoSaMP algorithms of the greedy algorithm. It is verified by simulation that: compared with the traditional Least-Squares (LS) channel estimation method, the obtained channel estimation is of higher accuracy. With the same training sequence length and channel environment, the Minimum Mean Square Error (MMSE) equalization of received signal is performed by using the obtained channel estimation. The Monte-Carlo simulation results show that compared with the traditional LS channel estimation method, the proposed method can improve the system error performance by 2~3 dB.

Key words: sparse channel estimation; air-ground communication; single-carrier frequency-domain equalization; greedy algorithm

0 引言

随着地空通信对高速数传的需求日益迫切, 要求

地空通信系统必须具备较高数据传输能力。近年来兴起的单载波频域均衡 (Single-Carrier Frequency-Domain Equalization, SC-FDE) 系统采用单载波系统的传输方式及多载波系统的信号处理方法, 能够有效提高传输速率, 同时可避免多载波峰平比 (PAPR) 高、对频偏敏感等缺陷^[1]。文献[2-3]介绍了 SC-FDE 技术在地空传输系统中的应用, 研究表明在高速传输过程中 SC-FDE 系统具有良好的信息传输可靠性。

收稿日期: 2014-08-11

修回日期: 2015-06-04

基金项目: 通信网信息传输与分发技术重点实验室基金 (ITD-U12003/K1260009)

作者简介: 王宁 (1989—), 男, 陕西榆林人, 硕士生, 研究方向为地空通信及通信信号处理技术。

在 SC-FDE 系统中,信道估计的准确与否直接影响均衡性能。传统的 SC-FDE 系统中采用基于最小二乘(Least-Squares, LS)准则的信道估计算法,该算法原理简单,但在低信噪比传输环境中误差较大。近年来兴起的压缩感知理论开辟了一种全新的信号采集处理算法,广泛应用于信号处理的各项领域。文献[4]介绍了压缩感知技术在稀疏多径信道估计中的应用,研究结果显示其具有良好的估计性能;文献[5]介绍了基于压缩感知的 MIMO-OFDM 水声通信信道估计算法;文献[6]介绍了水声单载波分块传输中基于压缩感知的稀疏信道估计算法,研究结果表明新的压缩感知信道估计算法较传统的 LS 信道估计算法更加准确。

地空无线信道可视为由一个直射波成分和多个散射波成分组成的多径信道,即 Rice 信道模型^[7],因此其信道冲激响应具有时域稀疏特性,本文提出了基于贪婪算法的 SC-FDE 稀疏信道估计算法,研究结果表明利用该算法所得信道估计结果更加准确。

1 SC-FDE 地空通信系统

基本的 SC-FDE 系统结构如图 1 所示。

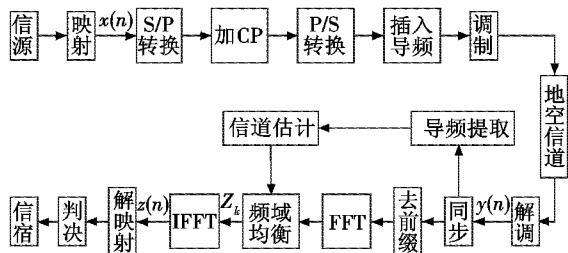


图 1 单载波频域均衡系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of SC-FDE system structure

对照图 1,系统具体信号流程如下所述。

1) 发送端信号流程。输入信号通过正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keyin, QPSK)映射后进行串并转换,转换后并行的 N 点长的数据块即为接收端进行频域均衡的数据块,之后插入长度为 N_s 的循环前缀以降低块间串扰,至此,构造出了 $N + N_s$ 长的传输符号,再进行并串转换将信号转换为串行信号,插入导频信号后将其调制再送入信道。

2) 接收端信号流程。接收端解调同步后分成两部分处理:其一是提取导频用于信道估计;其二是对每个传输符号去掉循环前缀后将其变换到频域,以信道估计获得的信道响应结果对该频域信号进行均衡,之后再恢复到时域进行解映射,判决后就得到了系统传输的信息。

3) 数学描述。设信源输出每 N 个映射后的码元 $x(n)$ 组成一个传输符号,假设发送信号的平均功率为

P ,信道冲激响应为 $h(n)$,接收端去掉循环前缀后得到的信号可以表示为

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i-n)h(i) + v(n) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: $x(i-n)$ 为发送信号; $h(i)$ 为信号冲击响应; $v(n)$ 为加性高斯白噪声,且 $E\{v(n)\} = 0, D\{v(n)\} = \sigma^2$,其中, E 为信号期望, D 为信号方差, σ^2 为噪声能量。经过快速傅里叶变换(FFT)变换到频域后,接收信号 Y_k 可表示为

$$Y_k = X_k H_k + V_k \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中: X_k 为发射信号; H_k 为信道频域响应; V_k 为噪声的频谱。频域均衡后得到接收信号 Z_k ,则

$$Z_k = W_k X_k H_k + W_k V_k \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中, W_k 为频域均衡系数。采用最小均方误差准则(MMSE)进行均衡,即

$$W_k = \frac{\hat{H}_k^*}{\hat{H}_k \hat{H}_k^* + \sigma^2/P} \quad (4)$$

经过快速傅里叶逆变换(IFFT)后信号为

$$z(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W_k X_k H_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W_k V_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

2 基于稀疏重构的信道估计方法

2.1 稀疏信道模型

信号经过地空信道衰落后的包络幅值一般服从莱斯分布,即信息经过地空衰落信道后,接收信号由直射路径信号与多个多径信号叠加而成,那么长度为 N 的多径信道 $\mathbf{h} = (h(0) h(1) \dots h(N-1))^T$ 的时域冲激响应可表示为

$$h(i) = \sum_{j=1}^J c_j \sigma(i - d_j) \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (6)$$

式中: J 为多径信道的路径个数; c_j 和 d_j 分别为第 j 条路径上的复增益和延时^[8]; σ 为冲击函数。若 $J \ll N$ 时,则信道呈明显的稀疏性。

2.2 信道估计

SC-FDE 系统中通常利用导频信号进行信道估计,导频一般采用具有时频域恒幅特性和良好自相关性的 UW(Unique Word)序列,IEEE802.16 协议规定的 UW 是 Frank_Zadoff 序列和 Chu 序列^[9]。本文选取 Chu 序列作为导频信号进行分析,设发送的导频信号为 $\mathbf{x} = (x(0) x(1) \dots x(N-1))^T$,信道冲击响应为 $\mathbf{h} = (h(0) h(1) \dots h(N-1))^T$, N 表示信道时域采样点数,由于信道具有稀疏特性,其中仅有 J 个取值较大,其他各点取值趋近于零,且 $J \ll N$,则式(1)用矩阵形式表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{v} \quad (7)$$

式中: \mathbf{v} 为噪声向量; \mathbf{X} 为 $N \times N$ 的发射导频信号矩

阵,即

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x(0) & x(-1) & \cdots & x(-N+1) \\ x(1) & x(0) & \cdots & x(-N+2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \cdots & x(0) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

若导频采用 Chu 序列,则所发送的 Chu 序列(训练序列)为

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{-j2\pi n^2}{N}\right) \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (9)$$

2.2.1 基于 LS 准则信道估计方法

LS 信道估计方法是单载波频域均衡系统中最常用的一种信道估计方法。在式(7)中,根据 LS 准则得到的信道估计值可表示为

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}} = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{y} \quad (10)$$

在不同信噪比下,定义 SC-FDE 地空通信系统中信道估计归一化均方误差 E_{NMSE} 为

$$E_{\text{NMSE}} = \frac{E \|\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}} - \mathbf{h}\|_2}{E \|\mathbf{h}\|_2} \quad (11)$$

式中, E 为均值。将式(10)代入式(11),则基于 LS 准则的信道估计误差为

$$E_{\text{NMSE,LS}} = \text{tr}(E((\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}} - \mathbf{h})(\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}} - \mathbf{h})^H)) = \sigma^2 \text{tr}((\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1}). \quad (12)$$

2.2.2 基于稀疏重构的信道估计方法

贪婪算法是一种典型的稀疏重构算法,该算法通过逐步选取对压缩测量值产生最大影响的列向量来实现对原始信号的最优估计。本文主要研究基于贪婪算法中典型的正交匹配追踪(OMP)算法及其改进的压缩采样匹配追踪(CoSaMP)算法的信道估计方法。将上文中的 \mathbf{X} 作为测量矩阵, $\mathbf{y} = (y(0) \ y(1) \ \cdots \ y(N-1))^T$ 作为观测向量,通过稀疏重构的方法在 \mathbf{X} 中选取最少的列向量作为基向量,找到能够对观测向量 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$ 进行线性表示的系数向量 $\hat{\mathbf{h}} \in \mathbb{C}^N$ ($M \leq N$),此为信道响应的估计值,即

$$\min_{\Gamma} \{ |\Gamma| : \mathbf{y} = \sum_{i \in \Gamma} \mathbf{x}_i \mathbf{h}_i \} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

式中: Γ 为支撑集; \mathbf{x}_i 为压缩测量矩阵的第 i 列向量。

根据压缩感知理论,测量矩阵需满足 RIP 条件,即对任意稀疏度为 J 的稀疏信号 s 和常数 $\delta_j \in (0, 1)$,测量矩阵 \mathbf{X} 需满足

$$(1 - \delta_j) \|s\|_2 \leq \|\mathbf{X}_r s\|_2 \leq (1 + \delta_j) \|s\|_2 \quad (14)$$

式中, $\Gamma \subset \{1, 2, \dots, N\}$, $|\Gamma| \leq J$, \mathbf{X}_r 是由测量矩阵 \mathbf{X} 中索引 Γ 对应的相关列构成的矩阵,可记为 $\mathbf{X} \in \text{RIP}(J, \delta_j)$ 。

根据文献[10],任意 $N \times N$ 矩阵 $\mathbf{X} \in \text{RIP}(J, \delta_j)$ 等价于

$$\max_{\substack{\Gamma \subset \{1, 2, \dots, N\} \\ |\Gamma| \leq J}} \|\mathbf{X}_r^H \mathbf{X}_r - \mathbf{I}_r\|_2 \leq \delta_j \quad (15)$$

由上述可知 $\mathbf{X}_r^H \mathbf{X}_r = \mathbf{I}_r$,显然有 $\|\mathbf{X}_r^H \mathbf{X}_r - \mathbf{I}_r\|_2 = 0$,对于任意常数 δ_j ,式(15)恒成立,因此 \mathbf{X} 满足 RIP 条件。

1) OMP 算法。OMP 算法的思想是:将残差向量在字典上进行线性分解,残差初始值即为观测向量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$,字典即为测量矩阵 \mathbf{X} , \mathbf{X} 中所有列向量具有归一化的模,重构允许误差为 ϵ 。每次迭代都从字典的列向量中选取一个与残差相关系数最大的列向量,即残差在该列向量上的投影最大,可以表示为

$$\lambda_k = \underset{i_k}{\text{argmax}} \langle \mathbf{r}_k, \mathbf{x}_{i_k} \rangle \mathbf{x}_{i_k} \quad (16)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示两个向量的内积;向量 \mathbf{x}_{i_k} 为 \mathbf{X} 中第 i_k 个列向量, $i_k = 1, 2, \dots, N$ 。

对残差值做更新

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_{k-1} - \lambda_k \quad (17)$$

计算信道估计值 $\hat{\mathbf{h}}_k, \hat{\mathbf{h}}_k$ 满足最小优化问题

$$\min_{\hat{\mathbf{h}}_k} \|\mathbf{X} \hat{\mathbf{h}}_k - \mathbf{r}_{k-1}\|_2^2 \quad (18)$$

式(18)是一个二次函数最小化问题,求目标函数对 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 的微分,令导数为零即可得到,即

$$\mathbf{X}^H (\mathbf{X} \hat{\mathbf{h}}_k - \mathbf{r}_{k-1}) = -\mathbf{X}^H \mathbf{r}_k = 0 \quad (19)$$

为使式(19)成立,需要令 \mathbf{X} 中列向量与残差 \mathbf{r}_k 正交,此即正交匹配的概念。停止迭代的条件为 $\|\mathbf{r}_k\|_2^2 < \epsilon$,或者迭代次数大于压缩采样序列的长度,否则重复执行上述步骤。

2) CoSaMP 算法。对于 2.2 节中地空信道的系统模型,若感知矩阵 \mathbf{X} 满足约束等距条件,对于 k 稀疏的信道 \mathbf{h} ,则在 Euclidean 范数空间上,观测向量 $\mathbf{u} = \mathbf{X}^* \mathbf{X} \mathbf{h}$ 的任意 S 项对应于 \mathbf{h} 的 S 项,则可将向量 \mathbf{u} 看作 \mathbf{h} 的代替。CoSaMP 算法首先选择观测向量中最大的 $2S$ 项,并将这些项的索引位置集合并到已有的支撑集中,然后通过最小二乘准则来得到估计值 \mathbf{a} 。

基于 CoSaMP 算法的信道估计方法实现流程为输入测量矩阵 \mathbf{X} ,观测向量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$,信号稀疏度 s ,允许误差 ϵ 。具体流程如图 2 所示。

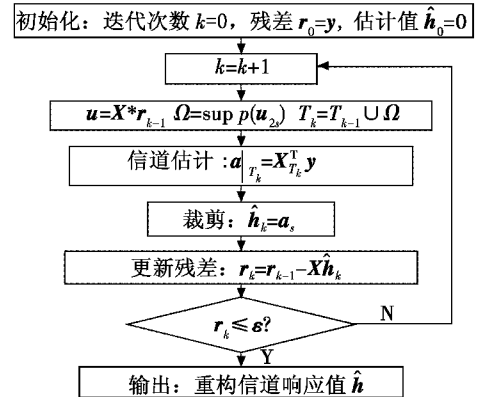


图2 CoSaMP 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of CoSaMP

3 仿真与分析

实验 1 各重构算法重构概率。

分别采用 OMP 算法和 CoSaMP 算法对长度 $M = 100$ 的信号进行重构,当稀疏度 k 分别为 5 和 10 的时候,考察信号采用不同长度的压缩采样值进行信号重构的重构概率。实验中信号幅度为 1,所加高斯白噪声方差 σ^2 为 0.1,重构允许误差为 1×10^{-5} ,每个压缩采样序列长度下进行 200 次实验,并将重构概率平均。仿真结果如图 3 所示,实验表明,在相同的压缩采样序列长度下 CoSaMP 算法比 OMP 算法具有更好的重构性能,且整体来看,CoSaMP 算法具有更好的稳定性和鲁棒性。

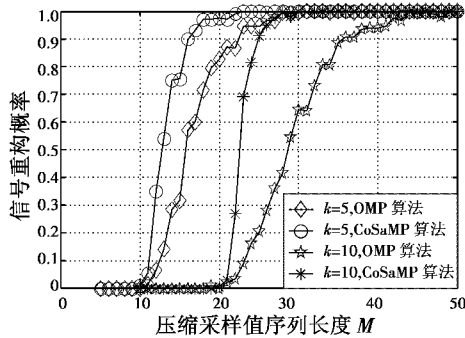


图 3 信号重构概率与采样序列长度关系
Fig. 3 Relationship of signal reconstruction probability and sampling sequence length

实验 2 不同算法下的信道估计对比。

信道时域采样点数为 96,路径为 4 条,功率衰减分别为 0 dB,5 dB,10 dB,15 dB,各径延时分别为 0 μs , 1.25 μs , 2.5 μs , 3.75 μs ,不受噪声影响的多径信道冲击响应如图 4a 所示。压缩采样序列长度为 96,图 4b、图 4c、图 4d 分别为 OMP, CoSaMP, LS 算法下信噪比为 0 dB 时所估计得到的信道冲击响应。实验结果表明 CoSaMP 算法估计性能最好,其次为 OMP 算法,而 LS 信道估计算法性能最差。

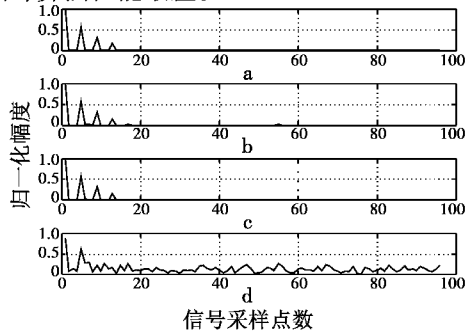


图 4 不同估计算法得到的信道冲击响应
Fig. 4 Channel impulse response of different estimation algorithms

图 5 所示为各算法下的信道估计 NMSE。实验表明,在低信噪比条件下,基于稀疏重构的信道估计算法相比于 LS 算法性能有明显提升,在高信噪比条件下,各算法性能相近。

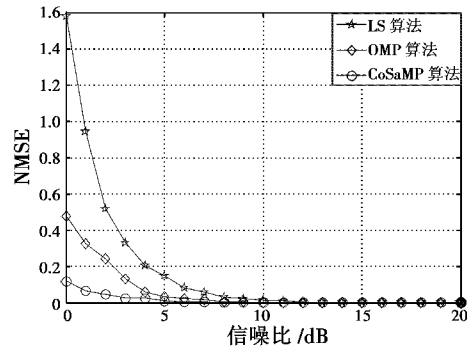


图 5 信道估计归一化均方误差
Fig. 5 Normalized mean square error of channel estimation

实验 3 系统误码率统计。

基于 IEEE802.16 推荐的帧格式,导频由两个长度为 96 的 UW(本文采用 Chu 序列)组成,每帧包含 10 个数据块,每个数据块包含 224 个信息码元和一个长 32 的 UW 序列,其作用与循环前缀相同,目的是降低符号间串扰,FFT 运算点数为 256。

系统帧结构如图 6 所示。

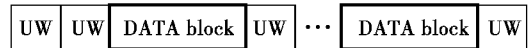


图 6 系统帧结构

Fig. 6 The structure of system frame

码元速率为 8 MHz,采样频率为 32 MHz,相移为 $\pi/4$,调制方式为 QPSK 调制。

信道模型为:1 条主径,3 条延迟径,噪声为加性高斯白噪声,各径时延及功率衰减见表 1。

图 7 为在 MMSE 均衡准则下,基于各信道估计算法的系统误码率随信噪比变化曲线图。由图可看出,采用 CoSaMP 算法进行信道估计所得的系统误码性能最好,相比于传统的 LS 算法有 3 dB 左右的性能提升,OMP 算法次之,相比于 LS 算法有 2 dB 左右的性能提升。

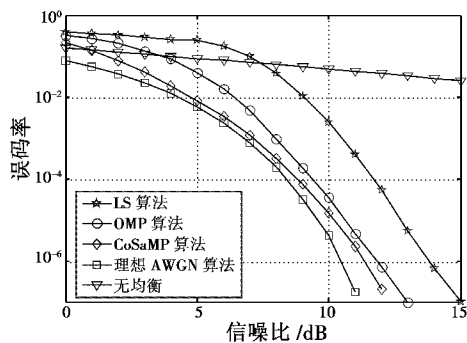


图 7 不同算法误码率

Fig. 7 BER performance of different algorithms

表1 多径分布

Table 1 Multipath distribution

径编号	时延/ μs	平均相对功率/dB
1	0	0
2	1.25	-5
3	2.50	-10
4	3.75	-15

4 结论

针对地空信道的时域稀疏特性,本文在 SC-FDE 系统中提出了基于贪婪算法的信道估计算法,分析证明了基于 Chu 序列的导频矩阵满足 RIP 条件,以其作为测量矩阵,将地空信道估计问题构造为稀疏重构模型,采用贪婪算法中的 OMP 算法和 CoSaMP 算法进行信道估计,仿真验证了基于稀疏重构的信道估计算法与传统的 LS 算法相比,信道估计更加准确,系统误码性能有明显改善。

参考文献

- [1] 陈强,杨霄鹏,欧阳超,等. 基于 TD-NLMS 的航空移动通信 OFDM 系统载波频率偏移消除[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(1):71-74. (CHEN Q, YANG X P, OUYANG C, et al. Elimination of carrier frequency offset in aeronautical mobile communication OFDM system based on TD-NLMS algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(1): 71-74.)
- [2] 王宁,郭英,张坤峰,等. 地空数据传输系统中单载波频域均衡技术研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):66-70. (WANG N, GUO Y, ZHANG K F, et al. Single carrier frequency domain pre-equalization applied to ground-to-air data transmission system [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(5): 66-70.)
- [3] YU X L, SONG D D, YANG Z X. Aeronautical channel modeling in frequency-domain for block-data transmission systems[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011:719-723.
- [4] BERGER C R, WANG Z H, HUANG J Z, et al. Application of compressive sensing to sparse channel estimation [J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48 (11): 164-172.
- [5] 王妮娜,桂冠,苏泳涛,等. 基于压缩感知的 MIMO-OFDM 系统稀疏信道估计方法[J]. 电子科技大学学报,2013,42(1):58-62. (WANG N N, GUI G, SU Y T, et al. Compressive sensing-based sparse channel estimation method for MIMO-OFDM systems [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(1): 58-62.)
- [6] 孟庆微,黄建国,韩晶,等. 水声单载波分块传输中基于压缩感知的稀疏信道估计方法[J]. 北京邮电大学学报,2012,35(5):14-17. (MENG Q W, HUANG J G, HAN J, et al. Compressed sensing based sparse channel estimation method for underwater single carrier block transmission [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(5): 14-17.)
- [7] HAAS E. Aeronautical channel modeling [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(2):254-264.
- [8] YU X L, SONG D D, YANG Z X. Aeronautical channel modeling in frequency-domain for block-data transmission systems[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011, 4:719-723.
- [9] IEEE Std 802. 16-2004. Air interface for fixed broadband wireless access systems[S]. New York:LAN/MAN Standards Committee,2004.
- [10] RUDELSON M, VERSHYNIN R. On sparse reconstruction from Fourier and Gaussian measurements [J]. Communications on Applied Mathematics, 2008, 61 (8): 1025-1045.
- (上接第 49 页)
- [16] 张润楚.多元统计分析[M].北京:科学出版社,2006. (ZHANG R C. Multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [17] 施政,夏喜莲.基于熵理论的加权马氏距离及其应用[J]. 阜阳师范学院学报:自然科学版,2011,28(3):21-24. (SHI Z, XIA X L. Weighted Mahalanobis distance based on the entropy theory and its application [J]. Journal of Fuyang Teachers College: Natural Science, 2011, 28(3): 21-24.)
- [18] 丁涛,丁浩,朱世根.加权距离判别分析及其在模式识别中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(8):51-54. (DING T, DING H, ZHU S G. Discriminant analysis based weighted Mahalanobis distance and application on pattern recognition [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(8): 51-54.)
- [19] 赵鹏,杨剑,周文军,等.基于节点权重和 DS 证据理论的 WSN 数据融合[J]. 计算机测量与控制,2013,21(11):3117-3119. (ZHAO P, YANG J, ZHOU W J, et al. Data fusion in wireless sensor network based on node weight and DS evidence theory [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(11): 3117-3119.)