

# 一种改进的基于压缩感知的稀疏信道估计算法

李赛峰<sup>1</sup> 王勇<sup>2,3</sup> 朱然刚<sup>3</sup> 葛轶洲<sup>4</sup> 叶中付<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学信息科学技术学院, 合肥, 230027; 2. 电子制约技术安徽省重点实验室, 合肥, 230037; 3. 合肥电子工程学院, 合肥, 230037; 4. 通信信息控制和安全技术重点实验室, 嘉兴, 314033)

**摘要:** 分析了突发信号的结构特征, 提出了一种改进的基于压缩感知的稀疏信道估计方法。在信道初始估计中, 利用前导伪随机序列的自相关特性, 估计信道的路径时延, 以此初始化稀疏重构算法, 增加了信道估计的先验信息。在后续处理中, 利用前一时刻已估计出的信道信息, 跟踪估计当前时刻的信道信息。仿真证明, 与最小二乘估计算法、正交匹配追踪算法和分离近似稀疏重构算法相比, 本文提出的算法提高了信道估计的精度, 降低了接收系统的误码率。

**关键词:** 压缩感知; 伪随机序列; 稀疏重构; 最小二乘估计

**中图分类号:** TN911.7 **文献标志码:** A

## Improved Sparse Channel Estimation Algorithm Based on Compressive Sensing

Li Saifeng<sup>1</sup>, Wang Yong<sup>2,3</sup>, Zhu Rangang<sup>3</sup>, Ge Yizhou<sup>4</sup>, Ye Zhongfu<sup>1</sup>

(1. Institute of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, 230027, China; 2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei, 230037, China; 3. Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei, 230037, China; 4. Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaxing, 314033, China)

**Abstract:** After investigating the structural features of burst signal, an improved sparse channel estimation algorithm is proposed based on compressive sensing. In the initial estimation, the autocorrelation property of preamble pseudo-random sequence is utilized to estimate the path delay of channel. Then the sparse recovery with the delay is initialized, which takes advantage of the prior information of channel estimation. In the follow-up channel estimation, the algorithm tracks the current channel information through the channel information estimated in the previous moment. Simulations indicate that the proposed algorithm improves channel estimation precision, and decreases the bit error rate of receiver system, when compared with the least square estimation algorithm, orthogonal matching pursuit algorithm and sparse reconstruction by separable approximation algorithm.

**Key words:** compressive sensing; pseudo-random sequence; sparse recovery; least square estimation

## 引 言

信道是通信系统重要的组成部分, 不同的信道对于信号传输的影响不同。当信号在无线多径信道

中传输时,经历不同路径的信号在接收端叠加在一起,这样就会影响信号的正常接收<sup>[1]</sup>。信道估计就是根据接收到的信号,估计信道状态信息,消除信道对信号传输的影响,保证信号的正确传输。

压缩感知(Compressive sensing, CS)理论是 Candes, Romberg 和 Tao 提出的一种新理论<sup>[2]</sup>。该理论指出,如果信号在某个变换域上是稀疏的,也就是说信号在该变换域上大部分元素为 0 或者接近 0,那么可以用一个与该变换域不相关的矩阵将信号投影到一个低维空间上,最后通过重构算法,从低维空间的投影中恢复出原来的信号<sup>[3]</sup>。压缩感知理论在数据采集<sup>[4]</sup>、语音图像处理<sup>[5,6]</sup>、雷达信号处理<sup>[7]</sup>和阵列信号处理<sup>[8]</sup>等方面有着广泛的应用。

近年来,越来越多的学者开始关注压缩感知理论在通信领域的应用,比如认知无线电、无线传感器网络的数据收集和信道估计等方面。文献[9,10]指出,无线多径信道具有稀疏的结构,也就是说,信道的冲击响应只包括少量较大的幅度值。而且这些幅度值在时间上间隔较远,呈现出稀疏分布的特性,因此人们开始利用压缩感知理论来研究无线多径信道的估计问题<sup>[11,12]</sup>。相比传统的信道估计方法<sup>[13,14]</sup>,比如最小二乘估计算法(Least square estimation, LSE),压缩感知方法利用了信道稀疏的先验知识,因此估计性能优于传统的信道估计算法。文献[15]提出了一种基于叠加信号的稀疏信道压缩感知估计方法,这种方法只适合特定结构系统的信道估计。文献[16]提出了一种基于正交匹配追踪(Orthogonal matching pursuit, OMP)的稀疏信道压缩感知估计方法,这种方法在有噪情况下重构性能不佳。文献[17,18]提出了基于基追踪的稀疏信道压缩感知估计方法,这种方法的计算量太大。文献[19]提出了一种改进的广义正交匹配追踪算法来估计正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统的信道。当多径数量较大时,这种方法的估计性能一般。

本文的研究充分利用了无线信道的稀疏特性和突发信号训练序列的自相关特性,提出了一种针对频率选择性慢衰落信道的改进的基于压缩感知理论的信道估计算法。通过对突发信号训练序列的检测估计和对已估计信道状态信息的跟踪,提高了信道估计的整体性能。

## 1 系统模型

### 1.1 信道模型

无线多径信道的冲击响应为<sup>[20,21]</sup>

$$h(\tau, t) = \sum_{p=0}^{P(t)-1} a_p(t) \delta(\tau - \tau_p(t)) \quad (1)$$

式中: $h(\tau, t)$ 是信道冲击响应; $P(t)$ 为路径数; $a_p(t)$ 为第  $p$  条路径的衰减, $\tau_p(t)$ 为第  $p$  条路径的时延。

本文主要讨论路径数、路径时延和路径衰减的变化比信号变化缓慢得多,即慢衰落信道的情况,式(1)可以写成

$$h(\tau) = \sum_{p=0}^{P-1} a_p \delta(\tau - \tau_p) \quad (2)$$

对于 Zero-Padded OFDM 通信系统<sup>[22]</sup>,OFDM 符号周期为  $T$ ,保护间隔为  $T_g$ ,发送信号为

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K-1} s[k] e^{j2\pi kt/T} g(t) \quad (3)$$

式中  $s[k]$ 为发送的符号序列, $k=0,1,\dots,K-1$ , $K$ 为 OFDM 符号的子载波数量; $t \in [0, T+T_g]$ ; $g(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T], \\ 0, & t \in [T, T_g]. \end{cases}$

根据式(2)和式(3),忽略噪声的影响,发送信号  $x(t)$ 通过信道  $h(t)$ ,就可以得到接收信号

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \sum_{p=0}^{P-1} a_p x(t - \tau_p) \quad (4)$$

式中 $\otimes$ 表示卷积运算。

在信号接收部分,对 $y(t)$ 作串转并操作,然后FFT变换,最后再积分,这样就可以推导出第 $m$ 个子载波的表达式为

$$y_m = \frac{1}{T} \int_0^{T+T_s} y(t) e^{-j2\pi mt/T} dt \quad (5)$$

综合式(3)和式(4),可以得到

$$y_m = \sum_{p=0}^{P-1} a_p e^{-j2\pi\tau_p m/T} \sum_{k=1}^{K-1} s[k] \delta[k-m] \quad (6)$$

将式(5)写成矩阵形式

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{K-1}]^T$ ;  $\mathbf{s} = [s_0, s_1, \dots, s_{K-1}]^T$ ;  $\mathbf{H}$ 为信道状态信息矩阵,其元素为

$$[\mathbf{H}]_{m,k} = \sum_{p=0}^{P-1} a_p \mathbf{F}_p \delta[m-k] \quad (8)$$

式中,矩阵 $\mathbf{F}_p$ 为对角矩阵,其元素 $[\mathbf{F}_p]_{m,m} = e^{-j2\pi\tau_p m/T}$ 。

## 1.2 基于压缩感知的信道估计模型

根据压缩感知理论,如果有稀疏向量 $\boldsymbol{\theta}$ ,其维度为 $N_\theta$ ,非零元素个数为 $K_\theta$  ( $K_\theta \ll N_\theta$ )。通过观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ ,对 $\boldsymbol{\theta}$ 作 $M_\theta$ 次观测,得到维度为 $M_\theta$ 的观测值为

$$\mathbf{z}_\theta = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\theta} \quad (9)$$

当 $\boldsymbol{\Phi}$ 满足有限等距性,即使是 $M_\theta < N_\theta$ ,也就是观测的次数少于未知向量的维度,可以根据式(10)重构出稀疏的未知向量 $\boldsymbol{\theta}$ ,这个性质是解欠定方程(9)的理论依据,具体方法为

$$\min \|\boldsymbol{\theta}\|_0 \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{z}_\theta = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\theta} \quad (10)$$

分析式(7)和式(9),基于压缩感知的信道估计,实质上就是对式 $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s}$ 进行变换处理,构造出稀疏向量 $\boldsymbol{\theta}$ ,然后根据信道特征和已知的发送信号(比如导频信号),设计观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ ,再根据观测值 $\mathbf{z}_\theta$ ,通过式(10),重构出稀疏向量 $\boldsymbol{\theta}$ ,最后得到信道状态。

将式(8)代入 $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s}$ ,可以得到

$$\mathbf{y} = [\mathbf{F}_0 \mathbf{s} \mathbf{F}_1 \mathbf{s} \cdots \mathbf{F}_{P-1} \mathbf{s}] \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{P-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据引言部分的阐述,多径信道具有稀疏结构。因此可以利用多径信道的稀疏特性,构造基于时延的字典,字典的每一个原子,代表一条路径的时延,而需要重构的稀疏向量就是每一条路径的衰减。

根据文献[17],对信道最大时延 $\tau_{\max}$ 进行划分为

$$\boldsymbol{\tau} = [0, \tau_{\max}/M, 2\tau_{\max}/M, \dots, (M-1)\tau_{\max}/M] \quad (12)$$

式中 $M$ 为时延划分的个数,也是字典原子的个数。

这样就得到了基于压缩感知的稀疏信道估计的基本模型

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} = \mathbf{D}\mathbf{S}\mathbf{a} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{y}$ 是接收信号,相当于式(9)中的观测值 $\mathbf{z}_\theta$ 。

$$\mathbf{D} \text{ 是字典, } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 0 \cdot 0/T} & e^{-j2\pi 0 \tau_{\max}/M/T} & \dots & e^{-j2\pi 0(M-1)\tau_{\max}/M/T} \\ e^{-j2\pi 1 \cdot 0/T} & e^{-j2\pi 1 \tau_{\max}/M/T} & \dots & e^{-j2\pi 1(M-1)\tau_{\max}/M/T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-j2\pi(K-1)0/T} & e^{-j2\pi(K-1)\tau_{\max}/M/T} & \dots & e^{-j2\pi(K-1)(M-1)\tau_{\max}/M/T} \end{bmatrix}; \mathbf{S} \text{ 是信号对角矩阵, } \mathbf{S} = \text{diag}(s_0, s_1,$$

$\dots, s_k, \dots, s_{K-1})$ ;  $\mathbf{DS}$  构成观测矩阵, 相当于式(9)中的  $\Phi$ ; 有研究指出, 一致分布的随机矩阵可以用来作为观测矩阵对稀疏信号进行有效的观测, 这其中就包括部分傅里叶矩阵<sup>[23]</sup>。本文所用的观测矩阵为  $\mathbf{DS}$ 。其中, 字典  $\mathbf{D}$  具备傅里叶矩阵的形式, 导频信号在部分子载波处值为 1, 其他为零, 由导频信号构成的对角矩阵  $\mathbf{S}$  右乘  $\mathbf{D}$ , 相当于是从  $\mathbf{D}$  中选取了部分行, 从而构成了部分傅里叶矩阵。因此,  $\mathbf{DS}$  可以用来作为观测矩阵进行有效观测。 $\mathbf{a}$  是经过时延划分之后的衰减向量,  $\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_{M-1}]^T$ , 即需要重构的稀疏向量, 相当于式(9)中的  $\theta$ 。

这样就可以根据式(13), 利用观测值、字典和导频信号, 通过重构算法(如正交匹配追踪算法), 恢复稀疏向量  $\mathbf{a}$ , 最后再计算  $\mathbf{Da}$ , 得到信道状态信息矩阵  $\mathbf{H}$ 。

## 2 改进算法

本文提出的改进算法, 利用前导序列估计信道时延作为初始阶段估计的先验信息, 并对已估计信道状态信息进行跟踪, 提高信道估计的整体性能。

### 2.1 突发信号结构

突发 OFDM 信号的一般结构如图 1 所示<sup>[24]</sup>。

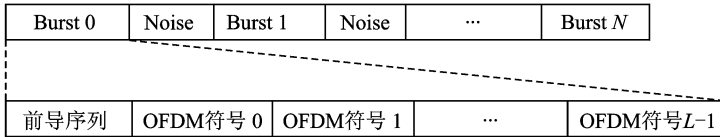


图 1 突发信号结构

Fig. 1 Framework of burst signal

信号以突发块的形式不连续发送, 一个突发块包括一段前导序列和若干个 OFDM 符号两个部分, 前导序列的作用是突发信号检测与同步, 常常使用伪随机序列, 伪随机序列具有自相关性好的优点, 紧接着前导序列的是  $L$  个 OFDM 符号, 每个符号包括导频和数据。

### 2.2 改进算法描述

改进算法基于压缩感知信道估计的基本模型, 利用突发信号的前导伪随机序列, 对信道路径时延进行估计, 并将此估计值作为重构算法的初始值, 提高了有噪条件下重构算法的精度; 而且, 在后续符号的信道估计中, 利用了已估计出的信道信息, 降低了信道估计算法的计算量。整个信道估计的原理框图如图 2, 其中虚线部分表示只在突发起始阶段运行。

#### 2.2.1 时延估计

在接收系统中, 突发头部的伪随机序列常用于信号检测与同步之用, 本文则利用其来估计时延。在处理图 1 的 OFDM 符号 0 阶段, 利用突发信号伪随机序列良好的自相关特性, 估计信道时延, 如图 2 的虚线部分所示。即将本地伪随机序列  $cl(n)$  与接收的伪随机序列  $cr(n)$  作相关运算, 得到相关值

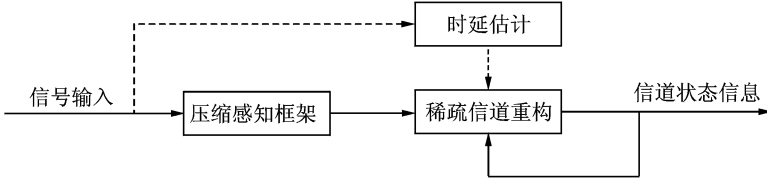


图2 信道估计框图

Fig. 2 Diagram of channel estimation

$$xcorr(n) = d(n) \otimes cr(n) \quad (14)$$

然后搜索相关峰,根据相关峰的位置,估计信道时延,再将此估计值作为稀疏信道重构的先验信息。

### 2.2.2 构造压缩感知框架

在经典的非盲 OFDM 系统的信道估计中,OFDM 的导频信号可以用来估计出导频位置的信道状态,然后再根据这些有限频点的信道状态信息,采用插值等方法,得到整个信道的状态信息<sup>[14]</sup>。本文与文献[14]的方法不同,在此要构造压缩感知的框架。首先,基于信道的稀疏性,根据式(12)对时延进行划分,然后根据式(13),设计基于时延细分的字典,再将导频信号与设计字典共同构成观测矩阵,并以导频频点的信道输出作为观测值,最后将时延细分之后的路径衰减作为需要重构的稀疏向量,由此构成压缩感知的框架。

### 2.2.3 稀疏信道重构

在开始阶段,即处理图1的 OFDM 符号 0 阶段,利用时延估计值作为稀疏重构的先验信息,采用 OMP 算法,重构出整个信道状态信息。在后续阶段,即处理 OFDM 符号 1 至 OFDM 符号  $L-1$  阶段,利用已估计出的信道状态信息,提取占据主要能量的路径的时延,作为 OMP 算法的先验信息,再重构出整个信道状态信息。

### 2.2.4 算法具体流程

根据前面对突发信号结构和估计算法的分析,稀疏信道的估计问题转化为求解一个优化问题,即

$$\min \| \mathbf{a} \|_0 \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{y}_{\text{pilot}} = \mathbf{D}_{\text{pilot}} \mathbf{S}_{\text{pilot}} \mathbf{a} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{y}_{\text{pilot}}$ 是导频频点的信道输出; $\mathbf{D}_{\text{pilot}}$ 是导频位置的字典; $\mathbf{S}_{\text{pilot}}$ 是由导频信号构成的对角矩阵; $\mathbf{a}$ 是时延细分之后的路径衰减。

改进算法具体流程如下:

(1)初始化设置:主循环变量  $i=0$ ,最大时延  $\tau_{\max} = T_g$ ,OFDM 符号数  $L$ ,字典原子数  $M$ ,信道跟踪因子  $\alpha$ ,字典  $\mathbf{D}$ ,导频位置的字典为  $\mathbf{D}_{\text{pilot}}$ ,导频信号构成的对角矩阵为  $\mathbf{S}_{\text{pilot}}$ ,读取前导伪随机序列  $cr(n)$ 。

(2)读取 OFDM 符号  $\mathbf{y}(i)$ ,得到导频位置的接收信号  $\mathbf{y}_{\text{pilot}}(i)$ 。

(3)如果  $i=0$ ,处理 OFDM 符号 0,跳转到(4);否则,处理 OFDM 符号 1 到  $L-1$ ,跳转到(5)。

(4)根据伪随机序列,估计信道时延:

(4.1)计算本地伪随机序列与接收的伪随机序列的相关值  $xcorr(n)$ ,搜索相关峰;

(4.2)根据相关峰位置信息,估计信道时延  $\tau_{pn}$ ;

(4.3)根据信道时延  $\tau_{pn}$ ,计算稀疏向量  $\mathbf{a}$  的非零元素位置 index,跳转到(6)。

(5) 信道跟踪估计, 根据在(6)中已重构得到的稀疏向量  $\mathbf{a}$ , 选择占全部能量比例为  $\alpha$  的元素, 记录其位置 index。

(6) 初始化非零元素集  $\mathfrak{S}$ , 将 index 添加到  $\mathfrak{S}$  中, 设置重构算法循环变量  $j=0$ , 最大循环次数  $J$ , 残余误差门限  $E_{ps}$ 。开始循环:

(6.1) 令非零元素集  $\mathfrak{S}$  为  $\mathbf{a}$  的支撑集, 计算使得  $\| \mathbf{D}_{\text{pilot}} \mathbf{S}_{\text{pilot}} \mathbf{a} - \mathbf{y}_{\text{pilot}} \|_2$  最小的  $\mathbf{a}$ ;

(6.2) 计算残余值  $\mathbf{r} = \mathbf{y}_{\text{pilot}} - \mathbf{D}_{\text{pilot}} \mathbf{S}_{\text{pilot}} \mathbf{a}$ ;

(6.3) 计算  $(\mathbf{D}_{\text{pilot}} \mathbf{S}_{\text{pilot}})^H \mathbf{r}$ , 上标 H 表示厄米特变换, 找到幅度最大的一项, 将其下标添加到非零元素集  $\mathfrak{S}$  中;

(6.4)  $j=j+1$ ;

(6.5) 如果  $j>J$  或者  $\| \mathbf{r} \|_2 < E_{ps}$ , 跳出循环, 改进的 OMP 算法结束, 否则跳到(6.1)。

(7) 信道频率响应  $\mathbf{H}(i) = \mathbf{D}\mathbf{a}$ 。

(8)  $i=i+1$ 。

(9) 如果  $i < L$ , 则跳到(2); 否则, 完成一个突发信号的信道估计。

### 3 仿真实验

为了测试算法的性能, 本文以 OFDM 突发信号在频率选择性慢衰落信道中传输的信道估计均方误差和误码率作为检测标准, 对比算法选择最小二乘估计(LSE)算法<sup>[14]</sup>、正交匹配追踪(OMP)算法<sup>[17]</sup>和分离近似稀疏重构(Sparse reconstruction by separable approximation, SpaRSA)算法<sup>[18]</sup>。

仿真条件设置如下: 采样率为  $f_s=1$  MHz, OFDM 符号子载波数为 128, 导频子载波数为 13, 符号周期  $T=0.128 \mu\text{s}$ , 保护间隔  $T_g=0.016 \mu\text{s}$ 。信道为瑞利衰落信道, 路径数  $P=5$ 。为了检测算法在各种不同延时情况下的性能, 路径时延从 0 到  $T_g$  每次仿真随机选取。图 3 和图 5 为多普勒频率  $f_{\text{Doppler}}=0$  Hz, 仿真静态信道情况下的均方误差和误码率; 图 4 和图 6 为多普勒频率  $f_{\text{Doppler}}=500$  Hz, 仿真慢变信道情况下的均方误差和误码率。

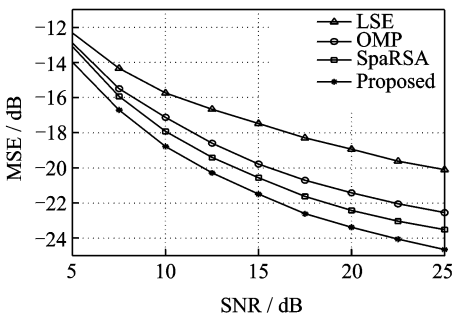


图 3 多普勒频率为 0 Hz 时的均方误差随信噪比变化曲线

Fig. 3 MSE-SNR results with 0 Hz Doppler frequency

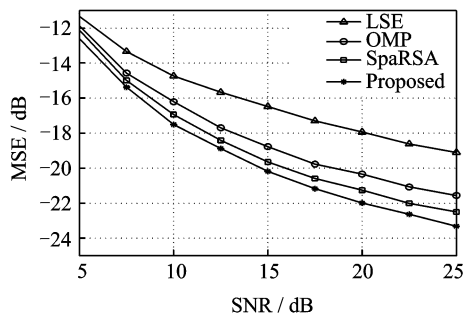


图 4 多普勒频率为 500 Hz 时的均方误差随信噪比变化曲线

Fig. 4 MSE-SNR results with 500 Hz Doppler frequency

从图 3~6 中, 可以看出, 本文提出的算法在静态信道和慢变信道中性能都最好, 信道估计均方误差最小, 误码率最低, SpaRSA 算法性能次之, 标准的 OMP 算法性能再次之, 最小二乘算法没有利用信道稀疏的特性, 性能最差, 估计的均方误差最大, 误码率最高。

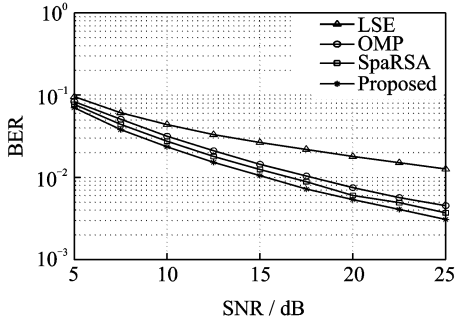


图5 多普勒频率为 0 Hz 时的误码率随信噪比变化曲线

Fig. 5 BER-SNR results with 0 Hz Doppler frequency

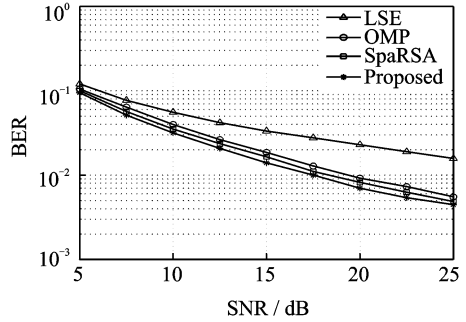


图6 多普勒频率为 500 Hz 时的误码率随信噪比变化曲线

Fig. 6 BER-SNR results with 500 Hz Doppler frequency

## 4 结束语

在复杂的多径信道中,信号的畸变非常严重,信道估计的重要性更加凸显。针对频率选择性慢衰落信道估计问题,本文分析了信道的稀疏特性,构建了 OFDM 信号在稀疏信道中的传输模型,提出了一种改进的基于压缩感知理论的稀疏信道估计算法。该算法利用了突发信号前导序列良好的自相关特性,估计信道时延,以此作为重构算法的先验信息,提高了重构算法在噪声条件下的性能;而且在后续符号的信道估计中,利用已估计出的信道先验信息,跟踪信道的变化。从仿真结果可以看出,本文提出的算法与经典的最小二乘估计算法、标准的 OMP 算法和分离近似稀疏重构算法相比,性能最佳。

## 参考文献:

- [1] Cho Y S, Kim J, Yang W Y, et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB[M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2006,52(2):489-509.
- [3] 石光明,刘丹化,高大化,等. 压缩感知理论及其研究发展[J]. 电子学报,2009,37(5):1070-1081.  
Shi Guangming, Liu Danhua, Gao Dahua, et al. Advance in theory and application of compressed sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2009,37(5):1070-1081.
- [4] Laska J N, Kirolos S, Duarte M F, et al. Theory and implementation of an analog-to-information converter using random demodulation[C]//Circuits and Systems, ISCAS 2007. New Orleans; IEEE International Symposium on, 2007:1959-1962.
- [5] 常侃,覃团发,唐振华. 基于多重假设的视频压缩感知分层重建[J]. 数据采集与处理,2013,28(6):730-738.  
Chang Kan, Qin Tuanfa, Tang Zhenhua. Multi-hypothesis-based hierarchical reconstruction for compressed video sensing [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013,28(6):730-738.
- [6] 孙林慧,杨震. 语音压缩感知研究进展与展望[J]. 数据采集与处理,2015,30(2):275-289.  
Sun Linhui, Yang Zhen. Compressed speech sensing for research progress and prospect[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015,30(2):275-289.
- [7] 张弓,杨萌,张劲东,等. 压缩感知在雷达目标探测与识别中的研究进展[J]. 数据采集与处理,2012,27(1):1-12.  
Zhang Gong, Yang Meng, Zhang Jindong, et al. Advances in theory and application of compressed sensing in radar target detection and recognition[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012,27(1):1-12.
- [8] Zhang Y, Ye Z, Xu X, et al. Off-grid DOA estimation using array covariance matrix and block-sparse Bayesian learning[J]. Signal Processing, 2014,98:197-201.
- [9] Vuokko L, Kolmonen V M, Salo J, et al. Measurement of large-scale cluster power characteristics for geometric channel models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(11):3361-3365.

- [10] Czink N, Yin X, Özcelik H, et al. Cluster characteristics in a MIMO indoor propagation environment[J]. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 2007, 6(4):1465-1475.
- [11] Bajwa W U, Haupt J, Sayeed A M, et al. Compressed channel sensing: A new approach to estimating sparse multipath channels[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(6):1058-1076.
- [12] Berger C R, Wang Z, Huang J, et al. Application of compressive sensing to sparse channel estimation[J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2010, 48(11):164-174.
- [13] Van De Beek J J, Edfors O, Sandell M, et al. On channel estimation in OFDM systems[C]// *Vehicular Technology Conference*, 1995 IEEE 45th. Chicago: IEEE, 1995, 2:815-819.
- [14] Coleri S, Ergen M, Puri A, et al. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems[J]. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 2002, 48(3):223-229.
- [15] Nawaz S J, Ahmed K, Patwary M, et al. Superimposed training-based compressed sensing of sparse multipath channels[J]. *Communications, IET*, 2012, 6(18):3150-3156.
- [16] Karabulut G Z, Yongaçoğlu A. Sparse channel estimation using orthogonal matching pursuit algorithm[C]// *Vehicular Technology Conference*, 2004 IEEE 60th. Los Angeles: IEEE, 2004, 6:3880-3884.
- [17] Berger C R, Zhou S, Preisig J C, et al. Sparse channel estimation for multicarrier underwater acoustic communication: From subspace methods to compressed sensing[J]. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 2010, 58(3):1708-1721.
- [18] 尹艳玲, 乔钢, 刘淞佐, 等. 基于基追踪去噪的水声正交频分复用稀疏信道估计[J]. *物理学报*, 2015(6):1-8.  
Yin Yanling, Qiao Gang, Liu Songzuo, et al. Sparse channel estimation of underwater acoustic orthogonal frequency division multiplexing based on basis pursuit denoising[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015(6):1-8.
- [19] 彭云柯. 基于压缩感知的 MIMO-OFDM 系统信道估计[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
Peng Yunke. MIMO-OFDM channel estimation on compressive sensing[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [20] Tranter W, Shanmugan K, Rappaport T, et al. Principles of communication systems simulation with wireless applications [M]. New York: Prentice Hall Press, 2003.
- [21] 陈宇, 未元, 梁彦, 等. IQ 不平衡 OFDM 系统高性能稀疏信道估计算法[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(6):986-990.  
Chen Yu, Wei Yuan, Liang Yan, et al. High-performance sparse channel estimator for OFDM system with IQ imbalances [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(6):986-990.
- [22] Papadimitriou P D, Georgiades C N. Zero-padded OFDM with improved performance over multipath channels[C]// *Consumer Communications and Networking Conference*, 2004 (CCNC 2004). Las Vegas: IEEE, 2004:31-34.
- [23] Tsaig Y, Donoho D L. Extensions of compressed sensing[J]. *Signal Processing*, 2006, 86(3):549-571.
- [24] Zivkovic M, Mathar R. Preamble-based SNR estimation in frequency selective channels for wireless OFDM systems[C]// *Vehicular Technology Conference*, IEEE 69th. Barcelona: IEEE, 2009:1-5.

## 作者简介:



李赛峰 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向: 通信信号处理, E-mail: lsf2013@mail.ustc.edu.cn。



王勇 (1979-), 男, 副教授, 研究方向: 卫星通信。



朱然刚 (1979-), 男, 讲师, 研究方向: 阵列信号处理。



葛轶洲 (1988-), 男, 助理工程师, 研究方向: 阵列信号处理。



叶中付 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 信号与信息处理, E-mail: yezf@ustc.edu.cn。



