

# 基于二维压缩感知的双选信道估计

彭 钰, 侯晓赞

(南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 高速移动下的无线宽带通信要经历时间和频率的双选择性衰落, 为了使发送的数据经过衰落的信道后在接收端被正确地接收, 必须要对信道状态信息进行估计。文中根据双选信道在时延-多普勒域的二维稀疏性, 同时利用时域和多普勒域内的相关性, 在 OFDM 系统中提出了基于二维压缩感知(2 Dimension Compressive Sensing, 2D-CS)的双选信道估计。同时为了克服信道的双选特性对信道估计造成的不稳定性, 设计了二维正则正交匹配追踪(2 Dimension Regularized Orthogonal Matching Pursuit, 2D-ROMP)算法进行信道估计。理论分析和仿真结果表明, 在同等条件下, 采用二维的信道估计方法比一维的信道估计方法性能提高很多, 同时与现有的基于传统的时频二维的算法相比, 基于 2D-ROMP 的信道估计复杂度更低, 且系统性能更高, 减少估计时延。

**关键词:** 信道估计; 压缩感知; 双选信道; 二维正则正交匹配追踪

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2013)10-0220-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2013.10.055

## Doubly Selective Channel Estimation Based on Two Dimension Compressed Sensing

PENG Yu, HOU Xiao-yun

(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** High data rates and high mobility introduce time and frequency selectivity in wideband wireless communication. Need to estimate the channel state information so that the data through fading channel can be received correctly. Exploiting the sparsity and correlation of doubly selective wireless channel in both delay domain and Doppler domain, study the doubly selective channel estimation based on 2 Dimension Compressive Sensing (2D-CS). In order to overcome the instability of the channel estimation caused by the multipath delay spread and Doppler shift, the channel estimation based on 2 Dimension ROMP (2D-ROMP) algorithm is designed in this paper. Theoretical analysis and simulation shows that the 2D-ROMP has better performance but with fewer pilots than conventional 2 dimension delay domain and Doppler domain estimation, furthermore, 2 dimension channel estimation has better estimation performance than 1 dimension channel estimation.

**Key words:** channel estimation; compressive sensing; doubly selective channel; 2 dimension regularized orthogonal matching pursuit

### 0 引言

现代通信的移动性以及高速率数据通信使得无线通信系统中的信道表现为双选择性衰落, 因此提高双选信道估计的稳定性和估计性能, 提高系统的频谱利用率, 保证高速移动通信的可靠性具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。研究表明无线信道往往呈现稀疏性<sup>[4]</sup>, 尤其是在传输带宽较大时, 这种稀疏性会更加明显。于是人们根据压缩感知理论(Compressive Sensing, CS)<sup>[5-8]</sup>提

出了基于压缩感知的信道估计方法<sup>[9-10]</sup>, 在获得同样估计性能的情况下, 需要的导频数或训练序列的长度大大减少, 这样可以提高频谱利用率和信道估计性能。目前基于 CS 的信道估计方法只利用信道在时延域或多普勒域的稀疏性进行, 简便易行, 应用广泛。

为了利用时域与频域的相关性来有效地降低二维信道估计的复杂度, 传统的二维算法采用分别进行两个一维的信道估计, 这种算法利用了两个相互独立的

收稿日期: 2012-12-28

修回日期: 2013-04-02

网络出版时间: 2013-07-24

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX03003-006); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助课题(2010D02)

作者简介: 彭钰(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为压缩感知及信道估计技术等; 侯晓赞, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为通信信号处理技术、认知无线电技术及协同通信技术等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130724.1005.042.html>

有限冲激响应维纳滤波器,两个滤波器分别应用在时域和频域内。但在快衰落信道下,带来了不可避免的时延,而且在快时变信道中需要大量的导频数。因此,文中利用信道在时延-多普勒域的稀疏特性来进一步减少导频个数,同时根据时域和多普勒域的相关性,设计了 2D-ROMP 算法进行信道估计。仿真结果表明在同等条件下,采用二维的信道估计方法比一维的信道估计方法性能提高很多,同时与现有的基于传统的时频二维的算法相比,基于 2D-ROMP 的信道估计复杂度更低,且系统性能更高,减少了估计时延。

## 1 系统和信道模型

基于 OFDM 系统进行研究,通过合理地设计调制器和解调器可以获得无符号间干扰,此时接收信号可以表示为:

$$r_{l,k} = H_{l,k}a_{l,k} + z_{l,k}, l = 0, 1, \dots, L-1; k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (1)$$

式中,  $a_{l,k}$  为发送符号;  $r_{l,k}$  为接收符号;  $L$  为符号数;  $K$  为子载波数;  $z_{l,k}$  为信道噪声;  $H_{l,k}$  是离散时延-多普勒域的信道冲激响应函数二维 DFT 表示。其中  $i$  表示多普勒频移,  $m$  表示时延扩展。相应的  $H_{l,k}$  可以表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$H_{l,k} = \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{L-1} F[m, i] e^{-j2\pi(\frac{km}{K} - \frac{li}{L})}, l = 0, 1, \dots, L-1; k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (2)$$

式中,  $F[m, i]$  是时延-多普勒域中的信道脉冲响应函数,表示如下:

$$F[m, i] = S_h[m, i] A_{\gamma, g}^*(m, \frac{i}{N_r}) \quad (3)$$

式中,  $S_h[m, i]$  为离散时延-多普勒扩展函数;  $A_{\gamma, g}$  是  $\gamma, g$  的互模糊函数,分别表示如下:

$$S_h[m, i] = \frac{1}{N_r} \sum_{n=0}^{N_r-1} h[n, m] e^{-j2\pi \frac{in}{N_r}} \quad (4)$$

$$A_{\gamma, g}(m, \varepsilon) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma[n] g^*[n-m] e^{-j2\pi \varepsilon n}, m \in Z, \varepsilon \in R \quad (5)$$

根据文献[12]分析可知  $F[m, i]$  是  $pn_{\Lambda}$ -稀疏的。

## 2 基于 CS 的双选信道估计

时频二维的导频辅助信道估计按照 OFDM 信号的帧进行估计。一帧包含  $L$  个 OFDM 符号,每个 OFDM 符号内包含  $K$  个子载波,设一帧中所有导频符号的个数为  $|\text{pilot}|$ 。进行 LS 信道估计时,导频均匀放置达到最佳的信道估计性能;进行 CS 估计时,导频随机选取估计性能最优。

根据式(2),  $H_{l,k}$  可由二次采样时频网格  $\Xi$  上的

采样值唯一表示,只要选取  $D, I$  满足频率的采样间隔  $\Delta K = \frac{K}{D}, \Delta L = \frac{L}{I}$  为整数即可。

由式(2)可得

$$H_{l\Delta L, k\Delta K} = \sum_{m=0}^{D-1} \sum_{i=-\frac{I}{2}}^{\frac{I}{2}-1} F[m, i] e^{-j2\pi(\frac{km}{D} - \frac{li}{I})}, l = 0, 1, \dots, I-1; k = 0, 1, \dots, D-1 \quad (6)$$

为了采用 CS 进行信道估计,把(6)写成矩阵的表示形式从而转化为 CS 的标准表示形式:

$$\mathbf{h} = \sum_{m=0}^{D-1} \sum_{i=-I/2}^{I/2-1} \alpha_{m,i} U_{m,i} = \mathbf{U}\boldsymbol{\alpha} \quad (7)$$

其中

$$\alpha_{m,i} = \sqrt{ID} F[m, i], U_{m,i} = \frac{1}{\sqrt{ID}} e^{-j2\pi(\frac{km}{D} - \frac{li}{I})} \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{U}$  是  $ID \times ID$  的矩阵;  $\boldsymbol{\alpha}$  是  $ID \times 1$  的向量;  $\mathbf{h}$  是  $1 \times ID$  的向量。插入导频后,导频处的信道系数为:

$$\mathbf{h}^{(p)} = \mathbf{S}\mathbf{U}\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\varphi}\mathbf{x} \quad (9)$$

$\mathbf{h}^{(p)}$  可根据式(1)由接收端导频处的信号估计得到:

$$\mathbf{h}^{(p)} = \frac{r_{l,k}}{p_{l,k}} = H_{l,k} + \frac{z_{l,k}}{p_{l,k}} \quad (10)$$

式中,  $p_{l,k}$  表示在发送端  $(l, k)$  处插入导频;  $\mathbf{h}^{(p)}$  表示导频处的信道冲激响应;  $r_{l,k}$  表示导频处的接收信号;  $z_{l,k}$  表示导频处的噪声。根据(9)式,恢复矩阵  $\boldsymbol{\varphi}$  满足 RIP 性质,  $\mathbf{x}$  为稀疏信号,符合 CS 重构信号的条件,故可以利用 CS 的方法得到  $\mathbf{x}$ ,从而根据(6)、(7)得到  $F[m, i]$ 。

## 3 2D-ROMP 算法

ROMP 算法具有贪婪算法简单易实现的优点,同时每次迭代加入了满足一定条件的多个原子,ROMP 将筛选出的多个原子的索引值存到候选索引集中采用正则化进行原子的二次筛选,重构精度较高,与凸优化算法相当,运算量低。故文中将 ROMP 应用于双选信道估计中。

基于 1D-ROMP 的信道估计是把一帧中每个 OFDM 符号分别进行处理才可以得出一帧信道的估计值,但是每个 OFDM 符号之间存在相关性会产生冗余,降低了频谱利用率,同时估计时延和复杂度比较大。根据在时频二维稀疏信道中,多径时延的变化相对于信道的幅度和相位的变化速度来说是比较缓慢的,利用时域和频域的相关性,根据式(9)将上述搜索过程变为对一帧内的  $L$  个 OFDM 符号为对行和列同时进行搜索,而不是对每个 OFDM 符号进行一维处理。

2D-ROMP 具体算法描述如下:用  $\Lambda$  表示索引集,

对应  $S$  中非零元素的位置集合;  $r$  表示残差值, 对应迭代过程中得到的接收信号估计值与其真实值的差值;  $\Gamma$  由恢复矩阵  $T$  的部分列组成, 其列数属于索引集  $\Lambda$ 。

(1) 输入:  $Y$ —接收导频信号;  $T$ —恢复矩阵;  $m$ —信道时延-多普勒稀疏度

(2) 初始化: 残差值  $r_0 = Y$ , 索引集  $\Lambda_0 = \emptyset$ , 迭代次数  $i = 1, \Gamma_0 = \emptyset$ 。

(3) 迭代过程: 第  $i$  次迭代的步骤如下:

① 识别过程: 由式 (11) 得互相关系数  $u$ , 找出  $m$  个最大非零值位置构成集合  $J$ , 当  $J$  中非零值元素小于  $m$  时, 将所有元素索引构成  $J$ 。

$$\lambda_j = \arg \max_{k=1, \dots, K} \sum_{i=0}^{L-1} |\langle r_{j-1}^{(i)}, \varphi_k^{(i)} \rangle| \quad (11)$$

② 正则化: 找出  $J$  的子集  $J_0$ , 使得对于所有索引  $i, j \in J_0$ , 满足  $|u_i| < 2|u_j|$ ; 再在所有  $J_0$  中选出能量最大的那组。

③ 将上述选定的子集  $J_0$  加入到索引集中,  $\Lambda_i = \{\Lambda_{i-1} \cup J_0\}$ ; 更新支撑集  $\Gamma_i = \Gamma_{i-1} \cup \varphi_{J_0}$ 。

④ 利用 LS 算法获得新的信道估计值:  $\hat{S}_i = \operatorname{argmin} \|Y - \Gamma_i \hat{S}_i\|$ 。

⑤ 计算新的残差值:  $r_i = Y - \Gamma_i \hat{S}_i$ ;

⑥  $i = i + 1$ , 若迭代次数  $i > m$  或者  $|\Lambda| \geq 2m$ , 终止迭代。

(4) 输出: 估计值  $\hat{S}$ , 满足  $S_{\Lambda_m} = \hat{S}_m$  且  $S_{[1, \dots, N] - \Lambda_m} = 0$ 。

### 4 仿真与分析

文中在时间与频率双选择性衰落的 OFDM 系统中研究 ROMP 信道估计性能, 信道脉冲响应函数  $F[m, i]$  可由式 (2) ~ (5) 得到。系统采样频率为  $f_c = 2\text{GHz}$ , 用  $\Delta K = 4, \Delta L = 1$  进行二次采样, 发送数据采用 16QAM 调制, 子载波个数  $K = 256$ , CP 的长度  $N - K = 50$ , 每次传输的 OFDM 符号数  $L = 6$ 。信道路径个数  $P = 5$ , 传输数据块长度为  $N \times L$ , 每个数据块进行一次信道估计, 时隙数为 5 000 个, 保护间隔大于时延数。基于传统的二维信道估计导频均匀放置, 2D-ROMP 的导频随机放置。

图 1 为在不同导频数下 2D-ROMP 下的 MSE 性能比较。

从图 1 可以看出, 随着导频数的增加, 2D-ROMP 算法信道估计性能越来越好, 但当导频数大于 32 后将没有意义, 信道估计性能改善越来越小, 只会让系统的吞吐量降低。

图 2 为不同信道估计方法下在不同的信噪比下的

均方误差比较。

图 3 是不同信道估计方法以及不同导频数下的系统误比特率 (BER) 的比较。

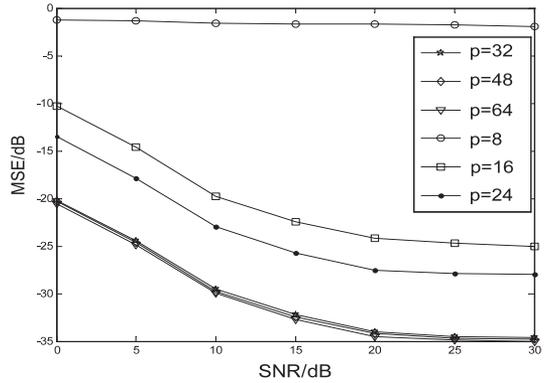


图 1 不同导频数时的 MSE 性能比较图

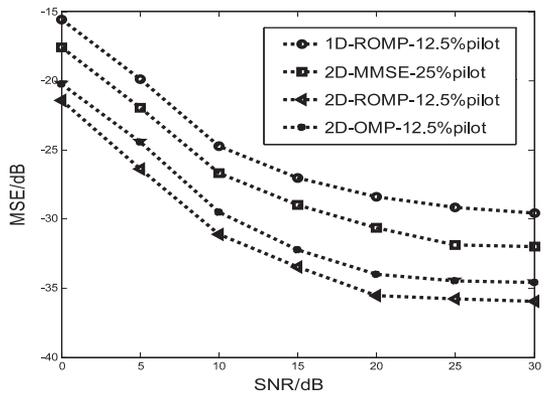


图 2 MSE 性能比较图

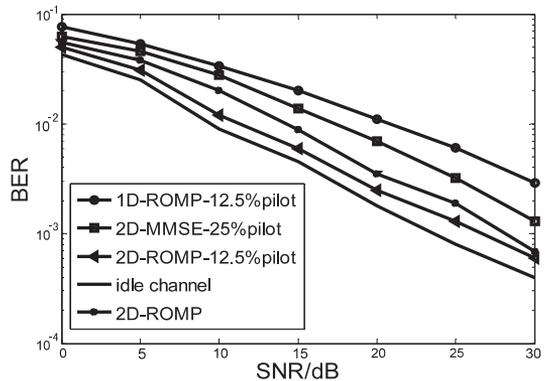


图 3 BER 性能比较图

观察图 2 与图 3 可以看出, 采用 2D-ROMP 算法的 BER 与已知信道的 BER 非常接近, 相比于三种二维的信道估计, 1D-ROMP 的估计性能最差, 这说明了同时利用时频二维的相关性可以减少导频数, 提高估计性能。

文中通过计算 CPU 时间的方法 (以秒为单位) 采用归一化时间粗略估计各算法随导频数变化的运算复杂度。图 4 比较了 2D-ROMP, 2D-OMP 以及 1D-ROMP 的运算复杂度。

由图 4 可知, 在同等条件下, 2D-ROMP 相比于 1D-ROMP 复杂度只略微增加, 这与前面的理论推导一

致,同时 2D-ROMP 算法之所以能以较少的导频数获得更好的信道估计性能,是以增加运算复杂度为代价的,但 ROMP 的计算复杂度比 OMP 略高。

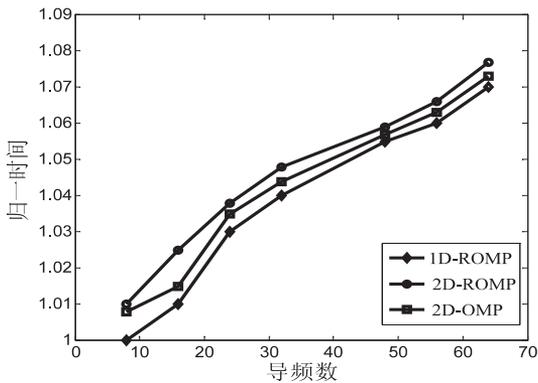


图 4 压缩感知重构复杂度比较

## 5 结束语

文中根据信道在时延-多普勒域的稀疏性,对 OFDM 系统下的时频双选信道进行建模,为了解决双选择性衰落信道的不稳定性问题,采用了基于压缩感知的 2D-ROMP 算法对信道进行估计。对采用不同的导频个数的 2D-ROMP、2D-OMP、2MMSE 以及 1D-ROMP 算法的信道估计性能进行比较。仿真结果表明,在同等条件下,采用二维的信道估计方法比一维的信道估计方法性能提高很多,同时与现有的基于传统的时频二维的算法相比,基于 2D-CS 的信道估计复杂度更低,且系统性能更高,减少了估计时延;此外采用 2D-ROMP 算法的信道估计要比 2D-OMP 算法更加稳定,在同等条件下信道估计性能更好。

## 参考文献:

[1] Choi Y S, Voltz P J, Cassara F A. On channel estimation and detection for multicarrier signals in fast and selective Rayleigh fading channels[J]. IEEE Transaction on Communication,

2001, 49(2):1375-1387.

- [2] Rouseaux O, Leus G, Moonen M. Estimation and equalization of doubly selective channels using known symbol padding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3):979-990.
- [3] Larsson E G, Liu G, Li J, et al. Joint symbol timing and channel estimation for OFDM based WLANs[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(8):325-327.
- [4] Pardes J L, Arce G R, Wang Zhongmin. Ultra wideband compressed sensing: channel estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 3(1):383-395.
- [5] Donoho D L, Elad M, Temlyakov V N. Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2007, 24(4):118-121.
- [6] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5):1070-1081.
- [7] Baraniuk R. A lecture on compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4):118-121.
- [8] Donoho D L, Tsaig Y. Extensions of compressed sensing[J]. Signal Processing, 2006, 86(3):533-548.
- [9] Cotter S F, Rao B D. Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization[J]. IEEE Transaction on Communication, 2002, 50(3):374-377.
- [10] Bajwa W U, Haupt J, Raz G, et al. Compressed channel sensing[C]//Proc of Annual Conference on Informations and Science Systems. [s. l.]:[s. n.], 2008:5-10.
- [11] Taubock G, Hlawatsch F. A compressed sensing technique for OFDM channel estimation in mobile environments: exploiting channel sparsity for reducing pilots[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [s. l.]:[s. n.], 2008:2885-2888.
- [12] Needell D, Vershynin R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2):310-316.

(上接第 219 页)

[4] 傅钢善, 李 婷. 3G 时代基于专家系统的移动学习模式[J]. 中国电化教育, 2010(4):106-111.

[5] Hartmann G, Stead G, DeGani A. Cross-platform mobile development[EB/OL]. 2012-11. [http://www.it.hiof.no/mobapp/misc/WP4\\_crossplatform\\_mobile\\_development\\_March2011-1.pdf](http://www.it.hiof.no/mobapp/misc/WP4_crossplatform_mobile_development_March2011-1.pdf).

[6] 陆 钢, 朱培军, 李慧云, 等. 智能终端跨平台应用开发技术研究[J]. 电信科学, 2012(5):14-17.

[7] Stead G. Towards open formats for mobile learning[EB/OL]. 2012-11. <https://wss.apan.org/1539/JKO/mole/Shared Documents/Towards open formats for Mobile Learning.pdf>.

[8] Christ A M. Bridging the mobile app gap[J]. Digital Ecosystem, 2011(10):27-32.

[9] 解攀科. 基于 Android 的移动学习系统设计与实现[D]. 武汉: 华中师范大学, 2011.

[10] 郭文丽. 移动 Widget 及其应用研究进展[J]. 图书馆杂志, 2012, 31(1):63-69.

[11] 张凯勇. 移动图书馆手机信息服务新应用模型之架构-基于移动 Widget 的分析[J]. 图书馆学研究, 2012(20):28-32.

[12] Kokil A, Nagowah L. Developing cross platform secured mobile widgets using subject-role based access control mechanism[J]. International Journal of Computer Applications, 2012(10):42-50.

[13] 马志强, 蒋 晓. 基于用户体验的智能手机网站界面设计探讨[J]. 包装工程, 2012(1):63-66.

## 基于二维压缩感知的双选信道估计

作者: [彭钰](#), [侯晓赟](#), [PENG Yu](#), [HOU Xiao-yun](#)  
作者单位: [南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 江苏 南京, 210003](#)  
刊名: [计算机技术与发展](#)

---

ISTIC

英文刊名: [Computer Technology and Development](#)

---

年, 卷(期): 2013(10)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201310055.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201310055.aspx)