



基于压缩感知的 MIMO NC-OFDM 系统信道估计算法

陈恩庆, 高新利, 向小强, 王忠勇

(郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 多输入多输出不连续正交频分复用(MIMO NC-OFDM)系统是认知无线电(CR)系统的常用体制, 由于授权用户占用而导致的载波不连续情况下的信道估计是影响该系统性能的关键技术问题。提出一种基于压缩感知(CS)的 MIMO NC-OFDM 系统的信道估计方法——稀疏自适应匹配追踪(SAMP)算法。SAMP 算法在重构过程中先对信号稀疏度进行初始估计, 然后自适应调整步长逐步逼近信号, 相较于其他贪婪算法, 能够在稀疏度未知的情况下准确重建稀疏信号。仿真结果表明, SAMP 算法提高了重构精度, 在实际应用中易于实现。

关键词: 多输入多输出不连续正交频分复用; 认知无线电; 压缩感知; 信道估计; 稀疏自适应匹配追踪

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016040

Sparse channel estimation algorithm based on compressed sensing in MIMO NC-OFDM system

CHEN Enqing, GAO Xinli, XIANG Xiaoqiang, WANG Zhongyong

School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Multiple-input multiple-output non-contiguous orthogonal frequency division multiplexing (MIMO NC-OFDM) system is a commonly used system in cognitive radio. One of the key technical that affects the MIMO NC-OFDM performance is channel estimation in the condition of non-continuous carrier caused by licensed users' occupation. Sparsity adaptive matching pursuit (SAMP) algorithm was proposed as a new method to estimate sparse channel in MIMO NC-OFDM system. Compared with other state-of-the-art greedy algorithms, the most innovative feature of the SAMP is that it is capable to adjust the step length adaptively to approach the original signal and reconstruct the sparse signal without prior information of the sparsity. Simulation result shows that, the new channel estimation method outperforms many existing iterative algorithms in reconstruction performance and can be implemented easily in practical application.

Key words: multiple-input multiple-output non-contiguous orthogonal frequency division multiplexing, cognitive radio, compressed sensing, channel estimation, sparsity adaptive matching pursuit

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61201251, No.61172086); 教育部博士点科研基金资助项目(No.20104101120011)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of China(No.61201251, No.61172086), The Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No.20104101120011)



1 引言

认知无线电(cognitive radio, CR)是一种允许感知用户利用主用户在某一时间留下的频谱空洞进行通信的智能多用户无线通信系统,可以有效解决目前频谱资源的分配和优化问题,缓解频谱资源日益紧张的矛盾。不连续正交频分复用(non-contiguous orthogonal frequency division multiplexing, NC-OFDM)^[1]是 OFDM 技术的一种变型,其不同之处在于,NC-OFDM 系统所使用的子载波是不连续的,当作为认知无线电的数据调制方式时,能够更灵活、方便地整合空闲的频谱资源,有效地适应动态变化的频谱环境,同时还可以实现感知用户和主用户之间的多系统共存。

多输入多输出 OFDM(MIMO-OFDM)技术可以充分利用空间信道,在不增加带宽的条件下成倍地提高通信系统的容量,成为下一代宽带无线通信的核心技术。与 NC-OFDM 系统面临的问题类似,MIMO NC-OFDM 系统中,主用户的占用使感知用户导频无法正常插入,从而无法正确获得导频处的信道信息,尤其当连续的禁用带宽超过系统的相干带宽时,传统的信道估计方法将失效。因此如何实现缺少导频情况下感知用户的有效信道估计是 MIMO NC-OFDM 系统的关键技术问题之一。

对于单天线 NC-OFDM 的信道估计方法研究大多集中在对导频图案的设置,避免导频落入被主用户或其他 CR 用户占用的子信道内。参考文献[2]通过修正 IDFT 变换域降噪方法,获得较好的估计性能。参考文献[3]则提出一种在单天线 NC-OFDM 系统下基于压缩感知(compressed sensing, CS)^[4,5]的信道估计方法,通过对导频图案和压缩感知测量矩阵的设计进行研究,提出了一种导频位置优化的准则。相比传统的信道估计方法,压缩感知信道估计方法可以在多种禁用子载波情况下,使用较少导频获得较好的估计性能,从而更适用于条件受限的 NC-OFDM 系统。但参考文献[3]中的方法需要预先知道信道长度信息,在工程应用中受到一定限制,由于多天线系统的更高复杂性,目前关于 MIMO NC-OFDM 系统压缩感知信道估计的研究不多。

本文提出一种基于稀疏自适应匹配追踪(sparsity adaptive matching pursuit, SAMP)^[6]的 MIMO NC-OFDM 系统信道估计方法,有效解决了 OMP 等常见重构算法需要预先知道信号稀疏度的问题,相比传统估计方法使感知用

户的信道估计精度有了较大提高。

首先简要介绍压缩感知基本理论和 MIMO NC-OFDM 系统信道模型,之后详细分析了基于压缩感知的信道估计重构算法,最后给出 MIMO NC-OFDM 系统中运用压缩感知算法和传统方法进行信道估计的性能比较。

2 压缩感知基本理论

压缩感知原理:对于一个线性信号 $x \in R^n$,如果 x 中只有 K ($K < N$) 个非零元素,而其他 $N-K$ 个元素都为零,则称 x 是 K -稀疏的。通过感知矩阵 $\Phi_{M \times N}$ ($M < N$) 可以获得 x 的观测值:

$$y = \Phi x + e \quad (1)$$

其中, e 为噪声。如果 $M \geq K \cdot \lg N$,且感知矩阵 Φ 满足有限等距特性(restricted isometry property, RIP)^[7],则可以通过最优化理论寻找式(1)的最稀疏解恢复信号 x 。

目前重构算法思想主要有凸优化和贪婪迭代两种。凸优化可以表示为求解基于 l_1 范数的最优化问题:

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_1 \quad \text{s.t.} \quad y = \Phi x \quad (2)$$

由(2)式得出的解具备唯一性和稳定性,代表算法是基追踪(basis pursuit, BP)算法,然而 BP 算法虽然重构精度较高,但同样有着较高的复杂度,重构时间较长,不适合大量信号的实时处理。相比较而言,贪婪迭代算法的运算量小,重建效果好,而且更易实现。同时,信道估计算法需要具有实时性,而且信号重建的维数较小,因此更适合应用在信道估计中。常见的算法包括匹配追踪(matching pursuit, MP)^[8]算法、正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)^[9]算法、正则正交匹配追踪(regularized orthogonal matching pursuit, ROMP)^[10]算法、子空间追踪(subspace pursuit, SP)^[11]算法等。

3 系统和信道模型

假设 MIMO NC-OFDM 系统中有 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线。MIMO NC-OFDM 的系统基带原理如图 1 所示。

在传输过程中发射端的信息数据被分成 N_t 路并行数

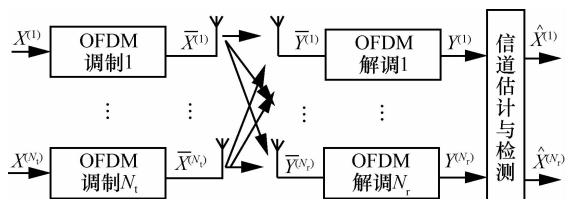


图 1 MIMO NC-OFDM 系统基带原理

据流,然后分别进入对应的调制模块中进行 N 点FFT,最后再由 N_t 个相互独立的发射天线发送出去。这里假设所经信道是相互独立的,且为频率选择性衰落稀疏信道^[12]。在接收端,每根接收天线接收到来自所有发射天线的信号,与发送端类似,分别进入对应的解调模块中进行解调。然后再进行相应的信道估计和检测,MIMO NC-OFDM系统单路信号处理原理如图2所示。

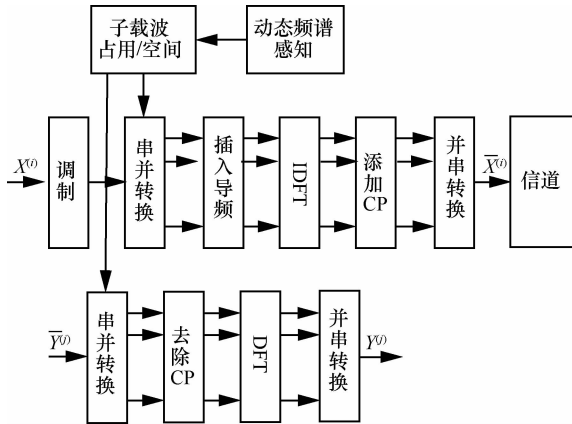


图2 MIMO NC-OFDM系统单路信号处理原理

需要注意的是,发送的信息数据包括导频信息必须落到CR用户通过动态频谱感知技术所确定的空闲子载波位置,而禁用子载波位置数据应设置为0,以避免对主用户造成干扰。由于在接收端,所有接收天线接收到信号之后所进行的处理是一样的,以其中一根接收天线为例。例如第 j 根天线接收到的信号可表示为:

$$Y^j = \sum_{i=1}^{N_t} H^{(ij)} \circ X^i + Z^j = \sum_{i=1}^{N_t} (Fh^{(ij)} \circ X^i + Z^j) \quad (j=1, \dots, N_r) \quad (3)$$

其中, $Y^j=[Y_1^j, \dots, Y_N^j]^T$ 是第 j 根天线接收到信号的频域形式; $H^{(ij)}=[H_1^{(ij)}, \dots, H_N^{(ij)}]^T$ 表示第 i 根发射天线到第 j 根接收天线间信道的频域响应; $X^i=[X_1^i, \dots, X_N^i]^T$ 是第 i 根发射天线发射信号的频域形式; F 是离散傅里叶变换矩阵,第 (m,n) 个元素为 $F_{(m,n)} = e^{-j2\pi mn/N}$; $Z^j=[Z_1^j, \dots, Z_N^j]^T$ 是信道加性复高斯白噪声; $h^{(ij)}=[h_1^{(ij)}, \dots, h_N^{(ij)}]^T$ 表示第 i 根发射天线到第 j 根接收天线间信道冲激响应的离散形式。“ $\circ$ ”表示前后两向量对应的元素相乘。

在多天系统,通常利用正交导频获取信道估计。假设不同发射天线导频插入除了禁用子载波以外的其他不同频率子载波上,同时在任意一根发射天线导频对应位置处,其余发射天线数据应设置为0。根据不同发射天线的导频位置,可以分离接收天线接收到的信号。以从第 i 根天

线发送的导频符号分离第 j 根接收天线接收的信号为例,从式(3)中提取导频信号:

$$Y_p^{(ij)} = C_p^{(i)} F h^{(ij)} \circ X_p^{(i)} + Z_p^{(ij)} \quad (4)$$

其中, $Y_p^{(ij)}$ 表示根据第 i 根发送天线导频信息从第 j 根接收天线提取到的导频信号。同时 $Y_p^{(ij)} = C_p^{(i)} Y^{(ij)}$, $X_p^{(ij)} = C_p^{(i)} X^{(ij)}$, $Z_p^{(ij)} = C_p^{(i)} Z^{(ij)}$, $C_p^{(i)}$ 是第 i 根发射天线的 $p \times N$ 导频选取矩阵,它用于从 N 个子载波中选出 p 个导频:

$$C_p^{(i)} = (s_{l_1}, \dots, s_{l_p})^T \quad (5)$$

其中, $T=\{l_1, l_2, \dots, l_p\}$ 表示导频位置的索引集, s_{l_k} 是一个 N 行单位列向量,其中第 l_k 个元素为1,其他的都为0。对式(4)进行如下变换:

$$R^{(ij)} = Y_p^{(ij)} / X_p^{(i)} = C_p^{(i)} F h^{(ij)} + Z' \quad (6)$$

其中, $R^{(ij)}$ 、 $C_p^{(i)} F$ 对接收端而言均是已知信号,可以通过不同信道估计方法得到信道冲击响应 $h^{(ij)}$ 。“/”表示前后两向量对应的元素相除。

4 基于CS的信道估计

基于导频辅助的信道估计方法是通过在数据符号中插入已知的导频信息,在接收端利用导频信息获得整个信道的频率响应值或冲击响应值。在传统的OFDM信道估计中,导频符号一般在频域上均匀分布,通过内插就可获得不错的效果。然而对NC-OFDM系统,由于授权用户接入行为的随机性,其频谱会呈现随机不连续的特点。若系统中感知用户的导频序列仍采用等间隔的分布,其中某些导频势必会落在授权用户的频谱区域上,从而影响到授权用户的正常通信,这时,传统均匀分配的最优导频信道估计方法将不再适用NC-OFDM系统。基于压缩感知的信道估计方法对导频的设计不再要求均匀分布,只需少量导频随机分布在符号整个频域内,就可以获得很好的信道估计性能。因此压缩感知信道估计方法更适合应用于NC-OFDM系统。

下面就详细描述在MIMO NC-OFDM系统中,用压缩感知的方法进行信道估计的过程。之前已经假设多天线的信道都是相互独立的,因此以其中第 i 根天线发送、第 j 根天线接收为例,利用压缩感知的方法得到第 i 天线到第 j 天线间的信道冲击响应,其他收发天线间的信道冲击响应均可按照以下方法进行类似计算^[14]。

前面通过对接收信号的分析得到式(6)。对比式(1)和式(6)可以看出,如果令 $R^{(ij)}=y$, $C_p^{(i)} F = \Phi$, $h^{(ij)}=x$, $Z'=e$,同时 $C_p^{(i)} F$ 为部分离散傅里叶变换矩阵,满足RIP特性^[13],则求 $h^{(ij)}$ 的信道估计过程完全可以建模为从有噪测量值中重建压缩



感知信号的问题。此时,只要选择合适的压缩感知重构算法,就可以估计出信道冲击响应 $h^{(ij)}$ 。为了实现信道稀疏度未知条件下的信道估计,本文提出采用SAMP算法进行压缩感知信道估计。

SAMP算法是匹配追踪系列算法的一种,相比较OMP等算法,它最大的特点是自适应,即在不知道稀疏度 K 的前提下,自适应调整步长逐步逼近信号。算法将迭代过程分为多个阶段(stage),在每个阶段中信号重建所需的支撑集的大小不发生改变,通过选取感知矩阵 Φ 和余量 r 的内积中最大的一些值形成候选集,再通过迭代从候选集中选取支撑集中的原子。因此使得它的恢复精度高于每次选出一个或几个原子来更新支撑集的OMP算法,但同时运算复杂度也有所加大。基于SAMP的信道估计算法具体步骤如下。

输入: $y(R^{(ij)}=y), \Phi(C_p^0 F=\Phi)$ 。

初始化: 初始余量 $r_0=y$, 初始步长 $S=1$, 阶段次数 $stage=1$, 迭代次数 $n=1$, 候选值集合 $C=\Phi$, 索引值集合 $\Lambda=\Phi$, 支撑集集合 $T=\Phi$, 阈值 ε ; 其中 Φ 是空集。

步骤1 计算余量 r_{n-1} 和感知矩阵 Φ 的每一列的 $u=\{u_j|u_j=|<r_{n-1}, \Phi_j>|, j=1, 2, \dots, N\}$, 并将 u 中 S 个最大值对应的索引值存入集合 Λ_n 中;

步骤2 更新支撑集 Φ_C , 其中 $C_n=T_n \cup \Lambda_n$;

步骤3 应用 $\hat{x}=\arg \min \|y-\Phi_C \hat{x}\|_2$, 得到 $\hat{x}$, 选出 $\hat{x}$ 中前 S 个最大元素对应的索引值并放入 T_n 中;

步骤4 对余量 $r_n=y-\Phi_{T_n} \hat{x}$ 进行更新;

步骤5 如果 $r_n \leq \varepsilon$, 则结束所有过程; 否则进一步判断: 若 $\|r_n\|_2 \geq \|r_{n-1}\|_2$, 则转入下一阶段, 即 $stage=stage+1, S=S \times stage$; 否则继续在本次阶段里迭代 $n=n+1$, 更新支撑集 $T_n=T_{n-1}$ 。

输出: x 的稀疏逼近信号 $\hat{x}$, 即 $h^{(ij)}$ 。

在上述算法中, 初始步长的选取对算法性能影响较大。对于信道估计这样的低维信号恢复问题, 可以选取较小的初始步长值, 复杂度较低, 且可以达到较高的恢复精度。对于有噪声干扰情况, 则可将阈值 ε 设为噪声的平均功率。

5 仿真分析

为了验证MIMO NC-OFDM系统中压缩感知信道估计算法的有效性, 本文选择了SAMP与OMP、SP、CoSaMP算法、传统的LS方法以及LS+IDFT降噪方法进行比较。依据参考文献[3], 系统仿真参数设置见表1。

表1 仿真参数

参数	取值
收发天线数	$N_t=2, N_r=2$
载波数	$N=512$
循环前缀	$CP=64$
调制方式	QPSK
信道长度	$L=50$
稀疏度	$K=6$
SAMP算法初始步长	$S=1$
阈值 ε	噪声平均功率

为了简化MIMO NC-OFDM系统, 采用2收2发的系统模型。在稀疏度未知的情况下, 初始步长设置为1较为妥当; 阈值 ε 视不同的信噪比情况下而定。系统采用频率选择性衰落稀疏信道, 同时假设信道在一个数据符号内是不变的。导频采用频分复用方式下的正交导频。这里采用均方误差(mean square error, MSE)和误码率(bit error rate, BER)来衡量各种方法的性能。

在本次仿真实验中, 关于导频图案的设计, 分为两种不同的CR干扰模式: 宽带干扰模式和窄带干扰模式。具体参数^[3]见表2。

表2 仿真参数

	宽带干扰模式	窄带干扰模式
禁用子载波数/个	100	100
禁用位置	51~80 201~230 351~390	随机分布在 整个符号 频域内

对LS方法和LS+IDFT降噪方法, 导频子载波间隔数设为5, 当遇到禁用子载波时, 就取消这个位置上的导频, 由余下可用的导频来进行信道估计。根据禁用子载波的位置, 这两种方法的可用导频数是 $P=83$; 而对于OMP与SAMP两种压缩感知方法, 仿真阶段分别使用的导频数是 $P=83$ 和 $P=36$, 便于同前两种方法进行比较。同时导频位置采取随机分布的方式, 这是因为对压缩感知而言, 导频位置随机分布能够比均匀分布获得更佳信道估计性能。

图3~图6分别是在两种干扰模式下的MSE与BER比较。从仿真结果看, 无论是在宽带模式还是窄带模式下, 基于压缩感知的信道估计方法性能要优于LS和LS+IDFT降噪方法。首先, 当4种方法的导频数都是 $P=83$ 时, LS方法的估计效果最差, 随着信噪比的增大, 性能基本上没变化; LS+IDFT降噪方法性能虽然可以被接受, 却是在牺牲

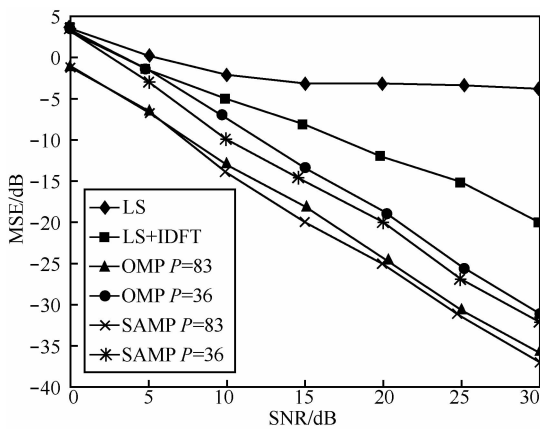


图3 宽带干扰模式下不同信道估计方法 MSE 性能比较

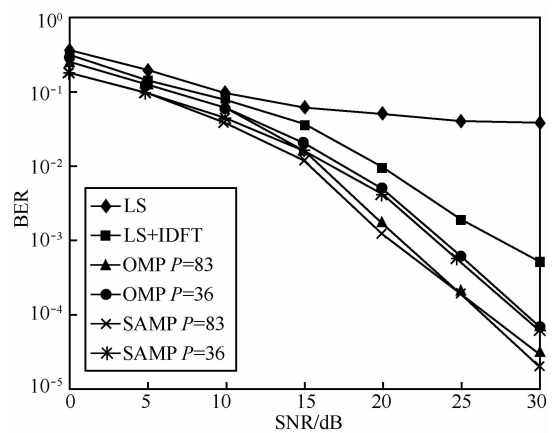


图4 宽带干扰模式下不同信道估计方法 BER 性能比较

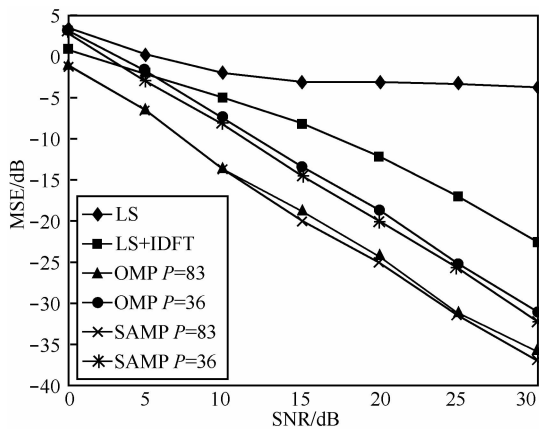


图5 窄带干扰模式下不同信道估计的 MSE 性能比较

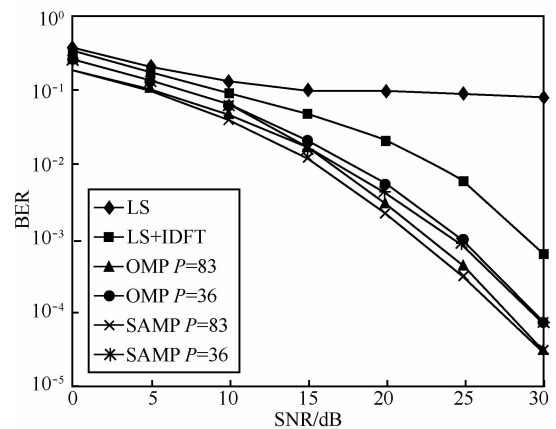
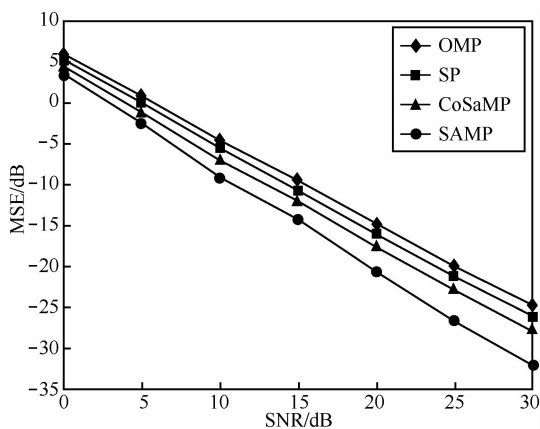
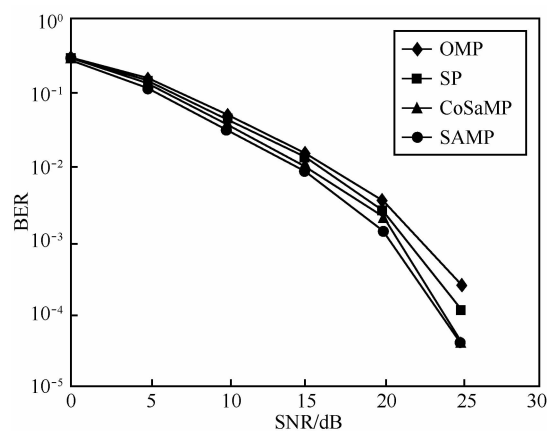


图6 窄带干扰模式下不同信道估计的 BER 性能比较

大量导频的情况下得到的;当信噪比是 30 dB 时,OMP 与 SAMP 两种压缩感知方法 MSE 都比 LS+IDFT 低大约 15 dB。当 OMP 与 SAMP 在导频数 $P=36$ 时,MSE 也比 LS+IDFT 在 $P=83$ 时低 10 dB 左右。换言之,要保持 LS+IDFT 在 $P=83$ 的信道估计性能,如果换成压缩感知的方法,只需要 $P=36$,这就降低了导频的占有率,提高了系统的频谱利

用率,在一定的频带资源条件下提高了系统的吞吐量,更适用于条件受限的 MIMO NC-OFDM 系统。同时,SAMP 作为贪婪迭代类算法的一种,不仅算法复杂度比其他类压缩感知重构算法低,而且不需要稀疏度作为先验条件,更适用于信道估计这样的实时应用。

图 7 和图 8 是在宽带干扰模式下,导频数 $P=36$ 时,

图7 导频数 $P=36$ 时不同信道估计的 MSE 性能比较图8 导频数 $P=36$ 时不同信道估计的 BER 性能比较



SAMP 算法和 OMP、SP、CoSaMP 几种算法的 MSE 与 BER 比较。随着信噪比的增加, SAMP 算法的重建精度越来越高, 并且一直优于其他 3 种算法, 由此可见, SAMP 算法的重构稀疏信号的性能比 OMP、SP、CoSaMP 算法的重建性能好。

6 结束语

本文围绕 MIMO NC-OFDM 系统稀疏频率选择性衰落信道估计问题, 研究了基于压缩感知的信道估计方法。并将 SAMP 与 OMP 两种压缩感知方法同传统的 LS 和 LS+IDFT 降噪方法在不同模式和不同导频数的条件下进行了算法性能比较, 同时比较了在相同导频数下, SAMP 算法和 OMP、SP、CoSaMP 几种算法的重构性能。理论分析和仿真结果表明, 在条件受限的 MIMO NC-OFDM 系统中, 压缩感知的方法用较少的导频获得较好的信道估计性能, 提高了系统的频带利用率。同时本文所用到的 SAMP 算法, 相对于其他较先进的 MP 类算法, 不需要稀疏度作为重构的先验知识, 重构精度有很大的提高, 大大提高了算法的工程实用性。

参考文献:

- [1] TANG H Y. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems [C]//The IEEE Dynamic Spectrum Access Networks, November 8-11, 2005, Baltimore, MD. New Jersey: IEEE Press, 2005: 151-159.
- [2] ZHANG S C, WANG J, LI S Q. A channel estimation method for NC-OFDM systems in cognitive radio context [C]//The IEEE International Conference on Communication System, November 9-11, Guangzhou, China. New Jersey: IEEE Press, 2008: 208-212.
- [3] 何雪云, 宋荣方, 周克琴. 认知无线电 NC-OFDM 系统中基于压缩感知的信道估计新方法[J]. 通信学报, 2011(32): 85-94.
HE X Y, SONG R F, ZHOU K Q. Compressive sensing based channel estimation for NC-OFDM systems in cognitive radio context[J]. Journal of Communication, 2011(32): 85-94.
- [4] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [5] CANDES E, TAO T. Near optimal signal recovery from random projection; universal encoding strategies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [6] THONG T D, LU G, TRAN D. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing [C]//The Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, October 26-29, 2008, Pacific Grove, California, USA. [S.l.:s.n.], 2008: 581-587.
- [7] CANDES E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [8] CANDES E, TAO T. Decoding by linear programming [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12): 4203-4215.
- [9] TROPP J, GILBERT A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [10] MALLAT S, ZHANG Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [11] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(5): 2230-2249.
- [12] LI W C, PREISIG J C. Estimation of rapidly time-varying sparse channel[J]. IEEE J Ocean Eng, 2007, 32(4): 927-939.
- [13] RUDELSON M, VERSHYNIN R. On sparse reconstruction from Fourier and Gaussian measurements[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2008, 61(8): 1025-1045.
- [14] GOMAA A, AL-DHAHIR N. A sparsity-aware approach for NBI estimation in MIMO-OFDM [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(6): 1854-1862.

作者简介



陈恩庆(1977-), 男, 博士, 郑州大学副教授, IEEE 会员, 主要研究方向为无线通信系统及技术、时频分析理论及应用、模式识别等。



高新利(1990-), 女, 郑州大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信、通信信号处理。

相小强(1989-), 男, 郑州大学硕士生, 主要研究方向为通信信号处理。

王忠勇(1965-), 男, 博士, 郑州大学教授, 主要研究方向为通信与信息系统、信号处理。