

MIMO-OFDM 系统中基于压缩感知的 信道参数反馈方法*

傅洪亮^{a,b}, 张贝贝^a, 陶华伟^a, 李明瑞^a

(河南工业大学 a. 信息科学与工程学院; b. 粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 郑州 450001)

摘要: 为了解决 MIMO-OFDM 系统中基于完全信道状态信息预编码所面临的反馈链路开销大的问题, 提出将压缩感知技术应用于这种预编码的信道状态信息的反馈阶段。在接收端通过压缩感知技术对由信道估计得出的信道状态信息进行观测, 将少量的观测值反馈到发送端, 在发送端通过正交匹配追踪算法重构出完全信道状态信息。仿真结果表明, 信道状态信息在 KLT 域的压缩感知性能明显优于 DCT 域的压缩感知性能, 可以由反馈到发送端的少量采样值精确地重构出信道状态信息, 降低了反馈链路的开销。

关键词: 多输入多输出正交频分复用; 预编码; 压缩感知; 信道参数反馈; Karhunen-Loève 变换; 离散余弦变换; 正交匹配追踪

中图分类号: TN911.23 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)05-1870-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.072

Channel parameters feedback method based on compressed sensing for MIMO-OFDM system

FU Hong-liang^{a,b}, ZHANG Bei-bei^a, TAO Hua-wei^a, LI Ming-rui^a

(a. School of Information Science & Technology, b. Key Laboratory of Grain Information Processing & Control, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the problems of large overhead in the feedback link of pre-coding due to the full channel state information, this paper proposed a channel parameters feedback method based on compressed sensing for MIMO-OFDM pre-coding. At the receiver, it observed channel state information which resulted from the channel estimation by compressed sensing measurement matrix. Then a small amount of measurements were fed back to the sender. In the sender, it reconstructed the channel state information through orthogonal matching pursuit algorithm. Simulation results show that the compressed sensing in KLT which can recover the channel state information accurately via a small amount of samples that fed back to the transmitter is superior to the compressed sensing in DCT and decreases the overhead in the feedback link.

Key words: MIMO-OFDM; pre-coding; compressed sensing; channel parameters feedback; Karhunen-Loève transform (KLT); discrete cosine transform (DCT); orthogonal matching pursuit (OMP)

0 引言

在 MIMO-OFDM 系统中, 为了更好地提高系统的整体性能, 可以在发射端对即将发送的信号进行一定的预处理, 使接收端更容易准确检测并恢复出发射信号, 这就是在 MIMO-OFDM 系统中的预编码技术^[1,2]。传统 MIMO-OFDM 预编码可分为基于完全信道和部分信道状态信息预编码^[3]。基于完全信道状态信息预编码是最理想的预编码方案, 但是反馈完全信道状态信息需要很大的反馈链路开销, 而且还受到频谱资源的限制, 因此如何利用少量的反馈数据在发送端近乎完美地重构出信道状态信息是目前研究的热点。

压缩感知 (compressed sensing, CS)^[4,5] 理论表明, 对于稀疏信号可以通过非常有限的测量值来有效重构原始信号。压缩感知理论的基本前提是原始信号必须具有稀疏性或可压缩

性, 也即该信号必须能用一组基进行稀疏地线性表示。这种线性表示的大部分系数为零或接近于零, 只有少数几个系数为较大值。压缩感知与传统的奈奎斯特采样不同。奈奎斯特采样是对信号进行等间隔采样, 但是, 有用信息在信号这个载体中的分布并不一定是均匀的。而压缩感知就是根据有用信息在信号中的分布状况来进行采样。压缩感知通过计算原始信号与随机化的观测矩阵各行之间的内积来实现采样, 可以在节省大量采样资源的同时又很好地重构信号。

本文将压缩感知技术应用于 MIMO-OFDM 系统预编码信道状态信息的反馈阶段, 研究了信道状态信息这类数据在 KLT 域及 DCT 域的压缩感知性能, 并指出了今后需要重点研究的方向。仿真结果表明, 本文提出的方案可以由反馈到发送端的少量采样值精确地重构出信道状态信息, 降低了反馈链路的开销。

收稿日期: 2011-09-26; 修回日期: 2011-10-28 基金项目: 河南省科技创新杰出青年基金资助项目 (104100510008)

作者简介: 傅洪亮 (1965-), 男, 河南郑州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线通信、通信信号处理; 张贝贝 (1987-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为通信信号处理 (163zhangbeibeibei@163.com); 陶华伟 (1987-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要研究方向为通信信号处理; 李明瑞 (1987-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为通信信号处理。

1 压缩感知理论模型

设 x 是一个 $N \times 1$ 稀疏信号,能够将其稀疏表示的基向量是 $\{\psi_j\}_{j=1}^N$ 。如图1所示,如果 x 的稀疏度为 K (此时称 x 是 K -稀疏信号),那么线性表达式为

$$x = \sum_j \psi_j \alpha \quad (x = \Psi\alpha) \quad (1)$$

其中: α 是 $N \times 1$ 系数向量, α 中最多存在 K 个非零元素或较大的数,其他元素都为零或近乎为零; Ψ 是 $N \times N$ 基矩阵。

压缩感知是根据信息在信号中的分布情况来对信号进行采样的,这就与传统的均匀采样有了很大的区别。为此,压缩感知必然是对信号进行全局观测,并且每次的观测值尽量是有用信息的不同部分。同时这些观测值的信息冗余度几乎为零。由此可见,通过对信号进行观测,在观测次数远小于原信号采样数目的情况下,仍然可以近乎完美地重构出原始信号。

具体地,设 x 是 Ψ 基下的 K -稀疏信号,有 M 个不同的观测行向量 $\{\varphi_j\}_{j=1}^M$,通过计算不同观测向量与 x 的内积,获得对应的观测值

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \alpha = \Theta \alpha \quad (2K \leq M \ll N) \quad (2)$$

其中:

$$\Theta = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M]^T, \Theta = \Phi \Psi \quad (3)$$

这里要求 Θ 应满足“限制等距特性(RIP)”^[6]且观测矩阵 Φ 与基矩阵 Ψ 完全不相干^[7]。其原因在于当对信号进行观测时,要使每次得到的观测值尽量是原始信号所含信息的不同成分。如果观测矩阵 Φ 与基矩阵 Ψ 相干,就不能保证每次的观测值之间没有交叉成分(冗余成分),这样显然不利于对信号进行压缩感知采样。

目前用于压缩感知的观测矩阵主要有以下几种:高斯随机矩阵、二值随机矩阵(伯努利矩阵)、傅里叶随机矩阵、哈达玛矩阵和一致球矩阵等。本文采用具有良好的 RIP 以及不相干性的高斯随机矩阵作为压缩感知观测矩阵。

N 维原始信号 x 经过压缩感知观测(采样)得到 M 维观测值 y ,观测流程如图2所示。

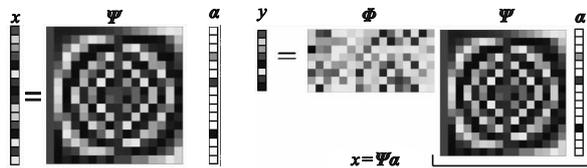


图1 基矩阵 Ψ 和系数向量 α 表达 K -稀疏信号 x 示意图($K=3, N=16$)

图2 压缩感知观测流程示意图($K=3, M=8, N=16$)

得到 $M \times 1$ 观测值 y 后,可以通过求解一个最优 l_0 范数问题精确重构出原始信号 x 。

由

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmin} \|\alpha\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \Theta \alpha = y \quad (4)$$

计算出 $\hat{\alpha}$ 。得到 $\hat{\alpha}$ 后,即可通过

$$\hat{x} = \Psi \hat{\alpha} \quad (5)$$

来完成对原始信号的重构。

Candes 等人^[8]指出,如果要精确重构出 K 稀疏信号 x , M 必须满足

$$M = O(K \log(N/K)) \quad (6)$$

压缩感知重构算法有基追踪(basis pursuit, BP)算法、内点法、共轭梯度投影法、迭代阈值法、正交匹配追踪算法(OMP),

最小全变分法以及一些综合的改进算法。本文采用正交匹配追踪算法(OMP)^[9]求解最优 l_0 范数问题以重构原始数据。

2 MIMO-OFDM 系统中的压缩感知

如图3所示,在 MIMO-OFDM 系统中,设发送端天线数为 P ,接收端天线数为 Q 。假设接收端对当前信道已经进行了完全估计,得到了信道矩阵 H (包括幅度及相位信息);将 H 变换为 $E \times 1$ 的列向量 H' ;对 H' 进行稀疏变换得到 α ,然后对 α 进行压缩感知观测得到维度比 α 的维度低得多的观测值列向量 y ,进而将 y 反馈到发送端;在发送端求解一个最优 l_0 范数问题得到 $\hat{\alpha}$,再对 $\hat{\alpha}$ 进行稀疏反变换,即可得到 \hat{H} 。

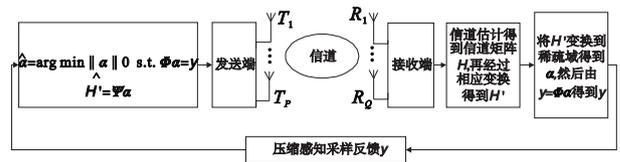


图3 压缩感知应用于MIMO-OFDM系统

本文分别采用 KLT 域压缩感知和 DCT 域压缩感知对 H' 进行处理。

1) H' 在 KLT 域的压缩感知

KLT 域的压缩感知为

$$\alpha = U^T H' \quad (7)$$

其中: U^T 被称为 KLT 矩阵。KLT 矩阵可以由 H' 的自相关矩阵或 H' 的协方差矩阵进行特征值分解得到。本文采用自相关矩阵特征值分解的方法得到 KLT 矩阵。 H' 的自相关矩阵为

$$R = H' H'^T = U \Lambda U^T \quad (8)$$

由于 H' 是 $E \times 1$ 列向量,为了在仿真中减少运算量,可以通过计算 H' 的奇异值分解来得到 KLT 矩阵 U^T 。将 H' 进行奇异值分解得到

$$H' = S \Sigma V^T \quad (9)$$

于是

$$H' H'^T = S \Sigma^2 S^T = S \Lambda S^T \quad (10)$$

对比式(8)(10)可得

$$U = S \quad (11)$$

经过 KLT 得到 α 后,对其进行压缩感知观测

$$y = \Phi \alpha \quad (12)$$

这里, Φ 是 $M \times E$ ($M \ll E$) 的高斯随机矩阵,那么 y 是 $M \times 1$ 观测值向量。然后接收端将 y 反馈到发送端。在发送端(已知 Φ) 由

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmin} \|\alpha\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \Phi \alpha = y \quad (13)$$

得到 $\hat{\alpha}$, 于是

$$\hat{H}' = U \hat{\alpha} \quad (14)$$

2) H' 在 DCT 域的压缩感知

对 H' 进行一维 DCT:

$$\alpha(k) = \frac{1}{\sqrt{E}} \sum_{x=0}^{E-1} H'(x) \quad k=0 \quad (15)$$

$$\alpha(k) = \sqrt{\frac{2}{E}} \sum_{x=0}^{E-1} H'(x) \cos \frac{(2x+1)k\pi}{2E}, k=1, 2, \dots, E-1 \quad (16)$$

得到 α 后,再经过式(13)(14)的变换,在接收端计算出 $\hat{\alpha}$ 。然后对 $\hat{\alpha}$ 进行一维逆 DCT:

$$\hat{H}'(x) = \frac{1}{\sqrt{E}} \hat{\alpha}(0) + \sqrt{\frac{2}{E}} \sum_{k=1}^{E-1} \hat{\alpha}(k) \cos \frac{(2x+1)k\pi}{2E}$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, E - 1 \quad (17)$$

最后分别计算基于上述两种域的压缩感知得到的 \hat{H}' 和 H' 之间的标准误差 (standard error, SE) 以评价重构数据的可靠性。标准误差越小, 重构数据可靠性越大。

3 仿真结果与分析

仿真中, 设收发两端天线数 $P = Q = 4$, 信道为瑞利衰落信道, OFDM 子载波数 $N_c = 32$, 每个子载波多径扩展数 $D = 3$, 每径延迟符号数 $T_c = 1$, H' 的行数 $E = 1536$ 。压缩感知观测次数即高斯随机观测矩阵行数 $M = 200$ 。

图 4 给出了基于 KLT 域与 DCT 域的压缩感知对 MIMO-OFDM 信道参数幅度的重构效果对比。由图 4(a) 可知, 信道参数幅度数据在 KLT 域只有一个绝对值较大的数, 其余的数都为零或近乎为零, 因而这些数据在 KLT 域具有很好的稀疏性。由图 4(b) 可知, 经 KLT 域稀疏化的数据可以精确重构出原始数据, 由仿真结果显示 $SE = 0$, 因此重构数据可靠性很大。由图 4(c) 说明, 信道参数幅度数据在 DCT 域只有少数几个较大值, 其余均为零或近乎为零的数, 因此信道参数幅度数据在 DCT 域同样具有较好的稀疏性。由图 4(d) 可看出, 经过 DCT 域稀疏化的数据对原始数据的重构效果没有 KLT 域重构效果好, 但仿真结果显示 $SE = 0.0503$, 说明重构数据的可靠性还是比较好的。

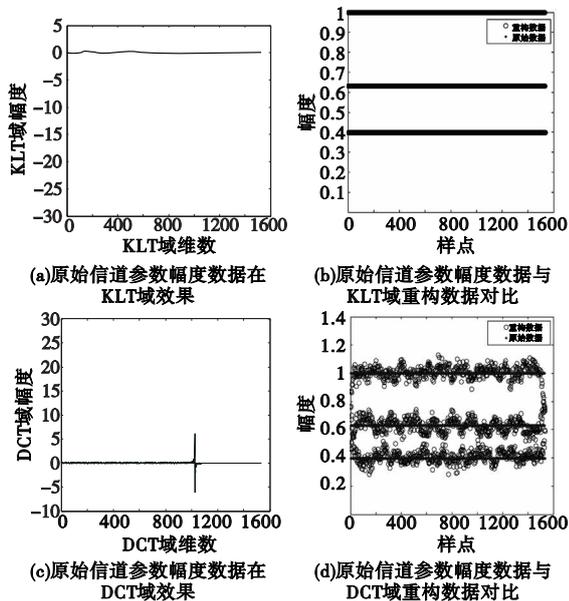


图 4 基于 KLT 域与 DCT 域的压缩感知针对信道参数幅度的重构效果对比

图 5 绘出了基于 KLT 域与 DCT 域的压缩感知针对 MIMO-OFDM 信道参数相位的重构效果对比。由图 5(a)(b) 可知, 与信道参数幅度数据相同, 信道参数相位在 KLT 域只有一个绝对值较大的数, 其余的数都是为零或近乎为零, 因而也具有很好的稀疏性且重构效果很好。同样仿真结果显示 $SE = 0$, 所以重构数据可靠性很大。在仿真过程中发现, 信道参数相位数据在 DCT 域的稀疏性较差 (图 5(c)), 重构效果也不好。为了更好地体现原始信道参数相位数据与 DCT 域重构数据的对比情况, 仿真时将原始数据与重构数据均进行了量化。由图 5(d) 可知, DCT 域重构效果较差, 仿真结果显示 $SE = 1.9818$, 说明重构数据的可靠性较小。

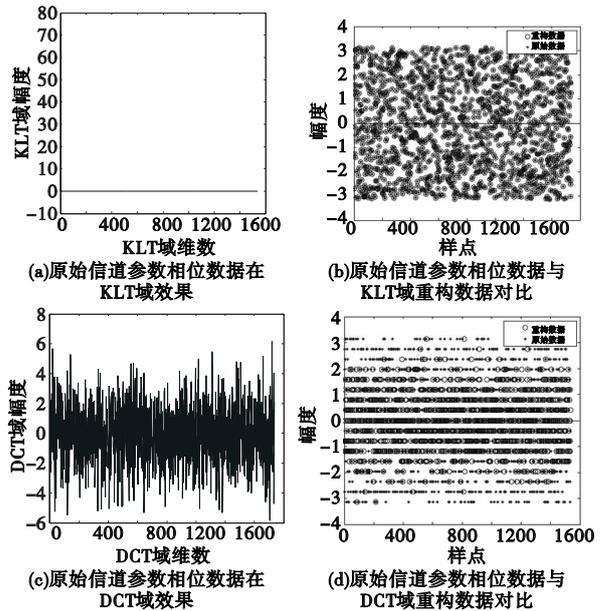


图 5 基于 KLT 域与 DCT 域的压缩感知针对信道参数相位的重构效果对比

数据在变换域的压缩感知性能包括数据在变换域的稀疏性和压缩感知重构性能。原始数据越稀疏, 压缩感知对原始数据的重构效果就越好。由图 4 和 5 可知, 无论是信道参数幅度数据还是相位数据, 它们在 KLT 域的压缩感知性能都比在 DCT 域的压缩感知性能好。原因在于 KLT 可以完全去除原始数据中各元素之间的相关性, 使数据的能量集中到极少数系数上, 从而使数据在 KLT 域上达到最稀疏的理想效果且原始数据可以被精确重构。因此, KLT 是一种最佳的稀疏变换方法。但是, 由式 (7) ~ (14) 可知, 对于每个 H' 都需要求对应的 KLT 矩阵 U , 复杂度较高。因此本文一方面要继续寻找解特征值与特征向量的快速算法, 另一方面则要寻找一些虽不是最佳但也有较好的去相关性能且容易实现的一些变换方法。DCT 对信道参数特别是相位数据的去相关性能不如 KLT 好, 导致数据在 DCT 域的稀疏性以及压缩感知重构性能较差。

4 结束语

本文将压缩感知技术应用于 MIMO-OFDM 预编码中的反馈阶段, 对信道状态信息在 KLT 域和 DCT 域的压缩感知性能作了比较。仿真结果显示, 信道状态信息在 KLT 域的稀疏性能比在 DCT 域的稀疏性能好, 且信道状态信息在 KLT 域有更优异的压缩感知重构性能。由于 KLT 很难实际应用于信道状态信息的压缩感知中, 因此如何将数据进行趋近于 KLT 域那样的稀疏化, 找到一种能实际应用并且性能趋近于 KLT 的方法就成为今后研究的课题。

参考文献:

[1] JIANG Cheng-ling, WANG M M, YANG Chun-liang. MIMO precoding using rotating codebooks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 1222-1227.
 [2] 王静怡. 多用户 MIMO 系统中的预编码技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
 [3] 傅洪亮, 陶勇, 张元. 基于非线性预编码的多载波分层空时检测方法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4): 1509-1511.

(上接第 1872 页)

- [4] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans on Information Theory*,2006,52(4):1289-1306.
- [5] 金坚,谷源涛,梅顺良. 压缩感知及应用[J]. *电子与信息学报*,2010,32(2):470-475.
- [6] CANDES E, ROMBERG J. Sparsity and incoherence in compressive sampling[J]. *Inverse Problems*,2007,23(3):969-985.
- [7] CANDES E, TAO T. Decoding by linear programming[J]. *IEEE*

Trans on Information Theory,2005,51(12):4203-4215.

- [8] CANDES E, TAO T. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. *IEEE Trans on Information Theory*,2006,52(12):5406-5425.
- [9] TROPP J, GILBERT A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Trans on Information Theory*,2007,53(12):4655-4666.