

基于空频相关性的大规模 MIMO-OFDM 信道压缩反馈算法

李晓辉* 王维猛 黑永强

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 大规模 MIMO-OFDM 系统中, 信道常常存在较强的空间和频域相关性。针对多数信道压缩反馈算法仅考虑空间或频域相关性的问题, 该文提出一种空频联合压缩反馈算法。首先, 根据压缩感知理论进行了信道空频 2 维稀疏度分析; 然后, 推导了信道矩阵在空间和频域 2 维相关性下的联合稀疏基; 最后, 利用该联合稀疏基给出了空频联合压缩算法。仿真结果与分析表明, 该算法在保证信道反馈精度的同时, 可显著降低反馈量。

关键词: 无线通信; MIMO-OFDM; 压缩反馈; 空频相关性

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1178-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01048

Compressed Channel Feedback Based on Spatial-frequency Correlation for Massive MIMO-OFDM Systems

Li Xiao-hui Wang Wei-meng Hei Yong-qiang

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In Massive MIMO-OFDM systems, the channel shows strong correlations in both spatial and frequency domain. Aiming at the problem that only spatial or frequency domain correlation is considered in most of the existing compressed feedback algorithms, a joint spatial-frequency compression algorithm is proposed. First, a two dimensional sparsity of channel in spatial-frequency domain is analyzed according to the compressed sensing theory. Then, a joint sparse matrix of channel is derived. Based on the joint sparse matrix, the joint spatial-frequency compression algorithm is presented. Simulation results and analysis show that, the proposed algorithm can significantly reduce the feedback load with acceptable accuracy.

Key words: Wireless Communication; MIMO-OFDM; Compressed-feedback; Spatial-frequency correlation

1 引言

大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统在基站端使用数以百计的低功耗天线, 通过波束赋形使得传输信号的能量更明确地指向期望方向, 提升接收端的信噪比, 提升系统吞吐量^[1]。然而, 为了通过使用大规模 MIMO 获得性能增益, 基站需要获取信道状态信息(CSI)。信道状态信息的获取可通过信道互易性, 也可通过反馈获得。但是, 信道互易性并不适用于频分双工(Frequency Division Duplexing, FDD)系统。由于天线数过多, 传统的信道信息反馈降低方法, 如矢量量化方法和基于码本的方法等并不适用于大规模 MIMO 系统^[2]。此外, 未来移动通信系统中常常采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和 MIMO 相结合的传输模

式, 不同子载波的信道反馈也会加剧反馈带来的开销。因此, 需要设计有效的算法来降低大规模 MIMO-OFDM 系统的反馈开销。

近年来, 压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论被广泛应用于信号处理和通信领域, 为研究信道的压缩反馈提供了新的思路。使用压缩感知降低 MIMO-OFDM 系统中反馈量的方法主要从空间和频域两个角度来考虑。由于大规模 MIMO-OFDM 系统的天线间距小, 信道往往具有较强的空间相关性^[1,2]。文献[1]利用了大规模 MIMO 的空间相关性, 提出了信道模拟压缩反馈方法, 以更小的功率和更短的时间获得了更好的反馈性能; 文献[2]也使用压缩感知从空间角度来降低反馈开销, 提出了根据信道状态变化自适应调整压缩比和将卡洛南-洛伊变换(Karhunen-Loeve Transform, KLT), 离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)相结合的两种自适应压缩算法, 进一步提升了反馈效率。在频域角度, 文献[3]指出当信道多径数远远小于子载波数时, 频域信道矩阵在快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)矩阵上是稀疏的, 也就是使用 FFT

2013-07-17 收到, 2013-10-25 改回

国家自然科学基金(61201135), 国家科技重大专项(2012ZX03001027-004)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B08038)资助课题

*通信作者: 李晓辉 xhli@mail.xidian.edu.cn

变换矩阵作为频域稀疏基可得到频域信道的最稀疏表示。文献[4-6]指出相邻子载波上的信噪比具有高度相关性，所有子载波上信噪比构成的信号是一种稀疏可压缩的信号，并提出在频域采用基于压缩感知理论的压缩反馈方法，在相同的反馈条件下获得更好的系统吞吐量性能。文献[7]在压缩反馈的基础上提出了基于特征值的反馈算法，进一步提高了压缩和反馈效率。

本文在分析现有空间信道压缩反馈算法^[1,2]和信道频域相关性^[4-7]的基础上，将空间和频域的相关性相结合，推导了信道矩阵在空频相关性下的联合稀疏基，并提出了一种基于联合稀疏基的信道联合压缩反馈算法，进一步降低了大规模 MIMO-OFDM 系统的反馈量。本文剩余部分结构如下：在第2节，给出了系统模型；在第3节，对大规模 MIMO-OFDM 系统的信道进行了稀疏度分析，并提出了基于空频相关性的信道联合压缩反馈算法；第4节对上述算法进行了仿真及相应的分析；最后在第5节给出研究结论。

2 系统模型

考虑如图1所示的多用户大规模 MIMO 系统。假定基站端有 N_t 根天线，在 N_c 个子载波上向 K 个用户同时发送数据，每个用户接收天线数为 N_r 。要发送的数据经过 OFDM 调制后映射到 N_c 个子载波上。经过 IFFT 变换后，令基站在子载波 n_c 上发送给用户 k 的信号为 $x_k^{n_c}$ ($n_c = 1, 2, \dots, N_c, k = 1, 2, \dots, K$)，则进行波束赋形后，基站在子载波 n_c 上发送给用户用户的信号为

$$\mathbf{u}^{n_c} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^{n_c} x_k^{n_c} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{w}_k^{n_c}$ 表示用户 k 在子载波 n_c 上的波束成形矢量。经过信道传输后，第 k 个用户在第 n_r ($n_r = 1, 2, \dots, N_r$) 根接收天线第 n_c 个子载波上收到的信号可以表示为

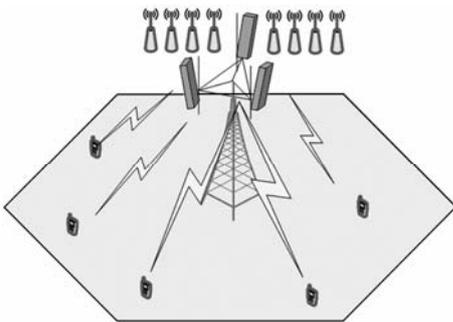


图1 多用户大规模 MIMO 系统

$$r_k^{n_c}(n_r) = \mathbf{h}_k^{n_c, n_r} \mathbf{u}^{n_c} + n = \mathbf{h}_k^{n_c, n_r} \mathbf{w}_k^{n_c} x_k^{n_c} + \mathbf{h}_k^{n_c, n_r} \cdot \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{w}_j^{n_c} x_j^{n_c} + n, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

其中 $\mathbf{h}_k^{n_c, n_r} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 是子载波 n_c 上基站到第 k 个用户第 n_r 根接收天线上的频域信道响应， n 为均值为 0，方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。用户端进行相应的检测及子载波解映射从而解出发送的信号。

3 基于空频相关性的信道压缩反馈

3.1 压缩感知简介

压缩感知(CS)理论突破了奈奎斯特采样定理的限制，抛弃了高速采样再压缩的方法，利用信号空间的性质，建立新的信号描述和处理方法，使其在保证信息不损失的情况下，用远低于奈奎斯特采样定理要求的速率采样信号，同时又完全恢复出原始信号^[8]。压缩感知理论主要包括 3 部分：(1)信号的稀疏表示；(2)设计观测矩阵，要在降低维数的同时保证原始信号的信息损失最小；(3)设计信号恢复算法，利用 M 个观测值无失真地恢复出长度为 N 的原始信号。在压缩感知模型中，并不是直接测量稀疏信号本身，而是将信号投影到一组观测矩阵 Φ 上而得到测量值。即，用一个与稀疏变换矩阵不相关的 $M \times N$ ($M \ll N$) 观测矩阵 Φ 对信号进行线性投影，得到线性测量值。如果观测基矩阵与稀疏基矩阵的乘积满足有限等距特性(RIP)，就可以在接收端根据观测值、观测矩阵和稀疏矩阵等约束条件恢复出原始信号。

3.2 信道空频稀疏度分析

大规模 MIMO-OFDM 系统中，用户信道矩阵 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{(N_r \times N_t) \times N_c}$ ，其中 \mathbf{H} 的第 i 列 $\mathbf{H}(:, i)$ 表示子载波 i 上的信道，其在空间稀疏基上是稀疏的，如式(3)所示，可选用的稀疏基有 DCT 变换稀疏基，KLT 变换稀疏基等，本文将空间稀疏基 ψ_s 选为 DCT 变换稀疏基^[1,2]； \mathbf{H} 的第 j 行 $\mathbf{H}(j, :)$ 是每一对收发天线对应的所有子载波上的信道，在频域稀疏基上是稀疏的，如式(4)所示，其中的频域稀疏基 ψ_f 选为 FFT 变换矩阵^[4-7]。其中，每一列的稀疏结果 $\theta_{\text{col}, i}$ 和每一行的稀疏结果 $\theta_{\text{row}, j}$ 均仅有有限个非零值。

假定 $\mathbf{H}(:, i)$ 经过 ψ_s 稀疏后的结果为 $\theta_{\text{col}, i}$ ， $\mathbf{H}(j, :)$ 经过 ψ_f 稀疏后的结果为 $\theta_{\text{row}, j}$ ，那么

$$\mathbf{H}(:, i) = \psi_s \theta_{\text{col}, i} \quad (3)$$

$$\mathbf{H}^T(j, :) = \psi_f \theta_{\text{row}, j} \quad (4)$$

引理 1 对于一个 2 维矩阵，如果矩阵的行与行之间是相关的，矩阵的列与列之间也是相关的，则该 2 维矩阵左乘一个正交矩阵，并不会改变矩阵

行与行之间的相关性。同理，对此矩阵右乘一个正交矩阵，不会改变矩阵列与列之间的相关性。

证明 如果一个矩阵是正交矩阵，那么此矩阵是一个可逆矩阵，同时矩阵可逆等价于此矩阵可表示为若干个同阶初等矩阵的乘积，所以矩阵同一个正交矩阵相乘，相当于此矩阵和一系列初等矩阵的乘积相乘，根据矩阵初等变换的性质，并不会改变此矩阵另一维的特性。

根据引理 1, 我们可以利用空域和频域对信道矩阵进行联合压缩, 得到矩阵更稀疏的表示形式。由于本文所选用的空间稀疏基 ψ_s (DCT 变换矩阵) 或频域稀疏基 ψ_f (FFT 变换矩阵) 均是正交矩阵, 由引理 1 可知, 在对信道矩阵的行进行处理后, 并没有改变信道矩阵列与列之间的相关性, 可再进一步利用列与列间的相关性对信道矩阵的列进行压缩, 得到信道更加稀疏的表示形式。

3.3 基于空频相关性的信道压缩反馈算法

本节分 3 部分来介绍所提的新算法: 一是推导了空频联合稀疏基, 二是给出了算法的具体实现过程, 三是分析了算法的反馈量。

3.3.1 联合稀疏基 由于在基站恢复信号时需要使用稀疏基矩阵, 因此需要根据 ψ_f 和 ψ_s 推导出 H 的联合稀疏基矩阵 ψ 。即: 求得 $\psi = f(\psi_s, \psi_f)$ 使得 $\text{vec}(H)$ 在 ψ 上是稀疏的, 其中 $f(\bullet)$ 表示由 ψ_f 和 ψ_s 得到 ψ 的函数。

假定向量 $\text{vec}(H)$ 在 ψ 上的稀疏结果为 s , 矩阵 H 经过 ψ_f 和 ψ_s 联合稀疏的结果为 S , 所推导出的 ψ 应满足的条件为: $s = \text{vec}(S)$ 。

(1) 首先考虑利用信道矩阵的空间相关性对 H 的每一列进行压缩: 将 H 表示为 $H = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{N_c}]$, 根据式(3)可得

$$H = [\psi_s \theta_{\text{col},1} \ \psi_s \theta_{\text{col},2} \ \dots \ \psi_s \theta_{\text{col},N_c}] = \psi_s \theta_1 \quad (5)$$

其中 $\theta_1 = [\theta_{\text{col},1} \ \theta_{\text{col},2} \ \dots \ \theta_{\text{col},N_c}]$ 是一个 $(N_r \times N_t) \times N_c$ 维的矩阵, 表示的是将 H 的每一列进行空间压缩的结果, 是 H 的空间稀疏表示。

(2) 然后对 H 的空间稀疏表示结果考虑利用频域相关性对其进行进一步压缩, 得到 H 空频联合稀疏表示形式: 由引理 1 可知, θ_1 矩阵的每一行在稀疏基 ψ_f 上也是稀疏的, 记 $\theta_1 = [\theta_1^1; \theta_1^2; \dots; \theta_1^{N_r \times N_t}]$, 其中 θ_1^i 是一个行向量, 表示 θ_1 矩阵的第 i 行。假设 $(\theta_1^i)^T$ 在 ψ_f 上稀疏表示的结果为 θ_{11}^i , 即: $(\theta_1^i)^T = \psi_f \theta_{11}^i$, 那么

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \left[(\psi_f \theta_{11}^1)^T; (\psi_f \theta_{11}^2)^T; \dots; (\psi_f \theta_{11}^{N_r \times N_t})^T \right] \\ &= \theta_{11} \psi_f^T \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\theta_{11} = [\theta_{11}^1 \ \theta_{11}^2 \ \dots \ \theta_{11}^{N_r \times N_t}]^T$ 也是一个 $(N_r \times N_t) \times N_c$ 维的矩阵, 是 H 的空频联合稀疏表示。

(3) 推导 H 的空频联合稀疏基: 将式(6)代入式(5), 得

$$H = \psi_s \theta_{11} \psi_f^T \quad (7)$$

于是可以得到

$$\theta_{11} = \psi_s^T H \psi_f \quad (8)$$

令 $S = \theta_{11}$, 则得到信道矩阵 H 经过联合稀疏的结果, 即

$$S = \psi_s^T H \psi_f \quad (9)$$

根据式(9), 可以分别通过 ψ_s 和 ψ_f 恢复出信道矩阵 H , 即: 先进行频域信道的恢复, 再进行空间信道的恢复, 这种方法计算复杂度较高。为了简化恢复信道矩阵 H 的步骤, 下面给出用于空频 2 维联合处理的稀疏基。

对于 S , 目标是找出 $\psi = f(\psi_s, \psi_f)$, 使得信道矩阵 H 对应的列向量 $\text{vec}(H)$ 在稀疏基 ψ 上是稀疏的, 且满足条件

$$s = \psi^T \text{vec}(H) = \text{vec}(S) = \text{vec}(\psi_s^T H \psi_f) \quad (10)$$

根据文献[9]中式(496)可得

$$s = \text{vec}(\psi_s^T H \psi_f) = (\psi_f \otimes \psi_s)^T \text{vec}(H) \quad (11)$$

所以, $\text{vec}(H) = (\psi_f \otimes \psi_s) s$, 那么联合稀疏基为 $\psi = (\psi_f \otimes \psi_s)$ 。

3.3.2 算法具体实现 根据上面的分析和推理, 本文给出使用基于空频相关性的信道联合压缩算法的具体流程图, 如图 2 所示

根据图 2 所示, 所提出的新的信道压缩反馈算法的具体步骤为:

步骤 1 确定 H 的空间稀疏基 ψ_s 和频域稀疏基 ψ_f , ψ_s 选用 DCT 变换矩阵, ψ_f 选用 FFT 变换矩阵;

步骤 2 根据 ψ_s 和 ψ_f 得到联合稀疏基 $\psi = (\psi_f \otimes \psi_s)$;

步骤 3 生成随机高斯观测矩阵 Φ , 其每一个元素均服从 $N(0, 1/\sqrt{M})$ 分布, M 表示 Φ 矩阵的行数;

步骤 4 根据观测矩阵 Φ 对信道矩阵进行随机投影, 得到观测矢量 $s = \Phi \text{vec}(H)$;

步骤 5 根据观测矢量 s , 联合稀疏基 ψ 和观测矩阵 Φ , 采用正交匹配追踪(OMP)算法在基站端进行信道信息的恢复, 恢复出信道矩阵 H 。

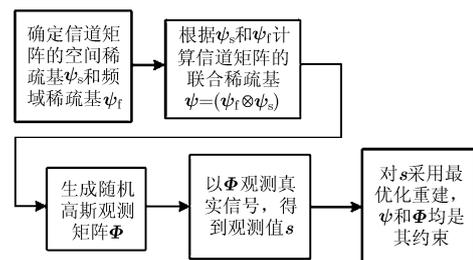


图 2 信道联合压缩反馈算法流程图

3.3.3 反馈量分析 在 CS 中, 压缩比 η 的定义为观测矢量的长度与原信号矢量长度的比值。本文中, 假定空间稀疏压缩比为 η_1 , 频域稀疏压缩比为 η_2 , 所提联合压缩算法的压缩比为 η_3 , 其中 $\eta_i < 1$, $i = 1, 2, 3$ 。如果仅采用空间压缩, 所需反馈的观测矢量的长度为 $M_1 = \eta_1 N_r N_t N_c$; 仅采用频域压缩, 所需反馈的观测矢量的长度为 $M_2 = \eta_2 N_r N_t N_c$, 采用联合压缩算法所需反馈的观测矢量的长度为 $M_3 = \eta_3 N_r N_t N_c$ 。由于 M_i 之间的关系满足 $M_3 = M_2 \eta_1 = M_1 \eta_2$ ($\eta_i < 1$), 所以 M_3 小于 M_1 同时小于 M_2 , 即: 使用联合压缩反馈算法所需的反馈量最小。

4 仿真与性能

4.1 仿真与性能分析

本节对上述推导进行仿真验证。仿真中, 信道反馈的精度用归一化误差来表示, 假定原信道矩阵为 \mathbf{H} , 基站端恢复出的信道矩阵为 $\hat{\mathbf{H}}$, 那么恢复信道时产生的归一化误差为

$$\sigma_{\text{err, MSE}} = \frac{\|\mathbf{H} - \hat{\mathbf{H}}\|_2^2}{\|\mathbf{H}\|_2^2}$$

参照标准 3GPP TR 25.996 和 3GPP TR 36.814 搭建 Massive 信道模型。首先, 选定 SCM urban macro 场景, 然后根据场景生成信道模型参数: 发射端天线数为 $N_t = 128$, 天线高度为 32 m, 接收端天线数为 $N_r = 1$, 发射端天线间距为 0.1λ , λ 表示载波波长, 子载波数为 $N_c = 256$, 用户数 $K = 5$, 用户在小区内均匀分布, 移动台速度方向在 $[0^\circ, 360^\circ)$ 范围内服从均匀分布。根据标准 3GPP TR 25.996 我们确定基站端发射功率为 46 dBm, 时延扩展为 $\sigma_{\text{DS}} = 10^{\varepsilon_{\text{DS}}\alpha + \mu_{\text{DS}}}$, 角度扩展为 $\sigma_{\text{AS}} = 10^{\varepsilon_{\text{AS}}\beta + \mu_{\text{AS}}}$, 阴影衰落为 $\sigma_{\text{SF}} = 10^{\sigma_{\text{SF}}\gamma/10}$ 等信道模型参数。根据用户和基站位置计算出用户到基站的距离、信号从基站的直视径离开角、信号到达用户的直视径到达角。根据角度扩展及多径分布, 计算各多径的到达角、离开角等信息。至于信道中多径的分布,

假定 OFDM 稀疏信道在一个 OFDM 符号内时不变, 多径数 $P = 6$, 多径信道模型中第 1 个路径时延为 0, 其它路径的时延为 $\tau_n = -r_{\text{DS}}\sigma_{\text{DS}}\ln z_n$, 每条路径的增益为 $P_n = \exp[(1 - r_{\text{DS}})\tau_n / (r_{\text{DS}}\sigma_{\text{DS}})] \cdot 10^{-z_n/10}$, 其中各符号的取值及意义参照标准 3GPP TR 25.996。最后根据生成的用户信道模型参数生成信道矩阵 \mathbf{H} 。

对比信道稀疏表示前后的信道增益直方图, 通过观察稀疏表示前后信道的特性变化来说明本文采用的稀疏表示方法的有效性。为使图形更清晰, 我们仅画出其中 64 根天线 64 个子载波的情形, 分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

由图 3 (a)和图 3(b)可以看出, 在对信道进行稀疏表示前, 信道增益在不同的发射天线和不同的子载波上, 其增益值均是非零的, 而且也不符合指数衰减的规律, 不过信道增益在发射天线之间, 子载波之间存在着相关性; 经过信道稀疏表示后, 信道增益可用有限个非零值进行表示, 说明本文提出的稀疏表示方法是有效的。对比可看出, 本文提出的联合稀疏算法是有效的, 可获得信道信息的最稀疏表示。

下面采用上文推导出的稀疏基来对信道矩阵进行压缩, 然后再对信道矩阵进行恢复, 并与原来的算法进行对比。对于空间的相关性, 采用 DCT 稀疏基, 对于频域的相关性, 采用 FFT 变换稀疏基, 对于联合利用空间相关性和频域间的相关性, 采用所提算法推导出的稀疏基。仿真曲线如图 4 和图 5 所示。

由压缩比的定义可知, 图 4 和图 5 也可看作是在不同反馈量下的信道反馈准确度比较, 可以看出, 仿真结果论证了本文算法的有效性。与其它算法相比, 本文提出的算法在压缩比较低(小于 0.3)时可获得较理想的反馈性能(反馈误差在 10^{-15} 数量级), 同时, 在相同反馈量下, 所提算法对信道恢复的准确性最高。

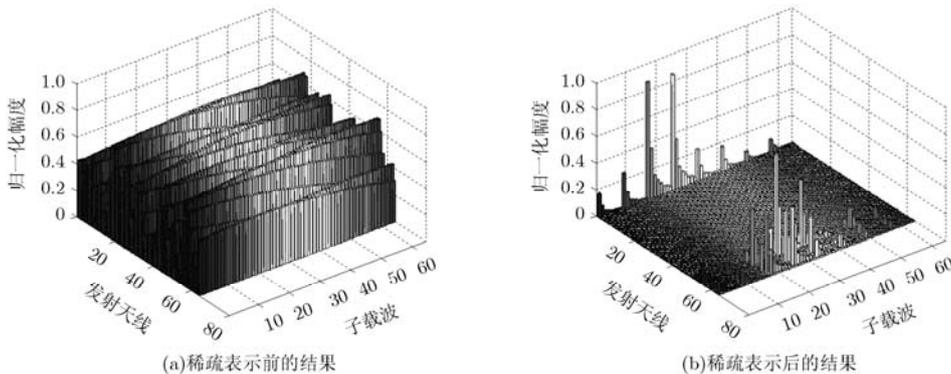


图3 稀疏表示前后信道增益直方图

图 6 是不同算法在相同压缩比下信道容量随信噪比变化曲线, 由仿真结果可看出: 本文提出的联合压缩算法的性能远远优于现有的信道稀疏算法, 可获得接近于最理想反馈的性能。图 7 是不同算法在不同压缩比下的性能比较, 可以看出, 要使 3 种算法都获得相近的性能, 本文算法需要的压缩比最小, 也就是说所需要的反馈量最小。综上所述说明, 本文提出的联合压缩算法可以以最低的反馈量获得接近于最理想反馈的性能。

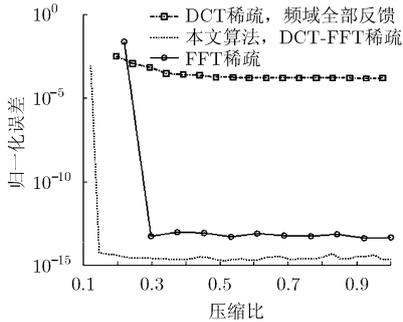


图 4 不同稀疏压缩算法下的性能比较

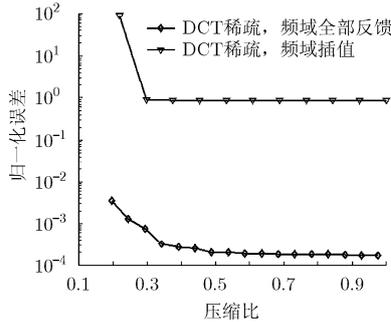


图 5 不同空间稀疏压缩算法下的性能比较

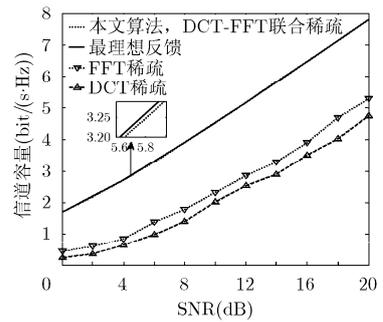


图 6 不同稀疏压缩算法在相同压缩比下信道容量随信噪比变化曲线(压缩比为 0.16)

由于信道矩阵在压缩反馈时的 OMP 迭代次数是稀疏度的函数, 信道在空间压缩时每一子载波上

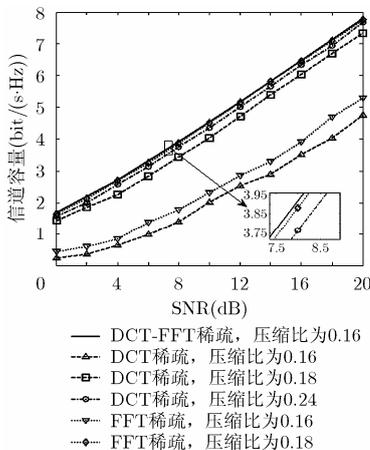


图 7 不同稀疏压缩算法在不同压缩比下信道容量随信噪比变化曲线

表 1 不同稀疏压缩算法在接收端检测时实现复杂度(OMP 迭代次数)之间的比较

算法	OMP 迭代次数	
	$k_s = 16, k_t = 6, k = 100$	
空间压缩(DCT 稀疏)	$k_s N_c$	$16 \times 256 = 4096$
频域压缩(FFT 稀疏)	$k_t N_t N_r$	$6 \times 128 = 768$
联合压缩(DCT-FFT 联合稀疏)	k	100

4.2 复杂度分析

下面就本文提出的基于空频相关性的联合压缩反馈算法与现有算法进行复杂性比较, 我们主要考虑进行接收端检测时的 OMP 迭代次数, 如表 1 所示, 设基站端发射天线数为 N_t , 用户接收天线数为 N_r , 系统子载波数为 N_c , 信道矩阵在频域的稀疏度为 k_t , 在空间的稀疏度为 k_s , 在空频 2 维相关性下的联合稀疏度为 k 。

的 OMP 迭代次数为 k_s , 那么整个信道矩阵的 OMP 迭代次数为 $k_s N_c$, 同理, 信道在进行频域压缩时所需的 OMP 迭代次数为 $k_t N_t N_r$ 。因为信道在空频相关性下的联合压缩是在空间压缩的基础上进行频域压缩或在频域压缩的基础上进行空间压缩, 所以其稀疏度 k 远小于 $k_s N_c$ 和 $k_t N_t N_r$ 。因此, 根据上述分析及表 1, 可以说明基于空频相关性的联合压缩算法的实现复杂度最低。

5 结论

本文首先分析了大规模 MIMO-OFDM 系统的实际特性, 介绍了现有的几种降低信道信息反馈负载的算法, 并分析了这些算法的不足。然后, 提出了适用于大规模 MIMO-OFDM 系统的基于空频相关性的联合压缩反馈算法, 并推导出了相应的联合稀疏基。与仅利用空间相关性或仅利用频域相关性进行信道压缩反馈的算法相比, 所提算法可在进一步降低系统反馈量的同时, 以较低的复杂度保证信道信息反馈的精度。

参考文献

- [1] Lee Jun-ho and Lee Seung-hwan. A compressed analog feedback strategy for spatially correlated massive MIMO systems[C]. Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Quebec City, Canada, 2012: 1-6.
- [2] Kuo P, Kung H T, and Ting P. Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays[C]. Wireless Communications and Networking

- Conference (WCNC), Shanghai, China, 2012: 492-497.
- [3] 何雪云, 宋荣方, 周克琴. 基于压缩感知的 OFDM 系统稀疏信道估计新方法研究[J]. 南京邮电大学学报, 2010, 30(2): 60-65.
He Xue-yun, Song Rong-fang, and Zhou Ke-qin. Study of compressive sensing based sparse channel estimation in OFDM systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2010, 30(2): 60-65.
- [4] Gao Huan-qin, Song Rong-fang, and Zhao Jun-xi. Compression of CQI feedback with compressive sensing in adaptive OFDM systems[C]. *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Suzhou, China, 2010: 1-4.
- [5] 高欢芹, 宋荣方. 自适应 OFDM 系统中基于压缩感知的反馈压缩新方法[J]. 南京邮电大学学报, 2010, 30(3): 16-20.
Gao Huan-qin and Song Rong-fang. Compressed sensing based feedback compression in adaptive OFDM systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2010, 30(3): 16-20.
- [6] 孙超. 基于压缩感知的无线信道信息反馈的研究[D]. [硕士论文], 南京邮电大学, 2011.
Sun Chao. Study of wireless channel state information feedback scheme based on compressed sensing[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [7] 宋勇, 卫国. MIMO-OFDM 系统的 CQI 反馈压缩改进算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 40(8): 776-782.
Song Yong and Wei Guo. An improved CQI feedback compression algorithm for MIMO-OFDM system [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2012, 40(8): 776-782.
- [8] 石光明, 刘丹华, 高大化. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
Shi Guang-ming, Liu Dan-hua, and Gao Da-hua. Advances in theory and application of compressed sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [9] Petersen K B and Pedersen M S. The Matrix Cookbook [OL]. <http://orion.uwaterloo.ca/~hwolkowi/matrixcookbook.pdf>, 2008.
- [10] 孙超, 李永杰, 宋荣方. 基于压缩感知的 MIMO-OFDM 系统信道状态信息反馈方案研究[J]. 南京邮电大学学报, 2012, 32(1): 54-58.
Sun Chao, Li Yong-jie, and Song Rong-fang. Study on compressed sensing based CSI feedback scheme for MIMO-OFDM systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2012, 32(1): 54-58.
- [11] Gwon Y, Kung H T, and Vlah D. Compressive sensing with directly recoverable optimal basis and applications in spectrum sensing. Harvard Computer Science Technical Reports TR-08-11 [OL]. <ftp://ftp.deas.harvard.edu/techreports/tr-08-11.pdf>, 2011.
- [12] Cotter S F and Rao B D. Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(3): 374-377.
- [13] Gwon Youngjune, Kung H T, and Vlah Dario. Compressive sensing with optimal sparsifying basis and applications in spectrum sensing[C]. *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, America, 2012: 5386-5391.
- [14] He Xue-yun, Song Rong-fang, and Zhu Wei-ping. Pilot allocation for sparse channel estimation in MIMO-OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 2013, 60(9): 612-616.
- [15] Vlachos Evangelos, Lalos Aris S, and Berberidis Kostas. Stochastic gradient pursuit for adaptive equalization of sparse multipath channels[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2012, 2(3): 413-423.
- [16] Qaseem S T, Al-Naffouri T Y, and Alghadhban S. Compressive sensing for feedback reduction in MIMO broadcast channels[C]. *17th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Doha, The State of Qatar, 2010: 356-361.
- [17] Kim Kiyoen, Jang Seng-hun, and Kim Dong-ku. An efficient feedback scheme using compressive sensing for MIMO broadcast channel with random beamforming[C]. *2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, Singapore, Singapore, 2010: 743-747.
- [18] Qaseem S T and Al-Naffouri T Y. Compressive sensing for reducing feedback in MIMO broadcast channels[C]. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Cape Town, South Africa, 2010: 1-5.
- 李晓辉: 女, 1972 年生, 教授, 研究方向为宽带无线接入、无线资源管理、多天线技术。
- 王维猛: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为多天线技术、波束赋形及信道反馈技术。
- 黑永强: 男, 1983 年生, 副教授, 研究方向为 MIMO 及多用户 MIMO、无线资源优化管理、智能进化算法及其在无线通信中的应用。