

基于压缩感知的大规模 MIMO 分段信道反馈

张梦莹, 陈璇

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:大规模多人多出技术 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 是未来 5G 无线通信的关键技术。在 MIMO 系统中, 发送端的空时编码、接收端的信号检测都需要信道状态信息 (Channel State Information, CSI), 而大规模 MIMO 的信道反馈问题随着 MIMO 信道矩阵的尺寸越来越大, 变得越来越具有挑战性。为此, 在研究大规模 MIMO 系统中信道脉冲响应 (Channel Impulse Response, CIR) 反馈的基础上, 提出了一种基于压缩感知的分段 CIR 反馈方案。应用该方案分段后的信道有着比原信道更好的稀疏性, 基站可以利用压缩感知恢复分段后的经过高度压缩的 CIR。仿真结果表明, 所提出的方案可大幅度降低反馈误差, 当压缩率为 20% 时, 直接压缩方案已经失效, 而所提出的方案表现却良好; 当压缩率为 50% 时, 所提出的方案能够获得高于直接压缩方案 5 dB 的 SNR 增益。

关键词:大规模 MIMO; CIR 反馈; 压缩感知; 分段 CIR

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)06-0183-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.06.038

Segmental Channel Feedback for Massive MIMO with Compressive Sensing

ZHANG Meng-ying, CHEN Xuan

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) is becoming a key technology for future 5G wireless communications. In MIMO systems, Channel State Information (CSI) is essential for both space-time coding at transmitters and signal detection at receivers. Channel feedback for massive MIMO is challenging due to the substantially increased dimension of MIMO channel matrix. For this reason, on the basis of the study of Channel Impulse Response (CIR) feedback for massive MIMO systems, a segmented CIRs feedback scheme based on compressive sensing has been proposed. Specifically, segmented channels are sparser than the original channel. Thus, the base station can recover the highly compressed segmented CIRs under the framework of compressive sensing. Simulation results show that the proposed scheme can reduce the feedback error compared with the direct CS-based scheme and that when compression ratio is 20%, the direct CS-based scheme fails to work since the feedback while the proposed scheme performs well; when compression ratio is 50%, the proposed scheme achieves a 5 dB SNR gain compared with the direct CS-based scheme.

Key words: massive MIMO; CIR feedback; compressive sensing; segmental CIRs

0 引言

第 5 代移动通信系统 (5G) 具有远高于 4G 的频谱利用率和能效^[1]。大规模 MIMO 是 5G 无线通信的关键技术, 通过大量增加基站天线数, 有效提高了频谱利用率, 成为目前学术界和业界的研究重点之一^[2]。然而在大规模 MIMO 中, 为了使基站发射信号的能量能够准确地指向期望的方向, 基站须提前获得下行信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 并对其进行

预编码。此外, CSI 的准确获取对系统获得的安全速率至关重要, 而安全容量是最大的安全速率, 获取准确的系统安全容量是物理层安全的关键。因此, 准确获得 CSI 能够降低中断概率, 使系统更加安全可靠。

在时分双工 (Time-Division Duplexing, TDD) 系统中, 发送端通过上行信道估计, 利用上下行信道互易性获得 CSI, 下行信道 CSI 在接收端再由此互易性确定^[3]。在频分双工 (Frequency-Division Duplexing,

收稿日期: 2016-06-27

修回日期: 2016-10-12

网络出版时间: 2017-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61271335); 江苏省高校重点项目 (14KJA510003)

作者简介: 张梦莹 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为无线通信、MIMO 信道估计。

网络出版地址: <http://jns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170428.1702.030.html>

FDD)系统中,上下行信道占有的频率不同,信道互易性消失,因此需利用链路反馈技术,使发送端实时获得 CSI^[4]。另外,CSI 的反馈量随着系统带宽的增长成倍增加,反馈量的降低可以提高频谱利用率,因此,CSI 的反馈制约着整个系统性能的提升。

传统的信道反馈方案属于部分信道信息反馈 (Partial CSI Feedback),反馈的是预编码矩阵的索引号 (Precoding Matrix Index, PMI)^[5-6]。该类方法牺牲了一定的系统性能,从而极大地降低了信道的反馈量。但其并不适用于大规模 MIMO 系统,因为为保证接收到的 CSI 的正确性,其使用的码本的尺寸极大。另一类则是完全信道信息反馈 (Full CSI Feedback),是一种基于非码本的显式 CSI 反馈。例如直接信道量化反馈^[7],将终端估计的信道矩阵主要特征值分量通过某种方式构建出直接信道反馈波形,经过量化,再将其反馈给基站,基站便可利用该反馈波形恢复出下行信道矩阵。尽管该方法可以获得完整的 CSI,但反馈开销较大,从而降低了频谱的利用效率。

近年来,压缩感知 (Compressive Sensing, CS) 理论的发展与应用为大量减少 MIMO 系统的 CSI 反馈量提供了新的途径^[8]。从空间角度来看,大规模 MIMO 系统的相邻信道在空间上具有较强的相关性^[9],而实际上其无线信道的能量往往集中在有限的空间方向上^[10-11],也就是说,信道在空域上是可被压缩的。从频域角度来看,当系统的子载波数远远大于信道多径数时,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^[12]。文献[13]直接对 CIR 进行压缩,利用信道的稀疏性减少反馈开销,但是开销仍然很大,尤其是当信道不够稀疏时。文献[14]提出了一种基于压缩感知利用 MIMO 信道的时间相关性减少反馈开销的差分反馈方案,但是该方案易发生差错传播,并且在假设不成立的条件下失效。

为此,提出了一种基于压缩感知的分段反馈方案。该方案能够在相同开销的情况下显著降低均方误差,提高反馈的正确率。将原始 CIR 平均分成若干部分,并且保证 CIR 总长度不变,分段后的 CIR 比原始 CIR 享有更强的稀疏性,即使原 CIR 不够稀疏而无法使用压缩感知,分段后的 CIR 也可以使用压缩感知来反馈。分段后的 CIR 可以使用更低的比率来压缩,并且具有更低的均方误差。

1 系统模型

假设 MIMO 系统模型有 M 个发射端和 N 个接收端,每个接收端仅有一根天线。信道矩阵元素为独立同分布,同时服从均值为 0、方差为 1 的复高斯随机分布。假设反馈信道理想,不考虑时延和误差的影响。

假设第 m 根发射天线与某一用户间的 CIR 可表示为 $\mathbf{h}_m = [h_m(0), h_m(1), \dots, h_m(L-1)]^T$, 其中 $1 \leq m \leq M$, L 为最大的时延拓展。CIR 通常被认为是稀疏的 (例如,在 \mathbf{h}_m 中有 K 个非零元素, $1 \leq K \ll L$), 因为它在宽带通信中只包含几个重要路径^[15]。提出方案中,接收端无需进行预编码码字的处理,而是直接反馈 CSI 需要反馈的就是信道矩阵 \mathbf{h}_m 。

2 基于压缩感知的分段信道反馈

如图 1 所示,不像传统的直接压缩反馈方案利用传感矩阵直接压缩稀疏的 CIR,提出的基于压缩感知的分段反馈方案能够产生比原始 CIR 更加稀疏的分段 CIR。利用传感矩阵压缩分段后的 CIR,这个传感矩阵是基站和用户都已知的。经过反馈后,可由压缩感知算法恢复出 CIR,这样基站就会获得原始 CIR 的各个估计,最后各部分进行叠加,获得估计的 CIR。方案的过程可分解成以下三个部分。

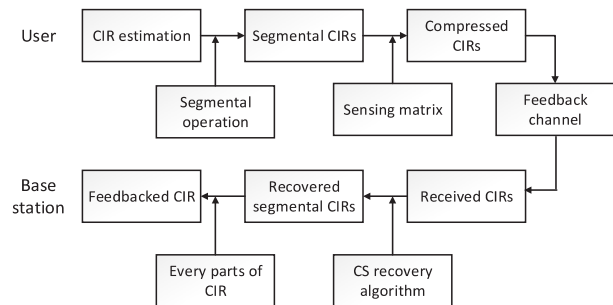


图 1 基于压缩感知的分段信道反馈

2.1 分段操作

不像传统的反馈方案直接反馈估计得到的 CIR,提出方案通过分段产生更加稀疏的 CIR,并且保持 CIR 长度不变。分段后 CIR 为 $\mathbf{h}_m^{(t)}$ (其中, $1 \leq t \leq T$, T 是原始 CIR 被分的段数),在数学上可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_m^{(1)} &= \mathbf{A}^{(1)} \mathbf{h}_m \\ \mathbf{h}_m^{(2)} &= \mathbf{A}^{(2)} \mathbf{h}_m \\ &\vdots \\ \mathbf{h}_m^{(T)} &= \mathbf{A}^{(T)} \mathbf{h}_m \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathbf{h}_m 是原始 CIR,且 $\mathbf{A}^{(t)}$ ($1 \leq t \leq T$) 为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{(1)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{L/T} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{L \times L} \\ \mathbf{A}^{(2)} &= \begin{bmatrix} 0_{L/T \times L/T} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{E}_{L/T} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{L \times L} \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\mathbf{A}^{(T)} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \mathbf{E}_{L/T} \end{bmatrix}_{L \times L}$$

(2)

其中, $\mathbf{E}_{L/T}$ 表示一个 L/T 维的单位矩阵。

可根据原始信道的长度选择 T 的大小,例如,当原始 CIR 不够稀疏时,可适当增大 T 。经过式(1)的矩阵乘法后,得到的 $\mathbf{h}_m^{(i)}$ 比原始的 \mathbf{h}_m 享有更强的稀疏性,并且保持总长度 L 不变。图 2 中展示了式(1)、(2)中的原始 CIR 及分段后的 CIR,其中参数 $L = 200$ 、 $K = 30$ 。CIR 的支撑集(即非零元素的位置)随机产生,非零元素的幅度满足独立同分布,并且服从均值为 0、方差为 1 的复高斯随机分布。

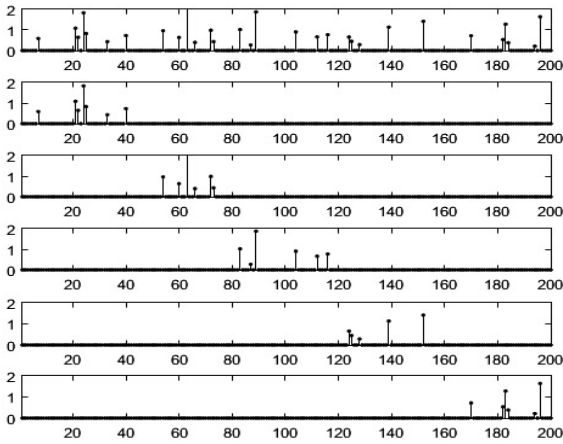


图 2 原始 CIR 和分段后的 CIR

从图 2 中可以看到,分段后的 CIR 比原始 CIR 享有更强的稀疏性,所以分段 CIR 可以以更高的压缩率进行压缩,减少了反馈开销。

2.2 CIR 的压缩与恢复

为确保信号能够准确重建,传统的奈奎斯特采样定理要求采样率必须不小于信号带宽的两倍。压缩感知理论利用信号空间的特性,在远低于奈奎斯特采样定理要求的速率下即可完全恢复原始信号^[16]。采用这种方法,不仅可以降低复杂度,还能减少设备成本。因此,压缩感知技术成为近年来信号处理领域的一个突破性进展,具有很强的理论意义和实用价值。

Donoho^[17]详细描述了压缩感知技术,指出信号只要在正交空间是稀疏的,就能以较低的频率采样和较高的概率进行重建。例如,一个稀疏信号 $\mathbf{h}_m^{(i)}$ 可以被传感矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{R \times L} (R \ll L)$ 压缩成一个低维向量 $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{h}_m^{(i)}$ 。如果 Φ 满足 RIP 性质^[18],那么基站就能够从观测到的含噪向量 $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{h}_m^{(i)} + \mathbf{n}$ 中恢复稀疏信号 $\mathbf{h}_m^{(i)}$,其中 \mathbf{n} 代表反馈信道的噪声,满足复高斯随机分布 $\text{CN}(0, \sigma_n^2)$ 。在数据使用的高斯随机矩阵^[19]。至于压缩

感知恢复算法,采用广泛应用的 SAMP (Sparsity Adaptive Matching Pursuit),因为该算法不需要知道稀疏度作为先验信息。

2.3 恢复原始 CIR

当基站接收到估计出的 CIR 的所有部分之后,通过对这些向量进行叠加,即可恢复原始的 CIR:

$$\hat{\mathbf{h}}_m = \mathbf{A}^{(1)} \hat{\mathbf{h}}_m^{(1)} + \mathbf{A}^{(2)} \hat{\mathbf{h}}_m^{(2)} + \cdots + \mathbf{A}^{(T)} \hat{\mathbf{h}}_m^{(T)}$$

(3)

其中, $\hat{\mathbf{h}}_m, \hat{\mathbf{h}}_m^{(1)}, \hat{\mathbf{h}}_m^{(2)}, \hat{\mathbf{h}}_m^{(T)}$ 分别是 $\mathbf{h}_m, \mathbf{h}_m^{(1)}, \mathbf{h}_m^{(2)}, \mathbf{h}_m^{(T)}$ 的估计值,乘以矩阵 $\mathbf{A}^{(i)} (1 \leq i \leq T)$ 是为了进一步消除估计误差。

3 仿真结果

采用 5 000 次独立的蒙特卡洛仿真取平均值。系统模型的参数:发射天线数 $M = 6$,信道长度 $L = 200$,信道稀疏度 $K = 30$,CIR 非零元素的位置随机产生,幅度服从复高斯分布 $\text{CN}(0, 1)$,原始 CIR 分段数 $T = 5$ 。

第一个仿真非零元素的位置是否会影响重构性能。考虑了四种情况:非零元素的位置随机分布在信道的头部、中部、尾部以及在整个信道上随机分布。如图 3 所示,四条线重合了,表明非零元素的位置不会影响压缩感知算法的重构性能。

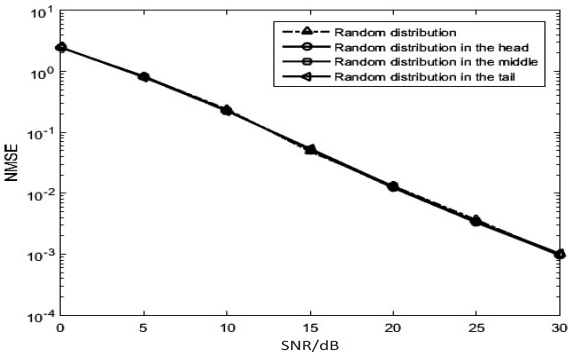


图 3 非零元素不同分布的 NMSE 性能

定义 CIR 的压缩率(信道开销)为 $\eta = R/L$,考虑两种情况: $\eta = 20\%$ 和 $\eta = 50\%$ 。如图 4 和图 5 所示,在相同的压缩率下,提出方案的 NMSE 性能优于直接压缩方案。

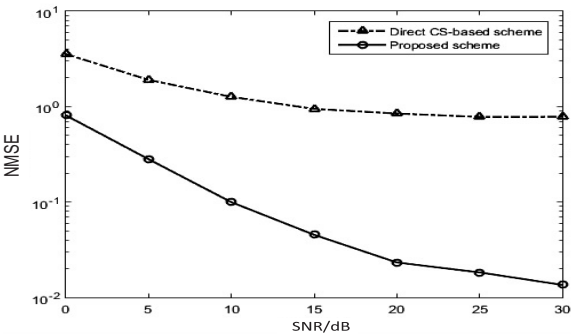


图 4 $\eta = 20\%$ 时直接压缩方案与提出方案的 NMSE 性能对比

在图 4 中,直接压缩方案已经失效,因为没有足够的反馈开销,而提出方案的表现良好。

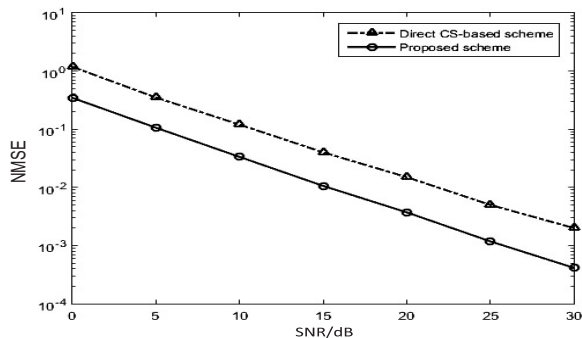


图 5 $\eta = 50\%$ 时直接压缩方案与提出方案的 NMSE 性能对比

在图 5 中,提出方案相比于直接压缩方案能够获得 5 dB 的 SNR 增益,并且 $\eta = 20\%$ 时的所提方案与 $\eta = 50\%$ 时的直接压缩方案具有相似的 NMSE 性能。

因此,提出的基于压缩感知的分段反馈方案相比于直接压缩方案能够获得更好的 NMSE 性能。可以用 20% 的压缩率代替 50% 的压缩率,因为要传输 T ($T = 5$) 次,所以在传输总量上是不变的,提出方案因其更强的压缩,占用更窄的带宽,能够传输更多的有效信息,有效降低了估计 CIR 的均方误差。在时间复杂度上,虽然串行传输时,提出方案所花费的时间是直接压缩方案的 T ($T = 5$) 倍,因为前者需要重复 T 次。随着多核芯片并行计算的发展,如果采取并行计算,提出方案所花费的时间应该和直接压缩感知方案的时间相等。此外,对于 T 大小的选择可以选取一个折中,相比于传输时间,传输正确率更重要的话,选择较大的 T ,反之,则选择较小的 T 。

4 结束语

大规模 MIMO 的信道反馈问题一直是一个热点问题,因为发送端的空时编码、接收端的信号检测都需要 CSI。为解决这个问题,提出了一种基于压缩感知的分段反馈方案,通过将原始 CIR 分成好几部分,可以得到具有更强的稀疏性 CIR,进而能够以更低的误差传播 CIR。仿真结果表明,在相同的压缩率下,所提出方案相比于直接压缩方案能够获得更好的 NMSE 性能。

参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
- [2] 徐国珍,蒋伟,刘安,等. 有限反馈下大规模 MIMO 系统性能仿真[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 24(5): 589-594.
- [3] 孙君,孙燕,孙燕. 基于压缩感知的信道互易性补偿方法

- [J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(12): 210-215.
- [4] Love D J, Heath R W, Lau V K N, et al. An overview of limited feedback in wireless communication systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2008, 26(8): 1341-1365.
- [5] Zhang H, Li Y, Stolpmann V, et al. A reduced CSI feedback approach for precoded MIMO-OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(1): 55-58.
- [6] 3GPP. Differential encoding/decoding for an arbitrary codebook for R1-060660 [S]. [s. l.]: [s. n.], 2006.
- [7] 3GPP. Additional details on DCFB for obtaining MIMO channel information at Node B for R1-051516 [S]. [s. l.]: [s. n.], 2005.
- [8] 徐志坚,邱晓晖. 采用压缩感知的协作多点信道反馈算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(10): 221-224.
- [9] Kuo P, Kung H T, Ting P. Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays [C]//IEEE conference on wireless communications and networking. [s. l.]: IEEE, 2012: 492-497.
- [10] Alrabadi O N, Tsakalaki E, Huang H, et al. Beamforming via large and dense antenna arrays above a clutter [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 314-325.
- [11] Gao X, Tufvesson F, Edfors O, et al. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz [C]//2012 conference record of the forty sixth Asilomar conference on signals, systems and computers. [s. l.]: IEEE, 2012: 295-299.
- [12] 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: 自然科学版, 2010, 30(2): 60-65.
- [13] 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: 自然科学版, 2012, 32(1): 54-58.
- [14] Shen W, Dai L, Shi Y, et al. Compressive sensing-based differential channel feedback for massive MIMO [J]. Electronics Letters, 2015, 51(22): 1824-1826.
- [15] Gui G, Adachi F. Stable adaptive sparse filtering algorithms for estimating multiple-input - multiple-output channels [J]. IET Communications, 2014, 8(7): 1032-1040.
- [16] 戴琼海,付长征,季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 425-434.
- [17] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [18] Qi C, Yue G, Wu L, et al. Pilot design for sparse channel estimation in OFDM-based cognitive radio systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 982-987.
- [19] Dai W, Milenkovic O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(5): 2230-2249.