

# 采用压缩感知的协作多点信道反馈算法研究

徐志坚, 邱晓晖

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**协作多点技术(Coordinated Multiple Points, CoMP)作为LTE-A的最重要候选技术之一,已经得到广泛的关注。在协作多点中,有很多种传输方案,其中一种基于联合传输下的全局预编码方案能够获得极佳的系统性能,而实现该方案的前提是基站可以得到较为完整的信道状态信息。因此在信道反馈时选择显式反馈,因为相比较其他反馈方式,它可以反馈更为完整的信道状态信息,而显式反馈的缺点为需要的反馈量过大。文中利用一种采用压缩感知的信道反馈新方法对联合传输下的全局预编码方案信道显式反馈信息进行压缩,仿真结果显示在不影响系统性能的前提下,能够有效地减少反馈量,使得系统发挥最佳性能。

**关键词:**协作多点;压缩感知;信道反馈;全局预编码

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)10-0221-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.10.053

## Study on Channel Feedback Algorithm Using Compressed Sensing for Coordinated Multiple Point

XU Zhi-jian, QIU Xiao-hui

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

**Abstract:** Coordinated Multi Point (CoMP) technology has drawn broad attention as one of the most important potential technologies of LTE-A. There are a variety of transmission schemes of CoMP, one of which is the global precoding scheme based on joint transmission can obtain excellent system performance. The realization of the program is based on the fact that the base station can get a more complete channel state information. Therefore, explicit feedback is chosen as the channel feedback method because compared with other feedback ways, the explicit feedback can feed more complete channel state information, but the disadvantage of the program is that it requires excessive feedback. In this paper, a novel channel feedback method of compressed sensing is utilized to compress the explicit channel feedback information of global precoding scheme under joint transmission. Simulation results show that on the premise of without affecting system performance, it can effectively reduce the amount of feedback, making the system work optimally.

**Key words:** coordinated multi point; compressed sensing; channel feedback; global precoding

## 1 概述

通信技术发展的步伐越来越快,随着数据通信和多媒体业务的需求不断发展,3G技术已经大规模商用并日益普及。3GPP组织推出了第三代移动通信系统的进化版:LTE(Long Term Evolution, 长期演进)系统, LTE系统也被称为3.9G,被业界认为是3G技术向4G技术的演进,而后在ITU(International Telecommunications Union)开始征集4G的情况下,3GPP组织推出了能够实现由LTE系统向4G平滑演进的技术:

LTE-A(Long Term Evolution - Advanced)。在LTE-A中,提出了众多候选的LTE改进技术,其中协作多点(Coordinated Multiple Points, CoMP)是最重要的技术之一,它可以有效地改善小区边缘用户的性能,消除小区间干扰,并满足小区边缘频谱效率的要求<sup>[1-6]</sup>。

在CoMP传输技术中,根据协作方式的不同,主要分为两类情况:联合传输和协作调度/波束成形<sup>[7]</sup>。联合传输技术的协作方式是由多个基站共同来给用户提供服务,通过基站之间的协作消除用户之间的干扰,

收稿日期:2013-11-21

修回日期:2014-02-05

网络出版时间:2014-07-28

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2011789);东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K201318)

作者简介:徐志坚(1988-),男,硕士研究生,研究方向为通信中的智能信号处理、压缩感知等;邱晓晖,教授,通信作者,研究方向为信号与信息处理、电磁兼容等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140728.1221.007.html>

在这里干扰信号被用来作为一个有用的信号加以利用,从而可以有效地消除小区间干扰。协作调度/波束成形技术的协作方式是单个基站为用户提供服务,通过对系统资源的有效分配,消除小区间干扰。

在联合传输技术中,用户的终端在同一时间接收多个节点以非相干传输或者相干传输方案发送的信息,从而提高接收到的信号的质量并可以有效地进行干扰抑制。开环传输为最常见的非相干传输方案,它的传输模式是多个节点中的每一个点发送相同的信号,通过空间来进行信号的自然结合。然而,在实际的应用场景中,由于空间信道具有的随机性特征,信号不能保证有效地合并。与非相干传输相比,相干传输使用闭环的传输方案,它的传输模式是根据用户反馈的信道状态信息在发射机端对发送的信号进行预处理,保证在空中接口处来自不同小区发送的信号能够自然地结合。很显然,对比非相干传输,相干传输可以得到更好的系统性能。

上文提到:相干传输是根据用户反馈的信道状态信息在发射机端对发送信号进行预处理,这里的预处理主要指的就是根据用户反馈回来的信道状态信息,在发射端使用合理的预编码技术对待发送的信息进行预编码。预编码技术的核心就在于预编码矩阵的获得,一般而言,发射端均根据用户终端反馈的终端与服务小区之间的信道状态信息求得预编码矩阵,而没有考虑到用户与相邻小区之间的信道状况<sup>[8]</sup>。在此基础上,文献[9]提出了一种全局预编码方案,它根据所有小区和用户终端之间的信道状态信息求得全局预编码矩阵。在与其他解决方案相比时,全局预编码方案可以获得极佳的系统性能,这是因为它反馈了更加全面的信道状态信息,但是正因为它反馈的更加全面,需要信道反馈的反馈量十分巨大,严重限制了其在实际应用中的应用。在保证性能的情况下,如何使用适当的反馈方案减少全局预编码方案的反馈量是文中研究的重点。

CoMP 信道反馈的研究主要分为三类:

(1) 显式反馈:观测到信道状态信息的用户对信道状态信息不进行任何处理,直接反馈,从而使基站能够获得完整的信道状态信息(如信道矩阵、信道协方差矩阵)。

(2) 隐式反馈:观测到信道状态信息的用户对信道状态信息进行一定的处理,转化为具体的参数反馈到基站(如 CQI, RI, PMI)。

(3) 基于导频的信道反馈:使用的专用导频获得信道状态信息,这种反馈方式只有在 CoMP-TDD 系统中适用<sup>[10-11]</sup>。

在 FDD 模式下的 CoMP,显式反馈和隐式反馈均

可以使用。对比隐式反馈,显式反馈更加准确,可以让系统更好地进行预编码处理,得到较好的系统性能,这是因为它反馈的内容更加全面,可以让基站得到完整的信道状态信息。而相比显式反馈,隐式反馈拥有较小的反馈量,优势在于可以有效地减小系统开销和利用频谱资源。

随着业务需求的不断增长以及对性能要求的不断提高,在 CoMP 下的显式反馈成为了业界关注的一个新的目标。因此,针对采用显式反馈的全局预编码方案,进行减小反馈开销量的研究,在文献[9]中讨论了一种基于压缩感知的信道反馈新方案。文中提出在协作多点的全局预编码方案中采用基于压缩感知的信道反馈新方法,仿真结果表明全局预编码方案在采用新的反馈方法后可以在保证系统性能的情况下,有效减少反馈量,突破全局预编码模式虽然性能最优但由于反馈量过大而无法采用的窘境。

## 2 基于压缩感知的信道反馈新方法

### 2.1 压缩感知

一个叫做压缩感知的相对较新的理论在近几年中的信号处理领域得到了广泛的关注。它指出只要信号是可以被压缩的或者在某个变换域可以被压缩,就可以用一个和变换基没有相关性的观测矩阵将变换所得的高维信号投射到一个低维空间上,最后通过求解一个优化问题就可以高概率地从少量的投影中重构出原来的信号<sup>[12-15]</sup>。

压缩感知的理论过程如图 1 所示。

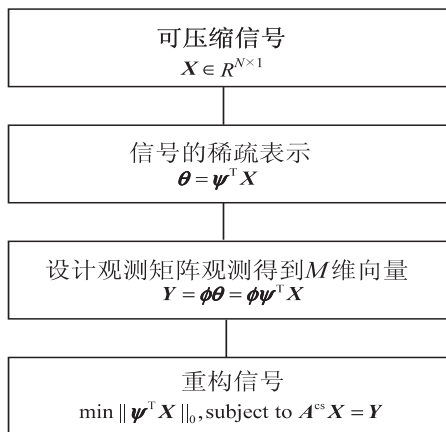


图 1 压缩感知理论过程

如果信号  $X \in R^{N \times 1}$  在某个变换域是稀疏的(指在此变换域上最多存在  $K$  个非 0 系数),求出其稀疏表示  $\theta = \psi^T X$ ,而后设计一个与变换基  $\psi$  不相关的观测矩阵  $\varphi (M \times N \text{ 维})$  对  $\theta$  进行观测(其中  $M \geq K \log_2(N/K)$ ),得到观测信号为  $Y = \varphi \theta$ ,即  $Y = A^{CS} X$ (其中  $A^{CS} = \varphi \psi^T$  称为 CS 信息算子)。最后,利用 0-范数意义下的优化问题求解  $X$  的精确获近似逼近。

## 2.2 基于压缩感知的信道反馈

宽带移动通信中信道的可分辨径的数量十分少,特别是在带宽很宽,信号的持续时间较长的情况下<sup>[16]</sup>。在这些信道中,大部分多径能量集中在时延-多普勒域非常小的区域内。而在时延域中,信道的多径元素并非均匀的分布,而是按照簇的方式分布。因此,信道在时延域上具有很强的稀疏性<sup>[17]</sup>,如图 2 所示。

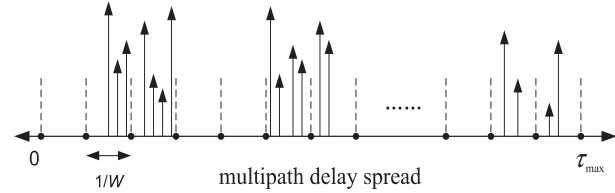


图 2 信道在时延域的稀疏表示

在这种情况下,用户只需要将信道中的少量可分辨径信息传回基站,基站就可以通过一个简单的处理过程来恢复原始下行信道的全部响应信息:UE 端信道估计出基站到 UE 的频域响应,即待反馈的信道矩阵  $\mathbf{H}$ , 对其做 IDFT 变换,转化为时域,得到了信道矩阵  $\mathbf{H}$  的稀疏表示,而后对信道矩阵  $\mathbf{H}$  进行压缩感知的操作,将压缩之后的信息传给基站,基站端再利用压缩感知的重构算法,对信道矩阵进行重构,即可得到完全信道状态信息。

## 3 全局预编码模式下的系统模型

文中考虑联合传输全局预编码方案模型,假设系统工作在 FDD 模式,参与协作传输的小区为  $B$  个,UE 的数量为  $K$  个,每个基站有  $M_i$  根传输天线,每个 UE 有  $M_i$  根天线,第  $k$  个 UE 被要求估计到所有参与协作的基站信道矩阵,即其对应的全局信道矩阵  $\mathbf{H}^k$ ;

目标边缘用户接收到的信道为:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}^k * \mathbf{W}^k * \mathbf{X}^k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}^i * \mathbf{W}^i * \mathbf{X}^i + \mathbf{N}^k$$

其中,  $\mathbf{H}^k = [\mathbf{H}_1^k, \mathbf{H}_2^k, \dots, \mathbf{H}_B^k]$  为用户  $k$  的信道全局矩阵,维度为  $M_r * \sum_{i=1}^B M_i$ 。

$$\mathbf{H}_i^k = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_i1} & \cdots & h_{M_iM_i} \end{bmatrix} \text{ 为第 } i \text{ 个协作基站到用户 } k$$

的信道矩阵,维度为  $M_r * M_i$ 。  $h_{mn}$  为第  $n$  个发送天线和第  $m$  个接收天线之间的信道频率响应。

$\mathbf{W}^k$  为第  $k$  个 UE 全局预编码矩阵,维度为  $\sum_{i=1}^B M_i * L_k$ 。其由第  $k$  个 UE 反馈的全局信道矩阵  $\mathbf{H}^k$  经过预编码算法的计算得到。

$\mathbf{X}^k$  为第  $k$  个由  $B$  个基站联合发送的数据向量,维

度为  $L_k * 1$ 。

$\mathbf{N}^k$  为独立加性高斯白噪声,  $\mathbf{N}^k \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ 。

另外,假设 UE 可以对信道进行理想估计,得到完全真实正确的信道响应系数。

图 3 为 2 基站 2UE 全局预编码模式的示意图。

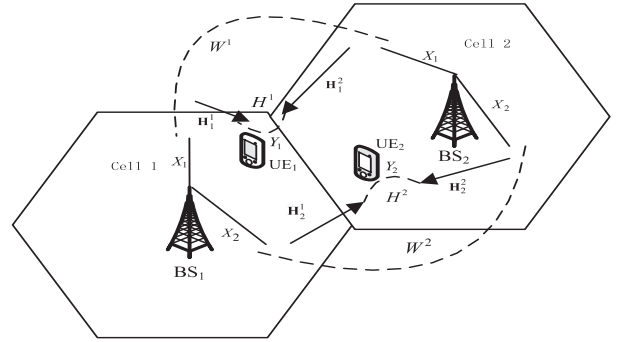


图 3 2 基站 2UE 全局预编码模式的示意图

## 4 基于压缩感知的 CoMP-Global-Precoding 信道反馈新方法

在基于压缩感知的 CoMP-Global-Precoding 的信道反馈中,反馈的对象是每个子载波上的信道矩阵。首先选取活动的  $\text{UE}_k$ ,  $\text{UE}_k$  估计出第  $i$  个协作基站的第  $x$  个子载波上的信道频域响应为  $\mathbf{H}_{i,x}^k$ 。

$$\mathbf{H}_{i,x}^k = \begin{bmatrix} h_{i,x}^{11(k)} & \cdots & h_{i,x}^{1M_i(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,x}^{M_i1(k)} & \cdots & h_{i,x}^{M_iM_i(k)} \end{bmatrix}$$

将  $\text{UE}_k$  估计得到的与第  $i$  个协作基站的所有可用子载波上的信道频域响应信息进行重新排列,(假设可用子载波总数为  $M_{\text{sub}}$ ) 得到用户  $\text{UE}_k$  与第  $i$  个协作基站信道频域响应信息  $\mathbf{H}_i^k$ 。

$$\mathbf{H}_i^k = [\mathbf{H}_{i,1}^k, \mathbf{H}_{i,2}^k, \dots, \mathbf{H}_{i,M_{\text{sub}}}^k]$$

再将  $\text{UE}_k$  估计得到的与全部  $B$  个协作基站信道频域响应进行重新排列,组成全局信道矩阵

$$\mathbf{H}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1^k \\ \vdots \\ \mathbf{H}_B^k \end{bmatrix}$$

将全局信道矩阵按行进行如下操作:

步骤 1:将选取的行进行 IDFT 变换,得到该行信号的稀疏表示;

步骤 2:对变换后的信号取实部与虚部;

步骤 3:分别对实部和虚部运用压缩感知原理进行压缩;

步骤 4:将压缩后信息传输回基站端;

步骤 5:在基站端对传输回来的压缩信号运用压缩感知重构算法进行重构;

步骤 6:合并实部与虚部;

步骤 7:对得到的信号进行 DFT 变换。  
对所有行操作完成之后,基站即可得到用户  $UE_k$  的全局信道矩阵。

5 仿真与分析

文中仿真的参数如表 1 所示,通过计算比较两者的反馈量并对比完全显示反馈和基于压缩感知的显示反馈的误码率性能。考虑 2 基站 2UE 协作,基站和 UE 天线数分别为 4 和 2。

表 1 仿真参数

参数	值
系统带宽/MHz	1.4
传输方式	联合传输全局预编码方案
BS 个数	2
UE 个数	2
BS 天线数	4
UE 天线数	2
信道模型	EPA5
信道估计方式	理想
信道编码	Turbo
FFT 点数	128
可用子载波数	72
预编码方式	SLNR

由表中所示,  $M_{sub}$  为 72,  $M_t$  和  $M_r$  分别为 4 和 2。根据文中提出的新算法,将待反馈的全局信道信息组合为  $2 * 288$  信道矩阵,将其分为两行送入压缩感知程序,经过多次实验得到稀疏度为 18,根据压缩感知测量值  $M \geq K \log_2(N/K)$  计算得到  $M$  等于 72。假设信道响应由 8 bit 量化(实部虚部各 4 bit),则完全信道反馈和基于压缩感知的信道反馈的反馈量对比如表 2 所示。

表 2 两种反馈模式反馈量对比

反馈方式	反馈量/bit
完全反馈	$M_{sub} * M_r * M_t * 8 = 4\ 608$
基于压缩感知的反馈	$M * M_r * 8 = 1\ 152$

由表中可以看出基于压缩感知的反馈量仅为完全反馈的反馈量的四分之一。  
图 4 为基于压缩感知的信道反馈和完全反馈的误帧率性能比较图。  
从中可以看出,基于压缩感知的显式反馈和完全信道反馈相比,误帧率没有显著上升。

6 结束语

文中提出了 CoMP 全局预编码模式下的基于压缩感知的信道显式反馈算法,与理想显式反馈进行对比

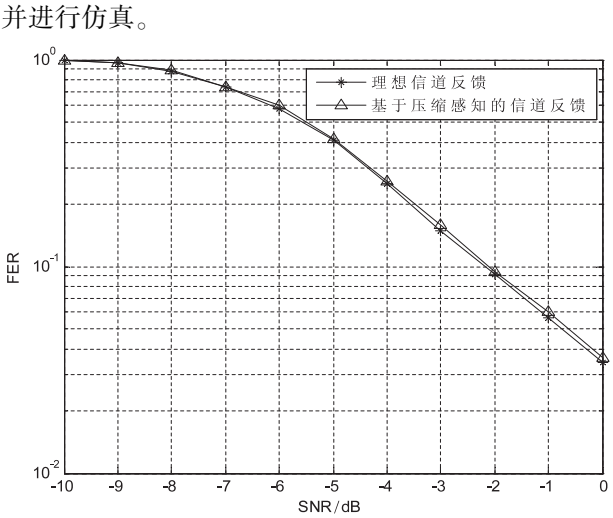


图 4 两种反馈模式误帧率性能比较

仿真结果表明:在反馈量减小到理想反馈的四分之一的情况下,系统误帧率没有明显提高,即采用压缩感知的信道显式反馈算法可以有效地减小系统反馈量并不影响系统性能。

参考文献:

[1] 3GPP. Requirements for further advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) [R]. [s. l.]:3GPP,2008.

[2] Marsch P, Fettweis G P. Coordinated multi-point in mobile communications: from theory to practice [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2011.

[3] 刘思杨. LTE-Advanced 系统中的协作多点传输技术[J]. 电信网技术,2009(9):5-9.

[4] 吴梅,黄帆,桑林,等. 协作式多点传输在 LTE-Advanced 系统中的应用[J]. 移动通信,2010,34(10):43-47.

[5] 刘凯,全庆一,胡炜,等. LTE-Advanced 中协作多点传输技术研究[J]. 数据通信,2012(3):24-28.

[6] Zheng Feng, Wu Muqing, Lu Huixin. Coordinated multi-point transmission and reception for LTE-advanced [C]//Proc of 5th international conference on wireless communications, networking and mobile computing. [s. l.]:IEEE,2009:1-4.

[7] Motorola. LTE-A multiple point coordination and its classification[R]. [s. l.]:Motorola,2008.

[8] Fujitsu. Different types of DL COMP transmission for LTE-A [R]. [s. l.]:Fujitsu,2009.

[9] Motorola. Coordinated multi-point transmission-exploring possible system operations and UE support[R]. [s. l.]:Motorola,2008.

[10] Motorola. Additional details on DCBF for obtaining MIMO channel information at Node B[R]. [s. l.]:Motorola,2005.

[11] Li Y, Song R. Novel scheme of CSI feedback compression for multi-user MIMO-OFDM system[J]. Procedia Engineering, 2012,29:3631-3635.



表 2 指纹识别结果

手指	总数	正确识别/%		拒识 /%	误识 /%	正确率 /%	拒识率 /%	误识率 /%	平均采集 时间/ms	平均识别 时间/ms
		相同手指	不同手指							
右手拇指	100	88	83	12	17	85.5	12	17	0.327	0.971
右手食指	100	92	90	8	10	91.0	8	10	0.334	0.976
右手中指	100	84	89	16	11	86.5	16	11	0.321	0.977
左手拇指	100	91	92	9	8	91.5	9	8	0.343	0.976
左手食指	100	80	87	20	13	83.5	20	13	0.326	0.973
左手中指	100	93	94	7	6	93.5	7	6	0.338	0.972

从测试结果可知,系统对每个指纹的平均采集时间为 0.331 5,平均识别时间为 0.974 1,也就是说整个系统从采集到识别的流程所用的总时间平均为 1.030 6 s,这基本上满足了用户对系统时间性能的要求。由于采集的指纹图像的质量不同,以及各个指纹图像的预处理效果不完全相同,使得系统对各类指纹的识别率也不完全相同,但是,从整个实验结果来看,系统对指纹的正确识别率平均为 88.6%,误识率平均为 10.8%,这说明整个系统的正确识别精度还不是很

4 结束语

随着数字化和网络化的发展,基于生物特征的识别系统是未来安防监控系统的发展趋势。安全可靠、方便易用的生物特征识别系统在企业银行、智能小区等门禁和考勤领域具有较强的实用价值和推广性。文中通过列表从几个方面对比不同生物特征作为识别特征的差异点,然后重点介绍了以指纹特征作为识别特征进行处理的一般过程,最后实现了一种基于指纹特征的识别系统。通过实验说明以生物特征为识别特征的识别系统在具有一定可行性和有效性的同时,还存在着只以单一生物特征作为识别特征识别率不是很高的问题。

参考文献:

[1] Lin Hong. Automatic personal identification using fingerprints [D]. USA:Michigan State University,1998.

[2] Jain A,Prabhakar S,Pankanti S. Matching and classification;a

+++++

(上接第 224 页)

[12] 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.

[13] 焦李成,杨淑媛,刘芳,等. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报,2011,39(7):1651-1662.

[14] 喻玲娟,谢晓春. 压缩感知理论简介[J]. 电视技术,2008,32(12):16-18.

[15] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on

case study in fingerprint domain[J]. Proceedings of the INSA-A (Indian National Science Academy),2001,67(2):67-85.

[3] 边肇棋. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社,1990.

[4] 田捷,杨鑫. 生物特征识别理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[5] 田启川,张润生. 生物特征识别综述[J]. 计算机应用研究,2009,26(12):4401-4406.

[6] 葛彦平. 基于匹配融合的指纹与指静脉双模态生物识别技术的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2012.

[7] 于洋. 基于嵌入式系统的指纹识别算法的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2012.

[8] 张佩强. 指纹识别方法研究[D]. 长春:吉林大学,2006.

[9] 杨雪. 指纹识别系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.

[10] Mehre B M. Fingerprint image analysis for automatic identification[J]. Machine Vision and Application,1993,6(2-3):124-139.

[11] 王建永. 指纹图像的特征提取与匹配[D]. 大连:大连理工大学,2003.

[12] Lin Hong, Jain A K, Pankanti S. Fingerprint enhancement [C]//Proceedings of 3rd IEEE workshop on application of computer vision. [s. l. ]:IEEE,1996:147-158.

[13] Lin Hong, Wan Yifei, Jain A K. Fingerprint image enhancement:algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1998,20(8):777-789.

[14] Maio D, Malteni D, Cappelli R, et al. FVC 2004; third fingerprint verification competition[C]//Proc of ICBA. Hong Kong: [s. n. ],2004.


+++++

Information Theory,2006,52(4):1289-1306.

[16] Vuokko L, Kolmonen V M, Salo J, et al. Measurement of large-scale cluster power characteristics for geometric channel models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2007,55(11):3361-3365.

[17] Bajwa W U, Haupt J, Raz G, et al. Compressed channel sensing[C]//Proc of 42nd annual conference on information sciences and systems. Princeton,NJ:IEEE,2008:5-10.

## 采用压缩感知的协作多点信道反馈算法研究

作者: [徐志坚](#), [邱晓晖](#), [XU Zhi-jian](#), [QIU Xiao-hui](#)  
作者单位: [南京邮电大学 通信与信息工程学院](#), 江苏 南京, 210003  
刊名: [计算机技术与发展](#)   
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2014(10)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjz201410054.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201410054.aspx)