doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.08.001

**引用格式**:余鹏,姚志强,朱蕾,等.基于确定性观测的压缩感知MIMO信道参数反馈[J].电讯技术,2016,56(8):833-838.[YU Peng, YAO Zhiqiang, ZHU Lei, et al. Compressed sensing MIMO channel parameters feedback based on deterministic observation[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(8):833-838.]

# 基于确定性观测的压缩感知MIMO信道参数反馈*

余 鹏**[1],姚志强[2],朱 蕾[2],王万蕾[2]

(1.中国电子科技集团公司第七研究所,广州 510220;2. 湘潭大学 信息工程学院,湖南 湘潭 411105)

**摘 要**:在实际资源受限(带宽受限或功率受限)的无线通信系统中,多径信道具有很强的稀疏特性,如何利用这一特点更加高效地将接收端获得的多径信道状态信息(CSI)进行压缩、反馈,是目前信道状态信息反馈技术的研究热点。针对现有多入多出(MIMO)信道状态信息反馈方法中随机观测矩阵需要较大存储空间的问题,引入了确定性Golay测量矩阵,提出了一种基于确定性观测的压缩感知MIMO多径信道参数反馈方法。在接收端对由信道估计得出的信道状态信息利用确定性Golay测量矩阵进行观测,将较少数目的观测值反馈到发送端,在发送端通过重构算法恢复出完全信道状态信息。仿真实验表明,与随机观测相比,采用确定性Golay观测矩阵的方法虽然需要的观测值数目会有所增加,但所需存储空间远小于随机观测矩阵,且利用确定性观测反馈信道状态信息的重构性能与随机观测矩阵相当。

**关键词**:多径信道;压缩感知;多输入多输出;确定性观测;信道参数反馈

**中图分类号**:TN92 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2016)08-0833-06

# Compressed Sensing MIMO Channel Parameters Feedback Based on Deterministic Observation

YU Peng[1], YAO Zhiqiang[2], ZHU Lei[2], WANG Wanlei[2]

(1. The 7th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation(CETC), Guangzhou 510310, China;
2. Informaton Engineering Institute, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract**: In bandwidth-limited or power-limited wireless communication system, how to more effectively compress and feedback the multipath channel state information (CSI) obtained from the receiver is a hot topic in CSI feedback field. In consideration of existing feedback methods of CSI in multiple-input multiple-output(MIMO) system, large storage space is indispensable for compressed sensing with random observation. This paper proposes a new CSI feedback method for MIMO multipath channel based on the deterministic observation of compressed sensing. CSI estimated by the receiver is observed by deterministic Golay measurement matrix, and a part of observation values are fed back to the transmitter. Then, CSI can be recovered completely through reconstruction algorithm at transmitter. Simulation results show that in comparison with random observation matrix, the Golay observation matrix needs more observations slightly, but the required memory is much less. And CSI can be reconstructed as good as random observation matrix. Using deterministic Golay observation matrix can greatly reduce system overhead and improve spectrum efficiency and system performance.

**Key words**: multipath channel; compressed sensing; multiple-input multiple-output; deterministic observation; channel parameters feedback

* **收稿日期**:2016-05-25;**修回日期**:2016-07-15 Received date:2016-05-25;Revised date:2016-07-15
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(61372127)
**Foundation Item**: The National Natural Science Foundation of China(No. 61372127)
** **通信作者**:yupeng_y@21cn.com **Corresponding author**: yupeng_y@21cn.com

## 1 引 言

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统中,为了获得更好的系统性能,可以在发射端利用信道状态信息(Channel State Information,CSI)进行发射机预编码、预均衡、功率分配等处理操作,这些操作基于完全的信道状态信息是最理想的。要获得完整的信道状态信息,就需要信道参数的反馈,即把接收端所获得的信道状态信息通过反馈链路反馈给发射端,使得发射端获取信道状态信息。另外,随着系统带宽的增加,信道状态信息的反馈量也成倍增加,降低反馈量有利于提高频谱利用率,优化系统性能。在反馈链路容量有限的情况下,反馈方案的设计存在困难,如何有效地将接收端获得的信道状态信息进行压缩、反馈,这也是目前完美信道状态信息反馈的研究热点。

为降低反馈量、减小反馈开销,研究者们做了许多工作,提出了许多反馈方案。这些反馈方案主要分为两类:一类是基于码本的部分信道状态信息反馈[1-2],如文献[1]提出了一种基于码本的信漏噪比算法,该算法通过码本量化预编码矩阵,基站仅需用户端反馈码本编号即可获得预编码矩阵,虽然可以使反馈量降低,但发射端无法获得全部信道状态信息而可能导致系统性能的下降;另一类是完全信道状态信息反馈,主要是基于非码本的显式的信道状态信息反馈,比如基于压缩感知的信道参数反馈。文献[3]提出了在信道反馈技术中引入压缩感知[4-6](Compressed Sensing,CS)方法,利用多径信道具有较强的稀疏性,在接收端对由信道估计得到的信道状态信息利用从正态分布中随机选取的测量矩阵进行随机观测,将较少数目的观测值反馈到发送端,在发送端通过正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit,OMP)算法完美恢复出完全信道状态信息。文献[7]对接收端的信道状态信息分别在 Karhunen-Loève 变换域和离散余弦变换域使用高斯随机矩阵进行观测,将较少数目的观测值反馈到发送端,在发送端通过 OMP 算法重构出完全信道信息。文献[8]针对大规模 MIMO 系统,结合离散余弦变换和快速傅里叶变换基,形成两种不同的观测矩阵对信道进行随机投影,反馈给基站,基站通过 OMP 算法重构 CSI。文献[9]利用在接收端对信道估计得到的信道信息使用服从高斯分布的随机矩阵进行观测,并将观测值反馈到发送端,在发送端通过梯度投影算法重构得到信道状态信息。基于压缩感知的 MIMO 信道参数反馈方法降低了反馈链路的开销,可以在发送端精确地重构出信道状态信息,达到了与完全信道状态信息反馈时非常接近的性能,极具研究价值。

本文针对随机观测的压缩感知占用存储空间较大且硬件不易实现的问题,引入了确定性观测矩阵的压缩感知方法进行 MIMO 多径信道参数反馈[10],提供了具体的实例——基于 Golay 序列的确定性压缩感知信道状态信息反馈方案,给出了整个设计过程,并与随机观测方法进行对比,以期为工程实现提供参考。

## 2 系统模型

多径信道冲激响应的抽头系数中不为 0 的只有几个,即这种信道中那些幅度近似为 0 的多径分量,对信号接收端几乎没有影响。在实际的通信系统中,存在非常多的稀疏多径信道,如高清数字电视信道、水下声音通信信道、多山地区的超宽带通信信道等。

图 1 的信道测量结果显示,多径分量以分簇的形式分布在时延域上,具有强烈的稀疏特性,因此可以应用压缩感知来压缩信道,进行稀疏化表示。

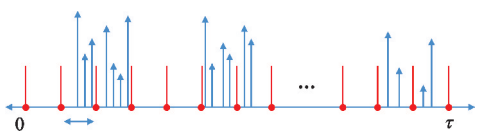


图 1 多径信道的稀疏性

Fig. 1 Sparsity of multipath channels

在接收端,对估计出来的多径信道信息进行测量,设计的观测矩阵需满足压缩感知理论的约束等距性条件。对于 $K$ 稀疏的长度为 $N$ 的信号,通过观测矩阵得到 $M$ 个线性测量值,满足 $cK\ln(N/K)\leqslant M\ll N$, $c$ 为很小的常数。

设第 $m$ 根发送天线到第 $n$ 根接收天线间的信道冲激响应为

$$\boldsymbol{h}_{nm}=[h_{nm}(1),h_{nm}(2),\cdots,h_{nm}(L)]。\quad(1)$$

式中:信道长度为 $L$;$\boldsymbol{h}_{nm}$ 中非零元素的数目为 $K$,且 $K$ 远小于 $L$。

在无线通信系统中,数据进行高速传输,信道大多是稀疏多径衰落信道,假定信道参数在一帧内恒定。信号经过稀疏多径信道后,在接收端可以表示为

$$y(n)=\sum_{l=1}^{L}x(n-l)h(l)+z(n)。\quad(2)$$

式中:$L$ 为稀疏多径信道的长度;$n=1,2,\cdots,N$;$h(l)$ 为信道的冲激响应,其中抽头系数大部分都为 0;$z(n)$ 为加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise,AWGN)。其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) & x(-1) & \cdots & x(2-L) \\ x(2) & x(0) & \cdots & x(3-L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N) & x(N-1) & \cdots & x(N+1-L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h(1) \\ h(2) \\ \vdots \\ h(L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ \vdots \\ z(N) \end{bmatrix}。 \tag{3}$$

## 3　基于确定性观测的压缩感知 MIMO 多径信道参数反馈方案

压缩感知理论[4-5]最早由 Candes 等人提出。Candes 证明了只要信号在某一个正交空间具有稀疏性,就能以较低的频率($M<<N$) 采样信号,而且可以以高概率重构该信号。这在信号处理领域中是一个非常新的研究方向,在很多领域都受到了高度关注。

压缩感知过程主要包括三个部分:一是信号的稀疏表示,寻找一个正交基,将原始信号稀疏化;二是观测矩阵的设计,既降维又最小信息损失;三是信号重构算法的设计,利用 $M$ 个观测值最优恢复出长度为 $N$ 的原始信号。

本文采用格雷(Golay)序列设计观测矩阵,进行确定性观测。

### 3.1　格雷互补序列

Golay 互补序列[11]由 Golay 提出,因其具有非常好的非周期自相关性而被广泛应用于许多领域,如电子系统中的识别、OFDM 系统中峰均比的控制以及 OFDM 系统信道同步等。

假设两个序列 $a=(a_0,a_1,\cdots,a_{N-1})$ 和 $b=(b_0,b_1,\cdots,b_{N-1})$,其中,里面的元素为±1,那么序列 $a$ 与序列 $b$ 的非周期互相关函数的定义为

$$A_{a,b}(k)=\sum_{j=0}^{N-1-k} a(j)b(j+k),0\leqslant k\leqslant N-1 。 \tag{4}$$

当序列 $a=b$ 时,上述定义的非周期互相关函数就变为非周期自相关函数 $A_{a,a}(k)$。如果一对二进制序列$(a,b)$,其长度为 $N$,当满足

$$C(k)=A_{a,a}(k)+A_{b,b}(k)=\begin{cases}2N, & k=0\\ 0, & 1\leqslant k\leqslant N-1\end{cases} \tag{5}$$

就成为格雷对。

### 3.2　确定性观测矩阵的设计

目前,常用的观测矩阵是与其他固定基都不相关的随机高斯矩阵,但实际应用中,其存储量大且计算过于复杂,硬件实现也相对较难,而确定性矩阵却可以弥补这个缺陷。确定性矩阵的构造简单,硬件实现容易。

本文引入确定性 Golay 测量矩阵——由 Golay 互补序列产生具有托普利兹(Toeplitz)结构[12-14]的观测矩阵[15],其构造方式:首先生成格雷互补序列 $x$,长度为 $L+N-1$,通常情况下,$x$ 的元素取值为±1,且独立地服从贝努利分布,再由此向量构成的托普利兹矩阵形式为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_L & x_{L-1} & \cdots & x_1 \\ x_{L+1} & x_L & \cdots & x_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{L+N-1} & x_{L+N-2} & \cdots & x_N \end{bmatrix}。 \tag{6}$$

文献[16]证明 $\boldsymbol{X}$ 满足约束等距特性(Restricted Isometry Property,RIP),可以作为观测矩阵。

在目前追求资源利用率的通信系统研究中,观测矩阵设计为确定性 Golay 测量矩阵有许多好处。由表 1 可知,随机高斯矩阵作为观测矩阵时需要更多的构造变量且信号重构的时间更长。在重构稀疏度较大的信号时,采用确定性 Golay 测量矩阵所需的观测值数目比采用高斯随机矩阵时稍多,但却可以减少矩阵构成所需的变量数目,同时减少信号重构时间。

**表 1　不同观测矩阵所需变量与做乘法运算次数对比**

Tab. 1 Comparison of the required variables and the number of multiplication operations between different observation matrices

| 观测矩阵 | 构造所需变量数 | 做乘法运算次数 |
|---|---|---|
| 确定性 Golay 测量矩阵 | $O(L+N-1)$ | $O(L\mathrm{lb}L)$ |
| 随机高斯矩阵 | $O(NL)$ | $O(NL)$ |

由此可知将确定性 Golay 测量矩阵作为压缩感知观测矩阵应用到 MIMO 系统的信道反馈中,可以减少信道状态信息反馈的成本和时间,得到更具有实时性的信道参数反馈结果。文献[13]通过实验证明了托普利兹结构的观测矩阵能够进行较为精确的重构,运算时间以及矩阵构成所需的存储空间也大大降低。同时,由于托普利兹矩阵是用行向量循环移位来生成整个矩阵,这就使得该矩阵易于硬件实现,因此其在工程应用的研究中将有重要的研究意义。目前确定性测量矩阵的研究也成为了一大热

点[17-18]。

### 3.3 信号的重构算法

压缩感知中的信号重构过程就是从 $M$ 个观测点中对原始长度为 $N(M<<N)$ 的信号 $\boldsymbol{x}$ 进行估计的过程,也就是求解欠定方程组 $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{\Phi x}$[19]。在前面观测矩阵的设计中已经提及,Candes 和 Tao 提出的 RIP 特性是成功重构信号的理论保证,指出了能够从 $M$ 个观测值中以较高概率精确重构原始信号的前提条件。

本文采用的是压缩采样匹配追踪(Compressive Sampling Matching Pursuit, CoSaMP)算法[20]。CoSaMP 算法既能像基于凸优化的最小 $l_1$ 范数法那样保证重构信号的稳定性,又能体现出贪婪算法的快速特性。

### 3.4 基于确定性观测压缩感知的 MIMO 信道参数反馈方案

传统的有限反馈预编码方案首先在接收端利用信道估计获得实时的信道状态信息,然后将其与整个码本中的码字进行对比,接着将最接近信道状态信息的码字序号反馈到发射端。我们假设接收端通过信道估计得到了近似完整的信道状态信息,本文提出的方案中接收端不对预编码码字进行处理,而是直接反馈信道状态信息。

基于压缩感知的信道反馈具体过程如图 2 所示,$M_t$ 为发射天线数目,$M_r$ 为接收天线数目。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 $\boldsymbol{H}$,其中包括了幅度及相位信息;将信道矩阵变换成一个时域信道列向量,然后利用压缩感知观测得到比信道列矩阵元素少得多的观测值列向量 $\boldsymbol{y}$,进而将 $\boldsymbol{y}$ 反馈到发射端;在发射端利用压缩感知重构算法来重建出时域信道列向量,再将其变为频域信道矩阵 $\boldsymbol{H}'$。

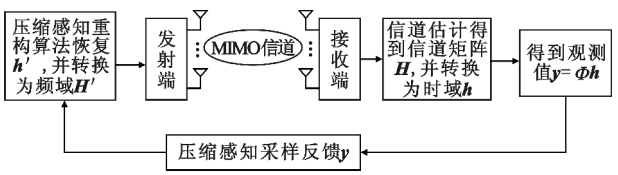


图 2 基于压缩感知的信道反馈具体过程

Fig. 2 Specific process of channel feedback based on compressed sensing

在观测过程中,引入了确定性观测矩阵——由格雷互补序列产生具有 Toeplitz 结构的观测矩阵;在反馈过程中,我们计算量化方式下完全 CSI 反馈和确定性压缩感知 CSI 反馈两种方案的反馈量;在信号的重构过程中,我们采用 CoSaMP 算法,后续仿真中将对其恢复完美程度和反馈误差进行分析。

## 4 仿真结果及分析

由于基于确定性压缩感知的反馈方案能够近似完美地恢复出完全 CSI,本文对比完全信道反馈与基于确定性压缩感知的反馈方案。在完全 CSI 反馈方案中,把利用信道估计得到的全部 CSI 反馈到发射端。为了对比完全信道反馈与基于确定性压缩感知的反馈方案所需要的反馈量,使用 Lloyd-Max 方法[21]对信道矩阵元素的实部和虚部都进行量化,每个矩阵元素都为 $Q=8$ b,实部4 b,虚部4 b。在确定性压缩感知反馈方案中,同样将信道矩阵每一个元素量化成8 b,将 2×2 MIMO 系统(每个子信道长度 $L_1=100$)的信道矩阵先横向排成一行,再转置成列矩阵,对这个列矩阵进行观测,观测数目采用 120,也就是把原来的全部 400 个信道值压缩成了 120 个值,从而极大地降低反馈的信息量。发射端通过重构算法利用这 120 个元素值就可以精确重构出原始信道冲激响应。表 2 列举了不同反馈方案下的反馈量。

表 2 不同反馈方式下反馈量的比较

Tab. 2 Comparison between different feedback methods

| 反馈方式 | 反馈量/b |
|---|---|
| 完全反馈 | $M_r\times M_t\times L_1\times Q=2\times2\times100\times8=3\ 200$ |
| 基于确定性压缩感知的反馈 | $M_r\times M_t\times N_1\times Q=2\times2\times30\times8=960$ |

由表 2 可知,基于确定性压缩感知的反馈方案数据量远少于完全反馈方案数据量,所以,在现实中反馈容量受限的情况下,基于确定性压缩感知的反馈方案更为实用。

仿真参数设定包括测量数、观测矩阵的形式(随机的或确定性的)、信道冲激响应恢复程度、不同反馈方式下的反馈量等。对仿真结果,本文采用计算其归一化均方误差(Mean Squared Error, MSE)的方法来进行重构性能的对比。仿真采用稀疏多径信道,每个子信道的长度为 $L_1=100$;信道的主要抽头数量即稀疏度 $K=8$;观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_1$ 由均值为零、方差为 1 的高斯随机变量产生;观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_2$ 是一个确定性 Golay 测量矩阵;天线配置 2×2;仿真次数1 000次。

图 3 展示了基于确定性压缩感知反馈的信道冲

激响应重构结果,采用的测量数为 120,压缩感知重构采用的是 CoSaMP 算法。从图中可以看出,在非零抽头位置,原始信号与重构信号全部重合,基于确定性压缩感知反馈的重构效果近乎完美。

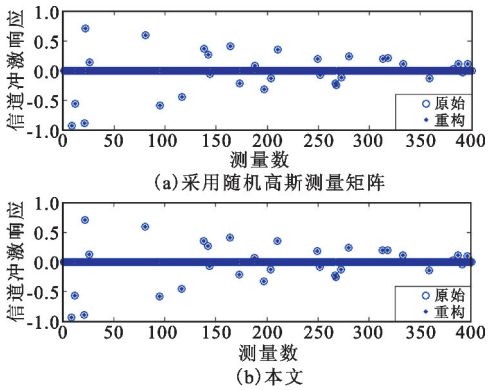


图 3　采用不同测量矩阵时压缩感知反馈的信道冲激响应重构结果

Fig. 3 Reconstruction results of channel impulse response of compressed sensing feedback using different measurement matrices

为了更清楚地了解发射端利用确定性压缩感知恢复信道状态信息的完美程度,以及在后续研究中比较其对系统容量的影响,本文设置了一个无错误、零延时的理想反馈信道来为发射端提供信道状态信息。

由图 4 可以看出,在理想反馈信道下,采用基于压缩感知的方法所反馈的信道状态信息误差非常小,接近于 0。采用压缩感知的方法,不管是利用随机观测矩阵还是确定性 Golay 测量矩阵,都可以获得很好的重构性能,而确定性观测矩阵在现实生活中易于硬件实现,所以采用确定性矩阵来进行压缩感知信道反馈具有很好的实际参考价值。

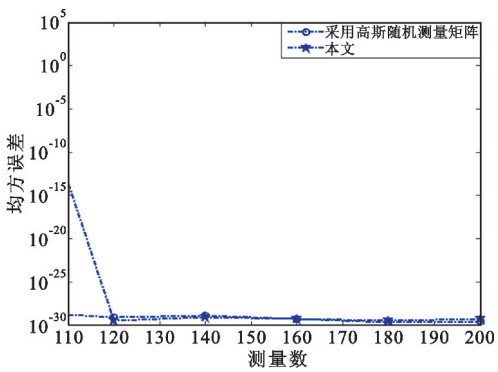


图 4　采用不同测量矩阵时信道状态信息恢复的最小均方误差

Fig. 4 Minimum mean squared error of channel state information recovery with different measurement matrices

## 5　结束语

本文在 MIMO 系统信道参数反馈中引入了一种确定性观测矩阵——确定性 Golay 测量矩阵,提出一种新的基于确定性观测的 MIMO 压缩感知信道参数反馈方法。仿真结果表明,采用确定性观测矩阵需要的观测值数目有所增加,但其所需存储空间远小于随机观测矩阵,且确定性观测反馈信道状态信息的重构性能与随机观测矩阵一样近乎完美。在 MIMO 系统信道参数反馈中采用确定性观测压缩感知方法,可以大大降低系统开销,获得近乎完美的信道状态信息,从而发射端可以进行合理的功率分配操作,优化系统性能。

文中确定性观测矩阵或者随机观测矩阵都是在进行信号处理前已经设计好的,进一步可研究根据待观测信号来进行自适应调整观测矩阵的方法。

**参考文献:**

[1] 王大鸣,巴斌,崔维嘉,等. 一种基于码本的 SLNR 算法[J]. 通信技术,2013(7):91-95.
WANG Daming, BA Bin, CUI Weijia, et al. A SLNR algorithm based on code book[J]. Communications Technology, 2013(7):91-95. (in Chinese)

[2] LIU T H, CHIU C N, LIN C Y. Fast codeword selection for limited feedback beamforming multiple-input-multiple-output systems using breadth-first tree search[J]. IET Communications, 2013, 7(6):531-537.

[3] 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.
SUN Chao, LI Yongjie, SONG Rongfang. Study on compressed sensing based CSI feedback scheme for MIMO-OFDM systems[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2012, 32(1):54-58. (in Chinese)

[4] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52 (4):1289-1306.

[5] CANDES E J. Compressive sampling[C]//Proceedings of the 2006 International Congress of Mathematicians. Madrid, Spain: ICM, 2006:1433-1452.

[6] 石光明,刘丹化,高大化,等. 压缩感知理论及其研究发展[J]. 电子学报,2009,37(5):1070-1081.
SHI Guangming, LIU Danhua, GAO Dahua, et al. Advance in theory and application of compressive sensing[J]. ECTA Electronica Sinica, 2009, 37(5):1070-1081. (in Chinese)

[7] 傅洪亮,张贝贝,陶华伟,等. MIMO-OFDM 系统中基于压缩感知的信道参数反馈方法[J]. 计算机应用研究,2012,29(5):1870-1872.

FU Hongliang, ZHANG Beibei, TAO Huawei, et al. Channel parameters feedback method based on compressed sensing for MIMO-OFDM system[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(5): 1870-1872. (in Chinese)

[8] 李小兵, 刘利, 景小荣. 大规模 MIMO 系统信道状态信息反馈开销降低方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(18): 56-60.
LI Xiaobing, LIU Li, JING Xiaorong. Channel state information feedback overhead reduction method for massive MIMO systems[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(18): 56-60. (in Chinese)

[9] 徐媛媛. LTE 系统中基于压缩感知的信道反馈方案研究[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(2): 53-56.
XU Yuanyuan. Research into channel feedback scheme of LTE system based on compressive perception[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(2): 53-56. (in Chinese)

[10] 王万蕾. 基于压缩感知的 MIMO 最优功率分配性能分析与研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
WANG Wanlei. Performance analysis and research on MIMOoptimal power allocation based on compress sensing [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013. (in Chinese)

[11] GOLAY M J E. Complementary series[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1961, 7(2): 82-87.

[12] BAJWA W U, HAUPT J, NOWAK R, et a1. Toeplitz structured compressed sensing matrices [C]//Proceedings of 2007 IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing. Madison, WI, USA: IEEE, 2007: 294-298.

[13] RAUHUT D. Circulant and Toeplitz matrices in compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 61(3): 1410-1425.

[14] YIN W, MORGAN S P, YANG J, et al. Practical compressive sensing with Toeplitz and circulant matrices [C]//Proceedings of 2010 SPIE. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2010.

[15] YAO Z, LI G, WANG S, et al. Channel estimation of sparse multipath based on compressed sensing using Golay sequences[C]// Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP). Singapore: IEEE, 2015: 976-980.

[16] HAUPT J, BAJWA W U, RAZ G, et al. Toeplitz compressed sensing matrices with applications to sparse channel estimation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(11): 5862-5875.

[17] LI K. Convolutional compressed sensing using deterministic sequences[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(3): 740-752.

[18] DEVORE R A. Deterministic constructions of compressed sensing matrices[J]. Journal of Complexity, 2007, 23(4-6): 918-925.

[19] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. SIAM Review, 2001, 43 (1): 129-159.

[20] NEEDELL D, TROPP J. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2009, 26(3): 301-321.

[21] BENVENUTO N, CHERUBINI G. Algorithms for communications systems and their applications [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2002.

## 作者简介:

**余 鹏**(1965—), 男, 广东广州人, 高级工程师, 主要研究方向为无线通信网络;

YU Peng was born in Guangzhou, Guangdong Province, in 1965. He is now a senior engineer. His research concerns wireless communication network.

Email: yupeng_y@21cn. com

**姚志强**(1975—), 男, 湖南沅江人, 2004 年和 2010 年分别获华南理工大学工学硕士学位和博士学位, 现为教授、硕士生导师, 主要研究方向为宽带无线网络、通信信号处理、无线定位技术以及 MIMO 和压缩感知技术等;

YAO Zhiqiang was born in Yuanjiang, Hunan Province, in 1975. He received the M. S. degree and the Ph. D. degree in 2004 and 2010, respectively. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns wideband wireless network, communication signal processing, wireless position and MIMO and compress sensing technology.

Email: yaozhiqiang@ xtu. edu. cn

**朱 蕾**(1992—), 女, 湖南邵阳人, 湘潭大学硕士研究生, 主要研究方向为 MIMO- DAS 定时同步算法研究和基于压缩感知的信道估计。

ZHU Lei was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1992. She is now a graduate student. Her research concerns MIMO-DAS timing synchronization algorithm and channel estimation based on compressive sensing.