

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.11.006

引用格式:李小文,冯永帅,张丁全. 广义空间调制系统的低复杂度检测算法[J]. 电讯技术,2016,56(11):1213-1217. [LI Xiaowen, FENG Yongshuai, ZHANG Dingquan. A low complexity detection algorithm for generalized spatial modulation systems[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(11):1213-1217. ]

# 广义空间调制系统的低复杂度检测算法\*

李小文,冯永帅\*\*,张丁全

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

**摘 要:**针对广义空间调制(GSM)系统接收端最大似然(ML)检测算法计算复杂度极高的缺点,提出了一种基于压缩感知(CS)信号重构理论的低复杂度信号检测算法。首先,在多输入多输出(MIMO)信道模型下,通过改进正交匹配追踪(OMP)算法,得到一个激活天线索引备选集;然后,利用 ML 算法在该备选集中进行遍历搜索,检测出激活天线索引和星座调制符号。仿真结果表明所提算法的检测性能接近于 ML 算法,且复杂度约为 ML 算法的 2%。因此,所提算法在保证检测性能的同时也大大降低了计算复杂度,实现了检测性能与复杂度之间的平衡。

**关键词:**广义空间调制;多输入多输出;压缩感知;最大似然;正交匹配追踪

**中图分类号:**TN911      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2016)11-1213-05

## A Low Complexity Detection Algorithm for Generalized Spatial Modulation Systems

LI Xiaowen, FENG Yongshuai, ZHANG Dingquan

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:**To overcome the disadvantage of high computational complexity of maximum likelihood(ML) detection algorithm for the generalized spatial modulation(GSM) system, a low complexity signal detection algorithm based on compressed sensing(CS) signal reconstruction theory is investigated. Firstly, under the channel model of multiple-input multiple-output(MIMO), through improving orthogonal matching pursuit(OMP) algorithm, a candidate set of active antenna index is obtained. Then the ML detection algorithm is used to perform traversal search in the candidate set to obtain the active antenna index and the constellation modulation symbols. Simulation results show that the detection performance of the proposed algorithm is similar to that of ML detection algorithm and its computational complexity is about 2% of that of ML. Therefore, the proposed algorithm reduces the computational complexity while ensuring the detection performance, which achieves the favourable performance-complexity trade-off.

**Key words:**generalized spatial modulation; multiple-input multiple-output; compressed sensing; maximum likelihood; orthogonal matching pursuit

1 引 言

空间调制(Spatial Modulation, SM)是一种新的

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)传输方案,其主要特点是在每个时隙只有一根

\* 收稿日期:2016-04-12;修回日期:2016-06-12      Received date:2016-04-12;Revised date:2016-06-12  
基金项目:国家科技重大专项(2012ZX03001024)  
Foundation Item:The National Key Technologies R&D Program(2012ZX03001024)

\*\* 通信作者:981352634@qq.com      Corresponding author:981352634@qq.com

发射天线被激活处于工作状态,且以被激活天线的物理位置携带部分发送信息比特,将传统的二维映射扩展至三维映射<sup>[1]</sup>。与传统的调制方案相比,空间调制技术既可以避免 MIMO 系统中存在的信道间干扰(Inter-Channel Interference, ICI)、天线间同步(Inter-Antenna Synchronization, IAS)、多无线射频(Radio Frequency, RF)链等主要缺点,又能够实现更高吞吐率、更简单的发射端设计和更好的能量效率<sup>[2]</sup>。因此,SM 是一个有前景的调制方案。

SM 技术虽然创造性地采用天线索引传输信息,但这种技术并没有能够充分利用空间资源。为了进一步提高系统的频谱效率,文献[3]在 SM 系统的基础上提出了一种多激活天线的广义空间调制(Generalized Spatial Modulation, GSM)方案。在 GSM 方案中,每个时隙内有多根发射天线被激活传输多路数据流。因此,与每个时隙激活单根发射天线的传统 SM 方案相比,GSM 方案能够实现更高的频谱效率。但是,采用多根激活发射天线传输使得 GSM 系统的信号检测更加复杂。对于 GSM 系统,联合搜索所有可能发射天线组合和调制符号的最大似然(Maximum Likelihood, ML)检测算法的计算复杂度随着发射天线数目和调制阶数成指数增长。在这种情况下,一些次优检测算法被提出,包括最大接受比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)<sup>[1]</sup>检测算法、迫零(Zero-forcing, ZF)<sup>[4]</sup>检测算法和最小均方误差(Minimum Mean Squared Error, MMSE)<sup>[4]</sup>检测算法等。这些算法虽然复杂度很低,但是在低信噪比(Signal-to-noise Ratio, SNR)区域遭受到严重的性能损失,其性能较差,且仅适用于超定系统。

最近,压缩感知(Compressive Sensing, CS)<sup>[5]</sup>稀疏信号重构算法由于其极低的计算复杂度而被应用于大规模天线阵列系统的信号检测中,例如:正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)<sup>[6]</sup>算法被用于广义空移键控(Generalized Space Shift Keying, GSSK)<sup>[7]</sup>符号检测,仿真结果显示其相对于许多传统的 MIMO 检测算法(如 MMSE、ZF 算法)有更好的性能以及较低的复杂度。但是,随着信噪比的增加,它的误比特率(Bit Error Rate, BER)出现了地板趋势。在文献[8]中,通过预处理提高 OMP 算法的检测性能,而这又需要进行奇异值分解的计算,因此检测复杂度也相应增加。而最近提出的用于 GSM 系统检测的基追踪去噪(Basis Pursuit De-noising, BP-DN)<sup>[9]</sup>算法虽然能获得很好的检测性能,但是其复杂度远高于 OMP 算法。

针对上述问题,本文充分利用广义空间调制信号本身固有的稀疏特性,并结合压缩感知稀疏信号重构理论,提出了一种新的基于 CS 理论的低复杂度且性能接近于 ML 算法性能的 GSM 信号检测算法——ML-OMP 检测算法。在 ML-OMP 检测算法中,首先,通过 OMP 算法得到一个小的激活天线索引集,称其为激活天线索引备选集;然后,利用 ML 算法在该备选集中进行遍历搜索,检测出激活天线序列集和调制符号。在实际的应用中,最终的激活天线索引集相对于全部的激活天线序列集而言一般比较小。因此,在这个备选集中采用 ML 算法进行信号检测时复杂度较低,同时能够获得很好的性能。与传统的 OMP 算法相比,本文提出的算法实现了检测性能与复杂度之间的平衡。

2 系统模型

考虑一个具有  $N_t$  根发射天线和  $N_r$  根接收天线的 GSM 系统,如图 1 所示,其数字调制阶数为  $M$ ,每个时隙发射端激活的发射天线数目为  $n_t$ 。因此,当从  $N_t$  根发射天线中选择激活  $n_t$  根天线时所有的天线组合数为  $C_{N_t}^{n_t}$ 。其中,  $C_{N_t}^{n_t}$  表示二项式系数。在这些天线组合中,只有  $N=2^{\lfloor \lg(C_{N_t}^{n_t}) \rfloor}$  个天线组合用来传输信息比特,其中  $\lfloor x \rfloor$  表示小于  $x$  的最大整数。在发射端的每个时隙内,信息比特被分为天线索引调制比特和数字调制比特两部分。第一部分  $l_1 = \lfloor \lg(C_{N_t}^{n_t}) \rfloor$  个信息比特用于一组发射天线组合索引的映射,第二部分  $l_2 = n_t \lg M$  个信息比特被映射为星座符号矢量  $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{n_t}]$ ,其中  $s_1, s_2, \dots, s_{n_t} \in \mathbf{S}$  是星座调制符号集合。因此,发射端每个时隙内传输的信息比特长度为  $l_1 + l_2$ ,发射信号矢量  $\mathbf{x}$  为  $\mathbf{x} = [\dots, 0, s_1, 0, \dots, 0, s_2, 0, \dots, 0, s_{n_t}, 0, \dots] \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ ,其中  $\mathbf{x}$  中有  $n_t$  个非零元素。

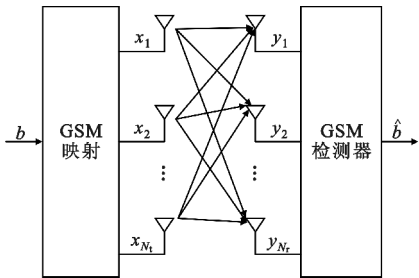


图 1 GSM 系统模型  
Fig. 1 GSM system model

假设信道为半静态频率平坦衰落信道,且信道增益在一个符号周期内保持不变,则接收信号矢量

$\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \sum_{k=1}^{n_t} \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{n} = \mathbf{H}_I \mathbf{s} + \mathbf{n}. \tag{1}$$

式中:  $k \in \{i_1, i_2, \dots, i_{n_t}\}$ ;  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  是方差为  $\sigma^2$  的加性白高斯噪声;  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$  表示 MIMO 信道矩阵, 且  $\mathbf{H}$  中的元素服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布, 则  $\mathbf{H}$  具有 RIP (Restricted Isometric Property) [7] 特性;  $\mathbf{h}_k$  是信道矩阵  $\mathbf{H}$  的第  $k$  列,  $\mathbf{H}_I = (\mathbf{h}_{i_1}, \mathbf{h}_{i_2}, \dots, \mathbf{h}_{i_{n_t}})$  是信道矩阵  $\mathbf{H}$  的子矩阵, 对应于发射天线组合  $I$ 。

对于 GSM-MIMO 系统, 由文献[4]可知 ML 检测算法如下:

$$(\hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{s}}) = \arg \min_{I \in \Gamma, \mathbf{s} \in \mathbf{Q}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}_I \mathbf{s}\|_F^2. \tag{2}$$

式中:  $\Gamma = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$ ;  $I_i (i \in \{1, 2, \dots, N\})$  表示在第  $i$  个发射天线组合中  $n_t$  根激活发射天线的集合;  $\mathbf{Q} = \mathbf{S}^{n_t \times 1}$  表示  $n_t$  维调制符号矢量。很明显, ML 检测算法的复杂度随着  $N_t, n_t, M$  增大成指数增长, 难以在实际中应用。

3 基于信号稀疏特性的检测算法

根据空间调制的映射原理, 发射信号矢量  $\mathbf{x}$  中大部分位置的元素是零, 即  $\mathbf{x}$  具有稀疏特性。故在接收端的信号检测可以看作是一个稀疏信号重构问题, 即可以用压缩感知中的稀疏重构理论来恢复信号  $\mathbf{x}$ 。由于 CS 理论是基于实数域, 因此需要对式 (1) 进行实数化, 可得

$$\begin{bmatrix} \Re(\mathbf{y}) \\ \Im(\mathbf{y}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{H}) & -\Im(\mathbf{H}) \\ \Im(\mathbf{H}) & \Re(\mathbf{H}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{x}) \\ \Im(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{n}) \\ \Im(\mathbf{n}) \end{bmatrix}. \tag{3}$$

式中:  $\Re(\cdot)$  和  $\Im(\cdot)$  分别表示取实部和虚部。进一步将式 (3) 简写为

$$\mathbf{y}' = \mathbf{H}' \mathbf{x}' + \mathbf{n}'. \tag{4}$$

式中:  $\mathbf{y}' \in \mathbb{R}^{2N_t \times 1}$ ;  $\mathbf{H}' \in \mathbb{R}^{2N_t \times 2N_t}$ ;  $\mathbf{x}' \in \mathbb{R}^{2N_t \times 1}$ ;  $\mathbf{n}' \in \mathbb{R}^{2N_t \times 1}$ 。显然,  $\mathbf{H}'$  也具有 RIP 特性。

通过稀疏重构理论, GSM 的信号检测可以归结为  $l_0$  范数优化问题, 故可以通过 MP (Matching Pursuit) 类算法有效解决。而 OMP 算法检测性能较差, 难以在实际中应用, 这就促使我们提出一种更有效的稀疏检测算法。

3.1 基于 OMP 算法的 GSM 信号检测

OMP 算法是一个贪婪迭代过程, 在稀疏信号重构中有着重要的地位。在每次迭代中, 将当前残余量  $\mathbf{r}_t$  与观测矩阵  $\mathbf{H}'$  的每一列作相关运算, OMP 会选择出其最大绝对相关值对应的  $\mathbf{H}'$  的列索引号  $\lambda$  作

为激活天线索引; 然后, 每一次迭代都使用最小二乘法来估计  $\mathbf{x}$ , 再用估计值更新残余量; 直到迭代结束, 得到激活天线序列集  $I$ 。根据获取的激活天线序列集  $I$ , 采用迫零均衡和星座图量化来求解发射的星座符号矢量  $\mathbf{s}$ 。

3.2 基于 ML-OMP 算法的 GSM 检测

从理论上讲, OMP 算法经过  $n_t$  次迭代后可以完成对  $n_t$ -稀疏信号的重建。但是, 在每次迭代中, OMP 算法仅选取一个最大相关值对应的索引号作为激活天线索引, 当接收信号受到深度衰落时, 在搜索过程中, 有时可能会选择到错误的激活天线索引。因此, 本文对 OMP 算法进行改进, 提出了一种将 ML 算法和 OMP 算法进行联合的信号重构算法, 即 ML-OMP 算法。其核心思想为: 在 OMP 算法的第  $t (1 \leq t \leq n_t)$  次迭代中, 通过计算观测矩阵  $\mathbf{H}'$  中每一列与当前残差  $\mathbf{r}_t$  的内积, 选出前  $K$  个最大相关值对应的  $\mathbf{H}'$  的列索引号, 以此构建本次迭代所确定的索引集  $\Lambda_t$ , 并记录此次迭代最大相关值对应的  $\mathbf{H}'$  的列索引号为  $\lambda_t$ , 用于残差计算。由于在每次迭代过程中选择了多个  $\mathbf{H}'$  的列索引, 因此, 索引集  $\Lambda_t$  中很大可能地包含了正确的激活发射天线索引; 然后, 每一次迭代都使用最小二乘法估计  $\mathbf{x}$ , 再用估计值更新残余量, 直到迭代结束。这样就可以得到  $n_t$  个索引集  $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{n_t}$ 。然后, 从每一个索引集中选取一个元素进行组合, 作为一组激活天线序列集  $I$ , 此时候选的激活天线序列集的组数不会超过  $K^{n_t}$  (不同的索引集中可能含有相同的列索引), 将这些激活天线序列集存于集合  $B$  中, 最后通过式 (5) 的 ML 算法检测出最终的激活天线序列集和调制符号:

$$(\hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{s}}) = \arg \min_{I \in B, \mathbf{s} \in \mathbf{Q}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}_I \mathbf{s}\|_2^2. \tag{5}$$

ML-OMP 算法流程如下所示:

输入: 接收信号矢量  $\mathbf{y}'$ , 信号矩阵  $\mathbf{H}'$ , 信号稀疏度  $n_t$ , 每次迭代选择索引数  $K$

输出: 激活天线序列集  $\hat{I}$ , 星座符号矢量  $\hat{\mathbf{s}}$

初始化:  $\mathbf{r}_0 = \hat{\mathbf{y}}, \mathbf{H}'_0 = \emptyset$

for  $t = 1$  to  $n_t$

计算  $|\langle \mathbf{r}_{t-1}, \mathbf{h}_j \rangle|$ , 取前  $K$  个最大的相关值对应的列索引并存于集合  $\Lambda_t$  中。

$$\Lambda_t = \arg \max_{j=1, 2, \dots, N_t} |\langle \mathbf{r}_{t-1}, \mathbf{h}_j \rangle|;$$

$$\mathbf{H}'_t = \mathbf{H}'_{t-1} \cup \mathbf{h}_{\lambda_t};$$

$$\mathbf{x}'_t = \arg \min_{\mathbf{x}_t} \|\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{H}'_t \mathbf{x}_t\| =$$

$$((\mathbf{H}'_t)^T \mathbf{H}'_t)^{-1} (\mathbf{H}'_t)^T \hat{\mathbf{y}}$$

$$\mathbf{r}_t = \hat{\mathbf{y}} - \mathbf{H}'_t \mathbf{x}'_t = \hat{\mathbf{y}} - \mathbf{H}'_t ((\mathbf{H}'_t)^T \mathbf{H}'_t)^{-1} (\mathbf{H}'_t)^T \hat{\mathbf{y}}$$

end

分别从  $\Lambda_1, \Lambda_2, \cdots, \Lambda_{n_t}$  的每一个索引集中选取一个元素进行组合, 将所有组合存于集合  $B$  中。采用 ML 算法进行检测可得

$$(\hat{l}, \hat{s}) = \arg \min_{l \in B, s \in Q} \| \mathbf{y} - \mathbf{H}_l \mathbf{s} \|_2^2 \quad .$$

4 性能和复杂度分析

4.1 性能分析

通常情况下, 如果一个向量中非零元素的个数少于或等于其所有元素个数的 20%, 那么这个向量就可以认为是稀疏的。

本文仿真时系统的接收天线数为 10, 发射天线数分别为 128 和 64, 调制方式为 QPSK, 为了满足稀疏性的要求, 激活天线数取为 2, 将提出的 ML-OMP 算法与 ML 算法和 OMP 算法进行性能对比, 仿真结果如图 2 和图 3 所示, 其中,  $K$  为 OMP 过程中每次迭代选择的索引个数。

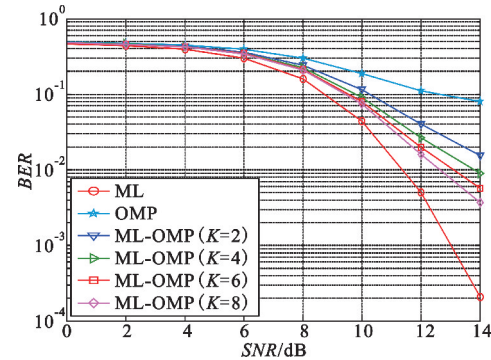


图 2 当  $N_t = 128$  时不同算法的误比特率曲线  
Fig. 2 BER curves for differernt algorithm when  $N_t = 128$

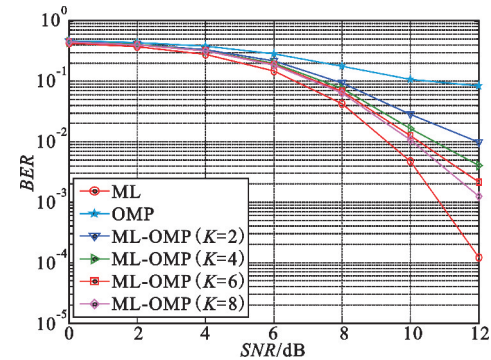


图 3 当  $N_t = 64$  时不同算法的误比特率曲线  
Fig. 3 BER curves for differernt algorithm when  $N_t = 64$

从图 2 和图 3 中我们可以看到 ML-OMP 算法的性能明显优于 OMP 算法, 并且当  $SNR \geq 10$  dB 时, OMP 算法逐渐呈现出地板趋势, 而 ML-OMP 算法并没有呈现出地板趋势。从图中我们还可以看到,

与 OMP 算法相比, 当  $BER = 10^{-1}$  时, ML-OMP 算法的性能至少提高了 2 dB, 并且随着  $K$  增大, ML-OMP 算法的性能不断提高且较接近于 ML 算法的性能。因此, 在大规模天线阵列的 MIMO 系统中, 新提出的算法相比于 OMP 算法对 GSM 信号检测有明显的性能提升。

4.2 复杂度分析

我们用复乘的操作次数来定义复杂度。由文献 [4] 可以得到 ML 算法检测复杂度约为  $C_{ML} = 2^N M^{n_t} N_r (n_t + 1)$ , 由文献 [9] 可以得到 OMP 算法的检测复杂度约为  $C_{OMP} = 4(n_t + 1) N_t N_r$ 。在 ML-OMP 算法中, 与 OMP 算法相关联操作的复杂度约为  $4(n_t + 1) N_t N_r$ , 与 ML 算法相关联操作的复杂度约为  $N_t K^{n_t} M^{n_t} (n_t + 1)$ , 故 ML-OMP 算法的检测复杂度约为  $C_{ML-OMP} = 4(n_t + 1) N_t N_r + N_t K^{n_t} M^{n_t} (n_t + 1)$ 。

为了进一步比较提出的算法与 ML 算法和 OMP 算法的计算复杂度, 本文计算系统在接收天线数为 10, 发射天线数分别为 128 和 64, 调制方式为 QPSK, 激活天线数为 2 时不同算法的复杂度, 其结果如图 4 和 5 所示。

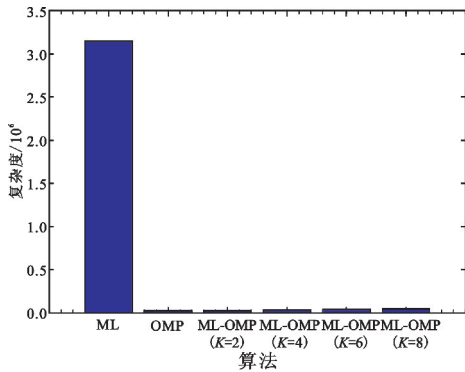


图 4 当  $N_t = 128$  时不同算法的计算复杂度  
Fig. 4 Computational complexity for differernt algorithm when  $N_t = 128$

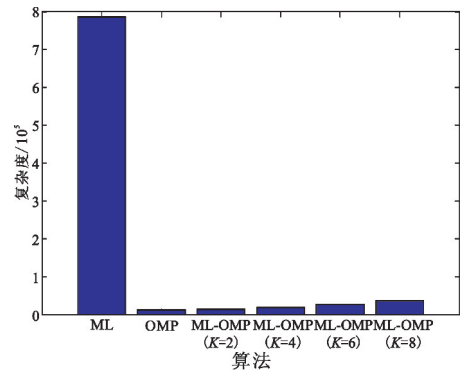


图 5 当  $N_t = 64$  时不同算法的计算复杂度  
Fig. 5 Computational complexity for differernt algorithm when  $N_t = 64$

从图 4 和图 5 中我们可以看到,在大规模天线阵列的 MIMO 系统中,ML 算法的复杂度极高,OMP 算法复杂度最低,而 ML-OMP 算法的复杂度随着  $K$  的增大而增大,但相对于 ML 算法,其复杂度仍然很低。结合上述检测性能分析图我们可以看到,当  $K=8$  时,ML-OMP 算法的检测性能较为接近 ML 算法的检测性能,但其复杂度很低,约为 ML 算法的 2%。

## 5 结束语

针对激活多根发射天线的广义空间调制系统,本文提出了一种新的低复杂度的信号检测算法。该算法充分利用 GSM 系统中发射信号的稀疏特性,结合稀疏信号重构的相关理论和 ML 算法进行信号检测。理论分析和仿真结果证实了当系统发射天线数目增加时,ML 算法的性能虽然最优,但是其复杂度极大,在实际应用中不易实现,而本文提出的信号检测算法在大规模天线阵列的 MIMO 系统中所能达到的误比特率在保证正常通信的情况下,具有比 ML 算法低得多的计算复杂度。因此,所提算法具有实际的应用意义。若将此算法应用与现实系统中,还应考虑更复杂的信道条件、费用、安全等因素。

## 参考文献:

- [1] MESLEH R, HAAS H, SANANOVIC S, et al. Spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2228–2241.
- [2] RENZO M D, HAAS H, GHAYEB A, et al. Spatial modulation for generalized MIMO: challenges, opportunities, and implementation[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(1): 56–103.
- [3] YOUNIS A, NIKOLA S, RAED M, et al. Generalised spatial modulation[C]//Proceedings of 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2010: 1498–1502.
- [4] WANG J, JIA S, SONG J. Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11(4): 1605–1615.

- [5] 吴凌华, 张小川. 压缩感知的发展与应用[J]. 电讯技术, 2011, 51(1): 120–124.  
WU Linghua, ZHANG Xiaochuan. Development and application of compressed sensing[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(1): 120–124. (in Chinese)
- [6] JEGANATHAN J, GHAYEB A, SZCZECINSKI L. Generalized space shift keying modulation for MIMO channels[C]//Proceedings of 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication. Cannes, France: IEEE, 2008: 1–5.
- [7] YU C M, HSIEH H, LIANG H, et al. Compressed sensing detector design for space shift keying in MIMO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1556–1559.
- [8] WU C H, CHUNG W H, LIANG H. OMP-based detector design for space shift keying in large MIMO systems[C]//Proceedings of 2014 IEEE Wireless Communication Symposium. Austin, Texas, USA: IEEE, 2014: 4072–4076.
- [9] LIU W, WANG N, JIN M, et al. Denoising detection for the generalized spatial modulation system using sparse property[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(1): 22–25.

## 作者简介:



李小文(1955—),男,重庆人,教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信系统;

LI Xiaowen was born in Chongqing, in 1955. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns wireless communication system.

冯永帅(1990—),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信系统空间调制技术;

FENG Yongshuai was born in Henan Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns spatial modulation for wireless communication systems.

Email: 981352634@qq.com

张丁全(1992—),男,云南人,硕士研究生,主要研究方向为 TD-LTE 系统开发。

ZHANG Dingquan was born in Yunnan Province, in 1992. He is now a graduate student. His research concerns system development of LTE.