

文章编号 1004-924X(2018)11-2669-06

湍流信道下光空间调制信号的压缩感知检测

王惠琴*, 宋梨花, 曹明华, 王道斌

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:在光空间调制系统中采用最大似然检测算法可以获得最优的误码性能,但算法的译码复杂度限制了其实际应用。本文依据光空间调制激光器映射向量,并结合脉冲位置调制方式下的脉冲向量构建了具有稀疏特性的发送信号。基于该稀疏特性,采用正交匹配追踪算法提出了一种基于压缩感知理论的光空间调制信号检测方法。仿真结果表明:该方法以少量误码性能损失为代价极大地降低了信号检测的复杂度。当激光器数目为 64 时,相比于最大似然检测算法,本文所提方法的复杂度降低了 99.54%。同时,由于稀疏性的引入,该方法更适用于具有大规模激光器的无线光通信系统。

关键词:光无线通信;光空间调制;压缩感知;信号检测算法

中图分类号:TN929.12 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182611.2669

Compressed sensing detection of optical spatial modulation signal in turbulent channel

WANG Hui-qin*, SONG Li-hua, CAO Ming-hua, WANG Dao-bin

(School of Computer & Communication,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

* Corresponding author, E-mail:15117024169@139.com

Abstract: The maximum likelihood detection algorithm produces the best bit error performance in optical spatial modulation systems, but the complexity of the decoding process limits its application in practical settings. To address this deficiency, a transmission signal with sparse characteristics was generated by mapping an optical spatial modulation laser vector and a pulse position modulation vector together. A compressed sensing-based optical spatial modulation signal detection method was proposed based on the resulting transmission signal with sparse characteristics and the utilization of an orthogonal matching pursuit algorithm. Simulation results show that this method can greatly reduce computational complexity at the expense of a small increase in the performance error. In comparison with the maximum likelihood detection algorithm, the complexity of the proposed method is reduced by 99.54% when 64 lasers are used. Moreover, this approach is more suitable for wireless optical communication systems with large-scale lasers, due to the introduction of sparsity.

Key words: wireless optical communication; optical spatial modulation; compressed sensing; signal detection algorithm

收稿日期:2018-05-15;修订日期:2018-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61465007);甘肃省教育厅高等学校科学研究项目(No. 2017A-011);兰州理工大学博士基金资助项目(No. 03-061616)

1 引言

近年来,随着数据传输业务量的急剧增加,对通信的服务质量提出了更高的要求,传统无线光通信(Wireless Optical Communication, WOC)技术已经无法满足用户对数据速率的要求。光多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术是解决上述问题的一种有效手段。但传统光 MIMO 技术存在多光束传输导致的信道间干扰强,接收端干扰抵消算法和信号检测算法复杂度大,天线间同步要求高等诸多问题。

空间调制(Spatial Modulation, SM)^[1]作为一种特殊的 MIMO 技术,不仅采用传统的数字调制星座(即信号域)传递信息,而且通过发送天线索引号(即空间域)来传递信息。因此,发送天线不单是形成无线链路的媒介,其本身也承载信息,可以得到比经典系统更高的频谱效率。同时,由于在每个时隙上只有一条链路负责传输信号,避免了信道间干扰问题。基于上述优势,SM 近年来在无线通信领域掀起了研究热潮^[2]。

目前的 WOC 系统大多采用强度调制/直接检测(Intensity Modulation and Direct Detection, IM/DD)方式,导致 SM 技术不能直接应用于射频通信中。为此,文献[3]针对室内 WOC 系统提出了一种光空间调制(Optical Spatial Modulation, OSM)方案。在此基础上,文献[4]结合脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)提出了一种空间脉冲位置调制(Spatial Pulse Position Modulation, SPPM)方案,同时分析了该方案在大气联合衰减效应下的平均误比特率。文献[5]针对湍流信道,提出了一种单载波调制/空间调制方案。文献[6]和[7]将 PPM 和脉冲

幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)相结合,提出了一种空间脉冲幅度位置调制(Spatial Pulse Amplitude Position Modulation, SPPAM)方案,给出了它在强湍流信道下误比特率的性能界。文献[8]将空间调制技术和分集接收技术相结合,提出了一种基于分集接收的空间调制方案,给出了最大比合并和等增益合并方式下的平均误比特率。

上述文献在译码时均采用了最大似然(Maximum Likelihood, ML)译码算法。ML 算法性能优秀,但由于要穷尽搜索所有可能的发射机序号和调制星座组合,其译码复杂度较高,而且其复杂度随着调制阶数的增加呈指数倍增长,这就限制了它的实际应用,尤其是在大规模 MIMO 系统中的应用。因此,在保证解调性能的基础上,如何有效降低接收端译码复杂度成为了一个亟待解决的关键问题。常规线性检测算法^[9],如迫零(Zero Forcing, ZF)和最小均方误差检测算法(Minimum Mean Square Error, MMSE),虽然复杂度较低,但其误码性能有限,而且仅适合于发送天线数小于接收天线数的场景。如何获得误码性能优良、译码复杂度低、实用性强的译码算法是光空间调制技术走上实用化的关键。针对这一问题,本文将 PPM 调制与 OSM 技术相结合,利用 OSM 映射向量和 PPM 脉冲向量构建了具有稀疏特性的矩阵,并采用压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论,提出了一种适合于湍流信道 OSM 信号的低复杂度检测算法。

2 OSM 系统模型

对于一个有 N_t 个激光器(LD)和 N_r 个探测器(PD)的 OSM 系统,其模型如图 1 所示。

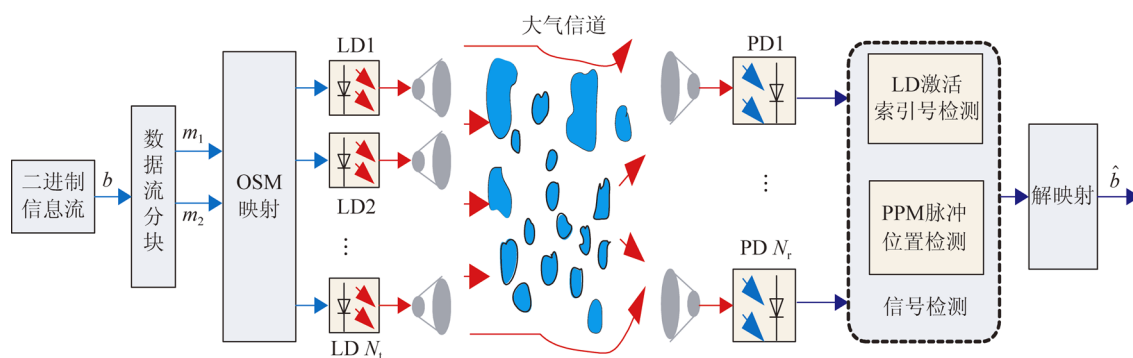


图 1 OSM 系统模型

Fig. 1 Model of OSM system

二进制信息比特流 b 首先经串/并变换成长度为 $m = m_1 + m_2$ 比特的数据块,其中 $m_1 = \log_2 N_t$,表示数据比特映射为激活激光器的序号; $m_2 = \log_2 L$,表示比特映射为数字调制的某个调制符号。假设采用 L-PPM 调制,其中 L 表示进制数。那么,激光器序号的映射关系可以用一个 $N_t \times 1$ 维的向量 $\mathbf{x}_s = [0, 0, \dots, \underset{i_{th}}{1}, \dots, 0]^T (1 \leq i \leq N_t)$ 表示。脉冲位置映射关系可以用 $1 \times L$ 维的向量 $\mathbf{x}_l = [0, 0, \dots, \underset{j_{th}}{A_m}, \dots, 0] (1 \leq j \leq L)$ 表示发送脉冲的位置)来表示。经比特映射后的第 j 个数字脉冲由激活的第 i 个激光器经光学天线发送出去,则发射信号可表示为 $\mathbf{x}_{l,s} = \mathbf{x}_s \mathbf{x}_l$ 。因此,OSM 信号 $\mathbf{x}_{l,s}$ 可以看作是一个 $N_t \times L$ 维的矩阵。当 $N_t = 2$ 并采用 4-PPM 调制时,OSM 映射关系如表 1 所示。

由表 1 可见,由于每一时刻只激活一个激光器发送光脉冲信号,因此 $\mathbf{x}_{l,s}$ 只有一个位置的元素非零,其他元素均为 0,即 OSM 发送信号具有良好的稀疏性。

表 1 OSM 符号映射关系

Tab. 1 Symbol mapping relation of OSM

输入比特	LD 映射信号	4-PPM 映射信号
000	$\mathbf{x}_s = [1, 0]^T$	$\mathbf{x}_l = [A_m, 0, 0, 0]$
001	$\mathbf{x}_s = [1, 0]^T$	$\mathbf{x}_l = [0, A_m, 0, 0]$
010	$\mathbf{x}_s = [1, 0]^T$	$\mathbf{x}_l = [0, 0, A_m, 0]$
011	$\mathbf{x}_s = [1, 0]^T$	$\mathbf{x}_l = [0, 0, 0, A_m]$
100	$\mathbf{x}_s = [0, 1]^T$	$\mathbf{x}_l = [A_m, 0, 0, 0]$
101	$\mathbf{x}_s = [0, 1]^T$	$\mathbf{x}_l = [0, A_m, 0, 0]$
110	$\mathbf{x}_s = [0, 1]^T$	$\mathbf{x}_l = [0, 0, A_m, 0]$
111	$\mathbf{x}_s = [0, 1]^T$	$\mathbf{x}_l = [0, 0, 0, A_m]$

当信号经大气信道传播后,探测器收到的信号可表示为:

$$\mathbf{y} = \eta \mathbf{H} \mathbf{x}_s \mathbf{x}_l + N = \eta \mathbf{H} \mathbf{x}_{l,s} + N, \quad (1)$$

其中: η 是光电转换效率, N 是服从均值为 0、方差为 n_0 的加性高斯白噪声, \mathbf{y} 是一个 $N_r \times L$ 维的接收信号矩阵, \mathbf{H} 是 $N_r \times N_t$ 维的信道衰减矩阵。在弱湍流条件下, \mathbf{H} 中的元素 h_{ij} 均服从对数正态分布^[10],其概率密度函数为:

$$f(h_{ij}) = \frac{1}{(8\pi\sigma_x^2)^{\frac{1}{2}} h_{ij}} \times \exp\left[-\frac{1}{8\sigma_x^2} (\ln h_{ij} - 2\mu_x)^2\right], \quad (2)$$

式中: μ_x 为均值, σ_x^2 为方差。依据文献[10]对 h_{ij} 进行归一化处理,即 $E[h_{ij}] = e^{2(\mu_x + \sigma_x^2)} = 1$,得 $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。 σ_x^2 也可用闪烁因子来表示, $\sigma_x^2 = \exp(4\sigma_\alpha^2) - 1$,其典型值为 $\sigma_\alpha^2 \in [0.4 \sim 1.0]$ ^[11]。此时 $\mu_x = -\frac{1}{4} \ln(1 + \sigma_\alpha^2)$, $\sigma_x^2 = \frac{1}{4} \ln(1 + \sigma_\alpha^2)$ 。

3 适合于 OSM 的 CS 信号检测算法

压缩感知理论由 Candes 等人提出^[12]。它是建立在信号稀疏表示、测量矩阵的非相关性以及逼近理论上的一种信号采集和重建方法。当原始信号具有稀疏性时,它可以通过较少的观测值恢复出原始的高维信号^[13]。由空间调制的映射原理可知,信号 $\mathbf{x}_{l,s}$ 具有稀疏性,尤其 L-PPM 调制中 L 取值较大时,发射信号具有更强的稀疏性,所以求解 $\mathbf{x}_{l,s}$ 的过程可看成是一个稀疏矩阵重构问题。而 CS 中的正交匹配追踪算法^[14] (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 在每次迭代过程中将选出的列用 Gram-Schmidt 正交化方法进行正交化处理,具有收敛速度较快的特点。因此,在后续的信号重构过程中采用 OMP 算法。具体检测步骤如下:

第一步,为了防止噪声被过度放大,首先对信道矩阵 \mathbf{H} 进行归一化处理,即:

$$\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}} \mathbf{D}, \quad (3)$$

其中: $\bar{\mathbf{H}}$ 为归一化后的信道矩阵, $\bar{\mathbf{H}}$ 中的第 j 列 \bar{h}_j 可由 $\bar{h}_j = h_j / \text{norm}(h_j)$ 运算得到。 \mathbf{D} 为一个 $N_t \times N_t$ 维的对角矩阵,即 $\mathbf{D} = \text{diag}\{\text{norm}(h_j)\}, j = 1, 2, \dots, N_t$ 。因此,式(1)可改写为:

$$\mathbf{y} = \eta \mathbf{H} \mathbf{x}_{l,s} + N = \eta \bar{\mathbf{H}} \mathbf{D} \mathbf{x}_{l,s} + N = \eta \bar{\mathbf{H}} \mathbf{x} + N = \bar{\mathbf{H}} \mathbf{x} + N. \quad (4)$$

由式(4)可见,经上述归一化处理后, $\bar{\mathbf{H}} = \eta \bar{\mathbf{H}}$ 仍然可看作为一个观测矩阵, $\mathbf{x} = \mathbf{D} \mathbf{x}_{l,s}$ 中虽然非零元素的幅值发生了变化,但非零元素的位置没有发生改变,即其稀疏性未改变。因此,可将 CS 理论应用于变换后的信号检测中。

第二步,利用 OMP 算法进行信号重构。OMP 算法如表 2 所示。

表 2 OMP 算法流程

Tab. 2 Flow of OMP algorithm

输入:接收信号向量 \mathbf{y} , 归一化信道矩阵 $\bar{\mathbf{H}}$ 和激活天线数目 $n_t=1$;
 输出:估计 LD 序号和 PPM 脉冲位置;
 初始化:残差 $r_0 = \mathbf{y}$, 支撑集合 $\Lambda_0 = \emptyset$, 迭代次数 $t=1$;

- ① 计算内积: $i_t = \operatorname{argmax}_{1 \leq j \leq N_t} \langle \bar{\mathbf{h}}_j, r_{t-1} \rangle$;
- ② 重构: $\Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup i_t$

$$x_t = \operatorname{arg min}_x \| \mathbf{y} - \bar{\mathbf{H}}_{\Lambda_t} x \|_2$$
;
- ③ 更新: $r_t = \mathbf{y} - \bar{\mathbf{H}}_{\Lambda_t} x_t$;
- ④ 判别:若 $t = n_t$, 则停止; 否则, $t = t + 1$ 跳转至步骤 ②, 重复上述步骤。

当发射信号中只有一个元素非零, 即 $n_t = 1$ 时, 利用 OMP 算法进行信号重构时只需计算一次内积即可, 而不必再进行残差的更新与下一步的迭代运算。只需完成内积 $\boldsymbol{\varphi} = \langle \mathbf{y}, \bar{\mathbf{H}} \rangle = \bar{\mathbf{H}}^T \mathbf{y}$ 计算, 此时所得内积 $\boldsymbol{\varphi}$ 是一个 $N_t \times L$ 维的矩阵。

第三步, 激光器的索引号和脉冲位置号的识别。由于 OSM 方案中原始发送信息经比特映射后隐含在激活的激光器索引号和 PPM 脉冲位置中, 因此, 需要估计出激活的激光器索引号和所发送的脉冲位置。步骤二中得到的内积矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$ 的行号表示激光器的索引号, 列号表示脉冲位置。因此, 根据 OMP 算法原理, 找出 $\boldsymbol{\varphi}$ 中绝对值最大元素所对应的位置, 其对应的行号和列号即为估计出的激光器索引号和脉冲位置。

第四步, 将第三步得到的结果进行逆映射即可恢复出发送的原始信息。

4 性能分析

为了更好地描述所提出算法的性能, 仿真分析了其误码性能和计算复杂度, 结果如图 2~图 5 所示。仿真条件如下: 系统总功率不变, 接收端已知完整的信道状态信息, 闪烁因子 $\sigma_r^2 = 0.6$, 光电转换效率 $\eta = 0.8$, 激活激光器数 $n_t = 1$, 采用 4-PPM 调制方式。

4.1 误码性能

图 2 所示为探测器数量对算法误码性能的影响, 此时激光器数量 $N_t = 64$ 。由图 2 可以发现: OSM 系统的误码率随着信噪比的增加而逐渐减

小, 当信噪比大于某一门限值时, 系统的误码性能趋于一个固定值, 即出现“地板效应”, 而且其门限值随探测器数目的增加逐渐变小; 在激光器数目不变的条件下, 误码性能随探测器数目的增多得到改善。当 $\text{BER} = 10^{-2}$ 时, 相对于探测器数目为 6 的系统, 探测器数目为 8, 10, 12, 16, 20 的系统所需的信噪比分别减少了约 5, 8.5, 11, 14 和 16 dB。

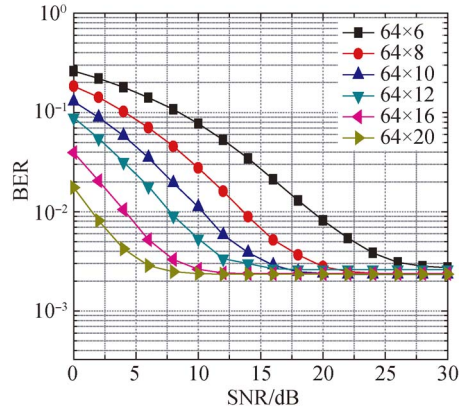


图 2 不同探测器数量下算法的误码性能

Fig. 2 Error performance of proposed algorithm with different detector numbers

图 3 所示为激光器和探测器数量取不同组合时算法的误码性能。可以发现: 当探测器数量一定时, 增加激光器数量会引起误码性能的增加。产生这一现象的原因是激光器数目的增加会使发射信号集合变大, 从而导致正确检测出发射符号的概率降低; 接收分集会带来 OSM 系统误码率的减小, 而且探测器数目相同时误码率曲线的斜率相同。这表明 OSM 系统仅获得了接收分集增益, 而未获得发射分集增益。

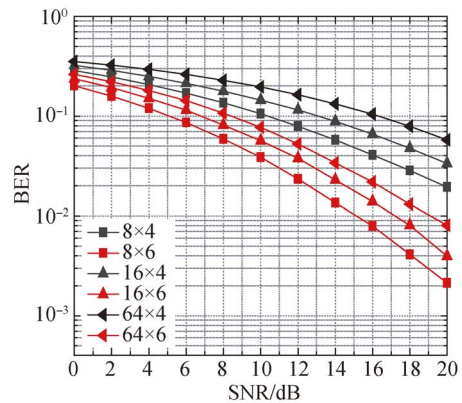


图 3 激光器数量与算法误码性能的关系

Fig. 3 Relationship between number of lasers and error performance of algorithms

图 4 所示为本文所提算法、ML、ZF 和 MMSE 检测算法的误码性能比较,其中,激光器数量取 64,探测器数量分别取 6 和 8。可以发现,所提算法性能仅次于 ML 算法。这是因为 ML 算法穷尽搜索了所有可能的发射信号组合,而所提算法虽然充分利用了发射信号的稀疏特性,以较高的概率正确恢复出了原始信息,但与 ML 算法相比,其性能仍有一定的损失。

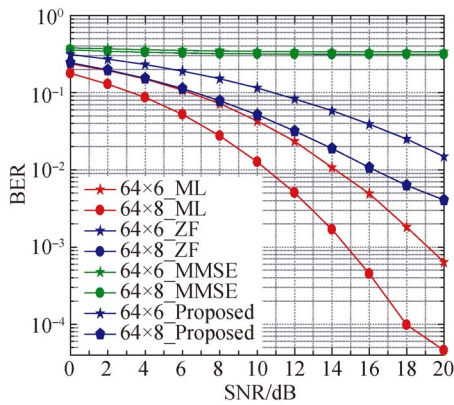


图 4 不同算法下的误码性能

Fig. 4 Error performance under different algorithms

4.2 复杂度

对检测算法而言,其复杂度是算法投入实际应用的关键性因素。在文献[15]的基础上,本文根据光信号的特点,分析比较了所提算法、ML 算法、ZF 算法以及 MMSE 算法在 OSM 系统中的复杂度,结果如表 3 所示。

表 3 各算法复杂度

Tab. 3 Complexities of different algorithms

算法	复杂度
ML 算法	$C_{ML} = N_t L \times (2N_t N_r L + 2N_t L - 1)$
ZF 算法	$C_{ZF} = \frac{3}{2} N_t N_r^2 - \frac{5}{4} N_t N_r - \frac{1}{4} N_r^2 + 2N_t^2 L - N_t L$
MMSE 算法	$C_{MMSE} = \frac{3}{2} N_t^2 + 2N_t^2 L + 2N_t^2 N_r - \frac{3}{2} N_t^2 - N_t L + N_t$
Proposed 算法	$C_{Proposed} = N_t (2N_t - 1)(L + 1)$

参考文献:

[1] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. . Spatial modulation [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4):2228-2241.

图 5 直观地比较了 $N_r = 10$ 时,各算法复杂度与激光器数量的关系,可以发现:ML 检测算法的复杂度最大,线性检测算法的复杂度次之,而本文所提算法的复杂度最低;当激光器数量较少时,几种算法的复杂度相差不明显,但随着激光器数目的不断增加,ML 算法的复杂度会急剧增大,而所提算法的计算复杂度变化不大;所提算法的复杂度受激光器数目的影响较小,随激光器数量的增加基本保持不变。当 $N_t = 64$ 时,ML 算法的复杂度为 1 330 944,而本文所提算法的复杂度仅为 6 080,降低了约 99.54%。因此,该算法在大规模天线系统中具有明显的优势。

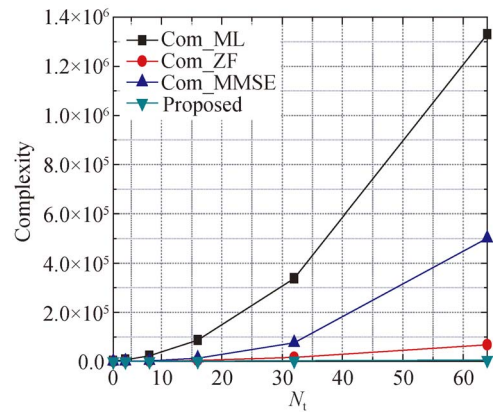


图 5 不同算法的复杂度比较

Fig. 5 Complexity comparison among different algorithms

5 结论

本文利用 OSM 信号的时域稀疏性和压缩感知理论,采用 OMP 算法提出的适用于湍流信道下 OSM 系统的信号检测算法,在以误码性能微降为代价的条件下大幅降低了计算复杂度。当激光器数目为 64 时,相比于 ML 算法,本文所提算法的复杂度降低了 99.54%。尤其在激光器数量较大时,该算法的优势更加明显。

[2] RENZO M D, HAAS H, GHAYEB A, et al. . Spatial modulation for generalized MIMO: challenges, opportunities, and implementation [C]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(1): 56-103.

[3] MESLEH R Y, ELGALA H, HAAS H. Optical

- spatial modulation [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2011, 3(3):234-244.
- [4] PHAM H T T, CHU D B, DANG N T. Performance analysis of spatial PPM-based free-space optical communication systems with Gaussian beam [C]. *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, IEEE, 2014:144-148.
- [5] HWANG S H, CHENG Y. SIM/SM-aided free-space optical communication with receiver diversity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(14):2443-2450.
- [6] ÖZBILGIN T, KOCA M. Optical spatial pulse position amplitude modulation over atmospheric turbulence channels [C]. *IEEE International Conference on Communications*, IEEE, 2014:3412-3417.
- [7] ÖZBILGIN T, KOCA M. Optical spatial modulation over atmospheric turbulence channels [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(11):2313-2323.
- [8] ODEYEMI K O, OWOLAWI P A, SRIVASTAVA V M. Performance analysis of free space optical system with spatial modulation and diversity combiners over the Gamma Gamma atmospheric turbulence [J]. *Optics Communications*, 2017, 382:205-211.
- [9] SUN Y, WANG J, HE L. Iterative zero forcing detection scheme for generalised spatial modulation [C]. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, IEEE, 2015:1-4.
- [10] MOHAMED A, MESLEH R. Performance analysis of space-shift keying over negative-exponential and log-normal FSO channels [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(5):26-30.
- [11] WILSON S, BRANDT-PEARCE M, CAO Q L, et al.. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(8):1402-1411.
- [12] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4):1289-1306.
- [13] TROPP J A, GILBERTA C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12):4655-4666.
- [14] THEIS F J, JUNG A, PUNTONET C G, et al.. Signal recovery from partial information via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 15(2):419-439.
- [15] 杨宗菲. 基于空间调制的新型 MIMO 传输技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- YANG Z F. *Research on New MIMO Transmission Technology Based on Spatial Modulation* [D]. Chengdu: Graduate University of Electronic Science and Technology, 2014. (in Chinese)

作者简介:



王惠琴(1971—),女,甘肃渭源人,教授,博士生导师,2011年于西安理工大学获得博士学位,主要从事无线光通信理论与技术方面的研究。E-mail: 15117024169@139.com



宋梨花(1993—),女,甘肃静宁人,硕士研究生,主要从事无线光通信 MIMO 技术方面的研究。E-mail:1214767475@qq.com

(本栏目编辑:曹 金)