

采用预编码的 GSM 网络最大互信息优化方法研究

魏霖静¹ 宁璐璐² 练智超³ 代永强^{1,4} 王联国¹

(甘肃农业大学信息科学技术学院 兰州 730070)¹ (南洋理工大学生物科学学院 新加坡 639798)²

(南京理工大学计算机科学与工程学院 南京 210094)³

(兰州大学信息科学与工程学院 兰州 730000)⁴

摘要 为了提高广义空间调制(GSM)互信息的性能,提出了一种新的基于椭球算法的预编码方案。首先,为了对含有互信息的预编码器进行优化,推导出了有限字符输入下的 GSM 互信息解析表达式。在最大化 GSM 互信息的过程中,为了解决联合预编码设计的非凸耦合问题,将 GSM 系统转换成虚拟的多输入多输出(MIMO)系统。然后,在考虑所有子信道功率约束的条件下,使用了扩展的椭球算法。实验结果表明,提出的预编码方案大大提升了 GSM 互信息的性能。

关键词 广义空间调制(GSM),有限字符输入,互信息,预编码,椭球算法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.05.013

Research on Maximum Mutual Information Optimization in GSM Networks with Precoding

WEI Lin-jing¹ NING Lu-lu² LIAN Zhi-chao³ DAI Yong-qiang^{1,4} WANG Lian-guo¹

(School of Information Science and Technology, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)¹

(School of Biological Sciences, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)²

(School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)³

(School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)⁴

Abstract In order to improve the the performance of generalized spatial modulation (GSM) mutual information, a new precoding scheme based on the ellipsoid algorithm was proposed. First, in order to optimize the preencoder with mutual information, the analytical expression of GSM mutual information under finite character input is derived. In the process of maximizing the mutual information of GSM, the GSM system is transformed into a virtual multi-input multi-output (MIMO) system in order to solve the non-convex coupling problem of joint precoding design. Then, under the condition of considering all the sub-channel power constraints, the extended ellipsoid algorithm is used. The experimental results show that the proposed precoding scheme greatly improves the performance of GSM mutual information.

Keywords Generalized spatial modulation (GSM), Finite character input, Mutual information, Precoding, Ellipsoid algorithm

1 引言

空间调制是近期研究出的一套无线传输方案,能够提高多输入多输出(MIMO)系统的频谱效率^[1-2]。在空间调制系统中,仅有一根发射天线被激活,在发射端进行数据传输。因此,无需信道间干扰(ICD)以及发射天线同步,也能够获得较高的数据速率和能量效率。作为空间调制系统的延伸,广义空间调制(GSM)系统能够激活一个以上的发射天线进行数据传输,从而能提高频谱效率^[3]。在上述系统中,激活的天线

组用于信息传输,每个激活的天线都会传输不同的已调符号。

近期,对空间调制系统和 GSM 系统的研究集中于解决通信系统中的传输预处理、解调制以及误差性能等各类问题^[4-6]。除此之外,文献[7-8]对容量分析以及预编码设计进行了研究。文献[7]推导出了瑞利衰落信道上空间调制多输入多输出(SM-MISO)系统的高斯输入信号信道容量。但是由于发射天线传输符号以及指标为离散的、有限的,因此无法在实际空间调制系统中获得高斯输入信号的信道容量^[9]。文献[8]推导了有限字符输入下的 SM-MISO 系统互信息,并研

到稿日期:2016-06-14 返修日期:2016-08-10 本文受国家自然科学基金项目(61063028, 31560378),江苏省自然科学基金青年基金(BK20150784),中国博士后面上资助(2015M581800),甘肃省科技支撑计划项目(1604WKCA011),陇原青年创新创业人才项目(2016-47),2016年度甘肃省高校重大软科学(战略)研究项目计划(2016F-10)资助。

魏霖静(1977-),女,博士后,副教授,主要研究方向为智能计算、生物信息学、图像分析, E-mail: wlj@gsau.edu.cn(通信作者);宁璐璐(1989-),女,博士后,主要研究方向为计算生物学、生物信息学、电子技术、图像数据分析;练智超(1983-),男,博士后,副教授,主要研究方向为图像处理、模式识别、电子技术、医学图像分析、智能算法;代永强(1981-),男,博士生,副教授,主要研究方向为智能计算、模式识别、电子通信;王联国(1968-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为智能计算、算法应用、电子通信。

究出了有限字符输入条件下最大化互信息下限的预编码方案。文献[10-11]对能够提高误差性能的空间移位键控(SSK)和空间调制预编码设计方法进行了研究,该方法高度依赖于每对接收信号之间的欧几里得距离。但是,由于结构差异显著,上述基于空间调制系统的预编码方案无法直接用于GSM多输入多输出(GSM-MIMO)系统^[12]。

本文主要研究有限字符输入下的GSM-MIMO系统。首先,推导出了瑞利衰落信道上的GSM互信息,这是空间调制系统和MIMO系统的通用表达式。由于对天线指标以及已调数据进行了多路复用,在GSM预编码器优化过程中会出现非凸耦合问题。为了解决上述问题,将GSM系统转换成虚拟的MIMO系统^[13],并且运用互信息的梯度方法^[14-15]。在考虑所有子信道功率约束的条件下,由于需要采用梯度法来寻找有限字符输入下的GSM预编码器,研发了一种扩展的椭圆算法,该算法是基于梯度辅助互信息最佳化(GAMIO)的迭代方法。

2 系统模型以及互信息

2.1 系统模型

图1是带有发射天线 N_T 以及接收天线 N_R 的GSM系统模型。信息源位分为两个部分:激活的天线信息位和已调信息位,如M阶正交幅度调制(M-QAM)。从每个时间槽 N_s ($N_s \leq N_T$)上选定天线对已调符号进行传输。如果从 N_T 发射天线激活 N_s 天线,则 $C_{N_s}^{N_T}$ 表示传输天线组合的总数量。可用天线组合的数量为 $N = 2 \lfloor \log_2 C_{N_s}^{N_T} \rfloor$,其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示小于或者等于 x 的最大整数。

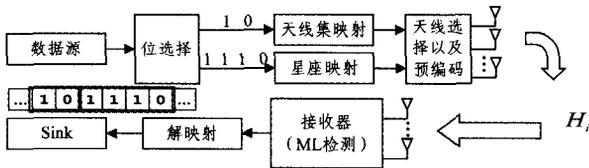


图1 GSM-MIMO系统模型

$H_i \in C^{N_R \times N_s}$ ($i=1, 2, \dots, N$)表示GSM的 i -th子信道矩阵;从所有合适的信道矩阵群 ζ 中选取 N 子信道矩阵。例如,如果 $N_T=4$ 并且 $N_s=2$,则 $N=4$ 并且 $\zeta = \{(h_1 h_2), (h_1 h_3), (h_1 h_4), (h_2 h_3), (h_2 h_4), (h_3 h_4)\}$,其中 h_j 表示 j -th发射天线与 N_R 接收天线之间的信道矢量。表示为 $y \in C^{N_R \times 1}$ 的接收信号向量如下所示:

$$y = H_i P_i x_m + n \quad (1)$$

其中, $n \in C^{N_R \times 1}$ 表示带有零均值和方差 σ^2 的加性高斯白噪声(AWGN); $P_i \in C^{N_s \times N_s}$ 表示 i -th子信道的预编码矩阵; $x_m \in C^{N_s \times 1}$ ($m=1, 2, \dots, M$)表示从离散调制星座推断出的输入符号。本文假设输入符号的功率约束为:

$$E[x_m x_m^H] = \frac{1}{N_s} I_{N_s} \quad (2)$$

其中, I_n 表示 $n \times n$ 单位矩阵, $E[\cdot]$ 表示统计期望。设已知发射器与接收器的信道状态信息(CSI),ML检测器检测了激活的天线信息以及已调符号。因此,ML检测可表示为:

$$\Delta(I_i, x_m) = \arg \min_{(i, m)} \|y - H_i P_i x_m\|^2 \quad (3)$$

其中, $I_i \in I$, $I = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$ 表示 H_i 用于数据传输时激活天线的指标集。

2.2 GSM互信息推导

根据文献[8, 10],GSM的离散输入与信道输出之间的互信息可表示为:

$$I(x, H; y) = I(H; y|x) + I(x; y) \quad (4)$$

其中, $I(H; y|x)$ 表示激活天线信息的互信息, $I(x; y)$ 表示 x 与 y 之间的互信息。由于接收信号为高斯分布,条件概率密度函数(PDF)即 $p(y|H_i, x_m)$, $p(y|x_m)$ 以及边缘条件概率密度函数 $p(y)$ 分别表示如下:

$$p(y|H_i, x_m) = \frac{1}{(\pi\sigma^2)^{N_R}} \exp\left(-\frac{\|y - H_i P_i x_m\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$p(y|x_m) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{1}{(\pi\sigma^2)^{N_R}} \exp\left(-\frac{\|y - H_i P_i x_m\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$p(y) = \frac{1}{NM^{N_s}} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{M^{N_s}} \frac{1}{(\pi\sigma^2)^{N_R}} \exp\left(-\frac{\|y - H_i P_i x_m\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

运用式(5)一式(7)可获得有限字符输入下的GSM互信息:

$$I(x, H; y) = N_s \log_2 M + \log_2 N - \frac{1}{NM^{N_s}} E[\log_2(Q)] \quad (8)$$

$$Q = \sum_{i_2=1}^N \sum_{m_2=1}^{M^{N_s}} \exp\left(-\frac{\|d_{i_2, m_2}^2 + n\|^2 - \|n\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$

$$d_{i_2, m_2}^2 = H_{i_2} P_{i_2} x_{m_2} - H_{i_1} P_{i_1} x_{m_2} \quad (10)$$

本文推导出的有限字符输入下的GSM互信息是广义版本的空间调制系统和MIMO系统。例如,如果只有一根发射天线被激活用于数据传输($N_s=1$),式(8)就等同于空间调制系统^[10]的互信息。此外,如果选取所有发射天线进行数据传输($N_s=N_T$),就能够获得MIMO系统的互信息。

3 本文提出的GSM设计

在GSM-MIMO系统中,需要对预编码矩阵 P_i 进行合理设计,以便能使互信息最大化。GSM系统的最优化问题可用公式表示为 $\max_{P_i} I(x, H; y)$,其约束条件为 $\text{Tr}(P_i P_i^H) \leq N_s$,其中 $\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。但是,由于 d_{i_2, m_2}^2 、最优化问题 $\max_{P_i} I(x, H; y)$ 属于非凸耦合问题,是由从不同子信道组传输的信号组成,因此找到最优的解决方案并非易事。为了设计出GSM系统的预编码矩阵,提出一种带有约束的扩展椭圆算法。

3.1 等效虚拟MIMO系统

首先,为了在考虑所有子信道功率约束的条件下找到通用预编码器,重新用公式将GSM-MIMO系统表示为虚拟MIMO系统。在GSM-MIMO系统中,每个时间槽内实际数据传输的信道矩阵随着激活天线组的变化而变化。因此,采用了虚拟公用信道 $H_v \in C^{N_s \times N_R}$,其能够将GSM子信道变为虚拟通用MIMO信道。如果未进行预编码并且 $N_s \geq N_R$,则式(1)可表示为:

$$y = H_v H_v' H_i x_m + n = H_v \tilde{H}_i x_m + n \quad (11)$$

其中, $\tilde{H}_i = H_v' H_i$ 表示虚拟传递矩阵, $(\cdot)'$ 表示广义逆。其能够将GSM系统的输入信号变为同等虚拟MIMO系统的输入信号。

包含GSM中 N 子信道的同等虚拟MIMO系统可表示为:

$$y = H_v P_v \tilde{x} + n \quad (12)$$

其中, $\tilde{x} \in \{\tilde{H}_1 x_m, \tilde{H}_2 x_m, \dots, \tilde{H}_N x_m\}$ 表示虚拟MIMO系统的输入符号, P_v 表示虚拟MIMO系统的通用预编码矩阵。

利用有限字符输入下的虚拟 MIMO 系统互信息梯度能够解决最优化问题^[14]。

3.2 预编码器设计

为了找到虚拟 MIMO 系统的线性预编码矩阵 P_v , 提出了一种迭代算法。在满足 GSM 子信道功率约束的条件下, 虚拟 MIMO 系统的最优化问题可表示为 $\max_{P_v} I(x; y)$, 其约束条件为 $\text{Tr}(P_i P_i^H) \leq N_s$, 其中, $P_i = H_i' H_v P_v H_v' H_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 表示 GSM 子信道的预编码矩阵。文献[15]提出的梯度法没有考虑 GSM 系统中所有子信道的功率约束。

因此, 提出一种扩展的椭球算法, 其能够解决复值最优化问题。本文提出的算法迭代包括两个部分: 约束迭代和目标迭代。如果未满足约束条件, 首先进行约束迭代。如果满足了所有约束条件, 则进行目标迭代。利用互信息梯度以及由实值变量组成的约束条件, 获得可行的更新方向。

由于为了解决实值凸极小化问题而对原始椭球算法进行了定义, 因此能够将最优化问题改为实值形式。首先, 利用式(13)将虚拟 MIMO 系统的互信息梯度转换成带有实值变量的矢量形式。

$$\text{vec}(ABC) = (C^T \otimes A) \text{vec}(B) \quad (13)$$

其中, $\text{vec}(\cdot)$ 表示矩阵矢量化, \otimes 表示克罗内克积, 能够用矢量形式表示互信息梯度 $\nabla_{P_v} I(x; y)$, 如下所示:

$$\begin{aligned} \text{vec}(\nabla_{P_v} I(x; y)) &= \text{vec}(H_v^H H_v P_v E') \\ &= (E'^T \otimes H_v^H H_v) \text{vec}(P_v) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, E' 表示最小均方差(MMSE)矩阵, 可表示为:

$$\begin{aligned} E' &= E[(\tilde{x} - E[\tilde{x}|y])(\tilde{x} - E[\tilde{x}|y])^H] \\ &= E[\tilde{x}\tilde{x}^H] - E[E[\tilde{x}|y]E[\tilde{x}|y]^H] \end{aligned} \quad (15)$$

目标函数的矢量化梯度是实数域中式(14)的表达式, 可表示为:

$$d_o = \begin{bmatrix} \text{Re}\{(E'^T \otimes H_v^H H_v)\} & -\text{Im}\{(E'^T \otimes H_v^H H_v)\} \\ \text{Im}\{(E'^T \otimes H_v^H H_v)\} & \text{Re}\{(E'^T \otimes H_v^H H_v)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}\{\text{vec}(P_v)\} \\ \text{Im}\{\text{vec}(P_v)\} \end{bmatrix} \quad (16)$$

我们能够利用复值导数法^[14] 获得约束的梯度, 如下式:

$$\frac{\partial \text{Tr}(ZYZ^H W)}{\partial Z} = WZY \quad (17)$$

约束的矢量化梯度可表示为:

$$\text{vec}(\nabla_{P_v} \text{Tr}(P_i P_i^H)) = \text{vec}\left(\frac{\partial \text{Tr}(P_i P_i^H)}{\partial P_v}\right) = \text{vec}(W P_v Y) \quad (18)$$

其中, $W = H_i^H (H_i')^H H_i' H_v$, $Y = H_v' H_i H_i^H (H_v')^H$ 。 i -th 约束函数的矢量化梯度是式(18)的实值形式, 可表示如下:

$$d_{c,i} = \text{Re}\{(Y^T \otimes W) \text{vec} P_v\} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{(Y^T \otimes W)\} & -\text{Im}\{(Y^T \otimes W)\} \\ \text{Im}\{(Y^T \otimes W)\} & \text{Re}\{(Y^T \otimes W)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}\{\text{vec}(P_v)\} \\ \text{Im}\{\text{vec}(P_v)\} \end{bmatrix} \quad (19)$$

在带有约束条件的扩展椭球算法中, 首先选取了合适的初始椭球集 S 以及椭球中心 P_v ; 其次, 利用目标函数以及约束条件的梯度确定实值方向; 再次, 通过利用梯度选取的方向来删除半个椭球, 如果候选集足够小, 则停止迭代; 最后, 将解开的向量即椭球中心转换成原始矩阵形式。扩展的椭球算法经过修改能够用于 GSM 系统, 其步骤如下所示:

1) 初始化椭球尺寸 S 以及椭球中心 P_v , $S = \alpha I_{n_d}$, 其中 α 表示常量, $P_v = \text{vec}(\beta I_{N_s})$, β 表示常量。

2) 如果 $\text{Tr}(P_i P_i^H) \geq N_s$, 则 $d = d_{c,i}$, 否则 $d = -d_o$ 。然后更新如下 3 个参数, 直到 $t \leq \epsilon$, 其中 ϵ 表示要求的精确度。

$$t = \{\text{Tr}(d^H S d)\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$P_v = P_v - \frac{S d}{(n_d + 1)t} \quad (21)$$

$$S = \frac{S n_d^2}{n_d^2 - 1} \left(1 - \frac{d}{(n_d + 1)t}\right) \quad (22)$$

3) 进行矩阵转换 $P_v = \text{mat}(P_v)$, 其中 $\text{mat}(\cdot)$ 表示 $\text{vec}(\cdot)$ 的逆运算。

3.3 算法复杂度分析

在浮点运算方面, 本文所提算法的计算复杂度如下所示:

$$O(N_s^3 + N_s^3 N) \times O(N_s^3 \log(\frac{1}{\epsilon})) \quad (23)$$

也就是说, 激活的天线 (N_s) 数量是复杂度的主导因素。由于在实际 GSM 系统中 N_s 通常较小, 因此本文提出的算法具有较好的实际应用价值。

在实际系统中, 由于无线信道不断变化, 无法获得发射端完整的 CSI, 因此需使用预定的密码本进行数据传输, 该密码本是代码字的有限集。发射器需利用从接收器反馈获得的代码字索引选取相应的预编码矩阵, 即利用带有密码本的有限反馈(LFB)来检测 GSM 系统中预编码矩阵的量化误差性能。

4 实验结果

本节通过计算机仿真对有限字符输入下的 GSM-MIMO 系统互信息性能进行了评估。图 2 示出了当 $N_T = 4, N_R = 4$ 并且使用了 QPSK ($M = 4$) 输入时关于激活天线 (N_s) 数量的 GSM 系统互信息。如果 N_s 增加, 则互信息性能就会提升, $N_s = 4$ (即在 MIMO 系统中) 时除外。由于 $N_s = N_T$ 时的组合数量 (N) 等于 1, 因此我们无法获得 GSM 系统上的额外增益 $\log_2 N$ 。

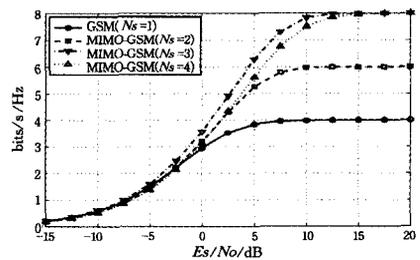


图 2 当 $N_T = 4, N_R = 4$ 时不同 N_s 条件下的互信息 (QPSK)

如图 3 所示, 我们对本文提出的 ($N_T = 3, N_R = 2, N_s = 2$) GSM-MIMO 系统互信息预编码方案进行了评估。此外, 本文将相位旋转^[14] 方案、文献[11]中预编码辅助 MIMO 方案与提出的预编码方案进行了比较。在这种情况下, 需从所有组合 ($N = 2$) 中选取两个任意集, 并对两种调制 (BPSK 和 QPSK) 进行比较。本文同样也对实际有效反馈系统的性能进行了模拟, 反馈信息为 12bit。由于 GSM 系统的开销反馈位为 $L_{\text{GSM}} = L_{\text{MIMO}} \times N$ (其中, L_{MIMO} 表示 MIMO 反馈位), 如果密码本长度相等, 则 GSM 系统的性能损失大于 MIMO 系统的性能损失。相较于未经预编码方案以及传统空间调制相位旋转预编码方案^[14], 本文提出的预编码方案能够大大提升互信息的性能。

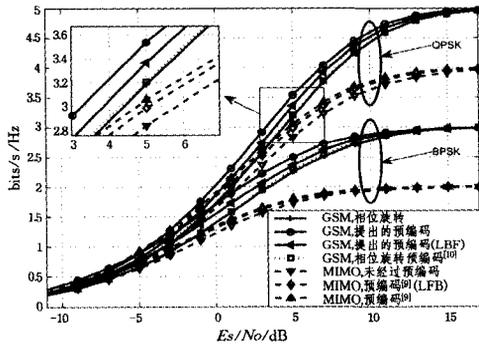


图3 当 $N_T=3, N_R=2, N_S=2$ 时的互信息比较

如图4所示,当 $N_T=5$ 并且 $N_R=2$ 时,在 $SNR=5dB$ 的条件下对 BPSK 调制的 GSM-MIMO 系统性能与复杂度进行了分析。对于所有信道的每个代码字而言,LFB 的长度均为 8bit。由于本文所提方案的计算复杂度与 N_S 高度相关,因此对带有不同 N_S 的未经过预编码方案的性能增益进行了评估。结果显示,如果 N_S 增加,互信息的性能增益也会大幅提升。

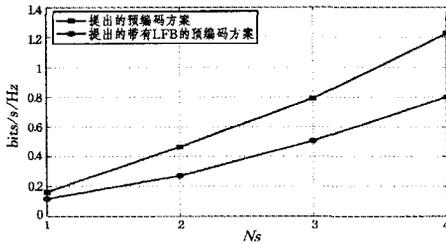


图4 当 $N_T=5, N_R=2$ 时,不同 N_S 下的性能增益(BPSK)

结束语 本文提出了一种新的基于椭圆算法的预编码方案;推导出了有限字符输入下的 GSM 互信息解析表达式;将 GSM 系统转换成虚拟的多输入多输出(MIMO)系统;在考虑所有子信道功率约束的条件下使用了扩展的椭圆算法。实验结果表明,提出的预编码方案大大提升了 GSM 互信息的性能。提出的预编码算法由于考虑到了所有子信道的功率约束,因此能够大幅提升互信息的性能。

参考文献

- [1] LIU J L, CHEN Z G, WANG L. An Adaptive Modulation Algorithm with Low Complexity for Generalized Spatial Modulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 48-53. (in Chinese)
刘健伶, 陈志刚, 王磊. 一种自适应广义空间调制及其低复杂度算法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 48-53.
- [2] LIU W L, WANG N, JIN M L. Sparse Detection Algorithm for Generalized Spatial Modulation Systems [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(9): 1233-1237. (in Chinese)
刘文龙, 王楠, 金明录. 广义空间调制系统的稀疏检测算法[J]. 信号处理, 2013, 29(9): 1233-1237.
- [3] SHA J, DU Y Y. Performance Analysis of GSM Based on Labeled Stochastic Petri Net [J]. Computer Science, 2012, 39(7): 29-31. (in Chinese)
沙静, 杜玉越. 基于标号随机 Petri 网的 GSM 性能分析[J]. 计算机科学, 2012, 39(7): 29-31.
- [4] LU K S, YAO J G. Generalized Spatial Modulation Scheme to Multi-user Downlink [J]. Video Engineering, 2015, 39(20): 22-25. (in Chinese)
- [5] ZHU Y J, FU H S, CAI W B. Low complexity adaptive generalized spatial modulation for visible light communication [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(6): 2080-2084. (in Chinese)
朱义君, 付红双, 蔡文炳. 可见光通信中低复杂度自适应广义空间调制算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(6): 2080-2084.
- [6] TIAN X J, YUAN C W, HU Z W, et al. Phase Rotation Precoding for Orthogonalized Spatial Multiplexing System [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(6): 68-71. (in Chinese)
田心记, 袁超伟, 胡紫巍, 等. 正交空间复用系统的相位旋转预编码[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(6): 68-71.
- [7] YANG Y, JIAO B. Information-guided channel-hopping for high data rate wireless communication [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(4): 225-227.
- [8] GUAN X, CAI Y, YANG W. On the Mutual Information and Precoding for Spatial Modulation with Finite Alphabet [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2013, 2(4): 383-386.
- [9] YANG H, HE Y Z. Correlated Channel Capacity of Virtual MIMO Based on Distributed Satellites [J]. Computer Science, 2015, 42(6): 276-278. (in Chinese)
杨欢, 何元智. 分布式星群下模拟 MIMO 相关信道容量分析 [J]. 计算机科学, 2015, 42(6): 276-278.
- [10] MALEKI M, BAHRAMI H R, BEYGI S, et al. Space Modulation With CSI: Constellation Design and Performance Evaluation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(62): 1623-1634.
- [11] ZENG W, XIAO C, LU J. A Low-Complexity Design of Linear Precoding for MIMO Channels with Finite-Alphabet Inputs [J]. Wireless Communications Letters IEEE, 2012, 1(1): 38-41.
- [12] CHEN P L, LIU P. MIMO Broadcast Transmission Scheme Based on BD Precoding and TDM [J]. Computer Science, 2014, 41(11): 168-170. (in Chinese)
陈培磊, 刘萍. 基于 BD 预编码和时分复用的 MIMO 广播传输方案 [J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 168-170.
- [13] HAN X Q. Research on MIMO Receiver in the Downlink of LTE [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
韩小琴. LTE 下行 MIMO 技术的接受算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [14] MASOUIROS C. Improving the Diversity of Spatial Modulation in MISO Channels by Phase Alignment [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(5): 729-732.
- [15] FÜGEDI, PÉTER. MIMO Gaussian Channels With Arbitrary Inputs: Optimal Precoding and Power Allocation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(3): 1070-1084.
- [16] LI L, LU X X, YIN Z Q, et al. Low-Complexity Adaptive Modulation Algorithm for MIMO-OFDM Systems Based on Singular Value Decomposition [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(8): 129-136. (in Chinese)
李莉, 卢晓轩, 殷志强, 等. 基于奇异值分解的低复杂度 MIMO-OFDM 系统自适应调制算法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(8): 129-136.