

12-12-2019

Low-Complexity Signal Detection Algorithm based on PGQSM

Fatang Chen

Chongqing Key Lab of Mobile Communications, CQUPT, Chongqing 400065, China;

Yang Kang

Chongqing Key Lab of Mobile Communications, CQUPT, Chongqing 400065, China;

Yongli Fu

Chongqing Key Lab of Mobile Communications, CQUPT, Chongqing 400065, China;

Mengjie Li

Chongqing Key Lab of Mobile Communications, CQUPT, Chongqing 400065, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Low-Complexity Signal Detection Algorithm based on PGQSM

Abstract

Abstract: Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation (PGQSM) uses the known channel state information to *perform pre-coding processing on the in-phase and quadrature signals* of the quadrature spatial modulation (QSM), so as to reduce the complexity of the receiver for signal detection. At the same time, *an improved Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation low complexity detection algorithm is proposed to solve the problem of the proposed algorithm's high complexity at the receiver. The results of analysis and simulation show that the proposed algorithm can achieve almost the same BER performance as the maximum likelihood (ML) algorithm with more than 90% complexity reduction.*

Keywords

Precoding, generalized quadrature spatial modulation, bit error performance, maximum likelihood

Recommended Citation

Chen Fatang, Yang Kang, Fu Yongli, Li Mengjie. Low-Complexity Signal Detection Algorithm based on PGQSM[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(10): 2078-2084.

预编码辅助广义正交空间调制的低复杂度检测

陈发堂, 杨康, 付永莉, 李孟杰

(重庆市移动通信技术重点实验室, 重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要: 预编码辅助广义正交空间调制(PGQSM), 利用已知的信道状态信息, 对正交空间调制(QSM)的同相和正交两路信号分别做预编码处理, 以降低接收机进行信号检测的复杂度。同时, 针对预编码辅助广义正交空间调制系统的正交性在接收端造成的计算复杂度过高的问题, 提出了一种改进的预编码辅助广义正交空间调制低复杂度检测算法。分析和仿真结果表明, 该改进的算法可以得到与最大似然检测算法(maximum likelihood, ML)近乎相同的误比特率(BER)性能, 同时可以使计算复杂度降低 90%以上。

关键词: 预编码; 广义正交空间调制; 误比特性能; 最大似然

中图分类号: TN820 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 10-2078-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0380

Low-Complexity Signal Detection Algorithm based on PGQSM

Chen Fatang, Yang Kang, Fu Yongli, Li Mengjie

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications, CQUPT, Chongqing 400065, China)

Abstract: Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation (PGQSM) uses the known channel state information to perform pre-coding processing on the in-phase and quadrature signals of the quadrature spatial modulation (QSM), so as to reduce the complexity of the receiver for signal detection. At the same time, an improved Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation low complexity detection algorithm is proposed to solve the problem of the proposed algorithm's high complexity at the receiver. The results of analysis and simulation show that the proposed algorithm can achieve almost the same BER performance as the maximum likelihood (ML) algorithm with more than 90% complexity reduction.

Keywords: Precoding; generalized quadrature spatial modulation; bit error performance; maximum likelihood

引言

大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术是目前关于 5G 的各项关键技术中, 研究和讨论最为集中的方向之一^[1]。针对 MIMO 系统, 正交空间调制(Quadrature Spatial Modulation, QSM)^[2]已经提出了数字解调方案, 而且提供了高效的能源效率实施。传统的空间调制是通过在每个时隙内激活单根发送天线来传输数据, 且每根发送天线的索引只携带一个空间星座点符号^[3]。在这种情况下, SM 系统能够有效地消除通道间干扰, 降低天线间的同步要求, 大幅度减小接



收稿日期: 2017-08-08 修回日期: 2017-09-22;
基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX03001021-004), 重庆教委科学技术研究项目(KJ1500428), 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2016jcyjA0.09);
作者简介: 陈发堂(1965-), 男, 重庆, 硕士, 研究员, 硕导, 研究方向移动通信和 TD-LTE 系统开发。

<http://www.china-simulation.com>

• 2078 •

收机的复杂度。基于 SM 系统架构, 随着广义空间调制(Generalized Spatial Modulation, GSM)^[4]和广义空移键控(Generalized Space Shift Keying, GSSK)^[5]这两项技术的提出, 大幅度降低 SM 的复杂度成为了可能。它们通过发射天线索引或发射的天线索引的组合来传输信息。大幅度提高了 SM 的频谱效率, 进一步降低了 SM 的复杂度^[6]; 广义空移键空时移键控(Space Time Shift Keying, STSK)^[7]和空时频移键控(Space Time Frequency Shift Keying, STFSK)^[8]分别将 SM 扩展到了时域和时频域, 进一步提高频谱效率。文献[9]提出通过对 SM 进行空时编码(Space-Time Coding, STC)可以快速获得传输分集。

一种新的传输方案, 正交空间调制(QSM)将传统的空间星座符号在空间调制方案中进一步扩展到同相(实部)和正交(虚部)域, 将传输符号的同相和正交端分离, 然后再分别选择对应的激活天线发送, 然后传送到接收机。由于空间域的扩展, QSM 系统较之 SM 系统增加了系统的频谱效率, 通过选取激活接收天线索引来传递附加的信息比特^[10]。这样就可以使得 QSM 系统获得更优的误比特(Bit Error Rate, BER)性能。预编码辅助空间调制(Pre-coding aided Spatial Modulation, PSM)^[11]系统通过激活接收天线索引来在空间域中传输信息比特。文献[12]分析了不完全通道的 QSM 性能状态信(CSI), CSI 发射机(CSIT)采用预编码方案, 使信息比特由 PSM 中的接收天线索引传送。PSM 在接收端具有更低的系统开销和更低的计算复杂^[13]。为了提高系统的频谱效率, 文献[7]将 PSM 和 QSM 和系统进行广义化, 提出了一种新的空间调制技术: 预编码辅助广义正交空间调制(Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation, PGQSM)。PGQSM 系统结合了广义预编码辅助空间调制(Generalized Pre-coding aided Spatial Modulation, GPSM)^[7]和 QSM 两大调制系统最大的优势。PGQSM 将被传输符号扩展到同相和正交域。因为域扩展, 系统的频谱效率较之 GPSM 得到很大程

度提高。

关于 SM 和 QSM 这两大调制系统, 涉及到的检测算法有迫零(zero forcing, ZF)^[14]检测算法、最小均方误差(minimum mean square equalization, MMSE)^[15]检测算法等。这些算法的复杂度虽然比较低, 但是由于它们的性能损失很严重, 所以只能运用到特定的系统中。本文综合考虑算法对 PGQSM 系统的利用率、适应性和算法本身的复杂度, 权衡利弊最终决定借鉴正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法^[16]的思想, 对传统的 OMP 进行了算法的改进: 通过每次算法的相关迭代选出激活天线备选集, 其中包括相关性最高和相关性最差的激活天线索引; 然后消除掉选中天线带来的影响, 更新天线索引残余量, 进行下一次迭代。最后经过有限次的迭代计算后, 遍历相关性最高的索引集, 然后检测出需要的信号。通过分析和仿真结果显示, 该算法实现了 BER 性能最佳且近似于最大似然(ML)检测算法的系统性能。同时大大降低了计算复杂度。

本文内容安排如下: 第 1 部分详细介绍了预编码辅助广义正交空间调制(Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation, PGQSM)的系统模型, 并具体分析了发送端预编码和接收端信号检测的相关过程; 第 2 部分针对 PGQSM 系统现有算法复杂度不高的情况, 提出了改进的相关检测算法; 第 3 部分进行了该系统在不同发送天线数目、不同算法下的复杂度分析; 第 4 部分对本文改进的算法进行仿真分析, 并与现有的算法进行对比, 通过改变仿真参数, 从不同角度分析本文算法的优点; 最后一个部分是对本文的总结和对未来的展望。

1 系统模型

假设一个 $N_r * N_t$ 的 MIMO 系统, 采用 K 阶的正交幅度调制方案, 其中 S 是调制星座的符号。令其发送天线数为 N_t , 接收天线数为 N_r 。假设 $N_t \geq N_r$, 在完备的 CSIT 下能够保证预编码设计的可行

性。在 PGQSM 系统中， N_a ($1 \leq N_a \leq N_r$) 根接收天线被激活。导致了激活的发送符号(实部和虚部)天线组合可能会有 $C_{N_r}^{N_a}$ 种。这些激活天线组合中只有 $2^{\lfloor \log_2(C_{N_r}^{N_a}) \rfloor}$ 种组合是被允许的，其他的组合都被认为是无效的。其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示取小于或者等于 x 的最大整数。在每个时隙内，输入的二进制比特流位数为： $m = 2m_{ssk} + N_a * m_{mod}$ ， $m_{ssk} = \lfloor \log_2(C_{N_r}^{N_a}) \rfloor$ 为空间符号传递的信息比特数， $m_{mod} = \log_2 K$ 为星座映射传递的信息比特数。

$$s(\eta) = s^I(\eta) + js^O(\eta) \quad (1)$$

式中： j 为虚数单位 $s^I(\eta)$ 和 $s^O(\eta)$ 分别代表 $s(\eta)$ 的同相和正交部分。 $s(\eta) \in S$ ，其中 S^I 和 S^O 分别是 S 的同相和正交部分。且 $s^I(\eta) \in S^I(\eta)$ ， $s^O(\eta) \in S^O(\eta)$ 。 $N_a \log_2 K$ 位映射到 N_a 个发送符号 $s = \{s(\eta)\}$ ，($1 \leq \eta \leq N_a$)。其中 $\lfloor \log_2(C_{N_r}^{N_a}) \rfloor$ 位用来选择发送 $\{s^I(\eta)\}$ ($1 \leq \eta \leq N_a$) 这些符号的天线组合，而 $\lfloor \log_2(C_{N_r}^{N_a}) \rfloor$ 位用来选择发送 $\{s^O(\eta)\}$ ($1 \leq \eta \leq N_a$) 这些符号的天线组合。则预编码前的向量符号的同相和正交部分可以表示为：

$$\begin{aligned} x^I &= \{x^I(\eta)\} = \{s^I(\eta)\} \quad (1 \leq \eta \leq N_a) \\ x^O &= \{x^O(\eta)\} = \{s^O(\eta)\} \quad (1 \leq \eta \leq N_a) \end{aligned} \quad (2)$$

1.1 发送端

PGQSM 系统将传输符号的同相和正交分开，PGQSM 系统通过发送端预编码的方式，在 N_r 个接收天线中按相应的方法分别选择对应的激活天线发送。系统模型如图 1 所示。

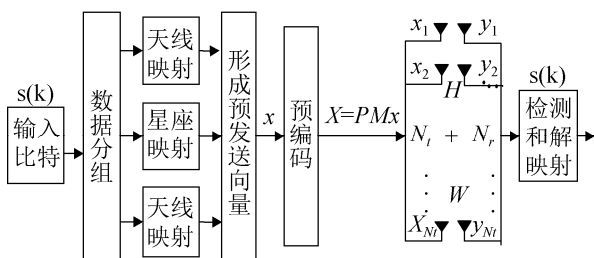


图 1 PGQSM 系统
Fig. 1 PGQSM System

式中： $P \in \mathbb{C}^{N_r * N_r}$ 是预编码矩阵， M 是 $N_r * N_r$ 的单位对角矩阵，其中第 η 个对角元素

$d(\eta) = \sqrt{1/\|P_{\eta}\|_2^2}$ ， P_{η} 是指信道预编码矩阵 P 的第 η 列。

在 PGQSM 系统中，假设信道为半静态频率平坦衰落信道，经过调制和预编码后的数据向量通过 $N_r * N_r$ 维的由信道增益系数组成的无线信道 H 传输出去。 w 是服从 $w \sim (0, \sigma^2)$ 的加性复高斯白噪声。将同相和正交两个部分进行预编码后生成发送信号 X ：

$$X = PMx = PM(x^I + jx^O) \quad (3)$$

为了避免在预处理过程中产生的功率放大，对预编码矩阵的约束条件为 $Tr\{PP^H\} = N_r$ ($Tr(A)$ 表示矩阵 A 的迹)

1.2 接收端

PSM 系统接收端检测的信号 y 的表达式为：

$$y = HPx + w \quad (4)$$

式中： H 为信道冲激响应矩阵。假设为完全信道状态信息，且文献[17]中提出的迫零(Zero Forcing, ZF)预编码方案和最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)线性预编码方案可以很好地应用到该系统中。本文中为了简化分析，采用 ZF 预编码方式。ZF 预编码矩阵由信道响应矩阵 H 组成，具体表达式如下：

$$P = \beta H^H (HH^H)^{-1} \quad (5)$$

式中： $(A)^H$ 表示 A 矩阵共轭的转置。 $(A)^{-1}$ 表示 A 矩阵的逆矩阵。 $\beta = \text{sqr}t(N_r / \text{Tr}\{HH^H\})$ 为归一化因子，在满足功率限制的情况下， β 可以简化为 $\text{sqr}t(N_r)$ 。其中 $\text{sqr}t(A)$ 表示 A 的平方根。

采用 ZF 预编码的方式，接收信号可以进一步表示为：

$$y = \beta Mx + w = \beta Mx^I + j\beta Mx^O + w \quad (6)$$

PGQSM 系统接收端采用传统的 ML 最优检测算法，其检测公式如下：

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \arg \min_x \|y / \beta - Mx\|^2 = \\ & \arg \min_{x^I, x^O} \|y / \beta - (Mx^I + jMx^O)\|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中： \hat{x} 表示 x 的估计值，在估计时候，为了便于计算可以将 y / β 量化为 y ，对结果没有多大影响，

又因为式(7)中同相和正交端的相互独立性, 所以该式又可以写为:

$$\hat{x} = \arg \min_x \|y^I - Mx^I\|^2 + j \arg \min_x \|y^Q - Mx^Q\|^2 \quad (8)$$

从式(8)可知, ML 最优检测算法需要进行多达 $N_t^2 K$ 次穷举, 最优的 ML 检测导致了对所有可能的发送符号进行详尽的搜索, 会导致很高的复杂度。其中 y^I 和 y^Q 分别为信号 y 的同相和正交部分。

2 提出的检测算法

PGQSM 系统在激活天线时, 由于其激活天线的个数不确定性, PGQSM 系统将传输符号的同相和正交域分开。将经过调制和预编码后的符号在 $2N_t$ 根天线上发送, 发送符号的同相部分在前 N_t 根天线上发送, 发送符号的正交部分在后 N_t 根天线上发送。这样就可以避免该符号的实部和虚部发送在同一根天线上。通过每一次的迭代筛选出激活天线的相关备选集, 包括相关性最高和相关性最差的激活天线索引。然后消除掉选中天线所带来的影响, 接着开始更新残余量, 再进行下一次的迭代。经过有限次的迭代运算后, 遍历出相关性最高的天线索引集, 最后采用最优 ML 检测算法对需要的信号进行最终的估计。

本文提出一种天线索引集的优化选择方案, 具体实现步骤如下:

1) MMSE 算法可以实现理想的信道估计, 并且该算法的均方误差和信噪比成反比, 估计出来的系统性能也是非常理想的。所以采用 MMSE 算法对发送信号进行初步的理想预估计:

$$s = ((\hat{H})^H \hat{H} + \sigma^2 I)^{-1} (\hat{H})^H \hat{y} \quad (9)$$

式中: I 是 $N_r * N_t$ 的单位矩阵。

2) 对获取到的信号向量进行排序, 选出最有可能被激活的也就是相关性最高的天线索引集合:

$$L = [l_1, l_2, l_3, \dots, l_{2N_t}] = \arg \text{sort}(s) \quad (10)$$

式中: $\text{sort}(\cdot)$ 为升序函数; l_1 为最有可能被激活的天线索引; l_{2N_t} 为最不可能被激活的天线索引。如果 $l_1 > N_t$, 则将 l_1 放在虚部索引集合中, 否则的话

将其在实部索引集合中。

3) 天线索引集合选定之后要消除所选信号对接收信号的影响, 获得 y 的残余量 r :

$$r = y - \hat{H}_{(l_1, l_{2N_t})} * x \quad (11)$$

4) 接着对残余量进行第二次估计:

$$s_1 = ((\hat{H})^H \hat{H} + \sigma^2 I)^{-1} (\hat{H})^H r \quad (12)$$

然后对该估计得到的信号重复式(9)的操作, 选出次优的激活天线索引, 重复式(9)以后的步骤。这样重复执行完上述操作, 经过 N 次迭代运算后, 一共会选出 $2N$ 个元素组成的天线索引集, 多次迭代运算后找到的天线索引集合就遍历出的相关性最高的天线索引集。但要注意实部集合和虚部集合不能为空集, 如果实部集合和虚部集合有一者为空集, 则要一直进行迭代操作。

3 复杂度分析

在相同的频谱效率下, 将本文提出的算法与传统的 ML 算法、OMP 算法进行了比对。通常评估块衰落信道的计算复杂度一般从传输块预处理的复杂性和对传输块中的每个符号的检测这两个方面进行入手, 这里的复杂性是根据数字进行评估的实数操作, 包括乘法, 加法等运算的比较。PGQSM 系统采用 ML 算法检测, 从式(8)我们看到, 针对同相和正交域的检测方法其实是相同的。所以计算复杂度时, 只需要计算出一端的就可以了。为了衡量算法的计算复杂度, 本文用每秒的运算次数来表征计算复杂度。从文献[9]中易知 ML 算法的计算复杂度为:

$$C_{ML} = (8N_r N_a + 4N_r - 1) K N_t^2 \quad (13)$$

由文献[11]可知 OMP 算法的复杂度为:

$$C_{OMP} = N_a (8N_r N_t + 2N_t) + \sum_{t=1}^{N_a-1} (12N_r - 1) K^t + 8N_r t \quad (14)$$

式(9)的复杂度为: $2(4N_a^3 + 12N_a^2 \cdot (2N_t) + 7N_a^2 + 6(2N_r)N_a)N_t$, 其中 $N_a = 2$ 。关于提出的算法, 每次进行迭代的复杂度大概为 $(8N_r - 1)K + 4N_r + 2N_t$, 所以该提出算法的复杂度可以表示为:

$$C_{\text{算法}} = 2N((60 + 120N_r)N_t + (8N_r - 1)K + 4N_r) + (20N_r - 1)N^2K \quad (15)$$

表 1 中列出了 $N_t = N_r = 8$ 时不同系统配置下两种算法的计算复杂度比较。

表 1 具体仿真参数设定

Tab. 1 Setting of Specific Simulation Parameters

详细仿真参数	具体参数内容
发射天线数/ N_t	64/128
接收天线数/ N_r	16
调制方式	4/16QAM
迭代次数/ N	6/8

4 仿真分析

本文对 PGQSM 系统进行了详细的介绍,为了更为直观的展示 PGQSM 系统的性能,将本文的算法同 OMP 算法和 ML 算法进行了不同发送天线数下误比特性能的对比和算法复杂度的比较,详细的仿真参数见表 1。

当 $N_t=64$ 和 $N_t=128$ 时,几种算法的 BER 性能对比如图 2~3 所示。从两图中可以看出无论是在 4QAM 还是在 16QAM 的调制方式下,ML 的 BER 性能是最优的。OMP 算法的 BER 性能是最差的。不过 OMP 算法性能随着信噪比增大而降低,而且慢慢趋于平缓。而其他算法随着信噪比增加,BER 性能降低后没有趋于平缓,而是一直在降低。本文提出的算法性能介于 ML 和 OMP 算法的性能之间,且当 $BER=10^{-1}$ 时,提出的算法比 OMP 算法至少提高了 6 dB。4QAM 明显比 16QAM 的误比特性能更优。在发送天线数 $N_t=64$ 和 $N_t=128$ 的情况下,曲线的走势是大致相似的,但是随着 SNR 增加,发送天线数 $N_t=128$ 时的 BER 性能比 $N_t=64$ 的下降幅度大。

如图 4~5 所示,当 $N_t=64$ 和 $N_t=128$ 时,几种算法的复杂度可以从图 4 和 5 明显的看出:OMP 的算法复杂度是最低的,ML 算法的复杂度是最高的。而且所有算法的复杂度都随着大规模天线阵列增大而呈指数增长趋势。

但提出算法的复杂度还是非常小的。提出的算法的复杂度尽管介于 OMP 算法和 ML 算法之间。

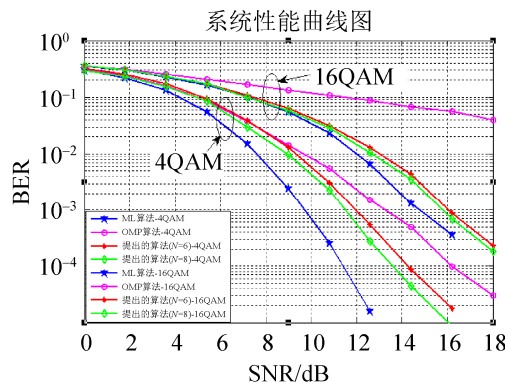


图 2 $N_t=64$ 不同算法性能比较
Fig. 2 Performance comparison of different algorithms under $N_t=64$

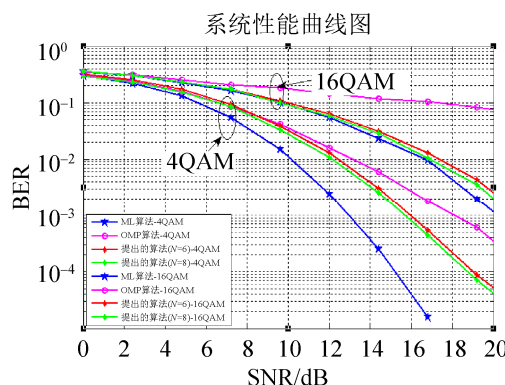


图 3 $N_t=128$ 不同算法性能比较
Fig. 3 Performance comparison of different algorithms under $N_t=128$

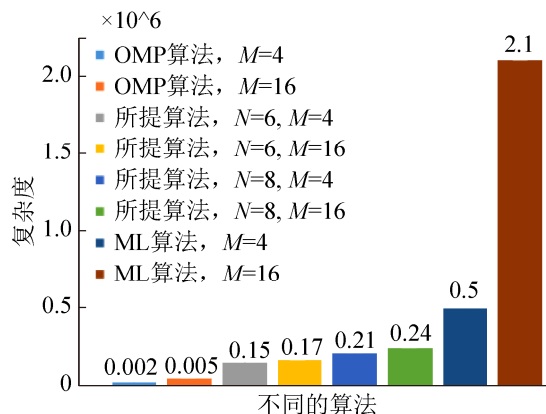
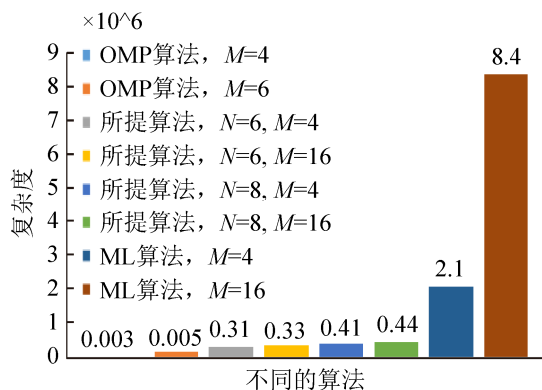


图 4 $N_t=64$ 不同算法复杂度比较
Fig. 4 Comparison of complexity of different algorithms under $N_t=64$

但是和 ML 算法相比较, 在 $N=8$ 时, 算法的复杂度大约是 ML 算法复杂度的 1/10, 所以提出的算法复杂度能够降低 90%左右。从图 4~5 都可以看出, ML 的算法尽管性能很好, 但是复杂度太高, 很难应用到实际中去。所以该改进的算法比 ML 算法复杂度优化了太多, 可以更好的应用到实际中去。同时还可以保持近似 ML 算法的更优的误比特性能。

图 5 $N_T=128$ 不同算法复杂度比较Fig. 5 Comparison of complexity of different algorithm under $N_T=128$

为验证在 PGQSM 系统中, 所提出的算法在多激活接收天线时的检测性能, 本文针对 $N_a=2$ 和 $N_a=4$, 对提出算法在 4QAM 的情况下进行了仿真验证, 如图 6 所示。仿真结果表明, 当激活接收天线数为 2 时, 所提出的检测算法相比传统 ML 算法计算复杂度降低了 92%, 仅有约 0.3 dB 的误比特性能损失。

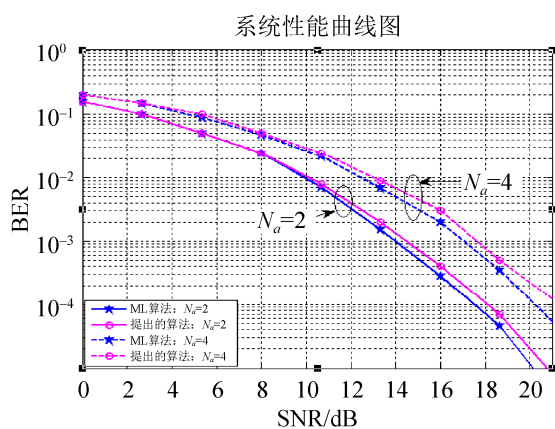


图 6 多激活接收天线情况下的误比特性能

Fig. 6 Bit-error performance under multiple activation of receiving antenna

5 结论

本文介绍了 PGQSM 的工作原理, 并针对大规模 MIMO^[18]下的预编码辅助广义正交空间调制系统提出了一种低复杂度, 但是性能较好的检测算法。并对该系统的接收端和发送端中的信号向量进行了理论分析和公式推导。预编码辅助广义正交空间调制系统发送端将传统的空间星座符号在 SM 方案中进一步扩展到同相和正交域, 将传输符号的实部和虚部分开, 然后分别选择相应的激活天线发送, 同时传送到接收机。接收端可以根据信道状态信息选择合适的接收天线接收信号, 这样可以降低接收端功耗并且降低接收端的检测复杂度。

理论分析与计算机仿真结果表明, 本文针对 PGQSM 系统提出了接收天线激活方案候选集的确定方案, 可以有效地降低方案候选集的个数, 有效的提高了选择的有效性, 很大程度上缩小了接收端的搜索范围, 最大程度的实现了系统性能与计算复杂度之间的权衡, 能够获得近似 ML 检测的误比特性能, 同时显著地降低了检测复杂度。因此 PGQSM 能够很好地运用于下行数据传输场景中, 具有较高的工程应用价值。

随着无线通信与信息技术的高速发展, 大规模天线系统中天线数目比传统 MIMO 系统中更多, 支持更多用户同时传输, 因此利用大规模天线技术可以获得比传统 MIMO 系统更加显著的复用增益。当天线间的相关性确定之后, 理论上可以通过波束赋形获得最多 N_t 倍的波束赋形增益。随着天线数目的增加, 大规模天线除了可以提供比传统 MIMO 更大的空间自由度外, 还会有以下突出的特点: 有极低的每天线发射功率; 热噪声及非相干干扰的影响降低; 空间分辨率提升; 信道“硬化”。快速衰落的影响变小。

预编码辅助广义正交空间调制 (Pre-coding aided Generalized Quadrature Spatial Modulation, PGQSM) 技术以其自身独特的优势会在未来高速发展的无线通信技术中发挥出更加重要的作用。本

文对 PGQSM 系统进行了详细的介绍, 将本文的算法同 OMP 算法和 ML 算法进行了不同发送天线数下误比特性能的对比和算法复杂度的比较。对于该系统的研究还可以从以下角度来进行:

1) 在多天线发送时, 不同天线之间的灵活互换技术, PGQSM 技术尽管保持了近似 ML 检测的误比特性能, 同时显著地降低了检测复杂度。但是说到底还是需要通过发送天线的索引来传输符号。如果在未来大量天线同时传输情况下, 能够实现这一灵活互换技术, 那么传递信息的安全性、数据的准确性、传输的可靠性将得到很大的提高。推动通信技术实现真正意义上的高速发展。

2) 本文对 BER 性能和算法复杂度的研究基于的是 $N_T=64$ 和 $N_T=128$, 也做了 $N_T=256$ 和 $N_T=512$ 的仿真, 结果和 $N_T=128$ 的仿真结果几乎一致, 所以不再陈述。未来将要更大量的发送天线下的相关性能和复杂度的研究。

参考文献:

- [1] Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Commun. Mag (S1558-1896), 2014, 52(2): 186-195.
- [2] Mesleh R S, Aggoune H M. Quadrature spatial modulation[J]. IEEE Trans. Veh. Technol (S1939-9359), 2015, 64(6): 2738-3742.
- [3] Xu C, Sugiura S, Ng S, et al. Spatial modulation and space-time shift keying: optimal performance at a reduced detection complexity[J]. IEEE Trans. Commun. (S1558-0857), 2013, 61(1): 206-216.
- [4] Ju P, Zhang M, Cheng X, et al. Generalized spatial modulation with transmit antenna grouping for correlated channels[J]. IEEE Commun. Lett (S1938-1883), 2016, 16(5): 1-6.
- [5] Su S T, Chung W H, Wu C F. Exploiting entire GSSK antenna combinations in MIMO systems[J]. IEEE Commun. Lett (S1558-2558), 2015, 19(5): 719-722.
- [6] 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.
- [7] Zhang Rong, Yang L L. Generalised PreCoding Aided Spatial Modulation[J]. IEEE Trans Wireless Commun (S1558-2248), 2013, 12(11): 364-375.
- [8] Ngo H A, Xu C, Sugiura S, et al. Space-Time-Frequency Shift Keying for Dispersive Channels[J]. IEEE Signal Process Lett (S1558-2361), 2011, 18(3): 177-180.
- [9] Renzo M D, Haas H. Ransmit-Diversity for Spatial Modulation (SM): Towards the Design of High-Rate Spatial Modulated Space-Time Block Codes[J]. IEEE Commun. (S1938-1883), 2011, 3(1): 1-6.
- [10] Yang L L. Transmitter Preprocessing Aided Spatial Modulation for Multiple-Input Multiple- Output Systems[J]. IEEE Commun. Lett (S1550-2252), 2011, 73(1): 1-5.
- [11] Rajashekar R, Hari K V S, Hanzo L. Antenna selection in spatial modulation systems[J]. IEEE Commun. Lett (S1089-7798), 2013, 17(3): 521-524.
- [12] Bian Y. Differential spatial modulation[J]. IEEE Trans Veh Technol (S1939-9359), 2015, 64(7): 3262-3268.
- [13] Zhang R, Yang L L, Hanzo L. Error bability and capacity analysis of generalised pre- coding aided spatial modulation[J]. IEEE Trans. Wireless Commun. (S1558-2248), 2015, 14(1): 364-375.
- [14] Sun Y, Wang J, He L. Iterative zero forcing detection scheme for generalised spatial modulation[J]. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (S2155-5052), 2015, 6(1): 17-19.
- [15] Xiao Y, Yang Z, Dan L, et al. Low-complexity signal detection for generalized spatial modulation[J]. IEEE Communications Letters (S1558-2558), 2014, 18(3): 403-406.
- [16] Xiao L, Yang P, Xiao Y, et al. Efficient compressed sensing detectors for generalized spatial modulation systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S1939-9359), 2017, 99(1): 22-25.
- [17] Perovic N S, Haselmayr W, Springer A. Low-complexity Detection for Generalized Pre- Coding Aided Spatial Modulation[C]. New York: Vehicular Technology Conference, 2015, 24(2): 1-5.
- [18] Narasimhan L T, Raviteja P, Chockalingam A. Generalized spatial modulation in large-scale multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1558-2248), 2015, 14(7): 3764-3779.