

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.05.016

无线通信技术

基于广义预编码辅助空间调制的分组检测算法

陈发堂,李玉河,刘 燕

(重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘要:广义预编码辅助空间调制在每一个时隙内通过选择激活接收天线组合来传递空间维度信息比特。在相同频谱效率和信噪比的情况下,相比于传统的广义空间调制系统,广义预编码辅助空间调制系统的误比特性能有显著提升。同时,针对广义预编码辅助空间调制系统现有的检测算法具有较高的计算复杂度的问题,提出了一种基于广义预编码辅助空间调制的分组检测算法。仿真结果表明,该算法的检测性能接近最大似然检测算法,且复杂度显著降低。

关键词:预编码;空间调制;误比特性能;分组检测

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2017)05-0061-04

Low-Complexity Signal Detection Algorithm based on GPSM

CHEN Fa-tang, LI Yu-he, LIU Yan

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

Abstract: The features of Generalized Pre-coding aided Spatial Modulation (GPSM) are that in each time slot the bit information of space dimension is transmitted by selecting the active receiving antenna combination. In the same frequency spectrum efficiency and signal-to-noise ratio, GPSM shows better bit error performance when compared to conventional generalized spatial modulation system. Meanwhile, to reduce the complexity of signal detection in GPSM, this paper proposes a group detection algorithm base on GPSM. The simulation results show that the detection performance of the proposed algorithm is similar to that of the Maximum Likelihood (ML) method, while the complexity is reduced significantly.

Key words: pre-coding; spatial modulation; bit error performance; group detection

0 引 言

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统作为无线通信领域中最具前景的技术之一,近年来备受关注^[1]。空间调制(Spatial Modulation, SM)在每一个时隙内激活单根发送天线传输数据^[2],有效地避免了信道间干扰。许多学者深受 SM 的启发,进而开展了大量的研究。例如,文献[3]提出了一种 SM 的低复杂度的实现形式——空移键控(Space Shift Keying, SSK);为了提高 SM 系统的频谱效率,文献[4]和[5]分别提出了广义空间调制(Generalized Spatial Modulation, GSM)和广义空移键控(Generalized Space Shift Keying, GSSK);文献[6]提出的空时移键控(Space Time Shift Keying, STSK)和文献[7]提出的空时频移键控(Space Time Frequency Shift Keying, STFSK)分别将 SM 扩展到了时域和时频域;文献[8]提出通过对 SM 进行空时编码(Space-Time Coding, STC)可以获得发送分集。

预编码辅助空间调制(Pre-coding aided Spatial

Modulation, PSM)通过选取的激活接收天线索引来传递额外的信息比特^[9]。更具体地说,PSM 系统中选取的激活接收天线索引表示系统空间域中传递的信息。相比于传统的 SM,PSM 系统在接收端具有更低的系统开销和较低的复杂度,能够很好地运用到下行数据传输过程中。为了提高系统的频谱效率,文献[10]将 PSM 系统进行广义化,提出了广义预编码辅助空间调制(Generalized Pre-coding aided Spatial Modulation, GPSM)。GPSM 系统在一个时隙内通过激活多根接收天线来实现系统频谱效率的提升。随着接收天线激活数量的增加,接收端检测的复杂度也随之增加,基于此原因,本文提出了一种次优的分组检测算法,该算法能够获得近似最大似然(Maximum Likelihood, ML)检测算法的系统性能,同时大大降低了计算复杂度。

1 系统模型

假设 MIMO 系统的发送天线数为 N_t ,接收天线数为 N_r ,激活接收天线数为 N_a ,且有 $N_t \geq N_r \geq N_a$ 。发送预编码在发送端通过接收端反馈的信道

收稿日期:2017-04-17

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)

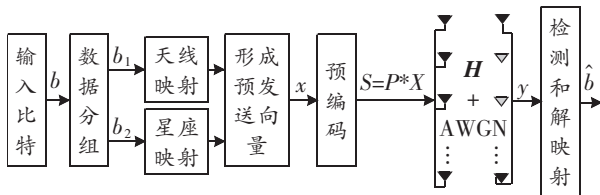
作者简介:陈发堂(1965—),男,重庆人。研究员,硕士生导师,主要从事移动通信和 TD-LTE 系统开发研究。

通信作者:李玉河,硕士。E-mail:liyuhex@163.com

状态信息(Channel State Information at the Transmitter, CSIT)计算得到的矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ 对发送的信号进行预处理,通过这种方式主动消除信道间干扰。

1.1 发送端

GPSSM 系统通过发送端预编码的方式,在 N_r 个接收天线中选择多根接收天线进行激活,相比传统的星座映射所携带的信息比特,这种激活天线选择的方式可以传递额外的信息比特,系统模型如图 1 所示。GPSSM 系统中,空间符号中有 N_a 个元素不为 0,其天线索引为 $\{k_1, \dots, k_{N_a}\}$,其中 $k_1, \dots, k_{N_a} \in Z, Z = \{1, \dots, N_r\}$ 。



注: $\mathbf{H}$ 为信道矩阵; AWGN (Additive White Gaussian Noise) 为加性高斯白噪声。

图 1 GPSSM 系统框图

在 GPSSM 系统中,空间调制符号 $s \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$,除了 $\{k_1, \dots, k_{N_a}\}$ 个元素为调制符号 $b_m \in A$ (A 为 L 阶的相移键控 / 正交幅度调制 (Phase Shift Keying/Quadrature Amplitude Modulation, PSK/QAM) 调制符号索引) 外,其他元素均为 0。为了更为详细地描述 GPSSM 系统中的符号,利用 s_M^K 表示以 K 为激活接收天线索引集合并且待发送的调制符号分别为 $b_M, M = \{m_1, \dots, m_{N_a}\}$ 。因此,GPSSM 系统中每个时隙内传输的信息比特数为 $k_{\text{eff}} = k_{\text{ssk}} + N_a * k_{\text{mod}}$, 式中, $k_{\text{ssk}} = \lceil \log_2 C_{N_r}^{N_a} \rceil$ 为空间符号传递的信息比特数, $k_{\text{mod}} = \log_2 L$ 为星座映射传递的信息比特数。

经过发送预编码处理后,发送的符号 $x \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$, 其表达式为 $x = \mathbf{P}s_M^K$, 式中, $\mathbf{P}$ 为预编码矩阵。

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 $\text{Tr}\{\mathbf{P}\mathbf{P}^H\} = N_r, \text{Tr}(\mathbf{A})$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹。

1.2 接收端

PSM 系统接收端检测的信号 y 的表达式为 $y = \mathbf{H}^T \mathbf{P}s_M^K + \mathbf{w}$, 式中, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_r}$, 假设为完全信道状态信息; $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 为均值为 0、方差为 δ^2 的复高斯加性白噪声向量。

文献[11]中提出可以采用迫零 (Zero Forcing,

ZF) 预编码和最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 预编码方式。为了简化分析,本文采用 ZF 预编码方式。ZF 预编码矩阵由信道响应 $\mathbf{H}$ 组成,表达式为 $\mathbf{P} = \beta \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-1}$, 式中, $\beta = \sqrt{N_r / \text{Tr}[(\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-1}]}$ 为归一化因子,在满足功率限制的情况下,可以将 β 简化为 $\sqrt{N_t}$ 。

采用 ZF 预编码方式时,接收信号可以进一步表示为 $y = \beta s_M^K + \mathbf{w}$ 。

GPSSM 系统接收端可以采用 ML 检测算法,可以写成如下形式:

$$[\hat{K}, \hat{M}] = \arg \min_{s_M^K \in S} \|y / \beta - s_M^K\| \quad (1)$$

式中, S 表示由所有可能的激活接收天线组合以及调制符号组成的发送信号; K 表示接收天线索引; M 表示调制符号。

2 提出的检测算法

文献[12]中,通过利用基于 M 算法的最大似然 (M-ML) 算法获得了近似 ML 检测算法的性能,大大减少了信号检测的计算复杂度。受此启发,本文将其核心思想应用到 GPSSM 系统中,以此来保证在系统性能损失较小的情况下显著降低计算复杂度。由于 GPSSM 系统与 SM 系统有所不同,不能将 M-ML 算法直接应用到 GPSSM 系统中,因此本文对该算法进行了改进,同时还提出一种方便检测的激活接收天线选择方案以进一步降低检测复杂度。

假设 GPSSM 系统发送天线数为 N_t , 接收天线数为 N_r , 激活接收天线数为 N_a 。根据 GPSSM 系统方案,需要从 N_r 个接收天线中选择 N_a 个进行激活。为了便于分析,现假设 $N_r = 4, N_a = 2$, 因此 $k_{\text{ssk}} = 2$, 只有 4 种合法的天线选择组合。这样导致需从所有可能的天线选择组合中进行挑选,如何进行挑选能够进一步提升系统性能便成为研究的热点之一。本文提出一种分组天线选择方式。

首先将接收天线分成 N_a 组,然后在每组 $k = N_r / N_a$ 中选择 1 根接收天线进行激活。为了更为直观地描述分组天线选择方法,用矩阵 $\mathbf{C}$ 来表示合法的天线组合候选集合:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

矩阵 $\mathbf{C}$ 的每一列表示一种可能的接收天线激活组

合方式,0 表示相应位置天线处于静默状态,1 表示相应位置的天线激活。按照上述方案,可选的天线组合数为 $N_c = (N_r/N_a)^{N_a}$ 种。为了让这些天线选择方案都可用,应该满足 $k = 2^n, n$ 为正整数。

针对上述接收天线激活方案,GPSM 系统的接收端可以采用分组检测的方案,即将接收的信号进行分组,在每组中确定 1 根激活接收天线以及其传输的符号,最后综合每组检测的结果确定最终的发送端传输信息。

为了详细描述分组检测方法的过程,现定义如下: $y_i \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}, i \in \{1, \dots, N_a\}$,表示接收端收到的信号从第 $N_r - i * k + 1$ 到第 N_r 个元素组成的向量, $d_i, i \in \{1, \dots, N_a\}$ 表示第 i 个检测阶段的每路径的累积度量值, x_i 表示第 i 个检测阶段的符号向量, M 表示每个检测阶段保留的分支点数。当系统设置为 $N_r = 4, N_a = 2, M = 2$,且采用 4QAM 调制方式时,提出的分组检测 GPSM 算法原理框图如图 2 所示。图中,黑色圆点表示幸存节点,由于 $N_a = 2$,因此将所有天线分成两组,在每组中检测 1 根激活天线,最终选择累积度量值最小的路径所对应的天线序号以及星座符号作为估计值。

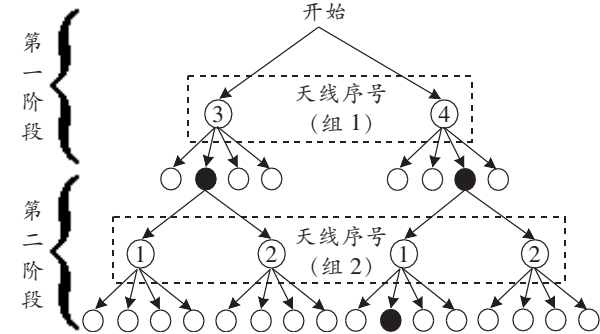


图 2 分组检测 GPSM 算法原理框图

3 复杂度分析

GPSM 系统采用的 ML 检测算法如式(1)所示,主要包含向量的乘法和加法。为了衡量算法的计算复杂度,本文使用实数乘法和复数加法的运算次数来表示算法的计算复杂度。所提检测算法需要 $\{1 + M[N_a(N_a + 1) - 2]/2\}(N_r/N_a)(N_r L/N_a)$ 次复数加法和 $2\{1 + M[N_a(N_a + 1) - 2]/2\}(N_r/N_a)(N_r L/N_a)$ 次实数乘法。GPSM 系统采用 ML 检测算法时,需要 $N_r(N_r L/N_a)^{N_a}$ 次复数加法和 $2N_r(N_r L/N_a)^{N_a}$ 次实数乘法。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 两种算法的计算复杂度比较

系统配置	ML 算法		本文算法 ($M = 6$)	
	实乘运 算次数	复加运 算次数	实乘运 算次数	复加运 算次数
$N_a = 2, L = 16$	65 536	32 768	6 656	3 328
$N_a = 2, L = 64$	1 048 576	524 288	26 624	13 312
$N_a = 4, L = 16$	16 777 216	8 388 608	7 040	3 520

4 仿真分析

本文对 GPSM 系统进行了介绍,为了更直观地体现 GPSM 系统的性能,对其进行了 MATLAB 仿真,并在相同频谱效率以及信道环境下对 GPSM 和 GSM 系统性能进行了比较。根据文献[10]和本文第 2 节提出的接收天线激活方案,可以得到空间维度传输比特数 $b_1 = \log_2(N_r/N_a)^{N_a}$,星座符号传输比特数 $b_2 = N_a \log_2 L, L$ 表示星座调制阶数。因此 GPSM 系统频谱效率 $\eta = b_1 + b_2$,当 $N_t = N_r = 8, N_a = 2$,且采用 16QAM 调制方式时,系统频谱效率 $\eta_{16QAM} = \log_2(8/2)^2 + 2\log_2 16$ 为 12 bit/s/Hz;采用 64QAM 调制方式时,系统的频谱效率 $\eta_{64QAM} = \log_2(8/2)^2 + 2\log_2 64$ 为 16 bit/s/Hz。图 3 所示为在上述系统配置下分别采用 16QAM 和 64QAM 调制方式,且接收端都采用 ML 检测方式时,两者之间的误比特性能比较。仿真结果表明,在相同的频谱效率下,GPSM 系统相比传统 GSM 系统误比特性能提升约 1.3 dB。

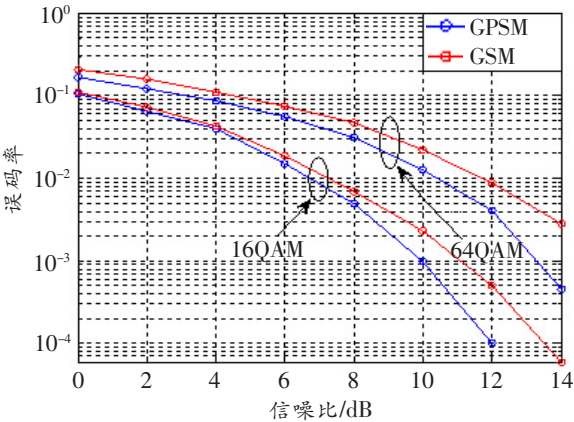


图 3 GPSM 和 GSM 系统误比特性能比较

为了验证本文所提分组检测 GPSM 算法的有效性,对该算法进行了蒙特卡罗仿真。在相同的系统配置下对所提出的 GPSM 算法与 ML 算法进行比较,GPSM 算法在每个检测阶段保留的节点数量 M 不同,对系统误比特性能也会造成一定的影响。图 4 所示为在第一个检测阶段保留节点数量分别为 4 和 6 时两种算法的系统误比特性能曲线。

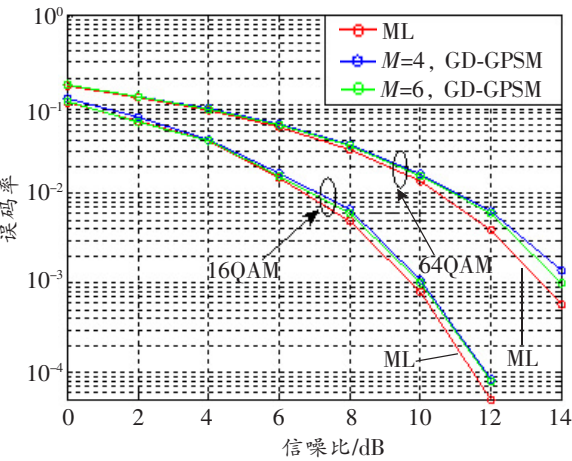


图 4 不同算法的误比特性能比较

为了验证分组检测 GPSM 算法在多激活接收天线情况下 GPSM 系统中的检测性能,针对 $N_a=2$ 和 $N_a=4, M=6$ 的情况进行了仿真,如图 5 所示。仿真结果表明,当 $N_a=2$ 时,分组检测 GPSM 算法相比传统 ML 算法计算复杂度降低了 90%,仅有约 0.2 dB 的误比特性能损失。

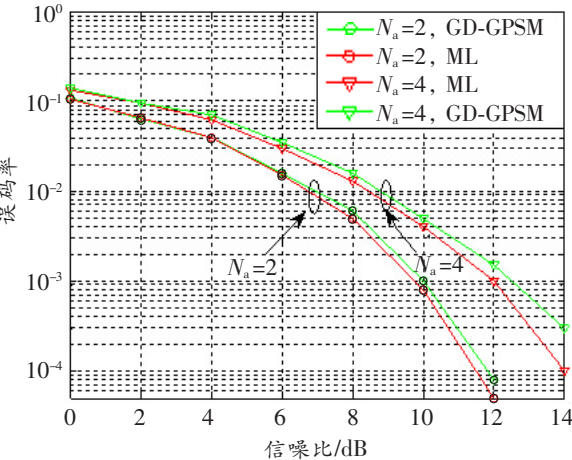


图 5 多激活接收天线情况下的误比特性能比较

5 结束语

本文介绍了 GPSM 的工作原理,并针对该系统的接收端以及发送端中的信号向量形式进行了理论分析和公式推导。GPSM 系统接收端可以根据信道状态信息选择合适的接收天线进行信号的接收,这样可以降低接收端功耗并且接收端的检测复杂度也有所降低,因此 GPSM 能够很好地运用于下行数据传输场景中。另一方面,本文根据 GPSM 系统提出了一种接收天线激活方案候选集确定的方案,可以有效地降低方案候选集的个数,从而避免了在所有天线组合候选集中选择合适的候选集并设置为合法的这一过程。最后,文中提出了一种分组检测方

案,该方案能够获得近似 ML 检测的误比特性能,同时显著地降低了检测复杂度。

参考文献:

[1] Hanzo L, Alamri O, El-Hajjar M, et al. Near- Capacity Multi-Functional MIMO Systems: Sphere-Packing, Iterative Detection and Cooperation[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2009.

[2] Mesleh R Y, Haas H, Sinanovic S, et al. Spatial Modulation[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2008, 57(4): 2228—2242.

[3] Jeganathan J, Ghroyeb A, Szczecinski L, et al. Space Shift Keying Modulation for MIMO Channels[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(7): 3692—3703.

[4] Younis A, Serafimovski N, Mesleh R, et al. Generalised Spatial Modulation [C]//2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA: IEEE, 2010: 1498—1502.

[5] Jeganathan J, Ghroyeb A, Szczecinski L. Generalized Space Shift Keying Modulation for MIMO Channels [C]//IEEE 19th Int Symp PIMRC 2008. Cannes, France: IEEE, 2008: 1—5.

[6] Sugiura S, Chen S, Hanzo L. Generalized Space-Time Shift Keying Designed for Flexible Diversity, Multiplexing and Complexity Tradeoffs [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2011, 10(4): 1144—1153.

[7] Ngo H A, Xu C, Sugiura S, et al. Space-Time-Frequency Shift Keying for Dispersive Channels[J]. IEEE Signal Process Lett, 2011, 18(3): 177—180.

[8] Renzo M Di, Haas H. Transmit-Diversity for Spatial Modulation (SM): Towards the Design of High-Rate Spatially-Modulated Space-Time Block Codes[C]//IEEE Int Conf Commun 2011. Kyoto: IEEE, 2011: 1—6.

[9] Yang L L. Transmitter Preprocessing Aided Spatial Modulation for Multiple-Input Multiple- Output Systems[C]// 2011 IEEE 73rd Vehicular Technol Conf (VTC Spring). Yokohama: IEEE, 2011: 1—5.

[10] Zhang Rong, Yang L L. Generalised Pre- Coding Aided Spatial Modulation [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2013, 12(11): 364—375.

[11] Perovic N S, Haselmayr W, Springer A. Low-complexity Detection for Generalized Pre- Coding Aided Spatial Modulation [C]//Vehicular Technology Conference 2015. Boston: MA, 2015: 1—5.

[12] Zheng J, Yang X, Li Z. Low-complexity Detection Method for Spatial Modulation based on M-Algorithm [J]. Electronics Letters, 2014, 50(21): 1552—1554.