

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.01.019

无线通信技术

空间调制系统下改进的匹配滤波检测算法

李小文, 薛 尧, 张丁全

(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: SM(空间调制)作为一种新颖的多天线传输方案,独创性地将输入比特与发射天线序号构成一种映射关系来传输比特信息。由于 SM 系统的 ML(最大似然)最优检测算法需要遍历所有可能的码本,其检测复杂度很高,因此人们相继提出了一些简化算法,如 MF(匹配滤波)、SD(球形译码)算法等。与这些算法思路不同,文章将 EMF(穷搜索 MF)与 NMF(最优 MF)算法相结合,引入候选集因子 T 有效均衡系统性能与复杂度。仿真结果表明:当 $T=4$ 时,改进的 MF 检测算法能获得与 EMF 相似的系统性能,但计算复杂度更低。

关键词: 空间调制;信号检测;最大似然;匹配滤波

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2017)01-0061-04

Based on Superposition Coded for Spatial Modulation System Design

LI Xiao-wen, XUE Yao, ZHANG Ding-quan

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

Abstract: Spatial Modulation (SM) is a novel multi-antenna transmission scheme, which originally constitutes a mapping relation inputting bits and transmitting antenna. Due to the fact that the Maximum Likelihood (ML) optimal detection algorithm of SM system requires traversing all possible codebook, the algorithm suffers high detection complexity. For this reason, some people have proposed simplified algorithms, such as MF, sphere decoding algorithm. Different from these algorithms, this paper combines EMF algorithm and NMF algorithm. We add candidate set factor T to effectively balance the system performance and complexity. Simulation results show that when $T=4$, the improved MF detection algorithm can achieve similar performance as EMF algorithm, but with lower computational complexity.

Key words: spatial modulation; signal detection; maximum likelihood; matched filtering

0 引 言

随着无线移动通信的快速发展,人们对通信系统提出了更多的要求。未来移动通信研究的一个关键问题便是寻找一种适宜的对天线传输技术,可以很好地均衡无线通信系统的频谱效率和能量效率。研究表明,MIMO(多输入多输出)技术通过增加发送与接收信号的天线数量,可使系统容量和数据传输速率得到有效提高,并且不会增加系统带宽和发射功率。但随着天线数量的增加,MIMO 技术也存在以下弊端:发送天线之间要求同步,极大地增加了硬件实现难度和成本;所有发送天线同时传输同频信号,将导致各天线之间存在极强的信道干扰。

针对以上缺陷,2006 年 R. Mesleh 等人提出了一种新的多天线传输技术——SM(空间调制)方案。在文献[1]和[2]中阐述了 SM 方案的核心思想,任一发送时刻只有一根发射天线处于激活状态,其余发射天线处于静默状态,发送的比特信息一部分映

射到星座调制图上,其余比特映射到天线索引号构成的空间维上。由于这种特殊结构,SM 系统能有效避免信道间干扰和多天线发射同步难的问题,更重要的是该技术具有单射频特性,天线间干扰程度低,接收端信号处理较为简单,因此 SM 正逐渐成为 MIMO 传输技术研究的热点。

SM 系统常采用 ML(最大似然)、MF(匹配滤波)算法进行信号检测^[3]。文献[4]阐述了 ML 虽然具有较低的 BER(误码率),但它通过穷举搜索激活天线索引与星座调制符号的全部可能组合,使得系统复杂度极高。文献[5]中的 MF 算法将分离检测激活天线索引和星座调制符号,复杂度大大降低。文献[6]基于 MF 算法提出了两种改进的检测算法,EMF(穷搜索 MF)和 NMF(最优 MF),这两种检测算法的 BER 性能均优于 MF,但 EMF 通过穷搜索信号空间获得近似 ML 性能;相反,NMF 为获得低的计算复杂度牺牲了系统性能^[7]。

为了在系统性能与计算复杂度上取得有效地折

收稿日期:2016-07-11

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03001024);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500428)

作者简介:李小文(1955—),男,重庆人。研究员,硕士,主要从事 TD-LTE 系统开发研究。

通信作者:薛尧,硕士。E-mail:471984363@qq.com

中,本文在 NMF 算法基础上引入一个候选集因子 T 来均衡系统性能与复杂度。通过利用 NMF 检测中的判决矩阵 $\mathbf{G}$,按照一定的规则对所有可能的天线索引按照激活概率大小进行排序,然后选取 T 个激活概率大的天线索引求最优解。仿真结果表明,改进的 MF 算法性能近似 EMF,且计算复杂度远低于 EMF 算法。特别地,随着发送天线数量和星座调制阶数的增加,改进的 MF 算法的优势更加明显。因此,在高阶调制的大规模 MIMO 系统中,该算法具有一定的工程实际意义。

1 系统模型

我们设计了包含 N_t 根发送天线、 N_r 根接收天线的 SM-MIMO 系统模型,如图 1 所示。在 SM 系统中,每个时隙会有一根天线被激活用于传输调制

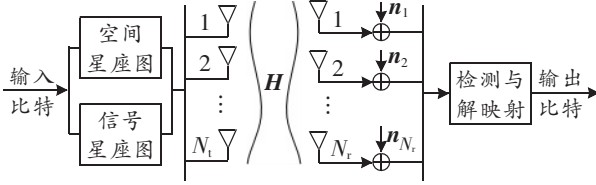


图 1 SM-MIMO 系统模型

符号。同时,将长度为 $\log_2 N_t + \log_2 M$ 的输入二进制比特流分成两部分,其中 $\log_2 N_t$ 个比特用来决定在哪根天线上传输调制符号,剩下的 $\log_2 M$ 个比特用于 M-QAM (M 阶正交幅度调制),生成一个调制符号。调制后的符号向量通过 $N_r \times N_t$ 维的无线信道 $\mathbf{H}$ 进行传输, $\mathbf{H}$ 为准静态瑞利衰落信道, $\mathbf{H}$ 的每个元素都是方差为 1、均值为 0 的复高斯随机变量。接收信号模型可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{y} \in N_r \times 1$ 为接收信号向量; $\mathbf{n} \in N_r \times 1$ 为方差为 δ^2 、均值为 0 的复高斯加性白噪声向量; $\mathbf{x} = [0, \dots, 0, s, 0, \dots, 0]^T$ 表示发送符号向量。

假设第 l 根天线被用来传输调制符号,则 $\mathbf{H}$ 可以等效为 $N_r \times 1$ 维的信道矩阵 $\mathbf{h}_u$, $\mathbf{h}_u$ 表示信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的第 u 列,所以接收信号模型可以简化为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} = \mathbf{h}_u \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{s}$ 表示星座调制符号向量集合。根据简化后的接收信号模型,SM-MIMO 系统的 ML 检测算法可以写成如下形式:

$$(\hat{u}, \hat{s}) = \arg \min_{u \in I, s \in S} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_u \mathbf{s}\|_F^2 \quad (3)$$

式中, I 表示天线索引集合。从上式可以看出,ML 检测算法需要进行 $N_t M$ 次穷举搜索,这将给系统接

收端带来很高的计算复杂度。

2 改进的 MF 检测算法

2.1 MF 算法

相比 ML 检测,MF 算法具有较低的计算复杂度,它将激活天线索引和星座调制分开检测,首先估计发射天线的索引号,然后再恢复相应的星座调制符号。类似于传统 MIMO 中的 MF 算法,SM 系统的 MF 算法首先把接收到的信号乘以 MIMO 信道矩阵的共轭转置矩阵 $\mathbf{H}^H$,得到判决向量

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}^H \mathbf{y} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{H}^H \mathbf{n} \quad (4)$$

依据判决向量 $\mathbf{g}$ 可得激活天线索引为

$$\hat{u} = \arg \max_u \left(\frac{|g(u)|}{\|\mathbf{h}_u\|_F} \right) = \arg \max_u \left(\frac{|\mathbf{h}_u^H \mathbf{y}|}{\|\mathbf{h}_u\|_F} \right) \quad (5)$$

式中, $g(u)$ 为判决向量 $\mathbf{g}$ 的第 u 个元素。通过式 (5) 估计出激活天线索引 $\hat{u}$, 然后,根据式 (6) 解调对应的星座调制符号:

$$\hat{x}_a = Q[g(u = \hat{u})] \quad (6)$$

式中, $\hat{u}$ 和 $\hat{x}$ 分别为估计得到的激活天线索引和相应的星座调制符号; $Q[\cdot]$ 为星座解调函数。因为 MF 检测是将激活天线索引和星座调制符号分离检测,因此第一步求解出激活天线索引号非常关键。传统的 MF 检测算法虽然复杂度较低,但是已经被证明只适用于部分受限的信道,并不适用于常见的信道模型,如瑞利衰落信道。

2.2 改进的 MF 算法

假设在 MIMO 系统接收端我们已知信道信息 $\mathbf{H}$, 类似传统的 MF 算法,首先可得判决向量为

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{H}')^H \mathbf{y} \quad (7)$$

此处 MF 算法使用修正的等效信道矩阵 $\mathbf{H}' = [\mathbf{h}_1/\alpha_1, \dots, \mathbf{h}_{N_t}/\alpha_{N_t}]$, 其中归一化因子为 $\alpha_u = \|\mathbf{h}_u\|$ 。特别地,经过归一化后的信道矩阵 $\mathbf{H}'$ 满足矩阵列向量模值为常数,基于式 (3) 的 ML 检测准则,SM-MIMO 的检测可等效为

$$(\hat{u}, \hat{s}) = \arg \min_{u, s} \|\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{h}}_u\|_{K_{u,s}}^2 = \arg \max_{u, s} (2 \|\bar{\mathbf{h}}_u\| \{\Re(z_u) \Re(s_s) + \Im(z_u) \Im(s_s)\} - \|\bar{\mathbf{h}}_u\|^2 |s_s|^2) \quad (8)$$

式中, $K_{u,s}$ 为第 u 列的第 s 个码本; $\Re(\cdot)$ 和 $\Im(\cdot)$ 分别为变量的实、虚部; z_u 为判决向量 $\mathbf{Z}$ 的第 u 个元素。式 (8) 会穷举所有可能的发射符号 s , 故其计算复杂度较高。由于星座图中的星座点存在对称性,我们将 u 和 s 进行分离检测,激活天线索引检测为

$$\begin{aligned} \hat{u} = & \arg \max_{u, \forall s'} (2 \| \bar{\mathbf{h}}_u \| \{ \pm | \mathcal{R}(\mathbf{z}_u) | | \mathcal{R}(s'_s) | \pm \\ & | \mathcal{J}(\mathbf{z}_u) | | \mathcal{J}(s'_s) | \} - \| \bar{\mathbf{h}}_u \|^2 | s'_s |^2) = \\ & \arg \max_{u, \forall s'} (2 \| \bar{\mathbf{h}}_u \| \{ | \mathcal{R}(\mathbf{z}_u) | | \mathcal{R}(s'_s) | + \\ & | \mathcal{J}(\mathbf{z}_u) | | \mathcal{J}(s'_s) | \} - \| \bar{\mathbf{h}}_u \|^2 | s'_s |^2), \quad (9) \end{aligned}$$

式中, $s'_s (s' = 1, \dots, M')$ 为星座图第一象限中的星座点, s_s 满足 $\mathcal{R}(s_s), \mathcal{J}(s_s) \geq 0$ 。然后将估计得到的 $\hat{u}$ 代入到式(6)中, 解出相应的星座调制符号。

为进一步降低 EMF 算法中激活天线索引检测的复杂度, 对给定的星座方案, 可以利用星座特性得到对应的简化算法, 对式(8)进行近似, 仅采用判决激活天线的主要成分, 简化后的判决矩阵可写为

$$\mathbf{G} = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (10)$$

式中, $\mathbf{P} = [| \mathcal{R}(\mathbf{Z}) |, | \mathcal{J}(\mathbf{Z}) |]$; $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_v^T]$ 与调制方式有关, $\mathbf{X}$ 中的元素 $\mathbf{x}_v$ 为星座的单位模向量, 针对不同的 APM(幅度相位调制)星座, 其对应的单位模不同。根据式(10)的判决矩阵, SM-MIMO 系统的激活天线索引估计为

$$\hat{u} = \arg \max \{ G(u, v) \}, \quad (11)$$

式中, $G(u, v)$ 表示判决矩阵 $\mathbf{G}$ 的第 u 行第 v 列元素。然后将得到的激活天线索引 $\hat{u}$ 代入到式(6)中, 解出相应的星座调制符号。

如上所述, 基于信道列向量模值归一化的检测算法存在误差传播, 主要原因是需要预先判断激活天线的位置, 然后根据该索引值解调出相应的调制符号, 天线索引检测的正确率直接影响了调制符号检测的正确率。为了更好地权衡系统的性能与复杂度, 可以利用上面的判决矩阵 $\mathbf{G}$, 根据公式(12)对所有可能的天线索引按照激活概率大小进行排序, 然后选取 T 个激活概率大的天线索引求最优解。首先定义基于排序的 MF 判决向量为

$$\mathbf{G}' = [g_1^{\max}, \dots, g_{N_t}^{\max}]^T, \quad (12)$$

式中, $g_u^{\max} (u = 1, \dots, N_t)$ 表示判决矩阵 $\mathbf{G}$ 的第 u 行元素的最大值。设 $\mathbf{G}'$ 按照元素 $g_u^{\max} (u = 1, \dots, N_t)$ 的模值大小进行降序排列, 初始天线索引集合表示为 $U = [1, \dots, N_t]$, 则排序后得到的判决向量和天线索引分别为 $\mathbf{G}'_0 = [\max_1, \dots, \max_k, \dots, \max_{N_t}]$ 和 $\bar{U} = [u_1, \dots, u_k, \dots, u_{N_t}]$, 其中 u_1 为激活概率最大的天线索引, u_{N_t} 为激活概率最小的天线索引。

通过选取 $\mathbf{G}'_0$ 的前 T 个值, 分别进行解调得到对应的调制星座点向量 $\mathbf{S}' = [s_{u_1}, \dots, s_{u_k}]$, 结合激活天线索引可得 T 个估计到的向量:

$$\mathbf{K}^t = [\underbrace{0, \dots, 0}_{u_t-1}, \underbrace{s_{u_k}, 0, \dots, 0}_{N_t-u_t}], \quad t = 1, \dots, T, \quad (13)$$

最后, 利用 ML 准则, 在 T 个候选向量中求得最终的激活天线索引 $\hat{u}$ 和星座点向量 $\hat{s}$

$$\begin{aligned} \{\hat{u}, \hat{s}\} = & \arg \min \| \mathbf{Z} - \| \mathbf{h}_u \| \mathbf{K}^t \|^2 = \\ & \arg \min \| \mathbf{Z}^{u_t} / \| \mathbf{h}_u \| - s_{u_t} \|^2. \quad (14) \end{aligned}$$

3 复杂度分析

本文使用复数乘法的次数来衡量算法的检测复杂度; 两个复数相乘需要 4 次实数乘积运算。我们将传统的 ML 算法、EMF 算法和 NMF 算法与本文改进的 MF 算法进行计算复杂度的比较。在文献[4]中, 基于 ML 准则的传统 SM 系统信号检测需要 $6N_r N_t 2^Q$ 次复数乘法, EMF 和 NMF 实数乘法的次数分别为 $(6N_r + 3)N_t + (N_t + 2)N_t 2^Q$ 和 $(6N_r + 3)N_t + 2N_t \nu + 2$, 其中 Q 表示调制阶数。本文提出的改进的 MF 算法实数乘法次数为

$$C_{\text{improved}} = (6N_r + 3)N_t + 2N_t \nu T + 2T, \quad (15)$$

式中, T 表示候选集个数。当 $T = 1$ 时, 改进的算法的复杂度与 NMF 相同。改进的 MF 算法系统复杂度随候选集个数 T 线性增长, 而 EMF 方案的检测复杂度随调制阶数的改变呈指数增长。特别地, 在 $T = 3$ 时, 改进的 MF 检测性能非常接近 EMF 的性能, 因此, 在高速率传输的 MIMO 系统中, 两者复杂度差别会更加明显。例如, 当 $N_t = N_r = 8, N_A = 1$ (N_A 表示激活天线数) 时, 分别采用 $Q = 4$ 与 $Q = 6$ 的 QAM 调制, 改进算法的 $T = 3$, 各算法复数乘法次数的统计如表 1 所示。

表 1 不同调制阶数下各算法的计算复杂度

检测算法	检测性能	调制阶数 Q	实数乘法次数
ML 算法	最优	4	6 144
		6	24 576
EMF 算法	次优	4	1 688
		6	5 528
NMF 算法	次优	4	458
		6	618
改进 MF 算法	次优	4	510
		6	1 038

4 仿真分析

对改进的 MF 算法在不同 T 值的情况下进行仿真, 再与 EMF 和 NMF 检测算法进行比较。仿真中, $\mathbf{H}$ 为准静态瑞利衰落信道, 接收端对 $\mathbf{H}$ 完全已知。分别采用改进的 MF ($T = 1, 2, \dots, 4$)、EMF 和 NMF 算法进行信号检测。当 $N_t = N_r = 8, N_A = 1, Q = 4$, SNR (信噪比) 为 $0 \sim 20$ dB 时, 不同检测算法的系统 BER 性能仿真曲线如图 2 所示。

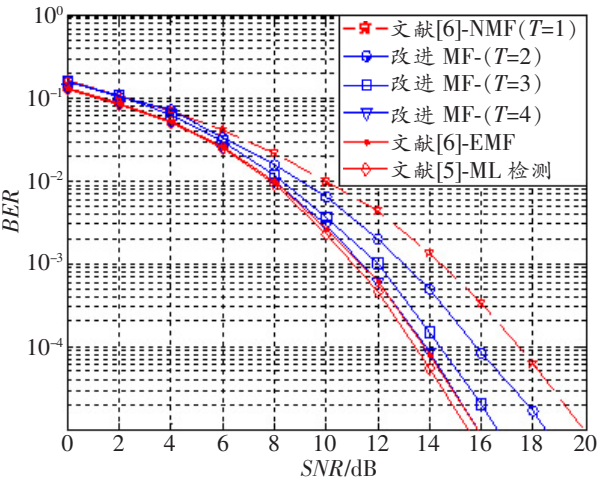


图 2 不同算法的性能比较

由图可知,当 $T=1$ 时,系统性能曲线与 NMF 完全重合,即 NMF 是改进算法的一个特例;当取不同的 T 值,改进的 MF 检测算法在 SNR 为 14~18 dB 时,与 NMF ($T=1$) 算法相比 BER 性能提升一个数量级。同时,随着 T 值的增大,系统性能的提升越来越明显;特别地,当 $T=4$ 时,改进的算法能获得近似 EMF 检测一样的 BRE 性能。为了权衡系统性能与复杂度,下文仿真中我们都将 T 设置为 4。

为进一步验证改进的检测算法在高速率传输 MIMO 系统中的性能,仿真了不同调制阶数 ($Q=4$ 与 $Q=6$) 时改进的 MF 算法、NMF 算法和 EMF 算法的性能,结果如图 3 所示。

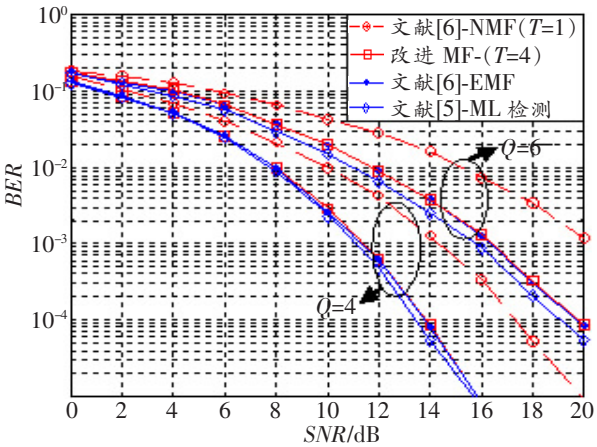


图 3 不同传输速率下各检测算法的性能曲线图

由图 3 中比较可知,不同调制阶数下改进的 MF ($T=4$) 检测算法 BER 性能曲线完全近似 EMF 算法,且性能远远优于文献[6]中的 NMF 检测。因为当 $T=4$ 时,改进的 MF 算法考虑了多数发射天线被激活的可能,可通过简单的 MF 算法求得此激活天线上发射的星座映射符号,最后综合这些估计

符号,利用 ML 准则得到最优解,此检测过程本质上即为 ML 检测。

5 结束语

在 SM 系统中,BER 性能最优的 ML 算法需要对激活天线序号与星座调制符号的所有组合情况进行搜索,计算复杂度极高。因此,MF 算法被应用于 SM 系统中,其核心思想是先解调激活天线索引号,再解调激活天线上对应的星座调制符号,以牺牲系统 BER 为代价,降低计算复杂度。EMF 算法通过穷搜索信号空间获得近似 ML 性能^[5];而 NMF 算法通过减少搜索的空间来降低系统复杂度。本文结合 EMF 和 NMF 算法,通过引入一个候选集个数因子有效权衡系统性能与复杂度。改进的 MF 算法的 BER 性能近似 EMF,且计算复杂度相对较低,特别在高速率的 MIMO 通信系统中,优势更加明显。因此,在未来的绿色通信系统中,本文提出的算法具有一定研究意义和运用价值。

参考文献:

[1] Mesleh R, Haas H, Sinanovi S, et al. Spatial modulation [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2010, 57(4): 2228—2241.

[2] Renzo M D, Haas H, Ghayeb A. Spatial modulation for multiple antenna wireless systems-A survey [J]. IEEE Communications Magazines, 2011, 49(12): 182—191.

[3] Jeganathan J, Ghayeb A, Szczecinski L. Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis [J]. IEEE Commun Letter, 2008, 12(8): 545—547.

[4] Tang Qian, Xiao Yue, Yang Ping, et al. A New Low-complexity Near-ML Detection Algorithm for Spatial Modulation [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(1): 90—93.

[5] Rajashekar Rakshith, Hari K V S, Hanzo, et al. Reduced-Complexity ML Detection and Capacity-Optimized Training for Spatial Modulation Systems [J]. IEEE Trans on Common, 2014, 62(1): 112—125.

[6] Xu C, Sugiura S, Ng S X, et al. Reduced-complexity non-coherently detected differential space-time shift keying [J]. IEEE Signal Process Letter, 2011, 18(3): 153—156.

[7] Sugiura S, Xu C, Ng S X, et al. Reduced-complexity coherent versus non-coherent QAM-aided space-time shift keying [J]. IEEE Trans Common, 2011, 59(11): 3090—3101.