

接收空间调制信道容量计算及其鲁棒性设计

吴飞龙^{1,2}, 王文杰¹, 刘超文¹, 姚博彬³

(1. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国空间技术研究院
西安分院, 710100, 西安; 3. 长安大学电子与控制工程学院, 710064, 西安)

摘要: 针对接收空间调制(RSM)系统中信道输入为有限码集导致香农容量公式不适用于 RSM 信道容量计算的问题,通过分析信道输入输出之间的互信息,推导了发射机拥有完美信道信息情况下的 RSM 系统的信道容量表达式,并进一步给出发射机的信道信息存在误差时具有鲁棒性的 RSM 预编码矩阵设计(RRSM)方法。该方法将二进制数据流映射成某根期望接收天线空间序号和传统调制符号,把它们作为 RSM 系统的信道输入,经发射预编码后得到信道输出;然后采用迫零算法使得信号功率在选定的期望接收天线处聚集而在其他接收天线处迫零,用所选定的期望接收天线的空间序号来传输额外信息比特;最后考虑 RSM 发射机的信道状态信息有误差,根据最小均方误差准则建立目标函数,求解得到 RSM 最优的鲁棒预编码矩阵。数值仿真实验表明:当发射机的信道状态信息误差的方差为 0.3 时,RRSM 方法相比原始的 RSM 方法可使最优检测在误码率为 10^{-4} 时获得 1 dB 性能增益,次优检测在误码率为 10^{-2} 时获得 2 dB 增益。

关键词: 空间调制;信道容量;互信息;迫零;预编码

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)02-0049-06

On the Channel Capacity of Receive Spatial Modulation and Its Robust Design

WU Feilong^{1,2}, WANG Wenjie¹, LIU Chaowen¹, YAO Bobin³

(1. Ministry of Education Key Lab for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China;
3. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The capacity of receive spatial modulation (RSM) is developed to solve the problem that Shannon capacity cannot evaluate the performance of RSM with finite-alphabet inputs by analyzing the mutual information between the channel inputs and outputs, and a robust RSM with imperfect channel state information (CSI) is proposed to improve the bit error rate performance. The channel inputs of RSM are discrete spatial modulation symbols formed by combinations of a conventional modulation symbol and the spatial index of the expected receive antenna, both of which are carrying binary source information. Then, zero forcing pre-coding is used by the transmitter with perfect CSI to focus the signal power on that selected receive antenna while the signal powers on other receive antennas are forced to zero. The spatial index of the selected receive antenna can be easily detected and decoded for extra information bits. When there exists imperfect CSI at the transmitter, an object function based on the minimum mean square

error principle is constructed to find the optimal robust RSM pre-coding matrix. Results from numerical simulation and comparisons with the original RSM show that the proposed robust RSM achieves 1 dB performance gain for the optimal RSM detection at BER of 10^{-4} and 2 dB gain for the suboptimal RSM detection at BER of 10^{-2} when the variance of the transmitter's CSI error is 0.3.

Keywords: spatial modulation; channel capacity; mutual information; zero forcing; precoding

多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)无线通信系统由于在发端和收端同时采用多天线技术,不仅可以提供分集增益,还可以提供复用增益,极大地提高了数据传输的能量效率和频谱效率,是未来移动通信中极具发展前景的一项技术。经典的 MIMO 技术包括 STBC 系统^[1]、贝尔实验室提出的 V-BLAST 系统^[2]等,但上述 MIMO 系统为了获得理想的性能增益要求发射天线严格同步,同时接收端译码复杂度较高,以最大似然译码为例,复杂度随着发射天线的数量呈指数增长。并且,在实际通信环境中,还由于信道间干扰使得理论上的性能增益大打折扣。

为了克服上述传统 MIMO 技术的缺点同时又要获得多天线技术带来的容量增益,新近提出的空间调制(spatial modulation, SM)^[3]技术是一个新的研究热点。在 SM 中,发射机每次只激活一条射频链路,除利用传统的星座调制(PSK、MQAM)外,激活的发射天线的序号也被映射成二进制比特信息。在接收端,通过检测发射天线序号和传统基带调制符号来恢复信息比特。这样,一方面 SM 可以获得多天线带来的频谱效率的提升,另一方面由于每次只有一根天线激活,克服了信道间干扰和发射同步的缺点。后续的研究表明,SM 系统的接收机检测算法复杂度相比前述 MIMO 技术降低很多^[4]。如果仅仅用天线的序号来传递信息而没有传统基带调制,称之为空间键控调制(space shift key, SSK)技术^[5]。很明显,SSK 是当 SM 中的传统调制阶数为 1 时的特例。如果发射天线每次激活 2 根或更多天线,用被激活的发射天线组合的序号来传输信息则称之为推广的空间调制(generalized spatial modulation, GSM)^[6-8]。先前大多数的 SM 研究都将发射机的天线序号作为额外的空域星座图来传递信息,并且假设接收机有准确的信道信息(channel state information at receiver, CSIR)。与之相对的是,文献[9]首先考虑了将接收天线的序号用来传递额外的信息,本文称之为接收空间调制(receive spatial modulation, RSM)。RSM 中假设发射机有完整的

信道信息(channel state information at transmitter, CSIT),激活所有发射天线,通过线性预编码技术^[10]使得发射信号功率在某根选定的接收天线处聚集,而在其他接收天线处迫零。被选定的接收天线的序号将作为 SSK 符号来传输数据。文献[11]将 RSM 做了与 SM 相对应的推广,用被选定的接收天线的组合序号来传输额外信息比特。

无论 SM 还是 RSM,其输入均是有限码集的离散输入,因而其信道容量不能依据高斯输入假设下的香农公式计算。SM 的容量在文献[12]已经做了初步分析,但该文仅仅讨论了接收机单根天线时的情况,还不能够推广到接收机多根天线时的 SM 系统容量计算。本文着重分析收发机均配置多根天线的 RSM 信道容量,它可以由 MIMO 信道的输入输出互信息得到。针对获得的 RSM 容量表达式中涉及多重积分不易获得闭式解,本文给出了基于蒙特卡罗积分的数值解。由于在实际通信中由发射机很难得到精确的信道信息,这样会对基于发射预编码的 RSM 系统性能有严重影响,因此本文还依据最小均方误差准则提出了一种鲁棒的 RSM(RRSM)预编码矩阵设计方法,能够有效降低信道估计误差时 RSM 系统的误码率。

1 RSM 系统模型

考虑一个 MIMO 平衰落系统,发射机装备 N_t 根天线,接收机的天线数量为 $N_r = 2^{k_1}$ 。系统采用 $M = 2^{k_2}$ 阶幅相调制(例如 MQAM、MPSK),其调制符号集记为 $\{b_1, \dots, b_m, \dots, b_M\}$, $E|b_m|^2 = 1$ 。假定一组长为 $k_1 + k_2$ 的输入比特流经映射后选定第 i ($1 \leq i \leq N_r$) 根接收天线和第 m 个幅相调制符号 b_m ,它们组合成的空间调制符号记为 $s_{i,m}$ 。显然,接收机可以从接收到的 $s_{i,m}$ 中解调出总共 $k_1 + k_2$ 比特信息,其中时域幅相调制符号 b_m 载有 k_2 比特信息,另外的 k_1 比特信息是由 SSK 调制符号 i 传递的。 $s_{i,m}$ 可以表示为

$$s_{i,m} = \mathbf{e}_i b_m \quad (1)$$

式中: $\mathbf{e}_i$ 是 N_r 维的列向量,第 i 个元素为 1,其余元

素均为0,即 $\mathbf{e}_i = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$ 。

对空间调制符号 $\mathbf{s}_{i,m}$ 进行预编码并发射到无线信道后,接收机的每个符号持续期内收到信号为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{s}_{i,m} + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}$ 是 $N_r \times N_t$ 维信道复增益矩阵; $\mathbf{P}$ 是 $N_t \times N_r$ 维的预编码矩阵; $\mathbf{n}$ 是接收天线上的零均值复高斯噪声向量,其每个元素的方差为 $\sigma_n^2 = 1/\gamma_s = 1/[(k_1 + k_2)\gamma_b]$, γ_s 表示每符号信噪比, γ_b 表示每比特信噪比。

为了消除 MIMO 信道间干扰对接收机的影响,确保没有能量泄漏到接收机的非期望天线上,设计了一种很自然的线性预编码矩阵,满足下式

$$\mathbf{H}\mathbf{P} = \beta \mathbf{I} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I}$ 是 N_r 阶单位矩阵; β 是功率调整系数; $\mathbf{P}$ 满足功率约束 $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) = N_r$ 。

当发射机得到准确的信道信息 $\mathbf{H}$ 时,式(3)的解即迫零(zero forcing, ZF)解

$$\mathbf{P} = \beta \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (4)$$

式(4)ZF 解存在的必要条件是 $N_t \geq N_r$, 并且满足功率约束的 β 可通过简单的矩阵运算得到: $\beta = \{N_r / \text{tr}[(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}]\}^{1/2}$ 。

按上述思想设计预编码矩阵后,将式(4)代入式(2),接收机收到的信号可以重新写为

$$\mathbf{y} = \beta \mathbf{s}_{i,m} + \mathbf{n} \quad (5)$$

式(5)可以根据式(1)进一步分解为

$$\left. \begin{aligned} y_i &= \beta b_m + n_i \\ y_k &= n_k, \forall k \neq i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据式(5),接收机可以采用最大似然检测算法对 SSK 符号 i 和传统调制符号 b_m 联合检测

$$[\hat{i}, \hat{m}] = \arg \min_{i \in \{1, \dots, N_r\}, m \in \{1, \dots, M\}} \{ \|\mathbf{y}/\beta - \mathbf{s}_{i,m}\|^2 \} \quad (7)$$

或根据式(6)采用低复杂度的次优检测算法,即先检测 SSK 符号 i ,再检测传统调制符号 b_m

$$\left. \begin{aligned} \hat{i} &= \arg \max_{i \in \{1, \dots, N_r\}} \{ |y_i|^2 \} \\ \hat{b}_m &= \arg \min_{b_m \in \{b_1, \dots, b_M\}} \{ |y_i/\beta - b_m|^2 \} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

采用最大似然译码时,RSM 接收机按照式(7)的最优译码复杂度为 $O(MN_r)$,而经典的 V-BLAST 系统的译码复杂度为 $O(M^{N_r})$ 。进一步,若 RSM 接收机采用式(8)次优检测的计算复杂度可以减少到大约为 $O(M)$,因而 RSM 系统中接收机结构简单,非常适合下行链路的数据传输。

2 RSM 容量分析

经典香农信道容量及其在 MIMO 信道下的推

广公式均假设输入信号服从连续高斯分布,然而对于 SM 和 RSM 来讲,传输信息的 SSK 符号和传统基带调制符号都是有限码集的离散输入。因此,经典的香农容量计算公式不能直接应用于 SM 或 RSM 的容量分析。文献[12]只分析了较为简单的单根接收天线的 SM 容量,不能推广到多根接收天线时的 SM 容量分析。本文以下主要分析收发机均配置多天线并经发射预处理的 RSM 容量。

为了表述方便,将输入符号 $\mathbf{s}_{i,m}$ 简记为 $\mathbf{s}_\tau$ ($\tau=1, \dots, MN_r$)。经过给定的信道 $\mathbf{H}$ 传输后,接收信号 $\mathbf{y}$ 的条件概率密度函数为

$$f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\tau) = \frac{1}{(\pi\sigma_n^2)^{N_r}} \exp\left\{-\frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{s}_\tau\|^2}{\sigma_n^2}\right\} \quad (9)$$

假定经过信道编码和交织后,由二进制数据流映射成对应的 $\mathbf{s}_{i,m}$ 中 m 对其所有取值均是等可能的,即 $f(\mathbf{s}_\tau) = \frac{1}{MN_r}$ 。该有限码集输入的 RSM 信道容量可由输入输出之间的互信息得到

$$C = I(\mathbf{s}, \mathbf{y}) = \sum_{\tau=1}^{MN_r} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{s}_\tau, \mathbf{y}) \text{lb} \frac{f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\tau)}{f(\mathbf{y})} d\mathbf{y} \quad (10)$$

利用式(9)可以简化式(10)中积分项的表达式

$$\begin{aligned} \text{lb} \frac{f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\tau)}{f(\mathbf{y})} &= \text{lb} \frac{f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\tau)}{\frac{1}{MN_r} \sum_{\epsilon=1}^{MN_r} f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\epsilon)} = \\ &= \text{lb}(MN_r) - \text{lb} \frac{\sum_{\epsilon=1}^{MN_r} f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\epsilon)}{f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\tau)} = \text{lb}(MN_r) - \\ &= \text{lb} \sum_{\epsilon=1}^{MN_r} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{H}\mathbf{P}(\mathbf{s}_\tau - \mathbf{s}_\epsilon) + \mathbf{n}\|^2 + \|\mathbf{n}\|^2}{\sigma_n^2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)并由 $f(\mathbf{s}_\tau, \mathbf{y}) = \frac{1}{MN_r} f(\mathbf{y} | \mathbf{s}_\tau)$ 得

$$\begin{aligned} C &= \text{lb}(MN_r) - \\ &= \frac{1}{MN_r} \sum_{\tau=1}^{MN_r} E_n \left\{ \text{lb} \sum_{\epsilon=1}^{MN_r} \exp\left[-\frac{\|\mathbf{H}\mathbf{P}(\mathbf{s}_\tau - \mathbf{s}_\epsilon) + \mathbf{n}\|^2 + \|\mathbf{n}\|^2}{\sigma_n^2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $E_n(\cdot)$ 表示 $(\cdot)$ 关于变量 $\mathbf{n}$ 的期望。

由于式(12)是在单次信道实现下的容量,因此衰落信道下的容量还需对信道取平均

$$C_{\text{fading}} = E_H \{C\} \quad (13)$$

值得指出的是,式(12)中关于噪声 $\mathbf{n}$ 分布的期望运算涉及到多维积分,直接求解比较困难,但是可

以通过蒙特卡罗仿真得到相对精确的数值解^[13]。由式(12)可以看出,RSM系统信道容量的上界由传统调制阶数 M 和接收天线数量 N_r 的乘积决定,这也符合直观上的理解,即发射一个RSM符号最多能传递 $\lg(MN_r)$ 比特的信息。

3 鲁棒的RSM预编码矩阵设计

实际通信中,发射机想要得到精确的下行信道状态信息是十分困难的。在时分双工系统中,CSIT可以根据信道互易原理通过反向信道估计得到;在频分双工系统中,CSIT可由接收机反馈得到^[14]。由于无线信道的时变特性和反馈时的量化误差等因素,发射机得到信道信息不可避免的存在估计误差。一种常用的信道估计误差模型是 $\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}} + \Delta\mathbf{H}$ 。在此模型中, $\mathbf{H}$ 是真实信道信息, $\bar{\mathbf{H}}$ 表示发射机估计出的信道信息, $\Delta\mathbf{H}$ 表示信道估计误差,假设其中的元素服从零均值独立复高斯分布,方差为 σ_2^2 。本文根据此信道估计模型设计一种鲁棒的预编码矩阵。

从式(3)不难看出,求解满足要求的预编码矩阵 $\mathbf{P}$ 等同于设计 $\mathbf{P}$ 中的每一列得到以下目标函数的最优解

$$\min_{\mathbf{p}_i} E\{\|\mathbf{H}\mathbf{p}_i - \beta\mathbf{e}_i\|^2\}, \forall i = 1, \dots, N_r \quad (14)$$

将 $\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}} + \Delta\mathbf{H}$ 代入式(14),并结合 $E\{\Delta\mathbf{H}\} = 0$ 得

$$\min_{\mathbf{p}_i} \|\bar{\mathbf{H}}\mathbf{p}_i - \beta\mathbf{e}_i\|^2 + \mathbf{p}_i^H E\{\Delta\mathbf{H}^H \Delta\mathbf{H}\} \mathbf{p}_i \quad (15)$$

上述问题显然是一个凸优化问题,最优解可通过令上述目标函数的梯度为零得到

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i &= \beta(\bar{\mathbf{H}}^H \bar{\mathbf{H}} + E\{\Delta\mathbf{H}^H \Delta\mathbf{H}\})^{-1} \bar{\mathbf{H}}^H \mathbf{e}_i = \\ &= \beta(\bar{\mathbf{H}}^H \bar{\mathbf{H}} + N_r \sigma_2^2 \mathbf{I}_{N_t})^{-1} \bar{\mathbf{H}}^H \mathbf{e}_i = \\ &= \beta \bar{\mathbf{H}}^H (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{H}}^H + N_r \sigma_2^2 \mathbf{I}_{N_r})^{-1} \mathbf{e}_i \end{aligned} \quad (16)$$

根据式(16),对所有 $\mathbf{p}_i$ 则有

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{N_r}] = \beta \bar{\mathbf{H}}^H (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{H}}^H + N_r \sigma_2^2 \mathbf{I}_{N_r})^{-1} \quad (17)$$

考虑到功率约束 $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) = N_r$, β 须满足 $\beta = \{N_r / \text{tr}[\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{H}}^H (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{H}}^H + N_r \sigma_2^2 \mathbf{I}_{N_r})^{-2}]\}^{1/2}$ 。注意到式(17)形式上与文献[9]中能够抑制接收机噪声的最小均方误差解类似,而最小均方误差解要优于式(4)中ZF解。因此,预编码矩阵若按照式(17)设计,不仅可以补偿由于信道估计误差带来的性能下降,还能一定程度上抑制接收噪声,这一点可以从下面的仿真中看到。

4 仿真结果与分析

本节将给出一些数值仿真结果验证前述理论推

导以及算法,并分析参数设置对系统性能影响。

本文假设多天线系统中无线信道 $\mathbf{H}$ 的衰落服从瑞利分布,即 $\mathbf{H}$ 中所有元素均为0均值、单位方差的独立复高斯随机变量。图1中的RSM容量曲线是根据式(12)、(13)通过蒙特卡罗仿真得到的结果。由图1可见,RSM容量的上界与 N_t 的大小无关,完全由 MN_r 的乘积决定;对于 $3 \text{ b} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的RSM传输, $N_r = 2$ 、QPSK的参数组合比 $N_r = 4$ 、BPSK的组合能获得更大容量;对于 $4 \text{ b} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的RSM系统, $N_r = 4$ 、QPSK的组合获得的信道容量最大。

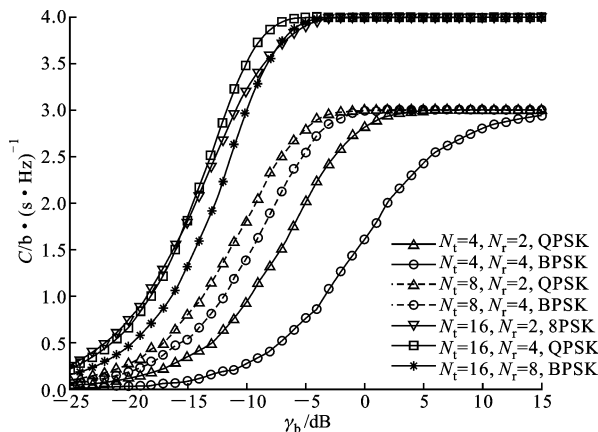


图1 RSM的信道容量

有限码集输入的多发单收(multiple input single output, MISO)系统的容量也可将 $N_r = 1$ 、相应调制阶数 M 代入式(12)、(13)得到。本文仿真对比了相同频谱效率 $4 \text{ b} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 下的RSM系统与MISO发射波束成形的信道容量,以及发射天线数 N_t 对RSM信道容量的影响,结果如图2所示。从图2中可以看出, N_t 的大小不影响RSM容量的上界,但由于较大的 N_t 提供了更多的分集增益,能够在更低的信噪比下达到RSM容量上界。进一步,观察图2发现,当 $N_t = 5$ 时,RSM的容量曲线在图示信噪比范围内均位于MISO波束成形容量曲线下方;不断增加 N_t ,两者的容量曲线会有交点, $N_t = 10$ 时交点大约在 -13 dB 处, $N_t = 15$ 时在 -18 dB 处;继续增加 N_t 到20时,RSM的容量超过MISO波束成形的容量。这是由于RSM发射机至少需要抽出 N 个自由度用于迫零以消除信道间干扰, N 较小时只能剩下较少的自由度用于提供发射分集增益,导致低信噪比时其系统容量不如MISO系统。当大量增加发射天线个数时($N_t = 20$),除用于信道迫零外,剩下用于提供发射分集增益的自由度此时足够多,因而在更大信噪比范围内RSM系

统容量均高于 MISO 容量。

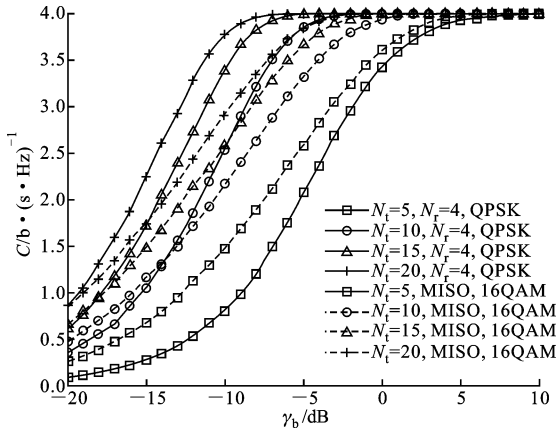


图 2 N_t 对 RSM、MISO 容量曲线的影响

图 3 仿真了本文提出的鲁棒的预编码对 RSM 系统存在信道估计误差时的误码率性能。此处仍然考虑瑞利衰落信道,当发射机获得的信道信息准确时,信道矩阵 $\mathbf{H}$ 建模为所有元素服从 0 均值独立复高斯分布,方差 $\sigma_u^2=1$;当发射机获得的信道信息有误差时, $\mathbf{H}$ 建模为 2 个 0 均值独立复高斯矩阵的和 $\mathbf{H}=\bar{\mathbf{H}}+\Delta\mathbf{H}$ 。 $\bar{\mathbf{H}}$ 、 $\Delta\mathbf{H}$ 的方差分别为 σ_1^2 、 σ_2^2 并且 $\sigma_1^2+\sigma_2^2=1$ 。仿真中 RSM 系统参数为 $N_t=10, N_r=4$, 采用格雷映射的 QPSK 调制进行 100 000 次独立实验并取平均。图 3 中的 RSM 最优检测对应于式(7)的算法,次优检测对应于式(8)的算法。可以看到,在理想信道信息($\sigma_2^2=0$)情况下,RSM 次优检测能以较低的计算复杂度获得与最优检测十分接近的 BER 性能。当存在严重的信道估计误差 $\sigma_2^2=0.3$ 时,非鲁棒的 RSM 最优检测相比 $\sigma_2^2=0$ 时大约损失 2 dB,而非鲁棒的 RSM 次优检测误码率性能则不理想,在信噪比增加到 10 dB 时出现地板。这是由于发射机根据不准确的信道信息设计出的预编码矩

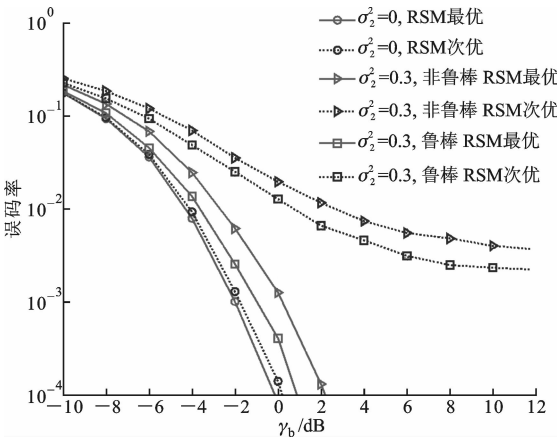


图 3 鲁棒 RSM 与非鲁棒 RSM 的误码率性能对比

阵无法完全消除信道间干扰,接收信号的功率在非期望天线处不能迫零,使得式(8)的非相干检测算法误码率非常高。进一步,对于信道估计误差 $\sigma_2^2=0.3$,采用本文提出的鲁棒的 RSM 可以比非鲁棒的 RSM 在最优检测时提供 1 dB 性能增益(误码率为 10^{-4} 时),次优检测时提供大约 2 dB 性能增益(误码率为 10^{-2} 时)。

5 结束语

RSM 技术作为一种新的 MIMO 传输方案不仅可以有效降低接收机检测算法的复杂度和和信道间干扰,同时也能获得发射分集以及空域信息带来的系统容量的提升。针对 RSM 系统中输入为有限码集的实际情况,本文从信道输入输出互信息角度分析了接收空间调制技术在完美信道信息下的信道容量,并进一步考虑在实际通信中发射机信道信息有误差时,根据最小均方误差准则设计了一种鲁棒的 RSM 预编码矩阵。仿真实验结果表明,该预编码矩阵可以有效降低 RSM 系统的误码率。

参考文献:

[1] TAROKH V, JAFAHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block coding for wireless communications: performance results [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(3): 451-460.

[2] FOSCHINI G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Bell Labs Technical Journal, 1996, 1(2): 41-59.

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

[4] MALEKI M, BAHRAMI H R, ALIZADEH A, et al. On the performance of spatial modulation: optimal constellation breakdown [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(1): 144-157.

[5] JEGANATHAN J, GHRAYEB A, SZCZECINSKI L, et al. Space shift keying modulation for MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3692-3702.

[6] FU Jinlin, HOU Chunping, XIANG Wei, et al. Generalized spatial modulation with multiple active transmit antennas [C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 839-844.

[7] WANG Jintao, JIA Shuyun, SONG Jian. Generalized

- spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4): 1605-1615.
- [8] XIAO Yue, YANG Zongfei, DAN Lilin, et al. Low-complexity signal detection for generalized spatial modulation [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3): 383-386.
- [9] YANG Lie-liang. Transmitter preprocessing aided spatial modulation for multiple-input multiple-output systems [C]// Proceedings of 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 565-573.
- [10] 孟银阔, 殷勤业, 田红波, 等. 多输入多输出系统下行链路发射与接收的联合线性预编码 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 475-478.
- MENG Yinkuo, YIN Qinye, TIAN Hongbo, et al. Joint linear precoding of transmit and receive for multiple input multiple output downlink system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(4): 475-478.
- [11] ZHANG R, YANG L L, HANZO L. Generalized precoding aided spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(11): 5434-5442.
- [12] GUAN Xinrong, CAI Yueming, YANG Weiwei. On the mutual information and precoding for spatial modulation with finite alphabet [J]. IEEE Wireless Communications Letter, 2013, 4(2): 383-386.
- [13] SOON X, HANZO L. On the MIMO channel capacity of multidimensional signal sets [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(2): 528-536.
- [14] 王绍鹏, 朱世华, 张国梅. 正交频分复用分组传输系统中载波频偏和信道的联合估计 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 739-742.
- WANG Shaopeng, ZHU Shihua, ZHANG Guomei. Combined carrier frequency offset and channel estimation for orthogonal frequency division multiplexing packet transmission systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6): 739-742.

(编辑 刘杨)

(上接第5页)

- Symposium on Operating Systems Principles. New York, NY, USA: ACM, 2009: 261-276.
- [4] REN Z, XU X, WAN J, et al. Workload analysis, implications, and optimization on a production hadoop cluster: a case study on Taobao [J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2014, 7(2): 307-321.
- [5] ZAHARIA M, CHOWDHURY M, FRANKLIN M J, et al. Spark: cluster computing with working sets [C]// Proceedings of the 2nd USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010: 10.
- [6] HENDERSON R L. Job scheduling under the portable batch system [C]// Proceedings of the Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Berlin, Germany, : Springer-Verlag, 1995: 279-294.
- [7] FREY J, TANNENBAUM T, LIVNY M, et al. Condor-G: a computation management agent for multi-institutional grids [J]. Cluster Computing, 2002, 5(3): 237-246.
- [8] HINDMAN B, KONWINSKI A, ZAHARIA M, et al. Mesos: a platform for fine-grained resource sharing in the data center [C]// Proceedings of the 8th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2011: 295-308.
- [9] VAVILAPALLI V K, MURTHY A C, DOUGLAS C, et al. Apache hadoop yarn: yet another resource negotiator [C]// Proceedings of the 4th Annual Symposium on Cloud Computing. New York, NY, USA: ACM, 2013: 1-16.
- [10] ZAHARIA M, BORTHAKUR D, SARMA J S, et al. Job scheduling for multi-user Mapreduce clusters[R]. Berkeley, California, USA: EECS Department, University of California, Berkeley, 2009: 1-16.
- [11] ZAHARIA M, BORTHAKUR D, SEN SARMA J, et al. Delay scheduling: a simple technique for achieving locality and fairness in cluster scheduling [C]// Proceedings of the 5th European Conference on Computer Systems, New York, NY, USA: ACM, 2010: 265-278.
- [12] ELMELEEGY K. Piranha: optimizing short jobs in hadoop [J]. Proceedings of the Very Large Data Base Endowment, 2013, 6(11): 985-996.
- [13] ZAHARIA M, KONWINSKI A, JOSEPH A D, et al. Improving MapReduce performance in heterogeneous environments [C]// Proceedings of the 8th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2008: 29-42.

(编辑 武红江)