

无线通信中空间调制 MIMO 技术的研究现状与展望

虞湘宾 邱赛男 王 丞

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要: 空间调制 (Spatial modulation, SM) 技术借助于天线序号“隐形”地传输信息, 能够获得高数据传输速率, 而且可有效克服信道间的干扰和同步问题, 降低系统的实现复杂度。多输入多输出 (Multiple input multiple output, MIMO) 技术, 能够极大地提高无线通信系统的容量和频谱效率。为了满足无线通信系统高质量和高速率的要求, 将 SM 和 MIMO 技术有效结合, SM-MIMO 技术应运而生, 成为近年来无线通信领域研究的热点方向。本文从基本原理和性能分析两方面介绍了 SM-MIMO 技术及其研究现状, 并且探讨了 SM-MIMO 技术的应用前景。同时也对近年来国内外研究团队在 SM-MIMO 方面的研究成果进行了综述和概括, 最后对该领域的未来研究工作进行了分析和展望。

关键词: 空间调制; 多输入多输出; 容量; 误比特率; 广义空间调制; 空移键控

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A

Research Status and Prospect for Spatial Modulated MIMO Technique in Wireless Communications

Yu Xiangbin, Qiu Sainan, Wang Cheng

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: By using the antenna index to transmit information invisibly, spatial modulation (SM) technique can obtain high data transmission rate, and overcome the inter channel interference and synchronization problems effectively, as well as reduce the implementation complexity. Multiple input multiple output (MIMO) technique can significantly improve the capacity and spectrum efficiency of wireless communication system. To satisfy the high quality and data rate requirements of communication system, SM-MIMO technique emerges by combining SM and MIMO techniques and thus becomes the main research hotspot in the field of wireless communication. The paper summarizes the current research advancement of SM-MIMO from the basic principles and performance analysis. The prospect of SM-MIMO in application is also addressed. Finally, both the current achievement and the further research prospect in this field are discussed and summarized.

Key words: spatial modulation; multiple input multiple output (MIMO); capacity; bit error rate; generalized spatial modulation; space shift keying

引 言

移动通信的发展与人们的日常生活息息相关。移动用户的不断增长,业务需求的不断高涨,使得移动数据呈现爆炸式增长,这就要求通信系统能提供更高的信道容量。多输入多输出(Multiple input multiple output, MIMO)技术通过在发射端和接收端配置多根天线,能够有效地提高无线通信系统的容量和频谱效率^[1-4]。因此 MIMO 技术被许多的通信标准采纳,例如 IEEE 802.11n, IEEE 802.16e 和 3GPP LTE^[5,6]。MIMO 技术可通过多个独立路径传输信号以达到空间分集^[7]的效果,从而降低系统误比特率,提高可靠性;还可实现空间复用^[8],即通过多个并行子信道传输不同信息,以提高数据传输速率。近年来 MIMO 技术不断地与新技术相结合,使得系统在获得 MIMO 信道所能达到的自由度的同时,较好地平衡计算复杂度、误比特率(Bit error rate, BER)以及可获得的传输速率这些冲突因子,从而达到系统最优性能。空间调制(Spatial modulation, SM)技术^[9]通过对天线序号进行调制来携带有效信息,能提高频谱效率,是一种低复杂度、能量有效的技术。将 SM 与 MIMO 技术相结合,可使系统能够利用发射天线序号作为一个额外的空间维度来传输信息,从而将传统的二维符号映射(幅度相位调制)扩充到三维映射^[10]。在给定的信噪比(Signal to noise ratio, SNR)下, SM-MIMO 系统的吞吐量要高于通常的空时编码^[11](Space time coding, STC)系统,但这并不是 SM-MIMO 技术最突出的优点。SM 技术通过每一时隙只激活一根或少数几根发射天线来进行数据传输,可有效克服通常 MIMO 信道间的干扰且不要求发送端天线同步^[12],并且提高了系统的频效和能效^[13,14]。除此之外,SM 在传输信息符号的基础上,还利用发射天线序号携带信息,增大了信息传输速率。而且单链路收发设计降低了收发端的实现复杂度^[15]。基于上述优点,SM 技术可以用于新兴的大规模 MIMO 系统^[16,17],还可延伸到基于光传输信息的室内可见光无线通信中^[18-21]。总之,SM 是一个发展前景十分广阔且可应用到多种场合的 MIMO 技术。本文将从基本原理和性能分析两方面介绍 SM-MIMO 技术,并且给出了 SM-MIMO 技术的应用前景。

1 SM-MIMO 的基本原理

1.1 SM 的发展

空间调制这一概念最早于 2001 年提出^[22],之后受到 Mesleh^[9], Haas^[23], Sugiura^[24], Yang^[25]以及 Jeganathan^[26]等广泛的研究。Mesleh 等在文献[9]中对 SM 技术的基本原理,性能分析方法进行了介绍,且证明了与贝尔实验室垂直分层空时码(Vertical Bell laboratory layered space-time, V-BLAST)相比具有更好的鲁棒性。文献[27]阐述了 SM 系统的发射端设计,接收端的检测算法分类以及 SM 原理研究的发展过程。文献[28,29]比较了空间相关信道下 SM-MIMO 系统的性能差异,结果表明 SM-MIMO 系统的性能会随着相关性的增大而变差。文献[30]探讨了 SM 系统发射分集的实现问题。文献[31]给出了具体调制方式的选择对 SM 系统性能的影响。性能分析是对 SM 技术进行深入研究 and 拓展的有效方法,而系统容量^[32,33]和误比特率^[34-36]是性能分析的两个重要指标。文献[37]给出了 SM 系统在 Nakagami 和瑞利衰落信道下的误比特率性能分析,并推导了瑞利信道下 BER 闭式表达式。文献[38]则针对 SM 接收端检测器提出了一种最优检测算法:天线序号与星座符号联合检测,并将其与 Mesleh^[9]提出的先检测天线序号再检测星座符号的次优检测算法相比较,最优检测虽然有较高的复杂度,但可获得最优性能。经过十几年的探索和发展,除了对 SM 本身性能的研究越来越深入,SM 还被用于不同的场景,具体见表 1。

文献[23]提出了一种新的正交空分复用(Orthogonal spatial division multiplexing, OSDM)技术,它利用发射天线的序号来传输额外源信息。文献[25]提出了一种信息引导的跳信道(Information-guided channel hopping, IGCH)调制技术,它可以使系统获得高吞吐量。之后文献[26]提出了空移键控(Space

表 1 空间调制研究进展

Tab. 1 Research progress of spatial modulation

时间/年	作者	贡献
2001	Chau 和 Yu ^[22]	介绍了 SM 的概念,并利用不同的多径衰落特性进行天线序号检测。
2002	Haas 等 ^[23]	提出了一种正交空分复用方案,通过采用 Walsh Hadamard 码和一个天线阵列实现数据复用。
2004	Song 等 ^[39]	提出了信道跳频调制技术,适用于任意发射天线数的系统。
2006	Mesleh 等 ^[40]	提出一种高效的 SM-MIMO 方案,可以将多个信息比特映射到一个星座符号和单根发射天线序号。
2008	Jeganathan 等 ^[41]	构造性提出 SSK 的概念及其改进版本的广义 SSK 技术,每一时隙可以激活多根天线来传输信息。
2009	Jeganathan 等 ^[26]	提出了 SSK 技术框架,SSK 可以看成是 SM 技术的简化,它只利用发射天线序号携带信息。
2010	Di Renzo 等 ^[42]	对于 SSK 系统,利用信道状态信息,提出一种功率分配方案,实现系统性能的改进。
	Serafimovski 等 ^[43]	介绍了分数阶位编码(FBE)-SM 方案,它允许发射端有任意的发射天线数。
2011	Renzo 等 ^[44]	介绍了时间正交信号设计 SM 技术,它可以实现发射分集。
	Yang 等 ^[45]	设计了一种引导信道跳变的位填充信息方案,消除了传统 SM 发射天线数必须为 2 的整数幂的限制。
	Qu 等 ^[46]	构想了一种块映射 SM 方案,进一步提高传输速率。
2012	Chang 等 ^[47,48]	提出了一种新的 SSK 调制技术,利用汉明编码星座设计,实现传输速率、性能和功耗之间的折中。
	Kuo 等 ^[49]	提出一种天线域的符号调制方法,在相同速率下,它的性能显著优于 SM 和 GSSK。
2013	Serafimovski 等 ^[50]	实现第 1 个室内 SM 实用测试平台(实验室环境)。
	Younis 等 ^[51]	实现室内实测信道下 SM 的首次性能评估。
2014	Yang 等 ^[52]	为了最小化系统平均误比特率,提出一种新的星形正交幅度调制 SM 方案。
	Kumbhani 等 ^[53]	给出了瑞利衰落信道下,有发射天线选择的 SM-MIMO 系统的中断概率分析。
2015	Jeon 等 ^[54]	提出一种多层次的空时编码 SM 方案,该方案在频谱效率、误比特率和检测复杂度方面显著优于其他传统传输方案。
	Wang 等 ^[55]	设计了一种新的上行链路大规模多用户 SM-MIMO 系统,进一步拓展 SM 的应用。
2016	Cui 等 ^[56]	在高速铁路的场景下,研究大规模 SM-MIMO 在空时相关莱斯衰落信道下的性能。
	Li 等 ^[57]	提出了一个虚拟的空间调制方案,可以在虚拟的平行信道下实现天线序号映射。
	Xu 等 ^[58]	通过研究大规模 MIMO 可见光通信的特点,建立了一个频谱效率和误差性能的平衡准则。

shift keying, SSK) 技术,可以看成是 SM 技术的简化,它仅利用发射天线携带信息,而没有传输星座符号,如相移键控(Phase shift keying, PSK)和正交幅度调制(Quadrature amplitude modulation, QAM)符号等^[10]。总的来说,上述所涉及的技术在任一时隙只激活一根发送天线以减小复杂度,同时降低信道间干扰以及发射端对天线同步的要求,减少了能量消耗。基于上述 SM 及其相关技术的概念,各种广义 SM 技术被相继提出。首先,作为 SSK 技术的拓展,文献[41]提出了一种广义空移键控(Generalized

space shift keying, GSSK)技术,每一时隙激活多根发射天线来传输信息,可以有效提高数据传输速率。这种形式的拓展也可以用于 SM 技术中,文献[59]提出一种广义空间调制(Generalized spatial modulation, GSM)技术,它利用所有激活的发射天线传输相同的幅度相位调制(Amplitude phase modulation, APM)符号,从而实现发射分集增益的增加。相反,文献[60,61]提出的另一种 GSM 技术在每一时隙使用激活的发射天线传输不同的信息符号,可以达到增加复用增益的目的。上述文献中,广义 SM 技术在每一时隙激活多根发射天线来进行数据传输,故可以克服 SM 中一个固有的限定缺点,即发射天线数必须为 2 的整数幂。此外,SM 技术也可以和空时分组编码(Space-time block coding, STBC)技术^[62]以及网络编码(Trellis coding, TC)技术^[63-65]相结合,充分发挥两者的优势。最近,空时移位键控(Space time shift keying, STSK)技术及其广义技术广义空时移位键控(Generalized space time shift keying, GSTSK)^[66]被进一步的拓展和运用,在 SSK/SM 技术运用到时间和空间维度时将 SSK/SM 与空时分组码相结合,这样可以在分集和复用上获得折中。与传统的 SM 利用激活的发射天线序号携带信息不同,STSK 利用预先设计的空时分散矩阵序号来传输额外的信息,具有多天线同步传输而获得分集增益的优点。在进一步的研究中,借助于频移键控(Frequency shift keying, FSK)调制,STSK 的概念被扩展到频率域^[67-68]。文献[67]提出了 SFSK 和空时频移键控(Space time frequency shift keying, STFSK)技术,除了可以在空间域和时间域传输信息,还能在额外的频率域传输信息。为了支持多用户,文献[68]将 STFSK 概念扩展到慢频率跳频多址(Slow frequency hopping multiple access, SFHMA)中,并且分别对基于高斯最小移位键控(Gaussian minimum shift keying, GMSK)和时分/频分多址接入(TD/FDMA)的 SFHMA 系统的区域频谱效率(Area spectral efficiency, ASE)进行量化。基于 SM/SSK 的原理,正交的子载波也可以同样被利用,即被激活的正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)^[69]的子载波序号可用于传输额外的信息,被称之为子载波序号调制(Subcarrier-index modulation, SIM)^[70]。基于同样的原理,在频率选择性衰落信道下,文献[71]提出了一个新的传输方案,称为 OFDM 序号调制,能在提高数据传输速率的同时获得好的误码性能。在图 1 中,根据在时域、频域和空间域上不同程度的衰落,对上述提到的各种技术进行分类和总结。为了完整性,在图 1 中简要提及了经典跳时脉冲调制(Time hopping impulse modulation, THIM)^[72],它利用时隙的指标“隐形地”传输额外的数据信息。另外,作为进一步的改进,混合 QAM-FSK 调制^[73]将时域和频域相结合实现独立的衰落。

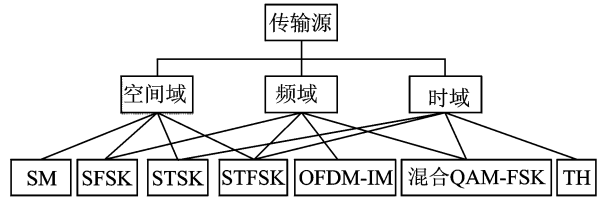


图 1 空间调制及其相关技术分类示意图

Fig. 1 Classification map of spatial modulation and its related technologies

1.2 SM-MIMO 系统模型

SM 的基本原理为在每一时隙内只激活一根发送天线来传输信息,通过被激活的天线序号携带信息,以增加信息传输速率。图 2 为 SM-MIMO 的系统框图。如图 2 所示,该 SM-MIMO 系统的发送端配有 N_t 根发送天线,接收端配有 N_r 根接收天线。根据 SM 的原理,在发送端每一时隙只激活一根天线来发送经星座调制后的信息,被激活的天线序号由 $\log_2 N_t$ 个信息比特决定。因此,每时隙传输的总比特数为 $m = \log_2(MN_t)$, M 为符

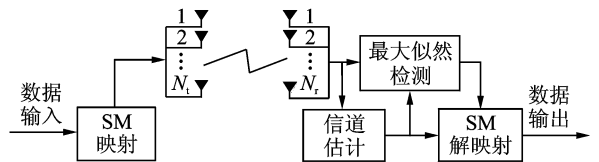


图 2 SM-MIMO 系统

Fig. 2 SM-MIMO system model

号星座调制的阶数。调制后的比特经过激活的天线进行传输,发送符号向量^[26]可以表示为

$$\mathbf{x}_{j_q} = [0, 0, \dots, \underset{\substack{\uparrow \\ \text{第 } j \text{ 个}}}{x_q}, \dots, 0]^T \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_{j_q} 为 $N_t \times 1$ 维的符号向量; j 为被激活的天线序号, $j \in [1: N_t]$; x_q 为位于 \mathbf{x}_{j_q} 的第 j 个元素并表示多进制 Mary 星座中的第 q 个符号, $q \in [1: M]$ 。

图 3 为 SM 的映射原理图,以 4 根发送天线传输 4 个比特为例,前两个比特用于确定发送天线序号,后两个比特用于星座符号调制,因此图 3 中的信息比特 $[1\ 1\ 1\ 0]$ 所对应的发送符号向量为 $[0\ 0\ 0\ -1]^T$,即激活第 4 根发送天线发送符号“ -1 ”。SM 还可根据发送天线总数的不同灵活地变换映射结构。仍以 4 个比特为例,当发送端有 2 根发送天线,则用第 1 个比特映射天线序号,后 3 个比特采用 8PSK/8QAM 调制。当发送端有 8 根天线,则用前 3 个比特映射天线序号,最后 1 个比特采用 BPSK 调制。在接收端,接收信号可以表示为^[37]

$$\mathbf{y} = \sqrt{P}\mathbf{H}\mathbf{x}_{j_q} + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中: \mathbf{H} 为 $N_r \times N_t$ 维的 MIMO 信道矩阵,其元素服从均值为零,方差为 1 的复高斯分布; P 为每根发送天线的发送功率; \mathbf{n} 为 $N_r \times 1$ 维的噪声向量,其元素服从均值为 0,方差为 N_0 的复高斯分布。假设信道状态信息(Channel state information, CSI)对接收端完全已知,接收端采用最优检测算法,即利用最大似然法同时检测发送天线序号与星座符号^[74],则

$$[\hat{j}, x_q] = \arg \min_{j, q} [\sqrt{P_i} \|\mathbf{g}_{j_q}\|_F^2 - 2\text{Re}\{\mathbf{y}^H \mathbf{g}_{j_q}\}] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{g}_{j_q} = \mathbf{h}_j x_q$, \mathbf{h}_j 为 \mathbf{H} 的第 j 列; \hat{j} 和 x_q 分别为检测后所估计的发送天线序号和星座符号。

2 性能分析

近年来,SM-MIMO 系统的性能得到了广泛的研究^[75-89]。研究 SM-MIMO 系统性能的意义在于:

- (1) 了解无线传播对端到端错误概率和传输速率的影响。
- (2) 找出 SM-MIMO 的适用情形。
- (3) 为基于 SM-MIMO 原理的新系统设计以及传输方式提供参考。
- (4) 揭示 SM-MIMO 的基本特性,例如可达到的分集阶数、传输速率等。

2.1 速率分析

图 4 将空间复用^[8]、空间分集^[7]和空间调制的原理进行了比较。从图 4 可以看出,空间复用是在各个独立路径内传输不同的信息数据,其传输速率为 $N_t \log_2 M$ 。空间分集是利用 Alamouti 码^[90-92]进行信源编码后发送,其速率与码率 R_c 有关,可表示为 $R_c \log_2 M$ 。而 SM 是先根据信息

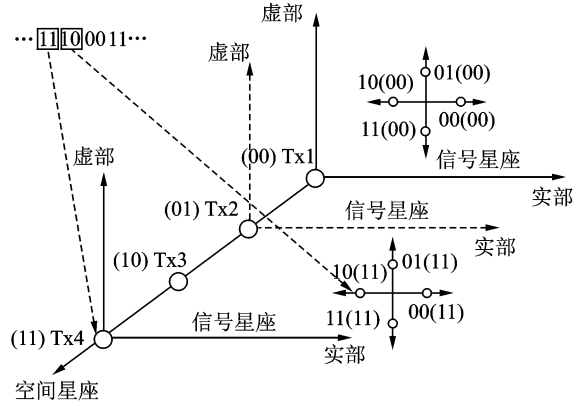


图 3 SM-MIMO 系统三维映射图^[12]

Fig. 3 Three-dimensional mapping of SM-MIMO^[12]

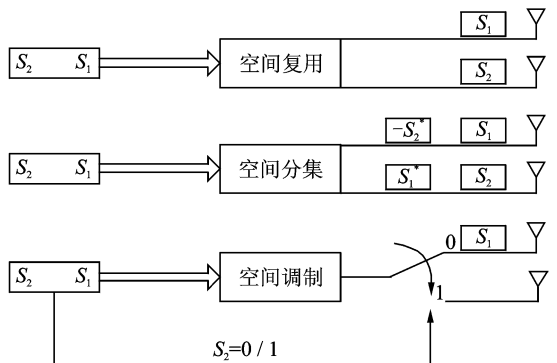


图 4 空间复用、空间分集和空间调制原理图^[12]

Fig. 4 Principle of spatial multiplexing, spatial diversity and spatial modulation

比特选择发送天线序号后,再传输经星座调制后的符号,其速率表示为 $\log_2 M + \log_2 N_t$ 。三者中空间复用的速率最高,SM 次之,空间分集最低。但空间复用中的信道间干扰会对传输质量产生较大影响,且对信道间的同步性要求很高,相比之下 SM 实现复杂度低,且能获得较高的传输性能。

2.2 容量分析

对于 SM 系统而言,容量分析是一个重要的研究课题。假设传输的信号满足幅度连续、时间离散的高斯分布,文献[25]推导了瑞利衰落信道下 SM 系统的容量公式,该容量也被称为连续输入连续输出无记忆信道容量(Continuous-input continuous-output memoryless channel,CCMC)^[93]。然而,这种假设在实际的通信系统中很难实现,除非使用精心设计的叠加调制^[94]。相比之下,文献[24]推导了 SM 系统的离散输入连续输出无记忆信道容量(Discrete-input continuous-output memoryless channel,DCMC)^[95],其中传输的信号为离散星座图中的星座点,如经典的 APM^[10]。文献[96]推导了 SM 系统互信息的闭式表达式,并且研究了调制方式对系统性能的影响。此外,文献[97]研究表明,SM 系统的容量可能会低于 V-BLAST 系统,但其检测复杂度不依赖于发射天线的数目,这种优势有利于 SM-MIMO 的实际应用。SM 系统的信道容量可以分为两部分,分别为符号星座容量和空间星座容量。文献[1]表明可以用“每次使用一个发射器的空间循环”的传输思想来理解信道容量。而且该文献还表明多天线系统的信道容量大于单天线通信系统和配备两根发射天线的 STBC 系统。文献[98,99]重点研究存在一个窃听者时 SM-MIMO 系统的安全速率。文献[98]的分析表明 SM 系统的中断保密容量优于相应的单天线系统,并且随着发射天线数的增加而增大。文献[99]研究了星座图大小对系统性能的影响。结果表明,其影响效果同时取决于被窃听用户和窃听者的 SNRs。当窃听者的 SNR 较低时,采用小的星座图即可。反之,当窃听者的 SNR 较高时,大的星座图能提供更大的保密容量。随着研究的深入,很多新的基于 SM-MIMO 传输的预处理方法被提出用来确保物理层的安全传输,包括信道对角化、基于特征分解和广义 SM。这些结果表明,由于其独特的传输原理,SM-MIMO 确实能够提高系统的频谱效率和安全速率。

2.3 BER 分析

从式(3)可以看出,SM 接收端检测主要分为两部分:发送天线序号检测和星座符号检测。只有当以上两部分检测都正确时,总的信息比特才能正确传输。基于此,文献[37]提出了一种误比特率算法:假设星座符号估计正确,用 P_a 表示发送天线序号检测错误概率;假设发送天线序号估计正确,用 P_d 表示星座符号检测错误概率,则总的平均误比特率可表示为

$$P_e \approx 1 - P_c = P_a + P_d - P_a P_d \tag{4}$$

式中: $P_c = (1 - P_a)(1 - P_d)$ 为系统总的检测正确概率。该方法是基于发送天线序号检测和星座符号检测两过程相互独立的前提,若信道相关,式(4)将大于平均误比特率的实际值。

(1) 天线序号检测错误概率

假设发送天线序号估计正确,发射天线序号检测错误概率 P_a 可表示为^[100]

$$P_a \leq \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{q=1}^M \sum_{\hat{j}=1}^{N_t} \frac{N(j, \hat{j}) P(x_{jq} \rightarrow x_{\hat{j}q})}{N_t M \log_2 N_t} \tag{5}$$

式中: $N(j, \hat{j})$ 为发送天线序号实际值 j 与估计值 \hat{j} 之间的错误比特数目; $P(x_{jq} \rightarrow x_{\hat{j}q})$ 为由 j 检测为 \hat{j} 的平均成对错误概率(Pairwise error probability, PEP)。且该式当 $N_t = 2$ 时为 P_a 的精确表达式,对于 $N_t > 2$ 时,是 P_a 的紧上界。

(2) 星座符号检测错误概率

假设发送天线序号估计正确,要计算星座符号检测错误概率 P_d ,就相当于计算发送天线数为 1,接收天线数为 N_r 的 MIMO 系统平均误比特率。由此可得到接收端有效信噪比 γ 的概率密度函数为

$$f(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(N_r)} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^{N_r-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (6)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为系统平均信噪比, $\bar{\gamma} = P/N_0$ 。则星座符号检测错误概率 P_d 可表示为

$$P_d = \int_0^{+\infty} p_d(\gamma) f(\gamma) d\gamma = \sum_i^M \alpha_i \left[1 - \sum_{l=0}^{N_r-1} \mu_i \left[\frac{1-\mu_i^2}{4} \right]^l \binom{2l}{l} \right] \quad (7)$$

式中: $p_d(\gamma) = \sum_i^M \alpha_i \operatorname{erfc}(\sqrt{\beta_i \gamma})$ 为 M-QAM 调制的瞬时 BER 公式; α_i 和 β_i 为与调制阶数 M 有关的参数, $\mu_i = \sqrt{\beta_i \gamma / (\beta_i \gamma + 1)}$ 。将 $P_a(6)$ 和 $P_d(8)$ 代入式(4)中, 则可得到 SM 总的平均误比特率。

3 SM-MIMO 应用前景

SM-MIMO 技术由于在发送端只采用一根天线发送信号, 可在提高传输速率的同时, 避免信道间干扰和对天线同步的要求, 降低了系统设计复杂度和能量消耗。鉴于以上 SM-MIMO 技术的优点, 可以将 SM-MIMO 技术用于当前的研究热点中, 发挥其优势。

3.1 大规模 MIMO 通信

SM-MIMO 系统配备大量的发射天线可获得高吞吐量。而且为了降低实现的复杂度以及提高能效, 相比于可用的发射天线数, SM-MIMO 系统仅需配置数量有限的射频链路。一般来说, 射频链路数量越少, 系统的能效越高、实现的复杂度越低。因此将 SM 与大规模 MIMO 相结合来满足下一代蜂窝网络高吞吐量的要求。在大规模 MIMO 的设计中, 需要重点考虑在实际应用中的信道估计训练开销和获得发送端信道状态信息(Channel state information at the transmitter, GSIT)/接收端信道状态信息(Channel state information at the receiver, GSIR)的反馈开销^[17]。为了解决该问题, 已有很多学者进行研究^[101-106]。为了减少训练开销, 一种可行的解决方案是基于时分复用(Time division duplexing, TDD)的蜂窝网络架构^[103-106]。在此情况下, 信道的互易性可以被利用, 信道训练开销仅与用户的数目呈线性扩展, 且独立于基站的天线数目。与此同时, 如果在基站使用适当的波束成形方案, 用户终端可以不需要 CSIR。然而, 大多数现有的蜂窝网络部署都是基于频分复用(Frequency division duplexing, FDD), 不能利用信道的互异性, 而且需要反馈链路进行下行链路传输。鉴于上述原因, 学者们正在研究有着有限训练和反馈开销的 FDD 模式下大规模 MIMO 蜂窝系统设计方案^[101, 102]。研究表明, 可以设计高效的有限反馈方案使得反馈开销小于发射天线数。迄今为止, 与现有大规模 MIMO 系统相比, SM-MIMO 系统要求有限的射频链路数以及其独特的编码机制可能会进一步增加训练开销。具体地: (1) 由于与发射天线数相比, 射频链路数有限, 所以不能使用正交导频符号同时估计所有信道增益。一个简单的次优解决方法是在训练阶段, 保持所有可用的发射天线处于激活状态, 同时根据 SM-MIMO 的调制原理关闭不需要传输负载的射频链路。因此, 发射端需要配置与发射天线数相同的射频链路。另一种解决方案是利用信道脉冲响应之间的空间和时间的相关性来减少训练开销^[107]。(2) 由于 SM 的编码机制, 基于 TDD 的蜂窝结构下行链路可能一直需要 CSIR。一种次优的可能解决方案是采用非相干解调方案来避免接收端需要 CSIR。总的来说, 尽管训练开销对 SM-MIMO 系统设计及实现很重要, 但相关的研究还较少。期待未来在该领域会有重大的发现。

3.2 多用户多小区 SM-MIMO 通信

以上文献得到的结果大多都受限于点到点的单用户通信情形, 仅有少数文献考虑了多址干扰的影响, 但是没有充分考虑蜂窝网络的特点, 包括小区关联机制及覆盖率等性能标准的影响。在这样的背景下, 需要进一步深入研究基本蜂窝网络的多用户 MIMO 下行/上行传输。大多数的 SM-MIMO 传输技

术都是开环的,因此与采用预编码和自适应波束成形的多用户 MIMO 通信没有直接的可比性。事实上,多用户 MIMO 与开环传输有着本质的不同,因为多用户 MIMO 基于用户间信道空间共享。在空分多址接入中,多用户的干扰问题可通过采用多天线的解决。这样不仅提供每个链路分集,还为空间分离的用户提供必要的自由度。为了与多用户大规模 MIMO 通信有可比性,放弃理想化的简单点对点的假设,真实地探讨多用户多小区网络的潜能,将会使得多用户多小区 SM-MIMO 的相关研究迅速发展。

3.3 毫米波通信

毫米波通信对于未来的蜂窝系统,尤其对广泛可用的免许可证频谱来说是一种很有前途的技术^[108-110]。由于毫米波的波长短,大型天线阵列可以紧紧地安置在发射端和接收端。所以,毫米波频段可以很好地被用于 SM-MIMO 通信,依靠数量有限的射频链路,在低复杂度和低功耗下获得较大的复用增益。毫米波蜂窝系统在实践中需要注意信道损伤和高频带的传播特性。具体地说,由于载波频率较高,导致实现毫米波蜂窝通信最大的障碍是自由空间路径损耗太大。此外,由于信道带宽极宽,使得噪声功率很大。所以为了在接收端获得足够的信噪比,未来毫米波蜂窝网络必须利用高增益电子可控的定向天线,这种天线可能由大型天线阵列的波束形成或预编码实现。然而实际中一些基带信号处理的复杂性和在这些频率上可能使用的射频链路数目的限制等因素,对于毫米波蜂窝通信系统的设计和优化将是一个挑战^[111]。基于这些考虑,SM-MIMO 在毫米波频段的使用需要依靠实用性好的解决方案,即可以同时保证高的复用增益和高增益波束成形以抵消增加的路径损耗和噪声功率。在 SM-MIMO 的设计和空间优化方面还有另外一个重要的约束:射频链路数不能任意减少以提供必要的高波束成形增益。射频链路数的合理选择必须要考虑所需的波束赋形增益、功率放大器的功率消耗/耗散、基带信号处理的实现复杂度以及低复杂度的基于射频(Radio frequency, RF)的预编码方案和所需的吞吐量。目前 SM-MIMO 在毫米波频段的应用还在初步阶段。

3.4 微小区异构蜂窝网络

蜂窝网络正在发生部署和优化的重大转变^[112,113],如毫微微/微微基站、固定/移动中继、认知无线电、非授权毫米波无线电和分布式天线等新的基础设施要素正在部署,使得未来的蜂窝系统变得更加异构^[114]。所以,新的蜂窝部署的特点将是这些基础设施要素的无计划、无规则以及随机部署,从而导致干扰模式变得更加复杂,相应地也使得对不同通信技术和协议的评估和设计更具有挑战性^[115]。因此,准确地建模随机部署的网络要素所产生的干扰、了解干扰对系统性能的影响,开发有效的技术减轻干扰是微小区异构蜂窝网络 3 个基本的研究方向。此外,这种新的异构蜂窝拓扑结构的根本问题是找到利用接入点和天线单元的最佳途径。在这种情况下,SM-MIMO 引入了另一个维度进行研究:对每个接入点的被激活和未被激活的发射天线数量进行权衡,以取得所需的频谱效率和能量效率的折中。低功耗基站的使用可以有效减小移动终端和接入点之间的传输距离,改善系统性能。传输距离的减少有利于 SM-MIMO 通信,因为静态功耗比射频功耗对性能有更明显的影响。SM-MIMO 技术的成功在于高效性、灵活性和优越性,所以能够用于新兴的异构蜂窝方案。文献^[116]的作者利用随机几何对网络干扰进行建模,得到异构干扰下 SM-MIMO 通信性能评估的初步结果。但是,这些结果不能直接用于蜂窝网络,因为没有考虑蜂窝的关联机制而且只研究了随机干扰的影响。由于 SM-MIMO 独特的工作原理,故需要准确的干扰模型来确保系统达到最佳性能。因此干扰感知的发射机和接收机设计将显得尤为重要。

3.5 RF 能量收集

未来的蜂窝网络将变得越来越高效,而 SM-MIMO 通过激活一部分发射天线,将会成为很有前途的降低蜂窝网络总功耗的关键技术。目前在绿色网络中采用的 RF 能量收集技术,可以为无线设备提

供额外的能量供应^[117]。该技术的主要原理是 RF 信号可用于同时传输信息和能量。周围的射频辐射可以通过接收天线获得,并且使用适当的电路可以将其转换成直流电压。在蜂窝网络中,可以使用新的混合蜂窝部署实现 RF 能量收集。在这种情况下,SM-MIMO 技术利用 RF 能量收集原理和相关的移动蜂窝网络的拓扑结构传输互信息和功率。一方面,和传统的 MIMO 技术相比,SM-MIMO 只激活少量的发射天线,可以有效地降低干扰,从而获得更好的信干比(Signal-to-interference ratio, SIR),相应地可减少无线网络的发射功率,提高系统的整体能效。停用一部分发射天线可降低相当大的电路功耗。另一方面,无需关闭未被激活的发射天线,可以将其切换到接收模式,同样可以提高系统的能效。这样,不用于数据传输的发射天线可以用于 RF 能量收集,通过捕捉周围的射频辐射并将其转换成能量用于后续的信息传输。由于 SM-MIMO 系统中可用的天线很多,所有未被激活的发射天线可以切换到接收天线模式来捕获不可忽视的射频功率。当然,必须安置合适的收发器确保 SM-MIMO 的信息传输和功率接收同时进行^[118]。迄今为止,对 SM-MIMO 和 RF 能量收集的融合的相关研究还较少,故这将是未来可持续低功耗网络的很有前途的研究领域。

4 结束语

传统的通信系统更多地把提高频谱效率作为系统设计和优化的指标。然而,随着通信业务的急剧增加,能量消耗也不断增加。满足通信服务质量高要求的情况下,高效能、低复杂度的通信技术变得尤为重要,因此,SM-MIMO 技术应运而生。随着天线数的增加,射频链路的成本不断提高,这制约了 MIMO 技术的广泛应用。SM 作为一种复杂度低,能量有效的调制技术,其与 MIMO 技术的结合,使得 SM-MIMO 能够利用空间维度(天线序号)作为一个额外的维度来传输信息,从而将传统的二维符号映射扩充到三维映射,成为下一代移动通信系统的一个很有前景的候选技术方案。经过十几年的发展,SM-MIMO 理论和系统设计已经日趋成熟。SM-MIMO 通过调制天线序号来传输信息,在避免信道间干扰的同时降低了对发送端天线同步的要求,提高了系统的能效和频效。关于 SM-MIMO 系统的性能分析,本文分为 3 个方面介绍:(1)速率分析。SM 技术利用发射天线序号携带信息,传输速率随着天线数目的增加呈对数增长。(2)容量分析。SM-MIMO 技术能同时传递天线序号和星座调制符号信息,增加系统容量。(3)BER 分析。接收端同时解调被激活的发射天线序号和星座调制符号,相应地,系统的平均 BER 由天线序号检测错误概率和星座符号检测错误概率两部分组成。因为 SM-MIMO 技术的诸多优点,SM-MIMO 技术可应用于当前的研究热点中,例如大规模 MIMO、多用户多小区 SM-MIMO 通信、毫米波通信、微小区异构蜂窝网络和 RF 能量收集等,具有很好的应用前景。由于 SM-MIMO 技术独特的优势,有关 SM-MIMO 及其相关技术的研究仍在不断发展和深入,新的研究成果将会继续出现。

参考文献:

- [1] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Communications*, 1998,6(3):311-335.
- [2] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. *European Transactions on Telecommunications*, 1999,10(6):585-595.
- [3] 杨绿溪,何世文,王毅,等.面向 5G 无线通信系统的关键技术综述[J]. *数据采集与处理*,2015,30(3):469-485.
Yang Lüxi, He Shiwen, Wang Yi, et al. Key technologies for 5G wireless communication system[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015,30(3):469-485.
- [4] Hanzo L, Alam O, El-Hajjar M, et al. Near-capacity multi-functional MIMO systems: Sphere-packing, iterative detection and cooperation[EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/bkabstractplus.jsp>, 2017-01-19.
- [5] Li Q, Li G, Lee W, et al. MIMO techniques in WiMAX and LTE: A feature overview[J]. *IEEE Communications Maga-*

zine, 2010,48(5):86-92.

- [6] Boccardi F, Clerckx B, Ghosh A, et al. Multiple-antenna techniques in LTE-advanced[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012,50(3):114-121.
- [7] 徐志强,胡捍英,刘阳军,等.无线衰落信道的分集技术[J].*数据采集与处理*,2006,12(S1):135-138.
Xu Zhiqiang, Hu Hanying, Liu Yangjun, et al. Diversity technology of wireless fading channel[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2006,12(S1):135-138.
- [8] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[C]// *Proceedings of International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*. New York: IEEE, 1998:295-300.
- [9] Mesleher R Y, Haas H, Sinanovic S. Spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008,57(4):2228-2241.
- [10] Hanzo L, Ng S X, Keller T, et al. Quadrature amplitude modulation: From basics to adaptive trellis-coded, turbo-equalized and space-time coded OFDM, CDMA and MC-CDMA systems[EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/bkabstractplus.jsp>, 2017-02-26.
- [11] Renzo M D, Haas H, Grant P M. Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: A survey [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011,49(12):182-191.
- [12] Renzo M D, Haas H, Ghayeb A, et al. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014,102(1):56-103.
- [13] Stavridis A, Sinanovic S, Renzo M D, et al. An energy saving base station employing spatial modulation[C]//*IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks*. Barcelona, Spain: IEEE, 2012:231-235.
- [14] Stavridis A, Sinanovic S, Renzo M D, et al. Energy evaluation of spatial modulation at a multi-antenna base station[C]//*IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway NJ: IEEE, 2013:1-5.
- [15] 郝金星,王劲涛,潘长勇.发射天线数可变的扩展空间调制[J].*清华大学学报:自然科学版*,2013,53(11):1526-1530.
Hao Jinxing, Wang Jintao, Pan Changyong. Extended spatial modulation with variable activated transmit antennas[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2013,53(11):1526-1530.
- [16] Marzetta T L. Non-cooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010,9(11):3590-3600.
- [17] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays[J]. *IEEE Signal Proces Mag*, 2013,30(1):40-46.
- [18] Mesleher R, Elgala H, Haas H. Optical spatial modulation[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2011,3(3):234-244.
- [19] Popoola W, Poves E, Haas H. Error performance of generalised space shift keying for indoor visible light communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013,61(5):1968-1976.
- [20] Popoola W, Poves E, Haas H. Spatial pulse position modulation for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012,30(18):2948-2954.
- [21] Vladeanu C, Lucaciu R, Mihaescu A. Optical spatial modulation for indoor wireless communications in presence of intersymbol interference[C]//*International Symposium on Electronics and Telecommunications*. New York: IEEE, 2012:183-186.
- [22] Chau Y, Yu S H. Space modulation on wireless fading channels[C]//*IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway NJ: IEEE, 2001,3:1668-1671.
- [23] Haas H, Costa E, Schultz E. Increasing spectral efficiency by data multiplexing using antennas arrays[C]//*IEEE International Symposium on Personal, Indoor, Mobile Radio Communications*. New York: IEEE, 2002,2:610-613.
- [24] Sugiura S, Chen S, Hanzo L. Coherent and differential space-time shift keying: A dispersion matrix approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010,58(11):3219-3230.
- [25] Yang Y, Jiao B. Information-guided channel-hopping for high data rate wireless communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008,12(4):225-227.
- [26] Jeganathan J, Ghayeb A, Szczecinski L, et al. Space shift keying modulation for MIMO channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009,8(7):3692-3703.
- [27] Yang P, Renzo M D, Xiao Y, et al. Design guidelines for spatial modulation[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutori-*

als, 2004, 17(1):6-26.

- [28] Renzo M D, Haas H. A general framework for performance analysis of space shift keying (SSK) modulation for MISO correlated Nakagami-m fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(9):2590-2603.
- [29] Renzo M D, Haas H. Space shift keying (SSK-) MIMO over correlated Rician fading channels: Performance analysis and a new method for transmit-diversity[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(1):116-129.
- [30] Renzo M D, Haas H. Bit error probability of SM-MIMO over generalized fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(3):1124-1144.
- [31] Renzo M D, Haas H. On transmit-diversity for spatial modulation MIMO: Impact of spatial-constellation diagram and shaping filters at the transmitter[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(6):2507-2531.
- [32] Zhang R, Yang L L, Hanzo L. Error probability and capacity analysis of generalized pre-coding aided spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(1):364-375.
- [33] Narasimhan T L, Chockalingam A. On the capacity and performance of generalized spatial modulation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(2):252-255.
- [34] Maleki M, Bahrami H R, Alizadeh A. On the performance of spatial modulation: Optimal constellation breakdown[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 62(1):144-157.
- [35] Handte T, Muller A, Speidel J, et al. BER analysis and optimization of generalized spatial modulation in correlated fading channels[C]//*IEEE 70th Vehicular Technology Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009:1-5.
- [36] Lee M C, Chung W H, Lee T S. BER analysis for spatial modulation in multicast MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(7):2939-2951.
- [37] Renzo M D, Haas H. Bit error probability of SM-MIMO over generalized fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(3):1124-1144.
- [38] Naidoo N R, Xu H J, Quazi T A. Spatial modulation: Optimal detector asymptotic performance and multiple-stage detections[J]. *IET Communications*, 2011, 5(10):1368-1376.
- [39] Song S, Yang Y, Xiong Q, et al. A channel hopping technique I: Theoretical studies on band efficiency and capacity[C]//*International Conference on Communications, Circuits and Systems*. New York: IEEE, 2004:229-233.
- [40] Mesleh R Y, Haas H, Ahn C W, et al. Spatial modulation—A new low complexity spectral efficiency enhancing technique [C]//*International Conference on Communications and Networking in China*. New York: IEEE, 2006:1-5.
- [41] Jeganathan J, Ghayeb A, Szczecinski L. Generalized space shift keying modulation for MIMO channels[C]//*IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. New York: IEEE, 2008:1-5.
- [42] Renzo M D, Haas H. Improving the performance of space shift keying (SSK) modulation via opportunistic power allocation [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(6):500-502.
- [43] Serafimovski N, Renzo M D, Sinanović S, et al. Fractional bit encoded spatial modulation (FBESM)[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(5):429-431.
- [44] Renzo M D, Haas H. Performance comparison of different spatial modulation schemes in correlated fading channels[C]//*IEEE International Conference on Communications*. New York: IEEE, 2010:1-6.
- [45] Yang Y, Aissa S. Bit-padding information guided channel hopping[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2):163-165.
- [46] Qu Q, Wang A, Nie Z, et al. Block mapping spatial modulation scheme for MIMO systems[J]. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2011, 18(5):30-36.
- [47] Chang R Y, Lin S J, Chung W H. Energy efficient transmission over space shift keying modulated MIMO channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(10):2950-2959.
- [48] Chang R Y, Lin S J, Chung W H. New space shift keying modulation with Hamming code-aided constellation design[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(1):2-5.
- [49] Kuo P H. SCRAD modulation: High data rate space shift keying scheme permitting reduced-complexity detector[J]. *IET Electronics Letters*, 2012, 48(24):1567-1569.
- [50] Serafimovski N, Younis A, Mesleh R, et al. Practical implementation of spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9):4511-4523.
- [51] Younis A, Thompson W, Renzo M D, et al. Performance of spatial modulation using measured real-world channels[C]//*IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway NJ: IEEE, 2013:1-5.
- [52] Yang P, Xiao Y, Zhang B, et al. Star-QAM signaling constellations for spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehic-*

ular Technology, 2014, 63(8):3741-3749.

- [53] Kumbhani B, Kshetrimayum R S. Outage probability analysis of spatial modulation systems with antenna selection[J]. Electronics Letters, 2014, 50(2):125-126.
- [54] Jeon C Y, Lee J W. Multi-strata space-time coded spatial modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1945-1948.
- [55] Wang S C, Li Y Z, Zhao M, et al. Energy-efficient and low-complexity uplink transceiver for massive spatial modulation MIMO [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10):4617-4632.
- [56] Cui Y P, Fang X M. Performance analysis of massive spatial modulation MIMO in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(11):8925-8932.
- [57] Li J, Wen M W, Zhang M, et al. Virtual spatial modulation[J]. IEEE Access, 2016, 4:6929-6938.
- [58] Xu K, Yu H Y, Zhu Y J. Channel-adapted spatial modulation for massive MIMO visible light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(23):2693-2696.
- [59] Fu J, Hou C, Xiang W, et al. Generalised spatial modulation with multiple active transmit antennas[C]//IEEE Globecom Workshops. New York: IEEE, 2010:839-844.
- [60] Younis A, Serafimovski N, Mesleh R. Generalised spatial modulation[C]//Conference Record of the 4th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. New York: IEEE, 2010:1498-1502.
- [61] Wang J T, Jia S Y, Song J. Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4):1605-1615.
- [62] Başar E, Aygözü Ü, Panayircı E, et al. Space-time block coded spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(3): 823-832.
- [63] Mesleh R Y, Renzo M D, Haas H, et al. Trellis coded spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(7):2349-2361.
- [64] Başar E, Aygözü Ü, Panayircı E, et al. New trellis code design for spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8):2670-2680.
- [65] Başar E, Aygözü Ü, Panayircı E, et al. Super-orthogonal trellis-coded spatial modulation[J]. IET Communications, 2012, 6(17): 2922-2932.
- [66] Sugiura S, Chen S, Hanzo L. Generalized space-time shift keying designed for flexible diversity multiplexing-and complexity-tradeoffs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4):1144-1153.
- [67] Ngo H A, Xu C, Sugiura S, et al. Space-time frequency shift keying for dispersive channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(3):177-180.
- [68] Wang L, Chen Z G, Wang X. A space-time block coded spatial modulation from (n, k) error correcting code[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(1):54-57.
- [69] Hanzo L, Münster M, Choi B J, et al. OFDM and MC-CDMA for broadband multi-user communications, WLANs and broadcasting[EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/bkabstractplus.jsp>, 2017-03-10.
- [70] Abu-alhiga R, Haas H. Subcarrier-index modulation OFDM[C]//IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. New York: IEEE, 2009:177-181.
- [71] Başar E, Aygözü Ü, Panayircı E, et al. Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 61(22):5536-5549.
- [72] Scholtz R A. Multiple access with time-hopping impulse modulation[C]// Military Communications Conference. New York: IEEE, 1993:447-450.
- [73] Latif A, Gohar N D. On the PAPR reduction of hybrid QAM/FSK (HQFM) OFDM transceiver[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(6):1061-1066.
- [74] Jeganathan J, Ghayeb A, Szczecinski L. Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(8):545-547.
- [75] Mesleh R Y, Engelken S, Sinanovic S, et al. Analytical SER calculation of spatial modulation[C]//IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2008:272-276.
- [76] Alshamali Quza B. Spatial modulation; Performance evaluation in Nakagami fading channels[C]//IEEE GCC Conference & Exhibition. Piscataway, NJ: IEEE, 2009:1-4.
- [77] Alshamali Quza B. Performance of spatial modulation in correlated and uncorrelated Nakagami fading channel[J]. Journal of Communications, 2009, 4(3):170-174.

- [78] Renzo M D, Haas H. On the performance of space shift keying MIMO systems over correlated Rician fading channels[C]//International ITG Workshop on Smart Antennas. Piscataway, NJ: IEEE, 2010:72-79.
- [79] Renzo M D, Mesleh R Y, Haas H, et al. Upper bounds for the analysis of trellis coded spatial modulation over correlated fading channels[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2010:1-5.
- [80] Renzo M D, Haas H. On the performance of SSK modulation over correlated Nakagami-m fading channels[C]//IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2010:1-6.
- [81] Yang P, Xiao Y, Zhou B, et al. Initial performance evaluation of spatial modulation OFDM in LTE-based systems[C]//International ICST Conference on Communications and Networking in China. New York: IEEE, 2011:102-107.
- [82] Renzo M D, Haas H. Bit error probability of space modulation over Nakagami-m fading: Asymptotic analysis[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011,15(10):1026-1028.
- [83] Shafik N M. Performance of OFDM-CDMA system using modified space-shift keying technique[J]. *International Journal of Information and Communication Technology*, 2011,2(2):174-181.
- [84] Dabi J, Gupta K. Performance analysis of STBC spatial modulation under transmit diversity and multiplexing gain[J]. *International Journal of Engineering Science Manage*, 2012,2(2):189-195.
- [85] Marzla A A, Runachalaperumal C. A study on spatial modulation based on performance and spectral efficiency[J]. *International Journal of Engineering Research in Applied Physics*, 2012,1(1):8-13.
- [86] Koca M, Sari H. Performance analysis of spatial modulation over correlated fading channels[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:1-5.
- [87] Arunachalaperumal C, Kumar S D, Arun C. A comparative study of the performance of precoded MIMO using trellis and STBC[C]//International Conference on Advanced Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:1-4.
- [88] Kumar S D, Arun C. A comparative study of the performance of precoded MIMO using trellis and STBC[C]//International Conference on Advanced Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:1-4.
- [89] Li Q L. Information-guided randomization for wireless physical layer secure transmission[C]//IEEE Military Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:1-6.
- [90] Tarokh V, Jafarkhani 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.
- [91] Vu M, Paulraj A. Optimal linear precoders for MIMO wireless correlated channels with nonzero mean in space-time coded systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006,54(6):2318-2332.
- [92] Shin H D, Lee J H. Performance analysis of space-time block codes over keyhole nakagami fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004,53(2):351-362.
- [93] Sugiura S, Chen S, Hanzo L. MIMO-aided near capacity turbo transceivers: Taxonomy and performance versus complexity [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012,14(2):421-442.
- [94] Zhang R, Hanzo L. A unified treatment of superposition coding aided communications: Theory and practice[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011,13(3):503-520.
- [95] Ng S X, Hanzo L. On the MIMO channel capacity of multi-dimensional signal sets[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006,55(2):528-536.
- [96] Guan X, Xiao Y, Cai Y, et al. On the mutual information and precoding for spatial modulation with finite alphabet[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013,2(4):383-386.
- [97] Sugiura S, Chen S, Hanzo L. A universal space-time architecture for multiple-antenna aided systems[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012,14(2):401-420.
- [98] Sinanovic S, Renzo M D, Haas H. Secrecy rate of time switched transmit diversity system[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2011:1-5.
- [99] Sinanovic S, Serafimovski N, Renzo M D, et al. Secrecy capacity of space keying with two antennas[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:1-5.
- [100] Proakis J G. *Digital Communications* [M]. New York: McGraw-Hill Press, 2000:255-270.
- [101] Nam J, Ahn J Y, Adhikary A, et al. Joint spatial division and multiplexing: Realizing massive MIMO gains with limited channel state information[C]//IEEE Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:1-6.
- [102] Kuo P H, Kung H T, Ting P A. Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New York: IEEE, 2012:492-497.
- [103] Shepard C, Yu H, Anand N, et al. Argos: Practical many-antenna base stations[C]//International Conference on Mobile

- Computing and Networking. New York: Assoc Computing Machinery, 2012;53-64.
- [104] Huh H, Caire G, Papadopoulos H C, et al. Achieving "massive MIMO" spectral efficiency with a not-so-large number of antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012,11(9):3226-3239.
- [105] Yang H, Marzetta T L. Performance of conjugate and zero-forcing beamforming in large-scale antenna systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013,31(2):172-179.
- [106] Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013,31(2):160-171.
- [107] Wu X, Claussen H, Renzo M D, et al. Channel estimation for spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Communication, 2014,62(12):4362-4372.
- [108] Rappaport T S, Murdock J, Gutierrez F, et al. State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications[J]. IEEE, 2011,99(8):1390-1436.
- [109] Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! [J]. IEEE Access, 2013,1:335-349.
- [110] Pi Z, Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6):101-107.
- [111] Valliappan N, Lozano A, Heath R W. Antenna subset modulation for secure millimeter-wave wireless communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013,61(8):3231-3245.
- [112] Renzo M D, Merola C, Guidotti A, et al. Error performance of multi-antenna receivers in a Poisson field of interferers—A stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013,61(5):2025-2047.
- [113] Renzo M D, Guidotti A, Corazza G E. Average rate of downlink heterogeneous cellular networks over generalized fading channels—A stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013,61(7):3050-3071.
- [114] Ghosh A, Andrews J G, Mangalvedhe N, et al. Heterogeneous cellular networks: From theory to practice[J]. IEEE Communications Magazine, 2012,50(6):54-64.
- [115] Andrews J G. Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift[J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51(3): 136-144.
- [116] Lu W, Renzo M D. Performance analysis of spatial modulation MIMO in a Poisson field of interferers[C]//International Conference on Computing, Networking and Communications. New York: IEEE, 2014:1-7.
- [117] Sudevalayam S, Kulkarni P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011,13(3):443-461.
- [118] Krikidis I, Suraweera H A, Yang S, et al. Full-duplex relaying over block fading channel: A diversity perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2): 4524-4535.

作者简介:



虞湘宾(1972-),男,教授,研究方向:无线通信与信号处理,E-mail:yxbxwy@nu-aa.edu.cn.



邱赛勇(1992-),女,硕士研究生,研究方向:空间调制与 MIMO 技术。



王丞(1992-),男,硕士研究生,研究方向:空间调制与协作通信技术。

