

# 基于 Massive MIMO 的 5G 安全通信技术研究

吴 敏, 吴 蒙

(南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

**摘 要:**随着现代信息安全和无线通信技术的高速发展,对于有广泛数据业务量的 5G 移动通信系统来说,将会有大量的机密、敏感信息在其通信系统中进行传输,所以安全问题越来越引起人们的关注,提供安全传输服务显得尤为重要。随着计算机不断增强的计算能力,传统的基于计算复杂度的加解密算法和密钥协商机制已经不能满足人们对于未来无线通信安全性的要求,而基于信号调制的方向调制技术因其无需考虑窃听者的计算能力,通过扰乱非期望方向上的信号星座图来实现安全传输的目的,成为了 5G 系统的重要研究点。在简单介绍了波束赋形的原理及其不足的基础上引出方向调制技术,并着重阐述了在大规模天线阵的前提下,基于天线子集选择和混合阵的方向调制技术实现安全传输目标的方法,并且从理论的角度说明了安全性能的提高。

**关键词:**5G; Massive MIMO; 方向调制; 天线子集选择; 混合阵

**中图分类号:**TP309

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2017)04-0130-05

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2017.04.029

## Research on Secure Communication Technology in 5G Based on Massive MIMO

WU Min, WU Meng

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** With the rapid development of modern information security and wireless communication technology, more and more people have paid attention to the security of sensitive information in the transmission process. It is particularly important to focus on secure services for 5G mobile systems, which is faced with a wide range of data traffic. With the increasing computing ability of the computer, the traditional encryption and decryption algorithm based on the computational complexity and the secret key negotiation mechanism has been unable to meet the requirements of wireless communication security in future. However, because directional modulation technique based on signal modulation can distort the signal constellation in undesired direction without considering the computer ability of the eavesdroppers, it is becoming a important hotspot in 5G system. Simply introducing the principle and shortcomings of technique, it is demonstrated that how the directional modulation technique based on antenna selection and mixed array achieve the goal of safe transmission under the premise of the large scale antenna array, and that the improvement of safety performance from the theory is validated.

**Key words:** 5G; Massive MIMO; directional modulation; antenna selection; mixed array

## 0 引 言

随着科技的发展、社会的进步,人们对于移动无线通信系统的要求也与日俱增。据预测,到 2020 年,移动通信网络将面临 1 000 倍数据容量和 100 倍设备连接数增长的挑战<sup>[1]</sup>,或许已经成熟的第三代移动网络和逐步成熟的第四代移动网络还可以承受住未来几年数据流量的激增,但是 2020 年以后,它们将不能够支持这样一个设备数量大,网络流量需求高的移动网络,那么第五代无线通信技术的研发就迫在眉睫。

在 5G 移动通信系统中,将会有大量的敏感和机密的信息,如金融数据、电子媒体、医疗记录、客户档案等,通过无线信道进行传输,因此,提供无与伦比的安全服务是 5G 网络在设计 and 实施上的一个首要任务。在传统的无线通信网络中,其安全性主要是依靠上层的加密协议体系,通过对传输信息进行加解密、认证等技术来保证窃听者得不到任何有用信息。传统的信息加密机制是在数据链路层或应用层上,通过一定的密码算法对信息流进行加密。这种加密方法是建立在计

收稿日期:2016-05-15

修回日期:2016-08-24

网络出版时间:2017-03-07

基金项目:江苏省基础研究计划(BK20151507)

作者简介:吴 敏(1991-),女,硕士研究生,研究方向为物理层安全技术;吴 蒙,博士,教授,研究方向为无线通信、信息安全等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170307.0921.032.html>

算复杂度上的,随着计算机运算能力的飞速提升,这种方式已不再安全,所以另觅一个不依靠计算复杂度的加密算法和密钥协商机制的安全传输技术显得尤为重要。保证无线传输中窃听接收机的 LPI (Low Probability Interception, 低截获概率)<sup>[2]</sup> 是安全通信的重要目标之一,主要是指不再依靠上层的数据加解密和密钥协商等手段来取得的安全性能。方向调制技术是一种能实现定向通信的重要技术,它将传统的基带调制功能转为由射频端来完成<sup>[3]</sup>,通过扰乱非期望方向的信号星座图来保证低截获率,从而实现信息的安全传输。

随着未来各种无线通信业务和宽带数据业务的不断发展,无线资源,尤其是频谱资源变得越来越紧张,如何更高效地利用这些有限的通信资源成为无线通信新技术发展的焦点所在。研究表明,大规模 MIMO (Multi-Input Multi-Output, 多输入多输出) 技术<sup>[4]</sup> 通过在基站配置大量收发天线提高空间的分辨率,使得多用户可以利用同一时频资源进行通信,而且大规模 MIMO 技术可以在不增加基站密度的情况下,提高频

率效率,降低发送功率,通过形成范围很窄的波束来降低干扰,提高安全性<sup>[5]</sup>。总而言之,大规模 MIMO 技术不论在频谱效率、可靠性还是能耗方面都具有不可比拟的优势,正是这些优点使得其成为 5G 研发者的研究热点。如果在大规模 MIMO 情境中利用方向调制技术传输数据,不仅可以实现数据的大量、高速传输,更可以在物理层面上实现数据的安全传输。

## 1 波束赋形和方向调制技术

波束赋形技术是目前存在的无线安全传输技术中的一种,它是实现信息定向传输的有效手段。利用天线阵列上各天线元素发射的电磁波相干相消的特性,形成的主瓣用来对准期望方向,而低功率的旁瓣或者零限位置则用来对准非期望方向,从而增强合法接收者的有效信号,抑制对合法接收者信号产生干扰的干扰源,进而提高通信系统的整体信干噪比,使系统的通信性能变得更好。波束赋形模型如图 1 所示。

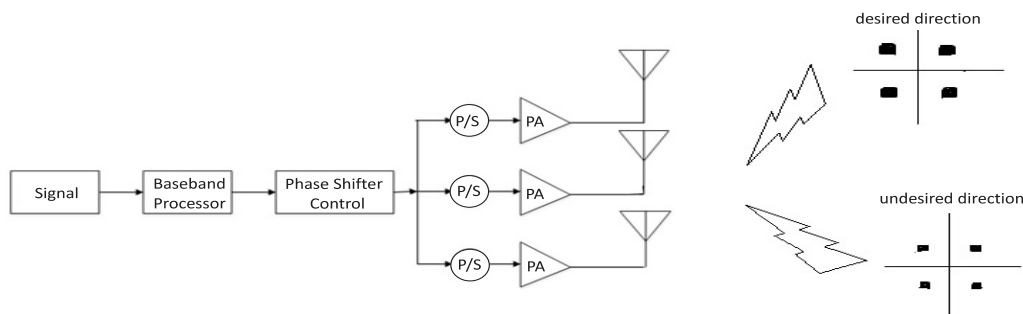


图 1 波束赋形技术模型图

近来研究表明,通过波束赋形方法产生的定向波束,可增强合法接收者的接收信号强度,如果合理设计波束的旁瓣或零点,就可以在一定程度上抵御非法用户的窃听。由图 1 不难看出,这种方式的缺点在于不同方位的接收信号只存在信号幅度上的区别(发射天线方向图决定)和能量强度上的差别,而不同方位接收的调制信号的星座图相同(即星座点间的相对相位关系不发生改变)。所以,只要窃听接收机具有足够的灵敏度,就可以顺利捕获到正确的通信信息,这无疑对无线通信信息的安全传输造成了不利影响。

方向调制技术即射频调制技术,主要思想是:每个阵元对应一个发射波束,通过相移器来控制每个波束的相位中心,期望方向会同时接收到多个通信波束并加以合成,形成与传统的基带调制信号相同的信号星座图,而在非期望方位接收机的信号星座图会产生畸变。国内外已有相关的研究,理论与技术也都比较成熟。文献[6-7]采用遗传算法获得天线阵中每个阵元的权值,从而仅使特定方向(即和期望方向)上形成正

确的星座图,而无需考虑其他方向信号星座图的畸变程度,但遗传算法实现过程复杂,相控阵技术成本代价也较高,不实用。文献[8-9]通过射频开关和天线反射器切换,使得不同方向的天线阵辐射特性不同,如图 2 所示(引自文献[4]中图 7)。只要射频开关配置选择得当,将可以在合法方向上产生正确星座图,而在非法方向上产生错误的星座图,从而实现安全传输,并且随着使用的天线反射切换器和射频开关数的增多,星座点数也增多,也能进一步为信息的安全传输提供保障。文献[10]提出了基于切换天线构成的可重构阵的方向调制,采用未经调制的载波直接激励可重构阵,通过不断切换重构发射阵列的方式,在合法方向上辐射出基带数字调制信号来实现安全传输。其中,天线的每种重构状态对应着基带调制信号星座图中的一个星座点。文献[11]提出了一种基于双切换天线阵的方向调制方法,在天线端通过发射天线的不断切换来综合出调制信号,同时用射频调制以使非期望方向上的星座点产生畸变,降低窃听者的截获率,导致窃听者

的误码性能恶化。但是这种方法的缺点在于发生切换时容易造成发射功率的浪费。

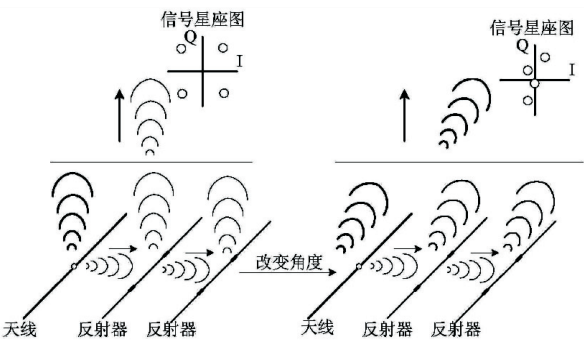


图 2 基于反射器的方向调制技术

2 基于稀疏阵的方向调制技术

天线阵的排列形式可以是线阵、面阵,无论是线阵还是面阵,又可采用均匀阵列和非均匀阵列。均匀阵列的各阵元天线具有相同的阵元间距,若知道合法接收者方向和干扰方向,可以通过调整移相器来将主瓣指向合法方向,采取诸如切比雪夫方向图,泰勒综合法和贝利斯综合法的方式来抑制旁瓣,一定程度上实现了安全传输,但是如果阵元间距过小,就会产生严重的互耦效应<sup>[12]</sup>,影响到合法接收者对正确信息的接收,对天线阵列的性能产生不良影响。所以,在基于大规模天线阵的 5G 系统中广泛应用均匀阵显得特别不现实,于是非均匀阵即稀疏阵就派上用场了。稀疏阵由于其阵元位置的稀疏性,使得天线阵列的孔径增大,而且由于阵波瓣宽度与阵列的最大尺寸有关,因此稀疏阵能获得窄的波瓣宽度,提高空间分辨率,减弱阵元间的互耦效应<sup>[13]</sup>。同时稀疏阵相对于等矩阵来说,减少了单元数目,降低了馈电网络的复杂性和故障率,从而明显降低了天线的成本。稀疏阵的诸多优点使其被视

为 5G 系统的关键技术之一,它将会和方向调制技术进行融合来保证下一代移动通信系统的安全传输。

在大规模线阵条件下,随着发射天线数目的增加,MIMO 编码和译码的算法复杂度也将急剧增加,为此,采用选择发送天线的方案。其核心思想是从所有的发射天线中选择出一部分性能优越的天线来发射信号。因为选择天线是产生稀疏阵的一种手段,所以关于天线子集选择的研究一直在进展中。

文献[14-15]是利用天线阵列的冗余性和信道分集的特点,通过随机选择各天线阵元的加权系数,形成发射端与窃听者之间的等效信道的快速随机变化,当窃听者使用盲均衡方法时无法收敛,从而恶化窃听者的误码性能,达到 LPI 的目的。该方法的安全性主要依赖两方面,一方面是随机设置依赖发射天线权系数,另一方面是发射天线信道的不相关性。但是该方法的缺陷在于功率利用率太低,为了保证合法用户的通信质量必须拥有很强的发射功率才行。为了解决随机加权系数造成功率利用率过低的问题,文献[16]提出在天线阵列固定的情况下通过每次随机选取若干天线发射以达到等效信道随机变化的目的。它的主要想法是,发射端将映射成星座点的信息符号随机分配给若干个天线上分别加权后发射,使得各阵元发出的信号在期望方向始终同相叠加,不仅形成正确的星座图而且得到最高的发射增益,而非法方向信道的随机快变造成窃听者每次接收到的信号增益和相移都会随机变化,产生的星座图也是畸形的,因此窃听者无法有效地通过盲均衡算法解调信息,保证了窃听者的低截获率,实现了安全传输。

文献[17]提出一种使用 ASM (Antenna Selection Modulation, 选择天线子集) 的方式进行信号传输,基于天线子集选择的传输模型如图 3 所示。

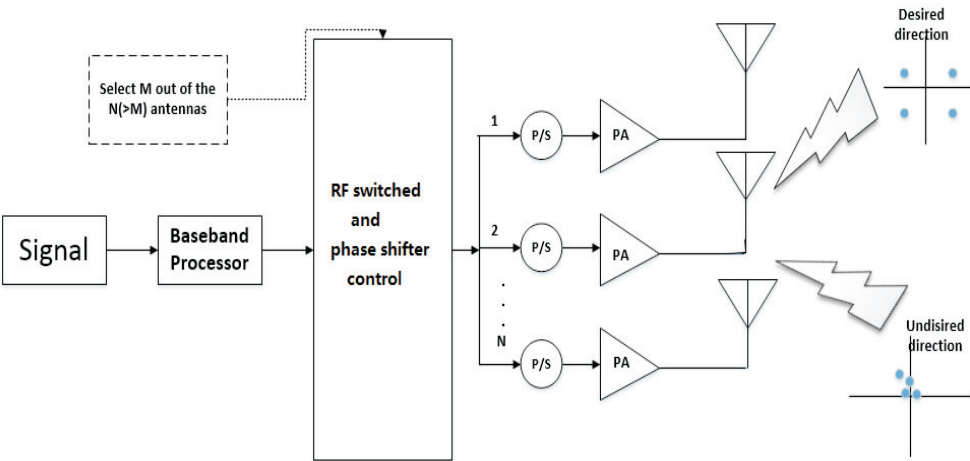


图 3 天线选择模型

由图 3 可看出,ASM 比传统的调制模型多了一个用来选取天线子集的相位控制模块,可以采用随机选

择算法和基于模拟退火算法的最优子集选择两种方法随机产生天线子集。与文献[6-11]中提到的通过改



变发射天线的相位来扰乱非法方向的星座图的方法的不同之处在于,在随机选择天线子集的过程中,由于不断改变沿旁瓣的远场模式,所以产生了许多额外的星座点,这些额外的星座点正好干扰了非法方向上的星座图,使非法窃听者接收到的星座图是混叠的,从而提高了信息传输的可靠性。

3 基于混合阵的方向调制技术

将大规模天线阵的阵元按特定规律划分成多个子阵,各子阵中每个阵元都有自己的移相器,所有子阵组成混合阵<sup>[18]</sup>。混合阵的方向调制的基础在于如何划分子阵列,文献[19]根据子阵拓扑的不同分为两类:相邻阵列划分和交叉阵列划分,如图4所示。

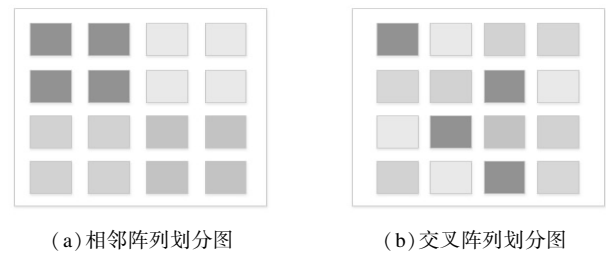
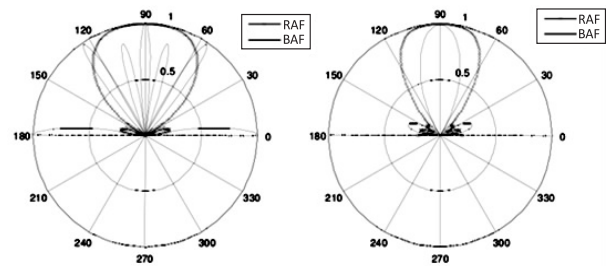


图4 相邻阵列和交叉阵列图

如图5所示,相邻阵列划分方法产生的主波束宽度比交叉阵列划分产生的大,而且在主瓣的两端有很

明显的旁瓣,极易产生干扰,易对安全通信造成影响,因此交叉阵列划分优于相邻阵列划分方法。但是,如果子阵划分不合理,就算阵元级部分很好地完成了调制,也会因为出现旁瓣而对主波束产生干扰,严重破坏阵列的天线性能。所以如何合理划分子阵对于混合阵的方向调制起着关键作用。遗传算法<sup>[20]</sup>、粒子群算法<sup>[21]</sup>等群体智能优化算法,既能很好地抑制子阵划分时的旁瓣问题,又兼顾搜索最优子阵波束成形增益,因此成为混合阵波束成形过程中划分子阵的有效工具。



(a) 相邻划分方法的方向图 (b) 交叉划分方法的方向图

图5 两种子阵的辐射方向图比较

文献[22]把每个天线子阵虚拟成一根单独的天线,则该大型的混合阵就等效成一个简化的天线阵列,运用之前提及的方向调制理论就可以实现混合阵的方向调制。文献[18]在文献[22]的基础上提出一个新的混合阵模型,如图6所示。

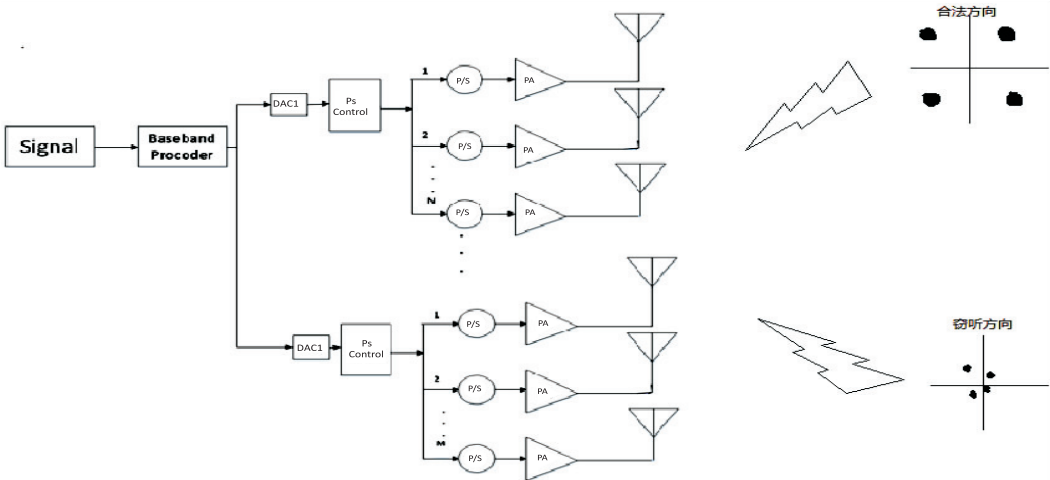


图6 混合阵方向调制图

该模型的特色之处在于混合阵中每个子阵与一个基带信号处理模块相连接,通过对子阵加权形成期望波束,将凸优化的方法应用到基带波束成形算法中去获得子阵级较优的权矢量,从而获得方向性更强的主瓣;再通过移相器改变各阵元发射信号的相位,在合法方向上产生正确的星座图,而在其他方向产生幅度和相位都发生畸变的信号,抑制了窃听接收机窃取有用信息,形成了一条安全的通信链路,完成了通信信息的可靠传输。其中,每个子阵亦可通过天线子集选择、切换天线阵元等方式进行子阵性能的优化,从而

提高混合阵的整体安全性能。

总而言之,通过对混合天线阵的设计,在射频端形成多波束的同时辐射通信信息,使得发送的调制信号的幅度和相位都与方位参数有关,通过方向调制区分了不同方向发送的信号星座图,使窃听方向接收到的信号星座图是畸形的,从而扭曲了窃听方向接收到的信息,达到了安全通信的目的。而且每个子阵可同时产生多个波束,将原来的单用户系统扩展到多用户系统,扩大了天线阵的应用范围。混合阵不仅能提高信息的传输可靠性,还因其能很大程度上减少天线部署

的代价,降低计算复杂度,所以混合阵在基于大规模天线阵的 5G 通信系统中应用前景广阔。

## 4 结束语

在第 5 代移动通信系统中,人们对于数据业务的需求呈现爆炸式增长,所以信息通信技术带来的安全问题随之变得更为突出,能量消耗也变得更加严重。大规模 MIMO 技术因其能提高频谱效率和可靠性而成为 5G 移动通信的一个关键技术,将大规模 MIMO 技术和方向调制技术相结合应用在 5G 系统中为其通信带来了安全。但是,这也只是从理论角度论述其安全性,而且目前研究中的信道模型比较简单,实际的无线信道中的多径衰落等因素并未考虑全面,信道状态信息(CSI)准确估计上的误差,将会影响其能达到的理想的安全层次,所以建立一个接近实际通信环境的信道模型是进行正确安全评估的首要任务。

## 参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- [2] 束咸荣,何炳发,高 铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 孔维萍. 基于多天线的物理层安全通信技术的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [4] Marzetta T L. Nocooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2010,9(11):3590-3600.
- [5] 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.
- [6] Daly M P, Bernhard J T. Directional modulation technique for phased arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2009,57(9):2633-2640.
- [7] Daly M P, Bernhard J T. Directional modulation and coding in arrays[C]//Proceedings of IEEE international symposium on antennas and propagation. [s. l.]: IEEE,2011:1984-1987.
- [8] Babakhani A, Rutledge D, Hajimiri A. A near-field modulation technique using antenna reflector switching[C]// Proceedings of IEEE international solid-state circuits conference. [s. l.]: IEEE,2008.
- [9] Babakhani A, Rutledge D B, Hajimiri A. Transmitter architectures based on near-field direct antenna modulation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits,2008,43(12):2674-2692.
- [10] Daly M P, Bernhard J T. Beamsteering in pattern reconfigurable arrays using directional modulation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2010,58(7):2259-2265.
- [11] Baghdady E. Directional signal modulation by means of switched spaced antennas[J]. IEEE Transactions on Communications,1990,38(4):399-403.
- [12] 曹茂国. 稀疏通信阵列波束成形技术研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [13] 薛正辉,李伟明,任 武,等. 阵列天线分析与综合[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [14] Moliseh A F, Win M Z. MIMO systems with antenna selection[J]. IEEE Microwave Magazine,2004,5(1):46-56.
- [15] Li Xiaohua, Hwu J, Ratazzi E P. Using antenna array redundancy and channel diversity for secure wireless transmissions[J]. Journal of Communications,2007,2(3):24-32.
- [16] 穆鹏程,殷勤业,王文杰. 无线通信中使用随机天线阵列的物理层安全传输方法[J]. 西安交通大学学报,2010,44(6):62-66.
- [17] Valliappan N, Lozano A, Heath R W. Antenna subset modulation for secure millimeter-wave wireless communication[J]. IEEE Transactions on Communication,2013,61(8):3231-3245.
- [18] Zhang J A, Huang X, Dyadyuk V, et al. Massive hybrid antenna array for millimeter-wave cellular communications[J]. IEEE Wireless Communications,2015,22(1):79-87.
- [19] 李 洁. 莱斯信道混合式波束成形技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [20] 程乃平,潘点飞. 大型阵列天线子阵划分及栅瓣抑制方法[J]. 信号处理,2014,30(5):535-543.
- [21] 孙海浪. 阵列天线测向算法及子阵划分研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- [22] Jiang Meilong, Yue Guosen, Rangarajan S. MIMO transmission with rank adaption for multi-gigabit 60GHz wireless[C]//IEEE global telecommunications conference. [s. l.]: IEEE,2010:1-5.