

5G 多天线系统中毫米波物理层安全设计

孟庆民^{1,2}, 龚家乐^{1,2}, 曾桂根^{1,2}, 刘传顺^{1,2}

(1. 南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 无线传感器与宽带无线通信教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 三维 MIMO (3D Multiple Input Multiple Output, 3D MIMO) 技术是一种提高第 5 代 (The Fifth Generation, 5G) 无线网络覆盖和频谱效率的潜在技术。三维信道空间模型 (Three-Dimensional SCM, 3D SCM) 作为 3D MIMO 技术的一部分, 它在 2D SCM 的基础上增加了垂直维自由度。在考虑毫米波段传输方案基础上, 文中重点探讨了 3D SCM 对物理层安全设计的影响。首先简述了 2D SCM 和 3D SCM 模型, 接着基于毫米波段路径损耗模型, 主要研究 3D SCM 如何影响毫米波段的安全容量。文中采用 1.9 GHz 频段和 28 GHz 及 73 GHz 两个毫米波频段, 引入相应的路径损耗模型, 最后在不同载波频率以及基站下倾角下采用计算机仿真评估了毫米波通信的信道安全容量。结果表明, 相对于传统 2D SCM 模型, 3D SCM 在 28 GHz 和 73 GHz 频段上的安全容量有一定程度的提升。与此同时, 适当地调整基站天线阵列的下倾角也利于优化期望用户的安全容量。

关键词: MIMO; 安全容量; 三维信道空间模型; mmWave; 5G; 信道建模

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2016)02-0091-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.02.021

Design of Millimeter Wave Physical Layer Security in 5G Multi Antenna System

MENG Qing-min^{1,2}, GONG Jia-le^{1,2}, ZENG Gui-gen^{1,2}, LIU Chuan-shun^{1,2}

(1. Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts & Telecommunications,
Nanjing 210003, China;

2. Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of MOE,
Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Three-dimensional Multiple Input Multiple Output (3D MIMO) is one of potential techniques to improve coverage and spectrum efficiency of 5G networks. Three-dimensional channel model (3D SCM), as an important part of 3D MIMO technology, has the additional vertical dimension of freedom compared with Two-dimensional channel model (2D SCM). The effect of 3D SCM to the physical layer security design is discussed in this paper where mmWave communications are considered. Firstly it outlines the 2D SCM and the 3D SCM model, and then by using the mmWave path loss models, analyzes the effect on security capacity of 5G mmWave communications systems based on 3D SCM. In this paper, the 1.9 GHz band and two millimeter wave frequency bands, 28 GHz and 73 GHz, are used, and the two path loss models are introduced. Finally the secure capacity performance of the millimeter-wave communication scheme is evaluated by using computer simulations under the different carrier frequencies and different base station downtilts. The results show that compared with traditional 2D SCM, the security capacity of 3D SCM has a certain increase under the 28 GHz band and the 73 GHz band. Meanwhile, right adjustment of the base station antenna array tilt angle can also be benefit to optimize the security capacity of the desired user.

Key words: MIMO; secure capacity; 3D SCM; mmWave; 5G; channel modeling

0 引言

到 2020 年, 无线数据传输的需求预计比现在高

1 000 倍^[1-2]。面对激增的无线传输需求, 提高已有频段的频谱效率是提高信道容量的一种有效方式。3D

收稿日期: 2015-05-17

修回日期: 2015-08-20

网络出版时间: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61372122, 61372123, 61471202)

作者简介: 孟庆民 (1965-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新一代宽带无线通信中的全双工 MIMO 和三维 MIMO 传输的理论与技术; 龚家乐 (1991-), 男, 硕士, 研究方向为三维 MIMO 建模和全双工 MIMO 波束成型设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160126.1520.048.html>

MIMO (Three - Dimensional Multiple Input Multiple Output) 技术能够通过调整天线阵列的垂直维倾斜角来抑制小区间的干扰,从而有助于提升小区边缘的用户吞吐量性能。3D SCM 作为 3D MIMO 技术的一部分,在 2D SCM 模型的基础上做了进一步的扩展,它同时考虑了水平和垂直维度的功率谱。近年来 3D SCM 引起了研究者们越来越多的关注。Nam Y H 等研究了一种基于 3D SCM 的大规模 MIMO 技术^[3]。Mondal 等提出了一种新的 3D 信道模型,能够对不同高度的用户建模^[4]。

使用更高的频段是解决无线传输需求的第二种方式。作为未来 5G 基础设施研究的一个方面,频谱范围的研究包括如下多个频段: <6 GHz, 38 ~ 40 GHz, 57 ~ 64 GHz, 70 ~ 75 GHz 和 81 ~ 89 GHz, 等等。现有的 LTE 网络和 WLAN 网络都基于 UHF (300 MHz ~ 3 GHz) 频段。虽然这些频段暂时能够满足传输需求,但预计到 2020 年新的可用频谱将必不可少^[5]。面对 5G 的挑战,为了将现有的网络容量能扩充 1 000 倍,运营商可能会采用毫米波段的频谱,以充分利用其频谱带宽的优势。近年来,关于毫米波信道建模的相关研究工作正在逐步展开^[6-9]。

与信道容量同样重要的是通信的安全性,窃听和恶意攻击是无线传输的两个问题^[10-11]。Barros 等给出了一种安全容量的定义(期望用户的互信息速率和非期望用户的互信息速率的差)^[12],安全容量越大代表系统越安全。

文中首先简述 2D SCM 和 3D SCM 信道模型,接着基于毫米波 (Millimeter Wave, mmWave) 路径损耗模型,仿真评估 2D SCM 和 3D SCM 模型对 mmWave 通信的安全容量的影响,在 Hata 模型以及 mmWave 路径损耗模型下比较了不同载波频率对系统安全容量的影响。

1 MIMO 空间信道模型简述

1.1 2D SCM 信道模型

3GPP/3GPP2 的 25996 规范提出了一种只考虑水平维度的二维空间信道模型^[13]。基站(下标用 BS 或 s 表示)与移动台(下标用 MS 或 u 表示)之间的信道衰落系数为:

$$h_{u,s,n}^{2D}(t) = \sqrt{\frac{\sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M (\sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \times \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \times \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \exp(jk \|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t)) \quad (1)$$

其中, M 表示第 n 个路径簇包含的子路径数; d_u ,

d_s 分别表示用户端和基站端阵元间隔; $\theta_{n,m,AoD}$ 和 $\theta_{n,m,AoA}$ 代表路径簇 n 中第 m 个子路径在基站处的分离角和移动台的到达角; θ_v 表示移动台的速度方向; σ_{SF} 为阴影衰落标准差。

1.2 3D SCM 信道模型

3D SCM 在 2D SCM 的基础上增加了垂直维度的功率谱,同时考虑了水平维度和垂直维度的功率谱,基站和移动台之间的信道衰落系数为^[3]:

$$h_{u,s,n}^{3D}(t) = \sqrt{\frac{\sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M (\sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD}, \varphi_{n,m,AoD})} \times \exp(j[kd_s \bar{r}_s \cdot \bar{\Phi}_{n,m} + \Phi_{n,m}]) \times \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA}, \varphi_{n,m,AoA})} \times \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \exp(jk \|v\| \cos(\varphi_{n,m,AoA}) \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t)) \quad (2)$$

其中, $\varphi_{n,m,AoD}$ 和 $\varphi_{n,m,AoA}$ 分别表示第 n 个路径簇中第 m 个子路径在基站处的垂直维分离角和移动台的垂直维到达角; \bar{r}_s 为发射天线 s 的位置矢量; $G_{BS}(\theta_{n,m,AoD}, \varphi_{n,m,AoD})$ 代表与分离角对应的基站端的天线增益^[12]; $G_{MS}(\theta_{n,m,AoA}, \varphi_{n,m,AoA})$ 代表与到达角对应的移动台端的天线增益; k 表示波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长。

2 毫米波段的物理层安全思想

2.1 一种提高 5G 物理层安全的思想

本节提出一种毫米波段的物理层安全设计思想。它集成了 3D MIMO 技术,同时利用基站下倾角调整来提高期望用户的安全容量。

2.2 期望用户安全容量定义及其计算

考虑一个半径为 100 m 的小区。设基站的天线数为 N_t ,期望用户和监听用户的天线数均为 N_r 。基站与期望用户,基站和监听用户之间为 LOS 传播。则用户接收端的信号可以表示为:

$$y = \sqrt{L}Hx + n \quad (3)$$

其中,基站发送信号为 x ,功率 $P = E\{x^H x\}$; n 为高斯白噪声,满足 $n \sim CN(0, N_0 W_c)$; H 为下行信道状态矩阵,其元素为 $h_{u,s,n}^{2D}$ 或是 $h_{u,s,n}^{3D}$; L 为路径损耗。

为便于分析,只考虑单径的无线环境。记期望用户与基站间的路径损耗为 L_D ,记 $\alpha_D = L_D P$,用户下行信道矩阵记为 H_{BD} ,则期望用户接收信号 y_d 可表示:

$$y_d = \sqrt{L_D}H_{BD}x + n_d \quad (4)$$

用户接收速率为:

$$C_d = E\{\log(\mathbf{I} + \alpha_D/N_d H_{BD}H_{BD}^H)\} \quad (5)$$

对于监听用户,下行信道状态矩阵设为 H_{BE} ,基站

与窃听用户间的路径损耗为 L_e , 记 $\alpha_e = L_e P$ 。

则窃听用户接收信号 y_e 可表示为:

$$y_e = \sqrt{L_e} \mathbf{H}_{BE} x + n_e \tag{6}$$

接收速率为:

$$C_e = E \{ \log(\mathbf{I} + \alpha_e / N_e \mathbf{H}_{BE} \mathbf{H}_{BE}^+) \} \tag{7}$$

安全容量的定义为期望用户和监听用户之间的速率差^[8], 由此可得期望用户的安全容量为:

$$R = \max_t \{ C_d(t) - C_e(t) \} \tag{8}$$

2.3 mmWave 蜂窝系统信道建模

城市 Hata 模型是城市宏小区最常用的模型之一, 其基本的路径损耗可表示为^[13]:

$$L_{\text{hata}} = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_{\text{MHz}}) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)] \times \log_{10}(d_{km}) - k \tag{9}$$

其中, $a(h_m)$ 为移动台天线高度校正因子; k 为常数。

然而,Hata 模型的适用范围为 150 MHz ~ 2 GHz, 对于频率更高的毫米波可能不再适用。更高频段, 如 10 GHz 以上的毫米波可能被用于 5G 通信。对于毫米波蜂窝系统的建模分析正在成为众多研究者关注的热点之一,Ghosh 等创建了一个路径损耗模型^[14-16] (参数见表 1)。它考虑基站高度 17 m, 移动台高度 2 m。路径损耗模型为:

$$PL(d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10\tilde{n} \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \tag{10}$$

其中, d_0 为参考距离 ($d_0 = 1 \text{ m}$); λ 为波长; \tilde{n} 为路径损耗因子; d 为基站与接收端的距离 (单位 m); X_σ 表示阴影衰落, 是均值为 0、标准差为 σ 的高斯随机变量。

表 1 对路径损耗指数和阴影衰落标准偏差的最佳拟合

| | 基站到用户 (73 GHz) | | 基站到用户 (28 GHz) | |
|------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | \tilde{n} /dB | σ /dB | \tilde{n} /dB | σ /dB |
| LOS | 2.0 | 5.2 | 2.1 | 3.6 |
| NLOS | 3.3 | 7.6 | 3.4 | 9.7 |

3 仿真结果和分析

本节对第 2 节中毫米波段的、基于 3D SCM 的物理层安全设计进行仿真评估。

3.1 载波频率对安全容量的影响

仿真基于式 (9) 中 COST 231 Hata 模型以及式 (10) 中 mmWave 路径损耗模型, 但是未考虑信道中的阴影。将仿真不同载波频率下的安全容量, 系统仿真参数如表 2 所示。

不同频率下期望用户的安全容量变化如图 1(a)

和(b)所示。

表 2 系统仿真参数

| 参数 | 数值 |
|----------------|-------------|
| 基站高度/m | 17 |
| 期望用户和监听用户高度/m | 2 |
| 期望用户和基站距离/m | 50 |
| 监听用户和基站距离/m | 80 |
| 载频 f_c /GHz | 1.9, 28, 73 |
| 天线功率/dBm | 30 |
| 期望用户和监听用户接收天线数 | 1 |
| 基站发射天线数 | 1, 4 |
| 移动台速率/(km/h) | 3 |
| 噪声功率/(dBm/Hz) | -174 |
| 莱斯指数 K | 1 |
| 移动台速率/(km/h) | 3 |

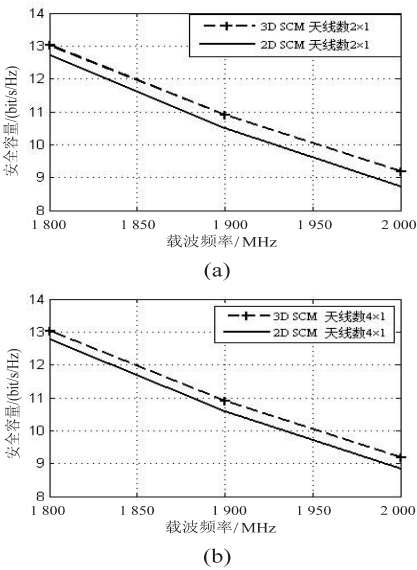


图 1 1.9 GHz 频率附近安全容量对比

由于天线数的增加, 期望用户和监听用户的接收速率同时增大, 所以期望用户的安全容量基本保持不变。与此同时, 图 1 和图 2 表明安全容量随频率的升高逐渐减小。而相对于同一频率而言, 3D SCM 安全容量略高于 2D SCM 模型时的安全容量, 1.9 GHz 频段约有 3% 左右的提高。而频率更高的 28 GHz 约有 5% 的提升, 73GHz 约有 10% 的提升。

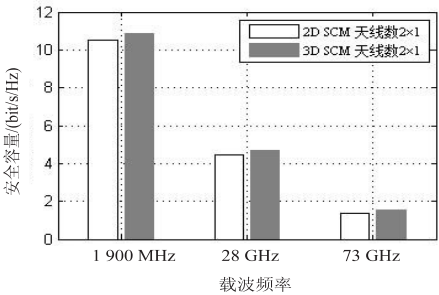


图 2 1.9 G、28 G 和 73 G 频段安全容量对比

3.2 基站下倾角对安全容量的影响

对于 3D SCM 而言, 天线垂直维谱可用于提升信道容量。这里将评估期望用户安全容量如何受基站垂

直维的下倾角的影响。

本节模拟仿真基站下倾角在 $6 \sim 28^\circ$ 时,期望用户安全容量的变化。在基站发送天线数 $N_t = 4$ 时,期望用户与监听用户接收速率同时增大,这导致安全容量并未显著变化。因此,此处仅仅给出 $N_t = 2$ 配置时的仿真结果。

仿真采用 28 GHz 和 73 GHz 两频段,如图 3 与图 4 所示。

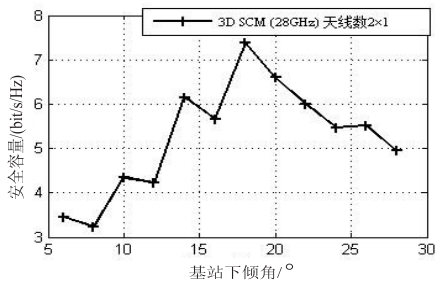


图 3 28 GHz 频段基站下倾角对安全容量的影响

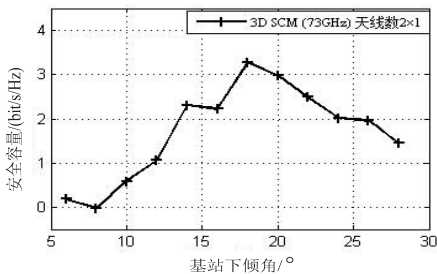


图 4 73 GHz 频段基站下倾角对安全容量的影响

载波为 28 GHz 时,随着基站下倾角增大,期望用户的安全容量总体逐步上升到达峰值后逐渐减小,当下倾角取 18° 左右时,期望用户的安全容量达到最大。当载波为 73 GHz 时,期望用户安全容量的变化与 28 GHz 时类似。

4 结束语

10 GHz 以上的毫米波段通信是 5G 网络的物理层研究的一个子方向。文中简要分析了 2D SCM 与 3D SCM 模型,提出了一种毫米波段基于 3D SCM 的物理层安全设计思想,着重研究不同频率以及不同基站下倾角对用户安全容量的影响。仿真结果表明,相比 2D SCM,3D SCM 在 28 GHz 和 73 GHz 频段的安全容量均有小幅提升,与此同时,适当调整基站天线阵列下倾角可以提高期望用户的安全容量。

参考文献:

- [1] 5G 概念白皮书[EB/OL]. 2015. http://wenku.baidu.com/link?url=p-w08Tdm1NoxyieuNWt5FrimQe6nMq_wZdgwK-002YJU5BIKK2v17G38JfMongwDAAPxdr58QVhOxqdLG-vT-lA0ybF580jwZtKQfY7WYqRb9y.pdf.
- [2] Raaf B, Zirwas W, Friederichs K J, et al. Vision for beyond 4G

- broadband radio systems [C]//Proc of PIMRC. [s. l.]: IEEE, 2011: 2369–2373.
- [3] Nam Y H, Ng B L, Sayana K, et al. Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 172–179.
- [4] Mondal B, Thomas T, Visotsky E, et al. 3D channel model in 3GPP [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 16–23.
- [5] Singh S, Kulkarni M N, Ghosh A, et al. Tractable model for rate in self-backhauled millimeter wave cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 33(10): 1–15.
- [6] Singh S, Kulkarni M N, Andrews J G. A tractable model for rate in noise limited mmWave cellular networks [C]//Proc of Asilomar conference on signals, systems and computers. Asilomar: [s. n.], 2014: 1911–1915.
- [7] Akdeniz M R, Liu Y P, Samimi M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 32(6): 1164–1179.
- [8] Rappaport T S, Gutierrez F, Ben-Dor E, et al. Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor urban cellular communications [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1850–1859.
- [9] 董可, 廖学文, 朱世华. 毫米波通信系统中利用随机逼近的波束赋形算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 72–76.
- [10] Shiu Y S, Chang S Y, Wu H C, et al. Physical layer security in wireless networks: a tutorial [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(2): 66–74.
- [11] Chorti A, Perlaza S M, Zhu H, et al. On the resilience of wireless multiuser networks to passive and active eavesdroppers [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 1850–1863.
- [12] Barros J, Rodrigues M R D. Secrecy capacity of wireless channels [C]//Proc of 2006 IEEE international symposium on information theory. Seattle, WA: IEEE, 2006: 356–360.
- [13] 3GPP TR 25.996 V10.0.0. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations [R]. [s. l.]: [s. n.], 2011.
- [14] Ghosh A, Thomas T A, Cudak M C, et al. Millimeter wave enhanced local area systems: a high data rate approach for future wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1152–1163.
- [15] Samimi M K, Rappaport T, MacCartney G R. Probabilistic omnidirectional path loss models for millimeter-wave outdoor communications [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(4): 357–360.
- [16] 3GPP TR 36.814 V9.0. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects [R]. [s. l.]: [s. n.], 2010.

5G多天线系统中毫米波物理层安全设计


作者:

[孟庆民](#), [龚家乐](#), [曾桂根](#), [刘传顺](#), [MENG Qing-min](#), [GONG Jia-le](#), [ZENG Gui-gen](#), [LIU Chuan-shun](#)

作者单位:

[南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003; 南京邮电大学 无线传感器与宽带无线通信教育部重点实验室, 江苏 南京 210003](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#)

英文刊名:

年, 卷(期):

2016 (2)

引用本文格式: [孟庆民](#). [龚家乐](#). [曾桂根](#). [刘传顺](#). [MENG Qing-min](#). [GONG Jia-le](#). [ZENG Gui-gen](#). [LIU Chuan-shun](#) 5G多天线系统中毫米波物理层安全设计[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2016 (2)