

26 GHz 室内毫米波人体阻挡衰减特性研究

耿绥燕¹, 李杏¹, 王琦¹, 王光波¹, 王蒙军², 孙韶辉², 洪伟³, 赵雄文^{1,2,3}

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 电信科学技术研究院无线移动通信国家重点实验室, 北京 100191;

3. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 基于 26 GHz 室内通信测量数据对人体阻挡衰减特性进行了研究。在 Vogler 多重刃形绕射场强计算的基础上, 提出了包含二射线和四射线的多个人体阻挡绕射模型。结果表明, 四射线人体阻挡衰减模型与实验数据非常吻合, 信道测量带宽为 1 GHz 时的人体绕射衰减略大于带宽为 500 MHz 时的衰减。在人体沿发端(TX)和收端(RX)连线平移过程中, 人体位于连线中间位置时衰减最小, 人体离 RX 端最近时衰减最大。在多人体穿过视距线阻挡测量中, 人体横向穿过视距线(人脸正面向 RX 喇叭口)比人体侧向(人脸侧面向 RX 喇叭口)穿过视距线时衰减大。此外, 人体阻挡数目越多, 衰减越大, 人体阻挡数目每增加 1 人, 阻挡衰减增加 5~8 dB。本文结果为分析 26 GHz 人体衰减特性和该频段毫米波无线通信系统设计提供有用信息。

关键词: 毫米波 26 GHz; 人体阻挡特性; Vogler 绕射模型; 二射线和四射线多人体阻挡模型

中图分类号: TN928

文献标识码: A

Research on human blockage effect for indoor 26 GHz mm-wave communications

GENG Sui-yan¹, LI Xing¹, WANG Qi¹, WANG Guang-bo¹, WANG Meng-jun²,
SUN Shao-hui², HONG Wei³, ZHAO Xiong-wen^{1,2,3}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunications Technology (CATT), Beijing 100191, China;

3. State Key Laboratory of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on 26 GHz indoor channel measurements, the blockage attenuation of human bodies was investigated. 2-ray and 4-ray human blockage models were proposed by calculation of the Vogler's multiple knife-edge diffraction field. Results show that 4-ray model fits quite well with measurement data. Human block attenuations are slightly bigger with 1 GHz than with 500 MHz bandwidth. In the blockage measurement of one person moving along the connection line between the transmitter (TX) and receiver (RX), the smallest attenuation is found when the person is located at the middle of the connection line, and the biggest attenuation is observed when the person is nearest from the RX position. In the blockage measurements by multiple human bodies, the attenuation is bigger in the cases which the persons cross the TX-RX connection line with their front faces directed to the horn aperture at the RX than the cases with their lateral faces directed to the RX horn aperture. The blockage attenuation is larger with the increase of person numbers, about 5~8 dB more attenuation per person. The results can be used for design of mm-wave 26 GHz indoor communications systems.

Key words: mm-wave 26 GHz, person blockage effect, Vogler diffraction model, 2-ray and 4-ray multiple person blocking model

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-09-02

基金项目: 无线通信国家重点实验室(电信科学技术研究院)基金资助项目(No.DTimo.15.094); 毫米波国家重点实验室开放课题基金资助项目(No.K201517)

Foundation Items: Foundation of State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunications Technology (No.DTimo.15.094), Foundation of State Key Laboratory of Millimeter Waves (No.K201517)

1 引言

吉比特毫米波室内 M2M(machine-to-machine) 通信技术正在全球兴起^[1,2]。目前,世界上有许多国家和地区已经把 26~38 GHz 频带分配给无线宽带应用于本地多点分配系统(LMDS, local multi-point distribution system)中^[3,4]。工信部已经批准中国移动、中国联通、中国电信和中国网通等运营商开展 26 GHz 下的 LMDS 网络接入业务。目前国际上对 26 GHz 毫米波的研究,主要针对室外大尺度路径损耗、阴影衰落以及多径效应等^[5]。26 GHz 室外信道^[6]研究表明,系统的发射天线越高,障碍物越少,覆盖范围就会越好。三星电子研究了 26 GHz 毫米波 MIMO (multiple-in multiple-out)无线通信系统,结果表明在最大传输距离达 2 km 范围内,数据的传输速率可达到 1 Gbit/s^[7,8]。为了建立一个类似于 WINNER II 或者 3GPP 的信道模型,三星目前正在致力于包括到达方向(DOA, direction-of-arrival)等信道的测量以及仿真研究^[9,10]。

人体阻挡效应是室内通信主要考虑的问题。比如,人体阻挡会严重影响室内高速率数据传输速率。目前,学者对 60 GHz 毫米波人体阻挡影响有一些研究,文献[11]提出了一个定向媒体接入控制协议,克服了中继过程中的阻挡问题,优化了中继选择和空间复用,从而提高了网络性能。文献[12]介绍了多个人体移动的办公室场景中进行的 60 GHz 毫米波测试,结果表明附加阴影衰落几乎不随频率发生显著变化。文献[13]中发现在 60 GHz 毫米波下当传输链路被人体阻挡时,传播损耗会非常高,而使用具有高增益且波束转向能力的天线可以帮助克服这个问题。此外,在 60 GHz 毫米波下针对不同的绕射体模型也进行了研究,如楔形模型、圆柱体模型等^[14,15]。

然而,现有文献中还没有发现针对 26 GHz 频段下的人体阻挡特性的研究。本文通过在室内 26 GHz 毫米波下进行的一系列人体阻挡测试,研究了人体阻挡衰减特性。具体地,基于 Vogler 多重刃绕射场强的计算,提出了二射线和四射线多个人体绕射场强计算模型,对模型的精确度和实验数据进行了分析比较。这些结果可为室内环境下包含多个人体移动的信号传播特性及无线通信系统设计提供有用信息。

2 人体阻挡测试环境和测试方式

26 GHz 毫米波下的人体阻挡效应测试是在北京安捷伦公司的一楼大厅进行的,图 1 所示为具体的测试场景。测试大厅中央除了测量设备外没有其他的阻挡物,这是为了方便人体的自由移动和减少其他阻挡物对人体绕射衰减的影响。测量过程中发端(TX)和收端(RX)的天线位置保持固定不变,发端(TX)和收端(RX)之间的距离是 15 m, TX 和 RX 为定向喇叭天线,高度均为 1.3 m。测试分为 3 种情况:人体沿着 TX-RX 连线移动、人体横向(脸正面向 RX 喇叭口)穿过 TX-RX 连线 and 人体侧向(脸侧面面向 RX 喇叭口)穿过 TX-RX 连线,3 种情况分别如图 2(a)~图 2(c)所示。具体地讲,图 2(a)所示为一个人沿 TX-RX 连线(从 TX 向 RX)移动,当人体与 TX 距离 3 m 时开始测量,每向前移动 1 m 测量一次,共测量了 12 次(最后一次测量时人体和 RX 距离为 1 m)。图 2(b)所示为人体横向穿过 TX-RX 连线,这种测量又分为 1 人、2 人或 3 人横向穿过情况。图 2(c)所示为人体侧向穿过 TX-RX 连线的测量,同样也分为 1 人、2 人或 3 人 3 种情况。所用测量带宽分别为 500 MHz 和 1 GHz,信道测量的具体参数如表 1 所示。

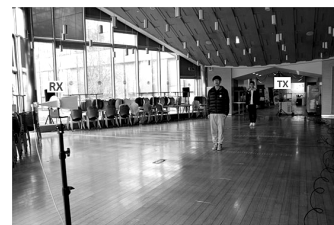


图 1 人体阻挡测试场景

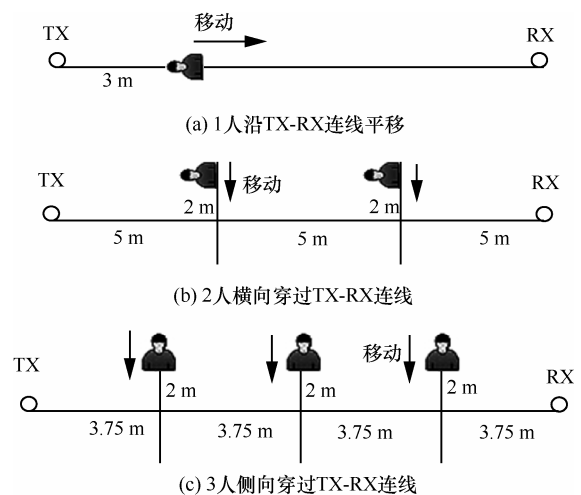


图 2 人体阻挡测试示意

表 1 26 GHz 人体阻挡测量系统参数

参数	数值
载频	26 GHz
带宽	1 GHz / 500 MHz
码长	1 024 chip
时延分辨率	1 ns
发射/接收天线	定向喇叭天线
天线增益	25 dB
发射/接收天线高度	1.3 m

3 多个人体阻挡绕射模型

本文的多个人体阻挡绕射模型是在 Vogler 多重刃形阻挡绕射的基础上提出的。Vogler 提出了一个在多个刃形阻挡物下计算绕射衰减的表达式。

3.1 Vogler 多重刃形阻挡物绕射

图 3 所示为计算多重刃形绕射的几何模型， θ_m 是绕射角， r_m 是多个刃形之间的间隔距离。当含有 N 个刃形阻挡物时，Vogler 计算绕射衰减场强(A)的表达式为^[16]

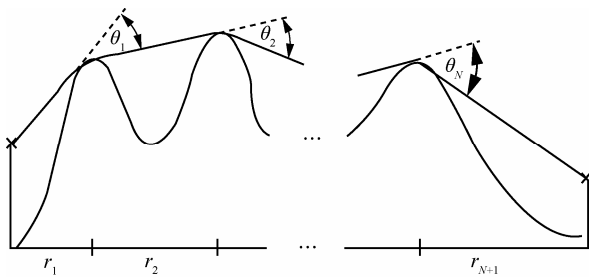


图 3 Vogler 多刃形绕射的几何模型

$$A = \frac{1}{2^N} C_N e^{\sigma_N} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right)^N \int_{\beta_1}^{\infty} \dots \int_{\beta_N}^{\infty} e^{2f} e^{-(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2)} dx_1 \dots dx_N \quad (1)$$

其中，

$$C_N = \begin{cases} 1, N=1 \\ \sqrt{\frac{r_2 r_3 \dots r_N r_T}{(r_2 + r_1)(r_3 + r_2) \dots (r_{N+1} + r_N)}}, N \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$r_T = r_1 + r_2 + \dots + r_{N+1} \quad (3)$$

$$\sigma_N = \beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_N^2 \quad (4)$$

$$\beta_m = \theta_m \sqrt{\frac{ki r_{m+1} r_m}{2(r_{m+1} + r_m)}}, m=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中， i 是虚数， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数。

$$f = \begin{cases} 0, N=1 \\ \sum_{m=1}^{N-1} \alpha_m (x_{m+1} - \beta_{m+1})(x_m - \beta_m), N \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{r_{m+2} r_m}{(r_{m+2} + r_{m+1})(r_{m+1} + r_m)}} \quad (7)$$

$$m=1, 2, \dots, N-1$$

注意，当 $N=1$ 时，式(1)就变为单刃绕射的场强衰减模型，如式(8)所示。

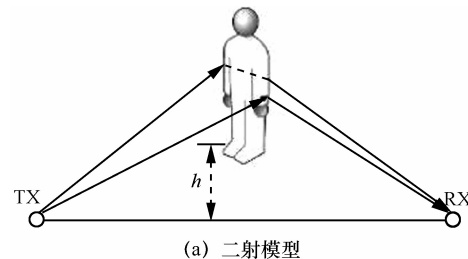
$$A(N=1) = \frac{1}{2} e^{\beta_1^2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\beta_1}^{\infty} e^{-x^2} dx \quad (8)$$

$$\beta_1 = \theta_1 \sqrt{\frac{ikr_1 r_2}{2(r_1 + r_2)}} \quad (9)$$

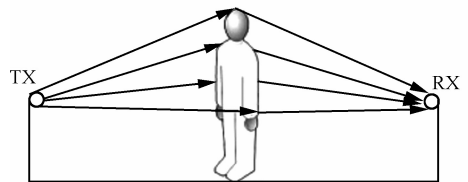
3.2 多个人体阻挡二射线和四射线模型

本文在 Vogler 多重刃形阻挡物绕射模型的基础上，提出了二射线和四射线多个人体阻挡绕射模型，分别如图 4(a)和图 4(b)所示。具体地，二射线模型考虑了来自身体两侧的绕射衰减，四射线模型不仅考虑了身体两侧，还考虑了从人体肩膀和头部上面穿过的绕射射线的场强。值得注意的是，当人体移动时，人身体一侧与 TX-RX 连线之间的距离 h (见图 4(a))，与 Vogler 模型中的绕射角的关系表达为

$$\theta_m = \frac{h_m - h_{m-1}}{r_m} + \frac{h_m - h_{m+1}}{r_{m+1}}, m=1, 2, \dots, N \quad (10)$$



(a) 二射线模型



(b) 四射线模型

图 4 人体二射线、四射线绕射模型

4 人体阻挡效应分析

以下对二射线和四射线人体阻挡模型得到的衰减与实验数据进行分析比较。

4.1 人体沿 TX-RX 连线方向移动

如图 2(a)所示, 当人体离发端 3 m 时开始测量, 每向接收端移动 1 m 测量一次, 最后一次测量时人体距离接收端长为 1 m (共测量了 12 次)。图 5 为二射线和四射线人体阻挡模型及与测量数据的比较。

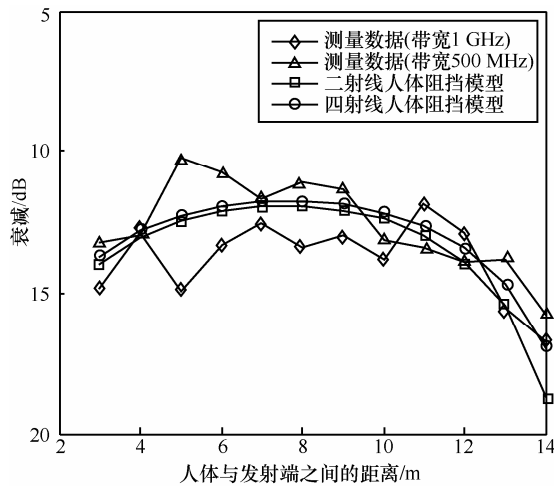
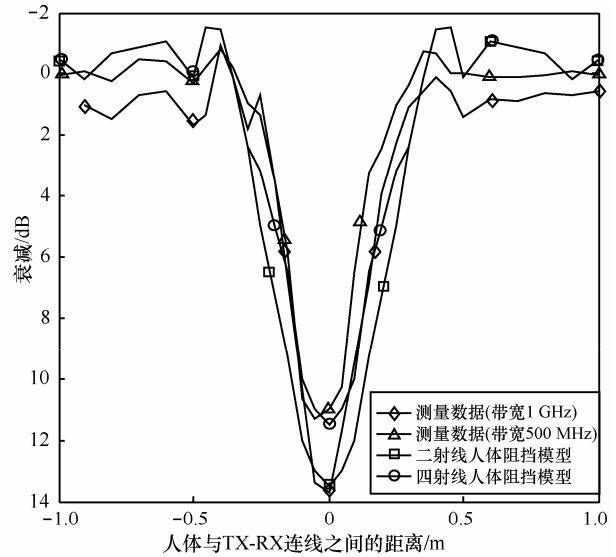


图 5 1 人在 TX-RX 连线上移动时的阻挡衰减

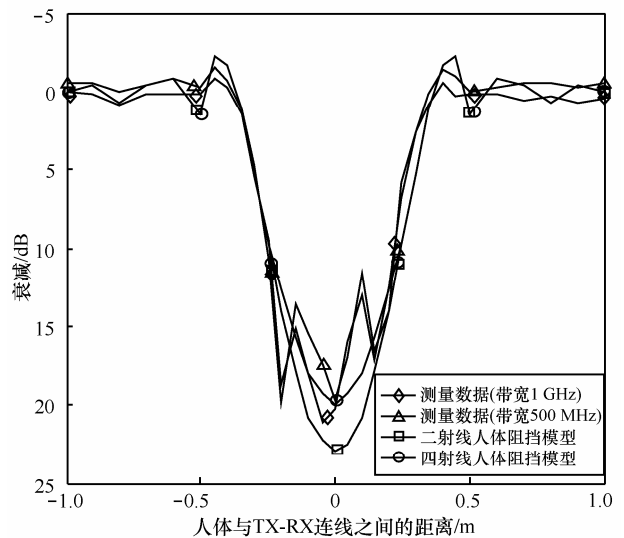
从图 5 可以看出: 1) 当人体和 TX 距离为 3~12 m 时, 实验衰减测量数据对称分布在人体阻挡模型两侧, 而且二射线和四射线 2 条人体阻挡模型曲线非常接近几乎重合; 2) 在人体和 TX 距离较远, 即 12~14 m 时, 二射线模型和实验数据有 1~3 dB 的偏差, 而四射线模型和实验数据之差在 0.5 dB 内, 四射线模型与实验数据的吻合度更好; 3) 当人体位于 TX-RX 连线中间位置时人体衰减最小(带宽 500 MHz 约 12 dB), 而当人体离 TX 最远(即离 RX 最近为 1 m)时衰减最大(17 dB, 如四射线模型所示)。这是因为在人体距离 RX 最近时, 大部分到达接收机的多径线被人体阻挡, 所以接收功率最小。

4.2 人体横向穿过 TX-RX 连线

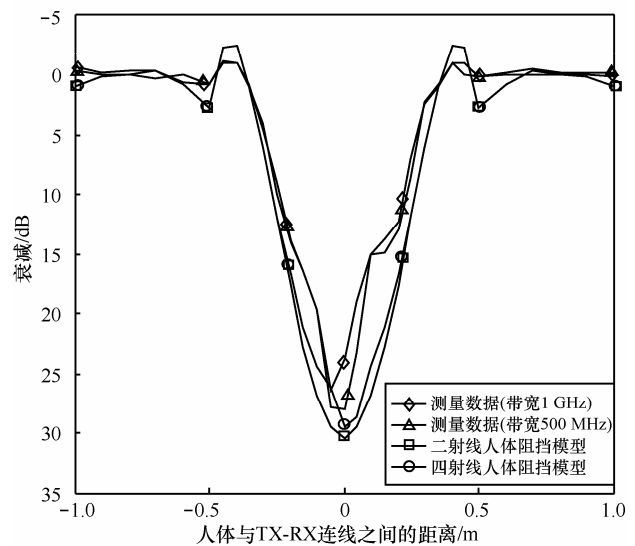
人体横向穿过 TX-RX 连线时, 横穿距离为 2 m (-1 m, 1 m), 人体每移动一个间隔(0.1 m)测量一次, 共测了 20 次。这种情况分为 1 人、2 人和 3 人横穿。1 人横穿时, 人体位于 TX-RX 连线中间(人体距 TX 和 RX 分别为 7.5 m)。2 人横穿时, 2 人位于 TX-RX 连线同一侧同时横穿, 这样 TX-RX 连线被均分为 3 段, 每段长为 5 m。3 人横穿时, 即 3 人位于 TX-RX 连线同一侧同时横穿, 连线被均分为 4 段, 每段长为 3.75 m。图 6(a)~图 6 (c)分别表示 1 人、2 人、3 人横向穿过时的测量衰减及二射线和四射线人体阻挡模型衰减的仿真结果。



(a) 1 人横穿



(b) 2 人横穿



(c) 3 人横穿

图 6 横向穿过 TX-RX 连线的人体衰减

从图 6 可以看出, 当 1 人、2 人以及 3 人横向穿过 TX-RX 连线时, 实验测量的衰减最大值分别为 12 dB、20 dB 和 28 dB, 二射线人体阻挡模型预测的衰减最大值分别为 14 dB、23 dB 和 29 dB, 而四射线模型预测的衰减最大值分别为 12 dB、20 dB 和 29 dB。因此当 1 人和 2 人阻挡时二射线模型和实验数据间有 2~3 dB 之差, 四射线模型与实验测量的衰减一致, 3 人阻挡时二射线和四射线模型都只与实验数据相差 1 dB。所以相比于二射线模型, 四射线模型与实验数据吻合更好。总体来说, 当收发天线之间人的个数越来越多时, 衰减也越来越大。此外, 从图 6 中可以发现人体衰减结果是呈左右对称的, 这是由于人体阻挡场景的几何形状是对称形式的。另外, 测量带宽为 1 GHz 时的衰减略大于带宽为 500 MHz 时的衰减。

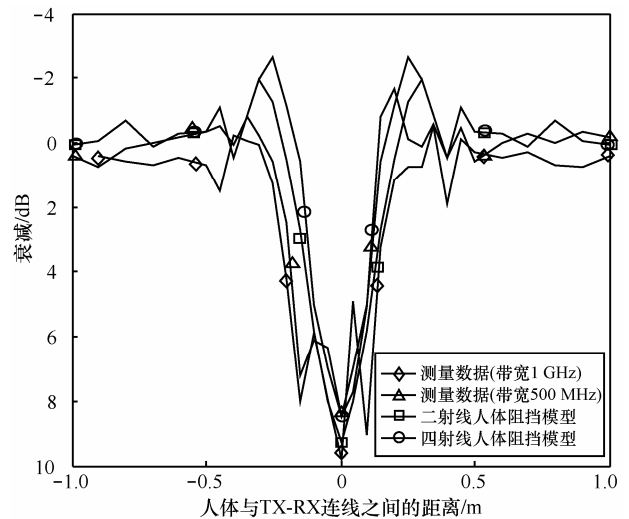
4.3 人体侧向穿过 TX-RX 连线

当人体侧向穿过 TX-RX 连线时, 穿过距离也为 2 m。具体的测量过程与人体横穿情况类似。1 人、2 人和 3 人的测量衰减以及二射线模型和四射线模型的衰减仿真结果分别如图 7(a)~图 7(c)所示。

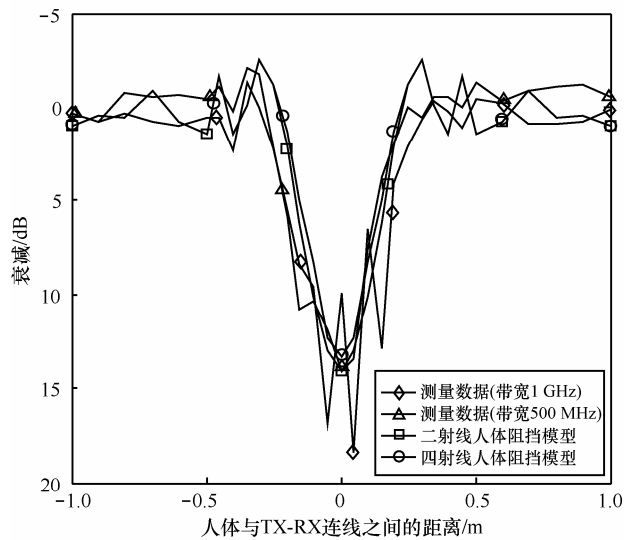
从图 7 可以看出, 当 1 人、2 人以及 3 人侧向穿过 TX-RX 连线时, 二射线人体阻挡模型的衰减最大值分别为 9 dB、13 dB 和 19 dB, 四射线模型衰减的最大值分别为 8 dB、13 dB 和 19 dB。这种情况二射线人体阻挡模型和四射线模型间的差距非常小, 2 个模型都和测量数据结果吻合。当收发天线之间人的个数越来越多时, 衰减也越来越大。相比于人体横穿情况, 人体侧穿时的衰减较小。同样地, 测量带宽为 1 GHz 时的衰减略大于带宽为 500 MHz 时的衰减。

5 结束语

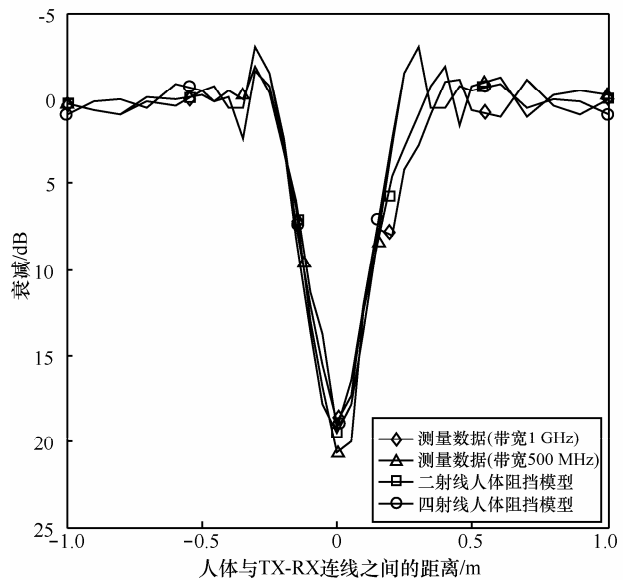
本文基于 26 GHz 毫米波室内测量对人体阻挡衰减特性进行了研究, 在 Vogler 多重刃形绕射场计算的基础上, 提出了二射线和四射线多个人体阻挡绕射模型。结果表明, 四射线人体阻挡衰减模型与实验数据非常吻合, 信道测量带宽为 1 GHz 时的人体绕射衰减略大于带宽为 500 MHz 时的衰减。在人体沿 TX-RX 连线平移过程中, 人体位于连线中间位置时衰减最小, 而位于离 RX 距离最近时衰减最大。在多个人体穿过 TX-RX 连线的阻挡衰减测量中, 人体横向穿过 TX-RX 连线时的衰减比人体侧向穿过 TX-RX 连线时的衰减大。



(a) 1人侧向穿过



(b) 2人侧向穿过



(c) 3人侧向穿过

图 7 侧向穿过 TX-RX 连线的人体衰减

具体地讲, 1 人、2 人以及 3 人横向穿过 TX-RX 连线时阻挡衰减最大分别为 12 dB、20 dB 和 28 dB, 而 1 人、2 人以及 3 人侧向穿过时阻挡衰减最大分别为 8 dB、13 dB 和 19 dB。此外, 人体阻挡衰减随人体数目增多而增大, 每增加 1 人, 阻挡衰减会增加 5~8 dB。本文为分析 26 GHz 人体衰减特性和该频段毫米波无线通信系统设计提供有用的信息。

参考文献:

- [1] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [2] 胡莹, 冀保峰, 黄永明, 等. 大规模 MIMO OFDMA 下行系统能效资源分配算法[J]. 通信学报, 2015, 36(7): 40-47.
HU Y, JI B F, HUANG Y M, et al. Energy-efficient resource allocation algorithm for massive MIMO OFDMA downlink system [J]. Journal on Communications, 2015, 36(7): 40-47.
- [3] HUR S, CHO Y J, LEE J, et al. Synchronous channel sounder using horn antenna and indoor measurements on 28 GHz[C]//IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, 2014: 83-87.
- [4] 顾浙骐, 张忠培. 基于协作多点传输的非线性顽健预编码[J]. 通信学报, 2015, 36(10): 140-148.
GU Z Q, ZHANG Z P. Nonlinear robust precoding for coordinated multipoint transmission [J]. Journal on Communications, 2015, 36(10): 140-148.
- [5] KIM M, LIANG J, KWON H, et al. Directional delay spread characteristics based on indoor channel measurements at 28 GHz[C]//IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. 2015: 403-407.
- [6] ELREFAIE A F, SHAKOURI M. Propagation measurements at 28 GHz for coverage evaluation of local multipoint distribution service[C]// Proceedings of the Wireless Communications Conference. 1997: 12-17.
- [7] MACCARTNEY G R, SAMIMI M and RAPPAPORT T S. Omnidirectional path loss models from measurements recorded in New York City at 28 GHz and 73 GHz[C]//IEEE 25th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. 2014: 227-231.
- [8] 胡莹, 冀保峰, 黄永明, 等. 基于上行多用户大规模 MIMO 系统能效优化算法[J]. 通信学报, 2015, 36(1): 81-87.
HU Y, JI B F, HUANG Y M, et al. Energy-efficient optimal algorithm based on uplink multi-user very large MIMO system [J]. Journal on Communications, 2015, 36(1): 81-87.
- [9] 耿绥燕, 刘盛尧, 洪伟, 等. 室内 60 GHz 毫米波无线信道参数及其相关性研究[J]. 电波科学学报, 2015, 30(4): 808-813.
GENG S Y, LIU S Y, HONG W, et al. Mm-wave 60 GHz indoor channel parameters and correlation properties[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(4): 808-813.
- [10] ROH W, SEOL J, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 106-113.
- [11] CASSIOLI D, RENDEVSKI N. A statistical model for the shadowing induced by human bodies in the proximity of mm waves radio link[C]//IEEE International Conference on Communications Workshops, 2014: 14-19.
- [12] GAO B, XIAO Z Y, ZHANG C M, et al. Double-link beam tracking against human blockage and device mobility for 60 GHz WLAN[C]//IEEE on Wireless Communications and Networking Conference. 2014: 323-328.
- [13] SEMKIN V, JACOB M, KURNER T, et al. Estimation of optimum antenna configurations supported by realistic propagation models at 60 GHz[C]//European Conference on Antennas and Propagation. 2014: 3434-3438.
- [14] JACOB M, PRIEBE S, DICKHOFF R, et al. Diffraction in mm and sub-mm wave indoor propagation channels [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 833-844.
- [15] GHADDAR M, TALBI L, DENIDNI T A, et al. A conducting cylinder for modeling human body presence in indoor propagation channel [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 3099-3103.
- [16] VOGLER L E. An attenuation function for multiple knife-edge diffraction [J]. Radio Science, 1982, 17(6): 1541-1546.

作者简介:



耿绥燕 (1966-), 女, 陕西绥德人, 华北电力大学副教授, 主要研究方向为短距离通信技术与应用、毫米波 MIMO 无线通信信道实验与建模等。

李杏 (1991-), 女, 陕西渭南人, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为毫米波无线信道建模、人体阻挡效应等。

王琦 (1990-), 女, 新疆呼图壁人, 华北电力大学博士生, 主要研究方向为毫米波无线通信、大规模 MIMO 信道建模等。

王光波 (1991-), 男, 河南新乡人, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为毫米波通信。

王蒙军 (1973-), 男, 河北沧州人, 电信科学技术研究院高级工程师, 主要研究方向为移动通信、高频段通信、MIMO 传输技术等。

孙韶辉 (1972-), 男, 广东韶关人, 电信科学技术研究院硕士生导师, 主要研究方向为 LTE 和第 5 代移动通信关键技术等。

洪伟 (1962-), 男, 河北张家口人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波理论与技术、无线通信射频与天线技术、计算电磁学等。

赵雄文 (1964-), 男, 陕西清涧人, 华北电力大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线信道建模和实验、无线通信系统、电磁场理论及其应用。