

340 GHz太赫兹室内信道测量及仿真研究*

王敏¹⁾²⁾ 王俊峰^{1)†} 吴秋宇³⁾ 黄一辛¹⁾

1)(四川大学计算机学院, 成都 610064)

2)(云南师范大学信息学院, 昆明 650092)

3)(中国工程物理研究院, 电子工程研究所, 绵阳 621900)

(2014年2月10日收到; 2014年3月14日收到修改稿)

太赫兹波的衰减性及高可用带宽使其在局域网环境中拥有广阔的应用前景. 而太赫兹波的窄波束问题需要借助波束成形技术来解决. 作为波束成形技术的关键内容, 非直视情况下太赫兹频段的室内信道建模成为了当前亟待开展的工作. 本文在340 GHz频段对多种常见室内装饰材料的太赫兹波反射特性和室内多径反射信道特性进行了实验研究, 并基于射线追踪法对太赫兹室内信道进行仿真, 仿真结果与测量结果符合较好, 为进一步太赫兹室内信道建模提供了基础.

关键词: 太赫兹通信, 材料反射特性, 信道模型, 射线追踪法

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.154101

1 引言

随着无线终端用户的快速增长, 无线数据传输速率的需求也在日益增加, 近几年内将超过10 Gbps^[1]. 太赫兹波的衰减性及高可用带宽使其在局域网环境中拥有广阔的应用前景. 近年来, 太赫兹源、太赫兹天线的巨大进步为太赫兹波实现超高速和超宽带无线数据传输提供了很大的机遇.

对于太赫兹频段, 速率高达数Gbps甚至数十Gbps的室内通信应用, 必然涉及在非直视(NLOS)场景下的数据传输问题. 由于电磁波在太赫兹频段衍射效应不明显, 阴影区信号覆盖问题需要采用波束成形 (beam forming) 技术来解决^[2]. 而且物理原理决定了在太赫兹频段的通信应用必须采用高增益的收发天线, 这就带来了窄波束的问题, 也需要波束成形技术来解决窄波束收发天线的对准问题^[2]. 由此可见, 波束成形必然成为将来太赫兹通信的关键技术. 作为波束成形技术的前提条件, 非

直视情况下太赫兹频段的室内信道模型研究就成为了当前亟待解决的问题之一. 目前, 无线局域网信道模型的研究只局限于载波频率最高为5 GHz, 带宽不超过40 MHz的无线局域网系统^[3], 而340 GHz频段太赫兹波的带宽从几GHz到几十GHz不等, 因此其信道模型不能通过对现有模型的改进或扩展来获得, 必须研究一个全新的经验模型. 而对太赫兹无线通信信道传输特性的研究, 是建立340 GHz太赫兹信道模型的基础.

在室外信道传输方面, 目前的研究主要集中于太赫兹波在不同传输介质中的传输特性^[4-6], 包括对大气、等离子体等传输介质的传输特性研究, 由于缺乏实际测试条件, 这些研究主要采用理论分析的方式, 较少结合应用场景进行实验测量和研究. 太赫兹波在大气传输中的高衰减性, 使其更适合于短距离的室内通信. 太赫兹波的室内传输主要受到室内墙壁、地面、天花板以及各种家具表面的反射和散射现象的影响. 因此太赫兹室内信道传输特性的研究主要包括室内装修材料的反射、散射特

* 国家自然科学基金 (批准号: 91338107, 11102124, 61102076)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-10-0604)、教育部博士点基金 (批准号: 20130181110095) 和江苏省未来网络前瞻性研究项目 (批准号: BY2013095-3-08) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangjf@scu.edu.cn

性以及信道传播特性研究. 由于太赫兹功能器件研究的进度相对缓慢 [7-9], 目前国内对太赫兹室内通信信道特性的研究进展甚微, 通信方面的主要成果都是出自国外实验室. 德国的太赫兹通信实验室 (Terahertz Communications Lab, TCL) [10], 针对下一代太赫兹宽带无线接入、太赫兹室内无线通信的应用背景, 对太赫兹波传输信道特性进行了初步研究 [11-13], 文献 [11] 研究了 100—1000 GHz 之间的常见室内装修材料的镜面反射特性, 通过测量得到各种材料的折射率和吸收系数. 文献 [12] 和 [13] 针对简单的室内场景进行测量, 根据信道传递函数, 获取了时变的信道特性并估计最大可达的符号率. 虽然国外已有针对室内装修材料反射特性以及室内信道传输特性的测量和研究结果, 但是由于国内和国外常见的装修材料种类不同, 而且材料的生产技术和设备也不相同, 造成材料的物理特性出现较大差异, 因此有必要针对国内常见装修材料的太赫兹反射特性进行研究, 进而研究太赫兹室内信道的传输特性.

本文在 340 GHz 频段对多种室内装饰材料在镜面和非镜面的反射特性以及室内多径反射信道特性进行了实验研究, 并利用射线追踪法对一个简单的室内场景进行仿真研究, 为太赫兹室内信道建模的研究提供支持, 同时, 材料反射特性的实验结果对太赫兹系统元件的研究和发展也具有一定的参考价值.

2 实验方案

2.1 实验平台

如图 1 所示, 实验平台由两套太赫兹收发链路、两台宽带信号源以及一台宽带频谱仪组成. 太赫兹发射链路采用倍频方案, 输入中频信号经过 18 倍频模块倍到太赫兹频段. 接收链路采用混频方案, 接收信号经过次谐波混频器后下变频到中频. 接收本振链路为 12 倍频. 发射端中频输入信号和接收端本振输入信号由罗德·施瓦茨 (R&S) 公司的信号源 SMF 100 提供, 接收端中频信号功率测量由 R&S 公司的频谱仪 FSU 26 来完成.

为了弥补倍频系统损耗以及自由空间损耗, 在收发两端分别使用两个增益为 26 dBi 的喇叭天线, 同时安装两个聚乙烯透镜. 发射波束经过太赫兹透

镜聚集达到较高的功率密度, 以实现较高的测量动态范围. 完整的测试参数见表 1.

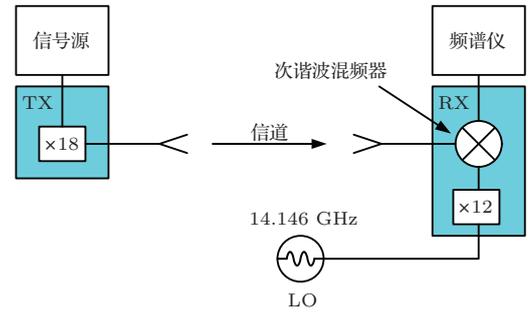


图 1 实验平台示意图

表 1 测试参数

参数名	参数值
测量点	41
平均噪底/dB	-110.87
测试信号功率/dBm	-3
开始频率/GHz	320
停止频率/GHz	360
带宽/GHz	40
矢网动态范围/dB	90

2.2 材料反射特性测量

材料反射特性的测量装置如图 2 所示, 被测材料放置于接收机和发射机前端, 调整太赫兹波发射机端的入射角 (α 角) 和接收机端的反射角 (β 角) 以测量不同入射角和不同反射角下的反射损耗. 发射角和接收角均在 0° — 90° 之间.

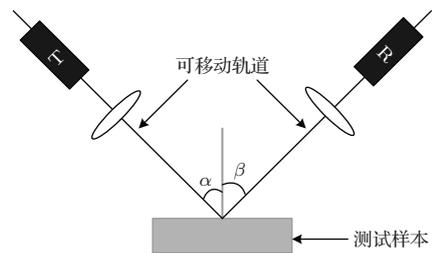


图 2 材料反射特性测量实验装置

现有装置无法直接测量入射到材料表面和反射的太赫兹波功率, 实验通过测量太赫兹波经过这些材料反射后到达接收端的功率, 并将其接收功率-频率曲线与铝板的测量结果进行比较, 可以得到这些材料相对于铝板的幅频响应特性曲线. 由于铝板对于太赫兹波的反射率接近 100%, 相对铝板的

幅频响应特性曲线可以看作该材料的幅频响应特性曲线的极好近似。

2.3 室内信道测量

室内信道测量在如图 3 所示的房间中进行。房间四面均为釉面瓷砖，长 × 宽为 2720 mm × 1910 mm。以房间西南角为坐标原点建立如图所示的坐标系，发射机 (TX) 位于坐标 (670, 1280)，接收机 (RX) 位于坐标 (1880, 530)。

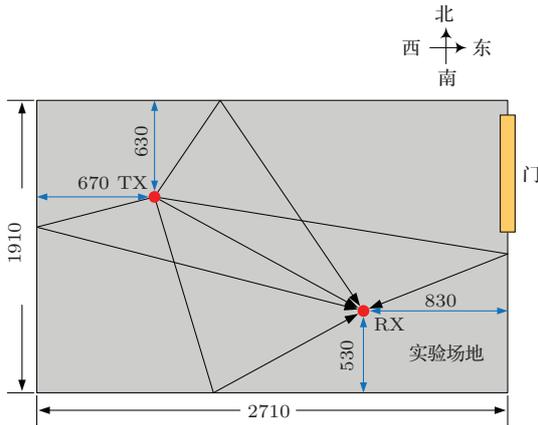


图 3 室内信道测量场地示意图

假设 TX 产生一个频率覆盖太赫兹频段、幅度为 A 的脉冲信号，并经过全向天线辐射出去。该脉冲信号在房间内经过自由空间的直射和墙壁的反射到达接收端。脉冲信号经过室内墙壁多次反射后基本上已经衰减到很小的功率水平，接收端接收到的功率基本上由沿直射路径和一次反射路径传播的电磁波能量组成，因此可以通过测量直射路径和一次反射路径的频率响应特性 (即传递函数)，并将它们变换到时域得到每条路径的脉冲响应，再叠加起来得到信道的综合脉冲响应特性。但是现有硬件条件无法测量信号的延迟，只能得到每条传播路径的幅频特性。

3 测量结果及分析

3.1 装修材料太赫兹反射特性测量

在本节中，我们使用 2.2 节的测试装置，测量各种不同的装修材料 (纤维板、胶合板、塑料、石膏板、瓷砖) 在 340 GHz 频段的反射特性。被测样品的实测参数如表 2 所示。

表 2 测试样品参数

材料类别	测试编号	长宽/mm	厚度测量值/mm				平均厚度/mm	标准差/mm
			1	2	3	4		
高密度纤维板	纤维板 1	280, 280	4.66	4.74	4.90	4.77	4.77	0.0075
	纤维板 2	280, 280	12.15	12.36	12.20	12.2	12.23	0.0063
	纤维板 3	280, 280	15.26	15.30	15.29	15.31	15.29	0.0004
中密度纤维板	纤维板 4	280, 280	12.13	12.20	12.24	12.22	12.20	0.0017
	纤维板 5	280, 280	15.14	15.21	15.12	15.27	15.19	0.0035
柳桉胶合板	胶合板 1	200, 200	8.50	8.48	8.52	8.53	8.51	0.0004
	胶合板 2	200, 200	11.66	11.46	11.56	11.6	11.57	0.0053
	胶合板 3	200, 200	15.25	15.41	15.27	15.31	15.31	0.0038
	胶合板 4	200, 200	18.05	18.03	18.04	18.23	18.09	0.0068
石膏板		500, 500	12.13	11.15	12.27	12.4	11.99	0.2429
瓷砖		300, 300	8.69	8.65	8.67	8.80	8.70	0.0034
聚苯乙烯塑料	塑料 1	500, 400	27.79	29.09	28.72	28.27	28.47	0.2373
	塑料 2	500, 400	47.70	47.71	47.34	48.96	47.93	0.3776
纸板	纸板 1	250, 200	1.39	1.37	1.42	1.39	1.39	0.0003
	纸板 2	250, 200	4.03	4.07	4.12	4.11	4.08	0.0013

3.1.1 反射角的影响

图 4 是不同样品分别于 20°, 40°, 70° 入射角情况下在不同反射角的相对衰减量。从图中可以看

出，所有样品在镜面反射角度的反射功率都达到最大值，其中入射角度在 70° 时镜面反射功率大于入射角为 20° 和 40° 的情况。

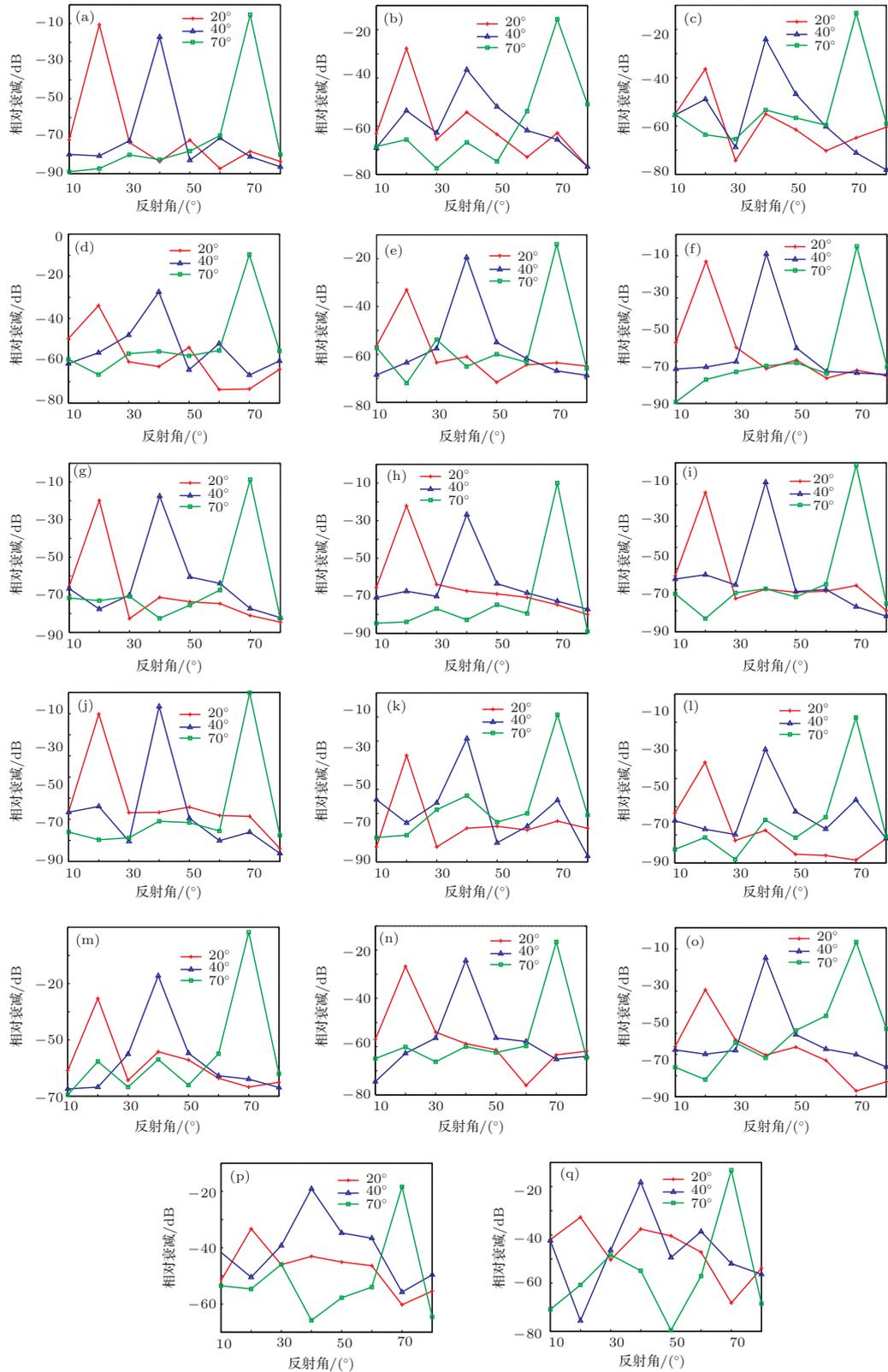


图4 (网刊彩色) 不同样品的相对衰减与反射角度的关系 (a) 瓷砖; (b) 胶合板1; (c) 胶合板2; (d) 胶合板3; (e) 胶合板4; (f) 纤维板1; (g) 纤维板2; (h) 纤维板3; (i) 纤维板4; (j) 纤维板5; (k) 塑料1; (l) 塑料2; (m) 石膏板A面; (n) 石膏板B面; (o) 纸板1; (p) 纸板2; (q) 纸板2+石膏板

瓷砖在镜面方向的反射能量衰减在所有测量的入射角度上都在10 dB左右, 是所有被测样品中镜面反射效果最好的. 其他样品尽管在大入射角

(70°)情况下可以达到约10 dB的相对衰减量, 但在小入射角时(20°)衰减基本都高于20 dB, 如胶合板和纤维板. 对于密度较低的样品, 如纸板1和纸板

2, 即使在大入射角的情况下, 镜面反射能量衰减也大于 18 dB; 两个聚苯乙烯塑料板的大入射角镜面反射能量衰减甚至达到了 30 dB.

对于瓷砖、中/高密度纤维板, 其反射能量主要集中在镜面方向. 非镜面方向的反射能量与镜面方向相比至少有 40 dB 的衰减, 最多可达 70 dB, 而且无论大入射角或小入射角在非镜面反射方向都会出现大衰减现象. 对于其他样品, 非镜面方向的反射能量衰减与镜面方向相比一般不会超过 40 dB.

值得注意的是, 对于样品纸板 2, 当入射角为 20° 时, 在镜面方向和非镜面方向的反射能量相差

不是很大, 差别大多在 10—20 dB 以内. 该现象与其他样品有明显的差别.

3.1.2 材料厚度的影响

从测试结果中可以看到, 对于同种材质, 厚度对于太赫兹波的反射系数有一定影响, 特别对于入射角为 40° 的胶合板, 镜面方向的反射系数相差近 20 dB, 而且厚度越厚反射越强, 如图 5 (a) 所示. 但是在入射角为 70° 和 20° 时未观察到此规律, 其中的物理原因仍需进一步研究. 其他材料的镜面方向反射系数差别均在 10 dB 以内 (篇幅有限, 仅给出胶合板和纤维板的测量结果).

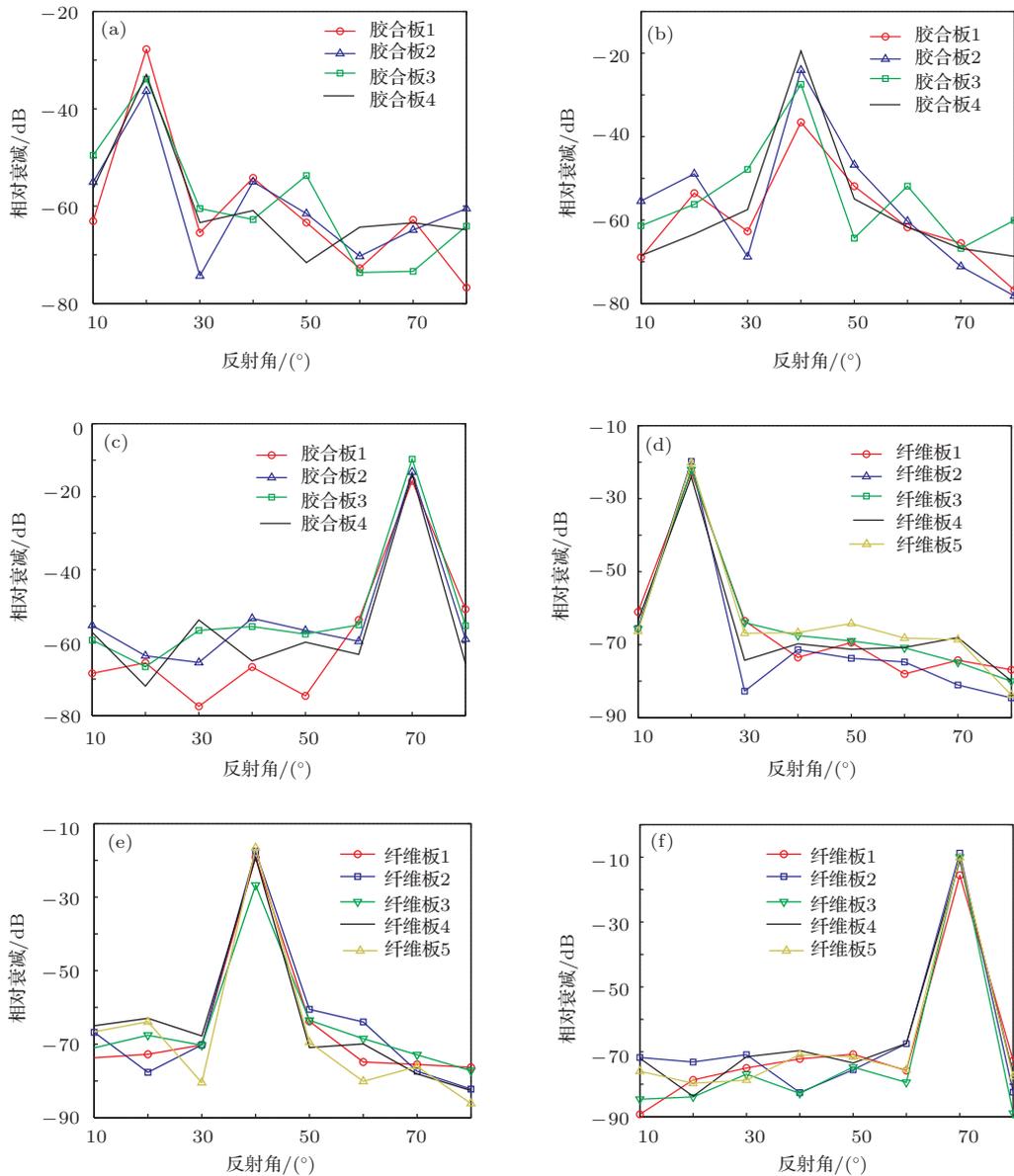


图 5 (网刊彩色) 不同厚度材料的相对衰减对比 (a) 胶合板 (入射角 20°); (b) 胶合板 (入射角 40°); (c) 胶合板 (入射角 70°); (d) 纤维板 (入射角 20°); (e) 纤维板 (入射角 40°); (f) 纤维板 (入射角 70°)

3.1.3 频率的影响

图6为不同样品的相对衰减与频率的关系. 由于在320—325 GHz频段内系统的动态范围只有约60 dB, 354—360 GHz频段内的动态范围只有70—80 dB, 而325—354 GHz频段内系统的动态范围在80 dB以上. 因此在测量结果中只有325—354 GHz频段的数据为有效数据. 根据测量结果, 在

325—354 GHz范围内, 大部分样品镜面方向的反射能量差别不大, 起伏在几个dB以内, 以瓷砖为例, 如图6(a)—(c)所示; 而纸板2在335 GHz处达到最小值-40 dB, 如图6(d)所示. 在非镜面方向, 纸板2、胶合板(小角度入射)和聚苯乙烯塑料板的反射能量存在较大的起伏, 如图6(d)—(h), (j)—(l)所示.

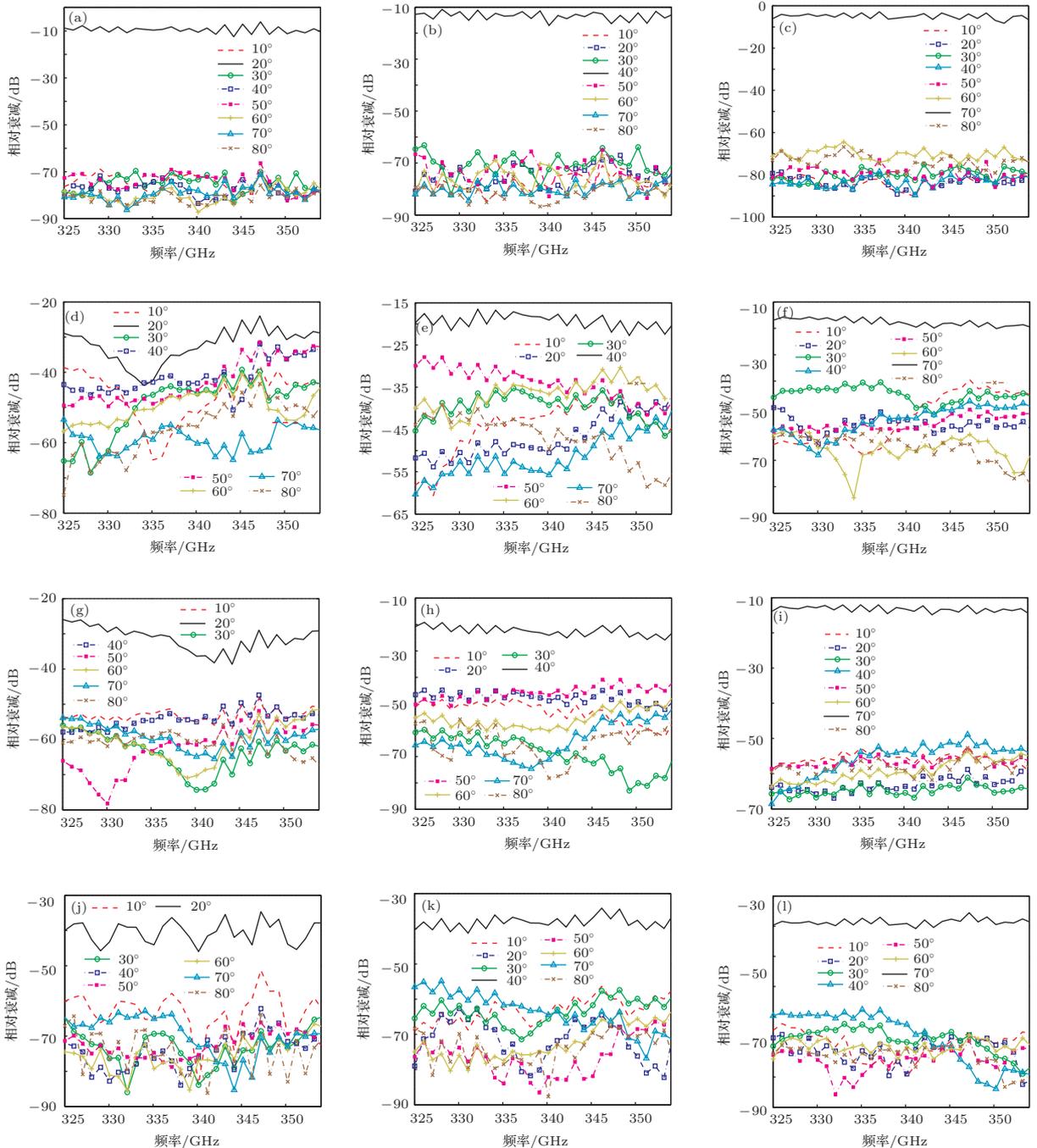


图6 (网刊彩色) 不同样品的相对衰减与频率的关系 (a) 瓷砖(入射角 20°); (b) 瓷砖(入射角 40°); (c) 瓷砖(入射角 70°); (d) 纸板 2(入射角 20°); (e) 纸板 2(入射角 40°); (f) 纸板 2(入射角 70°); (g) 胶合板 2(入射角 20°); (h) 胶合板 2(入射角 40°); (i) 胶合板 2(入射角 70°); (j) 塑料 1(入射角 20°); (k) 塑料 1(入射角 40°); (l) 塑料 1(入射角 70°)

3.2 室内信道测量与仿真

3.2.1 室内信道测量

通过调整天线的方向可探测各面墙的一次反射路径, 得到包括视距路径在内的5条路径的幅频响应, 如图7所示. 将所有路径的传递函数进行叠加可得到综合传递函数.

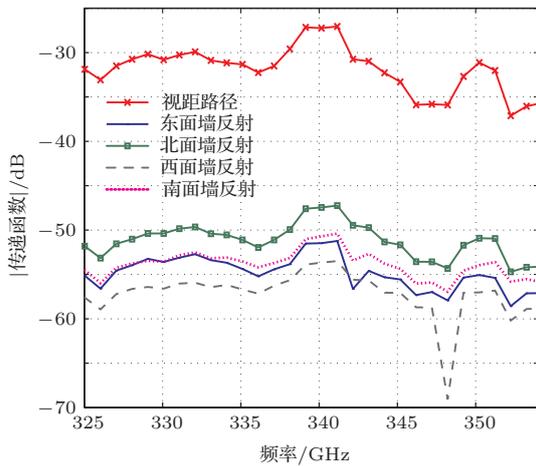


图7 (网刊彩色) 各路径测量的幅频响应

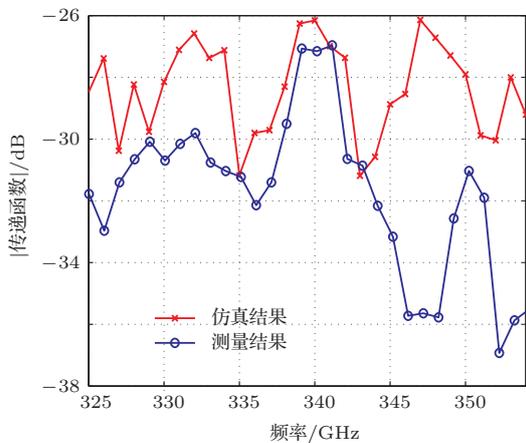


图8 (网刊彩色) 射线追踪法仿真与测量结果对比

3.2.2 室内信道仿真

射线追踪法(ray tracing)是用于研究无线通信信道特性的确定性工具, 通过它可获取信道的时空特征^[14], 然后推导出随机信道模型, 并且在毫米波频段已被验证能够提供可靠的信道仿真^[15,16]. 在我们的实验中, 发射机和接收机放置于距离地面90 cm左右的相同高度的工作车上, 因此可忽略地面和天花板的反射, 只考虑收发机所在的与地面平

行的反射平面, 如图3所示. 利用射线追踪法得到视距路径与四面墙的反射路径的综合传递函数, 并将其与测量得到的各路径综合传递函数比较. 如图8所示, 仿真结果和测量结果的规律相符, 幅度值也相差不大, 尤其是在340 GHz附近, 仿真值与测量值只相差约1 dB. 从图中也发现, 仿真的幅度值总体上略高于实际测量的幅度值, 这是因为实际测量中存在系统损耗, 如天线的对准可能会产生轻微的偏差, 天线前端的透镜可能没有放置于最佳位置, 这些损耗在仿真中并未考虑到. 将来的研究中可以考虑添加一个对准参数以更好地仿真室内信道特性.

4 结 论

本文在340 GHz对室内装饰材料太赫兹波反射特性和室内多径反射信道特性进行了实验研究. 在室内装饰材料的反射特性测量中, 我们不仅研究了材料的镜面反射, 还研究了非镜面反射的情况. 从实验结果可以看出, 室内常见装饰装修材料对320—360 GHz太赫兹波的传播有较大衰减, 而且反射能量基本处于镜面反射方向; 材料对不同频率太赫兹波的反射能力相差不大, 即材料的反射能量对于频率不甚敏感; 但不同材料之间对于太赫兹波的反射能力差别较大, 反射能力最强的材料为釉面瓷砖, 在大入射角情况下(70°)镜面方向的衰减仅有5 dB; 反射能力最弱的材料为聚苯乙烯塑料板, 在小入射角(20°)情况下镜面方向的衰减高达40 dB. 在实际应用中, 非镜面方向的反射能量基本上可以忽略不计.

在室内多径反射信道仿真研究中, 我们测量了室内通信信道的幅频响应, 与射线追踪法的仿真结果相比, 测量结果与仿真结果符合较好, 验证了射线追踪法的有效性.

将来, 我们将尝试在更复杂的室内场景(如放置有家具、办公隔板等)中进行信道测量, 同时基于射线追踪法进行修正和补充, 以更好地仿真太赫兹室内信道传输.

参考文献

[1] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T 2011 *J. Infrared Millim. Te.* **32** 143

- [2] Bird T S, Weily A R, Hanham S M Proceedings of 2008 *International Symposium on Antennas and Propagation Society San Diego*, July 5–11, 2008 1
- [3] Chong C, Tan C, Laurenson D, McLaughlin S, Beach M, Nix A 2003 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **21** 139
- [4] Zheng L, Zhao Q, Liu S Z, Xing X J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 5202 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 刘述章, 邢晓俊 2012 物理学报 **61** 5202]
- [5] Zhou X, Li Z Y, Luo Z F, Dong Z W, Yang C B 2013 *High Power Laser Part Beams* **25** 1573 (in Chinese) [周逊, 李贇宇, 罗振飞, 董志伟, 杨存榜 2013 强激光与粒子束 **25** 1573]
- [6] Zhang Y P, Zhang H Y, Geng Y F, Tan X L, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7030 (in Chinese) [张玉萍, 张会云, 耿优福, 谭晓玲, 姚建铨 2009 物理学报 **58** 7030]
- [7] Li Z Y, Bing P B, Xu D G, Cao X L, Yao J Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084212 (in Chinese) [李忠洋, 邴丕彬, 徐德刚, 曹小龙, 姚建铨 2013 物理学报 **62** 084212]
- [8] Wu S Q, Liu J S, Wang S L, Hu B 2013 *Chin. Phys. B.* **22** 104207
- [9] Tu X C, Kang L, Liu X H, Mao Q K, Wan C, Chen J, Jin B B, Ji Z M, Xu W W, Wu P H 2013 *Chin. Phys. B.* **22** 040701
- [10] Terahertz Communications Lab <http://www.tcl.tu-bs.de/index.htm> [2014-1-16]
- [11] Piesiewicz R, Jansen C, Wietzke S, Mittleman D, Koch M, Kürner T 2007 *J. Infrared Millim. Waves* **28** 363
- [12] Kleine-Ostmann T, Jastrow C, Priebe S, Jacob M, Kürner T, Schrader T Proceedings of 2012 *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)* Washington DC, July 1–6, 2012 258
- [13] Priebe S, Jastrow C, Jacob M, Kleine-Ostmann T, Schrader T, Kürner T 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 1688
- [14] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, Mittleman D, Koch M, Schoebel J, Kurner T 2007 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **49** 24
- [15] Xu H, Kukshya V, Rappaport T S 2002 *IEEE J. Sel. Area Comm.* **20** 620
- [16] Marinier P, Delisle G Y, Talbi L 1996 *Wirel. Pers. Commun.* **3** 257

Research on indoor channel measurement and simulation at 340 GHz*

Wang Min¹⁾²⁾ Wang Jun-Feng^{1)†} Wu Qiu-Yu³⁾ Huang Yi-Xin¹⁾

1) (College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

2) (College of Computer Science and Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

3) (Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900 China)

(Received 10 February 2014; revised manuscript received 14 March 2014)

Abstract

Ultra-broadband terahertz communication systems are expected to help satisfy the ever-growing need for unoccupied bandwidth. Due to high attenuation of terahertz wave, it can be widely used in indoor WLAN data communication. Future THz WLANs will rely on not only the line-of-sight (LOS) but also the nonline-of-sight (NLOS) channels to perform data communication. Hence, both kinds of channels have to be characterized. In this paper, we present the measures of ultra-broadband channel at 340 GHz for an indoor scenario. The measured channel transfer function is compared with a ray tracing simulation performed with the indoor scenario. Additionally, we show the reflection losses of some building and plastic materials which could be required as input data for the ray tracing algorithm.

Keywords: THz communications, material properties, channel measurement, ray tracing algorithm

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.154101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91338107, 11102124, 61102076), the Program for New Century Excellent Talents in University, Ministry of Education of China (NCET-10-0604), the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20130181110095), and the Prospective Future Networks Research Project of Jiangsu Province of China (Grant No. BY2013095-3-08).

† Corresponding author. E-mail: wangjf@scu.edu.cn