

典型衣物的 D 波段透射率研究

刘 杰^{1,2} 蒋 均^{1,2} 成彬彬^{1,2} 陆 彬^{1,2} 经 文² 张 健^{1,2}

¹中国工程物理研究院微系统与太赫兹中心, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 基于自由空间法,设计研制了一套 D 波段透射率测试装置,对典型衣服、鞋底及快递包装进行了测试。该测试装置包括 D 波段矢量网络分析仪、高斯波束天线、双曲透镜、光学导轨以及固定夹具。采用直通反射-传输线(TRL)校准方法和时域门技术,提高了测试准确度,保证数据有效性。对 10 种厚薄不同的衣服进行了 D 波段透射率测试,测试曲线趋势与已报道文献结果吻合。对鞋底以及快递包装的透射率进行了测试,获得了与安保场景比较接近的数据,有利于安检系统的设计。

关键词 成像系统;透射率;自由空间法;D 波段;太赫兹成像

中图分类号 O452 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0711001

D-Band Transmittance of Typical Clothing

Liu Jie^{1,2} Jiang Jun^{1,2} Cheng Binbin^{1,2} Lu Bin^{1,2} Jing Wen² Zhang Jian^{1,2}

¹Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Based on the free-space method, a set of D-band transmittance measurement device is designed and developed, and typical clothes, shoes and wrappers are measured by the device. The device consists of a D-band vector network analyzer, two Gauss beam antennas, two hyperbolic lenses, an optical guide and a clamp. The through-reflect-line (TRL) calibration method and the time domain gate technique are adopted to improve the measurement accuracy and guarantee the validity of the data. Ten kinds of clothes with different thickness are measured by the device. The trend of data agrees with the published data well. Furthermore, three kinds of shoes and six kinds of wrappers are measured. The measured results are similar to those obtained by the security system, and are helpful to the design of security systems.

Key words imaging systems; transmittance; free-space method; D-band; terahertz imaging

OCIS codes 110.6795; 110.6880

1 引 言

近年来,安检需求日益广泛和紧迫。D 波段(0.11~0.17 THz)是频率较高的毫米波,也被国外认为是频率较低的太赫兹波,具有独特而实用的优点,可应用在高数据量传输的通信系统、雷达系统和亚毫米分辨率的成像系统中^[1-6]。传统毫米波安检仪的设计参考了大量衣物透射率数据^[7-8],因此设计 D 波段安检系统,必须掌握衣服、鞋底及快递包装等覆盖物的透射特性。国内外很多研究机构用时域光谱仪(TDS)研究 D 波段常见物体的透射特性,在 0.1~1 THz 范围内测量了物体的透射特性,但由于 TDS 的频域特性通过傅里叶变换得到,频率间隔为几吉赫兹,因此精度较差,同时由于频率在 300 GHz 以下,信噪比低,数据的准确度较差,国内也有类似的测试实验^[9-10]。采用矢量网络分析仪(VNA)也是一种常见的测试方法。矢量网络分析

收稿日期: 2016-02-18; 收到修改稿日期: 2016-03-06

基金项目: 国家 973 计划(2015CB755406)

作者简介: 刘 杰(1981—),男,博士研究生,副研究员,主要从事太赫兹成像系统及器件等方面的研究。

E-mail: liujie2003_2006@163.com

导师简介: 张 健(1968—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事电子学系统、无线电测控通信、太赫兹科学技术、集成微系统技术等方面的研究。E-mail: zhjmy@263.net

仪采用连续波测量,为相干检测方法,虽然不能进行超宽频谱的测试,但是能够实现几十兆赫兹的细小频率间隔的测试,因此测试数据能更加准确地呈现窄频段内的物体透射特性,如 Tosaka 等^[11-12]使用 300 GHz 的矢量网络测量复介电常数。

获得 D 波段常见掩盖物的透射特性,有助于该频段安检系统的设计。通常采用传输法测试材料的透射特性。常见的传输法有带状线法、同轴线法、矩形波导法和自由空间法等。由于同轴线法和矩形波导法等闭场法要求待测材料样品的测试装置配合紧密,测试不规则物体时误差较大。自由空间法基于准光原理,对待测物体的形状没有要求,适合本文的待测目标。为减小测试误差,用直通-反射-传输线(TRL)方法校准,同时利用矢量网络分析仪的时域门技术,避免了矢量网络分析仪与被测样品间的无穷反射带来的影响^[13-14]。

本文基于自由空间法,设计研制了一套 D 波段透射率测试装置,采用 TRL 方法和时域门技术进行校准,测试了 10 种典型衣服的透射率,研究发现,衣服越厚,编织密度越高,透射率越低,该结果与已报道文献的数据趋势相吻合。测试了 3 种典型的鞋底及 6 种典型的快递包装的透射率,获得了比较实用的数据。通过对数据的初步分析,为安检系统设计提供有用信息。

2 原 理

测试电参数的方法有两种:1) 基于 VNA 的自由空间法,适用于 0.3 THz 以下的测试;2) TDS,适用于 0.3 THz 以上的测试。文献[12]在 220~330 GHz 内测试了目标介电常数,对比了 TDS 和 VNA 测试结果。测试结果表明,低频时 TDS 方法信噪比低,测试结果较 VNA 结果差,VNA 方法 5 MHz 的频率精度远大于 TDS 方法 3.8 GHz 的频率精度。因此本文采用基于 VNA 的自由空间法。

自由空间法指在自由空间中,设线极化平面波为 E_{in} ,由自由空间向样品垂直入射,传播方向为 Z 方向,如图 1 所示。入射波在空气与样品的交界面产生不连续性,反射回去的电磁波形成了反射波;另一部分电磁波则穿过样品面向前传播,形成透射波,还有部分电磁波能量转换成为其他形式能量而损耗。因此将样品作为二端口网络,通过测量透射波,可以得到透射率。样品的透射率可以表示为

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left(\frac{E_{out}}{E_{in}} \right)^2 = S_{21}, \quad (1)$$

式中 P_{in} 、 E_{in} 分别为入射的功率和电场强度模值, P_{out} 、 E_{out} 分别为透射的功率和电场强度模值。

VNA 的 S 参数模值一般用对数形式表示,通过

$$S_{21} = 10^{S_{21(dB)}/10} \quad (2)$$

进行转换,式中 $S_{21(dB)}$ 为对数形式的 S_{21} 。

3 装 置

D 波段透射率测试装置包括 D 波段 VNA、高斯波束天线、双曲透镜、光学导轨以及固定夹具,如图 2 所示。信号由 D 波段 VNA 扩展件(图 2 左侧)产生,通过高斯波束天线将信号辐射到双曲透镜上;两双曲透镜的间距为焦距的 2 倍,被测样品放在双曲透镜的共焦点处;信号垂直入射样品,穿透样品后经过右侧透镜和天线,进入 D 波段 VNA 扩展件(图 2 右侧)。

采用 TRL 方法进行校准,VNA 工作频率设置为 110~170 GHz,中频带宽为 5 kHz,测量频率步进为 300 MHz。具体步骤为:1) 以两透镜的共焦点为参考面,无被测样品的情况下进行直通校准;2) 在共焦点处放置短路板,对输入和输出端进行反射校准;3) 将两聚焦透镜的相对距离增加 $1/4$ 中心频率的波长进行传输校准。为提高测试精度和稳定性,校准和测试时,VNA 的平均测量次数为 100 次。短路板校准件由导电性能好的硬金属材料制作而成,平面度和光滑度较好。为减小由于电磁波绕过被测样品进入接收天线带来的影响,设计了 2 个高斯波束天线,天线的 3 dB 波束为 2° ;采用 VNA 的时域门技术克服信号在被测样品上的无穷反射。通过多次测试, S_{21} 幅度误差范围为 ± 0.2 dB,这是由于中心波长只有 2.14 mm,进行传输校准时容易引入较大的误差。

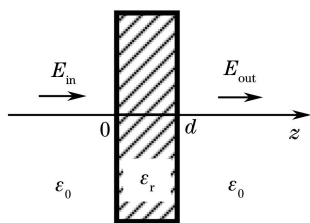


图 1 透射率测试系统原理图

Fig. 1 Sketch map of transmittance measurement system

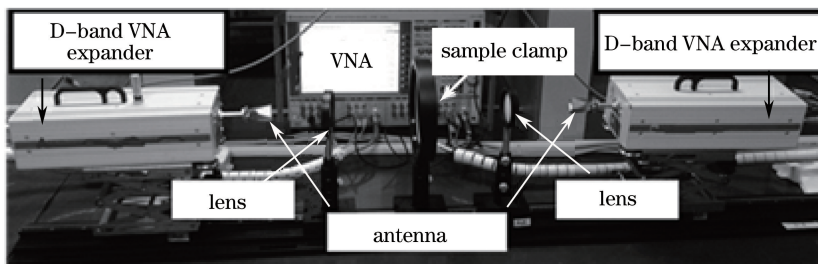


图 2 自由空间法测试原理图

Fig. 2 Measurement principle of free-space method

4 实验结果

4.1 D 波段典型衣服的透射率

对 10 种厚薄不同的衣服进行安检成像,使用 D 波段透射率测试装置测试衣服的透射率。实验中将样品固定在夹具上,使得信号垂直入射样品。样品编号及主要成分如表 1 所示,图 3 所示为透射率测试结果。

表 1 衣服样品名称及主要成分

Table 1 Clothes sample name and main component

| | Clothes 1 | Clothes 2 | Clothes 3 | Clothes 4 | Clothes 5 | Clothes 6 | Clothes 7 | Clothes 8 | Clothes 9 | Clothes 10 |
|-----------|-------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------------------|
| Name | Down jacket | Cotton jacket | Fur coat | Knit vest | Hoodie | Shirt | Jeans | Sweater | Under wear | Snowboarding jacket |
| Component | Down | Cotton | Leather | Viscose | Polyester | Cotton | Cotton | Wool | Cotton | Terylene |

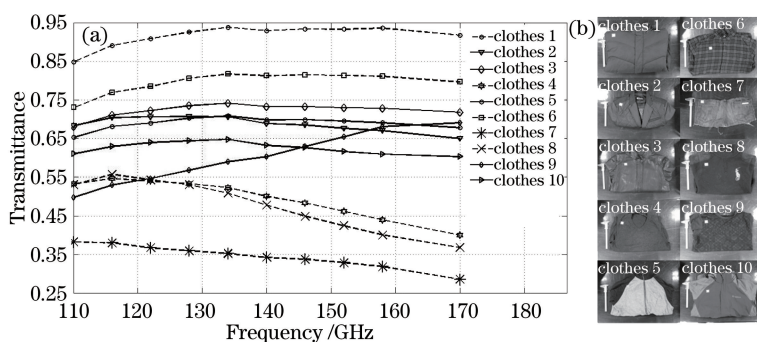


图 3 10 种典型衣服的透射率

Fig. 3 Transmittance of ten kinds of typical clothes

4.2 D 波段典型鞋底的透射率

针对 3 种典型的鞋底进行安检成像,利用 D 波段透射率测试装置测试鞋底的透射率。实验中,将样品固定在夹具上,使得信号垂直入射鞋底,为避免脚弓处钢板以及鞋面材料对实验造成影响,测试位置为脚跟所在鞋底的位置。图 4 所示为鞋底透射率,其中 shoe 1 是沙滩鞋底,shoe 2 是篮球鞋底,shoe 3 是皮鞋底。

4.3 D 波段典型快递包装的透射率

对 6 种典型的快递包装样品进行安检成像,利用 D 波段透射率测试装置测试快递包装的透射率。实验

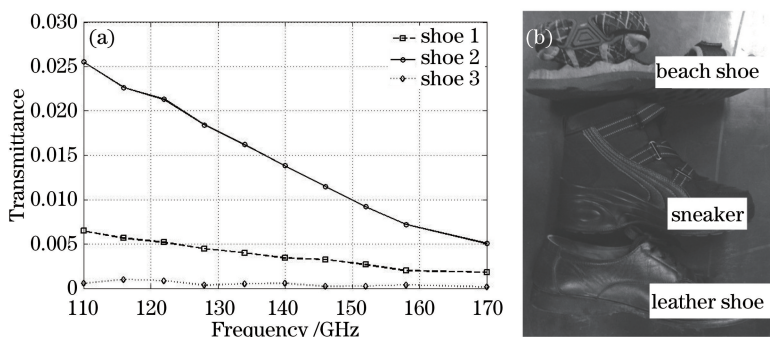


图 4 3 种典型鞋底的透射率

Fig. 4 Transmittance of three kinds of shoes

表 2 包装样品名称及主要成分

Table 2 Wrapper sample name and main component

| | Wrapper 1 | Wrapper 2 | Wrapper 3 | Wrapper 4 | Wrapper 5 | Wrapper 6 |
|-----------|------------------|-------------------|------------|------------|--------------|--------------|
| Name | Express envelope | Ordinary envelope | Paper case | Nylon film | Bubble film | Bubble plate |
| Component | Pulp | Pulp | Pulp | Nylon | Polyethylene | Polyethylene |

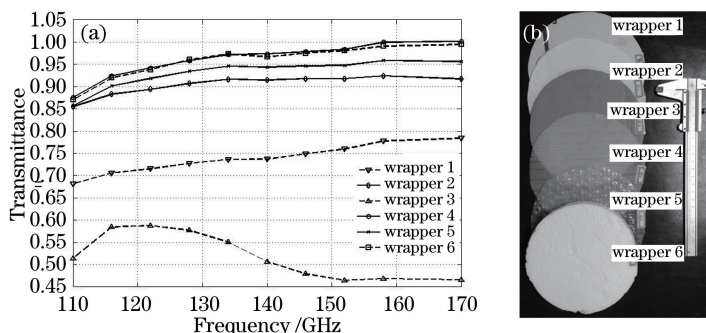


图 5 6 种典型包装的透射率

Fig. 5 Transmittance of six kinds of wrappers

中,为方便将样品固定在夹具上,将快递包装样品剪成直径为 15 cm 的圆形,同样使得信号垂直入射样品。样品编号及主要成分如表 2 所示,图 5 所示为快递包装样品的测试结果。

5 分析与讨论

所选 10 种典型衣服中冲锋衣的主要成分为涤纶,与 Petkie 等^[8]选用的滑雪服材料相同,且厚度相近。本文在 110 GHz 时透射率测试结果为 61%,而 Petkie 等^[8]在 100 GHz 时测得的透射率为 90%。在 Petkie 等^[8]的测试系统中,用肖特基二极管和测辐射热仪检测信号的功率,是一种非相干的功率检测。相对于 VNA 方法, Petkie 的测试方法在低频时信噪比低^[12],本文的测试准确度较高。测试结果表明:1) 羽绒服透射率最高,大于 85%;2) 牛仔衣透射率最低,仅大于 30%;3) 毛衣的透射率仅大于 38%。分析表明,虽然有例外,但是总体而言,衣服越厚,编织密度越大,透射率越低,这与 Petkie 等^[8]的结论吻合。由于棉、毛不存在极化损耗的问题,相对其他衣服材料来说漫反射的能量较多,因此在人体安检成像时,很可能会模糊隐藏物体的轮廓。

3 种典型的鞋底的透射率测试结果表明:1) 沙滩鞋底透射率大于 0.5%,皮鞋鞋底的透射率仅为 0.03%;2) 相对衣服来说,鞋底厚且密度大,因此反射和损耗更大,透射率相对较低;3) 对比鞋底材料,皮鞋底是橡胶制品,橡胶分子的偶极化会使介质损耗较大,导致透射能量很少。设计鞋底安检仪时,发射机输出功率要足够大,利用距离维的分辨率还是能够进行鞋底检测,而且接收机的动态范围也要足够大。

6 种典型快递包装样品的透射率测试结果表明:1) 普通信封厚度约为 0.2 mm,透射率接近 100%;2) 泡沫板厚度约为 20 mm,透射率大于 40%。因此发射机无需大功率,普通包装物很容易被穿透,意味着快递包裹安检设备可设计得较小,甚至是便携式设备。

6 结 论

为了更加细致地掌握典型衣物在 D 波段的透射率特性,设计和研制了一套基于自由空间法的 D 波段透射率测试装置,并对典型衣服、鞋底及快递包装进行了测试。对 10 种厚薄不同的衣服测试结果表明衣服越厚,编织密度越大,透射率越低,这与 Petkie 等^[8]的数据趋势吻合,而且由于采用了相干检测方法,数据准确性更高。对鞋底以及快递包装的透射率测试结果表明,常见快递包裹在 D 波段透射率达到 15% 以上,但鞋底的透射能力较差。采用 D 波段实现包裹安检和人体安检是可行的,鞋底检测则要求发射机的输出功率更高。

参 考 文 献

- Zhang Jian, Deng Xianjin, Wang Cheng, *et al.*. Terahertz high speed wireless communications: Systems, techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2014, 12(1): 1-13
张 健, 邓贤进, 王 成, 等. 太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 1-13.
- Cheng Binbin, Jiang Ge, Yang Chen, *et al.*. Signal processing for 0.14 THz high resolution imaging radar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1577-1581.
成彬彬, 江 舸, 杨 陈, 等. 0.14 THz 高分辨力成像雷达信号处理[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1577-1581.
- Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong, *et al.*. Terahertz sensing and imaging [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 166-189.
张存林, 张 岩, 赵国忠, 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 166-189.
- Zheng Xianhua, Wang Xinke, Sun Wenfeng, *et al.*. Developments and applications of the terahertz digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209003.
郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209003.
- Sun Zhenlong, Tu Xuecou, Jiang Yi, *et al.*. Fast imaging system based on self-made terahertz detector[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0811002.
孙振龙, 涂学凑, 姜 奕, 等. 基于自制太赫兹检测器的快速成像系统[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0811002.
- Cooper K B, Llombart N, Dengler R J, *et al.*. THz imaging radar for stand off personnel screening [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 169-182.
- Sheen D, McMakin D, Hall T E. Three-dimensional millimeter wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(9): 1581-1592.
- Petkie D T, Lucia F C, Casto C, *et al.*. Active and passive millimeter and sub-millimeter-wave imaging[J]. SPIE, 2005, 5989: 598918.
- Appleby R, Wallace H B. Stand off detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 2944-2956.
- Li Qi, Yang Yongfa, Zhao Yongpeng, *et al.*. Measurement investigation of continuous wave terahertz back scattering characteristics in three kinds of background materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011201.
李 琦, 杨永发, 赵永蓬, 等. 三种背景材料的连续太赫兹后向散射特性测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011201.
- Tosaka T, Fujii K, Fukunaga K, *et al.*. Evaluation of effect of wall on wave propagation at 300 GHz [C]. 38th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves, Mainz, 2013.
- Tosaka T, Fujii K, Fukunaga K, *et al.*. Development of complex relative permittivity measurement system based on free-space in 220-330 GHz range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(1): 102-109.
- Fukunaga K, Mizuno M, Tosaka T, *et al.*. Measurement of complex permittivity of insulating materials for THz telecommunication modules[C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, 2012: 448-450.
- Withayachumnankul W, Naftaly M. Fundamentals of measurement in terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2014, 35(8): 610-637.