

利用太赫兹波检测建筑物内钢筋的方法

毕凌志,袁明辉,朱亦鸣

(上海理工大学 太赫兹技术创新研究院 上海市现代光学系统重点实验室
教育部光学仪器与系统工程研究中心 太赫兹波谱与影像技术协同创新中心,上海 200093)

摘要: 钢筋参数(位置、直径等)对于已建建筑的安全性具有非常重要的作用。提出了一种利用太赫兹波检测建筑物内钢筋位置和直径的方法,选取太赫兹波作为检测信号,利用太赫兹波对非金属的建筑实体(如水泥、砖、石灰等)有着较强的穿透性以及金属(钢筋)几乎全反射的特性,实现太赫兹波穿透建筑实体检测钢筋的功能。同时相对于微波而言太赫兹波易于实现极窄的天线波束,从而达到很高的检测精度,相对于磁感应仪而言其不受外界磁场环境的影响。经理论分析与工程实验表明,该方法完全能够满足实际工程应用中的检测要求。

关键词: 太赫兹波; 建筑物; 钢筋检测; 数据处理

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0125003

Method of measuring steel bar in building by THz wave

Bi Lingzhi, Yuan Minghui, Zhu Yiming

(Terahertz Spectrum and Imaging Cooperative Innovation Center, Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Terahertz Technology Innovation Research Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The parameters of steel bar (such as position, diameter, etc.) play an important role in the safety of the constructed buildings. A measurement method for position and diameter of the steel bar within the building by using terahertz wave was proposed. The terahertz wave was used as the detection signal to realize these functions, which the terahertz wave had a strong penetrability to nonmetal building material (such as cement, brick, lime, etc.) and had the characteristics of almost total reflection to the metal (steel bar). At the same time, compared with the microwave, the terahertz wave was easy to achieve a very narrow antenna beam, which achieved high detection accuracy. And compared with the magnetic detector, it was not influenced by the external magnetic field environment. Theoretical analysis and engineering test show that this method can meet the requirements of actual engineering application.

Key words: terahertz wave; building; steel measurement; data processing

收稿日期:2018-08-13; 修订日期:2018-09-17

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61501297);上海市科委专项(14dz1206602)

作者简介:毕凌志(1990-),男,硕士生,主要从事太赫兹工程方面的研究。Email:shlingzhibi@126.com

通讯作者:袁明辉(1976-),男,副教授,博士,主要从事太赫兹工程方面的研究。Email:yuanminghui@usst.edu.com

0 引言

随着建筑行业迅猛发展,滋生了建筑施工中偷工减料的问题。其中很常见的是使用低标号钢筋甚至使用木棍、竹片等替代钢筋。而在钢筋混凝土的建筑结构中,使用的钢筋参数(水平位置、埋深、直径)是否符合设计要求对建筑物的安全性和耐久性起到了至关重要的作用。因此,在建筑质量监管中需要对墙体内部的钢筋标号(直径)进行检测。

能够探测建筑物内钢筋的方式主要有两种:一种是利用探地雷达^[1-2](Ground Penetrating Radar, GPR)技术;另外一种是使用磁感应仪。探地雷达设备价格昂贵,而且其主要用于探测地下物质的(金属)性质及大致位置,用于建筑物内钢筋直径测量时过于浪费且精度很低(厘米级)。目前应用较为广泛是利用电磁感应法的磁感应仪。它的主要原理是利用钢筋的强磁导率,使用磁感应线圈(电感)产生一个较强的磁场,当磁感应线圈接近钢筋时两者互感显著增加,从而通过探测线圈中感应电流变化情况确定钢筋的位置及直径,但是对于是否存在非金属物质代替钢筋的情况无法做出有效的判断。磁感应仪检测精度有限(亚厘米级),而且容易受地外界磁场的影响。

太赫兹波是频率在 0.1~10 THz (波长在 30 μm ~3 mm)范围内的电磁辐射^[3-5]。由于其具有独特的穿透特性,使得其在人体安全检查、无损检测、医疗诊断以及深空目标探测等诸多领域具有广阔的应用前景。在穿墙目标探测方面,红外及以上波段无法穿墙而微波虽然能够穿墙但是精度较低(因为波长较长)。而太赫兹波对建筑实体具有良好的穿透性同时探测精度较高(波长比微波短),因此太赫兹波是电磁波谱中穿墙无损探测最适合的波段^[6-7]。文中提出了一种利用太赫兹波检测建筑物内钢筋标号(直径)的方法,一方面与现有的探地雷达探测波相比 THz 脉冲是典型脉宽在皮秒量级,在射线方向上的时域空间分辨率高,同时 THz 波工作频率远高于常规探地雷达工作频率,反射波的脉冲波形极窄,分辨率高。另一方面解决了磁感应仪无法对非金属物质有效识别的问题。完全能够满足工程中对建筑物内钢筋标号(直径)的无损检测的要求。

1 工作原理

如图 1 所示,利用太赫兹波检测建筑物内钢筋的方法(本质上相当于一个高频近场雷达)综合了探地雷达不受外界磁场干扰以及保护层均匀性的影响(同时波长短,精度远比探地雷达高)和磁感仪测量精度高的优点(同时又克服了磁感仪受外界磁场和保护层均匀性影响以及无法对非金属物质进行有效识别等缺点)^[8-9]。对建筑物实体内钢筋的保护层均匀性无要求,测量精度高。

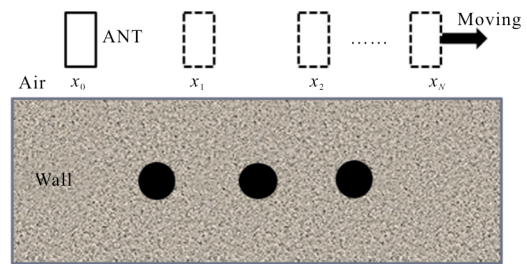


图 1 检测方法原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of detection method

太赫兹波从天线发出传入混凝土中,当其遇到不均匀体(介质分界面)时会反射部分太赫兹波,其反射系数由介质的相对介电常数决定。在传播过程中遇到混凝土中相对介电常数不同的材料(钢筋、空洞、木头等)的边界时发生反射,这些反射的太赫兹波又传回天线,天线接收到这些反射信号,又把它传回到主机,主机对这些反射信号进行全时程数字化纪录,再由计算机将收到的数字信号进行分析计算和成像处理。

在建筑实体这种非磁性介质中,太赫兹源发射的高频太赫兹波在介质中的传播速度主要影响因素是介电常数。太赫兹波速与介质的相对介电常数的关系可用公式(1)表示:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

天线发射出的太赫兹波信号在墙体结构中传播,近似于平面太赫兹波在多层均匀介质中传播。因此,当太赫兹波垂直入射到垂直墙面方向传播时,遇到不同介质分界面时将产生反射波和透射波,其反射与透射遵循反射与透射定律,反射信号振幅与反射系数成正比^[10]。反射系数的数学表达式为:

$$R = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \right| \quad (2)$$

式中： ε_1 和 ε_2 为分界面两侧介质的相对介电常数。由上式可知，太赫兹波在两种不同介质的界面产生反射，反射系数的大小主要取决于介质分界面两侧介质相对介电常数的差异。常见介质中，空气的相对介电常数为 1，混凝土的相对介电常数为 8.4，水的相对介电常数为 81，钢筋的相对介电常数为 ∞ 。根据理论计算可以得出钢筋、空洞、木片等工况条件下对太赫兹波的发射系数如表 1 所示。因而，该检测方法能够实现钢筋、空洞等物质检测的功能。

表 1 拟定介质物性参数表

Tab.1 Formulation of physical properties parameter list of medium

Dielectric	ε_r	$\mu/ms \cdot m^{-1}$	$V/m \cdot ns^{-1}$	R
Air	1	0	0.3	0.487
Fresh water	81	0.5	0.033	-
Rebar	∞	10^{10}	-	1
Wood	2.8	0.035	0.179	0.268
Plain dry concrete	8.4	1	0.103	-

2 验证实验

2.1 系统方案设计

如图 2 所示，太赫兹穿墙检测系统由太赫兹波发射源、太赫兹探测器、天线、光栅尺及配套的软件等部分组成。为了保证系统发射端与接收端光路保持一致或者相近，系统中将太赫兹发射源与太赫兹探测器装配在一起。在测试系统中波导天线起着至关重要的作用^[11]。系统中天线具有尺寸小、窄波束、低旁瓣等特点，大大地提高了检测精度与准确性^[12]。

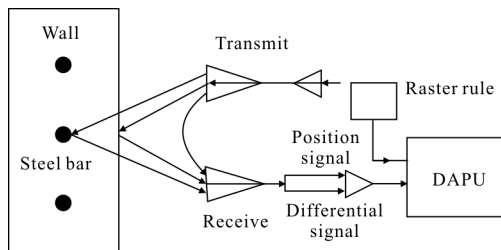


图 2 太赫兹检测系统结构图

Fig.2 Structure diagram of terahertz detection system

如图 3 所示，天线主要参数如下。天线数量：2 个；工作频段：93~96 GHz；发散角(3 dB)： $<3^\circ$ 。

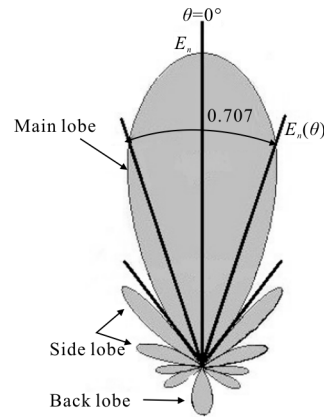


图 3 天线场强波瓣分布图

Fig.3 Distribution map of antenna field strength wave flap

2.2 测试方案

2.2.1 模型概况

根据 GB1499-2010 热轧带肋钢筋规范，钢筋偏差有尺寸公称直径范围及推荐直径范围为 6~25 mm，标准推荐的钢筋公称直径为 6、8、10、12、14、16、18、20、22、25、32、40、50 mm。

首先根据实际建筑规范制备混凝土模型。其中预留一个圆柱体的空洞(直径约为 6 mm)模拟在实际建筑中可能出现的空洞间隙。然后在空洞中填充木头、钢筋等物质制备在实际建筑实体中可能出现的物质材料。

2.2.2 测试方式与数据

在实际的建筑工程中施工方均应该按照设计图纸进行建筑施工，那么在检测中可以设计图纸对建筑实体中的钢筋位置与钢筋走向进行初步定位以便于减小检测难度和提高检测准确率^[13-14]。

在确定建筑实体中钢筋的位置与走向后，笔者将太赫兹穿墙检测系统的天线端垂直于建筑实体钢筋的方向放置，然后沿着钢筋走向方向的垂直方向移动进行测试并同时采集数据，如图 4 所示的由位置 $L_1 \rightarrow L_5$ 。

根据国家设计规范可知在建筑物中使用的钢筋最小标号为 6 mm，两种标号直径大小的最小梯度值为 2 mm，所以该系统在测试中选择标号为 6 mm 的钢筋作为测试目标且每隔 0.1 mm 进行一次数据采集，可以实现对钢筋的直径大小有效检测。

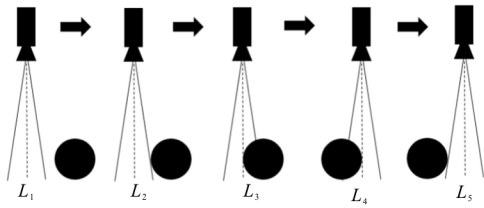


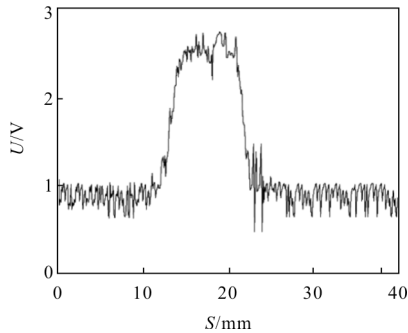
图 4 检测系统原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the detection system

2.3 数据处理与分析(以钢筋为例)

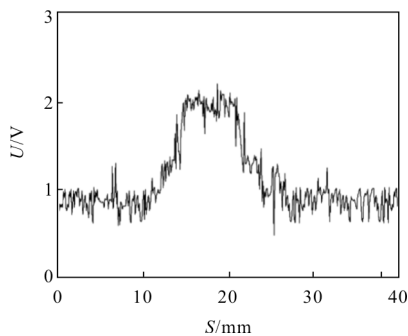
2.3.1 滤波处理

利用太赫兹穿墙检测系统对建筑实体内的钢筋直径测试结果如图 5(a)所示。从测试结果可以看出,当天线移动到没有钢筋的区域时(图 4-L₁),系统回波信号幅值围绕一个值上下波动,即此时信号幅值没有明显的变化趋势;当天线移动到有钢筋的区域时(图 4-L₂-L₃-L₄),系统回波信号幅值会有很明显的上升趋势并且在有钢筋的区域表现为较强信号回波。由测试结果可以看出,随着测试位置的变化,系统天线检测到的回波信号也在不停地变化,但是图形存在许多噪声,毛刺不利于后面做进一步的数据分析,所以需要测试数据滤波去噪、平滑处理^[15-17]。



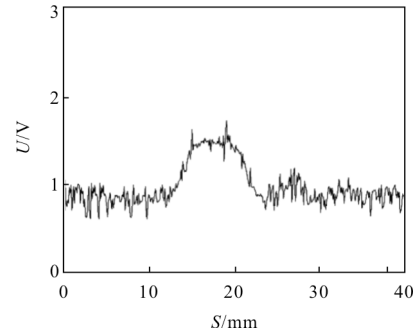
(a) 钢筋测试数据

(a) Testing data of rebar



(b) 空洞测试数据

(b) Testing data of cavity



(c) 木质测试数据

(c) Testing data of wood

图 5 不同材质测试结果

Fig.5 Testing data of different materials

(1) 剔除异常点

通过设置值域选出异常点,然后运用算术平均值法进行滤波处理。算法原理:算术平均滤波是根据 N 个采样数据寻找 U ,使得 U 与各个采样值之间的偏差的平方和最小,即

$$E = \sum_{i=1}^N (U - S_i)^2 \quad (3)$$

最小。由一元函数求极值的原理求得:

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (4)$$

图 5(a)为未处理数据,图 6 为剔除异常点后的数据。

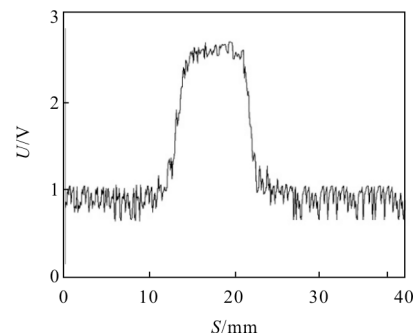


图 6 剔除异常点后的数据

Fig.6 Data after remove outliers

(2) 平滑处理

基于最小二乘法的数据算法,取相邻的 5 个数据点可以拟合出一条 3 次曲线来,然后用 3 次曲线上相应位置的数据作为滤波后的结果如图 7 所示。

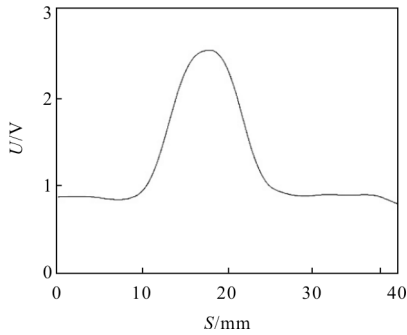


图7 平滑处理数据

Fig.7 Smoothing data processing

2.4 材质区分与直径判定

2.4.1 材质区分

根据反射与透射定律可知太赫兹波反射信号振幅与反射系数成正比。由表 1 可得钢筋、空洞、木片对太赫兹波的反射系数存在较大差异，其中钢筋对太赫兹波的反射系数远大于其他材质的“钢筋”。由测试结果可以看出，在圆柱体空间中充满钢筋时系统检测到的有效太赫兹回波信号峰值最大，如图 8 所示。

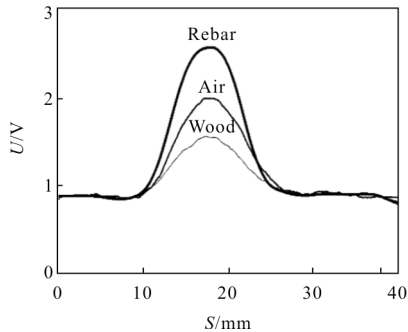


图8 不同材质数据对比

Fig.8 Comparison of different materials data

2.4.2 钢筋直径判定

由检测原理和图 4 可知太赫兹穿墙检测系统从位置 L_3 到 L_4 走过的位移大小即钢筋直径的大小。因此可以通过确定 $U-S$ 曲线中对应位置 L_3 和 L_4 的位置确定钢筋直径大小(位置 $L_1 \sim L_5$ 是同一次测试的不同位移点)。

由图 4 可知太赫兹穿墙检测系统移动到位置 L_3 时的信号强度刚好是系统天线移动到正对钢筋位置时；同理可得移回波信号强度的一半移动到位置 L_4 时的回波信号强度和位置 L_3 相同。即根据半高宽的定义可得：

$$U_{FWHN} = \frac{U_{max} - U_0}{\sqrt{2}} + U_0 \quad (5)$$

式中： U_{FWHN} 为系统移动到位置 L_3 、 L_4 时回波信号强度值； U_{max} 为回波信号强度最大值； U_0 为底噪。

将测试数据 $U_{max} = 2.559v$ 、 $U_0 = 0.873v$ 代入公式(5)可得：

$$U_{FWHN} = 2.065v \quad (6)$$

在 $U-S$ 图中可得到位置 L_3 、 L_4 的位移差为 6.7 mm，即钢筋直径 $d = \Delta S = 6.7 \text{ mm}$ ，如图 9 所示。

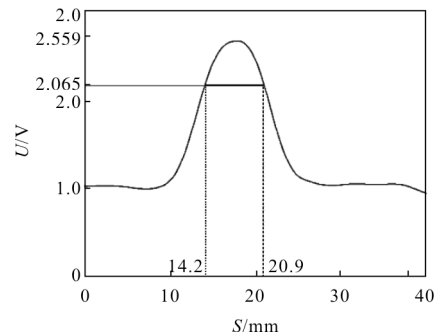


图9 检测钢筋系统输出数据

Fig.9 Output data of test steel bar system

2.5 不同深埋位置钢筋直径检测

在工程应用中，同一种标号的钢筋的埋深也存在着较大差异。因此，为了验证在不同的埋深工况下该方法是否能够实现检测钢筋直径的功能，对同一根钢筋在不同埋深情况下进行检测实验。

随机选取一根工程中常见的钢筋(直径为 32 mm)作为被测目标，测试钢筋的埋深分别为 25 mm 和 63 mm，如图 10 所示。

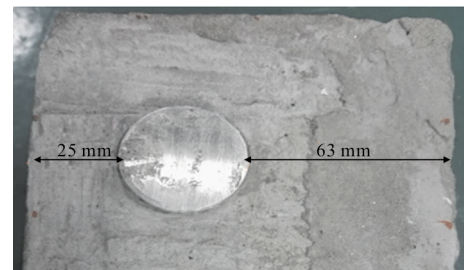


图10 检测模型实物图

Fig.10 Physical map of detection model

当钢筋埋深为 25 mm 时，钢筋直径检测结果为 31.5 mm，利用取整函数得出被测钢筋直径为 32 mm，如图 11(a)所示；当钢筋埋深为 63 mm 时，钢筋直

径检测结果为 32 mm,如图 11(b)所示。根据验证结果可知该方法可以实现对不同埋深的钢筋进行直径检测,且不受钢筋埋深的影响。

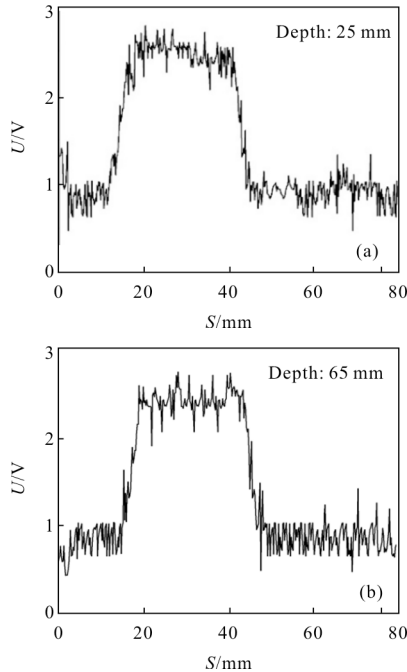


图 11 不同深埋位置钢筋测试结果

Fig.11 Test results of steel bars with different deep buried positions

3 结论

利用太赫兹波检测建筑物内钢筋的方法对直径大于等于 6 mm 的钢筋进行有效的识别。该方法可以实现对穿透非金属的建筑实体进行检测且对直径大于等于 6 mm 的钢筋有很高的识别率,检测分辨率达到 6 mm,检测精度达到 1 mm。被测样品的钢筋直径为 6 mm (国家标准中最小标号钢筋),运用该方法搭建的太赫兹穿墙检测系统检测钢筋的直径为 6.7 mm,利用取整函数得出钢筋直径检测结果为 6 mm。

参考文献:

[1] Yang Fengjuan, Luo Shengxian. Application of wavelet transform in detection of rebar in ground penetrating radar [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 31(4): 354-360. (in Chinese)
杨凤娟, 罗省贤. 小波变换在探地雷达检测钢筋中的应用

[J]. *物探化探计算技术*, 2009, 31(4): 354-360.

[2] Jiang Yanwen, Deng Bin, Wang Hongqiang, et al. RCS measurement of cylinders in terahertz band based on the time-domain spectroscopy system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2223-2227. (in Chinese)
蒋彦雯, 邓彬, 王宏强, 等. 基于时域光谱系统的太赫兹圆柱 RCS 测量[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2223-2227.

[3] Jiang Y, Deng B, Qin Y, et al. Experimental results of concealed object imaging using terahertz radar [C]// *International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, IEEE, 2017: 16-17.

[4] Wang Fang, Qiu Dajian, Xia Hongyan, et al. Preliminary exploration on identification of probiotics in terahertz time domain spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0703001. (in Chinese)

[5] Ding Li, Ding Xi, Ye Yangyang, et al. Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 114-121. (in Chinese)
丁丽, 丁茜, 叶阳阳, 等. 室内人体隐匿物被动太赫兹成像研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 114-121.

[6] Wang Kuifeng. Radar simulation test on the defects inspection between concrete layers [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016(a01): 85-87. (in Chinese)
汪魁峰. 雷达法测试混凝土层间脱空模拟试验[J]. *南水北调与水利科技*, 2016(a01): 85-87.

[7] Cao Ting, Wang Weixing, Yang Nan, et al. Detection method for the depth of pavement broken block in cement concrete based on 3D laser scanning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (2): 0206006. (in Chinese)

[8] Dai Shun, Liu Lihua, Wu Bingheng, et al. Development of handheld ground penetrating radar system for the nondestructive testing of reinforced concrete [J]. *Journal of Hunan University(Natural Science)*, 2010, 37(9): 39-43. (in Chinese)
戴舜, 刘丽华, 吴秉横, 等. 钢筋混凝土无损检测的手持式探地雷达研制 [J]. *湖南大学学报 (自科版)*, 2010, 37(9): 39-43.

[9] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral

- system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 34(10): 2392-2399. (in Chinese)
- 解琪, 杨鸿儒, 李宏光, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别[J]. *光学 精密工程*, 2016, 34(10): 2392-2399.
- [10] Zhang Jian, Wang Qiren, Zhang Xiaoyang, et al. Application of GPR in void defect detection of cement concrete pavement [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2013(6): 50-52. (in Chinese)
- 张建, 王齐仁, 张晓阳, 等. 地质雷达在水泥路面脱空缺陷检测中的应用研究[J]. *勘察科学技术*, 2013(6): 50-52.
- [11] Fuscaldo W, Tofani S, Zografopoulos D C, et al. A reconfigurable multilayered THz leaky-wave antenna employing liquid crystals [C]//*European Conference on Antennas and Propagation, IEEE*, 2017: 849-851.
- [12] Murano K, Watanabe I, Kasamatsu A, et al. Low-profile terahertz radar based on broadband leaky-wave beam steering [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2017, 7(1): 60-69.
- [13] Dai Bing, Wang Peng, Zhou Yu, et al. Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 328-334. (in Chinese)
- 代冰, 王朋, 周宇, 等. 小波变换在太赫兹三维成像探测内部缺陷中的应用[J]. *物理学报*, 2017, 66(8): 328-334.
- [14] Wang Hongyuan, Duan Fajie, Jiang Jiajia, et al. A two-dimension photoelectric level inclination measuring system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 3210-3127. (in Chinese)
- 王洪远, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 二维光电水平倾角测量系统[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(12): 3120-3127.
- [15] Cui Shanshan, Li Qi. De-noising research on terahertz digital holography based on wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1836-1840. (in Chinese)
- 崔珊珊, 李琦. 基于小波变换的太赫兹数字全息再现像去噪研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1836-1840.
- [16] Zhou Zhirong, Hua Dengxin, Yang Rong, et al. De-noising method for mie scattering lidar echo signal based on wavelet theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 144-149. (in Chinese)
- 周智荣, 华灯鑫, 杨蓉, 等. Mie 散射激光雷达回波信号小波去噪方法[J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 144-149.
- [17] Xu Tingfa, Su Chang, Luo Xuan, et al. Underwater range-gated image denoising based on gradient and wavelet transform[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 301-311. (in Chinese)
- 许廷发, 苏畅, 罗璇, 等. 基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪[J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 301-311.