

精确微波全息成像算法在违禁物品检测中的应用

王鹏宇¹ 杨晓庆²
WANG Pengyu YANG Xiaoqing

摘要

随着国家交通事业的不断发展,几乎各个城市都有机场、高铁站等公共交通设施,在方便了人们出行的同时,庞大的客流量对这些场所的安检能力也提出了更高的要求。现有的安检措施需要安检人员对旅客进行接触式安检,存在人员投入大、效率低等问题。针对上述问题,提出一种微波精确成像算法,由于微波是非电离的,不会对人体产生危害,很容易穿透普通材料,并且会在人体和任何隐藏物品表面产生反射,可以非接触式地检测人体、行李中是否携带了枪支弹药、刀具、化学炸药等违禁品,并能检测到其具体位置。通过使用 CST 全波仿真,得到目标散射波的幅度和相位,使用微波精确成像算法实现对隐藏物品的精确检测与定位。

关键词

微波成像; 电磁场与微波技术; 微波非接触检测; 精确合成孔径算法; 光学衍射角谱法; 全息成像

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.043

0 引言

当今世界,虽然大多数国家和地区都远离战争,不会受到战争带来的危害,但由于国际安全形势日益严峻,意识形态的冲突和利益集团之间的争斗导致恐怖袭击频繁发生,尤其是火车站和机场等人员密集场所,危害着世界人民的生命财产安全。比如,2014年,数名蒙面暴徒持刀进入昆明火车站砍杀无辜群众;2015年,恐怖分子进入法国巴塔克兰音乐厅射杀观众。这些恐怖袭击案件发生的根本原因就是这些人员密集场所的安检工作存在纰漏,使恐怖分子有机可乘,将违禁品带入其中。为了应对日益严峻的恐怖主义的威胁,火车站和机场等人员密集场所的安检工作显得格外重要。

目前常规的安检方式主要有手持金属探测器、红外热成像和 X 射线成像^[1],但这些安检方法存在一定的问题。金属探测器只能探测金属违禁品,对钥匙、手机等金属材质的物品会产生误警,而且对一些有害非金属物品如汽油、酒精等无法进行检测,同时这种检测方式需要投入大量人力,效率低下。红外热成像检测利用人体和其他物品的温度差异实现检测,但如果人穿的衣服较厚,或者违禁物在人体上的时间过长,与人体温度相近时,这种方式将无法有效成像。X 射线成像的效果虽然精确,且效率高,但是会产生电离辐射,长时间暴露在 X 射线的照射下,会对人体产生不可逆的伤害。

以上传统检测方式都存在一定的局限性,因此迫切需要一种更安全高效的安检方式。微波成像技术不会产生电离辐

射,对人体健康没有威胁,并且可以穿透有一定厚度的材料,成像分辨率高,非常适合应用于人体安检。在微波成像的方式中,从能量辐射方面可以将成像系统分为主动微波成像和被动微波成像,被动成像系统本身不会产生微波辐射,只是被动接收微波,受周围环境的影响大,不能实现三维成像,而主动成像会发射微波信号,相对于被动成像系统具有更高的稳定性,并且可以实现三维成像。在主动成像技术中,主要有合成孔径成像算法、宽带全息成像算法^[2-5],可以通过记录微波在宽频带上反射波的幅度和相位信息直接反演出三维图像,不需要对成像系统进行额外的距离聚焦处理,其反演出的图像更加准确,反演效率高。

在世界上,美国的 L-3 公司和英国的 Smiths Detection 公司在主动微波人体安检成像技术中处于领先地位,美国太平洋西北国家实验室对微波全息成像也有深入的研究,研发了多套成像系统和算法^[6-11],并与 L-3 合作开发了 ProVision,工作的中心频率为 30 GHz,分辨率小于 1 cm,每小时可以完成 200 ~ 300 人的安检需求。国内的微波成像技术发展时间较短,但也取得了较大的突破。深圳先进技术研究院开发的主动微波成像系统,工作中心频率为 35 GHz,分辨率为 1.05 cm;北京无线电计量测试研究所研发的主动微波成像系统,工作在 Ka 波段,分辨率可以达到 5 mm;北京理工大学学者们提出了一种三维非均匀傅里叶变换算法^[12-13],用来替代传统的 Stolt 插值和 FFT 算法,显著提高成像效率。

本文提出了一种精确微波全息成像算法,利用韦尔恒等式对微波全息算法中多层介质产生的相位滞后进行修正,实

1. 四川大学 四川成都 610065

现对隐藏违禁物品的正确成像，并考虑到微波在传播过程中随传播距离而衰减，利用光学衍射中的角谱理论对传统的微波全息成像算法进行了幅度和相位的修正，提高了成像精度。通过不断深入研究和实际应用，有望推动微波全息安检技术的发展，提升其在工程和科学领域中的应用水平。

1 理论分析

微波全息成像的本质就是利用单个天线在扫描平面上对待测区域进行等间隔距离扫描，得到目标散射波的幅度和相位，即目标的全息图，再经过反演得到精确的微波三维图像，全息成像系统配置如图1所示。

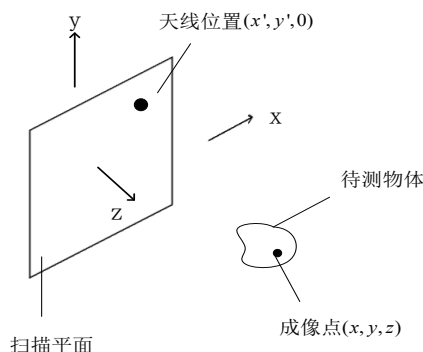


图1 全息成像系统配置

假设收发天线位于 $(x', y', 0)$ 处，待测物体上一点为 (x, y, z) ，并假设该点的反射率为 $f(x, y, z)$ ，则收发天线处的相应即为待测物体各点的反射率与往返相位相乘后的积分，即：

$$s(x', y', \omega) = \iint \frac{f(x, y, z) e^{-j2k\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}}}{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2} dx dy \quad (1)$$

式中： k 为电磁波波数，如果忽略微波随距离的衰减，根据韦尔恒等式可以将式(1)改写为：

$$S(K_x, K_y, \omega) = F(K_x, K_y, z) e^{-jK_z z} \quad (2)$$

大写字母表示物理量在频域中的表达式，其中：

$$K_z = \sqrt{4K^2 - K_x^2 - K_y^2} \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式并做二维傅里叶逆变换，可以得到待测物反射率的分布：

$$f(x', y', z) = \sum_{\omega} FT_{xy}^{-1} [S(K_x, K_y, \omega) e^{jK_z z}] \quad (4)$$

上述算法忽略了微波随传播距离而衰减，为了实现更清晰的成像，可以利用与微波全息原理相似的光学衍射中的角谱理论，对三维毫米波重建算法进行修正。根据光学角谱公式：

$$U_z(x_0, y_0, z_0) = \iint A(f_x, f_y) e^{jkz_0 \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}} \cdot e^{j2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)} df_x df_y \quad (5)$$

将式(1)按照式(5)的形式改写得得到：

$$s(x', y') = -\frac{j\lambda}{2z} \iint f(f_x, f_y) e^{-jz\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \cdot e^{j2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)} df_x df_y \quad (6)$$

反演式(6)可以得到经修正后的目标反射率函数：

$$f(x', y') = -\frac{2z}{j\lambda} FT_{xy}^{-1} \{ FT_{xy} [s(x', y')] \} \cdot e^{jz\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad (7)$$

与式(4)相比，式(7)加入了常数项 $-\frac{2z}{j\lambda}$ 来修正幅度和相位，提高成像的精确度。

以上算法可以有效检测到位于表面的违禁品，但如果违禁品被埋藏在较深的位置，就需要考虑物体上方介质带来的额外相位，如图2所示，需要将式(7)修正为：

$$f(x', y') = -\frac{2z}{j\lambda} FT_{xy}^{-1} \{ FT_{xy} [s(x', y')] \} \cdot e^{j \sum_{i=1}^{M-1} k_{zi} d_i} e^{jk_{zM} (z - \sum_{i=1}^{M-1} d_i)} \quad (8)$$

式中： M 为待测物所在介质层数； d_i 为每层介质的厚度； k_{zi} 为每层介质对应的传播波数。经过相位修正后，可以精确地对埋藏的违禁物品进行检测与定位。

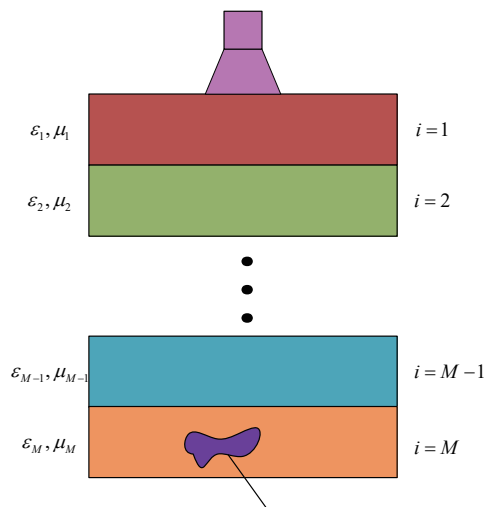


图2 违禁物隐藏示意

2 系统仿真结果

本文采用三维全波电磁场仿真软件CST MWS对电磁场进行仿真，将仿真得到的S参数输入矩阵计算软件MATLAB中进行编程计算成像。

待测物品为长宽20 cm、厚度2 mm的金属板，并在金属板中掏空一部分，长为15 cm，宽为7 cm，以测试系统是否可以正确对待测物形状进行成像，将整个待测物放置在介电常数为4的介质中心。用于模拟隐藏的违禁物品，如图3所示。

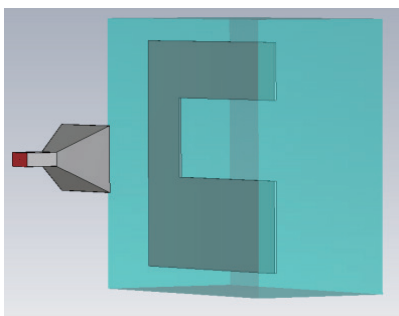


图3 仿真模型

实现全息成像，主要通过以下几方面。

(1) 使用工作频带在 8.2 ~ 12 GHz 内、增益为 10 dBi 标准增益的喇叭天线作为收发天线，由于喇叭天线末端与波端口之间存在相位差，这主要会影响被测物品的成像位置，也会影响一定的成像精度，所以要先对天线进行校准，先将介质材料移除，将天线放置在距待测物表面 8 cm 处（距离可根据所需进行选择），考虑到扫描和计算效率，设置天线在扫描平面进行 15 mm 步进扫描，在二维扫描平面扫描后得到 441 组 S 参数，为了消除喇叭天线自身噪声，需要对 S 参数进行均值滤波处理，使用 MATLAB 编程进行初步成像。为了得到被测物在 z 方向上的精确坐标，使用三维累加图像幅值的方法得到待测物 z 方向上的坐标。如图 4 所示，最后得到待测物 z 方向坐标为 16.8 cm，在后续试验中需要将 8.8 cm 的校准数据加入计算中。

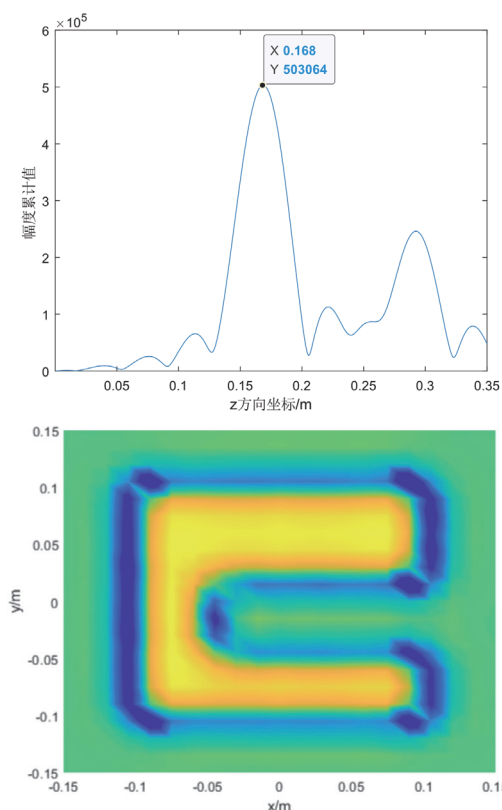


图4 校准过程三维累加图像幅值及成像效果

(2) 对喇叭天线进行校准后，将介质加入仿真模型中，喇叭天线放置在距介质表面 10 cm 处，待测物埋藏在介质表面下 3 cm 处，设置天线在待测物表面进行 15 mm 步进扫描，在二维扫描平面扫描后得到 441 组 S 参数，先将 S 参数进行均值滤波，并将 8.8 cm 的校准数据加入成像算法中，结果如图 5 所示。

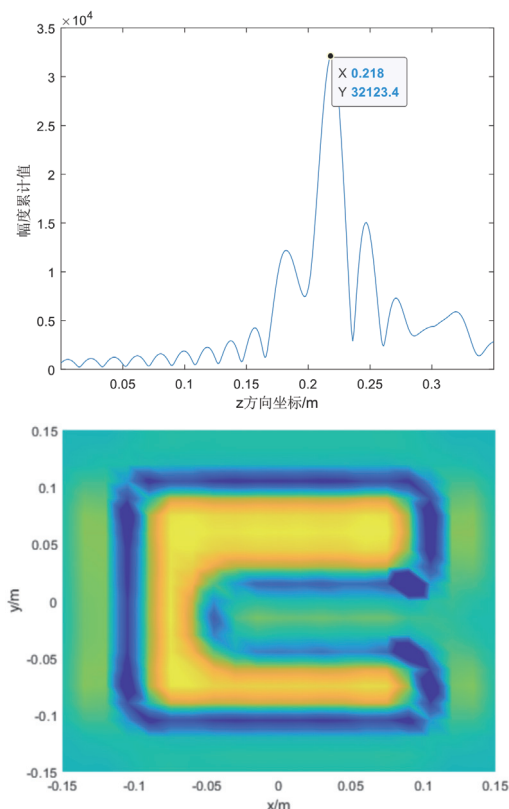


图5 隐藏物品三维累加图像幅值及成像效果

隐藏的违禁物品距离喇叭天线末端为 13 cm，再加入 8.8 cm 的校准数据，与三维累加图像幅值的结果一致，为 21.8 cm。由试验结果可以看出，通过该微波精确全息成像方法，可以精确得到被隐藏违禁物的位置及图像，从而可以让安检人员知道违禁品的形状大小和具体位置。

本文通过对微波全息成像算法与光学衍射中的角谱法进行结合，修正了传统微波全息成像算法中因忽略微波传播衰减引起的幅值和相位的误差，可以精确地对多层介质中隐藏的违禁物品进行成像。

3 总结与展望

安检工作中对违禁物品的检测正确率与效率关乎公共场所人民生命财产安全，本文基于此背景，对微波安检系统中的全息成像算法展开研究。针对目前安检工作的需求，本文利用光学衍射中角谱法对传统成像算法进行相位和幅值修正，将传统成像算法中被忽略的球面波随距离的衰减考虑其

中,提高成像质量,并考虑到违禁物品可能被隐藏在其他介质之下,传统微波全息成像无法正常工作的情况,利用韦尔恒等式将多层介质带来的相位滞后考虑其中,实现了对隐藏的违禁物品的检测。在对成像算法进行推导后,使用 CST MWS 对隐藏违禁品安检场景进行建模,利用 CST MWS 的时域全波电磁仿真,得到违禁品反射波的幅值与相位信息,将数据输入 MATLAB 中,实现了对违禁物品的成像及定位。这些研究方法和技术的应用对于电磁场仿真、安检领域具有重要的理论意义和实践意义。

然而,这项技术还有许多不足之处,成像使用的天线是常见的标准增益喇叭天线,在带宽及增益方面中规中矩,体积较大。在今后的工作中,还需要在天线设计方面做一定的工作,结合主流的天线设计、超表面设计及一些结构优化算法,设计一些专用于微波全息成像的天线,以进一步提高成像效果,减小天线体积,并能与 PCB 板集成,使检测系统总体更加灵活。

在成像过程中,需要收发天线在扫面平面进行栅格式扫描,考虑到实际扫描过程,每扫描一个点,机械扫描装置和射频器件需要一定的时间来响应,而且点数越多,成像算法也会需要越长的计算时间,所以扫描点数过多会使安检效率减慢。后续工作考虑到可以通过小波变换、压缩感知等技术,仅采集成像关键点,尽管会损失一定的精度。使用流行的 MIMO 组阵技术,将机械扫描改为阵元相位控制的波束扫描。另外,在计算过程中,可以使用 NVIDIA GPU 独有的 CUDA 技术,将成像算法移植到 GPU 上,利用 GPU 的并行计算能力提高计算效率。这些探索将为未来的研究提供更多的指导和支持。

参考文献:

- [1] 赵自然. 人体安检新技术的分析与探讨[J]. 中国安防, 2012(3): 40-43.
- [2] DHILLON S S, VITIELLO M S, LINFIELD E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of physics, D: applied physics, 2017, 50(4): 043001.
- [3] SIEBERT K J, QUAST H, LEONHARDT R, et al. Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging[J]. Applied physics letters, 2002, 80(16): 3003-3005.
- [4] SHI J, WANG Y, XU D, et al. Terahertz imaging based on morphological reconstruction[J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2017, 23(4): 1-7.
- [5] GIUBBOLINI L. A microwave imaging radar in the near field for anti-collision(MIRANDA)[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1999, 47(9): 1891-1900.
- [6] SHEEN D M, MCMAKIN D L, COLLINS H D, et al. Near-field millimeter-wave imaging for weapons detection[EB/OL]. (1992-11-20)[2024-03-01]. <https://www.osti.gov/biblio/10116882>.
- [7] KELLER P E, MCMAKIN D L, SHEEN D M, et al. Privacy algorithm for airport passengers screening portal[J]. Pacific northwest national lab, 2000, 4055: 476-483.
- [8] KELLER P E, MCMAKIN D L, SHEEN D M, et al. Privacy algorithm for cylindrical holographic weapons surveillance system[J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 2000, 15(2): 17-24.
- [9] MCMAKIN D L, SHEEN D M, HALL T E. Millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[C]//IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Piscataway: IEEE, 2003: 52-62.
- [10] SHEEN D M, MCMAKIN D L, HALL T E. Near field imaging at microwave and millimeter wave frequencies[C]//2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2007: 1693-1696.
- [11] MCMAKIN D L, SHEEN D M, HALL T E, et al. Biometric identification using holographic radar imaging techniques[EB/OL]. (2007-04-01)[2024-03-01]. <https://doi.org/10.1117/12.729636>.
- [12] YU M, LI Y, CHEN J. NUFFT-based algorithm for near-field MMW synthetic aperture imaging radiometers[C]//Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer(MEC). Piscataway: IEEE, 2013: 527-531.
- [13] 任百玲. 主动毫米波安检成像算法及系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

【作者简介】

王鹏宇(2000—), 男, 山东莒县人, 硕士, 研究方向: 天线设计、微波传感器设计、微波全息成像算法。

杨晓庆(1978—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 研究方向: 电磁超材料、微波无损检测和多物理场分析。

(收稿日期: 2024-03-12)