

文章编号: 2095-4980(2016)04-0513-07

近程目标太赫兹全息成像算法及仿真

张野, 邓彬, 秦玉亮, 王宏强

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 对比传统的基于球面波分解的近程目标太赫兹全息成像算法, 以驻定相位法为理论基础对成像算法进行推导, 得到了相同的成像补偿公式。采取图像熵的判决准则分析阵元误差对成像结果的影响, 为成像系统阵元位置精确度的设计提供理论依据。针对三维目标距离过近出现非补偿距离平面成像结果散焦的现象, 对传统成像算法的缺陷进行分析, 提出了基于循环补偿与投影合成相结合的近程目标太赫兹三维全息成像方法。220 GHz 条件下的 Matlab 仿真结果验证了所提方法的有效性, 实现了三维目标的聚焦成像。

关键词: 太赫兹; 全息; 驻定相位法; 三维成像; 图像熵

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0513

Terahertz holographic imaging algorithm and simulation for short-distance target

ZHANG Ye, DENG Bin, QIN Yuliang, WANG Hongqiang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Compared to traditional terahertz holographic imaging algorithm for short-distance targets based on spherical wave decomposition, the same imaging compensation formula is obtained based on the theory of stationary phase method. By analyzing the effect of array elements error on imaging results using the criterion of image entropy, it provides the theory basis to the design of the array elements position precision of imaging system. Aiming at the defocusing and fuzzy in 3-D targets imaging results at non-compensation distance which is too close, the defects of traditional imaging algorithm are analyzed, and terahertz 3-D holographic imaging method is proposed for short-distance target based on the combination of loop compensation and projection synthesis. The Matlab simulation results at 220 GHz show the effectiveness of the proposed method, which realizes the focused imaging of three-dimensional targets.

Key words: Terahertz; holographic; stationary phase method; three-dimensional imaging; image entropy

太赫兹波在电磁频谱中介于微波和红外之间, 频段为 0.1 THz~10 THz, 长期以来由于太赫兹源和器件发展的不完善, 成熟的太赫兹设备和仪器至今未实现广泛应用。太赫兹波兼具微波和红外的优点, 在成像上又具有其特殊的潜力^[1]。相比于微波频段, 太赫兹波频段更高, 波长短, 更易于极大带宽和极窄天线波束的实现, 可以在距离向和方位向获取更高的成像分辨力, 同时太赫兹波光子能量低, 可以更加安全地对人体进行安全检查。相比于红外射线, 太赫兹波对烟雾、介电材料和非极性液体材料具有良好的穿透性, 可以实现对物体的透视成像。在诸多成像应用中, 近程目标太赫兹全息成像在针对隐匿武器检查和其他非金属危险违禁品的安检场合具有天然的优势, 是目前国内外的研究热点。

在近程目标全息成像最早取得突破的是美国的西北太平洋国家实验室, 其研究重点集中在毫米波频段, 该实验室历经十几年的探索研究, 逐渐实现了毫米波全息成像系统的商业化^[2-5]。国内方面, 中国航天科工防御技术研究院完成了“毫米波主动式三维人体安检系统”的样机研制, 填补了国内近程目标全息成像技术的空白。中科院电磁辐射与探测技术重点实验室实现了太赫兹高斯波束下三维目标的图像重建^[6-7], 取得了一定的实验成果。目前为止, 由于系统成本和成像关键技术不完善等因素, 近程目标太赫兹全息成像技术仍在发展和完善之中。

本文对比传统的基于球面波分解的近程目标全息成像算法, 采用驻定相位法对成像算法进行推导, 得到了相

收稿日期: 2015-06-03; 修回日期: 2015-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61302148; 61571011)

同的成像补偿公式。在成像过程中,发现阵元位置存在误差会导致成像结果的模糊和散焦,提出了图像熵^[8]作为成像结果聚焦效果的判决准则,得到了阵元位置误差的控制范围,为成像系统的设计提供理论依据。同时,针对三维成像过程中目标距离阵列平面过近时,非补偿平面的目标成像结果散焦和模糊的现象,分析了问题出现的原因,指出了原有成像算法中存在的缺陷,提出了基于循环补偿与投影合成相结合的太赫兹近场三维全息成像算法,实现了三维目标的全聚焦投影成像。

1 三维成像算法推导

近程目标太赫兹全息成像的基本原理是利用合成的平面阵列发射太赫兹相干信号照射目标,经目标反射的回波与本振信号进行相干处理后,将接收的空间分布信号变换到波数域,随后在波数域利用相位补偿的方法,补偿电磁波的空间球面弯曲,将球面波前补偿为平面波前,最终通过傅里叶逆变换反演目标的散射分布函数。由于一维、二维和三维成像算法原理相同,下面直接对近程目标太赫兹三维全息成像算法进行推导,成像模型见图1。

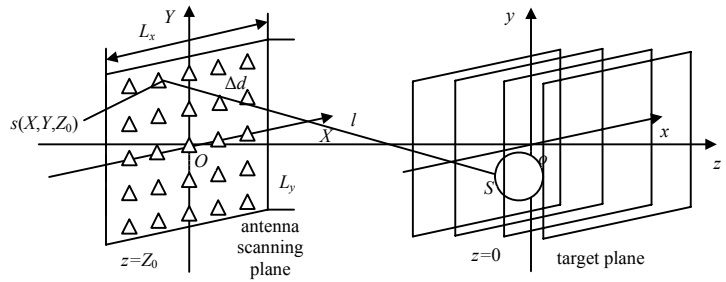


Fig.1 Three-dimensional imaging model

图1 三维成像模型

天线发射宽带太赫兹相干信号,经过目标 S 的散射后,回波信号由 XY 平面上的等效二维天线阵列接收,将接收信号与本振信号进行混频得到零中频信号为:

$$s(X, Y) = \iiint_V f(x, y, z) \exp[-j2k\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z_0)^2}] dx dy dz \quad (1)$$

式中: $f(x, y, z)$ 为目标散射特性函数; V 为目标区域; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为信号波长。式中的指数部分即表示目标散射的球面波信号,采取文献[2]基于球面波分解的方法,在忽略幅值和无穷小项影响的条件下,对式(1)作进一步的变换,可以将球面波在波数域表示成空间各个方向上的平面波的叠加,即

$$\exp[-j2k\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z_0)^2}] = \iint \exp[jk_x(X-x) + jk_y(Y-y) + jk_z(Z_0-z)] dk_x dk_y \quad (2)$$

式中 k_x, k_y 和 k_z 依次为波数 k 沿 x, y 和 z 方向的波数分量。将式(2)代入零中频信号 $s(X, Y)$ 可得:

$$s(X, Y) = \iiint_V \iiint f(x, y, z) \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)] dx dy dz \cdot \exp[j(k_x X + k_y Y + k_z Z_0)] dk_x dk_y = \iint FT3[f(x, y, z)] \cdot \exp[j(k_x X + k_y Y + k_z Z_0)] dk_x dk_y = IFT2[FT3(f(x, y, z))] \exp(jk_z Z_0) \quad (3)$$

式中: $FT3$ 表示三维傅里叶变换; $IFT2$ 表示二维逆傅里叶变换,调整式(3)可得:

$$f(x, y, z) = IFT3\{FT2[s(X, Y)] \exp(-jk_z Z_0)\} \quad (4)$$

式中: $IFT3$ 表示三维逆傅里叶变换; $FT2$ 表示二维傅里叶变换; $f(x, y, z)$ 即为所求的三维目标的散射特性函数。

以上是文献[2]所述的基于球面波分解的近程目标三维全息成像算法。除球面波分解的方法外,在驻相位点附近的相位缓变的条件下,采用驻定相位法同样可以实现对 $f(x, y, z)$ 的求解,本文采用驻定相位法对近程目标太赫兹三维全息成像算法进行详细推导。对式(1)两端同时进行二维傅里叶变换可得

$$S(k_x, k_y) = \iiint_V f(x, y, z) dx dy dz \iint \exp[-j2k\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z_0)^2}] \exp(-jk_x X - jk_y Y) dX dY \quad (5)$$

取

$$S_1(k_x, k_y) = \iint \exp[-j2k\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z_0)^2}] \exp(-jk_x X - jk_y Y) dX dY \quad (6)$$

代入式(5)可得

$$S(k_x, k_y) = \iiint_V f(x, y, z) S_1(k_x, k_y) dx dy dz \quad (7)$$

下面采用驻定相位法求解 $S_1(k_x, k_y)$:

令 $\phi(X, Y) = -2k\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z_0)^2} - k_x X - k_y Y$, 则式(6)可表示为:

$$S_1(k_x, k_y) = \iint \exp[j\phi(X, Y)] dXdY \tag{8}$$

求解驻相点

$$\frac{\partial \phi(X, Y)}{\partial X} = -2k \frac{X-x}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (z-Z_0)^2}} - k_x \tag{9}$$

$$\frac{\partial \phi(X, Y)}{\partial Y} = -2k \frac{Y-y}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (z-Z_0)^2}} - k_y \tag{10}$$

令式(9)和式(10)等于零, 则可以求出驻相点 X^* 和 Y^* :

$$X^* = -\frac{k_x}{\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}}(z - Z_0) + x \tag{11}$$

$$Y^* = -\frac{k_y}{\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}}(z - Z_0) + y \tag{12}$$

将驻相点代入到 $S_1(k_x, k_y)$ 可得:

$$S_1(k_x, k_y) \approx \exp[j\phi(X^*, Y^*)] = \exp[-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}(z - Z_0)] * \exp(-jk_x x - jk_y y) = \exp(jk_z Z_0) * \exp(-jk_x x - jk_y y - jk_z z) \tag{13}$$

将 $S_1(k_x, k_y)$ 计算结果代入 $S(k_x, k_y)$ 可得:

$$S(k_x, k_y) = \iiint_V f(x, y, z) \exp(jk_z Z_0) * \exp(-jk_x x - jk_y y - jk_z z) dx dy dz = FT3[f(x, y, z)] \exp(jk_z Z_0) \tag{14}$$

调整可得

$$f(x, y, z) = IFT3[S(k_x, k_y) \exp(-jk_z Z_0)] = IFT3[FT2(S(X, Y)) \exp(-jk_z Z_0)] \tag{15}$$

对比基于球面波分解的成像算法, 可以发现 2 种方法推导出的结论是相同的, 表明本文提出的采取驻定相位法作为近程目标全息成像算法的理论基础是同样成立的。需要注意的是, 此时天线发射的为宽带信号, 式中 $k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}$, 由于 k 具有一定的带宽, 因此在波数域进行球面波的补偿时, 补偿因子中 k_z 是不均匀分布的一组向量, 在实际成像时, 需要对 k_z 进行插值处理。三维成像流程见图 2。

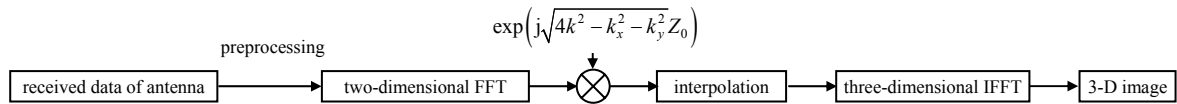


Fig.2 Flow chart of three-dimensional imaging
图 2 三维成像流程图

2 关键问题分析

2.1 系统分辨力与采样间隔

在近程目标太赫兹全息成像系统的实际应用中, 各维度的分辨力和不模糊距离是系统参数设计所必须考虑的。第 1 节中的成像算法是在空间波数域中推导的, 方位向的分辨力由覆盖的波数域宽度来决定, 在任一维度, 由空间频率覆盖的宽度 Δk 产生的分辨力为 $\delta \approx 2\pi / \Delta k$, 对于三维成像, 空间频率覆盖示意图 3, 将波数覆盖区域近似为矩形, 则可得到 k_x 的近似宽度为 $4k_c \sin(\theta_b / 2)$, 其中 k_c 为中心波数, θ_b 为天线全波束宽度。

由此可以得到方位向 x 的分辨力为:

$$\delta_x \approx \frac{\lambda_c}{4 \sin(\theta_b / 2)} \tag{16}$$

当天线阵列最大孔径宽度 D 较目标距离 R 小很多时, 方位向 x 的分辨力可近似为^[9]:

$$\delta_x \approx \frac{\lambda_c R}{2D} \tag{17}$$

y 方向的分辨力推导与 x 方向相同, 由式(17)可知, 方位向分辨力与阵列尺寸成正比, 与目标距离和波长成反比。在 z 方向, 可知距离向波数宽度为 $k_2 - k_1$, 可得距离向分辨力为:

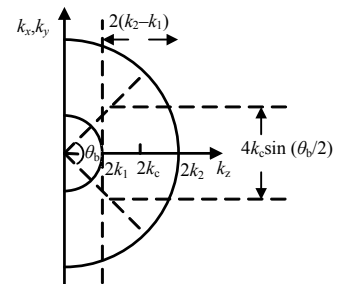


Fig.3 Schematic diagram of spatial frequency coverage
图 3 空间频率覆盖示意图

$$\delta_z \approx \frac{2\pi}{2(k_2 - k_1)} = \frac{c}{2B} \quad (18)$$

在实际成像系统的设计中, 天线扫描间隔的选取至关重要, 天线扫描间隔过大, 将导致采样频率不满足奈奎斯特采样定律, 成像结果将出现混叠, 间隔过小, 将极大地增加数据量, 导致无法实时成像, 同时增加了系统成本, 不利于实际应用。天线扫描间隔理论上应遵循式(19)和式(20)的约束。

$$\Delta x \leq \frac{\lambda_c \sqrt{(L_x + L'_x)^2 + (2Z_0)^2}}{4(L_x + L'_x)} \quad (19)$$

$$\Delta y \leq \frac{\lambda_c \sqrt{(L_y + L'_y)^2 + (2Z_0)^2}}{4(L_y + L'_y)} \quad (20)$$

式中: L_x 和 L_y 为天线阵列的二维尺寸; L'_x 和 L'_y 为目标二维尺寸; λ_c 为中心波长; Z_0 为目标平面到阵列平面的距离。假设目标距离向尺寸为 L_z , 距离向采样频率应满足式(21)的约束。

$$\Delta f \leq \frac{c}{2L_z} \quad (21)$$

2.2 阵元误差对成像的影响

在各种合成孔径和实孔径体制雷达的应用中, 阵元误差对雷达性能的影响长期以来都是研究的热点。针对本文所提出的近程目标太赫兹全息成像体制, 由于太赫兹收发器件性能的限制, 实际成像系统收发阵元分置, 每一组收发阵元近似为收发一体的准单站形式, 等效阵元位置为收发阵元中心。在系统搭建时, 阵元位置误差是不可避免的, 由于本文系统阵元较多, 无论是采用随机化搜索方法还是先进的模拟退火算法, 都需要很长时间来消除阵元位置误差对成像结果的影响, 不符合实际应用所要求的快速实时成像, 因此在系统搭建前必须预知阵元位置可接受的最大误差范围。

以单一阵元为例, 阵元位置误差对回波相位的影响见图4, 存在阵元误差时的回波相位误差为:

$$\Delta\varphi = 2k \left[\sqrt{(x+\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2 + Z_0^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + Z_0^2} \right] \approx 2k\sqrt{x^2 + y^2 + Z_0^2} \left(\sqrt{1 + \frac{2x\Delta x + 2y\Delta y}{x^2 + y^2 + Z_0^2}} - 1 \right) \approx 2k \frac{x\Delta x + y\Delta y}{\sqrt{x^2 + y^2 + Z_0^2}} \quad (22)$$

存在误差相位时, 球面波补偿后残余相位的干涉作用将导致成像分辨率下降。本文采取图像熵值作为成像结果聚焦好坏的判决准则, 图像熵的定义为: 对于一个包含 $N \times M$ 个像素的复值图像 X :

$$S(X) = -\sum_m \sum_n \rho(m,n) \ln \rho(m,n) \quad (23)$$

$$\rho(m,n) = \frac{|x(m,n)|^2}{P} \quad (24)$$

$$P = \sum_m \sum_n |x(m,n)|^2 \quad (25)$$

式中 $S(X)$, $\rho(m,n)$, $x(m,n)$ 和 P 分别为图像的熵、各像素功率在图像总功率中的比例、像素值、像素总功率。当阵元位置不存在误差时, 成像结果熵值最小, 误差越大, 熵值越大, 因此可以根据相同条件下成像结果的图像熵值来调整阵元位置以降低阵元误差。

2.3 三维成像球面波补偿误差分析

采取基于傅里叶变换补偿算法的近程目标太赫兹全息成像算法的特点是在波数域进行相位补偿, 其关键是补偿成像过程中由球面波波前的相位差造成的相位干涉。相位补偿可以等效为对弯曲球面进行一个相同曲率球面的对称补偿, 其补偿效果见图5。

采取第1节中的三维成像补偿算法进行相位补偿时, 补偿距离选取的为目标原点到平面阵列的距离 Z_0 , 对应的球面波曲

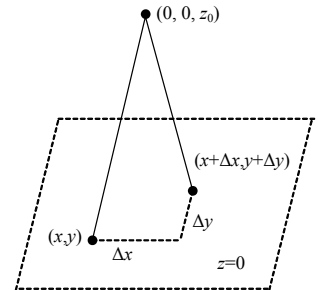


Fig.4 Effect of array element error on the echo phase
图4 阵元误差对回波相位影响

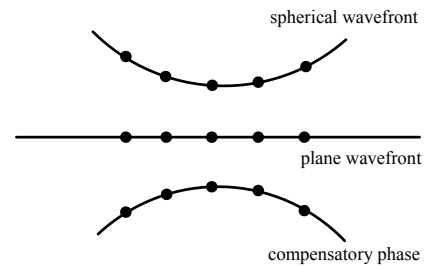


Fig.5 Equivalent schematic diagram of phase compensation
图5 相位补偿等效示意图

率为 $1/Z_0$ 。假设目标距离向宽度为定值 L_z ，当 Z_0 较大时， L_z/Z_0 较小， $Z_0 \pm L_z/2$ 范围内的球面波曲率近似相同，采取 Z_0 作为补偿距离时，几乎没有残余相位误差，对三维成像结果的影响很小。当 Z_0 较小时， L_z/Z_0 较大， $Z_0 \pm L_z/2$ 范围内的球面波曲率相差较大，此时取 Z_0 作为补偿距离，非补偿距离平面的目标会由于补偿后残余的相位误差较大导致成像结果发生散焦和模糊，曲率变化见图 6。为解决此问题，本文提出了基于循环补偿与投影合成相结合的太赫兹近场三维全息成像方法，具体流程如下：

- 1) 根据距离向成像分辨力 δ_z 和目标距离向尺寸 L_z 确定补偿距离点数 $[L_z/\delta_z]+1$ ；
- 2) 选取不同的补偿距离 $Z_i(i=1,2,\dots,[L_z/\delta_z]+1)$ ，采取第 1 节中的成像算法对目标进行成像，并保存对应补偿距离平面上目标的成像结果 $A_i(i=1,2,\dots,[L_z/\delta_z]+1)$ ；
- 3) 将所有保存的不同距离平面的成像结果 A_i 投影合成目标的三维成像结果。

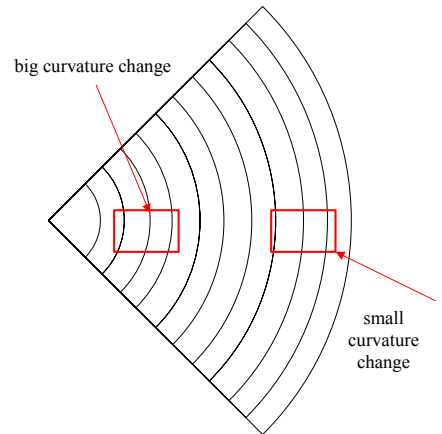


Fig.6 Schematic diagram of curvature change
图 6 曲率变化示意

3 仿真结果及分析

3.1 不同阵元误差下成像结果分析

本文以 Matlab 软件为工具对成像算法进行仿真。仿真条件为：天线发射信号为 220 GHz 的单频连续波信号，阵列大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，阵元间距为 1 mm，阵列平面坐标为 $Z_0 = -5\text{ m}$ ，计算可得二维方位向分辨力为 3.4 mm，不模糊距离为 3.4 m，目标为由电磁计算软件 CST 计算得到的长 0.3 m，宽 0.15 m 的坦克缩比模型的复 RCS 数据。不同阵元误差下坦克目标二维成像结果见图 7，本文假设阵元误差为高斯随机分布的，百分比为最大阵元误差相对于阵列尺寸的百分比。

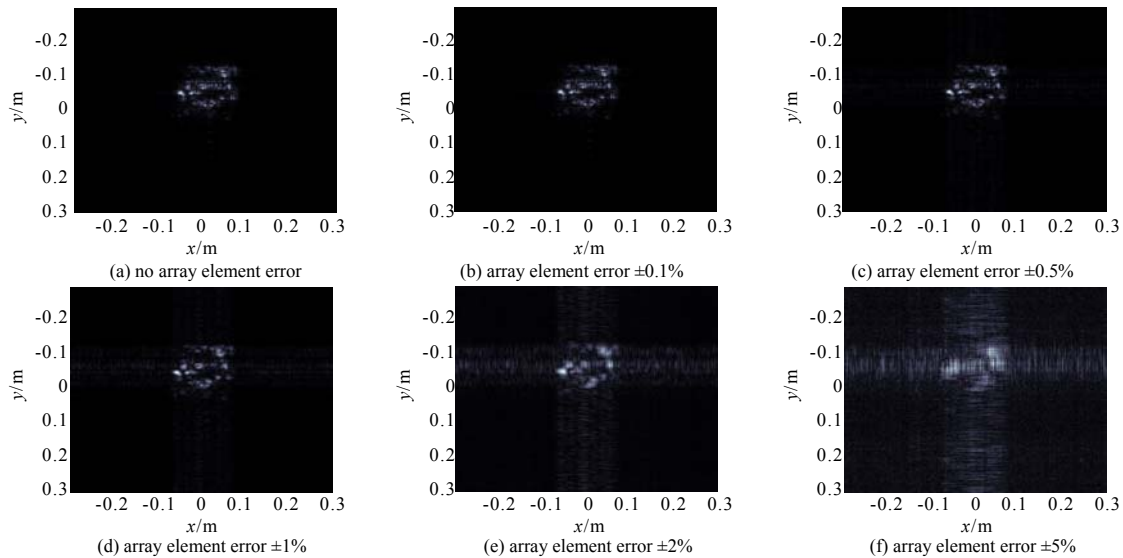


Fig.7 Imaging results of tank scaling model with different array element errors
图 7 不同阵元误差下坦克缩比模型成像结果

由图 7 的仿真结果可以发现，随着阵元误差的增大，坦克目标的成像结果分辨力逐渐降低，散焦和模糊的现象越来越严重。计算阵元误差为 $\pm 0.1\% \sim \pm 5\%$ ，步长为 0.1% 条件下所对应的成像结果熵值，见图 8。由图 8 可知，成像结果图像熵值随阵元误差百分比的增加而增加，因此采取图像熵值大小作为阵元误差大小的判决准则是成立的，在实际的系统设计中，通过计算相同条件下相同目标成像结果的熵值大小即可判断系统阵元精确度的大小，同时图像熵值可以作为下一步针对阵元误差提出的补偿算法的性能好坏的判决准则。对于上述仿真条件下的系统，考虑实际成像中环境和背景杂波等其他干扰的影响，阵元误差的精确度应控制在 $\pm 1\%$ 以内。对于不同条件下的成像系统，在系统设计前，均可采用仿真成像的方法对阵元误差的影响进行分析，为实际的系统设计提供依据。

3.2 目标三维成像仿真结果

仿真条件为：天线发射中心频率为 220 GHz，带宽为 10 GHz 的宽带线性调频信号，为减小运算量，取阵列大小为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ ，阵元间距为 1 mm，阵列平面坐标为 $Z_0 = -1\text{ m}$ ，计算可得二维方位向分辨力为 3.4 mm，距离向分辨力为 1.5 cm，方位向不模糊距离为 0.68 m，距离向不模糊距离为 0.6 m。假设目标为 7 个点目标，坐标依次为 $(0,0,0)$ 、 $(0.02,0,0.015)$ 、 $(-0.02,0,0.03)$ 、 $(0,0.02,0.045)$ 、 $(0,-0.02,0.06)$ 、 $(0.02,-0.02,0.075)$ 和 $(-0.02,-0.02,0.09)$ ，散射强度均为 1。

采取第 1 节中近程目标太赫兹全息成像算法在补偿距离为 1 m 的条件下对目标进行成像的结果见图 9，可以发现，目标真实距离与补偿距离偏差较小时(0.03 m 以内)，由于球面波曲率偏差较小，不同平面目标成像结果聚焦较好，随着距离的增大，成像结果逐渐发生散焦和模糊，距离偏差越大，成像结果质量越差。图 9(h)为三维目标投影成像结果，可以发现，此时的投影成像结果无法反映目标的真实散射强度信息。

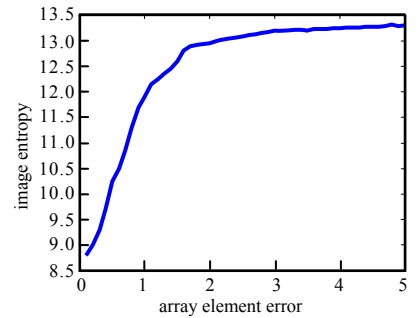


Fig.8 Change curve of imaging results entropy vs. array element error

图 8 成像结果熵值随阵元误差变化曲线

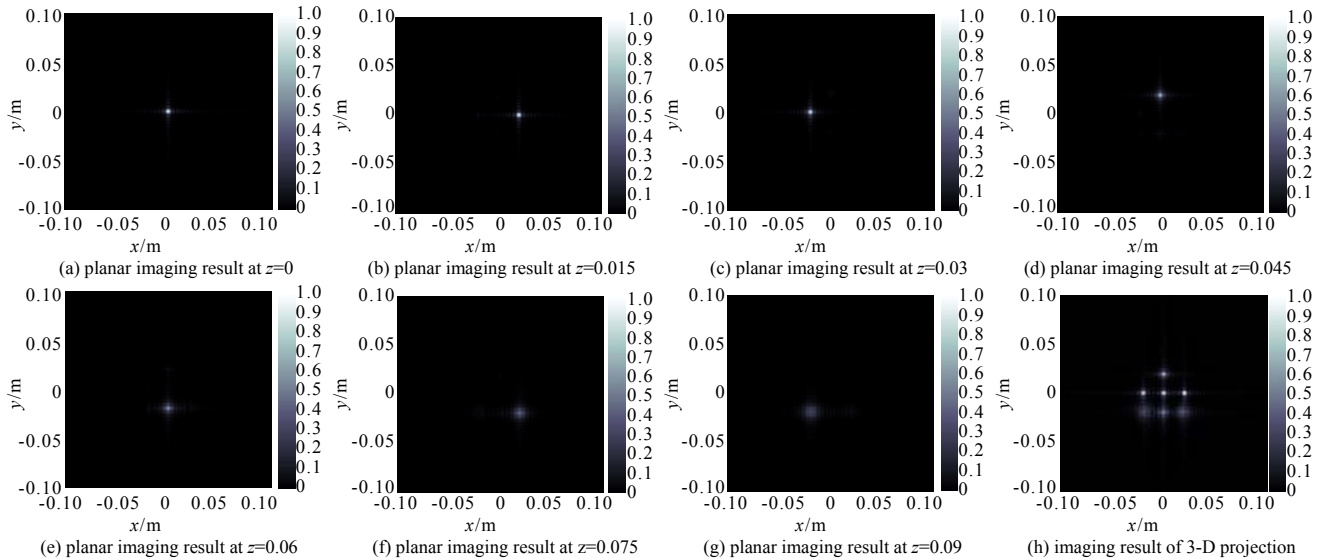


Fig.9 3-D imaging results by traditional algorithm

图 9 传统算法三维成像结果

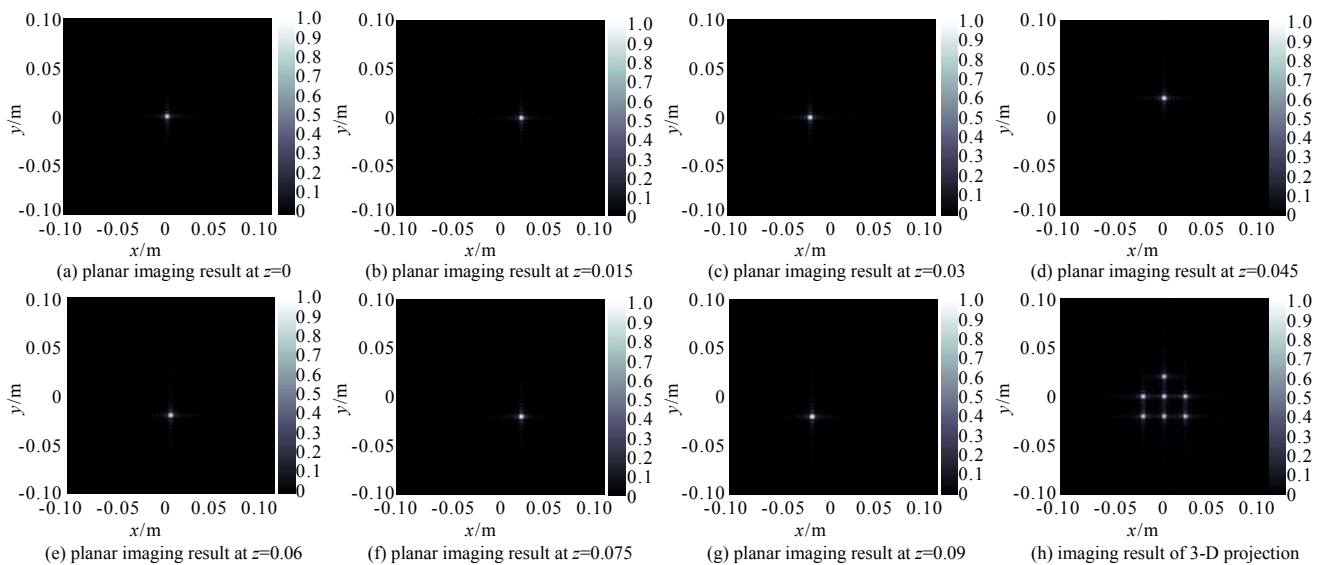


Fig.10 3-D imaging result by the improved algorithm

图 10 改进算法三维成像结果

采取本文提出的基于循环补偿与投影合成相结合的成像方法,针对不同成像平面的目标动态调整补偿距离,成像结果见图10。对比图9发现,此时目标的成像结果在任一距离平面都实现了完全聚焦,图10的三维投影成像结果反映了目标真实的散射强度信息,证明了本文提出的三维成像方法的有效性。

4 结论

本文采取驻定相位原理对近程目标太赫兹全息成像算法进行理论推导,得到了与传统球面波分解方法相同的成像结论。对比分析了不同阵元误差对成像结果的影响,选取图像熵作为成像结果聚焦效果的判决准则,为近程目标太赫兹全息成像系统设计和即将研究的补偿算法提供了理论依据。针对传统成像算法目标距离过近且距离向宽度较大时非补偿距离平面出现散焦和模糊的现象,提出了基于循环补偿与投影合成相结合的近程目标太赫兹三维全息成像算法,实现了对三维目标的全聚焦成像,反映了目标的真实散射信息。目前实验系统正在搭建之中,下一步将结合具体实验对本文的内容进行进一步的验证。

参考文献:

- [1] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,12(2):189-198. (LIANG Meiyang, DENG Chao,ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,12(2):189-198.)
- [2] SHEEN D M,MCKIN D L,HALL T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001(49):1581-1592.
- [3] SHEEN D M,MCKIN D L,LECHELT W M,et al. 2005 circularly polarized millimeter-wave imaging for personnel screening[C]// Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VIII. Bellingham,WA:SPIE. 2005,5789:117-126.
- [4] MCKIN D L,HALL T E,SHEEN D M. Holographic radar imaging privacy techniques utilizing dual-frequency implementation[J]. Proc. of SPIE, 2008,6943:69430P-69430P-10.
- [5] MCKIN D L,SHEEN D M,GRIFFIN J W,et al. Extremely high-frequency holographic radar imaging of personnel and mail[C]// Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2006:62011W-62011W-12.
- [6] GU S,LI C,GAO X,et al. Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beam-theory and experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013,51(4):2241-2249.
- [7] SUN Z,LI C,GU S,et al. Fast three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beams with enhanced phase-shift migration to improve computation efficiency[J]. Terahertz Science & Technology IEEE Transactions on, 2014,4(4):479-489.
- [8] 朱铮涛,黎绍发,陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. 光学精密工程, 2004,12(5):537-542. (ZHU Zhengtao,LI Shaofa,CHEN Huaping. Research on auto-focused function based on the image entropy[J]. Optics and Precision Engineering, 2004,12(5):537-542.)
- [9] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)

作者简介:



张 野(1992-),男,哈尔滨市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹全息成像、太赫兹阵列成像.email:1078670871@qq.com.

邓 彬(1981-),男,山东省济宁市人,讲师,博士,主要研究方向为合成孔径雷达成像、太赫兹雷达成像.

秦玉亮(1980-),男,山东省潍坊市人,副研究员,博士,主要研究方向为雷达信号处理、目标识别、量子雷达.

王宏强(1970-),男,陕西省宝鸡市人,研究员,博士,主要研究方向为太赫兹技术、目标识别、雷达信号处理.