

基于透镜成像原理的微波阵列快速成像技术

张继龙¹,李业振²,刘 勇²,王 栋³

(1. 苏州威陌电子信息科技有限公司,江苏苏州 215312; 2. 清华大学电子工程系,北京 100084;
3. 北京敏视达雷达有限公司,北京 100094)

摘 要: 微波成像技术在雷达、制导、引信、安防、医疗等领域有极大的应用需求,本文研究了基于透镜成像原理的微波阵列快速成像技术,通过分析透镜成像系统的成像特性以及成像算法,提出了一种适用于阵列成像的快速算法,该方法仅需要执行一次IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)运算即可获得目标的像. 所提出的新方法降低了算法复杂度,具有较快的运算速度. 最后进行了成像验证,采用微波暗室测试散射源近场数据,通过快速成像算法计算目标的像,实验结果证明新算法具有较好的成像效果.

关键词: 虚拟透镜; 微波成像; 雷达; 目标识别; 智能天线; 相控阵雷达; 合成孔径雷达; 毫米波成像
中图分类号: TN015; TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)05-1107-10
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20210495

A Novel Fast Imaging Technology of Microwave Array Based on Lens Imaging Principle

ZHANG Ji-long¹, LI Ye-zhen², LIU Yong², WANG Dong³

(1. Suzhou Weimo Electronic Information Technology Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215312, China;
2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Beijing Metstar Radar Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the microwave imaging problem which has great demand in the fields of radar, guidance, security and medical treatment, the microwave array fast imaging technology based on lens imaging principle is analyzed. Based on the analyzing of imaging characteristics and algorithm, a fast algorithm suitable for array imaging is proposed. In this method, only one-time IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) operation is needed to obtain the image of the target. The proposed new method greatly reduces the complexity of the algorithm and has a faster computing speed. Finally, imaging verification is carried out. The microwave anechoic chamber is used to measure the near field data of the scattering source, and the image of the target is calculated. The experimental results confirm the effectiveness of the new fast imaging algorithm.

Key words: virtual lens; microwave imaging; radar; target identification; smart antenna; phased-array radar; synthetic aperture radar; millimeter-wave imaging

1 引言

传统的微波成像方法主要是基于雷达技术,实孔径的相控阵波束扫描成像^[1,2]以及数字波束合成(Digital Beam Forming, DBF)^[3-5]扫描成像是两种典型方案. 该方法的主要缺点是硬件复杂、成像速度较慢,若要获得较高的成像精度,需要设置较窄的扫描波束,大角度扫描成像耗时较多,实时成像能力弱.

在雷达技术基础上进一步发展起来的合成孔径成

像^[6-11]、逆合成孔径成像^[12-18]等技术近年来得到大量应用. 但该成像技术体制要求目标与天线阵之间存在不同的相对运动,对非合作运动目标成像的运动补偿较困难,成像效果较差.

焦平面成像技术^[19-24]具有原理简单,实现较容易的特点,并且随着微波集成电路技术的发展,传感器阵列的性能得到大幅提升,而成本则大幅下降. 但由于微波、毫米波频段的电磁波绕射效应较明显,导致实际成像效果较差、分辨率较低.

从激光全息成像技术演变而来的微波全息成像技术^[25-30],是目前毫米波主动成像的首选技术之一,并且国内外已有相关产品在不同领域开始应用.但微波全息成像技术仅可用于近场成像,其相位补偿量与目标的空间谱相关,相位补偿误差较大时会导致成像严重失真,并且成像时需要依次进行FFT(Fast Fourier Transform)、IFFT两次运算,其运算量较大.

微波凝视关联成像技术^[31-36]是近年来发展起来的成像新技术,其核心思想是采用多个相互正交的辐射源对目标进行照射,利用辐射源之间的正交性简化电磁逆散射问题的求解.该方法的核心是需要设计和实现多个相互正交的辐射源模式,对于复杂、大孔径阵列,阵元间耦合较强,辐射源设计难度大,工程实现较困难.

2011年,文献[37]提出了一种基于虚拟透镜的微波阵列成像技术,即采用接收阵列模拟透镜成像机制,通过阵列单元的复加权,计算出预期成像平面上目标的像.文献[38]基于相似方法进行了电磁仿真和成像验证,文献[39]研究了成像条件、副像形成机理及解决办法,文献[40,41]对快速成像算法进行了初步研究.上述研究成果初步验证了该方法的技术可行性和成像效果.

本文深入研究了虚拟透镜成像算法的成像特性,证明了在大孔径阵列情况下,透镜成像系统所成的像与散射源之间存在近似线性关系,从而将复杂、病态、非线性的电磁逆散射问题转化为近似线性问题进行求解;提出了一种基于透镜成像原理的成像快速算法,该算法仅需要对阵列幅度、相位复加权信号进行一次二维IFFT运算即可得出目标的像;通过分析,证实目标的像与复加权阵列的远场方向图之间存在一定关系,并据此对像场坐标计算公式进行了修正;对阵列幅度加权的成像影响进行了仿真,对自动聚焦成像特性进行了分析和仿真;提出了一种中心视角方向可变的快速成像实现方法,可用于调整成像视角的中心方向以便观察特定方向的目标.本文采用Feko软件进行了电磁仿真,在微波暗室进行了测试,编写Matlab程序进行了成像验证,结果表明,所提出的新算法具有较好的成像效果.

2 基本原理

文献[37]提出的微波成像技术,其基本原理是采用天线阵接收目标的散射场,然后对接收到的单元信号移相后进行球面波二次散射,计算出在预定的成像平面上的合成场.图1给出了成像示意图.

由文献[37],可推导出传播相移和阵列单元相移计算公式:

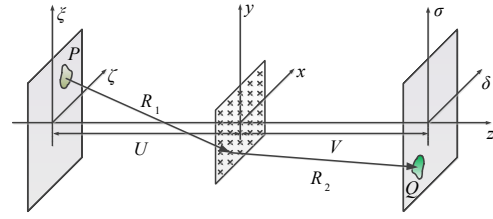


图1 成像原理示意图

$$\begin{cases} \varphi_1 = k \sqrt{U^2 + (x - \zeta)^2 + (y - \xi)^2} \\ \varphi_2 = k \sqrt{V^2 + (x - \delta)^2 + (y - \sigma)^2} \\ \varphi_L = k \sqrt{F^2 + R_L^2} - k \sqrt{F^2 + x^2 + y^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: φ_1 为散射源P到阵列单元的传播相移, φ_2 为阵列单元到像点Q的传播相移, φ_L 为阵列单元的透镜相移, k 为波数, U 为物距, V 为像距, F 为焦距, R_L 为阵列孔径半径, (ζ, ξ) 为散射源坐标, (x, y) 为阵列单元坐标, (δ, σ) 为像点坐标.

在傍轴条件下,将式(1)展开为泰勒级数并忽略高次项,可得出传播相移和阵列单元相移的简化近似公式:

$$\begin{cases} \varphi_1 \approx kU + \frac{k(x - \zeta)^2 + k(y - \xi)^2}{2U} \\ \varphi_2 \approx kV + \frac{k(x - \delta)^2 + k(y - \sigma)^2}{2V} \\ \varphi_L \approx k \sqrt{F^2 + R_L^2} - kF - \frac{kx^2 + ky^2}{2F} \end{cases} \quad (2)$$

实际上,在式(2)中,对聚焦成像有帮助的部分仅为与坐标有关的变化项:

$$\begin{cases} \varphi_1 \rightarrow \frac{k(x - \zeta)^2 + k(y - \xi)^2}{2U} \\ \varphi_2 \rightarrow \frac{k(x - \delta)^2 + k(y - \sigma)^2}{2V} \\ \varphi_L \rightarrow -\frac{kx^2 + ky^2}{2F} \end{cases} \quad (3)$$

3 成像系统特性分析

经过理论分析可以证明,在大孔径接收阵列情况下,透镜成像系统所成的像与目标之间存在近似线性关系,成像系统是一种线性映射系统.

如图1所示,假设源P的散射场为球面波,经过不同的传输路径 R_1 、 R_2 和透镜移相后到达像平面处的场强为:

$$E_q(\delta, \sigma) = E_p(\zeta, \xi) \iint \frac{1}{4\pi R_1^2} \cdot \frac{1}{4\pi R_2^2} \cdot e^{-j(\varphi_1 + \varphi_L + \varphi_2)} dx dy \quad (4)$$

其中: $R_1 = \sqrt{U^2 + (x - \zeta)^2 + (y - \xi)^2}$,

$R_2 = \sqrt{V^2 + (\delta - x)^2 + (\sigma - y)^2}$, $\mathbf{E}_p(\zeta, \xi)$ 为源散射场, $\mathbf{E}_q(\delta, \sigma)$ 为像场.

取:

$$\bar{R}_1 = \sqrt{U^2 + \zeta^2 + \xi^2}, \bar{R}_2 = \sqrt{V^2 + \delta^2 + \sigma^2},$$

当 $\bar{R}_1 \gg |R_1 - \bar{R}_1|, \bar{R}_2 \gg |R_2 - \bar{R}_2|$ 时, 式(4)可简化为:

$$\mathbf{E}_q(\delta, \sigma) \approx T \mathbf{E}_p(\zeta, \xi) \iint e^{-j(\varphi_1 + \varphi_2)} dx dy \quad (5)$$

其中, $T = 1/(16\pi^2 \bar{R}_1^2 \bar{R}_2^2)$.

对于规模为 $M \times N$ 的二维均匀离散阵列, 将式(2)代入式(5), 可推导出像平面处的场强为:

$$\mathbf{E}_q = T \mathbf{E}_p e^{-j\Psi_0 + j\Psi_1} \cdot \frac{e^{jM\omega_\delta} - 1}{e^{j\omega_\delta} - 1} \cdot \frac{e^{jN\omega_\sigma} - 1}{e^{j\omega_\sigma} - 1} \quad (6)$$

其中, $\Psi_0 = kU + kV - kF + k\sqrt{F^2 + R_L^2} + \frac{k(\zeta^2 + \xi^2)}{2U} + \frac{k(\delta^2 + \sigma^2)}{2V}$, $\Psi_1 = \frac{k(\delta - \delta_0)x_0}{V} + \frac{k(\sigma - \sigma_0)y_0}{V}$, $\delta_0 = -\frac{\zeta V}{U}$, $\sigma_0 = -\frac{\xi V}{U}$, $\omega_\delta = \frac{k(\delta - \delta_0)\Delta_x}{V}$, $\omega_\sigma = \frac{k(\sigma - \sigma_0)\Delta_y}{V}$. (x_0, y_0)

为阵列起始单元的坐标, Δ_x, Δ_y 分别为 x, y 方向的阵列单元间距.

定义均匀离散阵列的点源目标归一化像场为:

$$\mathcal{H}(\delta, \sigma) = \frac{e^{jM\omega_\delta} - 1}{e^{j\omega_\delta} - 1} \cdot \frac{e^{jN\omega_\sigma} - 1}{e^{j\omega_\sigma} - 1} \quad (7)$$

图2给出了单元间距为半波长, 阵列规模为 80×80 的归一化像场分布图, 离散阵列的归一化像场呈现出良好的聚焦特性.

根据式(7)零点分布情况, 可求出理想点源目标的中心像斑半径为:

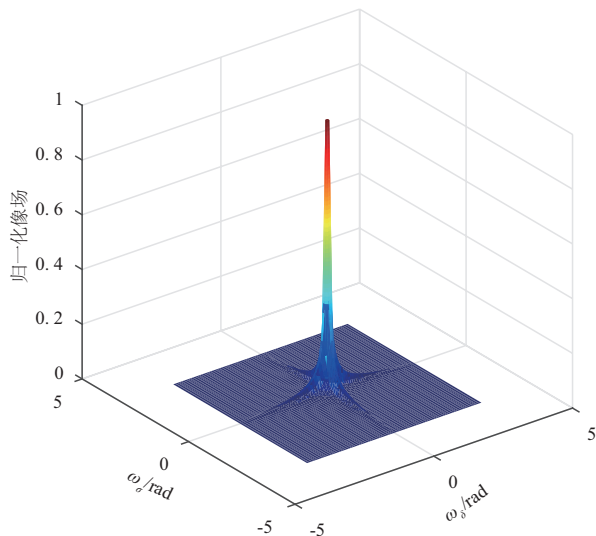


图2 离散阵列归一化像场分布

$$\begin{cases} r_\delta = \frac{\lambda V}{M\Delta_x} \\ r_\sigma = \frac{\lambda V}{N\Delta_y} \end{cases} \quad (8)$$

像场中心像斑相对天线阵列中心的扩散角为:

$$\begin{cases} \theta_\delta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{M\Delta_x} \right) \\ \theta_\sigma = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{N\Delta_y} \right) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知, 单元数量越多, 阵面孔径越大, 其归一化像场的中心像斑扩散角越小, 成像分辨率越高. 结合图2仿真结果, 对式(6)、式(9)进行深入分析可知, 当天线阵列足够大时, 归一化像场函数 $\mathcal{H}(\delta, \sigma)$ 表现出狄拉克函数(Dirac function)的采样特性, 实现了源场 $\mathbf{E}_p(\zeta, \xi)$ 到像场 $\mathbf{E}_q(\delta, \sigma)$ 的空间采样与坐标变换. 在这种情况下, 像场与散射源场之间存在如下近似关系:

$$\mathbf{E}_q(\delta, \sigma) \approx \mathbf{E}_p(\zeta, \xi) \cdot \gamma \cdot \text{Dirac} \left(\delta + \frac{V\zeta}{U}, \sigma + \frac{V\xi}{U} \right) \quad (10)$$

其中, γ 的绝对值为常量, 符号 Dirac 表示冲激函数.

根据冲激函数的性质可知, 此时像场强度与源场强度之间存在如下线性关系:

$$\left| \mathbf{E}_q \left(-\frac{U\delta}{V}, -\frac{U\sigma}{V} \right) \right| = |\gamma| \cdot \left| \mathbf{E}_p(\zeta, \xi) \right| \quad (11)$$

通过归一化像场函数 $\mathcal{H}(\delta, \sigma)$ 的空间采样, 该成像方法获得的像场与源场之间具有良好的线性映射关系.

当要求成像系统的角度分辨率小于 θ_0 时, 根据式(9)可知, 阵列单元数量要求为 $M > \frac{\lambda}{\Delta \cdot \tan(\theta_0/2)}$, 此时

可认为成像系统满足近似线性成像条件.

4 成像快速算法

对于离散阵列成像系统, 按照文献[37, 38]提出的成像算法, 需要完成阵面的两次嵌套循环、成像平面的两次嵌套循环共四次嵌套循环运算, 算法复杂度为 $O(N^2)$. 成像运算极为耗时, 难以实现快速实时成像, 且成像效果有待提高.

对于幅相加权阵列成像系统, 分析其实际运算过程, 成像时需要对阵列接收到的信号作如下处理:

$$\mathbf{E}_q(\delta, \sigma) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_{mn} A_{mn} e^{-j(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (12)$$

其中, \mathbf{E}_{mn} 为阵列单元接收到的场, A_{mn} 为阵列单元的幅度加权系数.

将式(3)代入式(12), 化简整理可得:

$$\mathbf{E}_q = \mathbf{e}^{-j\psi_0} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mathbf{B}_{mn} \mathbf{e}^{-j\psi_2} \mathbf{e}^{\frac{j(k\delta x_m + k\sigma y_n)}{V}} \quad (13)$$

其中,

$$\mathbf{B}_{mn} = \mathbf{E}_{mn} A_{mn} \mathbf{e}^{j\phi_{c_{mn}}} \quad (14)$$

$$\text{另有: } \psi_0 = \frac{k(\delta^2 + \sigma^2)}{2V}, \phi_{c_{mn}} = \frac{k(x_m^2 + y_n^2)}{2U}, \psi_2 = \frac{k(x_m^2 + y_n^2)}{2} \left(\frac{1}{U} + \frac{1}{V} - \frac{1}{F} \right).$$

当满足成像条件时: $\frac{1}{U} + \frac{1}{V} - \frac{1}{F} = 0$, 此时有 $\psi_2 = 0$, 令 $x_m = x_0 + m\Delta_x, y_n = y_0 + n\Delta_y$, 代入式(13), 化简整理得:

$$\mathbf{E}_q = \mathbf{e}^{j\psi_3} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{B}_{mn} \mathbf{e}^{j\omega_\delta x_m} \mathbf{e}^{j\omega_\sigma y_n} \quad (15)$$

$$\text{其中, } \psi_3 = \frac{-k(\delta^2 + \sigma^2)}{2V} + \frac{k\delta x_0}{V} + \frac{k\sigma y_0}{V}, \omega_\delta = \frac{k\delta\Delta_x}{V}, \omega_\sigma = \frac{k\sigma\Delta_y}{V}.$$

式(15)等号右边的系数满足 $|\mathbf{e}^{j\psi_3}| = 1$, 反应了像场的空间波动特性, 对成像基本无影响, 可忽略. 求和运算可用二维IFFT进行快速求解, 则像场计算公式为:

$$\mathbf{E}_q(\omega_\delta, \omega_\sigma) = \text{IFFT}_{MN} \left(\mathbf{E}_{mn} A_{mn} \mathbf{e}^{j\phi_{c_{mn}}} \right) \quad (16)$$

其中, IFFT_{MN} 表示 $M \times N$ 点二维IFFT运算. IFFT计算结果对应的 $\omega_\delta, \omega_\sigma$ 取值范围为: $\omega_\delta \in [0, 2\pi], \omega_\sigma \in [0, 2\pi]$, 进行fftshift运算后取值范围变换为: $\omega_\delta \in [-\pi, \pi], \omega_\sigma \in [-\pi, \pi]$, 此时的像才是符合实际分布的像, 并且与源场之间具有良好的线性映射关系.

$$\mathbf{E}_{q_image}(\omega_\delta, \omega_\sigma) = \text{fftshift} \left[\mathbf{E}_q(\omega_\delta, \omega_\sigma) \right] \quad (17)$$

对应的像点扫描角坐标变换公式为:

$$\begin{cases} \theta_\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_\delta}{k\Delta_x} \right) \\ \theta_\sigma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_\sigma}{k\Delta_y} \right) \end{cases} \quad (18)$$

对基于式(1)、式(3)的原始算法(文献[37])以及本文快速成像算法的成像效果进行仿真和对比, 图3给出了理想点源目标的一维线阵成像效果. 其中仿真条件为: 理想点源目标位于 $U=2$ m处, $f_0=10$ GHz, $V=2$ m, $F=1$ m, $\Delta = \lambda/2$, 阵列为一维线阵, 单元数量为100个. 扫描角定义为像点位置偏离阵面法线方向的角度.

仿真结果表明, 采用原始成像算法进行成像时, 用式(3)计算透镜相移和传播相移, 虽然能够改善聚焦效果提升成像质量, 但可能会导致“副像”的出现, 采取一定的技术措施后能够降低“副像”的影响, 但会增加系

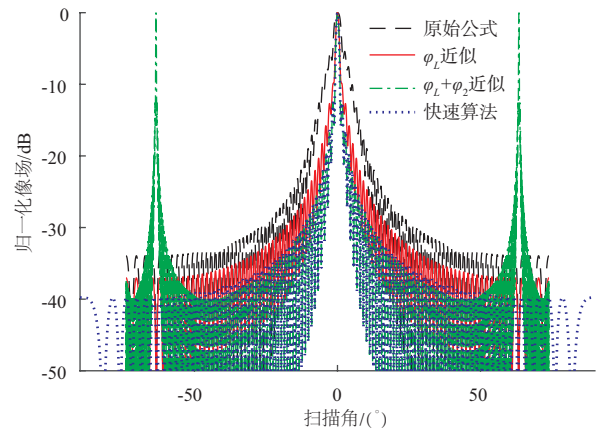


图3 不同方法成像效果对比

统的复杂性^[39]. 仿真结果表明, 快速成像算法既具有成像效果好的优点, 又避免了出现“副像”的缺陷. 快速算法是在相同的相位近似公式上推导而来, 其不出现“副像”的机理尚有待进一步深入研究.

对图4(a)所示模型目标进行了电磁仿真和成像验证, 目标位于阵列法线上, 距离阵列中心10 m, 阵列孔径为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 单元间距为 $\lambda/2$, 成像平面位于阵列前方10 m处, 照射平面波频率为10 GHz.

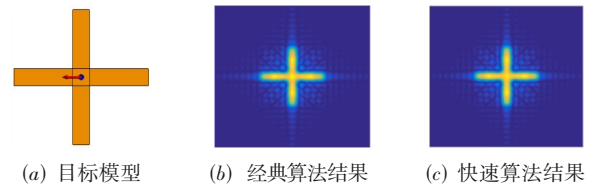


图4 模型及算法成像效果对比

图5给出了本文快速成像算法与文献[37]经典成像算法的运行时间对比结果. 仿真计算机CPU为Intel i5-9600KF, 开启5线程并行循环, 采用快速成像算法可以把计算速度提高约40倍以上, 并且随着像场剖分网

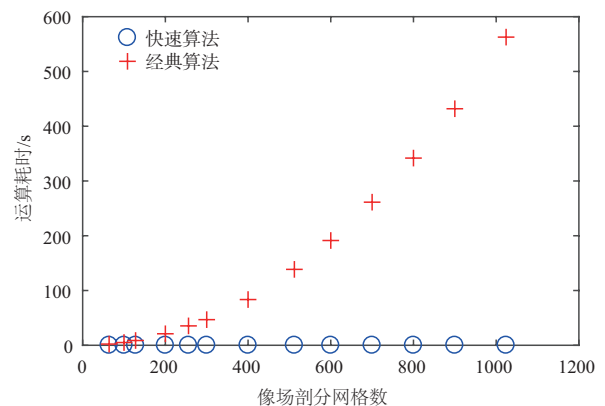


图5 算法运行时间对比

格数的增加,原始计算方法的耗时增加迅速,而快速算法的耗时增量则远小于原始计算方法的耗时增量.

5 快速算法的坐标修正

在偏离阵列法线方向较远处,推导式(13)的近似条件会被破坏,导致计算出的像点扫描角坐标与真实坐标之间出现较大偏差.

详细分析式(16),运算核 $E_{mn}A_{mn}e^{j\phi_{c_{mn}}}$ 为阵列信号的幅度、相位复加权运算,而二维 IFFT 运算,根据阵列天线理论,则其相当于求解此复加权阵列的远场方向图. 据此,可对像点扫描角坐标计算公式进行修正. 参考阵列天线远场方向图的推导原理及过程,可推得此复加权阵列的远场方向图计算公式为:

$$\left| E_q(\omega_\delta, \omega_\sigma) \right| = \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} B_{mn} e^{jm\omega_\delta} e^{jn\omega_\sigma} \right| \quad (19)$$

其中 $\omega_\delta = k\Delta_x \sin \theta_\delta, \omega_\sigma = k\Delta_y \sin \theta_\sigma$.

式(19)同样可用式(16)进行快速求解. 对应的像点扫描角坐标变换公式则可由式(19)的附加条件求出:

$$\begin{cases} \theta_\delta = \sin^{-1} \left(\frac{\omega_\delta}{k\Delta_x} \right) \\ \theta_\sigma = \sin^{-1} \left(\frac{\omega_\sigma}{k\Delta_y} \right) \end{cases} \quad (20)$$

由阵列天线理论可知,阵列天线方向图无栅瓣的条件为单元间距满足 $\Delta \leq \lambda/2$, 此时成像不会出现混叠现象. 当天线单元间距大于半波长时,对应的阵列天线方向图出现栅瓣,在成像上则表现为出现图像混叠现象.

通过分析可知,式(15)的 IFFT 像场计算结果与式(19)远场方向图计算结果是一致的,唯一的区别是像点扫描角坐标变换公式不同.

图 6 给出了 $f_0=35 \text{ GHz}, V=1 \text{ m}$, 焦距 $F=0.5 \text{ m}$, 天线单元间距为半波长, 阵列规模为 64×64 的成像仿真结果. 目标的物距为 $U=1 \text{ m}$, 改变其偏离法线法向的角度并进行成像仿真. 结果表明,在偏离阵列法线方向较远处,式(18)计算出的扫描角坐标与真实坐标之间出现较大偏差,而式(20)的坐标计算结果与真实坐标是一致的.

6 快速算法的成像验证

为了验证本文快速成像方法的有效性,在微波暗室进行了实验,采用喇叭馈源对目标进行照射,采用近场探头测量目标的散射场,采用本文快速算法编写 MATLAB 程序对测量数据进行成像处理. 成像目标是用导电胶带贴在泡沫材料上构造的“A”形物体,照射电

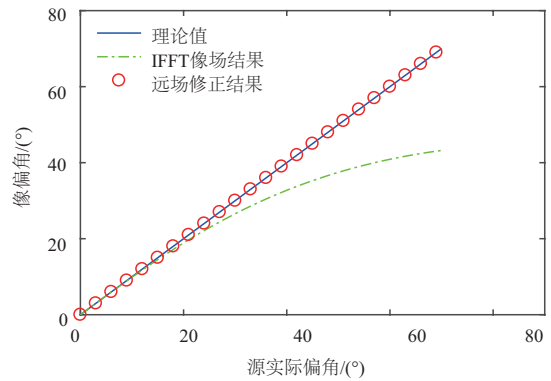


图 6 像场扫描角坐标仿真结果

磁波频率为 10 GHz. 测试现场见图 7, 馈源、目标、近场探头的相对关系见图 8.

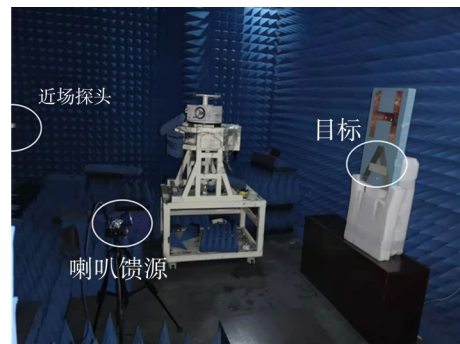


图 7 目标近场测试场景

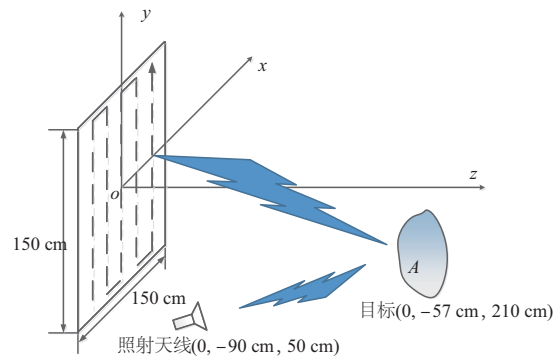


图 8 馈源、目标、近场探头相对关系

其中,用喇叭馈源对“A”字形物体进行照射,“A”形物体构成了成像系统的目标散射源,对应的物距 U_0 约为 2.1 m. 用近场探头对“A”字形物体的散射场进行采集,探头移动步进为 15 mm,近场探头的空间采样点阵即构成了成像系统的接收天线阵,等效阵列的规模为 101×101 . 假设成像平面位于近场探头的后方一定距离处. 在成像处理时,式(16)中的聚焦相位在成像处理程序中进行设置.

图 9 给出了测试获得的散射场幅度、相位分布图,从图中很难直接分辨出目标的形状.

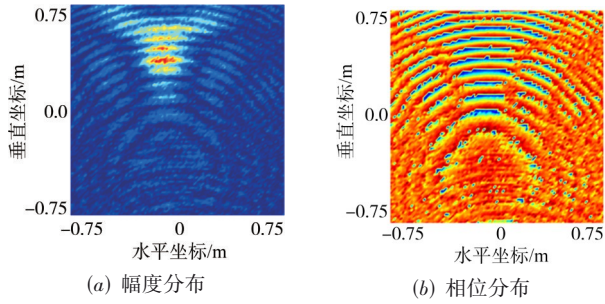


图9 目标散射场幅度、相位分布

图10给出了本文方法与其他几种成像方法的成像结果对比,在本文所述方法所成的像中能够清晰分辨出“A”字形目标,而原始算法及其他方法所成的像中均很难识别出“A”字形目标.实际成像结果充分证明了本文所述算法具有优异的成像效果.

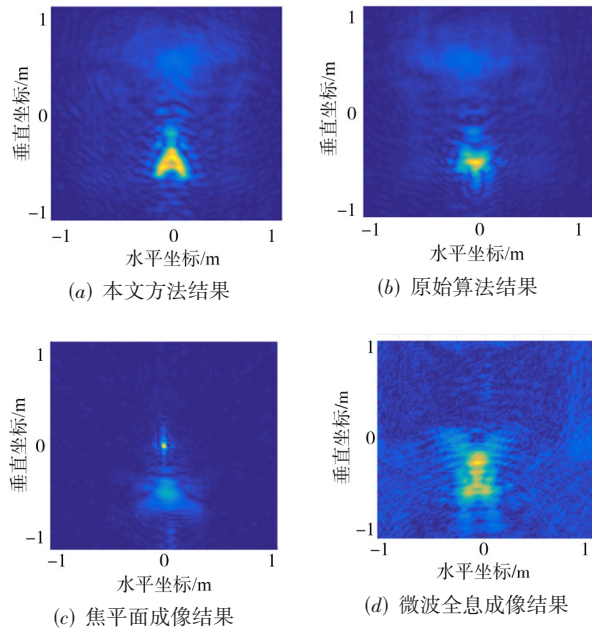


图10 不同成像方法结果对比

7 幅度加权对成像的影响

当阵列单元采用幅度加权时,定义成像系统的理想点源目标归一化像场为:

$$\mathcal{H}(\delta, \sigma) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{mn} e^{jm\omega_\delta} e^{jn\omega_\sigma} \quad (21)$$

其中, A_{mn} 为阵列单元的幅度加权系数. 式(21)同样可用二维快速傅里叶逆变换 (IFFT) 进行求解.

令阵列边缘的幅度加权值为 α , 一种余弦幅度加权公式为:

$$A_{mn} = \frac{1-\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi\sqrt{x_m^2+y_n^2}}{R_L}\right) - \frac{1-\alpha}{2} + 1 \quad (22)$$

其中 (x_m, y_n) 为阵列单元的坐标, R_L 为阵列的有效半径.

图11给出了单元间距为半波长, 100个单元的一维均匀线阵的归一化像场的仿真结果. 仿真结果表明, 采用幅度加权能够降低副瓣电平, 但会导致中心像斑变大, 图像可能出现模糊现象.

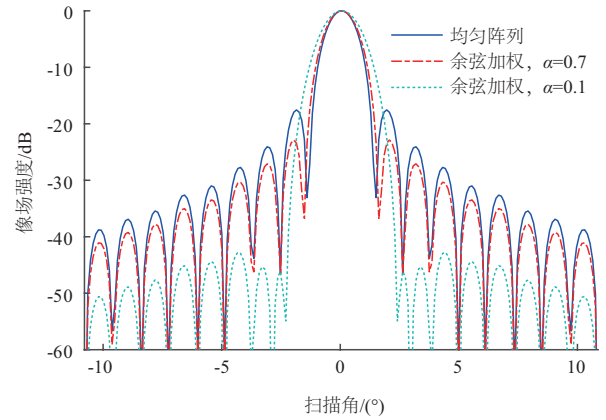


图11 不同幅度加权的一维成像仿真结果

利用前述成像实验的数据, 编写 MATLAB 程序对测量数据进行成像处理. 图12给出了不同幅度加权的成像结果.

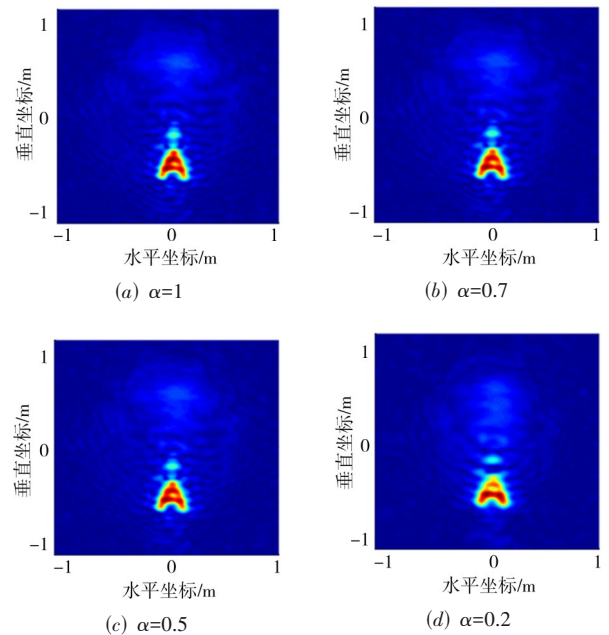


图12 不同幅度加权的成像结果

8 自动聚焦相位加权特性

式(14)中给出了聚焦相位的计算公式为:

$$\phi_{c_{mn}} = \frac{k(x_m^2 + y_n^2)}{2U} \quad (23)$$

在式(23)中,聚焦相位与焦距 F 、像距 V 是无关的,表明成像结果是与焦距无关的,在任意选择的成像平面处都能够实现自动聚焦成像。

利用前述成像实验的数据,图13给出了自动聚焦成像结果,实验结果证实,在物距参数较准确的情况下,成像算法能够在任意成像平面上形成清晰的像,具有良好的自动对焦成像性能。

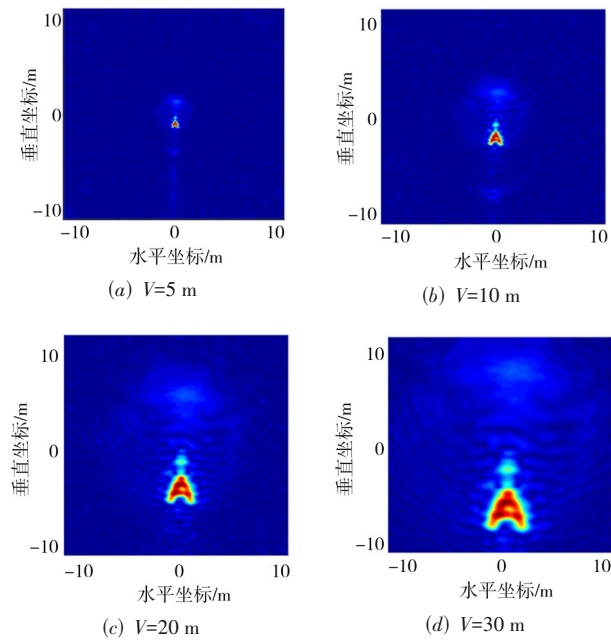


图13 自动对焦成像结果

9 中心视角可变的快速凝视成像

采用式(16)进行快速成像,像场的中心视角始终指向阵列的法线方向,并且中心视角方向的成像最清晰,偏离中心视角较远的区域,所成的像可能会出现失真。在大部分的实际应用需求中,希望能够调整中心视角的方向,以便对某一方向的目标进行准确观测。

为了调整中心视角方向,可借鉴相控阵雷达技术,对接收阵列进行扫描配相,通过叠加合适的扫描配相 ϕ_s ,即可实现成像系统中心视角方向的调整:

$$\mathbf{E}_q(\omega_\delta, \omega_\sigma) = \text{IFFT}_{MN} \left[\mathbf{E}_{mn} A_{mn} e^{j\phi_{c_{mn}}} e^{j\phi_{s_{mn}}} \right] \quad (24)$$

扫描配相 ϕ_s 的计算公式为:

$$\phi_s(m, n) = m\Delta_{\phi_x} + n\Delta_{\phi_y} \quad (25)$$

其中, $\Delta_{\phi_x} = k\Delta_x \sin \theta_\zeta$, $\Delta_{\phi_y} = k\Delta_y \sin \theta_\xi$, θ_ζ, θ_ξ 为中心视角指向散射源坐标 (ζ, ξ) 时, x, y 方向的扫描角坐标, 计算公式分别为:

$$\begin{cases} \theta_\zeta = -\tan^{-1}\left(\frac{\zeta}{U}\right) \\ \theta_\xi = -\tan^{-1}\left(\frac{\xi}{U}\right) \end{cases} \quad (26)$$

图14给出了改变视角中心方向的成像结果。其中,图14(a)中心视角指向阵列法线方向,图14(b)中心视角指向目标所在方向。

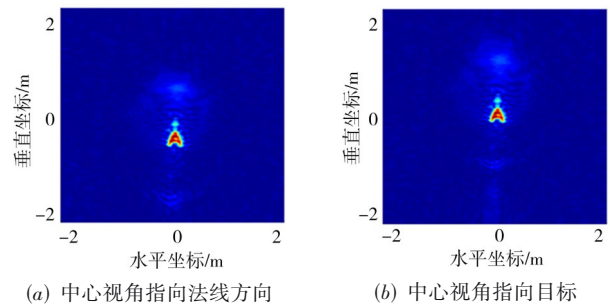


图14 改变视角中心方向的成像结果

10 结论

本文研究了基于透镜成像原理的微波阵列成像技术,提出了一种成像快速算法,实验结果表明,本文提出的快速成像算法成像效果较好,且极大的降低了算法复杂度,能够大幅提升成像速度,具有重大的工程应用潜力。

参考文献

- [1] KU B, SCHMALENBERG P, et al. A 77-81-GHz 16-element phased-array receiver with $\pm 50^\circ$ beam scanning for advanced automotive radars[J]. IEEE Trans on MTT, 2014, 62(11): 2823-2832.
- [2] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, THOMAS B, CHATTOPADHYAY G, SIEGEL P H. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 169-182.
- [3] YANG B, YU Z, LAN J, ZHANG R, ZHOU J, HONG W. Digital beamforming-based massive MIMO transceiver for 5G millimeter-wave communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(7): 3403-3418.
- [4] FULTON C, YEARY M, THOMPSON D, LAKE J, MITCHELL A. Digital phased arrays: challenges and op-

- portunities[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 487-503.
- [5] QIU J S, ZHANG Z M, et al. A novel weight generator in real-time processing architecture of DBF-SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, PP (99): 1-15.
- [6] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, SANSOSTI E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [7] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, KRIEGER G, HAJNSEK I, PAPATHANASSIOU K P. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.
- [8] YOUNIS M, QUEIROZ DE ALMEIDA F, VILLANO M, HUBER S, KRIEGER G, MOREIRA A. Digital beamforming for spaceborne reflector-based synthetic aperture radar, part 1: basic imaging modes[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021, 9(3): 8-25.
- [9] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1824-1828.
XING Meng-dao, BAO Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1824-1828. (in Chinese)
- [10] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 陈杰, 徐华平, 杨威, 于泽, 孙兵, 李景文. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240.
LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, CHEN Jie, XU Huaping, YANG Wei, YU Ze, SUN Bing, LI Jingwen. Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2016, 38(1): 229-240. (in Chinese)
- [11] 徐蕾, 王勇, 王全旺. 基于相位补偿的圆周 SAR 高分辨率三维成像方法[J]. 现代雷达, 2021, 43(3): 37-43.
XU Lei, WANG Yong, WANG Quanwang. High resolution three-dimensional imaging method for circular SAR based on phase compensation[J]. Modern Radar, 2021, 43(3): 37-43. (in Chinese)
- [12] RONG J, WANG Y, HAN T. Iterative optimization-based ISAR imaging with sparse aperture and its application in interferometric ISAR imaging[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(19): 8681-8693.
- [13] BERIZZI F, MESE E D, DIANI M, MARTORELLA M. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: modeling and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(12): 1880-1890.
- [14] PENG Z, MUÑOZ-FERRERAS J M, et al. A portable FMCW interferometry radar with programmable low-IF architecture for localization, ISAR imaging, and vital sign tracking[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(4): 1334-1344.
- [15] ZHANG S, LIU Y, LI X, HU D. Enhancing ISAR image efficiently via convolutional reweighted l_1 minimization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 4291-4304.
- [16] 保铮, 叶炜. ISAR 运动补偿聚焦方法的改进[J]. 电子学报, 1996, 24(9): 74-79.
BAO Zheng, YE Wei. Improvements of autofocusing techniques for ISAR motion compensation[J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(9): 74-79. (in Chinese)
- [17] 周万幸. ISAR 成像系统与技术发展综述[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 1-7.
ZHOU Wan-xing. Development and prospect of ISAR imaging system and imaging technique[J]. Modern Radar, 2012, 34(9): 1-7. (in Chinese)
- [18] 黎湘. 复杂运动目标雷达成像研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(2): 305-324.
LI Xiang. Progress in radar imaging for maneuvering targets[J]. Scientia Sinica Informationis, 2021, 51(2): 305-324. (in Chinese)
- [19] OJEFORS E, PFEIFFER U R, LISIAUSKAS A, ROSKOS H G. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(7): 1968-1976.
- [20] TRICHOPOULOS G C, MOSBACKER H L, BURDETTE D, SERTEL K. A broadband focal plane array camera for real-time THz imaging applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1733-1740.
- [21] PEPEL V D, WEBSTER P T, LOGAN J V, MORATH C P. Extraction of trap energy distribution in proton-irradiated focal plane arrays using a high-precision random telegraph noise detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [22] GÜNGÖR A, KAR O F, GÜVEN H E. A matrix-free reconstruction method for compressive focal plane array imaging[C]//2018 25th IEEE International Conference on Image Processing(ICIP). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2018: 1827-1831.
- [23] 陈其科, 李良超, 樊勇, 杨建宇, 张永鸿. W 波段 16 元完

- 全采样焦平面线性阵列天线设计[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(1): 23-27.
- CHEN Qi-Ke, FAN Yong, LI Liang-Chao, YANG Jian-Yu, ZHANG Yong-Hong. Design of W-band 16 elements full sampling focal plane linear array[J]. J INFRARED MILLI Waves, 2013, 32(1): 23-27. (in Chinese)
- [24] 宋崧, 王学田, 邓甲昊. 被动毫米波成像系统的发展状况及其关键技术[J]. 科技导报, 2011, 29(19): 74-79.
- SONG Song, WANG Xuetian, DENG Jiahao. Status and the key techniques of passive millimeter-wave imaging system[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(19): 74-79. (in Chinese)
- [25] AMINEH R K, RAVAN M, KHALATPOUR A, NIKOLOVA N K. Three-dimensional near-field microwave holography using reflected and transmitted signals[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(12): 4777-4789.
- [26] GAO J, QIN Y, DENG B, WANG H, LI X. A novel method for 3-D millimeter-wave holographic reconstruction based on frequency interferometry techniques[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 66(3): 1579-1596.
- [27] WU H, RAVAN M, AMINEH R K. Holographic near-field microwave imaging with antenna arrays in a cylindrical setup[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 69(1): 418-430.
- [28] BAUA S, AMINEH R K. Achieving range resolution in holographic imaging using single frequency microwave data[C]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2018: 1803-1804.
- [29] 江舸, 刘杰, 经文, 成彬彬, 周剑雄, 张健. 基于距离多普勒概念的全息雷达成像算法[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(3): 367-375.
- JIANG Ge, LIU Jie, JING Wen, CHENG Bin-Bin, ZHOU Jian-Xiong, ZHANG Jian. A range-doppler algorithm for holographic radar imaging[J]. J Infrared Millim Waves, 2017, 36(3): 367-375. (in Chinese)
- [30] 张琳琳, 汪海勇, 吴美武, 施红燕. 基于双频融合的微波全息成像算法研究[J]. 微波学报, 2018, 34(1): 55-59.
- ZHANG Lin-lin, WANG Hai-yong, WU Mei-wu, SHI Hong-yan. Microwave holographic imaging algorithm based on two-frequency[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(1): 55-59. (in Chinese)
- [31] GUO Y, WANG D, TIAN C. Research on sensing matrix characteristics in microwave staring correlated imaging based on compressed sensing[C]//2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST) Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2014: 195-200.
- [32] GUO Y, MA Y, WANG D. A novel microwave staring imaging method based on short-time integral stochastic radiation fields[C]//2013 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques(IST). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2013: 425-430.
- [33] ZHANG J, JIANG Z, YUAN B, GUO Y, WANG D. Improved performance of microwave staring correlated imaging by coherent integration[C]//2020 International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2021: 111-112.
- [34] YANG Y, YUAN B, LU G, GUO Y. Microwave staring correlated imaging for maneuvering target based on sparse bayesian learning[C]//2020 IEEE 5th International Conference on Signal and Image Processing(ICSIP). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2020: 401-406.
- [35] 刘波, 张健霖, 王东进. 基于空间分布熵的随机辐射源布局优化[J]. 现代雷达, 2019, 41(3): 21-26.
- LIU Bo, ZHANG Jianlin, WANG Dongjin. Distribution optimization of stochastic radiation source based on spatial distribution entropy[J]. Modern Radar, 2019, 41(3): 21-26. (in Chinese)
- [36] 陈建平, 朱文贵, 张刚. 一种微波关联成像的新方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(2): 196-198.
- CHEN Jian-ping, ZHU Wen-gui, ZHANG Gang. A new method of microwave relating imaging[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(2): 196-198. (in Chinese)
- [37] 张继龙, 赵国庆, 韩英臣. 微波透镜成像技术在目标识别中的应用研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(6): 639-642.
- ZHANG Ji-long, ZHAO Guo-qing, HAN Ying-chen. Development of microwave lens imaging technique in radar target identification[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011, 6(6): 639-642. (in Chinese)
- [38] 邓艳妮, 张麟兮. 一种基于虚拟数字透镜的微波成像方法[C]//2017年全国天线年会论文集(下册). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2017: 499-501.
- DENG Yanni, ZHANG Linxi. A microwave imaging method based on virtual digital lens[C]//Proceedings of 2017 National Antenna Annual Conference (Volume II).

- Xi'an, China: Xidian University Press, 2017: 499-501. (in Chinese)
- [39] 王栋, 张继龙, 许海波. 阵列数字成像技术及其应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(1): 51-55.
WANG Dong, ZHANG Ji-long, XU Hai-bo. Digital imaging technology of array antenna and its application[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(1): 51-55. (in Chinese)
- [40] 张艺恒, 张继龙, 宋雨花, 王栋. 微波阵列快速成像方法: CN112612024A[P]. 2021-04-06.
- [41] ZHANG J, WANG D. A novel fast imaging method for microwave array[C]//2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2021: 1-3.

作者简介



张继龙 男,1976年生于江苏泗阳. 现为苏州威陌电子信息科技有限公司高级工程师. 主要研究方向为微波技术与雷达信号处理.
E-mail: jilongzhang@163.com



李业振 男,1990年生于山东日照. 现为清华大学电子工程系微波与天线研究所工程师. 主要研究方向为天线理论及设计.
E-mail: yezhli1990@tsinghua.edu.cn



刘勇 男,1986年生于天津宁河. 现为清华大学电子工程系微波与天线研究所工程师. 主要研究方向为微波技术与雷达信号处理.
E-mail: liuyong565656@163.com



王栋 男,1976年生于内蒙古乌兰察布市. 现为北京敏视达雷达有限公司工程师. 主要研究方向为雷达系统与电磁兼容研究.
E-mail: w1976d@163.com