

文章编号: 2095-4980(2020)06-1035-05

基于截断 sinc 插值的毫米波全息成像算法优化

邵文浩, 朱 莉*, 刘 婕, 邹丽蓉

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 针对毫米波系统在二维横断面成像时, 空间频率间隔上非均匀性影响成像精确度问题, 提出基于截断正弦基数(sinc)函数的插值优化算法。算法取 sinc 函数为卷积核, 对数据进行插值, 相较细胞元插值法, 得到的散射插值幅值更接近实际值, 成像精确度更高。在此基础上, 由于 sinc 插值需要无穷项求和, 所需计算的数据量巨大, 因此对插值求和项进行截断处理, 对不同截断点数所成横断面像作比较, 进一步优化成像质量。仿真结果验证了算法的可行性和精确性。

关键词: 毫米波; 全息成像; 二维横断面像; sinc 插值

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019263

Optimization of millimeter wave holographic imaging algorithm based on truncated sinc interpolation

SHAO Wenhao, ZHU Li*, LIU Jie, ZOU Lirong

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that the non-uniformity of spatial frequency affects the accuracy in the process of two-dimensional cross-section imaging, an interpolation optimization algorithm based on truncated sine cardinal(sinc) function is proposed. The algorithm takes the sinc function as the convolution kernel to interpolate the data. Compared with the cell element interpolation method, the obtained scattering interpolation amplitude is closer to the actual value, and the imaging accuracy is higher. On this basis, sinc interpolation requires infinite summation and the amount of data to be calculated is huge, therefore, the interpolation summation should be truncated. The cross-sectional images formed by different truncation points are compared and processed by windowing to further optimize image quality. The simulation results verify the feasibility and accuracy of the optimization algorithm.

Keywords: millimeter wave; holographic imaging; two-dimensional cross-sectional image; sinc interpolation

毫米波被广泛应用在成像系统中。一方面, 毫米波波长较短, 和低频段的微波相比, 分辨力更高; 另一方面, 毫米波兼具红外和可见光的成像特性, 有一定强度的穿透力, 能够做到对隐匿物体的探测, 且能够进行全时段的工作^[1]。因此毫米波全息成像技术有着很广阔的研究前景, 特别是在近场成像方面, 例如生物医学上对患者的检查、安检上对隐匿违禁物品的检测、军事上在沙尘暴或雾霾等极端天气情况下对近场目标的探测等^[2-3]。针对毫米波近场成像系统的使用环境, 需要寻求一种精确度高、速度快的成像算法。基于波数域的对回波信号进行处理的成像算法, 相较于基于空间域的算法, 能够较好地抑制旁瓣拖影和像点发散的情况, 提升成像质量, 因此成为目前研究的重点^[4-5]。本文首先介绍了基于波数域的毫米波二维横断面成像原理, 然后针对算法实现中的关键步骤, 即匹配滤波后非均匀数据的插值问题, 提出了基于 sinc 函数的插值算法。使用该算法得到的散射插值幅度最接近实际值, 因此理论上具有极高的成像精确度。由于 sinc 插值需要无穷项求和, 计算数据量巨大, 因此在具体实现中, 需要对插值求和项进行截断处理, 分别采用 4 点、8 点、16 点截断对数据进行插值处理, 进一步优化成像质量。最后对优化算法进行仿真分析, 验证了该算法的可行性和精确性。

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-10-20

作者简介: 邵文浩(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为近场毫米波全息成像算法。email:1457735383@qq.com

*通信作者: 朱 莉 email:hjfr317-zl@vip.sina.com

1 近场毫米波二维横断面成像原理

被测目标的散射强弱等效到某一平面上形成二维平面像，横断面像反映的是被测目标沿着纵向和横向水平方向所形成平面上的散射分布。在坐标系中，横断面像是坐标平面 xoz 内的像，因此成像系统实现横断面像需要具备沿 x 和 z 两个方向的分辨能力^[6-7]。

成像模型见图 1，多个天线阵元构成一维扫描阵列，阵列长度为 L_x ，任意时刻只有一个天线单元处于工作状态，该天线单元工作时，发射步进频率信号，起始频率为 f_0 ，频率步进为 Δf ，共有 M 个频率点，最大频率为 f_{max} 。依靠直线阵列实现方位像成像，依靠步进频率信号实现距离像成像，二者结合可得二维横断面像^[8]。

设目标在以 $(x=0, z=0)$ 点为中心的平面区域内具有电场分布 $E_1(x, z; x=0, z=0)$ ，区域平面重合于坐标面 xoz ，在以 $(x=0, z=R_0)$ 点为中心的区域具有电场分布 $E_2(x, z; x=0, z=R_0)$ ，区域平面重合于坐标面 xoz 。目标区域电场分布 $E_1(x, z; x=0, z=0)$ 等价于待求的目标像函数^[9]。

采用步进频信号一维横向采样的测量方式，得到的散射数据可以认为是不同波数 k 时，电场分布 $E_2(x, z; x=0, z=R_0)$ 在 $z=R_0$ 的值^[10]，写成 $E(x, k; x=0, z=R_0)$ 。

首先对 $E(x, k; x=0, z=R_0)$ 沿变量 x 作傅里叶逆变换，将回波数据变换到波数域：

$$F(k_x, k; x=0, z=R_0) = \int E_2(x, k; x=0, z=R_0) e^{jk_x x} dx \tag{1}$$

构建波数域相位补偿因子，即线性色散空间滤波器，其数学表达式为：

$$H(k_x, k_z) = \text{rect} \left(\frac{|k_x|}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right) e^{-jk_z R_0} \tag{2}$$

利用相位补偿因子对测量平面波谱进行匹配滤波，得到目标平面波谱：

$$F(k_x, k; x=0, z=0) = F(k_x, k; x=0, z=R_0) H(k_x, k_z) \tag{3}$$

上式得到的目标平面波谱 $F(k_x, k; x=0, z=0)$ 以非正交的波数 k 和空间频率 k_x 为自变量，需将波数 k 代换为 k_z 。波数 k 与空间频率 k_x, k_z 满足如下关系：

$$k_x^2 + k_z^2 = k^2 \tag{4}$$

经代换，得到以空间频率 k_x 和 k_z 为自变量的目标平面波谱 $F(k_x, k_z; x=0, z=0)$ 。代换后，在 $k_x - k$ 坐标下均匀分布的回波数据变换至 $k_x - k_z$ 坐标下是非均匀的，因而代换过程必须借助相应的插值算法实现。利用 sinc 插值，从非均匀分布的 $k_x - k$ 域回波数据得到均匀分布的 $k_x - k_z$ 域数据。

对插值完的 $F(k_x, k_z; x=0, z=0)$ 进行二维傅里叶变换，得到目标区域电场分布 $E_1(x, z; x=0, z=0)$ ，即：

$$E_1(x, z; x=0, z=0) = \frac{1}{4\pi^2} \iint F(k_x, k_z; x=0, z=0) e^{-j(k_x x + k_z z)} dk_x dk_z \tag{5}$$

依据上述原理分析，波数域相位补偿横断面成像算法的具体步骤如下^[11]：1) 对回波采样数据作方位维傅里叶逆变换，将其变换至波数域；2) 根据天线阵列方位构建波数域相位补偿因子；3) 利用相位补偿因子对回波信号作匹配滤波；4) 对滤波后的数据进行 sinc 插值，实现数据在 $k_x - k_z$ 域的统一分布；5) 对 $k_x - k_z$ 域数据作二维快速傅里叶变换，得到横断面像。

基于波数域相位补偿的横断面全息成像算法流程如图 2 所示。

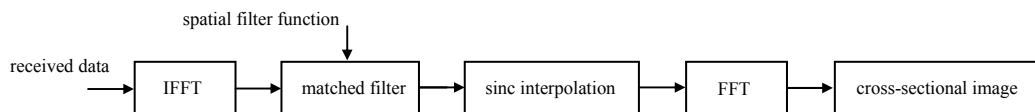


Fig.2 Flow of cross-sectional imaging
图 2 二维横断面成像流程图

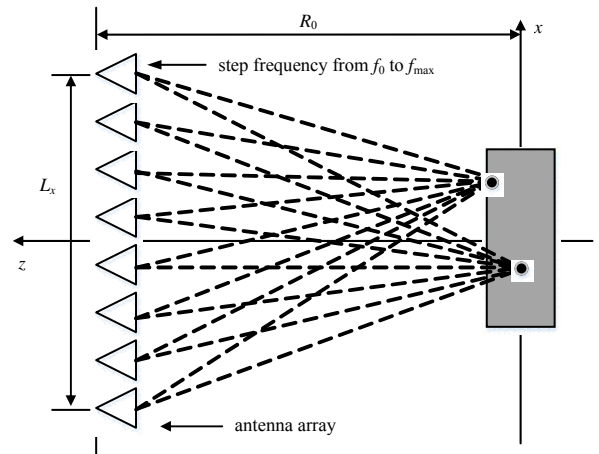


Fig.1 Model of cross-sectional imaging system
图 1 横断面成像系统模型

2 sinc 插值算法原理

波谱矩阵 $F(k_x, k; x=0, z=0)$ 数据的分布情况见图 3。中间呈倒梯形分布的“●”数据代表成像的有效数据，倒梯形之外的数据为无效数据(隐失波)。有效数据代表的平面波可以传播能量，参与目标图像的形成，在 k_x-k_z 坐标下均匀分布。根据色散关系式 $k_x^2+k_z^2=k^2$ ，将 k_x-k 坐标下数据变换到 k_x-k_z 坐标下，数据的分布情况见图 4。经色散关系变换后，在 k_x-k 坐标下均匀分布的数据在 k_x-k_z 坐标下是非均匀的，呈扇形分布， k_z 的两端，即最大值与最小值端为双曲线，且随着 k_z 的增大，数据的分布变得稠密^[12]。sinc 插值的目的是，使在 k_x-k_z 坐标下呈扇形分布(分布在弧线上)的数据均匀分布，分布情况见图 5。对于任一 k_x ，在不同波数 k 下，代换后的波数分量 k_z 分布在不同弧线与 k_{x1} 直线交点上，用“▲”表示，分布情况见图 6。

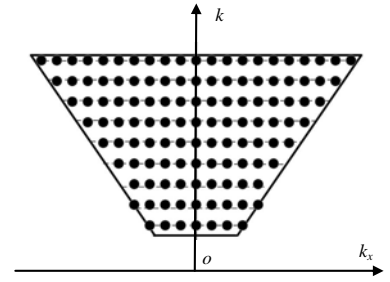


Fig.3 Spatial frequency distribution of data in k_x-k
图 3 k_x-k 坐标下数据空间频率分布

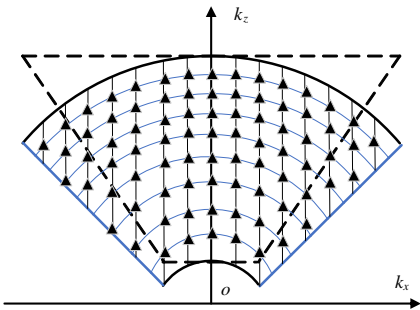


Fig.4 Spatial frequency distribution of non-uniform data in k_x-k_z
图 4 k_x-k_z 坐标下非均匀数据空间频率分布

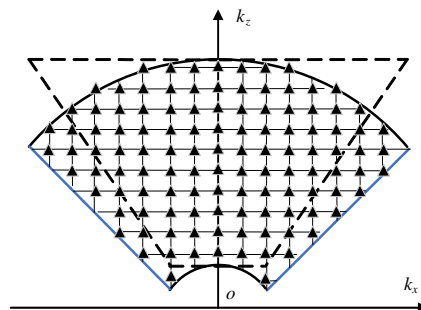


Fig.5 Spatial frequency distribution of uniform data in k_x-k_z
图 5 k_x-k_z 坐标下均匀数据空间频率分布

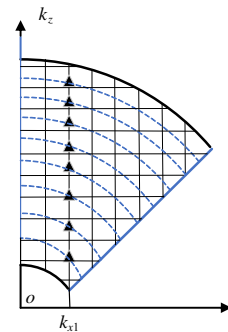


Fig.6 Spatial frequency distribution of data under a single k_x
图 6 单个 k_x 下数据空间频率分布

插值的目的是要根据非均匀分布的波谱数据 $F(k_x, k_z)$ 插值得出均匀分布的 $F'(k_x, k_z)$ 。sinc 函数插值算法是一种内插法，通常情况下函数本身表达式是未知的，利用已知位置的函数值通过内插的方法，得到任意位置处函数值^[13]。

根据 Nyquist 采样定理，对于带限信号 $f(t)$ ，若采样频率 f_s 大于其带宽的两倍，则可用一系列离散时刻的采样值恢复原始信号，即：

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{f_s}\right) \frac{\sin\left[\pi f_s\left(t - \frac{n}{f_s}\right)\right]}{\pi f_s\left(t - \frac{n}{f_s}\right)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{f_s}\right) \text{sinc}\left[\pi f_s\left(t - \frac{n}{f_s}\right)\right] \quad (6)$$

插值需要无穷项求和，具体实现时，在有限的计算资源下，需要对插值求和项进行截断处理。

对于 P 点的 sinc 插值^[14]，具体插值公式为：

$$F'(k_x, k_z) = F'(k_x, k_j + \Delta k_{k_z}) = \sum_{n=-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}-1} F(k_x, k_j + ndk) l_n \quad (7)$$

$$k_j + \Delta k_{k_z} = \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \quad (8)$$

$$l_n = \text{sinc}\left[\pi(-n + \Delta k_{k_z})\right], n = -\frac{P}{2}, \dots, \frac{P}{2}-1 \quad (9)$$

式中： P 为截断点数； $F'(k_x, k_z)$ 为待求的在 k_x-k_z 坐标下均匀分布的波谱数据， $F'(k_x, k_j + \Delta k_{k_z})$ 为均匀波谱数据 $F(k_x, k_z)$ 根据色散公式代换所对应的非均匀波谱数据， Δk_{k_z} 为 k_x-k 坐标下原始均匀数据 $F(k_x, k)$ 与非均匀数据 $F'(k_x, k_j)$ 的差值； k_j 为宽带信号对应的第 j 个波数； $F(k_x, k_j + ndk)$ 为均匀波谱数据 $F(k_x, k_z)$ 在截断区间内的 P 个等间隔的取值， dk 为空间频率间隔。

匹配滤波后，将得到的均匀分布的 $F(k_x, k)$ 利用色散关系式代换，得到不等间隔的空间频率分量 k_x 和 k_z 。利用空间频率分量 k_z 上的最大值和最小值以及数据个数，得到等间隔的 k_x 和 k_z ，插值的目的是要求得均匀的 $F'(k_x, k_z)$ 。

k_x 和 k_z 利用色散关系式 $k_x^2 + k_z^2 = k^2$ 代换可得到在 $k_x - k$ 坐标下非均匀分布的 $F'(k_x, k)$ 。 $F'(k_x, k)$ 等价于待求的 $F'(k_x, k_z)$ 。为了得到 $F'(k_x, k_z)$ 的数据, 对均匀的 $F(k_x, k)$ 用 sinc 函数作为卷积核进行卷积操作, 得到任意所求对应点处的 $F'(k_x, k)$, 等价于求得 $F'(k_x, k_z)$ 。

插值的流程图如图 7 所示。由于 $k_j(k_x, k_z)$, $\Delta k_{k_z}(k_x, k_z)$ 和 l_n 都随着 k_x, k_z 的变化而变化, 因此对于每一个待求的 $F'(k_x, k_z)$, 都必须重新计算以上 3 个参数。

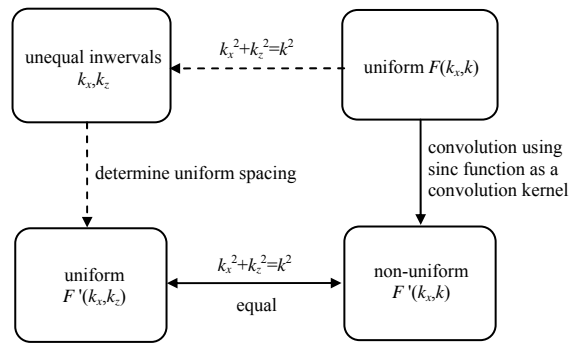


Fig.7 Flow of sinc interpolation
图 7 sinc 插值流程图

3 二维横断面成像仿真分析

使用 Matlab 进行二维横断面像的仿真实验分析^[15-16]。实验条件为: 起始工作频率 $f_0 = 30$ GHz, 步进频率 $\Delta f = 10$ MHz, 频率步进个数 $M = 1024$, 扫描点步进长度 $\Delta d = 5$ mm, 天线阵列扫描长度 $L_x = 2$ m, 扫描点与目标中心距离 $R_0 = 2$ m。分别在 xoz 坐标平面内以 $(0,0)$ 为圆心, 0.2 m 为半径的圆上放置 12 个散射强度为 1 的目标小球, 构成圆环图案。

对数据仅进行匹配滤波, 不进行插值, 所成的二维横断面像如图 8 所示。由图 8 可知, 基于波数域的二维横断面成像算法能够显示出目标像素点, 但是不够清晰, 这是由于各个目标点处的像素点波瓣展宽引起的, 各个点的像之间又发生混叠, 造成成像质量的下降, 无法有效识别各个目标点^[7]。因此引入 sinc 插值算法。对匹配滤波后的数据进行 4 点截断 sinc 插值, 经仿真后所成的二维横断面像如图 9 所示。从图 9 可知, 经过 sinc 插值算法处理后, 与图 8 相比, 各个像素点发散的情况得到一定抑制, 成像质量显著提升, 验证了 sinc 插值算法的可行性。

在此基础上, 为了进一步提高成像质量, 对匹配滤波数据分别进行 8 点、16 点截断 sinc 插值处理, 得到的二维横断面像见图 10 和图 11。经更高截断点数的 sinc 插值处理后, 图 10 和图 11 的各个像点进一步收敛, 能量更加集中, 成像质量有所提升, 随着计算量的增大, 运算时间也将增加。

表 1 以 $(0.1, 0.173, 2)$ 处的散射点为例, 比较使用插值算法前后及不同截断点数插值的仿真结果的精确度。表 1 中的数据显示了使用插值算法前后像点在 x, z 方向的误差, sinc 插值算法能有效降低成像的畸变, 降低旁瓣发散的影响, 提高成像质量。此外, 采用不同截断点数的 sinc 插值成像的像点位置无明显差异(差值小于 Matlab 仿真结果图片分辨力而无法测得), 可知更高截断点数的插值对成像畸变的改善甚小。此外, 4 点、8 点、16 点截断插值算法的计算量是成倍提升的, 使得插值更加耗时, 但更高截断点数的精确度提升却很小。在有限的计算资源下, 8 点截断 sinc 插值比较适合数据处理, 且能满足成像精确度要求。

表 1 插值算法前后 $(0.1, 0.173, 2)$ 处散射点的成像精确度比较

Table1 Comparison of imaging accuracy of scattering points $(0.1, 0.173, 2)$ before and after interpolation algorithm

	imaging position/m	x direction error/%	z direction error/%
direct phase compensation	$(0.0940, 0.1540)$	6.00	11.08
4-point truncated sinc interpolation	$(0.0990, 0.1686)$	1.00	2.66
8-point truncated sinc interpolation	$(0.0990, 0.1686)$	1.00	2.66
16-point truncated sinc interpolation	$(0.0990, 0.1686)$	1.00	2.66

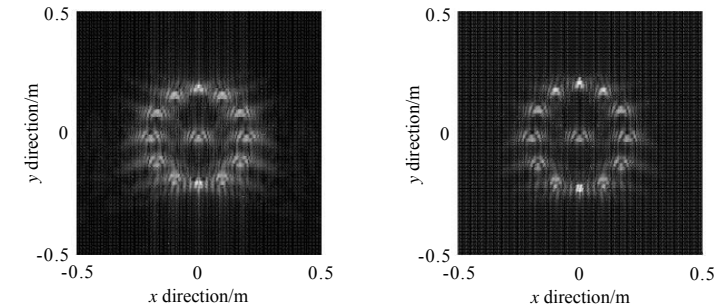


Fig.8 Two-dimensional cross-sectional image using wavenumber domain phase compensation

图 8 波数域相位补偿二维横断面像

Fig.9 Two-dimensional cross-sectional image with 4-point truncated sinc interpolation

图 9 4 点截断 sinc 插值二维横断面像

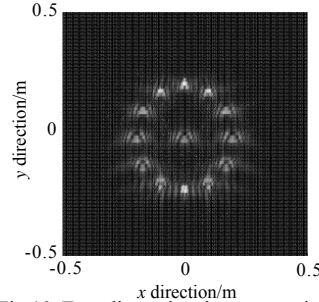


Fig.10 Two-dimensional cross-sectional image with 8-point truncated sinc interpolation

图 10 8 点截断 sinc 插值二维横断面像

Fig.11 Two-dimensional cross-sectional image with 16-point truncated sinc interpolation

图 11 16 点截断 sinc 插值二维横断面像

4 结论

本文首先介绍了近场毫米波二维横断面成像原理，对成像基础算法加以说明，并进行仿真实验。针对基础算法仿真结果中存在的图像畸变、像点发散、混叠等问题，提出了截断 sinc 插值算法对匹配滤波数据进行处理，该算法的核心思想是在插值过程中采用截断 sinc 函数作为卷积核，以降低数据空间频率上的非均匀性对成像结果的影响。仿真结果验证了二维横断面成像基础算法的可行性，以及截断 sinc 插值算法在抑制图像畸变、像点发散，提升成像质量方面的有效性。后续的研究将在毫米波三维成像算法以及数据处理方向进行。

参考文献：

- [1] MOHAMMADIAN Nafiseh, FURXHI Orges, SHORT Robert, et al. SAR millimeter wave imaging systems[C]// Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXII. Baltimore, Maryland, USA: SPIE, 2019: 109940A-1-13.
- [2] LI X, LI S Y, ZHAO G Q, et al. Multi-polarized millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[C]// IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Beijing: IEEE, 2016: 892-894.
- [3] LEE D J, KIM S, SONG D R, et al. Photonic-assisted on-wafer millimeter-wave imaging system[C]// 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Copenhagen, Denmark: [s.n.], 2016: 1-2.
- [4] 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: Electronic Industry Press, 2005.)
- [5] APPLEBY Roger, ROBERTSON Duncan A, WIKNER David. Millimeter wave imaging: a historical review[C]// SPIE Defense + Security. Anaheim, California, USA: SPIE, 2017: 1018902-1-13.
- [6] QIAO L, WANG Y, ZHAO Z, et al. Exact reconstruction for near-field three-dimensional planar millimeter-wave holographic imaging[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, 36(12): 1221-1236.
- [7] 王子野, 乔灵博, 王迎新. 高分辨力亚毫米波全息成像系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(6): 833-837. (WANG Ziyue, QIAO Lingbo, WANG Yingxin. Wide-band three-dimensional submillimeter-wave holographic imaging system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(6): 833-837.)
- [8] 张铁男. 毫米波三维全息成像图像重构算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016. (ZHANG Tienan. Research on image reconstruction algorithm of millimeter wave 3D holographic image[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2016.)
- [9] 史耀亮. 毫米波雷达近程平面扫描散射成像算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015. (SHI Yaoliang. Research on short-range planar scanning scattering imaging algorithm for millimeter wave radar[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2015.)
- [10] 张麟兮, 李南京, 胡楚锋, 等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 145-220. (ZHANG Lingxi, LI Nanjing, HU Chufeng, et al. Radar target scattering characteristics test and imaging diagnosis[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2009: 145-220.)
- [11] KAN Y Z, ZHU Y F, FU Q. A direct integral imaging method for near-field 3-D imaging[C]// IEEE Progress in Electromagnetic Research Symposium. Shanghai, China: IEEE, 2016.
- [12] 徐枫, 朱莉, 李小辉, 等. 基于 Stolt 算法的毫米波全息二维成像优化[J]. 电光与控制, 2019, 26(2): 62-65. (XU Feng, ZHU Li, LI Xiaohui, et al. Two-dimensional imaging optimization of millimeter wave holography based on Stolt algorithm[J]. Electro-Optic and Control, 2019, 26(2): 62-65.)
- [13] 张贵平, 贾鑫, 尹灿斌, 等. SAR 成像处理中插值算法的比较研究[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(8): 9-11. (ZHANG Guiping, JIA Xin, YIN Canbin, et al. Comparative study of interpolation algorithms in SAR imaging processing[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2008, 27(8): 9-11.)
- [14] MAO N H, ZHANG X M. Novel technique for planar near-field scattering measurements[C]// IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Hong Kong, China: IEEE, 1997: 897-900.
- [15] 陈丽. 合成孔径声呐成像算法研究及 MATLAB 仿真[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016. (CHEN Li. Synthetic aperture sonar imaging algorithm research and MATLAB simulation[D]. Hangzhou, China: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2016.)
- [16] 朱莉, 李兴国, 王本庆. 近程目标毫米波全息成像算法及仿真[J]. 电光与控制, 2011, 18(6): 37-40. (ZHU Li, LI Xingguo, WANG Benqing. MMW holographic imaging algorithm and simulation for short-distance target[J]. Electro-Optic and Control, 2011, 18(6): 37-40.)