

近程毫米波合成孔径辐射计成像算法

王本庆, 李兴国

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏南京 210094)

摘 要: 针对近程毫米波合成孔径辐射计成像存在非线性相位项和像差等因素影响而使图像模糊和分辨率降低的问题, 在分析合成孔径成像和衍射成像的相似性的基础上, 把衍射成像算法中的分数阶傅立叶变换和拉冬2魏格纳变换引入近程成像, 通过在时频平面的相关和坐标旋转减小非线性相位项的影响, 改善成像质量. 同时提出了基于互强度传播方程的近程成像算法, 通过两次傅立叶变换来消除成像模糊问题, 同样提高成像质量.

关键词: 毫米波辐射计; 合成孔径; 近程成像; 互强度传播方程; 分数阶 Fourier 变换; Radon2Wigner 变换

中图分类号: TN911.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1352-04

Near Sensing Millimeter Wave Synthetic Aperture Radiometer Imaging Algorithms

WANG Benqing, LI Xingguo

(Institute of Millimeter Wave and Optical Near Sensing Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: Since the effect of nonlinear phase factor and aberration which result in image blurring and resolution reducing in Millimeter wave synthetic aperture radiometer (MMW2SAR) near sensing imaging, the fractional Fourier transform (FRFT) and Radon2Wigner transform (RWT) using in diffraction imaging are introduced based on analyses the comparability between MMW2SAR passive imaging and the optical diffraction patterns. Through correlation and coordinate rotation on the time2frequency plane, the introduced algorithms reduce the impact of nonlinear phase and improve image quality. And mutual coherence function propagation equation (MCFPE) is also raised into MMW2SAR near sensing imaging, which can eliminate the fuzzy problem of imaging through twice Fourier transform and improve the imaging quality.

Key words: millimeter wave radiometer; aperture synthesis; near imaging; MCFPE; FRFT; RWT

1 引言

辐射计是一种接收物体自身微弱辐射能量的高灵敏度接收机. 辐射计被动成像技术已得到广泛应用, 而毫米波具有从环境中区分金属目标的能力, 且有一定的穿透能力, 因此发展毫米波成像技术具有很重要的意义. 毫米波合成孔径辐射计(MMW2SAR)成像不需要扫描, 成像速度快, 灵敏度高; 并且其成像分辨率和天线个数的平方成正比, 因此可以节约大量硬件资源, 降低成本, 具有较高的实用价值. 国内外已对毫米波合成孔径辐射计被动遥感成像技术作了大量研究^[1~3], 但这种遥感辐射计并不适合对近程目标成像. 近程毫米波合成孔径成像技术用来对几米至几十米范围内的目标进行探测和识别, 具有很高的实用价值, 如医疗上可以通过成像检测患者的病灶部位, 安检部门可以探测隐藏的枪支等危险目标, 此外还可以在不良气候条件下进行飞机着陆导航或者自动着陆等. 近几年, 近程毫米波合成孔径

技术有了较大发展, 日本 NEC 公司已经有成像样机的报道^[4].

基于傅立叶(Fourier)变换近程成像算法的不足, 本文首先采用分数阶 Fourier 变换(FRFT)和拉冬2魏格纳(Radon2Wigner)变换(RWT)来改善成像质量, 然后以互强度传播方程(MCFPE)为基础提出了一种简单有效的新近程成像算法, 同样可以提高成像水平, 最后对各算法的性能进行了仿真和分析讨论.

2 基于 Fourier 变换的成像算法

需要说明的是, 辐射计被动合成孔径是通过电磁波衍射和干涉效应成像, 而雷达主动合成孔径成像是通过宽带信号压缩和多普勒频移获成像, 因此被动合成孔径与主动合成孔径的成像原理完全不同.

近程毫米波合成孔径辐射计成像技术的基本原理是准单色扩展源的部分相干理论. 考虑一平面稳定准单色扩展辐射源 S, 其辐射场的归一化强度(亮温)分布

为 $I(x, y)$, 定义为:

$$I(x, y) = \frac{U(x, y) U^*(x, y)}{k_s U(x, y) U^*(x, y) dx dy} \quad (1)$$

式中 U 为点源辐射的复振幅, U^* 表示其共轭. 在距辐射源 R 处有一对接收天线, 设坐标分别为 $(0, 0)$ 和 (d_x, d_y) , 根据 van Cittert-Zernike 定理^[5], 两天线的归一化互相关函数 L 可表示为:

$$L = \int_S I(x, y) \exp(i2\pi \mathbf{R} \cdot \mathbf{r}) dS \quad (2)$$

式中 $\mathbf{R}$ 为同一点源到两天线的波程差, k 为波数. 在直角坐标系下, 对波程差取二阶 Taylor 展开, 可得:

$$L(M, T) = e^{iU} \int_S I(x, y) \exp[-i2\pi(xM + yT)] dx dy \quad (3)$$

其中 $M = d_x/R$, $T = d_y/R$, $U = \pi R^2(\lambda + T^2)$. 对式(3)作 Fourier 逆变换就可得到场景辐射强度像:

$$I(x, y) = \text{IFT}[e^{-iU} L(M, T)] \quad (4)$$

上式即为近程毫米波合成孔径辐射计成像的 Fourier 变换算法, 其特点就是存在二次相位补偿因子 e^{-iU} , 原因是近程条件下, 球面波前造成的, 这也是不同于遥感成像的关键之处. 二次相位项会使点源的响应变宽, 幅值变低, 因此图像变模糊, 如图 1 所示. 二次相位补偿因子去除了二次相位项的影响, 压缩了像点, 但却不能去除像差的影响. 图 2 所示为没有相位补偿的情况下近程和远程所成的二维像.

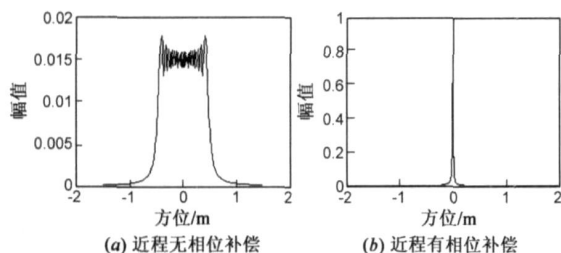


图1 点源的合成孔径成一维像

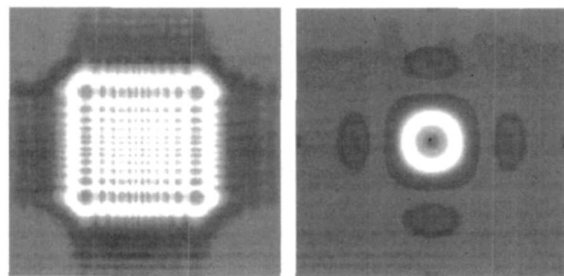


图2 点源的合成孔径图像

3 合成孔径成像特性分析

由光学原理可知, 当光在传播过程中受孔径限制时, 就可以明显地观测到衍射现象. 定义复振幅的 Fourier 变换为空间频率谱, 则衍射孔径就是工作在空间

频率域的矩形滤波器, 衍射过程就是空间滤波过程. 衍射有远场夫琅禾费 (Fraunhofer) 衍射和近场菲涅耳 (Fresnel) 衍射, 点光源的矩形孔径衍射如图 3 所示.

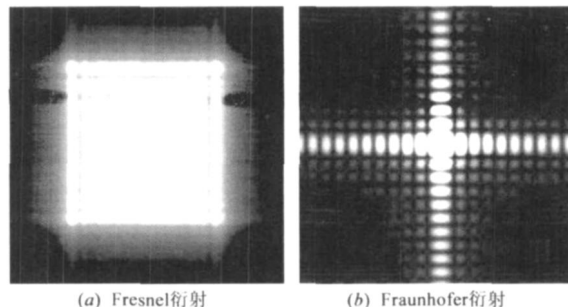


图3 点光源的矩形孔径光学衍射图像

另一方面, 式(2)中归一化互相关函数添加相位补偿后就是辐射源空间频率域的二维自相关函数, 有:

$$R(M, T) = e^{-iU} L(M, T) = k U(M, T) U^*(M - M, T - T) dM dT \quad (5)$$

自相关函数的 Fourier 变换就是空域功率谱, 即亮温分布. 由图 1 和图 3 可以看出, 衍射成像和合成孔径成像具有很强的相似性, 远程合成孔径成像对应 Fraunhofer 衍射, 近程成像对应 Fresnel 衍射.

近程条件下, 由于近程成像不能较好地满足傍轴条件以及孔径有限等因素的影响, 实际所成的像与理想像之间存在像差, 这里主要为场曲和畸变. 场曲像差使所成像的清晰像面不是一个平面而近似为一个抛物面, 因此所成平面像的边缘像点出现扩散模糊现象, 如图 4 所示, 这使得系统抗噪能力和成像质量下降, 因此有必要研究新的成像算法.

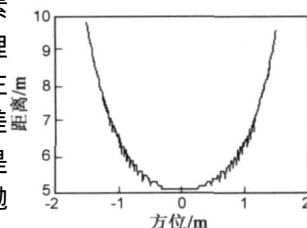


图4 像差曲线

4 近程成像算法

参照 Fresnel 衍射成像的算法^[6], 如 Fresnel 积分法、角谱法和分数阶 Fourier 变换法等来设计近程成像算法.

4.1 基于分数阶 Fourier 变换的算法

对图 4 所示的像差, 可以采用二次函数拟合, 即采用椭圆逼近抛物面, 有:

$$L(M, T) = e^{iU} k_s I(x, y) \exp[-i2\pi(xM + yT - x^2/a - y^2/b)] dx dy \quad (6)$$

其中 a 和 b 为拟合系数. 鉴于球面波照射物体的自由空间 Fresnel 衍射的光场分布与分数 Fourier 变换的等效性, 上式可采用 FRFT 求解, 二维 FRFT 定义为^[7]:

$$\text{FRFT}[I(x, y)] = c k_s I(x, y) \exp[i(\frac{x^2 + y^2}{2 \tan A} - \frac{xy}{\sin A})]$$

$$\# \exp \left[i \left(\frac{y^2 + T^2}{2 \tan B} - \frac{yT}{\sin B} \right) \right] dx dy \quad (7)$$

其中 $C = \sqrt{1 - i \cot A} \sqrt{1 - i \cot B} / 2P$. 式(6)并不满足上式的定义, 可令 $a = 2 \tan A$, $b = 2 \tan B$, 对式(6)进行变量代换后可得:

$$L(M, T) = C^{-1} e^{-iU} \text{FRFT}[I(x, y)] \quad (8)$$

式中 $U = PM(R - \sin 2A) + PT^2(R - \sin 2B)$. 可得基于 FRFT 的近程成像公式为:

$$I(x, y) = \text{FRFT}[C e^{iU} L(M, T)] \quad (9)$$

4.1.2 基于 Radon2Wigner 变换的算法

信号的 FRFT 模的平方和相应角度上的 RWT 等价, 即辐射场的空间频率分布函数 $U(M, T)$ 的 RWT 即为空域功率谱^[8]. RWT 定义为:

$$\text{RWT}[U(M, T)] = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x \cos A - M \sin A, y \cos B + T \sin B) dM dT \quad (10)$$

其中

$$\text{WT}(x, y, M, T) = k U(M \cos M/2, T + T/2)$$

$$U^*(M \cos M/2, T - T/2) \exp[i2P(Mx + Ty)] dM dT \quad (11)$$

为信号的魏格纳2维利(Wigner2Ville)分布(WVD). 上式说明函数 $U(M, T)$ 瞬时相关函数的二维 Fourier 逆变换作旋转后的边缘分布. 所以成像公式为:

$$I(x, y) = \text{RWT}[U(M, T)] \quad (12)$$

这种算法相关过程是在计算信号的 WVD 中完成的, 坐标旋转是在 Radon 变换中完成. 但实际上辐射场的 $U(M, T)$ 并不知道, 由式(5)可知, 也可以采用相关函数计算, 则基于 RWT 的近程成像公式为:

$$I^2(x, y) = \text{RWT}[R(M, T)] \quad (13)$$

可见 RWT 得到的是辐射场亮温分布的平方.

4.1.3 基于互强度传播方程的算法

由于近程合成孔径成像是在 Fresnel 区, 所以存在非线性相位的影响, 但通过互强度的传播公式^[5]把像平面变换到 Fraunhofer 区, 这样就可以忽略非线性相位的影响. 设在接收天线平面 A 的 Fraunhofer 区有一虚接收平面, 相距为 r , 则虚平面上的归一化互相关函数可用两平面间的 MCFPE 表示为^[5]:

$$L(Q_1, Q_2) = k_A k_A L(P_1, P_2) \exp(i2PJr) dP_1 dP_2 \quad (14)$$

注意式(14)是两个独立的二维积分, 积分区间是整个天线平面 A. 把上式展开有:

$$L = \text{FT}[L] \quad (15)$$

由于是在 Fraunhofer 区积分, 所以上式没有相位补偿项. 另一方面, 虚平面上的互相关函数和源的亮温分布仍然满足是距离 $(R + r)$ 处的 Fourier 变换, 即有:

$$I(x, y) = \text{IFT}[L] \quad (16)$$

同理上式忽略了相位补偿. 综合式(15)与式(16), 可得基于 MCFPE 的近程成像公式为:

$$I(x, y) = \text{IFT}\{\text{FT}[L]\} \quad (17)$$

这个算法再次证明了衍射成像和合成孔径成像具有相似性, 这种算法不需要相位补偿, 它和计算 Fresnel 衍射的角谱方法是相似的.

5 仿真和对比

图 5 所示为一维情况下, 辐射强度相同两个点源的所成的像, 条件是中心波长 $\lambda_0 = 8157\text{nm}$, 成像距离 $R = 5\text{m}$, 天线合成孔径 $D = 2\text{m}$, 天线最小间距 5mm , 两个像点的坐标分别是 0 和 2m 处. 在未加二次相位补偿时, 响应如图 5(a) 所示, 有相位补偿时, 响应如图 5(b) 所示. 可以看出即使有相位补偿, 边缘像点仍然较宽, 而且幅值低, 容易被噪声淹没.

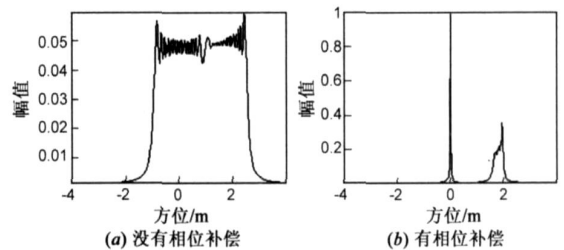


图5 基于 Fourier 变换的合成孔径近程成像

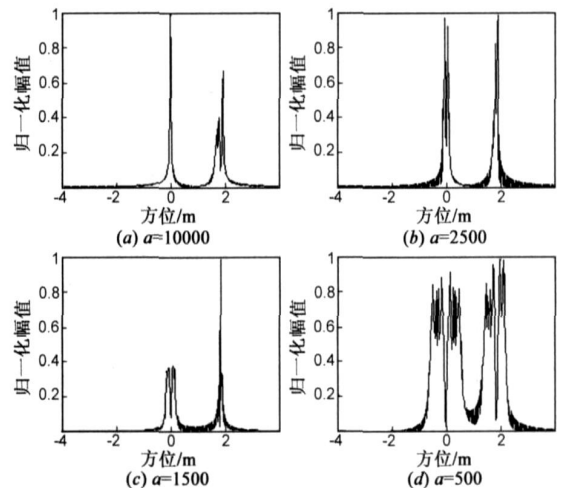


图6 基于 FRFT 算法近程成像

图 6 为同条件下, 分数阶 Fourier 变换(FRFT)算法的仿真, Radon2Wigner 变换(RWT)算法仿真如图 7 所示, 互强度传播方程(MCFPE)算法仿真见图 8, 为了对比其中图中都采用归一化幅值表示.

从上面的各图中可以看出, 各种算法中的参数 a 、 A 和 r 都有一个最佳值, 分别对应于 $a = 2500$ 、 $A = 7^\circ$ 和 $r = 100$. 由图 7(d) 所示的 WVD 可以看出, 不同位置的像点会在 WVD 上表现不同斜率的脊线, 对于 FRFT 算法和 RWT 算法都要有一个小的坐标旋转角度, 对于不同位置的像点要综合考虑, 一般取中间值, 所以在对边缘

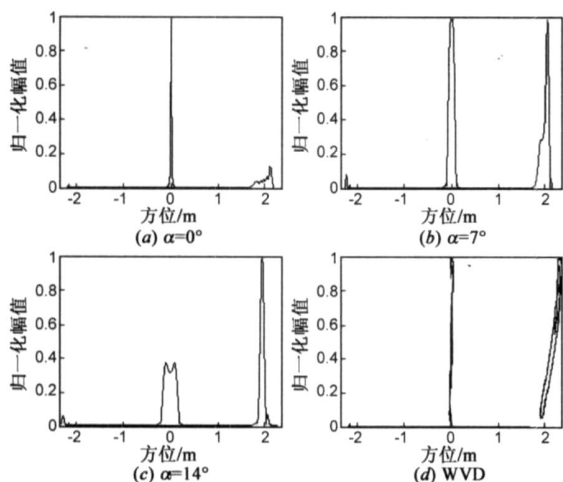


图7 基于RWT算法近程成像

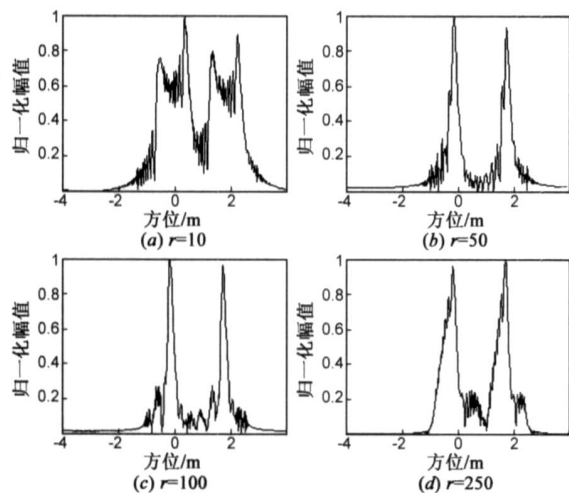


图8 基于MCFPE算法近程成像

像点压缩的同时,也加宽了中心像点,而且图像越大,情况越严重。而MCFPE算法经过两次Fourier变换则不存在这现象,图像越大,空域数据就越多,其效果也就越好。三种算法中,FRFT计算可借助于快速傅立叶变换(FFT),所以速度最快,但RWT算法效果最好,抗噪声能力也最好,因为它相当于使用四阶积累量成像,而四阶积累量对白噪声具有不敏性,这对于微弱信号的检测是相当有利的,但是当不同目标间辐射强度差别较大时,RWT算法就有可能忽略弱目标。另外,FRFT算法和RWT算法的空间分辨率和天线的最大合成孔径成正比,而MCFPE算法经过了两次Fourier变换,其空间分辨率和天线的最小间距成正比,但由于在两个平面上都进行了加窗和采样,所以分辨率较低和旁瓣较高。因此需要综合考虑实际成像的环境以确定相应的算法。

6 结论

本文提出了采用FRFT、RWT和MCFPE算法以解决近程毫米波合成孔径成像的像差等非线性问题,提高

了成像质量。近程成像算法的特点在于把空频分布旋转适当的角度后然后计算边缘分布得到清晰像,以此去除非线性相位项的影响。三种算法性能上各有所长,需要综合考虑实际环境以确定算法或者采用混合算法。

参考文献:

- [1] 章勇. 被动毫米波成像技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学研究生院, 1999.
ZHANG Yong. The research of passive Millimeter wave imaging techniques [D]. Nanjing: Graduated School, Nanjing University of Science and Technology, 1999. (in Chinese)
- [2] Neil A. Salmon, John Beale, Andy Beard, et al. An all electronic passive millimetre wave imaging system [J]. SPIE Proc, 2005, 5789: 11- 15.
- [3] Lettington A, Dunn D, Alexander N, et al. Design and development of a high performance passive millimetre wave imager for aeronautical applications [J]. SPIE Proc, 2004, 5410: 210- 218
- [4] Hitoshi Nohmi, Seiki Ohnishi, Osamu Kujibu. Passive millimetre wave camera with interferometric processing [J]. SPIE Proc, 2007, 6548: 65480C, 1- 8.
- [5] Bom M, Wolf E. Principles of optical [M]. London: Cambridge University Press, 1999.
- [6] Mas D, Perez J, Cernandez C. Fast numerical calculation of Fresnel patterns in convergent systems [J]. Optical Communications, 2003, 227(426): 245- 258.
- [7] 陶然, 齐林, 王越. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
TAO Ran, QI Lin, WANG Yue. Theory and applications of the fractional Fourier transform [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] Alieva T, Barbe A. Fractional Fourier and Radon-Wigner transforms of periodic signals [J]. Signal Processing, 1998, 69(2): 183- 189.

作者简介:



王本庆 男, 1981 年生于河北东光, 南京理工大学信息与通信工程专业博士研究生。研究方向为毫米波被动成像技术理论与应用。
E-mail: wangbenq@tom.com

李兴国 男, 1940 年生于云南嵩明。南京理工大学教授, 博士生导师。中国电子学会微波分会副主任委员, 毫米波亚毫米波专业委员会主任委员, 中国兵工学会委员, 中国宇航学会委员。主要从事毫米波精确探测及成像系统的研究。E-mail: lxxg2004@163.com