

基于轨道角动量的电磁涡旋 SAR 成像新方法

方 越¹, 王鹏波^{1,2}, 陈 杰^{1,2}

(1. 北京航空航天大学, 电子信息工程学院, 北京 100191;
 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

摘要:为研究电磁涡旋波在合成孔径雷达(SAR)领域的应用潜力,验证电磁涡旋 SAR 成像的可行性,将电磁涡旋与合成孔径雷达模型结合,通过使用单一模式的轨道角动量,用合成孔径原理实现方位聚焦。给出了基于电磁涡旋的 SAR 几何模型和回波信号模型,并提出了适用于电磁涡旋 SAR 的改进 chirp-scaling(CS)成像算法。通过点目标仿真分析,验证了所提成像算法的有效性。该方法可为 SAR 系统新体制设计及雷达的研究提供参考。

关键词:轨道角动量; 电磁涡旋; chirp-scaling 算法; 合成孔径雷达

中图分类号: TN 911.7 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.002

A Novel Imaging Algorithm for Electromagnetic Vortex SAR Based on Orbital Angular Momentum

FANG Yue¹, WANG Pengbo^{1,2}, CHEN Jie^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
 2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, Hubei, China)

Abstract: The imaging potential of orbital angular momentum (OAM) based electromagnetic (EM) vortex in synthetic aperture radar (SAR) field is studied in this paper. EM vortex and SAR model are innovatively combined, and focus in azimuth is realized based on synthetic aperture principle by use of single-mode OMA. In this paper, a novel imaging algorithm of EM vortex SAR based on the chirp-scaling algorithm is proposed, in which the radar is moving and OAM mode is fixed as a constant. The SAR geometry model and echo signal model of EM vortex are deduced, and a modified CS imaging algorithm is proposed. Simulations of point-like targets validate the effectiveness of the proposed imaging algorithm, which paves the way for the design of new mechanism SAR system and the research of the radar.

Keywords: orbital angular momentum (OAM); electromagnetic (EM) vortex; chirp-scaling (CS) algorithm; synthetic aperture radar (SAR)

0 引言

在过去的二十多年中,电磁涡旋波得益于其独特的物理特性^[1-3],包括螺旋波前的相位分布、独特的天线方向图及信息调制等,受到了很多领域的广泛关注,包括无线通信^[4]、电磁波探测^[5]、波束形成^[6]等领域。

近几年,电磁涡旋波已应用于雷达成像领域。通过对目标凝视照射,变换轨道角动量的模式数即

可获得方位向分辨率。郭桂蓉等^[7]首先提出了电磁涡旋具有对雷达目标方位向成像的潜力。刘康等^[8]推导了多发多收(MIMO)、多发单收(MISO),以及模式下利用圆环天线的回波信号模型,同时通过快速傅里叶变换(FFT)和 BP 成像算法获取了目标二维聚焦结果,但并没有给出详细的成像算法推导。袁铁柱等^[9]利用多个同心圆环天线实现了主瓣方向调整,同时旁瓣得到了有效抑制。刘康等^[10]提出了

波束控制方法, 以及通过 l_p 正则最小二乘法重构得到二维图像。然而, 大部分文献都集中于凝视雷达工作模式, 需要大量轨道角动量模式数变换, 对天线设计提出了较高的要求。本文将合成孔径的原理和电磁涡旋模型结合, 利用方位向合成孔径技术实现方位向分辨率^[11-12], 有效减轻了天线设计的负担。结合电磁涡旋几何模型和回波信号模型特点, 在传统 chirp-scaling (CS) 算法^[13]的基础上提出了电磁涡旋 SAR 聚焦方法, 从而完成成像处理。相比目前的电磁涡旋成像技术, 本文所提方法减轻了复杂天线设计和控制的压力, 并将电磁涡旋引入 SAR 领域, 通过长合成孔径时间实现更高的方位向分辨率。

1 电磁涡旋 SAR 几何模型与回波信号模型

电磁涡旋 SAR 采用单层环形天线发射和接收信号, 如图 1 所示。天线搭载于飞机上, 圆环上有 N 个均匀分布的天线阵元, 圆环半径为 a , 每个阵元相位存在等间隔相位差 $\Delta\varphi = 2\pi\alpha/N$, α 为轨道角动量模式数。

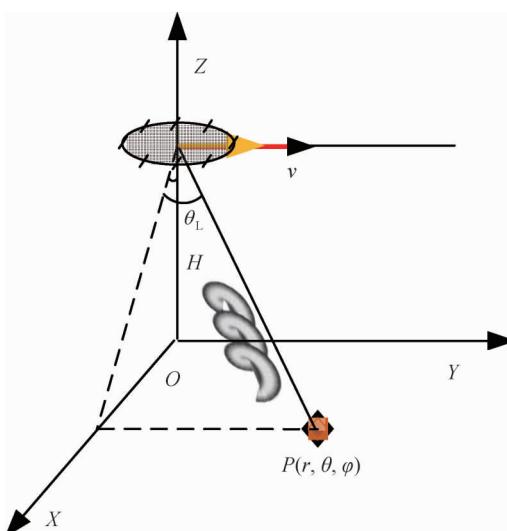


图 1 电磁涡旋 SAR 几何模型

Fig. 1 Geometry of EM vortex SAR

图 1 中, 飞机沿 Y 轴方向飞行, 速度为 v , 场景目标为 $P(r, \theta, \varphi)$, r, θ, φ 为目标球面坐标系下的坐标。

根据电磁涡旋 SAR 几何模型和天线阵元分布特性, 对任意一点目标 $P(r, \theta, \varphi)$ 含有轨道角动量的线性调频信号回波信号表达式^[14]为

$$s_{\text{echo}}(\tau, \alpha) = \sigma J_a^2(ka \sin \theta(t)) \omega_r \left[\tau - \frac{2r(t)}{c} \right] \\ \exp \left\{ j\pi b_r \left(\tau - \frac{2r(t)}{c} \right)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi r(t)}{\lambda} \right\} \exp \{ j\alpha\varphi(t) \} \quad (1)$$

式中: σ 为 目 标 的 散 射 截 面 积; λ 为 波 长; c 为 光 速; $J_a(\cdot)$ 为 一 阶 贝 塞 尔 函 数; $\omega_r[\cdot]$ 为 距 离 向 天 线 方 向 图; k 为 波 数, $k = \omega/c$; b_r 为 线 性 调 频 信 号 的 调 频 率。

方位角 $\varphi(t)$ 和高度角 $\theta(t)$ 能通过几何关系及球坐标系和直角坐标系的转换得到, 有

$$\varphi(t) = \arctan \frac{-vt}{\sqrt{R_0^2 - H^2}} \quad (2)$$

$$\theta(t) = \arccos \left(\frac{-H}{r(t)} \right) \quad (3)$$

式中: R_0 为 最 近 斜 距; H 为 飞 行 高 度。

相比传统 SAR 回波信号, 电磁涡旋 SAR 回波信号模型新引入了 2 项调制, 即贝塞尔函数的幅度加权和轨道角动量的相位调制。幅度加权将影响辐射增益包络, 同时非对称的加权将影响点目标聚焦。相位调制项是方位时间的函数, 对方位聚焦处理产生影响。因此必须对新引入的附加项进行补偿, 研究新模型下的成像算法。

2 电磁涡旋 SAR 成像新方法

本节给出了针对电磁涡旋 SAR 的成像方法, 对传统 CS 算法进行了改进, 考虑了幅度校正和相位补偿处理。改进 CS 成像算法流程如图 2 所示。基于传统的成像处理^[13], 在完成距离向聚焦处理后, 增加了幅度和相位校正处理。

为便于实现成像处理, 将平方贝塞尔函数 $J_a^2(x)$ 进行近似处理。当 $x \gg 1$ 时, $J_a^2(x)$ 可近似为

$$J_a^2(x) \approx \frac{1}{\pi x} [1 - \sin(\alpha\pi - 2x)] \quad (4)$$

校正函数可表示为

$$H_4(\tau, f; r_{ref}) = (J_a^2(f))^{-1} \exp[-j\alpha\varphi(f)] \quad (5)$$

式中: $J_a^2(f), \varphi(f)$ 为 频 域 表 达 式。

相比传统 CS 算法, 本文提出的算法考虑了电磁涡旋波的幅度加权和相位调制。

3 点目标仿真分析

点目标仿真参数见表 1。

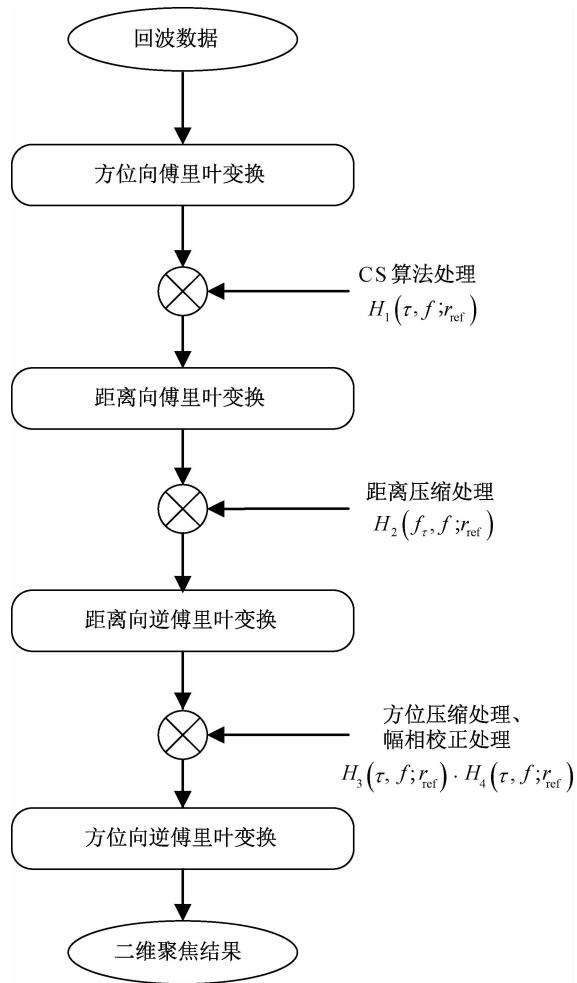


图 2 改进 CS 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of modified CS algorithm

表 1 点目标仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of point target

参数	值
载频/GHz	9.6
天线中心视角/(°)	35
OAM 模式数/个	5
天线半径/m	30λ
采样率/MHz	140
脉冲重复频率/Hz	2 000
飞行速度/(m·s ⁻¹)	250
斜距/m	30 000

传统 CS 成像与本文所提算法的二维聚焦结果对比如图 3 所示。由图可知,2 种算法的距离

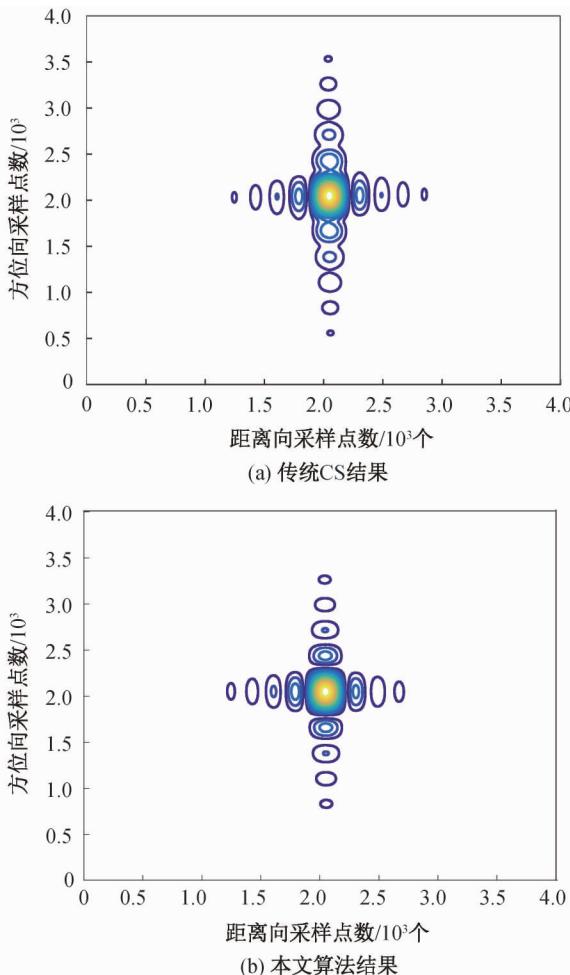


图 3 二维成像结果对比图

Fig. 3 Comparison of 2-D imaging results

向聚焦结果基本一致,方位向聚焦方便,传统 CS 算法有散焦现象,而本文所提算法则有明显的改善。

表 2 给出了方位向剖面的定量分析结果,包含点目标响应的分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比对比。由表可知,本文提出成像方法的方位向峰值旁瓣比为 -13.260 dB,而传统 CS 的峰值旁瓣比恶化到了 -12.198 dB。因此,本文提出的算法能应用于电磁涡旋 SAR 成像。

表 2 点目标成像结果方位向剖面分析对比

Tab. 2 Imaging performances of point target in azimuth

参数	传统 CS 算法	本文提出算法
分辨率/m	0.245	0.235
峰值旁瓣比/dB	-12.198	-13.260
积分旁瓣比/dB	-8.682	-10.346

4 结论

本文建立了电磁涡旋 SAR 几何模型和回波信号模型,从信号角度分析了电磁涡旋 SAR 与传统 SAR 信号的不同。针对电磁涡旋 SAR 回波信号模型,考虑电磁涡旋引入的幅度加权和相位调制问题,提出了改进的 CS 成像算法,解决了传统 SAR 成像算法方位向散焦的问题,点目标仿真实验验证了所提成像算法的有效性。后续将开展目标与电磁涡旋波的散射机理、电磁涡旋的有效传播特性等方面的工作,进一步研究电磁涡旋波在 SAR 领域的回波接收性能和成像的可行性。

参考文献

- [1] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature photonics*, 2012, 6(7): 488.
- [2] BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, 340 (6140): 1545-1548.
- [3] MAHMOULI F E, WALKER S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(2): 223-226.
- [4] TAMBURINI F, MARI E, SPONSELLI A, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 033001.
- [5] CANO E, ALLEN B, BAI Q, et al. Generation and detection of OAM signals for radio communications [C]//Antennas and Propagation Conference (LAPC). 2014: 637-640.
- [6] BAI Q, TENNANT A, ALLEN B. Experimental circular phased array for generating OAM radiobeams [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(20): 1.
- [7] 郭桂蓉,胡卫东,杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(6): 71-76.
- [8] LIU K, CHENG Y, YANG Z, et al. Orbital angular momentum based electromagnetic vortex imaging[J]. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2015, 14: 711-714.
- [9] YUAN T, WANG H, QIN Y, et al. Electromagnetic vortex imaging using uniform concentric circular arrays[J]. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2016, 15: 1024-1027.
- [10] LIU K, CHENG Y, LI X, et al. Study on the theory and method of vortex-electromagnetic-wave-based radar imaging [J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2016, 10(9): 961-968.
- [11] 陈筠力,李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望 [J]. 上海航天,2016,33(6):1-19.
- [12] 蔡爱民,王燕宇. 双/多基地 SAR 成像研究进展与趋势及其关键技术[J]. 上海航天, 2016, 33(4): 112-118.
- [13] RANEY R K, RUNGE H, BAMLER R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [14] YUAN T, CHENG Y, WANG H, et al. Beam steering for electromagnetic vortex imaging using uniform circular arrays[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 704-707.

(本文编辑:姚麒伟)