

基于NUFFT的FMCW CSAR圆柱面场景成像波数域算法

宋德鹏^a, 曲毅^a, 姜頔^b, 付凯城^a

(武警工程大学, a. 信息工程系; b. 电子技术系, 西安 710086)

摘要: 针对调频连续波圆周合成孔径雷达(FMCW CSAR)传统波数域算法对圆柱面场景成像时插值的精度直接影响成像质量且计算量较大的问题,提出了一种基于非均匀傅里叶变换的FMCW CSAR圆柱面场景成像的波数域算法,基于雷达到目标点的斜距按照四阶泰勒级数展开推导出了FMCW CSAR波数域回波信号,并在此基础上利用二维非均匀傅里叶变换代替插值功能较好地实现了聚焦成像。

关键词: 圆周合成孔径雷达; 调频连续波; 圆柱面场景; 非均匀傅里叶变换; 波数域算法

中图分类号: TN955 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)01-0024-03

NUFFT Based ω - k Algorithm of FMCW CSAR for Cylindrical Reconstruction Areas

SONG De-peng^a, QU Yi^a, JIANG Di^b, FU Kai-cheng^a

(Engineering College of CAPF, a. Information Engineering Department; b. Electronic Technology Engineering Department, Xi'an 710086, China)

Abstract: The accuracy of the traditional ω - k algorithm of Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Circular Synthetic Aperture Radar (CSAR) for image interpolation when reconstructing the cylinder areas has direct influence on the quality of imaging, and the process needs a large amount of calculation. To solve the problem, an ω - k algorithm based on Nonuniform Fast Fourier Transformation (NUFFT) is proposed, by which the echo signal of wave-number domain is deduced according to the fourth order Taylor expansion based on the slant range from radar to target. On the basis of which, the two-dimensional NUFFT is used instead of the interpolation function, and implements focused imaging.

Key words: CSAR; FMCW; cylindrical reconstruction area; NUFFT; ω - k algorithm

0 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种主动微波遥感器件,具有全天时、全天候的工作特点,在军事和民用领域应用广泛^[1-2]。直线SAR由于其合成孔径角度的限制,无法实现高分辨率的成像,圆周合成孔径雷达(CSAR)依靠其特有的圆周轨迹实现了360°全方位的合成角度,不但提高了成像的分辨率,还使其具有了三维成像能力^[3-4]。尤其是SAR与调频连续波^[5](FMCW)结合后,使得CSAR具有体积小、重量轻、发射功率低等特点,便于安装在小型平台,使其在安检、灾害探测等领域的应用更为广泛与简便。然而,CSAR的特殊轨迹

也使得其方位向与距离向完全耦合^[6],尤其在对圆柱面场景成像方面体现了三维成像的思维,RD等经典成像算法不再适用。

文献[7]最早提出了CSAR对圆柱表面利用傅里叶分解聚焦的成像算法,但该算法运算量较大,不能实时成像;文献[8]提出了改进的波数域算法对圆柱面成像,但该算法需进行插值,插值的精度决定了成像的质量;文献[9]利用二阶泰勒级数展开估计距离轨迹且利用STOLT插值对圆柱面成像,对于单个散射点严重限制了其成像的圆周孔径。本文在分析波数域成像算法的基础上将距离轨迹按四阶泰勒级数展开较二阶展开扩展了单个目标的成像孔径,并用NUFFT代替STOLT插值,有效提高运算效率与精度,实现良好的聚焦成像。

1 CSAR 成像几何

CSAR 成像几何如图1所示。

收稿日期:2016-03-01

修回日期:2016-11-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61101238)

作者简介:宋德鹏(1991—),男,河南信阳人,硕士生,研究方向为雷达信号处理。

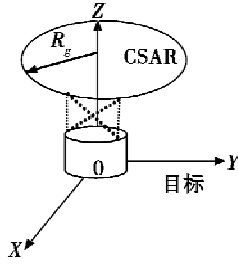


图 1 CSAR 成像几何

Fig.1 The geometry of CSAR

定义 R_g 为雷达运动半径, Z_c 为运动高度, 为了便于分析, 雷达做匀速圆周运动, 将坐标原点定为圆周运动的圆心, θ 为雷达慢时间运动角度, 目标区域是半径为 r_p 的圆柱面, φ_p 为目标点的角度变化。目标点的坐标可表示为 $(r_p \cos \varphi_p, r_p \sin \varphi_p, z_p)$, 雷达的坐标可以表示为 $(R_g \cos \theta, R_g \sin \theta, Z_c)$, 于是雷达到目标点的距离为

$$R(\theta) = \sqrt{R_g^2 + r_p^2 - 2R_g r_p \cos(\theta - \varphi_p) + (z_p - Z_c)^2} \quad (1)$$

2 传统波数域成像模型

为更有效地利用波数域算法^[10]重建成像区域, 将雷达到目标的斜距按照泰勒级数四阶展开 ($\cos x = 1 - x^2/2 + x^4/24 - \dots$), 于是

$$R(\theta) \approx \sqrt{(r_p - R_g)^2 + (Z_c - z_p)^2 + r_p R_g ((\theta - \varphi_p)^2 - (\theta - \varphi_p)^4/12)} \quad (2)$$

假设雷达发射线性调频信号为

$$s(t) = \exp(j2\pi(\frac{1}{2}kt^2 + f_c t)) \quad (3)$$

则 FMCW CSAR 接收到的回波信号去载频后为

$$s(\theta, t) = \sum f(x, y) \exp(j\pi k_c (t - 2R(\theta)/c)^2 - j4\pi R(\theta)/\lambda) \quad (4)$$

式中, $f(x, y)$ 为点目标的反射函数; t 为快时间; k_c 为调频率; c 为电磁波的速度; λ 为波长。在调频连续波体制下得到中频信号为

$$s_y(\theta, t) = \sum f(x, y) \exp(2k_c R(\theta)t/c + \frac{1}{2}k_c (2R(\theta)/c)^2 \exp(-j4\pi R(\theta)/\lambda)) \quad (5)$$

忽略残余视频相位用快时间傅里叶变换实现距离压缩为

$$s(\theta, f) = \sum f(x, y) \exp(-j4\pi R(\theta)/\lambda) \exp((f_c + f)/c) \quad (6)$$

令 $k = 2\pi(f_c + f)/c$, 则距离压缩后的信号可以表示为

$$s(\theta, k) = \sum f(x, y) \exp(-j2kR(\theta)) \quad (7)$$

令 $u = \theta - \varphi_p$, 将其变换到慢时间波数域

$$s(k_u, k) = \sum f(x, y) \exp(-jk_u \varphi_p) \cdot \int \exp(-j2kR(u) - jk_u u) du \quad (8)$$

利用驻相位原理

$$\frac{d(2kR(u) + jk_u u)}{du} = 0 \quad (9)$$

解得 u_0 , 将相位导数为零点的 u 值 u_0 代入式(8), 则

$$s(k_u, k) = \sum f(x, y) dx dy \cdot \exp(-jk_u \varphi_p) \cdot \exp(-j2k[(r_p - R_g)^2 + (Z_c - z_p)^2 + r_p R_g (u_0^2 - u_0^4/12)]^{1/2} - jk_u u_0) \quad (10)$$

所以将 u_0 代入相位得

$$\begin{aligned} \phi(u_0) \approx & 2k \sqrt{(r_p - R_g)^2 + Z_c^2 + r_p R_g (u_0^2 - u_0^4/12)} + \\ & k_u u_0 + 2k \frac{2\sqrt{(r_p - R_g)^2 + Z_c^2} \sqrt{(r_p - R_g)^2 + (Z_c - z_p)^2}}{2\sqrt{(r_p - R_g)^2 + Z_c^2 + r_p R_g (u_0^2 - u_0^4/12)}} + \\ & 2k \frac{(\sqrt{(r_p - R_g)^2 + Z_c^2} - \sqrt{(r_p - R_g)^2 + (Z_c - z_p)^2})^2}{2\sqrt{(r_p - R_g)^2 + Z_c^2 + r_p R_g (u_0^2 - u_0^4/12)}} \end{aligned} \quad (11)$$

对 $s(k_u, k)$ 进行 STOLT 插值和二维 IFFT 实现对目标区域的聚焦成像。

传统的波数域算法中利用 STOLT 插值将波数域回波数据变换到直角坐标系, 然后利用 IFFT 实现聚焦成像, 如图 2 所示。

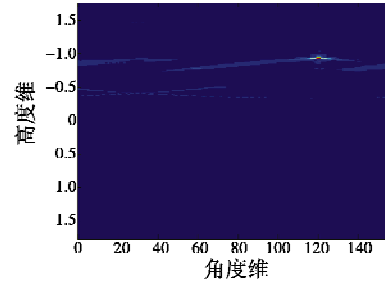


图 2 传统算法单点目标成像

Fig.2 Traditional algorithm for single point imaging

这种插值算法数据利用率低, 运算量较大, 同时旁瓣较高, 需要进一步改进。

3 基于 NUFFT 的成像算法

基于 NUFFT 的圆周 SAR 成像算法, 首先将散射场景中频信号波数域数据 $s(k_u, k)$ 变换到极坐标格式 $F(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k)$, 并计算出每个数据点在波数域直角坐标系下的坐标, 然后根据二维离散傅里叶变换的定义聚焦成像

$$f(x_m, y_n) = \sum_{k=0}^{MN-1} F(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) \exp(j\frac{2\pi}{M} \mathbf{u}_k m) \exp(j\frac{2\pi}{N} \mathbf{v}_k n) \quad (12)$$

式中, $(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) \in [-\frac{M}{2}, \frac{M}{2}] \times [-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]$, 由于在该算法中得到的 $(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k)$ 具有非均匀分布, 无法直接使用式(11)求解。根据 NUFFT 的基本原理将二维傅里叶变换的变换因子乘以变标因子, 根据 NUFFT 的基本原理^[11]可知

$$s_{m,n} \exp(j\frac{2\pi}{M} \mathbf{u}_k m) \exp(j\frac{2\pi}{N} \mathbf{v}_k n) = \sum_{p=-Q/2}^{Q/2} \sum_{g=-Q/2}^{Q/2} r_{p,g}(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) \cdot$$

$$\exp\left\{j\frac{2\pi}{\alpha M}([\alpha u_k] + p)m\right\} \exp\left\{j\frac{2\pi}{\alpha N}([\alpha v_k] + g)n\right\} \quad (13)$$

式中: $s_{m,n}$ 为变标因子; p, g 为插值长度; α 为采样因子; $r_{p,g}$ 为乘以变标因子后的傅里叶变换因子。当取变标因子为余弦因子时可以得到

$$s_{m,n} = \cos\left(\frac{\pi m}{\tau M}\right) \cos\left(\frac{\pi n}{\tau N}\right) \quad (14)$$

因此, 可以将式(12)分解为两个一维 NUFFT, 即

$$s_m \exp\left(j\frac{2\pi}{M}u_k m\right) = \sum_{\rho=-q/2}^{q/2} r_p(u_k) \exp\left\{j\frac{2\pi}{\tau M}([\tau u_k] + p)m\right\} \quad (15)$$

$$s_n \exp\left(j\frac{2\pi}{N}v_k n\right) = \sum_{\varepsilon=-q/2}^{q/2} r_g(v_k) \exp\left\{j\frac{2\pi}{\tau N}([\tau v_k] + g)n\right\} \quad (16)$$

$$r_{p,g}(u_k, v_k) = r_p(u_k) \otimes r_g(v_k) \quad (17)$$

式(17)中, \otimes 表示矩阵的直积, 于是可将二维 NUFFT 转换为两个一维 NUFFT。FMCW CSAR 基于 NUFFT 成像的处理流程为: 1) 获得 FMCW CSAR 波数域的极坐标格式下的中频信号数据 $F(u_k, v_k)$; 2) 将数据变换到直角坐标系, 计算每个数据点在直角坐标系下的坐标; 3) 根据式(14)、式(15)分解二维 NUFFT, 将数据进行两个一维 NUFFT 再做直积并映射到成像空间聚焦成像。

利用上述步骤得到 NUFFT 变换前后的数据显示如图 3 所示。可知二维 NUFFT 利用两个一维 NUFFT 快速实现, 能够较好地实现插值的功能, 且运算效率较插值更高。

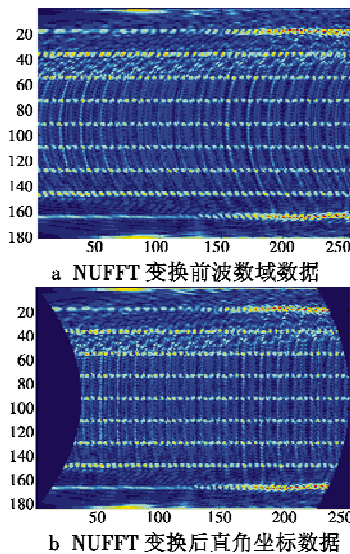


图 3 插值前后数据对比图

Fig. 3 The data before and after NUFFT

4 算法仿真

假设雷达运动半径为 50 m, 成像圆柱场景半径为

10 m, 雷达高度为 20 m, 发射线性调频连续波, 成像合成孔径角度为 $(0, \pi)$, 目标成像高度为 $(-1 \text{ m}, 1 \text{ m})$, 目标分布如图 4a 成 F 型分布。根据仿真对比, 在同一个 Matlab 仿真环境下, 传统算法运行时间约为 11.6 s, 基于 NUFFT 算法运行时间约为 3.9 s。

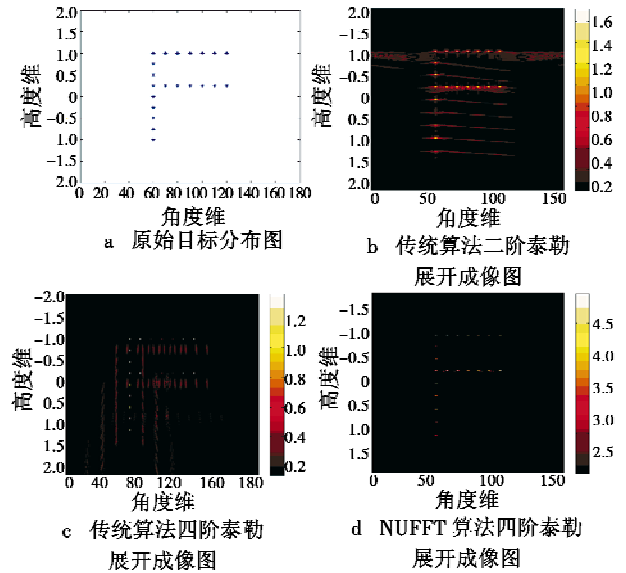


图 4 传统算法与 NUFFT 算法成像对比图

Fig. 4 Comparison between traditional algorithm and NUFFT

通过图 4 可知, 基于 NUFFT 的 FMCW CSAR 波数域成像算法能够较好地降低旁瓣聚焦成像。表明该算法能够有效地提高分辨率、降低旁瓣、提高成像运算的效率。

5 结论

针对现有成像算法的运算量大、分辨率低且插值精度直接影响成像质量等缺点, 在分析波数域算法的基础上提出了基于 NUFFT 的 FMCW CSAR 对于圆柱面场景的成像算法。经仿真可知, 该算法能较好地聚焦成像并通过 NUFFT 有效降低运算量。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] LIN Y, HONG W, TAN W X, et al. Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 651-655.
- [3] LI Y H, JIN T, SONG Q. 3D back-projection imaging in circular SAR with impulse signal[C]//The 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2009: 775-778.
- [4] 李浩林, 张磊, 保铮. 加速后向投影圆迹 SAR 成像方法[J]. 信号处理, 2015, 31(6): 638-642.

面的表现。

参考文献

- [1] 何翔,任晓瑞. 支持多核的嵌入式操作系统关键技术研究[J]. 航空计算技术,2013,43(4):86-90.
- [2] PAULITSCH M, NOWOTSCH J. Leveraging multi-core computing architectures in avionics [C]//The Ninth European Dependable Computing Conference, 2012:132-143.
- [3] 虞保忠,张灯,徐晓光,等. 嵌入式多核系统中断负载均衡研究[J]. 电子技术,2014(3):27-30.
- [4] RAS J, CHENG A M K. An evaluation of the dynamic and static multiprocessor priority ceiling protocol and the multiprocessor stack resource policy in an SMP system [C]//The 15th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2009:13-22.
- [5] 孔帅帅. 基于嵌入式多核处理器的通信及中断问题的研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [6] 王世涛,张激,李健,等. 嵌入式多核操作系统负载均衡研究[J]. 计算机工程,2015,41(7):86-90.
- [7] ORTIZ A, ORTEGA J, DIAZ A F, et al. Affinity-based network interfaces for efficient communication on multicore architectures[J]. Journal of Computer Science & Technology, 2013, 28(3):508-524.
- [8] COSTA D, DE AGUIAR P. On the virtualization of multiprocessed embedded systems[D]. Porto Alegre: Pontifical Catholic University, 2014.
- [9] YAN J N, HE J Z, CHEN W G, et al. ASLOP: a field-access affinity-based structure data layout optimizer [J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(9):1769-1783.
- [10] FUNG J, NEWELL D, LRELAN P, et al. Architectural characterization of processor affinity in network processing[C]//IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software, 2005:207-218.
- (上接第26页)
- [5] LUO Y H, SONG H J, WANG R. An accurate and efficient extended scene simulator for FMCW SAR with static and moving targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2014, 11(10):1159-1164.
- [6] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012,1(2):124-135.
- [7] SOUMEKH M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 8(5):1252-1265.
- [8] DALLINGER A, SCHELKSHORN S, DETLEFSEN J. Efficient ω - k -algorithm for circular SAR and cylindrical reconstruction areas [J]. Advances in Radio Science, 2006, 4(8):85-91.
- [9] KOU L L, WANG X Q, CHONG J S, et al. Circular SAR processing using an improved omega- k -type algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(4):572-579.
- [10] 张祥坤. 高分辨圆迹合成孔径雷达成像机理及方法研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2007.
- [11] 田甲申. 圆周 SAR 成像算法及相关技术[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- (上接第40页)
- tispoofing techniques[J]. International Journal of Navigation & Observation, 2012(9):1-13.
- [6] 葛大江,周光彬,胥大川,等. GPS 接收机的一种空时零陷抗欺骗式干扰方法[J]. 四川兵工学报,2015,36(8):41-45.
- [7] BROUMANDAN A, JAFARNIA-JAHROMI A, DEGHANIAN V, et al. GNSS spoofing detection in handheld receivers based on signal spatial correlation[C]//Position Location and Navigation Symposium (PLANS), IEEE/ION, 2012:479-487.
- [8] LI M, DEMPSTER A G, BALAEI A T, et al. Switchable beam steering/null steering algorithm for CW interference mitigation in GPS C/A code receivers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3):1564-1579.
- [9] TSUI J B Y. Fundamentals of global positioning system receivers; a software approach[M]. 2nd ed. New York: Wiley & Sons, 2005:129-185.
- [10] MAGIERA J, KATULSKI R. Accuracy of differential phase delay estimation for GPS spoofing detection[C]//The 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing(TSP), 2013:695-699.