

引用格式:宋德鹏,李斌兵,曲毅.基于子孔径的FMCW CSAR快速圆卷积成像算法[J].电光与控制,2019,26(7):15-19,24. SONG D P, LI B B, QU Y. FMCW CSAR fast circular convolution imaging algorithm based on sub-aperture[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7):15-19, 24.

基于子孔径的 FMCW CSAR 快速圆卷积成像算法

宋德鹏, 李斌兵, 曲毅
(武警工程大学信息工程学院, 西安 710086)

摘要: 调频连续波圆周合成孔径雷达(FMCW CSAR)波数域成像算法中大孔径成像会导致目标散射系数发生变化,从而不能聚焦成像。针对此问题,提出了子孔径FMCW CSAR快速圆卷积成像算法,并利用非均匀傅里叶变换代替插值以提高成像效率。同时分析了FMCW CSAR多普勒历程,对子孔径划分原则进行了理论推导,给出了满足子孔径选取的表达式,通过仿真分析验证该算法能够有效避免波数域算法与子孔径难以结合的问题,结果表明,在该孔径内能较好地成像,而超过该子孔径范围,难以实现良好的聚焦成像。

关键词: 圆周合成孔径雷达; 子孔径; 圆卷积; 成像

中图分类号: TN958 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.003

FMCW CSAR Fast Circular Convolution Imaging Algorithm Based on Sub-aperture

SONG De-peng, LI Bin-bing, QU Yi

(Information Engineering Department, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

Abstract: Due to the large aperture imaging of the Frequency Modulation Continuous Wave Circular Synthetic Aperture Radar (FMCW CSAR) wavenumber domain imaging algorithm, the target scattering coefficient changes, so that the imaging cannot be focused. To solve this problem, a sub-aperture FMCW CSAR fast circular convolution imaging algorithm is proposed, and non-uniform Fourier transform is used instead of interpolation to improve imaging efficiency. At the same time, the FMCW CSAR Doppler process is analyzed, and the principle of subaperture division is deduced theoretically. The expression of subaperture selection is given. The simulation analysis shows that the algorithm can effectively avoid the difficulty of combining the wavenumber domain algorithm with the subaperture. The results show that better imaging is possible within the aperture, and it is difficult to achieve good focus imaging beyond the sub-aperture range.

Key words: CSAR; sub-aperture; circular convolution; imaging

0 引言

合成孔径雷达(SAR)凭借全天时、全天候的优点在军用、民用领域应用越来越广泛,随其发展,对SAR成像分辨率的要求也越来越高,但其方位向分辨率受其合成孔径长度的影响,无法进一步提高^[1-3],因此,圆周合成孔径雷达(CSAR)应运而生。CSAR是雷达在一定高度围绕目标做圆周运动,对目标聚焦成像的一种合成孔径雷达体制。相对于直线SAR而言,其具

有360°合成孔径,极大地提高了成像分辨率^[4],尤其是调频连续波圆周合成孔径雷达(FMCW CSAR)兼具了调频连续波和CSAR的优点,使得其体积小、功率低,极大地拓展了其应用范围^[5]。

随着CSAR在各个领域的广泛应用,对其成像算法的研究也随之广泛开展。文献[6]利用BP算法对CSAR成像,能够对任意轨迹曲线进行有效成像,但是其运算复杂度高,耗时长;文献[7]利用波前重构算法成像有效避免了复杂的运算,节省了运算时间,但是其对场景中心点分辨率较好,对远离场景中心的成像效果较差,且较难与子孔径成像结合导致在实际应用中全孔径下存在目标散射系数发生变化而造成无法成像的问题;文献[8]介绍了基于傅里叶变换的CSAR的频域成像算法并与子孔径相结合,但是其转换到频域

收稿日期:2018-07-16

修回日期:2019-04-08

基金项目:国家自然科学基金(41171224);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,博士生,研究方向为雷达信号处理。

的理论较为复杂,且运算量较大;文献[9]利用压缩感知算法对 CSAR 成像进行了阐述,但是针对全孔径 CSAR 下如何避免散射系数发生变化对成像造成散焦的情况并没有涉及;文献[10]在 BP 算法下利用子孔径算法对 CSAR 成像,但是对于子孔径划分的理论依据没有详细阐述。

本文着重针对快速圆卷积算法下的子孔径算法进行讨论,结合子孔径选取条件,将基于子孔径的圆卷积算法应用于 FMCW CSAR 成像,既有效避免了波数域算法的大孔径下目标散射系数发生变化造成散焦,也解决了 BP 算法成像效率低的问题。

1 FMCW CSAR 成像几何与回波模型

图 1 为 CSAR 成像几何图。

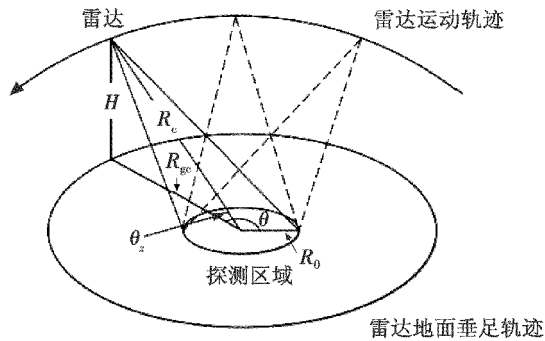


图 1 CSAR 成像几何图

Fig. 1 The geometry of the CSAR imaging

雷达在平台高度为 H 的平面内做匀速圆周运动,其运动半径为 R_{gc} ,雷达在空间内的位置为 $(x_a, y_a, z_a) = (R_{gc} \cos \theta, R_{gc} \sin \theta, H)$,其中 $\theta \in (0, 2\pi)$ 表示慢时间方位点。由成像几何可知,该观测场景均是半径为 R_0 的圆形区域,雷达与场景中心的距离 $R_c = \sqrt{R_{gc}^2 + H^2}$,雷达俯仰角 $\theta_z = \arctan \frac{H}{R_{gc}}$ 。

假设雷达发射的线性调频信号为

$$s_t(t) = e^{j2\pi(f_c t + \gamma t^2/2)} \quad (1)$$

式中: f_c 为载频; t 为快时间; γ 为调频率。由于线性调频信号在接收的同时持续发射,因此实际上在接收回波信号时,其回波信号可表示为

$$s_r(t) = e^{j2\pi[f_c(t-\tau) + \gamma(t-\tau)^2/2]} \quad (2)$$

在忽略距离向误差的情况下,时间延迟可表示为

$$\tau = \frac{2R_p(\theta)}{c} \quad (3)$$

式中, c 为光速。考虑雷达平台在延迟时间段内在方位向上的变化,则距离 $R_p(\theta)$ 可以表示为

$$R_p(\theta) = \sqrt{(R_{gc} \cos \theta - x_p)^2 + (R_{gc} \sin \theta - y_p)^2 + (H - z_p)^2} \quad (4)$$

2 圆卷积成像算法

由于时域后向投影算法原理简单、算法复杂度高,因此提出了波前重构算法,在波前重构算法的基础上通过分析化简可以得到快速圆卷积算法。该算法首先将回波信号去调频后表示为

$$s_{if}(t, \theta) = s_t(t) \cdot s_r^*(t) = e^{j2\pi(f_c \tau + \gamma t^2 + \gamma t^2/2)} \quad (5)$$

将回波数据转换到波数域得

$$s_{if}(k, \theta) = \iint_x \int_y g(x, y) \exp(-j2kR_p(\theta)) dx dy \quad (6)$$

式中: $k = 2\pi f/c$; $f = f_c + f_i$; $g(x, y)$ 是目标散射系数。将雷达的位置转换到直角坐标系得

$$s_{if}(k, x', y') = \iint_x \int_y g(x, y) \exp[-j2kR(x, y, x', y')] dx dy \quad (7)$$

式中: $x' = R_{gc} \cos \theta$, $y' = R_{gc} \sin \theta$ 。对式(7)做二维傅里叶变换可得

$$S_{if}(k_x, k_y) = \iint_{x'^2 + y'^2 = R_{gc}^2} s_{if}(k, x', y') \exp(-jk_x x' - jk_y y') dx' dy' \quad (8)$$

式中, k_x 和 k_y 为空间频率, $k_x = 2k \cos \alpha$, $k_y = 2k \sin \alpha$, α 为 k 与横坐标的夹角。

而后再将其转换到极坐标系可得

$$G_1(k, \theta) = \int_{\theta} G(k, \theta) F(k, \alpha - \theta) d\theta \quad (9)$$

$$F(k, \theta) = R_{gc} \exp(-j2kR_{gc} \cos \alpha) \quad (10)$$

于是由回波数据的表达式可知,将雷达位置看成是在 θ 方向上的一种卷积运算,即

$$G_1(k, \theta) = \text{IFFT}_{\theta}(\text{FFT}_{\theta}(G(k, \theta)) \text{FFT}_{\theta}(F(k, \theta))) \quad (11)$$

得到回波数据后,利用插值变换到笛卡尔坐标系再变换到时域,即可得到目标信息。

3 子孔径选取分析

由于实际情况中,全孔径时目标的散射特性在 360° 范围内会发生改变,无法实现聚焦成像,因此采用子孔径算法对目标进行成像能够有效避免此类问题^[10]。同时,在快速圆卷积算法中可以看出,回波数据的重建实际上是对 θ 的积分,改变其范围会影响其成像效果,与实际情况吻合。但是在子孔径算法中子孔径大小的选取不可忽略,子孔径过小会造成孔径个数多、数据大,不利于后续的成像处理,然而孔径过大,又无法达到聚焦的效果,因此需要根据实际情况对子孔径的选取进行有效分析。

为了有效分析子孔径的选取方法,假设目标位置为 $(r, \varphi, 0)$,则其在直角坐标系中的坐标可表示为 $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$ 。根据成像几何将雷达与目标的斜距重新表示为

$$R(t_m) = \sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\omega t_m - \varphi)} \quad (12)$$

则其多普勒频率为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t_m)}{dt_m} = \frac{2Rr\omega \sin(\omega t_m - \varphi)}{\sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\omega t_m - \varphi)}} \quad (13)$$

当载机平台具有一定高度时,对于场景中任意目标的俯仰角,根据成像集合可以表示为

$$\theta_i = \frac{H}{\sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\omega t_m - \varphi)}} \quad (14)$$

当波束两端刚好照射场景中 A, B 两点时,其最大和最小多普勒频率可以表示为

$$f_{\max} = \frac{2\omega R_{gs} f}{c} \cos(\omega t_m + \varphi) \sin\left(\theta_a + \frac{\theta_{bw}}{2}\right) \quad (15)$$

$$f_{\min} = \frac{2\omega R_{gs} f}{c} \cos(\omega t_m + \varphi) \sin\left(\theta_b - \frac{\theta_{bw}}{2}\right) \quad (16)$$

于是有方位向最大多普勒带宽为

$$B = f_{\max} - f_{\min} \quad (17)$$

当波束中心扫描的起始角和终止角重合时,即 $\theta_a = \theta_b = \theta_i$ 时,有瞬时带宽为

$$B(\theta_i) = \frac{4\omega R_{gs} f}{c} \cos(\omega t_m + \varphi) \cos \theta_i \sin \frac{\theta_{bw}}{2} \quad (18)$$

根据聚束 SAR 多普勒历程^[11],结合 CSAR 瞬时多普勒频率可以得到如图 2 所示的多普勒历程示意图。因为随着慢时间 CSAR 的距离压缩形状为正弦函数曲线,所以其多普勒历程包络为正弦函数曲线。其中, $B(\theta_i)$ 为随着俯仰角的变化整个孔径内所呈现的瞬时带宽, B_{rot} 为在聚束模式下波束位置的变化所引起的波束旋转带宽。CSAR 多普勒历程是由瞬时带宽和波束旋转带宽共同组成。图 3 所示为将斜多普勒历程转换到地平面时多普勒历程示意图。图 4 所示为俯仰角在整个孔径内的变化范围。图 5 所示为取一定宽度波束时瞬时带宽在整个孔径内的取值范围。

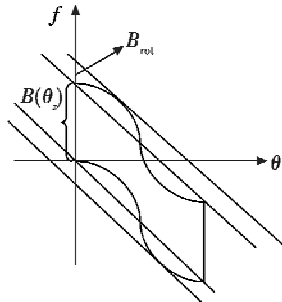


图 2 CSAR 多普勒历程示意图

Fig. 2 The procedure of the CSAR Doppler

对图 2 分析可知,CSAR 多普勒带宽可以表示为

$$B_i = B(\theta_i) + B_{rot} k_y \quad (19)$$

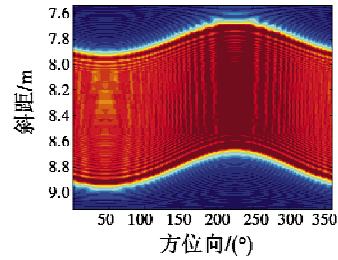


图 3 地平面多普勒历程仿真示意图

Fig. 3 The procedure of the CSAR Doppler on the ground simulation

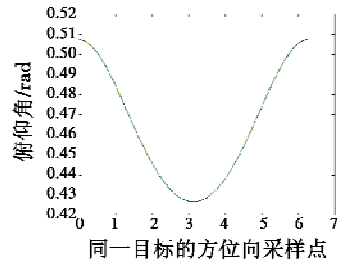


图 4 俯仰角变化范围

Fig. 4 The range of the pitch angle

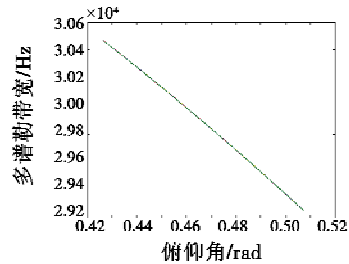


图 5 多普勒频率变化范围

Fig. 5 The range of the Doppler frequency

为了从理论上给出划分子孔径的原则,分析子孔径多普勒历程。若子孔径长度为 T_{sub} ,则其带宽为

$$B_{sub} = B_{sub}(\theta_i) + B_{rot} \quad (20)$$

$$B_{rot} = |K| T_{sub} \quad (21)$$

式中: K 为旋转中心产生的多普勒斜率^[2],可以表示为

$$K = 2\omega^2 R_{gs}^2 (\cos \theta_i)^3 / \lambda R_0 \quad (22)$$

式中: R_0 为雷达距场景中心的斜距。为了避免子孔径方位混叠, P_{PRF} 为脉冲重复周期,则必须满足

$$B_{sub} \leq P_{PRF} \quad (23)$$

于是有子孔径必须满足

$$T_{sub} \leq (P_{PRF} - \max(B_{sub}(\theta_i))) / |K| \quad (24)$$

由于在子孔径下,孔径角度较小,子孔径下的多普勒历程近似直线聚束 SAR 的多普勒历程,在拼接时可忽略子孔径频谱间的间隙。因此只要满足上述条件,可以选取合适的子孔径实现最终聚焦成像。当然,成像场景目标的散射特性不同和保持处理过程的高效性使得子孔径的选取最小值要根据具体的成像要求来最终确定。

4 基于子孔径算法及仿真分析

根据上述快速圆卷积算法,在最后成像过程中需要插值,而插值精度影响成像质量,也增加了运算量。为此,通过非均匀傅里叶变换实现该功能。同时结合子孔径算法,有效减少运算量并提高成像质量,其步骤为:1)按照子孔径划分原则,选取合适的子孔径长度 θ_L ;2)基于经典圆卷积算法,计算 θ_L 方向上的卷积;3)利用二维非均匀快速傅里叶(NUFFT)相关运算代替插值和二维快速傅里叶反变换(IFFT);4)聚焦成像。

在表1的参数设置下,根据上述理论公式求得最大弧度值为0.56 rad,则子孔径选取应不超过 50° ,因此在仿真中选取子孔径长度为 30° ,此时根据上节子孔径选取条件,结合表1参数对子孔径选取进行仿真,仿真非场景中心点目标位置为 $(-1\text{ m}, -1\text{ m}, 0\text{ m})$ 。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| 参数 | 载频/GHz | PRF/MHz | 运动半径/m | 运动速度/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ | 场景半径/m |
|----|--------|---------|--------|--|--------|
| 数值 | 9.6 | 3 | 100 | 20 | 10 |

图6为各子孔径空域频谱图,图7为圆卷积算法子孔径融合频谱图,图8为波数域算法场景中心和非场景中心点目标成像图,图9为快速圆卷积算法场景中心和非场景中心点目标成像图。对比图8、图9可以发现,二者对场景中心成像效果好于非场景中心,对比两种算法的距离向剖面图,可以发现,快速圆卷积算法成像效果优于波数域算法,且运算复杂度也会降低。

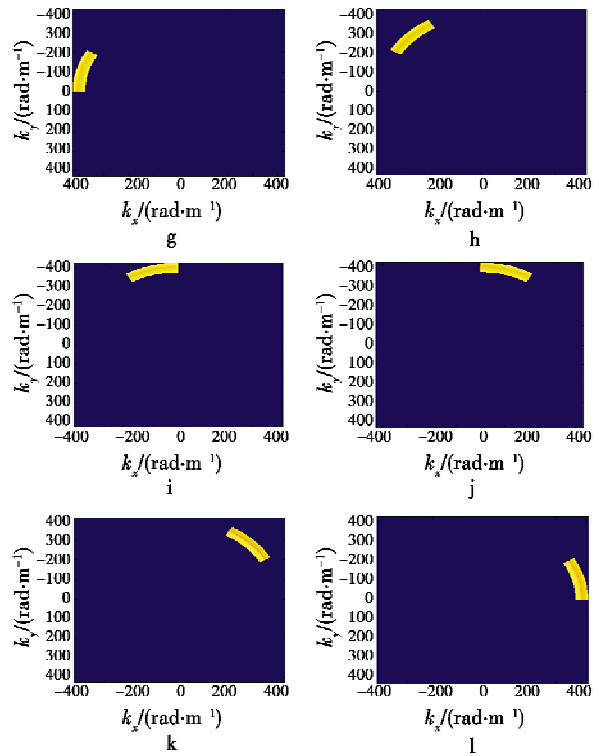
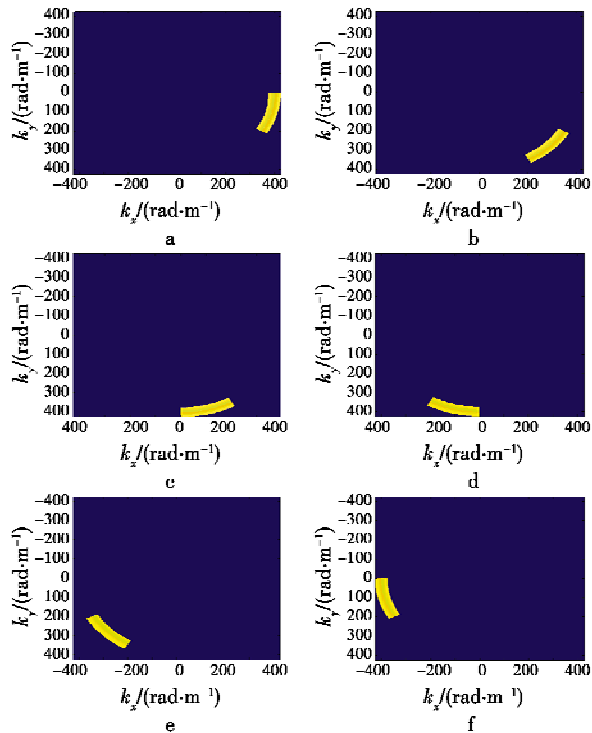


图6 子孔径频谱图

Fig. 6 The frequency spectrum of the sub-apertures

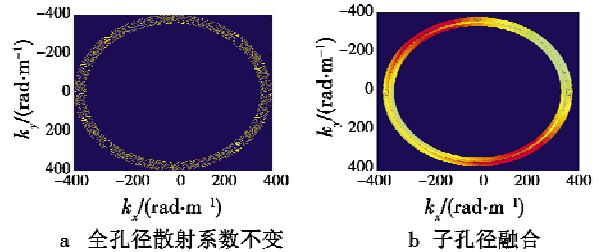


图7 快速圆卷积成像算法频谱图

Fig. 7 Spectrum of fast circular convolution imaging algorithm

图10为快速圆卷积算法在不同子孔径下对非场景中心点目标成像。

仿真结果表明,在限定的子孔径范围内能够较好成像,但是在临界值 50° 时成像效果已经恶化,当超越子孔径限定条件时,则无法聚焦成像。结果还表明,与全孔径散射系数不变时相比,子孔径成像分辨率有一定程度的降低,然而实际情况中全孔径无法设定散射系数不变,但是可以在子孔径内近似认为目标散射系数不发生变化,这样更符合实际应用,而且进一步验证了子孔径的选取与俯仰角和脉冲重复频率的关系,在超过选取条件时,目标不能有效聚焦成像,影响成像结果。同时,在多目标仿真中可以发现,该算法对于靠近场景中心的目标点的成像效果比距离场景中心较远的目标点成像效果要好,但是相比于波数域算法,利用快

速圆卷积算法能够有效提高成像效率。仿真结果亦表明该算法的有效性。

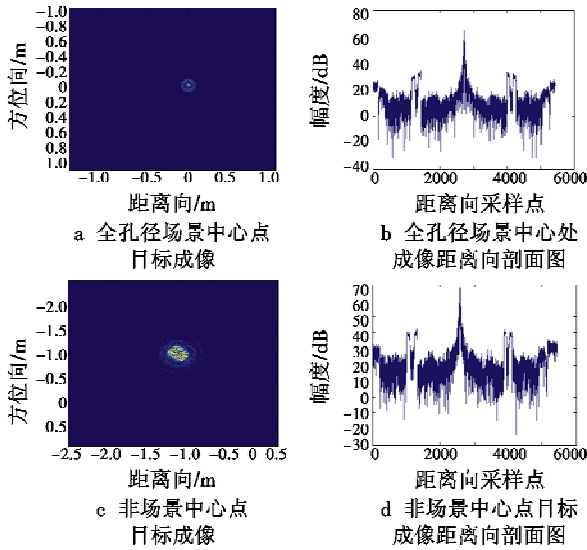


图8 波数域算法场景点目标成像
Fig. 8 Point target imaging based on wave number domain algorithm

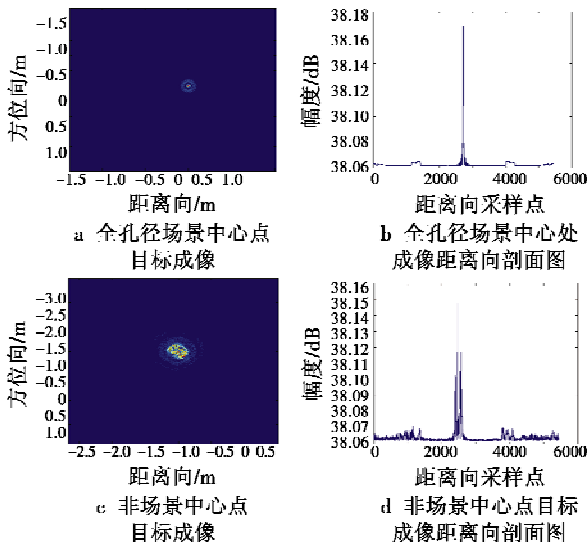


图9 快速圆卷积算法点目标成像
Fig. 9 Point target imaging based on fast circular convolution algorithm

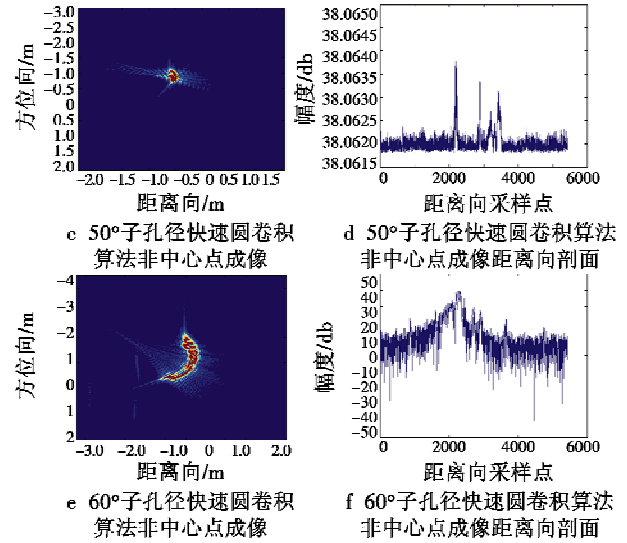
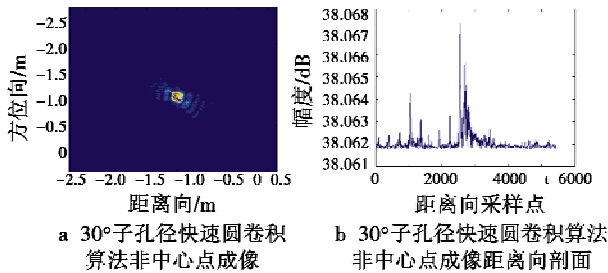


图10 不同子孔径快速圆卷积算法非场景中心点目标成像

Fig. 10 Fast circular convolution algorithm for non-center point target imaging at different sub-aperture

5 结论

FMCW CSAR 在实际成像过程中,全孔径成像会导致目标散射系数发生变化,以至于目标散焦,不能达到预期效果。利用子孔径算法,在小角度内对场景目标成像能够有效解决此类问题,同时利用快速圆卷积算法,一定程度上提高了成像效率,在子孔径下能够在数据量较多时依然有效快速成像。仿真结果亦表明该算法的有效性。

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] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 4版. 西安:电子工业出版社,2009.
- [3] 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.
- [4] 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, 2014, 11(10):1159-1164.
- [5] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2):124-135.

(下转第 24 页)

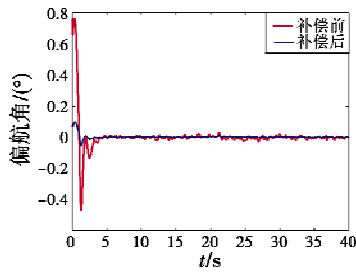


图10 补偿前后的控制量曲线图

Fig. 10 Control quantity before and after compensation

4 结论

本文以处于转速饱和状态的 Qball2 四旋翼飞行器为研究对象,结合了 Qball2 的结构参数建立 Qball2 的动力学模型,设计了一种基于误差补偿的自抗扰抗饱和和偏航角控制器。仿真实验和实物实验结果表明,所设计的抗饱和控制器能得到良好的抗饱和性能,并可以根据需求调节抗饱和性能,自由度较高。在接下来的工作中,将重点研究误差补偿系数与实际抗饱和性能之间的关系。

参考文献

[1] 聂博文,马宏绪,王剑,等. 微小型四旋翼飞行器的研究现状与关键技术[J]. 电光与控制,2007,14(6):113-117.
 [2] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用,2013,30(12):1498-1510.
 [3] 彭程,白越,乔冠宇,等. 四旋翼无人机的偏航抗饱和与多模式 PID 控制[J]. 机器人,2015,37(4):415-423.

[4] 魏青铜,陈谋,吴庆宪. 输入饱和与姿态受限的四旋翼无人机反步姿态控制[J]. 控制理论与应用,2015,32(10):1361-1369.
 [5] 王帅,邓永停,朱娟. 地基大口径望远镜伺服系统的抗扰动设计[J]. 光学精密工程,2017,25(10):2627-2635.
 [6] 韩京清,王伟. 非线性跟踪—微分器[J]. 系统科学与数学,1994,14(2):177-183.
 [7] DOYLE J C, SMITH R S, ENNS D F. Control of plants with input saturation nonlinearities [C]//Proceedings of American Control Conference, Minneapolis; IEEE Press, 1987:1024-1029.
 [8] 周宏,谭文. 线性自抗扰控制的抗饱和和补偿措施[J]. 控制理论与应用,2014,31(11):1457-1463.
 [9] 安哲. 基于视觉的 Qball-X4 四旋翼无人机地面目标跟踪[D]. 沈阳:东北大学,2014.
 [10] BOUABDALLAH S, SIEGWART R. Backstepping and sliding mode techniques applied to an indoor micro quadrotor [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation,2005:2247-2252.
 [11] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the American Control Conference, IEEE, 2003:4989-4996.
 [12] 杨晟萱. 四旋翼飞行器自抗扰控制方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
 [13] 刘一莎,杨晟萱,王伟. 四旋翼飞行器的自抗扰飞行控制方法[J]. 控制理论与应用,2015,32(10):1351-1360.
 [14] 李海生,朱学峰. 自抗扰控制器参数整定与优化方法研究[J]. 控制工程,2004,11(5):419-423.

(上接第19页)

[6] CHEN L P, AN D X, HUANG X T. A backprojection-based imaging for circular synthetic aperture radar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(8):1-9.
 [7] 陈海文. 基于波数域的圆周 SAR 三维成像算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
 [8] JIA G W, BUCHROITHNER M F, CHANG W G, et al. Fourier-based 2-D imaging algorithm for circular synthetic aperture radar: analysis and application [J]. IEEE Journal

of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(1):475-489.
 [9] AO D Y, WANG R, HU C, et al. A sparse SAR imaging method based on multiple measurement vectors model [J]. Remote Sensing, 2017, 9(3):297-318.
 [10] LIU T, PI Y M, YANG X. Wide-angle CSAR imaging based on the adaptive subaperture partition method in the terahertz band [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(2):1-9.
 [11] 陈家瑞. 机载滑动聚焦合成孔径雷达成像研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.