

FMCW CSAR 成像多普勒频移的校正方法

宋德鹏, 付凯城, 曲毅, 石婷
(武警工程大学信息工程系, 西安 710086)

摘要: 调频连续波圆周合成孔径雷达(FMCW CSAR)不满足“一步一停”模式, 载机运动引起的多普勒频移对大场景高速运动情况下的成像影响明显。FMCW CSAR与直线SAR不同, 运动速度方向的不断改变使得原有的直线SAR补偿函数不再适用。针对此问题, 建立了精确接收信号模型, 推导了CSAR的多普勒频移, 分析了运动半径和速度对多普勒频移的影响并提出了一种新的补偿函数对其进行多普勒频移补偿。仿真证明该函数有效校正了多普勒频移, 实现了大场景高速运动下的良好聚焦成像。

关键词: FMCW CSAR; 大场景高速运动; 多普勒频移; 补偿校正

中图分类号: TN955 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)10-0071-04

A Method for Doppler Shifting Correction of FMCW CSAR Imaging

SONG De-peng, FU Kai-cheng, QU Yi, SHI Ting

(Information Engineering Department, Engineering College of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: The go-stop mode is not suitable for Frequency Modulated Continuous Wave Circular Synthetic Aperture Radar(FMCW CSAR), the Doppler shifting caused by motion of the carrier aircraft has a great effect on the quality of imaging under large-scale, high-velocity condition. The compensation functions of linear SAR are not applicable due to the continuous change of the velocity direction. To solve the problem, we established an accurate signal receiving model, deduced the Doppler shifting in FMCW CSAR, analyzed the effect of the motion radius and velocity on Doppler shifting, and proposed a new compensation function to revise the Doppler shifting. Simulation results proved that the function can correct the Doppler shifting effectively.

Key words: FMCW CSAR; large-scale high-velocity motion; Doppler shifting; compensation and correction

0 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种主动微波遥感设备, 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]。但是直线SAR在实际应用中受到分辨率的限制, 尤其是受到合成孔径长度的制约, 其方位分辨率难以提高。而圆周轨迹合成孔径雷达(CSAR)依靠其特殊的圆周孔径避免了增加合成孔径的困难, 又因为其观测角范围可以达到360°, 能够实现大范围成像, 使其成为研究热点。现有国内CSAR成像的研究大多停留在脉冲体制, 文献[2]提出了一种圆周轨迹近似直线的分段成像算法, 其算法简单, 但由于近似直

线处理成像分辨率较低; 文献[3]改进RMA算法能够较为准确地聚焦成像, 但插值的精度直接影响成像的精度且精度过高影响运算速度; 文献[4]在BP算法基础上进一步子孔径处理成像能够避免插值降低运算量。然而脉冲体制CSAR因结构复杂、制作成本高、体积大等原因无法安装在小型平台上, 限制了其应用范围, 而CSAR利用FMCW方式发射调频连续波周期积累时间长、功率低, 适于低空飞行且距离分辨率突破了带宽的限制, 较好地弥补了脉冲体制的不足, 拓展了CSAR的应用范围。

但是, 国内对于FMCW CSAR研究较少, 尤其是在运动中连续收发大带宽、长周期的线性调频信号时不满足“一步一停”模式, 导致多普勒频移在大场景高速运动下成像距离分辨率严重恶化。文献[5]介绍了FMCW SAR通过速度补偿函数能够较好地校正该频移, 但在CSAR体制下速度的方向不断改变, 该补偿函

收稿日期: 2015-12-04

修回日期: 2015-12-22

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。

数不再适用。针对此问题,本文建立了精确接收模型,推导了CSAR情况下的多普勒频移表达式,提出了一种新的补偿函数以校正多普勒频移,从而提高成像距离分辨率。

1 回波模型改进及分析

传统的调频连续波系统模型通过将接收信号与发射信号混频得到中频信号,再进行傅里叶变换即可实现距离压缩。在这种体制下,发射信号为

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

式中: f_c 为载波频率; γ 为线性调频信号的调频率。在“一步一停”近似的基础上,接收到的回波信号是发射信号在时间上的延迟,即

$$s_r(t) = e^{j2\pi[f_c(t-\tau) + 1/2\gamma(t-\tau)^2]} \quad (2)$$

式中,延迟 $\tau = \frac{2R(\theta)}{c}$, $R(\theta)$ 是雷达到目标的斜距(因雷达平台进行匀速圆周运动,方位上按角度采样), c 是电磁波传播速度。混频后得到中频信号为

$$s_{if} = e^{j2\pi(f_c \tau + \gamma \tau t + 1/2\gamma \tau^2)} \quad (3)$$

对式(3)进行傅里叶变换实现距离压缩。而雷达在高速运动中连续收发大时宽信号时“一步一停”模式不再适用,文献[6]提出一种高速运动下大时宽信号的精确接收模型为

$$s'_r(t) = \sqrt{\alpha} s_r(\alpha t) \quad (4)$$

式中, $\alpha \approx 1 + \frac{f_d}{f_c}$, f_d 近似为慢时间采样点 θ_m 的多普勒频率。忽略幅度的影响,收到的回波信号为

$$s_r(t; \theta_m) = e^{j2\pi[f_c \alpha(t-\tau_m) + 1/2\gamma \alpha^2(t-\tau_m)^2]} \quad (5)$$

式中: τ_m 是慢时间点 θ_m 对应的回波延时; t 是线性调频信号一个周期内的快时间。由式(1)可得差频信号为

$$s'_{if}(t; \theta_m) = \text{rect}(t/T) e^{j2\pi(f_c \alpha \tau_m + 1/2\gamma \alpha^2 \tau_m^2)} \times e^{j2\pi[f_c(1-\alpha)t + \gamma \alpha^2 \tau_m t - \gamma \alpha(1-\alpha)\tau_m t]} \times e^{j2\pi[\gamma(1-\alpha)t^2 - 1/2\gamma(1-\alpha)^2 t^2]} \quad (6)$$

式中, T 为调频连续波的周期。从式(6)中可以知道,第2个指数项表示的是关于距离的单频信号,由于多普勒效应使其产生了频率频移,第3个指数项体现了一个调频信号。由于实际中 $f_d \ll f_c$,式(6)可近似为

$$s'_{if} = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_c \tau_m - 1/2\gamma \tau_m^2)} \times e^{j2\pi(f_d t + \beta \gamma \tau_m t)} \times e^{j2\pi(\gamma \frac{f_d}{f_c} t^2)} \quad (7)$$

式中, $\beta = \alpha(2\alpha - 1) \approx 1$ 。根据驻相位原理对式(7)做快时间傅里叶变换得到频域表达式为

$$s'_{if}(f_r; \theta_m) = e^{j2\pi(f_c \tau_m - 1/2\gamma \tau_m^2)} \times \frac{1}{2} T \text{sinc}\left[\pi T(f_r - f_d - \gamma \tau_m)\right] \times \text{rect}\left(\frac{f_c f_r}{2\gamma f_d T}\right) e^{-j\pi\left(\frac{f_c f_r^2}{2\gamma f_d T} + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (8)$$

式中, sinc 函数包含距离徙动的影响,以及高速运动导致的频率偏移 f_d 。

2 CSAR 多普勒频移

由文献[7]可知,根据图1所示的星载SAR围绕地球运动的几何图可推导其多普勒频移为

$$f_{\text{dop}} = \frac{2}{\lambda R} \left(\frac{R_{gd} R_c}{R} + \frac{R_{cd} R_g}{R} \right) \quad (9)$$

$$R^2 = R_g^2 + R_c^2 - 2R_g R_c \cos \alpha \quad (10)$$

其中: R_g 为雷达运动半径; R_{gd} 为圆周运动的径向速度; R_{cd} 为目标的自转速度; R_c 为目标到场景中心的距离。考虑在较为简单的情况下对静止目标成像,式(9)只剩下一项,根据几何关系化简可得

$$f_{\text{dop}} = \frac{2v R_c}{\lambda R} \cos \xi \quad (11)$$

式中: ξ 为平台运动速度与目标径向的夹角; v 为雷达平台运动速度。由几何关系 $\frac{R_c}{R} \cos \xi = \sin \gamma \cos \alpha$ 知,当雷达刚好照射到目标时 $\gamma = \theta_a$, θ_a 为波束宽度。

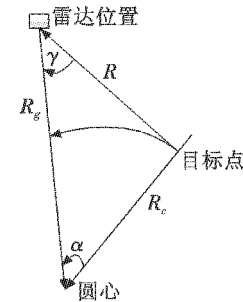


图1 雷达成像几何图

Fig. 1 Radar imaging geometry

当雷达匀速圆周运动时,对于不在圆心处的所有点都存在多普勒频移,有 $f_d = 2\omega R_g \sin \theta_a \cos \alpha / \lambda$ 。其中: ω 为雷达圆周运动的角速度; R_g 为雷达运动半径; α 为延迟前后目标与雷达之间的圆心角之差。在波束宽度和发射波长一定的情况下影响该频移的为雷达运动半径和运动角速度,即运动速度和成像范围。当最大多普勒频移没有超过 $1/M$ (M 通过实验取4或8)个频率分辨单元时,即 $2\omega R_g \sin \theta_a \cos \alpha / \lambda < 1/MT$,可以不用校正该频移进行后续处理完成聚焦成像;当最大多普勒频移大于 $1/M$ 个频率分辨单元时,多普勒频率导致的距离移动超出距离单元,同时也使得谱峰展宽如图2所示,需要对多普勒频移进行补偿才能较好聚焦成像。在高速运动平台大场景成像时,该现象较为明显需要进行补偿,因为在大场景高速运动下,载机运动在一个周期内引起的多普勒频移恶化了距离分辨率。

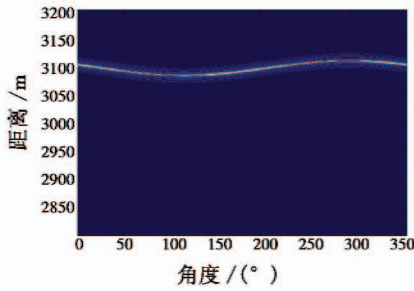


图 2 存在多普勒频移的距离压缩

Fig. 2 Range compression when Doppler shifting exist

3 多普勒频移的补偿

将式(7)变换到多普勒距离时间为

$$s(t; f_d) = \text{rect}(t/T) e^{j2\pi \frac{R_0}{\lambda} \sqrt{f_{dm}^2 - f_d^2}} \times e^{j2\pi [f_d t + \gamma \frac{2R_0}{c} (1 + \frac{f_d}{f_{dm} - f_d}) t]} \times e^{j2\pi (\gamma \frac{f_d}{f_c} t^2)} \quad (12)$$

式中： R_0 是目标到雷达航迹的最短距离； $f_{dm} = 2\omega R/\lambda$ 是雷达的最大多普勒频率。分析式(12)可知，在不考虑距离徙动的情况下，补偿周期内多普勒频移只需对 f_d 进行补偿。由式(7)知，多普勒效应的补偿函数为

$$H = e^{-j2\pi (\gamma \frac{f_d}{f_c} t^2 + f_d t)} \quad (13)$$

通过该补偿函数校正多普勒频移，校正后再利用现有的 CSAR 成像算法^[8-11]对其成像。

将上述算法总结如图 3 所示，得到原始数据后，将其表示成二维矩阵，在方位向得到多普勒时间域信号，然后用补偿函数补偿多普勒偏移，再变换回时域后用成像算法对 CSAR 模型成像。

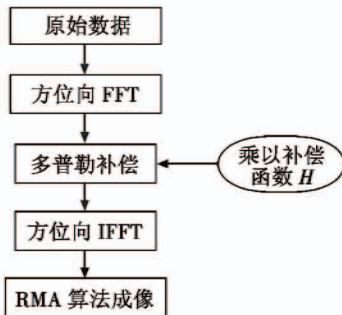


图 3 多普勒补偿流程图

Fig. 3 Doppler compensation tree

4 算法仿真

设雷达的发射波长为 0.054 4 m，波束宽度 0.108 8 rad，平台飞行高度 1000 m，成像场景半径 200 m，目标坐标为 (-50 m, 10 m, 0 m)。在不改变其他参数的情况下，只改变运动角速度和运动半径，仿真距离压缩情况。

1) 运动半径(3000 m)一定的情况下改变角速度。根据仿真图 4a 可知，在运动角速度 20 rad/s 的情况

下，二者几乎完全重合。因此周期内多普勒频移对距离偏移的影响可以忽略，不需补偿。根据仿真图 4b 可知，在运动角速度达到 200 rad/s 时出现两个波峰，且主瓣峰值低于第一旁瓣。这是因为，线性调频信号的带宽跨越了两个距离分辨单元，降低了距离分辨率，因此需要补偿周期内由于载机运动引起的多普勒频移以实现在高速运动情况下的聚焦成像。

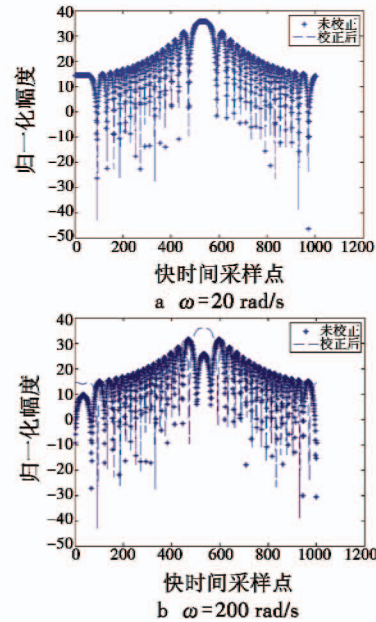


图 4 运动半径 3000 m 时的距离响应偏移

Fig. 4 Range compression shift when $R = 3000$ m

2) 运动角速度(200 rad/s)一定的情况下，改变运动半径。

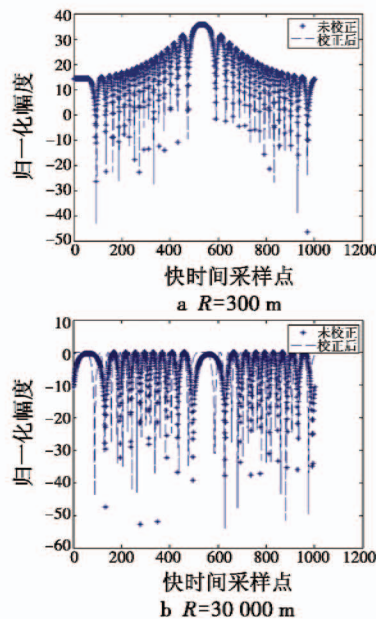


图 5 角速度为 200 rad/s 时的距离响应偏移

Fig. 5 Range compression shift when $\omega = 200$ rad/s

由图 5 可知，在高速的情况下加大半径会使谱峰

展宽、距离压缩点发生偏移进一步影响成像效果,需要校正以实现良好的聚焦成像。由仿真对比可以看出,通过补偿多普勒偏移可以将受影响的谱峰校正到正确的位置,并将分散的能量集中。

图6所示为对信号进行了多普勒频移补偿的距离压缩,可以看出,由于快时间调频信号项的存在导致距离压缩的展宽和偏移,补偿后可以看出,主瓣压缩比较明显,较好地校正了偏移。对比图7a和图7b可以看出,多普勒频移校正后成像聚焦效果明显,能够抑制旁瓣和谱峰展宽。

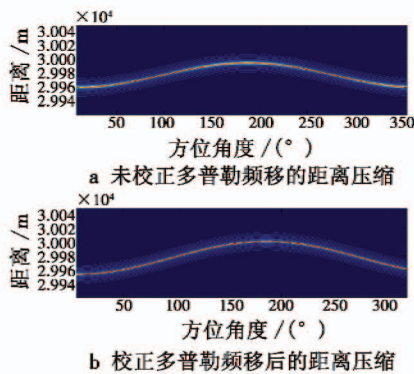


图6 多普勒频移对距离压缩的影响

Fig.6 Effect of the Doppler shift on range compression

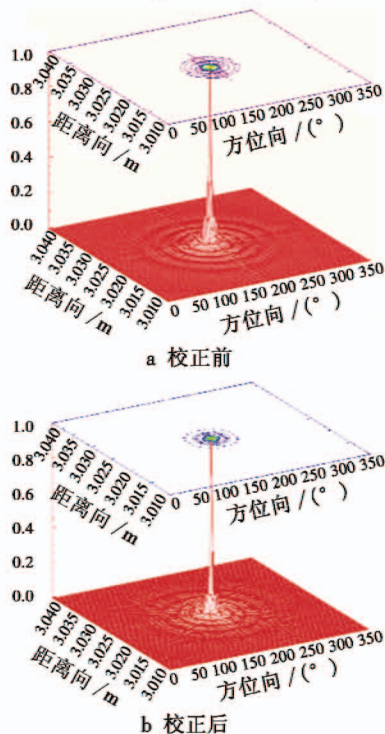


图7 校正前后点目标成像三维图

Fig.7 3D imaging before and after compensation

5 结论

针对多普勒频移对 FMCW CSAR 的成像影响,分

析了速度和场景大小对周期内多普勒频移的影响情况,指出在大场景高速运动情况下需要补偿该多普勒频移,为此提出了一种新的补偿函数以校正多普勒频移对成像的影响,通过仿真对比校正前后的距离压缩情况和点目标成像,有效证明了该补偿函数的有效性。

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. (BAO Z, XING M D, WANG T. Technique of radar imaging[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [2] 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. (ZHANG X K. Study on imaging mechanism and algorithm of high-resolution circular synthetic aperture radar[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Science, 2007.)
- [3] KOU L L, WANG X Q, CHONG J S, et al. Circular SAR processing using an improved omega-k type algorithm[J]. IEEE Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(4):572-579.
- [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. (LI H L, ZHANG L, BAO Z. Expediting back-projection for circular SAR imaging[J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(6):638-642.)
- [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, 2014, 11(10):1159-1164.
- [6] KROSCZYNSKI J J. Pulse compression by means of linear-period modulation[J]. IEEE Journal of Systems Engineering and Electronics, 1969, 57(7):1260-1266.
- [7] RANEY R K. Doppler properties of radars in circular orbits[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(9):1153-1162.
- [8] 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.
- [9] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2):124-135. (HONG W. Progress in circular SAR imaging technique[J]. Journal of Radars, 2012, 1(2):124-135.)

(下转第79页)

高,而采用连续方位旋转时,水平失准角的估计精度分别达到了 $1.5''$ 和 $1.0''$,显然采用连续旋转方位对准方案,水平失准角估计精度明显提高。

对于方位失准角的估计,从图 5 中可以看出,固定位置对准时,300 s 处方位角的估计精度约为 $22.3'$,采用最优双位置对准方案,300 s 时的估计精度为 $10.1'$,而引入最优三位置对准后,300 s 时方位角的估计精度可以达到 $7.7'$,采用连续方位旋转对准时,估计精度为 $3.2'$ 。从收敛速度上看,连续方位旋转对准方案收敛速度明显优于传统的两位置、三位置对准方案。表 1 给出了各种不同对准方案下误差角估计精度对比。

表 1 各种对准方法姿态角估计精度及其收敛时间
Table 1 The precision and time of attitude angle estimation by different alignment method

失准角	对准方式							
	单位置对准		两位置对准		三位置对准		连续旋转对准	
	精度	时间/s	精度	时间/s	精度	时间/s	精度	时间/s
ϕ_E	$21''$	100	$3.2''$	200	$1.8''$	120	$1.5''$	45
ϕ_N	$20.8''$	100	$2.3''$	110	$3.0''$	100	$1.0''$	40
ϕ_U	$22.3'$	210	$10.1'$	250	$7.7'$	260	$3.2'$	240

3 结束语

本文利用平台框架角运动方程建立状态方程,选取平台姿态角和加速度计输出作为观测量,通过 EKF 方法估计出平台的失准角。试验表明,本文提出的连续旋转自对准方法的对准精度及对准速度均明显优于传统的多位置对准。

参考文献

- [1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[J]. Spaceflight Mechanics, 2009, 134:1-26.
- [2] 万德钧,房建成. 惯性导航初始对准[M]. 南京:东南大学出版社,1998. (WAN D J, FANG J C. Initial alignment of inertial navigation[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1998.)
- [3] 唐江河,付振宪,邓正隆. 基于灵敏度分析的惯导平台参数分步辨识方法[J]. 宇航学报,2008, 29(6):1845-1851. (TANG J H, FU Z X, DENG Z L. The substep identification of inertial platform drift error coefficients base on sensitivity analysis[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6):1845-1851.)
- [4] 刘洁瑜,余志勇,汪立新,等. 导弹惯性制导技术[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010. (LIU J Y, YU Z Y, WANG L X, et al. Missile inertial guidance technology[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2010.)
- [5] BAR-ITZHACK I Y, PORAT B. Azimuth observability enhancement during inertial navigation system in-flight alignment[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1980, 3(4):337-344.
- [6] ANDREW D J. Continuous calibration and alignment techniques for an all-attitude inertial platform[R]. Key Biscayne: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1973.
- [7] 王荣颖,许江宁,卞鸿巍. 基于可观测性分析的方位旋转式惯导初始对准仿真研究[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(1):16-19. (WANG R Y, XU J N, BIAN H W. Initial alignment of azimuth rotating GINS based on observability analysis[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(1):16-19.)
- [8] 杨华波,蔡洪,张士峰,等. 高精度惯性平台连续自标定自对准技术[J]. 宇航学报,2006, 27(4):600-604. (YANG H B, CAI H, ZHANG S F, et al. Continuous calibration and alignment techniques for a high precision inertial platform[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(4):600-604.)
- [9] GELLER E S. Inertial system platform rotation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, 4(4):557-568.
- [10] 杨立溪. 惯性平台误差快速自标定技术[J]. 中国惯性技术学报,2000,8(4):1-4. (YANG L X. Rapid auto calibration for the error of inertial platform[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(4):1-4.)
- [11] 庞守宝,张晓玲,吴堃. 机载下视圆周 SAR 三维 BP 成像[J]. 电子科技,2010, 23(12):14-17. (PANG S B, ZHANG X L, WU K. Imaging of downward-looking 3D circle-SAR by BP algorithm[J]. Electronic Science and Technology, 2010, 23(12):14-17.)

(上接第 74 页)

- [10] 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.