

基于级数反演的斜视 FMCW SAR 成像算法研究

张双喜¹, 李 军², 张 磊¹, 邢孟道¹, 保 铮¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘 要: 在斜视调频连续波(FMCW)合成孔径雷达(SAR)成像中,斜距的三次项不仅会对相位产生影响,同时对包络也会有影响.如果不进行有效校正,将会影响到 SAR 图像的聚焦效果.针对这个问题,本文利用级数反演的方法推导出斜距展开到三次项时回波信号的距离多普勒频谱表达式,并在距离多普勒域上对三次项进行包络和相位滤波处理.此外,考虑到时域走动校正带来方位空变性问题,本文利用方位非线性变标算法(NCS)解决其沿方位空变性问题并给出结合运动补偿的实测数据处理的算法流程图.最后通过对多个点目标的场景进行仿真实验以及实测数据处理来验证本文成像算法的可行性和有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 调频连续波; 解线性调频; 非线性变标; 级数反演

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0532-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.019

Frequency Modulated Continuous Wave Squint Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm Based on Series Reversion

ZHANG Shuang-xi¹, LI Jun², ZHANG Lei¹, XING Meng-dao¹, BAO Zheng¹

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. The Measurement of Wireless Institute in Beijing, Beijing 100854, China)

Abstract: In the frequency modulated continuous wave(FMCW)squint synthetic aperture radar(SAR)imaging, not only the phases but also the envelopes of the echoes will be affected by the third term in range. If it isn't well-corrected, the performance of focusing for the SAR image will be deteriorated. Thus, the echo expression in the range-Doppler domain is presented by the series Reversion algorithm when the range expression comes to the third item. After that, a correction is implemented in the range-Doppler domain. In addition, considering the azimuth-variance in phase brought by the linear rang migration correction in azimuth time domain, the non-linear chirp scaling algorithm is utilized to solve the azimuth-variance problem. And a flowchart of the proposed FM-CW imaging algorithm with motion compensation for processing the real measured data is given in this paper. Finally, the simulated experiment with multiple point targets scenario and the imaging result of real measured data are utilized to validate the feasibility and effectiveness of the proposed imaging algorithm.

Key words: synthetic aperture radar(SAR); frequency modulated continuous wave(FMCW); dechirp; non-linear chirp scaling(NCS); series Reversion

1 引言

在机载雷达对地观测领域,装载于低空、小型无人机平台,飞行高度低、观测距离近的合成孔径雷达(SAR)越来越受到广泛的关注^[1~3].传统的合成孔径雷达采用脉冲体制,一般来说,脉冲体制雷达的构造较为复杂,并且成本高,体积大.而调频连续波(FMCW)雷达具有体积小,重量轻、造价低功耗小等特点^[4~10],与

SAR技术的结合促使了重量轻、成本低的短程高分辨成像雷达的诞生,使其易于安装在小型无人机上.同时由于发射峰值功率低,又具有低截获的特点.

鉴于调频连续波雷达具有以上的优点,国内外已有不少文献对调频连续波 SAR 成像算法进行研究.就成像算法而言其主要有改进的距离多普勒(RD)算法^[1]、频率变标(FSA)算法^[11]、波数域算法(w-k)^[9]、Chirp-Z 算法^[5]以及时域算法(BP)^[6]等.对于改进的距离多普勒成

像算法其最为代表性的是参考文献[1]提出的等效正侧视处理的成像算法,但其存在两点不足:一、仅仅考虑斜距三次项对方位相位的影响而忽略其对包络的影响,但对于大斜视、宽波束、远距离三次项对包络的影响是存在的;二、其考虑到时域走动校正带来方位空变,但其变标方式比较复杂.对于频率变标算法其难度在于对实测数据进行处理时需要进行高精度的运动补偿,以及在斜视模式下点目标还会存在沿距离方向上平移.此外,Chirp-Z算法,波束域算法(w-k)和时域算法(BP)对参数精度要求也比较高.

通过前面对现有 FMCW 成像算法的讨论,本文在现有的 FMCW 成像算法以及斜视成像算法^[12~14]基础上,针对录取的实测数据提出基于级数反演 FMCW 成像算法.考虑到参考文献[1]中成像算法的不足,提出将斜距公式展开三次项,利用级数反演的方法推导出 FMCW 回波信号的距离多普勒频谱表达式,并在距离多普勒域对三次项的包络和相位进行滤波处理,此时已经消除了斜距三次项对包络和相位的影响.接着利用非线性变标算法沿方位进行变标处理,以此来消除因在方位时域进行距离走动校正带来沿方位的空变性.最后给出了本文 FMCW 成像算法结合运动补偿^[15~18]对实测数据进行处理算法流程图.

2 调频连续波的信号形式

由文献[1]可得斜视 FMCW SAR 回波信号表达式为:

$$s(\bar{t}, t_m) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R + \frac{v(t_m - X_n) - R_0 v \sin\theta}{R} \bar{t}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R - R_{\text{ref}})\left(\bar{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R - R_{\text{ref}})^2\right] \quad (1)$$

其中 λ 为载频对应的波长, t_m 为方位时间, \bar{t} 代表距离时间, v 为平台速度, γ 为发射信号的调频斜率, θ 为斜视角, R_0 为平台到场景的最短距离, R_{ref} 为解线性调频时的参考距离, R 为瞬时斜距,其具体表达式为:

$$R = \sqrt{R_0^2 + v^2 \cos^2 \theta (t_m - X_n/v)^2} - (t_m - X_n/v) v \sin \theta + \frac{v^3 \cos^2 \theta \sin \theta}{2R_0^2} (t_m - X_n/v)^3 \quad (2)$$

在式(2)中 X_n 代表场景点的方位位置.由参考文献[10]可得:式(1)中第三个指数项为 RVP 项,对于 FMCW 而言,该项的影响可以忽略.由式(1)和式(2)可得,在式(1)中的第二个指数项包含线性距离走动分量项,先将其中的线性走动分量加以校正,同时校正多普勒中心,相应的参考函数为:

$$H_{\text{Walk, Fdc}}(\bar{t}, t_m) = \exp\left[j\frac{4\pi}{c}\gamma\Delta R(t_m)\left(\bar{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) + j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right] \quad (3)$$

在式(3)中 $\Delta R(t_m) = -vt_m \sin\theta$. 补偿后,目标的等效斜距与 t_m 的关系为:

$$R_l(t_m; R_0) = R_0 + X_n \sin\theta + \frac{v^2 \cos^2 \theta (t_m - X_n/v)^2}{2R_0} + \frac{v^3 \cos^2 \theta \sin \theta}{2R_0^2} (t_m - X_n/v)^3 \quad (4)$$

通过上述补偿后,相当于速度变为 $v \cos\theta$,多普勒中心也从原来的 $f_{dc} = 2v \sin\theta/\lambda$ 补偿为零.补偿后基频回波信号变为:

$$s(\bar{t}, t_m) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_l(t_m; R_0)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v(t_m - X_n) - R_0 v \sin\theta}{R} \bar{t}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_l(t_m; R_0) - R_{\text{ref}})\left(\bar{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \quad (5)$$

令 θ' 为平台到点目标的瞬时斜视角,则有如下关系:

$$\sin\theta' = \frac{(vt_m - X_n - R_0 \sin\theta)}{R(t_m; R_0)} \quad (6)$$

点目标的瞬时多普勒频率(瞬时斜视对应的点目标的瞬时频率)为:

$$f'_d = -\frac{2v \sin\theta'}{\lambda} \quad (7)$$

由此可以把式(5)进行进一步简化为:

$$s(\hat{t}, t_m) = \exp\left[j2\pi f'_d \hat{t}\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{c}\gamma R_{\text{ref}}\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\left(f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)R_l(t_m; R_0)\right] \quad (8)$$

3 基于级数反演的距离多普勒谱推导、三次项校正和瞬时多普勒平移校正

在这里首先对级数反演方法进行简要介绍,对于一个给定函数,如式(9):

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots \quad (9)$$

在式(9)中假设其常数项系数 $a_0 = 0$,其所对应的反函数为:

$$x = A_1 y + A_2 y^2 + A_3 y^3 + \dots \quad (10)$$

把式(10)代入式(9)可得:

$$y = a_1 A_1 x + (a_2 A_1^2 + a_1 A_2) y^2 + (a_3 A_1^3 + 2a_1 A_1 A_2 + a_1 A_3) y^3 \dots \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1^{-1} \\ A_2 &= -a_1^{-3} a_2 \\ A_3 &= a_1^{-5} (2a_2^2 - a_1 a_3) \end{aligned} \quad (12)$$

在这一节中,我们将利用级数反演的方法对距离多普勒谱进行推导.从式(8)中,我们可以看出第三个

指数项和方位时间 t_m 有关,而前面两项可以近似与方位时间无关.对此我们在推导方位频谱时只需对该项进行推导,而其他两项认为是常数保持不变.由驻相点原理可得:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{c}\left(f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right) R_l(t_m; R_0) - 2\pi f_a t_m \quad (13)$$

$$\frac{d\varphi}{dt_m} = 0 \quad (14)$$

由式(9)到式(14)可得:

$$\begin{aligned} \varphi = & -\frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{c}\left(f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right) \\ & + \frac{\pi c R_0}{2v^2 \cos^2\theta} \frac{1}{\left(f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)} f_a^2 \\ & + \frac{\pi c^2 \sin\theta R_0}{4v^3 \cos^4\theta} \frac{1}{\left(f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)} 2f_a^3 - 2\pi f_a \frac{X_n}{v} \end{aligned} \quad (15)$$

由式(8)和式(15)可得:

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, f_a) = & \exp[j2\pi f_a' \hat{t}] \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi c R_0}{2v^2 \cos^2\theta}\left(\frac{1}{f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}\right) f_a^2\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi c^2 \sin\theta R_0}{4v^3 \cos^4\theta}\left(\frac{1}{f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}\right) 2f_a^3\right] \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)可以进一步化为:

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, f_a) = & \exp[j2\pi f_a' \hat{t}] \cdot \exp\left(-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right) \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j\frac{\pi \lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} f_a^2\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi \lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} \left(\frac{1}{\left(\frac{\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}{1 + \frac{\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}{f_c}}\right) - 1}\right) f_a^2\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi c^2 \sin\theta R_0}{4v^3 \cos^4\theta} \left(\frac{1}{f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}\right) 2f_a^3\right] \end{aligned} \quad (17)$$

忽略二次距离徙动以及三次项沿距离空变性,二次距离徙动校正以及三次项补偿函数为:

$$\begin{aligned} H_{\text{RMC, SRC, 3ord}}(\hat{t}, f_a) = & \\ \exp\left[-j\frac{\pi \lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} \left(\frac{1}{\left(\frac{\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}{1 + \frac{\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)}{f_c}}\right) - 1}\right) f_a^2\right] & \end{aligned}$$

$$\cdot \exp\left[-j\frac{\pi c^2 \sin\theta R_0}{4v^3 \cos^4\theta} \frac{1}{\left(f_c + \gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)} 2f_a^3\right] \quad (18)$$

把式(17)乘以式(18)可得:

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, f_a) = & \exp[j2\pi f_a' \hat{t}] \cdot \exp\left(-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right) \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j\frac{\pi \lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} f_a^2\right] \end{aligned} \quad (19)$$

由于每一个多普勒频率单元对应着瞬时多普勒频率,即对应着一定的瞬时斜视角.在方位多普勒域构造瞬时多普勒平移校正参考函数,参考函数为:

$$H_{\text{DFS}}(\hat{t}, f_a) = \exp(-j2\pi f_a' \hat{t}) \quad (20)$$

把式(19)乘以式(20)就可以对式(8)中的第一个指数项进行校正.对多普勒平移校正之后的信号沿距离向进行傅里叶变换可得:

$$\begin{aligned} s(f_r, f_a) = & \exp\left(-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} f_r\right) \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j\frac{\pi \lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} f_a^2\right] \\ & \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\right)\right] \end{aligned} \quad (21)$$

对式(21)乘以相位保持函数 $H_{\text{PMF}}(f_r, f_a)$, 补偿参考距离的影响,补偿函数为:

$$H_{\text{PMF}}(f_r, f_a) = \exp\left(j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} f_r\right) \quad (22)$$

把式(21)乘以式(22)可得:

$$\begin{aligned} s(f_r, f_a) = & \exp\left(-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right) \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi \lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} f_a^2\right] \\ & \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\right)\right] \end{aligned} \quad (23)$$

图 1(a)所示为斜视模式下不考虑距离三次项对包络影响的距离脉压图,此时一次走动和二次弯曲已经得到校正,从图中可以看出包络还存在越距离单元走动,使得点目标能量分布在多个距离单元内.这是由于距离三次项未得到有效校正带来的.由于斜距三次项对于方位时间来说是个奇函数,所以未进行三次包络校正的包络形状也是奇对称的几何图.图 1(b)所示为利用本文方法进行三次项校正之后的结果图,从图中可以看出点目标信号能量基本集中在一个距离单元以内.这说明本文提出的三次项校正方法是有效的.

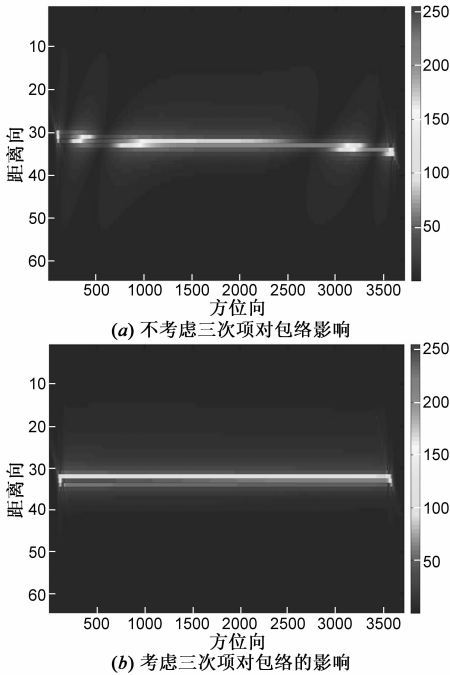


图1 斜视模式下不考虑和考虑三次项对包络影响的距离脉压比较图

4 利用方位非线性 CS 进行方位空变性处理

把式(23)所表示的信号进行 $f_a \rightarrow t_m$ 的逆傅里叶变换,将信号变换到 $f_r - t_m$ 域,则有:

$$s(f_r, t_m) = \exp\left[-j \frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi v^2 \cos^2\theta}{\lambda R_0} \left(t_m - \frac{X_n}{v}\right)^2\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\right)\right] \quad (24)$$

从式(24)可以看出由于走动校正带来点目标 X_n 沿距离向上存在 $X_n \sin\theta$ 的偏移,即原来处于斜距为 R_0 的点目标 X_n ,经距离走动校正之后其等效斜距变为 $R_0 + X_n \sin\theta$,而其方位调频斜率仍为 $-\frac{2v^2 \cos^2\theta}{\lambda R_0}$. 如果对点目标 X_n 用调频斜率为 $-\frac{2v^2 \cos^2\theta}{\lambda(R_0 + X_n \sin\theta)}$ 构造方位脉压参考函数进行方位脉压,将会使得该点目标出现散焦. 这是点目标沿方位存在空变性的原因. 对此可以利用非线性 CS 算法沿方位向上进行变标处理.

令 $R_s = R_0 + \sin\theta \cdot X_n$, 假定 $t_n = \frac{X_n}{v}$ 为点目标 X_n 对应方位参考中心的时间偏移,则点目标 X_n 的方位多普勒调频率为:

$$\gamma_m(R_s) = -\frac{2v^2 \cos^2\theta}{\lambda R_0}$$

$$\approx -\frac{2v^2 \cos^2\theta}{\lambda R_s} - \frac{2v^3 \cos^2\theta \sin\theta}{\lambda R_s^2} t_n = \gamma_{m\text{ref}} + k_{\text{SAC}} t_n \quad (25)$$

$\gamma_{m\text{ref}}$ 为参考多普勒调频率,采用 $\gamma_{m\text{ref}}$ 对同一距离单元具有不同调频率的目标进行匹配滤波,调频率的误差会使边缘处目标的方位聚焦性能恶化, k_{SAC} 为二次方位脉压因子:

$$k_{\text{SAC}} = -\frac{2v^3 \cos^2\theta \sin\theta}{\lambda R_s^2} \quad (26)$$

式(24)可以进一步改写为:

$$s(f_r, t_m) = \exp\left[-j \frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j\pi\gamma_m(R_0)(t_m - t_n)^2\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\right)\right] \quad (27)$$

确定扰动方程的非线性 CS 因子:

$$H_1(f_r, t_m) = \exp\left(j \frac{2\pi}{3} q t_m^3\right) \quad (28)$$

把式(28)乘以式(27),并沿方位进行 $t_m \rightarrow f_a$ 的傅里叶变换,可得:

$$s(f_r, f_a; R_0) = \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\right)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \exp\left(-j \frac{2\pi f_a X_n}{v}\right) \cdot \exp\left[-j\pi\left(\frac{1}{\gamma_m} - \frac{2q t_n}{\gamma_m^2}\right) f_a^2\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left(\frac{q f_a^3}{3\gamma_m^3} + \frac{q t_n^3}{3}\right)\right] \cdot \exp\left(j2\pi \frac{q t_n^2 f_a}{\gamma_m}\right) \quad (29)$$

从第三个指数项可得进行非线性 CS 操作后,多普勒调频率应该被补偿为参考值,则有:

$$\frac{1}{\gamma_{m\text{ref}}} = \frac{1}{\gamma_m} - \frac{2q t_n}{\gamma_m^2} \quad (30)$$

要将不同的多普勒调频率补偿为参考值,需要满足式(30),则:

$$q = -\frac{k_{\text{SAC}}}{2} \quad (31)$$

把式(31)代入式(29)可得:

$$s(f_r, f_a; R_0) = \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin\theta)\right)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi f_a X_n}{v}\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{q f_a^3}{3\gamma_m^3}\right) \cdot \exp\left(j \frac{R_s \lambda}{2v^2 \cos^2\theta} f_a^2\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{q t_n^3}{3}\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{q t_n^2 f_a}{\gamma_m}\right) \quad (32)$$

构造三次方位脉压参考函数为:

$$H_3(f_r, f_a) = \exp\left(-j2\pi \frac{qf_a^3}{3\gamma_{mref}^3}\right) \quad (33)$$

并构造方位脉压参考函数为:

$$H_{AZI} = \exp\left[-j \frac{\pi\lambda R_0}{2v^2 \cos^2\theta} f_a^2\right] \quad (34)$$

把式(33)乘以式(34)、式(30),并进行 $f_a \rightarrow t_m$ 的傅里叶变换,得:

$$s(f_r, t_m) = \text{sinc}\left[\pi T_p\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{ref} + X_n \sin\theta)\right)\right] \cdot \exp\left(j2\pi \frac{qt_n^3}{3}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi(R_0 + X_n \sin\theta)}{\lambda}\right] \cdot \text{sinc}\left[\Delta f_a\left(t_m - \frac{X_n}{v} - \frac{qt_n^2}{\gamma_m}\right)\right] \quad (35)$$

此时可以得到聚焦好的 SAR 图像.然而对于斜视 SAR 而言,时域走动校正以及斜视角的存在会带来图像的几何形变,对此还需要对式(35)所表示的 SAR 图像进行几何形变校正.考虑到在实际机载 FMCW SAR 系统中,载机存在运动误差.对此,我们在对数据处理过程中需要对回波数据进行运动补偿^[15~18].图2中给出了结合运动补偿的 FMCW 斜视成像算法流程图,本文是利用该算法流程对实测数据进行处理.

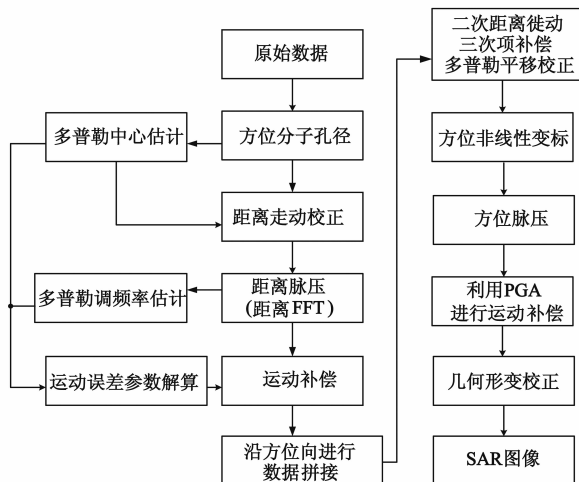


图2 结合运动补偿的FMCW斜视SAR成像算法流程图

5 斜视模式下多个点目标仿真成像结果

仿真参数:信号带宽 $B = 600\text{MHz}$,雷达工作在 ku 波段,扫频周期 $T_p = 1\text{ms}$,载机速度 $v = 100\text{m/s}$,场景中心斜距 $R_s = 2.5\text{km}$,斜视角 $\theta = 45^\circ$,距离采样率 $F_s = 4\text{MHz}$.点目标分布如图3所示.

图4为没有利用 NCS 沿方位进行变标成像结果,从图4(a)可以看出只有三个点目标得到比较好聚焦,其它点目标存在不同程度的散焦,这是由于当雷达波束中心线扫过场景中心点时,这三个点目标都处在波

束中心线上.由于这三个点目标不存在方位空变的问题,其才能得到比较好的聚焦效果.而其他点目标都存在方位空变性,所以存在不同程度的散焦.为了进一步分析边界点的聚焦效果,把图4(a)椭圆区域的点取出来进行16倍插值后得到如图5(a)所示.从图5(a)中可以看出该点目标沿方位向已经裂开为两个点目标.图6为利用本文方法进行成像之后的结果,图6(a)为没有进行几何形变校正的成像结果,从图6(a)中可以看出所有的点目标到取得较好成像效果,图6(b)为进行几何形变校正之后的成像结果.由于边界点有可能出现聚焦性能恶化,对此我们取出和图4(a)对应的边界点进行聚焦性能分析.对该点目标进行16倍插值,如图5(b)所示.从图中可以看出点目标的聚焦性能良好,此外其沿距离的峰值旁瓣比为 -13.21dB ,而方位的峰值旁瓣比为 -13.20dB ,这说明本文所提的方法的有效性和可行性.接下来我们将利用实测数据对本文算法进行验证.

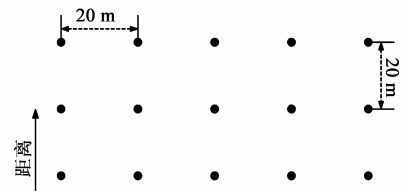
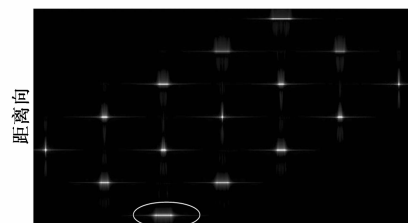


图3 点目标分布示意图

6 实测数据处理结果

在实际的数据录取过程中雷达工作在 ku 波段,载机速度 $v = 45\text{m/s}$,发射信号带宽 $B = 320\text{MHz}$,扫频周期 $T_p = 0.5\text{ms}$,场景中心斜距 $R_s = 1.5\text{km}$,距离采样率 $F_s = 16\text{MHz}$.



方位向
(a) 几何形变校正之前



方位向
(b) 几何形变校正之后

图4 没进行方位非线性变标成像结果

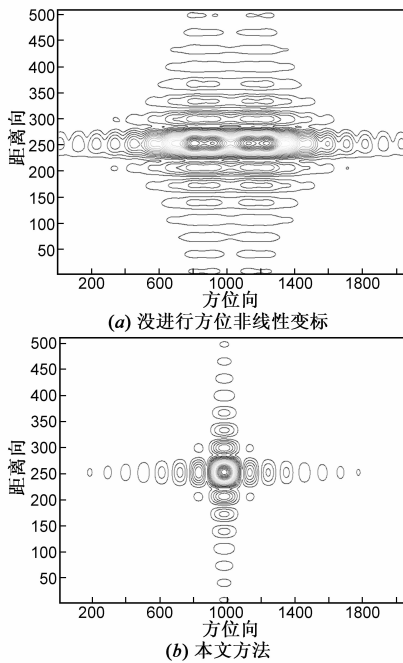


图5 椭圆区域对应的插图

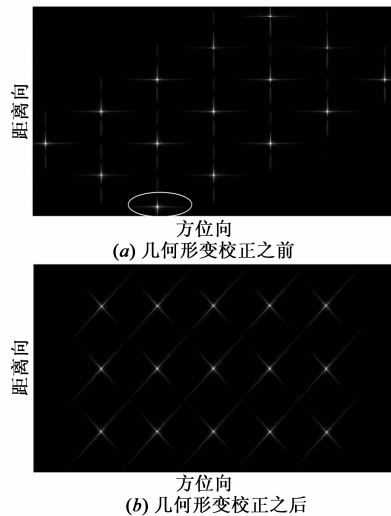


图6 利用NCS沿方位进行变标成像结果

图 7 所示为斜视模式下,利用本文方法对实测数据的进行成像的成像结果,成像场景为城区的建筑物道路和广场.从图中可以看出整个图像聚焦效果良好,成像场景比较清晰,道路,建筑物清晰可见.这说明利用本文算法对实测数据进行处理,可以取得好的成像质量.为了说明方位非线性变标的必要性,我们对图 7 中的矩形区域进行分析,对分析的图像不进行几何形变校正.图 8 所示是图 7 矩形区域的局部放大图,图 8(a) 为不沿方位进行变标处理,直接成像的结果图,从图中可以看出点目标明显存在散焦现象.图 8(b) 为本文方法的处理结果即沿方位进行非线性变标成像结果图.比较图 8(a) 和图 8(b) 中的椭圆和矩形区域,可以看出利用本文方法得到的图像中该区域的聚焦效果明显改

善很多.这说明沿方位进行非线性变标处理的必要性以及本文方法的有效性.

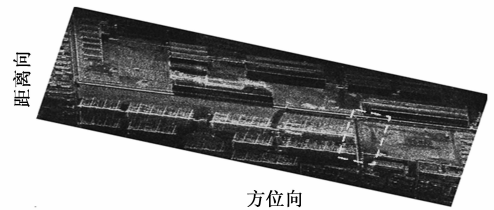
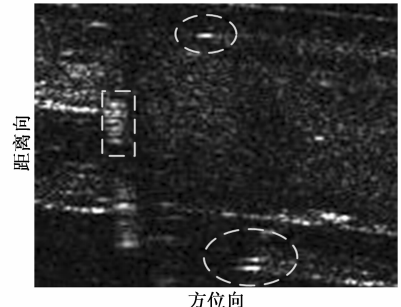
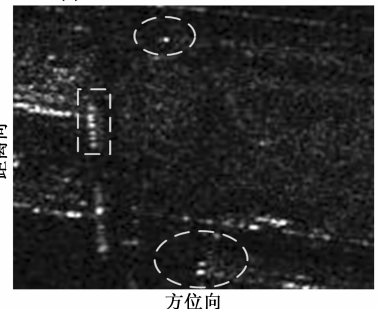


图7 实测数据的成像结果



(a) 没进行方位非线性变标成像结果



(b) 利用NCS沿方位进行变标成像结果

图8 图7中方框区域对应的局部放大图

7 结论

本文从斜距公式出发,利用级数反演的方法推导出斜视模式下 FMCW SAR 回波信号的距离多普勒谱的表达式.由此提出考虑斜距公式中三次项对包络影响的 FMCW 斜视 SAR 成像算法.接着考虑到在斜视情况下沿方位时域进行走动校正会带来方位空变性问题,本文利用沿方位进行非线性变标操作来解决这个问题.考虑到 FMCW 实测数据录取过程中平台运动误差,本文给出了结合运动补偿的实测数据处理的流程图.最后通过在斜视模式下的多个点目标仿真实验和实测数据的处理结果来验证本文提出的 FMCW 成像算法的可行性和有效性.

参考文献

[1] 梁毅,郭亮,邢孟道,保铮.一种斜视 FMCW SAR 的等效正侧视处理方法[J].电子学报,2009,37(6):1159-1164.
Liang Yi, Guo Liang, Xing Mengdao, Bao Zheng. An equivalent side-looking method for squint FMCW SAR[J]. Acta Elec-

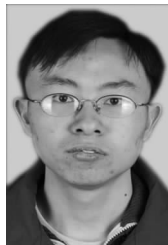
- tronica Sinica, 2009, 37(6): 1159 – 1164. (in Chinese)
- [2] 刘安娜, 陈力, 赵斐, 匡纲要. 基于 DPCA-FrFT 的三通道 SAR-GMTI 方法[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2091 – 2097.
Liu Anna, Chen Li, Zhao Fei, Kuang Gangyao. Study on DP-CA-FrFT based multi-channel SAR-GMTI[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2091 – 2097. (in Chinese)
- [3] 俞根苗, 尚勇, 邓海涛, 等. 弹载侧视合成孔径雷达信号分析及成像研究[J]. 电子学报, 2005, 33(5): 778 – 782.
Yu genmiao, Shang Yong, Deng Haitao, et al. Signal analysis and imaging processing of missile-borne side-looking SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 778 – 782. (in Chinese)
- [4] 杨明磊, 陈伯孝, 等. 多载频 FMCW 在 MIMO 雷达中的应用研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2351 – 2356.
Yang Minglei, Chen Baixiao, et al. Study on application of multiple carrier frequency FMCW in MIMO radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2351 – 2356. (in Chinese)
- [5] Yue Liu, Yunkai Deng, Robert Wang. Focus squint FMCW SAR data using inverse chirp-Z transform based on an analytical point target reference spectrum[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(5): 866 – 870.
- [6] Angel Ribalta. Time-domain reconstruction algorithms for FM-CW-SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 396 – 400.
- [7] Jiang Z H, Huangfu K, Wan J W. A chirp transform algorithm for processing squint mode FMCW SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(3): 377 – 381.
- [8] Jiang Z H, Cheng Z, Wan J W, Huangfu K. Improved nonlinear frequency scaling algorithm for squint FMCW SAR[J]. Electronics Letter, 2007, 18(43): 996 – 998.
- [9] R Wang, O Loffeld, H Nies, S Knedlik, M Hagelen, H Essen. Focus FMCW SAR data using the wave number domain algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2109 – 2118.
- [10] A Meta, P Hoogeboom. Signal processing algorithms for FM-CW moving target indicator synthetic aperture radar[A]. Proceedings of IGARSS'05[C]. Seoul, Korea, 2005. 316 – 319.
- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [12] 黄源宝, 保铮. 大斜视 SAR 成像的一种新的二维可分离处理方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(1): 1 – 5.
Huang Yuanbao, Bao Zheng. A new two-dimension-separated approach to high squint SAR processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(1): 1 – 5. (in Chinese)
- [13] 李悦丽, 梁甸农, 黎向阳. 一种改进方位向非线性 CS 大斜视角 SAR 成像算法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 62 – 67.
Li Yueli, Liang Diannong, Li Xiangyang. A refined azimuth nonlinear chirp scaling algorithm for high squint SAR imaging[J]. Journal of National University Defense Technology, 2008, 30(5): 62 – 67. (in Chinese)
- [14] 王亮, 练有品, 等. 大斜视与大波束角 SAR 成像比较[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1672 – 1676.
Wang Liang, Lian Youpin, et al. Comparison of large-squint and large-beamwidth SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1672 – 1676. (in Chinese)
- [15] Evan C Zaugg, David G Long. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 46(10): 2990 – 2998.
- [16] W G Carrara, R S Goodman, R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Boston, MA: Artech House, 1995. 245 – 254.
- [17] Mengdao Xing, Xiuwei Jiang, Renbiao Wu. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2870 – 2883.
- [18] Gianfranco Fornaro, Giorgio Franceschetti, Stefano perma. Motion compensation errors: Effects on the accuracy of airborne SAR images[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(4): 1338 – 1352.

作者简介



张双喜 男, 1984 年出生于福建东山. 2004 年就读于西安电子科技大学, 2008 年获学士学位, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室在读博士研究生, 主要从事 SAR、高分辨宽测绘 SAR 成像及其干扰抑制的研究.

E-mail: shuangxizhang1984@163.com



李 军 男, 1982 年出生于湖北宜都市. 2002 年就读于西安电子科技大学电子工程学院, 2006 年获学士学位, 2011 年获西安电子科技大学博士学位, 现为北京无线电测量研究所工程师, 主要研究方向: 雷达成像.

E-mail: lijun@mail.xidian.edu.cn