

基于 MLBF 的毫米波双站 SAR 前视 Omega-k 成像算法

马 超, 张小虎, 杨建超, 顾 红, 苏卫民

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:结合毫米波体制和双站毫米波合成孔径雷达(SAR)前视成像技术,开展毫米波双站 SAR 前视成像算法的研究.在双站 SAR 前视成像系统中,较大的前视角引入了多普勒质心偏移和严重的距离徙动,因此普通双站 SAR 的成像算法无法直接移植到双站 SAR 前视成像中.针对以上问题,论文首先提出了一种基于瞬时多普勒分析的改进 Loffeld's Bistatic Formula (MLBF) 二维频谱求解方法,相比于现有方法,该方法能更准确的得到双站 SAR 前视回波信号的二维频谱.在此基础上又推导出了适用于毫米波双站 SAR 前视成像的 Omega-k 算法;最后通过仿真实验,验证了提出算法的有效性和优越性.

关键词:双站合成孔径雷达;前视成像;MLBF;Omega-k 算法

中图分类号:TN958 **文献标识码:**A

Omega-k algorithm based on MLBF for millimeter wave bistatic forward-looking SAR imaging

MA Chao, ZHANG Xiao-Hu, YANG Jian-Chao, GU Hong, SU Wei-Min

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper combines millimeter-wave and bistatic forward-looking synthetic aperture radar (BFSAR) techniques, carrying out the research of imaging algorithms for millimeter-wave BFSAR. However, imaging algorithms for BFSAR are the difficulties in this study. Due to the special forward-looking geometry, imaging algorithms for bistatic SAR can not be applied to BFSAR directly. So, this paper proposes a modified Loffeld's Bistatic Formula (MLBF). The new method compared with other extended Loffeld's Bistatic Formula (ELBF) can obtain a bistatic point target reference spectrum, which is accurate enough for bistatic forward-looking configuration. Then, an Omega-k algorithm based on the reference spectrum is derived. Finally, simulations validate the accuracy of the MLBF method and the effectiveness of the Omega-k imaging algorithm.

Key words: bistatic SAR, forward-looking imaging, modified Loffeld's Bistatic Formula (MLBF), Omega-k algorithm

PACS: 84.40.Xb

引言

双站毫米波合成孔径雷达(SAR)^[1-2]前视成像弥补了单站 SAR^[3]前视成像的不足,并且该技术有

着较大的潜在应用价值,比如飞机的导航和盲降以及军事应用等,因此受到了越来越多的关注.国外最先开展了对双站 SAR 前视成像的研究,一些关于双站 SAR 前视成像的特性和可行性在文献[4-5]中进

收稿日期:2016-08-02,修回日期:2016-12-13

Received date: 2016-08-02, revised date: 2016-12-13

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20160847),国家自然科学基金(61471198)

Foundation items: Supported by Jiangsu Province Natural Science Foundation of China (BK20160847), and National Natural Science Foundation of China (61471198)

作者简介(Biography): 马超(1988-),男,湖北武汉人,讲师,博士,主要研究领域为:高分辨 SAR 成像系统、数字信号处理. E-mail: nust_macao@126.com

行了分析. 最新的有关双站 SAR 前视成像的实验结果在文献[6-7]中做了报道. 但这些实验不足之处在于, 使用的成像算法大都为时域的后向投影算法 (BP), 该算法的计算量大, 用于实时成像系统时对硬件的要求较高.

双站 SAR 前视的几何结构与普通双站 SAR 相比, 由于天线前视的关系, 引起了更严重的距离徙动和多普勒质心偏移, 而且往往前视角比较大. 因此普通双站 SAR 的成像算法不能直接应用于双站 SAR 前视成像中, 开发更快的成像算法成为了研究双站 SAR 前视成像的重点. 目前已有用于双站 SAR 前视成像的算法研究报道, 文献[8]针对发射天线固定、接收天线运动的双站 SAR 前视成像系统, 提出了适用于该系统的距离多普勒 (RD) 算法. 同样, 文献[9]基于 ELBF 方法推导出的二维频谱, 提出一种改进的距离多普勒算法. 文献[10]使用勒记德多项式 (MLPE), 推导出了用于双站 SAR 前视成像的 Chirp scaling (CS) 算法. 然而 RD 算法和 CS 算法在对场景进行成像时, 都采用雷达到场景中心目标的斜距做为参考距离, 并用该参考距离构造匹配滤波器. 因此最终的成像结果为: 场景中心的目标得到了完全聚焦, 但其它的目标离场景中心越远, 则聚焦的效果越差, 尤其是当系统前/斜视角越大时, 聚焦深度低的问题变得尤为突出.

Omega-k 算法可以避免以上问题, 它是在二维频域上通过插值来校正距离方位耦合与距离时间、方位频率的依赖关系, 因此 Omega-k 算法很适合用于大前/斜视角成像系统. 文献[11]通过旋转和平移前视接收天线的运动轨迹, 并对发射天线的运动轨迹进行重采样, 将双站 SAR 前视几何结构改变成了双站 SAR 侧视结构, 因此可以直接将普通双站 SAR 的 Omega-k 算法移植过来. 文献[12]使用常规 SAR 的 Omega-k 算法, 该算法使用等效相位中心来近似取代两个分离的发射天线和接收天线. 当发射与接收天线相距较远时, 这种近似无疑会带来较大的误差. 由此可见, 以上两种算法都是将双站 SAR 前视成像近似为其它易处理的成像几何结构, 然后使用现有的 Omega-k 算法, 这样的近似限制了算法的使用范围. 文献[13]基于 ELBF 方法, 精确的推导出了 Omega-k 算法, 但该算法无法应对接收天线前视角较大的情形.

毫米波 SAR 与低频段的 SAR 相比, 更容易获得大的信号带宽以及多普勒带宽, 因此具有更高的距离和方位向分辨率. 而在获取相同多普勒带宽的

情形下, 毫米波 SAR 需要的合成孔径时间也更短, 可以显著缩短成像所需时间. 由于波长短, 毫米波 Ka 波段天线的尺寸仅为 X 波段的 1/4, 使得毫米波 SAR 系统具有体积小、重量轻的优势. 同时, 雷达工作频段越高, 目标轮廓效应就越明显, 毫米波 SAR 能更清晰的获取目标轮廓几何特性[3]. 毫米波 SAR 的优点将使其逐步成为雷达成像技术发展的重要方向, 然而目前对毫米波双站 SAR 前视成像技术研究的报道还不多.

论文结合毫米波体制和双站 SAR 前视成像技术, 开展毫米波双站 SAR 前视成像算法的研究, 并针对以上提出的双站 SAR 前视成像算法存在的问题, 首先提出了一种基于瞬时多普勒分析的改进 Loffeld's Bistatic Formula (MLBF) 二维频谱求解方法, 该方法在接收天线前视角较大的情形下, 仍能精确的得到回波信号的二维频谱. 然后, 基于得到的信号二维频谱, 推导出适用于毫米波双站 SAR 前视成像的 Omega-k 算法. 最后通过仿真实验, 与现有的 Omega-k 算法相比较, 验证了本文算法的有效性和优越性.

1 MLBF 算法

本文研究的毫米波双站 SAR 前视成像几何关系如图 1 所示. 其中发射天线工作在侧视模式, 接收天线工作在前视模式, 两个天线分别以速度 v_T 、 v_R 沿 y 轴正方向运动; t 和 τ 分别是距离向时间和方位向时间; τ_{OT} 和 τ_{OR} 分别是发射天线和接收天线的零多普勒时间; r_{OT} 和 r_{OR} 分别是发射天线和接收天线到点目标 P 的最近距离; $R_T(\tau)$ 和 $R_R(\tau)$ 分别是发射天线和接收天线到点目标 P 的瞬时斜距; 当点目标经过波束中心时刻 τ_c 时, 发射天线的斜视角为 θ_{Tc} , 接收天线的前视角为 θ_{Rc} .

假设发射天线发射的是线性调频信号 (LFM), 经过解调后点目标 P 的回波为

$$g(t, \tau) = \sigma_p w_r \left(t - \frac{R_T(\tau) + R_R(\tau)}{c} \right) w_a (\tau - \tau_c) \exp \left\{ j\pi k_r \left(t - \frac{R_T(\tau) + R_R(\tau)}{c} \right)^2 \right\} \exp \left\{ -j2\pi \frac{R_T(\tau) + R_R(\tau)}{\lambda} \right\}, \quad (1)$$

其中瞬时斜距 $R_T(\tau)$ 和 $R_R(\tau)$ 的表达式为:

$$R_T(\tau) = \sqrt{r_{OT}^2 + (\tau - \tau_{OT})^2 v_T^2}, \quad (2)$$

$$R_R(\tau) = \sqrt{r_{OR}^2 + (\tau - \tau_{OR})^2 v_R^2}. \quad (3)$$

式(1)中, σ_p 为点目标 P 的后向散射系数, w_r 和 w_a

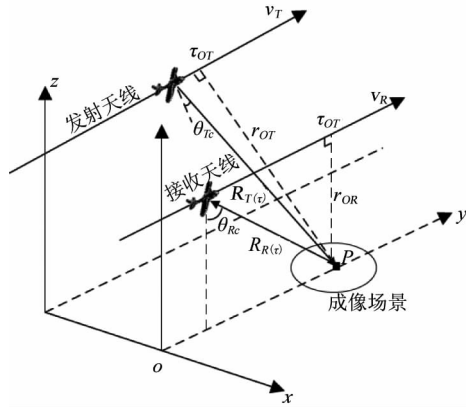


图1 毫米波双站 SAR 前视成像几何模型
Fig. 1 Geometry of bistatic forward-looking SAR

分别为距离向和方位向的窗函数, c 为光速, f_0 和 λ 分别为载波频率和波长, k_r 是 LFM 信号的调频率. 对式(1)做二维傅里叶变换, 可得

$$g(f, f_r) = \sigma_p w_r(f) \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{k_r}\right\} \int w_a(\tau - \tau_c) \exp\{-j\phi_b(f, \tau)\} dz, \quad (4)$$

其中 f 和 f_r 分别为距离向和方位向的频率变量; 双站相位 $\phi_b(f, \tau)$ 的表达式为:

$$\phi_b(f, \tau) = 2\pi(f + f_0) \frac{R_T(\tau) + R_R(\tau)}{c} + 2\pi f_r \tau. \quad (5)$$

由式(4)可以看出, 双站相位 $\phi_b(f, \tau)$ 包含了发射天线和接收天线的斜距, 为双根号形式, 并且相位 $\phi_b(f, \tau)$ 处在积分符号下. 如果我们采用求单站 SAR 回波信号二维频谱的方法, 即直接对式(4)采用驻定相位原理, 过于复杂的解析式使得求解二维频谱变得很困难. 原始的 LBF 方法^[14]为了解决该问题将式(5)分解成两项

$$\phi_b(f, \tau) = \phi_T(f, \tau) + \phi_R(f, \tau), \quad (6)$$

其中 $\phi_T(f, \tau)$ 和 $\phi_R(f, \tau)$ 分别为发射站相位和接收站相位, 表达式如下

$$\phi_T(f, \tau) = 2\pi \left[\frac{(f + f_0)}{c} R_T(\tau) + f_{\tau T} \tau \right], \quad (7)$$

$$\phi_R(f, \tau) = 2\pi \left[\frac{(f + f_0)}{c} R_R(\tau) + f_{\tau R} \tau \right]. \quad (8)$$

式(7-8)中, $f_{\tau T}$ 和 $f_{\tau R}$ 分别为发射和接收天线对方位向多普勒频率所做的贡献, 满足 $f_{\tau} = f_{\tau T} + f_{\tau R}$ 关系式. 原始的 LBF 方法假设发射站和接收站对多普勒频率所做的贡献是一样的, 即 $f_{\tau T} = f_{\tau R} = f_{\tau}/2$, 并沿用该假设直到求解二维频谱结束. 然而这种假设在一些复杂的双站 SAR 几何结构中是不成立的, 比如

卫星和飞机组成的双站情形. 为了解决原始 LBF 方法的不足, 文献[15]提出了一种 ELBF (Extended LBF) 方法, 该方法假定 $f_{\tau T} = k_T f_{\tau}$, $f_{\tau R} = k_R f_{\tau}$. 其中 k_T 和 k_R 分别为发射站和接收站的时间带宽积占总的时间带宽积的比例. 该方法解决了原始 LBF 不能应用与星机双站情形的问题, 但面对双站 SAR 大斜视角情形时, 算法的误差超出了可接受范围.

针对以上问题, 本文提出一种 MLBF 方法, 将直接对频率 $f_{\tau T}$ 和 $f_{\tau R}$ 进行求解, 然后将求得的结果用于式(4)二维频谱的推导. 图2为发射天线和接收天线的几何模型.

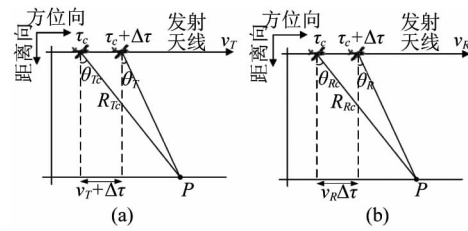


图2 发射天线和接收天线的几何模型 (a) 发射天线几何模型, (b) 接收天线几何模型

Fig. 2 The flight geometry of transmitter and receiver, (a) The geometry of transmitter's track, (b) The geometry of receiver's track

图2中, θ_T 和 θ_R 分别为发射天线和接收天线的瞬时斜视角、前视角. R_{Tc} 和 R_{Rc} 分别为波束中心时刻 τ_c 时, 发射天线和接收天线到点目标 P 的斜距. 设两天线平台同时从时间 τ_c 开始飞行, 经过时间 $\Delta\tau$ 后, 满足以下关系式

$$\begin{cases} \frac{R_{Tc} \sin\theta_{Tc} - R_{Tc} \cos\theta_{Tc} \tan\theta_T}{v_T} = \frac{R_{Rc} \sin\theta_{Rc} - R_{Rc} \cos\theta_{Rc} \tan\theta_R}{v_R} \\ f_{\tau} = \frac{f + f_0}{c} (v_T \sin\theta_T + v_R \sin\theta_R) = f_{\tau T} + f_{\tau R} \end{cases}. \quad (9)$$

将 $\tan\theta_T$ 和 $\tan\theta_R$ 分别在 $\sin\theta_T = \sin\theta_{Tc}$ 、 $\sin\theta_R = \sin\theta_{Rc}$ 处进行泰勒展开, 保留到一次项并代入到式(9)进行求解, 可得到发射和接收天线的方位频率表达式为

$$\begin{cases} f_{\tau T}(f, f_{\tau}) = \frac{R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc} f_{\tau}}{R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos \theta_{Tc}} \\ + \frac{v_T (f + f_0) (R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} \sin\theta_{Tc} - R_{Rc} v_T v_R \cos^2 \theta_{Tc} \sin\theta_{Rc})}{c (R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc})} \\ f_{\tau R}(f, f_{\tau}) = \frac{R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} f_{\tau}}{R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos \theta_{Tc}} \\ + \frac{v_R (f + f_0) (R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc} \sin\theta_{Rc} - R_{Tc} v_T v_R \cos^2 \theta_{Rc} \sin\theta_{Tc})}{c (R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc})} \end{cases}. \quad (10)$$

至此求得了发射和接收天线分别对总多普勒频

率的贡献量 $f_{\tau_T} f_{\tau_R}$. 设 τ_T 和 τ_R 分别为 $\phi_T(f, \tau)$ 和 $\phi_R(f, \tau)$ 的驻定相位点, 将式(7-8)分别在 τ_T, τ_R 处进行泰勒展开, 并保留到二次项

$$\phi_T(\tau) \approx \phi_T(\tau_T) + \frac{1}{2}\phi''_T(\tau_T)(\tau - \tau_T)^2, \quad (11)$$

$$\phi_R(\tau) \approx \phi_R(\tau_R) + \frac{1}{2}\phi''_R(\tau_R)(\tau - \tau_R)^2, \quad (12)$$

其中

$$\tau_T = \tau_{OT} - \frac{cr_{OT}f_{\tau_T}}{v_T^2 F_T}, \quad \tau_R = \tau_{OR} - \frac{cr_{OR}f_{\tau_R}}{v_R^2 F_R}, \quad (13)$$

$$F_T = \sqrt{(f + f_0)^2 - \left(\frac{cf_{\tau_T}}{v_T}\right)^2}$$

$$F_R = \sqrt{(f + f_0)^2 - \left(\frac{cf_{\tau_R}}{v_R}\right)^2}, \quad (14)$$

$$\phi''_T(\tau_T) = \frac{2\pi}{c} \cdot \frac{v_T^2 F_T^3}{r_{OT}(f + f_0)^2}$$

$$\phi''_R(\tau_R) = \frac{2\pi}{c} \cdot \frac{v_R^2 F_R^3}{r_{OR}(f + f_0)^2}. \quad (15)$$

将式(6)、(11-12)代入式(4)可得

$$g(f, f_\tau) = \sigma_p w_r(f) \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{k_r}\right\} \exp\{-j[\phi_T(f, \tau_T) + \phi_R(f, \tau_R)]\}$$

$$\cdot \int w_a(\tau - \tau_c) \exp\left\{-\frac{j}{2}[\phi''_T(f, \tau_T)(\tau - \tau_T) + \phi''_R(f, \tau_R)(\tau - \tau_R)]\right\} d\tau. \quad (16)$$

对式(16)中被积分的指数项再使用一次驻定相位原理, 我们便得到了回波信号的二维频谱, 解析式如下

$$g(f, f_\tau) = \sigma_p \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{k_r}\right\} \exp\{-j\psi_{QM}\} \exp\left\{-\frac{j}{2}\psi_{BD}\right\}, \quad (17)$$

其中

$$\psi_{QM} = \phi_T(f, \tau_T) + \phi_R(f, \tau_R)$$

$$= 2\pi(f_{\tau_T}\tau_{OT} + f_{\tau_R}\tau_{OR}) + \frac{2\pi}{c}(r_{OT}F_T + r_{OR}F_R)', \quad (18)$$

$$\psi_{BD} = \phi''_T(f, \tau_T)(\tau_b - \tau_T)^2 + \phi''_R(f, \tau_R)(\tau_b - \tau_R)^2$$

$$= \frac{2\pi v_T^2 v_R^2 F_T^3 F_R^3}{c(f + f_0)^2 (v_T^2 F_T^3 r_{OR} + v_R^2 F_R^3 r_{OT})}$$

$$\left[(\tau_{OT} - \tau_{OR}) - \frac{c}{v_T^2 v_R^2 F_T F_R} (r_{OT} v_R^2 F_R f_{\tau_T} - r_{OR} v_T^2 F_T f_{\tau_R}) \right]^2. \quad (19)$$

式(17)中, ψ_{QM} 可以理解为单站相位, ψ_{BD} 可以看作是双站衍生的相位. 在后面进行成像算法的推导时, 首先要将相位 ψ_{BD} 进行补偿掉. 以上是本文提出的 MLBF 算法, 该算法与 LBF 和 ELBF 方法相

比, 不仅能应对大斜视角情形, 更能很好的应用于具有大前视角的双站 SAR 前视成像情形.

2 用于毫米波双站前视 SAR 的 Omega-k 成像算法

相比于 RD 和 CS 算法, Omega-k 算法具有对宽孔径或大斜视角数据的处理能力, 因此更适合用于毫米波双站 SAR 前视成像中. 首先将 $f_{\tau_T} f_{\tau_R}$ 的表达式(10)代入(17), 并补偿掉式(17)中双站衍生的相位 ψ_{BD} , 结果为:

$$g(f, f_\tau) = \sigma_p \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{k_r}\right\} \exp\{-j2\pi(A\tau_{OT} + D\tau_{OR})f_\tau\}$$

$$\exp\{-j2\pi(B\tau_{OT} + E\tau_{OR})(f + f_0)\}$$

$$\exp\left\{-j\frac{2\pi}{c}(r_{OT}F_T + r_{OR}F_R)\right\}, \quad (20)$$

其中

$$A = \frac{R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc}}{R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc}}, \quad (21)$$

$$B = \frac{v_T (R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} \sin \theta_{Tc} - R_{Rc} v_T v_R \cos^2 \theta_{Tc} \sin \theta_{Rc})}{c (R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc})}, \quad (22)$$

$$D = \frac{R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc}}{R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc}}, \quad (23)$$

$$E = \frac{v_R (R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc} \sin \theta_{Rc} - R_{Tc} v_T v_R \cos^2 \theta_{Rc} \sin \theta_{Tc})}{c (R_{Tc} v_R^2 \cos^2 \theta_{Rc} + R_{Rc} v_T^2 \cos^2 \theta_{Tc})}. \quad (24)$$

做以下近似和变换

$$\tau_{OT} = p_0 + \tau_{OR}, \quad (25)$$

$$r_{OT} = p_1 + p_2 r_{OR}, \quad (26)$$

$$r_{OR} = r_{ORref} + r, \quad (27)$$

其中, p_0, p_1 和 p_2 为常系数; r_{ORref} 是位于成像中心目标到接收天线的最近距离, 并将其作为参考距离; r 为一个距离变量. 将式(25-27)代入到式(20)中, 可得

$$g(f, f_\tau) = \sigma_p \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{k_r}\right\} \exp\{-j2\pi[Ap_0(A + D)\tau_{OR}]f_\tau\}$$

$$\exp\{-j2\pi[Bp_0 + (B + E)\tau_{OR}](f + f_0)\}$$

$$\exp\left\{-j\frac{2\pi}{c}[p_1 F_T + (p_2 F_T + F_R)r_{ORref} + (p_2 F_T + F_R)r]\right\}. \quad (28)$$

对式(28)的相位项进行整理, 将其重新改写如下

$$g(f, f_\tau) = \sigma_p \exp\{-j\phi_{RC}\} \exp\{-j\phi_{IV}\} \exp\{-j\phi_V\}, \quad (29)$$

$$\phi_{RC} = \pi \frac{f^2}{k_r}, \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \phi_{IV} = & 2\pi[Bp_0 + (B + E)\tau_{OR}](f + f_0) \\ & + \frac{2\pi}{c}[p_1F_T + (p_2F_T + F_R)r_{ORref}] \\ & + 2\pi[Ap_0 + (A + D)\tau_{OR}]f_r \quad , \quad (31) \end{aligned}$$

$$\phi_V = \frac{2\pi(p_2F_T + F_R)r}{c} \quad . \quad (32)$$

式(29)中,相位 ϕ_{RC} 为距离向调制,是关于距离频率 f 的二次函数;由于相位中只包含参考距离 r_{ORref} ,所以 ϕ_{IV} 为距离不变项,它代表了不随距离改变的距离徙动、距离方位耦合和方位向频率调制在内的各种相位。 ϕ_V 为距离改变项,它的相位中包含了距离变量 r ,该相位代表了随距离改变的距离徙动、距离方位耦合的相位。

我们先使用距离调制向 ϕ_{RC} 和距离不变项 ϕ_{IV} 来构造参考函数:

$$H_{REF} = \exp\{j\phi_{RC}\} \exp\{j\phi_{IV}\} \quad . \quad (33)$$

将参考函数与回波数据式(29)相乘,便完成了Omega-k算法中第一个关键步骤,即一致聚焦。经过一致聚焦后,参考处距离的目标得到了完全聚焦,但非参考距离处的目标仅得到了部分聚焦。因此,Omega-k算法须要进行第二个关键步骤,即补余聚焦。该步骤采用Stolt插值的方法,对相位 ϕ_V 在距离频域上完成其它目标的聚焦。插值过程可以表示为

$$p_2F_T + F_R = P_2 \sqrt{(f + f_0)^2 - \left(\frac{cf_{rT}}{v_r}\right)^2} + \sqrt{(f + f_0)^2 - \left(\frac{cf_{rR}}{v_r}\right)^2} \rightarrow f' + f_0 \quad . \quad (34)$$

式(34)的含义是将原来的距离频率变量 f 非线性的映射成新的距离频率 f' 。经过Stolt插值后,相位可以表示为

$$\phi_V = \frac{2\pi r}{c}[f' + f_0] \quad . \quad (35)$$

由式(35)可以看出,此时回波信号中的相位 ϕ_V 已经是距离频率 f' 的线性函数,因此再将回波信号进行二维逆傅立叶变换,便完成了对数据的聚焦。

3 仿真实验结果与分析

本节将通过具体的仿真实验分三步来检验上文提出的成像算法。首先验证本文提出的MLBF方法应用于双站SAR前视成像时,求得的二维频谱是否准确。然后,进一步验证基于该二维频谱推导的Omega-k算法的正确性和有效性。最后结合仿真分析该算法的误差大小。

3.1 仿真实验用于验证MLBF方法

仿真实验中,使用的仿真参数如表1所示。其中

构型一、构型二分别为小前视角、大前视角情形。验证方法如下:我们首先通过数值仿真的方法(比如使用MATLAB等工具)直接得到点目标 P 回波信号的二维频谱,且将该频谱作为理想的频谱。然后把LBF、ELBF和MLBF算法推导得到的二维频谱作为匹配滤波器,分别与理想的频谱进行匹配聚焦。这种方法可以检验出三种算法得到的二维频谱的准确性,仿真结果如图3所示。

表1 双站SAR前视成像的仿真实验参数

Table 1 Bistatic forward-looking SAR system's parameters for simulations

系统参数	构型一		构型二	
	发射机	接收机	发射机	接收机
载波频率	35 GHz		35 GHz	
信号带宽	100 MHz		100 MHz	
采样率	180 MHz		180 MHz	
PRF 频率	750 Hz		600 Hz	
飞行速度	120 m/s	120 m/s	180 m/s	200 m/s
起始坐标	(0, 0.88, 20)km	(10, 0, 5)km	(0, 6.9, 6)km	(10, 0, 4)km
斜视角	0°	/	10°	/
前视角	/	10°	/	60°

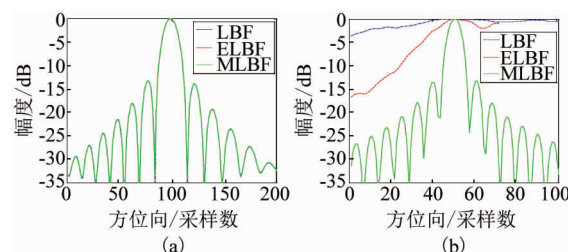


图3 对频谱进行匹配聚焦的结果 (a)构型一时,聚焦的结果,(b)构型二时,聚焦的结果

Fig. 3 Focusing results of spectra, (a) focusing result with case 1 parameters, (b) focusing result with case 2 parameters

图3为匹配聚焦结果的方位向切面图。由仿真结果可知,当为小前视角情形时(即构型一),LBF、ELBF和MLBF都可以精确得到双站SAR前视成像的点目标二维频谱,并能与理想频谱匹配上,如图3(a)所示。当前视角增大至60°时(即构型二),LBF和ELBF算法都失效,无法正确的处理双站SAR前视成像的数据,但MLBF算法仍然能精确的得到点目标二维频谱,与理想的频谱能很好的吻合。

3.2 仿真实验用于验证Omega-k算法

仿真场景由9个点目标组成,如图4所示。其中点目标分别以400 m和300 m的距离等间隔沿距离向和方位向分布。仿真实验采用构型二的参数,分别对基于ELBF提出的Omega-k算法和本文提出的算

法进行仿真、比较,仿真结果如图 5 所示.

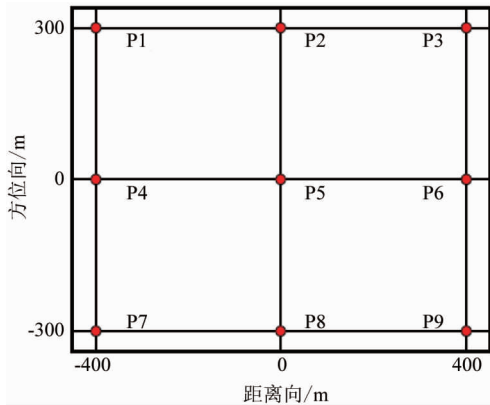


图 4 成像场景示意图

Fig. 4 The simulated imaging scene

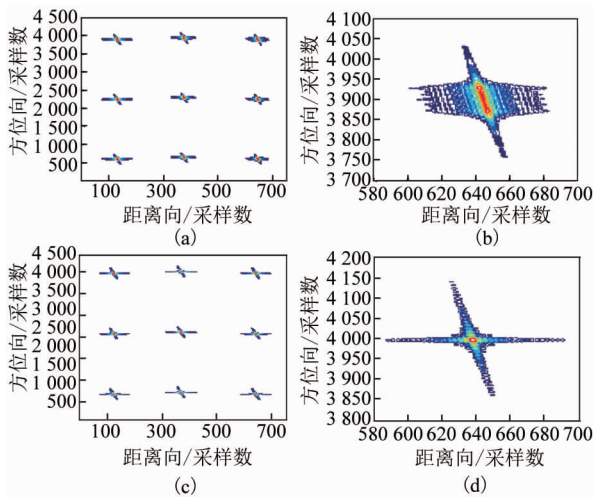


图 5 成像结果 (a) 使用基于 ELBF 的 Omega-k 算法得到的成像结果, (b) 图(a)中点目标 P3 的二维等值曲线, (c) 使用基于 MLBF 的 Omega-k 算法得到的成像结果, (d) 图(c)中点目标 P3 的二维等值曲线

Fig. 5 Imaging results (a) Imaging result using Omega-k algorithm based on ELBF, (b) The contours of target P3 in (a), (c) Imaging result using Omega-k algorithm based on MLBF, (d) The contours of target P3 in (c)

图 5 中,等值曲线显示的动态范围为 $-35 \sim 0$ dB. 图 5(a)和(c)为两种算法对场景进行成像的结果. 为了进一步分析成像质量,图 5(b)和(d)分别将两个成像结果中点目标 P3 的二维等值曲线进行放大. 由图 5(b)可知,当前视角较大时,基于 ELBF 推导出的 Omega-k 算法,在方位向上没能对点目标进行正确的聚焦,而图 5(d)显示点目标得到了完全的聚焦,说明本文提出的 Omega-k 算法仍然适用. 表 2 列出了图 5(c)中, P1、P5 和 P9 三个点目标的峰值旁瓣比(PSLR)、积分旁瓣比(ISLR)参数,由参数指

标可以看出,点目标都得到了精确的聚焦.

表 2 成像结果峰值旁瓣比、积分旁瓣比

Table 2 The PSLR and ISLR of imaging results

点目标	距离向		方位向	
	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB
PT1	-13.09	-9.84	-12.87	-9.78
PT5	-13.08	-9.85	-13.31	-10.24
PT9	-13.08	-9.84	-13.12	-9.87

3.3 成像算法误差分析

与 RD 和 CS 算法不同的是, Omega-k 算法本身具有对宽孔径或大斜视角数据的处理能力,所以不会存在点目标离场景中心越远,聚焦效果下降的缺陷. 本文算法的误差主要来源与由 MLBF 推导得到的二维频谱,在此对 MLBF 进行误差分析. 根据式(11-12),将 MLBF 的近似相位误差定义如下

$$E_T(f, \tau) \approx \left| \phi_T(f, \tau) - \left[\phi_T(f, \tau_T) + \frac{1}{2} \phi_T''(f, \tau_T) (\tau - \tau_T)^2 \right] \right|, \quad (36)$$

$$E_R(f, \tau) \approx \left| \phi_R(f, \tau) - \left[\phi_R(f, \tau_R) + \frac{1}{2} \phi_R''(f, \tau_R) (\tau - \tau_R)^2 \right] \right|, \quad (37)$$

其中 $E_T(f, \tau)$ 和 $E_R(f, \tau)$ 分别为发射、接收相位误差. 仍然采用构型二的仿真参数,成像场景宽度达到 1 km,误差仿真结果如图 6 所示.

由图 6 可以看出,发射天线的相位误差远远小于 $\pi/8$. 而接收天线的前视角较大缘故,引入的最大相位误差为 0.261 rad,但仍然小于 $\pi/8$,在可接收的误差范围. 将式(25-27)代入到 $E_T(f, \tau)$ 和 $E_R(f, \tau)$ 中,便可以通过约束 $E_{\text{sum}}(f, \tau) = E_T(f, \tau) + E_R(f, \tau) \leq \pi/8$,求得该算法适用的最大成像场景 r . 如果不是对很大的场景进行成像,对误差 $E_{\text{sum}}(f, \tau) \leq \pi/8$ 的约束一般都是成立的.

3.4 波束指向误差对成像的影响

前面算法的推导、分析以及仿真是基于发射和接收平台处于理想运动状态下的. 但在实际成像过程中,飞机因受气流扰动因素的影响,飞行姿态会有偏差造成天线波束指向误差,导致最终得到的图像一定程度上散焦. 下面对波束指向误差进行分析.

设发射天线方位向波束指向误差角度为 $\Delta\theta_T$,接收天线方位向波束指向误差角度为 $\Delta\theta_R$,由于波束指向误差的影响,收发瞬时斜距变为

$$R_{T_e}(\tau) = \sqrt{r_{OT}^2 + [(\tau - \tau_{OT})v_T + \Delta x_T]^2}, \quad (38)$$

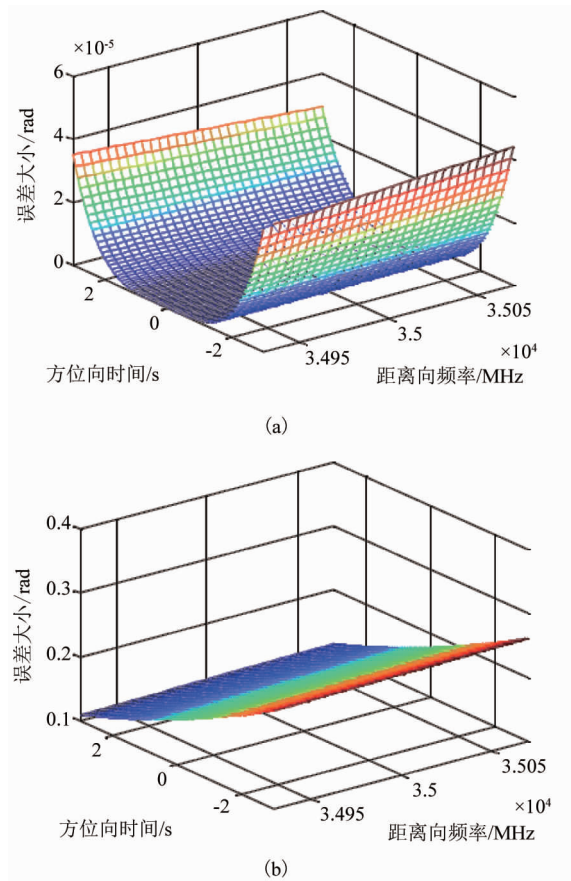


图6 误差分析 (a) 发射天线的相位误差, (b) 接收天线的相位误差

Fig.6 Error analysis, (a) The phase error of transmitter, (b) The phase error of receiver

$$R_{R_e}(\tau) = \sqrt{r_{OR}^2 + [(\tau - \tau_{OR})v_R + \Delta x_R]^2}, \quad (39)$$

$$\Delta x_T \approx R_{Tc} \Delta \theta_T, \quad (40)$$

$$\Delta x_R \approx R_{Rc} \Delta \theta_R, \quad (41)$$

式中 Δx_T 和 Δx_R 分别为波束指向误差 $\Delta \theta_T$ 和 $\Delta \theta_R$ 使得波束中心在地面上的偏移量. 此时双站斜距变为

$$\begin{aligned} R_{bi_e}(\tau) &= R_{T_e}(\tau) + R_{R_e}(\tau) \\ &= R_T(\tau) + R_R(\tau) + \Delta R_{bi}(\tau) \end{aligned}, \quad (42)$$

式(42)中 $\Delta R_{bi}(\tau)$ 即为波束指向误差引入的距离误差. 因此, 波束指向误差带来的相位误差为:

$$\begin{aligned} \varphi_e &= -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_{bi}(\tau) \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} [R_{bi_e}(\tau) - (R_T(\tau) + R_R(\tau))] \end{aligned}. \quad (43)$$

图7给出了双站前视 SAR 天线存在不同指向误差条件下方位向压缩处理的结果. 当收发波束指向误差 $\Delta \theta_T = \Delta \theta_R \leq 1^\circ$ 时, 相位误差最大为 13.4 rad, 方位向脉压曲线的主瓣基本重合, 旁瓣有着升高的趋势. 当波束指向误差为 $\Delta \theta_T = \Delta \theta_R = 2^\circ$ 时, 相位误差最大为 534.5 rad, 方位向脉压曲线的主瓣展宽, 并且旁瓣升高, 脉压质量有着明显的下降. 同时, 方位向波束指向误差会带来目标在方位向上的平移, 图7为了更好的比较主瓣宽度和旁瓣高度, 未将位置偏移信息展现出来, 更详细的分析可参考文献[16]. 从仿真结果可知, 双站前视 SAR 天线波束指向误差对成像质量有着较大的影响, 波束指向偏差越大, 目标的聚焦效果下降的越厉害.

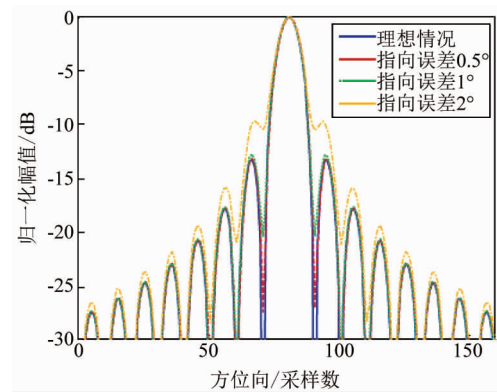


图7 方位向波束指向误差对方位向压缩处理的影响

Fig.7 The effect of azimuth compressing by beam pointing error

3.5 计算量分析

本文提出的基于 MLBF 的 Omega-k 成像算法运算量主要分为一次二维傅立叶变换, 一次距离频率域的非均匀 Stolt 插值, 一次二维傅立叶逆变换. 假设回波数据的距离和方位点数分别为 M 和 N , 一次二维傅立叶变换需要进行 $(M/2) \log_2^M + (N/2) \log_2^N$ 次复数乘法和 $M \log_2^M + N \log_2^N$ 次复数加法, 一次二维逆傅立叶变换所需的计算量和二维傅立叶变换的计算量相同. 一次距离频率域非均匀的 8 点 sinc 插值需要分别进行 $8MN$ 次复数乘法和复数加法. 因此本文的 Omega-k 算法总计算量为 $M \log_2^M + N \log_2^N + 8MN$ 次复数乘法和 $2(M \log_2^M + N \log_2^N) + 8MN$ 次复数加法. 以 $M = 512, N = 4096$ 为例, 本文算法大约需要 1.68×10^7 次复数乘法和加法运算, 以目标计算机处理器的计算能力是能较容易完成该计算任务的.

4 结论

毫米波双站 SAR 前视成像有着很大的潜在应用价值,然而研究毫米波双站 SAR 前视成像的算法是一大难点,并且由于特殊的前视几何结构以及大的前/斜视角,已有的双站 SAR 成像算法无法直接移植过来.针对以上问题,本文首先提出了 MLBF 算法,该算法不仅能适用于双站 SAR 前视的几何结构,而且在大的前/斜视角情形下,仍然保证算法的精度.然后,在此基础上推导出一种用于毫米波双站 SAR 前视成像的 Omega-k 算法.最后通过仿真实验,验证了 MLBF 算法相比于其它扩展的 LBF 算法,更能正确的处理双站 SAR 前视成像数据,同时,推导得到的 Omega-k 算法可以精确的对场景进行成像.

References

- [1] FENG Dong, AN Dao-Xiang, XIE Hong-Tu, *et al.* Fast factorized back projection algorithm for bistatic forward-looking low frequency ultra wide band SAR imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology* (冯东, 安道祥, 谢洪途, 等. 双站前视低频超宽带 SAR 的快速因式分解后向投影算法成像处理[J]. *电子与信息学报*), 2016, **38**(4): 941-949.
- [2] Qi C D, Shi X M, Bian M M, *et al.* Focusing forward-looking bistatic SAR data with chirp scaling [J]. *Electronics Letters*, 2014, **50**(3): 206-207.
- [3] WANG Hui, ZHAO Feng-Jun, DENG Yun-Kai. Development and application of the millimeter wave SAR [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves* (王辉, 赵凤军, 邓云凯. 毫米波合成孔径雷达的发展及其应用[J]. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(4): 452-459.
- [4] Balke J, Matthes D, Mathy T. Illumination constraints for forward-looking radar receivers in bistatic SAR geometries [C]. *European Radar Conference (EuRAD)*, Amsterdam, 2008: 25-28.
- [5] Walterscheid I, Espeter T, Klare J, *et al.* Potential and limitations of forward-looking bistatic SAR [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Honolulu, 2010: 216-219.
- [6] Walterscheid I, Papke B. Bistatic forward-looking SAR imaging of a runway using a compact receiver on board an ultralight aircraft [C]. *International Radar Symposium (IRS)*, Dresden, 2013: 19-24.
- [7] Walterscheid I, Brenner A R, Klare J. Bistatic radar imaging of an airfield in forward direction [C]. *European conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Germany, 2012: 227-230.
- [8] Qiu X L, Hu D H, Ding C B. Some reflections on bistatic SAR of forward-looking configuration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2008, **5**(4): 735-739.
- [9] Wang R, Loffeld O, Nies H, *et al.* Image formation algorithm for bistatic forward-looking SAR [C]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Honolulu, 2010: 4091-4094.
- [10] Wu J J, Yang J Y, Huang Y L, *et al.* Focusing bistatic forward-looking SAR using chirp scaling algorithm [C]. *IEEE Radar Conference (RADAR)*, Kansas, 2011: 1036-1039.
- [11] Shin H S, Lim J T. Omega-k algorithm for airborne forward-looking bistatic spotlight SAR imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2009, **6**(2): 312-316.
- [12] Wu J J, Huang Y L, Xiong J T, *et al.* Range migration algorithm in bistatic SAR based on squint mode [C]. *IEEE Radar Conference (RADAR)*, Boston, 2007: 579-584.
- [13] Wang R, Loffeld O, Nies H, *et al.* Focusing spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR data using wavenumber-domain algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 2275-2283.
- [14] Loffeld O, Nies H, Peters V, *et al.* Models and useful relations for bistatic SAR processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(10): 2031-2038.
- [15] Wang R, Loffeld O, Ui-Ann Q, *et al.* A bistatic point target reference spectrum for general bistatic SAR processing [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2008, **5**(3): 517-521.
- [16] ZHANG Ya-Biao, TANG Zi-Yue, ZHU Zhen-Bo, *et al.* The study of aero bistatic SAR's beam pointing errors [J]. *Acta Electronica Sinica* (张亚标, 汤子跃, 朱振波, 等. 机载双站 SAR 波束指向误差研究. *电子学报*), 2005, **33**(12): 2327-2330.