doi:10.11887/j.cn.201705016　　http://journal.nudt.edu.cn

结合直达波补偿的星地双站 SAR 滑动聚束模式频域成像算法*

闫飞飞,常文革,黎向阳,张启雷
(国防科技大学 电子科学学院,湖南 长沙 410073)

摘　要:星地双站合成孔径雷达以星载系统为机会照射源,地面接收机接收直达波和散射波信号进行同步和成像处理。介绍了星地双站合成孔径雷达系统结构,对基于直达波进行距离向脉冲压缩后的信号调频率、距离徙动以及二维频谱的空变性进行了分析。在此基础上,运用方位向预处理过程、直达波补偿以及非线性 Chirp Scaling 算法,提出了适合该模型的频域成像算法,并通过点目标仿真验证了该成像算法的有效性和性能。HITCHHIKER 星地双站合成孔径雷达系统实测数据进一步验证了该成像算法的有效性。

关键词:双站合成孔径雷达;滑动聚束;接收站固定;直达波补偿
中图分类号:TN957　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2017)05-096-06

Processing the sliding spotlight bistatic SAR combine with direct-path signal compensation in frequency domain

YAN Feifei, *CHANG Wenge*, *LI Xiangyang*, *ZHANG Qilei*
(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In fixed-receiver bistatic SAR (synthetic aperture radar), the spaceborne SAR was used as the illuminator. The direct-path signal and the backscattering echo were sampled, synchronized and focused by the receiver. The geometry of fixed receiver bistatic SAR was introduced. After the direct-path signal was used as reference signal for range match filtering, the spatial variation of chirp rate, range cell migration and two-dimensional spectrum were analyzed. Based on azimuth preprocessing, direct-path signal compensation and nonlinear Chirp Scaling imaging algorithm, a new focusing algorithm was presented. Simulation results of point targets were presented to validate the feasibility and efficiency of the proposed method. This algorithm was also validated by the measured data of the HITCHHIKER system.

Key words: bistatic synthetic aperture radar; sliding spotlight; fixed-receiver; direct-path signal compensation

双(多)基地合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)收发系统分置于不同平台,一方面可以通过灵活设置收、发站的空间位置,从而获得观测场景更加丰富的散射信息;另一方面,发射站可以远离被测地域,而接收站近距接收观测场景散射波信号,大大提高了双站系统的生存能力。星地双站 SAR 系统利用已有的星载 SAR 系统作为机会照射源,通过放置于地面某高地上的被动接收系统,接收直达波和观测区域的散射波信号并进行同步和成像处理,是双站 SAR 系统的一个重要研究方向。

时频同步处理是双站 SAR 系统需要解决的一个关键问题。考虑到直达波信号的信噪比较高,因此直达波信号可以作为距离向匹配滤波的参考信号。通过这种方式,在完成距离向脉冲压缩的同时,也实现了散射波信号的时频同步处理[1]。但是通过对距离压缩之后回波信号的分析可知,目标点信号的距离历程包含有三个根号项,从而导致很难利用驻定相位原理得到二维频谱的解析表达式,进而难以研究相应的频域成像算法。

时域反向投影(Back Projection, BP)算法虽然能够获取高精度的成像结果,但效率往往不高。对于星地双站 SAR 频域成像算法,有许多学者进行了研究。文献[2]基于级数展开法和距离多普勒算法,实现了滑动聚束模式双站 SAR 系统的成像处理。文献[3]利用二维驻定相位原理,对星机双站 SAR 相位进行展开,并利用单站成像算法,实现了对星机双站 SAR 系统的成像处理。文献[4]通过对回波信号二维频谱进行线性化处理,随后利用逆变标傅里叶变换,实现了双站

* 收稿日期:2016-05-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501477,61201329)
作者简介:闫飞飞(1986—),男,河南新蔡人,博士研究生,E-mail:ddx_yff@163.com;
常文革(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:changwenge@nudt.edu.cn

SAR 系统的成像处理。但上述几种方法均是针对收发站与点目标的双站距离历程进行研究,未考虑以直达波作为距离向匹配滤波参考信号之后,目标点二维频谱的空变性,因此上述几种算法不再适用。

本文针对滑动聚束模式星地双站 SAR 系统,分析了利用直达波进行同步之后的信号的二维空变特性。在此基础上,为了解决该模型条件下系统的二维空变性,基于方位向预处理方法、直达波补偿以及非线性 Chirp Scaling 算法,提出了适合该模式下的频域成像算法。通过点目标仿真,对该算法的有效性和性能进行了验证和分析。通过对 HITCHHIKER 实测数据的成像处理,进一步验证成像算法有效性[5]。

1　星地双站 SAR 系统

基于星载照射源的星地双站 SAR 系统构成如图 1 所示。

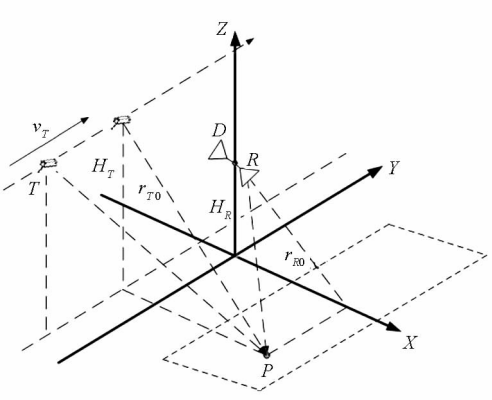


图 1　星地双站 SAR 系统

Fig. 1　Bistatic SAR system

在星地双站 SAR 滑动聚束模式中,由于卫星工作于滑动聚束模式[6],接收机静止,因此收发站到目标点的距离历程为:

$$r_T(t_m) = \sqrt{r_{T0}^2 + v_T^2(t_m - t_0)^2} \tag{1}$$

$$r_R(y) = \sqrt{r_{R0}^2 + y^2} \tag{2}$$

其中:t_m 为慢时间;v_T 为发射机速度;v_{TF}为发射波足速度;r_{T0},r_{R0}分别为发射机和接收机到点目标的最近斜距;t_0 为发射机到目标斜距的最近时刻,$t_0 = y(1/v_T - 1/v_{TF})$。

同理可得在目标点 P 的合成孔径时间范围内,发射机与直达波接收天线的斜距历程为:

$$r_D(t_m) = \sqrt{r_{D0}^2 + v_T^2(t_m + t_1)^2} \tag{3}$$

其中:t_1 为发射机到目标点的最近时刻,$t_1 = y/v_T$;r_{D0}为发射机到直达波接收天线的最近斜距。

假设星载 SAR 系统辐射的信号为线性调频信号,正交解调之后,考虑时频同步误差的实际散射回波应为:

$$\begin{aligned} s_r(t_m,\tau) = {} & \sigma_p \cdot \omega_a(t_m - t_0)\omega_r[\tau - t_d - e(t_m)] \cdot \\ & \exp\{j\pi k[\tau - t_d - e(t_m)]^2\} \cdot \\ & \exp\{-j2\pi f_0[t_d + e(t_m)]\} \cdot \\ & \exp[j\phi_e(t_m)] \end{aligned} \tag{4}$$

其中:σ_p 为目标后向散射系数;ω_r 和 ω_a 分别为距离向和方位向天线方向性函数;τ 为距离向快时间;f_0 为系统工作载频;k 为调频率;t_d 为收发站到点目标的距离延迟,$t_d = [r_T(t_m) + r_R(y)]/c$。

假设直达波通道和散射波通道已经过均衡校正,并利用相同的本振信号进行信号解调,则两路通道包含相同的时频同步误差。因此,参照式(4)解调后的直达波信号可以表示为:

$$\begin{aligned} s_d(t_m,\tau) = {} & \omega_r[\tau - t_D - e(t_m)]\exp[j\phi_e(t_m)] \cdot \\ & \exp\{j\pi k[\tau - t_D - e(t_m)]^2\} \cdot \\ & \exp\{-j2\pi f_0[t_D + e(t_m)]\} \end{aligned} \tag{5}$$

其中,t_D 为直达波距离延时,$t_D = r_D(t_m)/c$。

如式(4)所示,时频同步误差不仅造成回波距离徙动校正误差,还引入了相位误差,破坏了方位向信号相位的相干性。因此,必须采取相应的同步措施加以补偿。

直达波信号具有信噪比高、相位成分相对简单的优点。因此,利用提取到的直达波信号作为距离向参考信号,直接对散射波信号进行匹配滤波,在完成距离脉压的同时,实现了收发系统时间和相位的同步处理[1]。完成距离向匹配滤波后的散射波信号为:

$$\begin{aligned} s(t_m,\tau) = {} & \sigma_p\omega_a(t_m - t_{T0})\omega_r[\tau - r(t_m)/c] \cdot \\ & \exp[-j2\pi r(t_m)/\lambda] \end{aligned} \tag{6}$$

其中:

$$r(t_m) = r_T(t_m) + r_R(y) - r_D(t_m) \tag{7}$$

由式(6)可以看出,距离压缩之后,散射波信号中的时频同步误差已被完全补偿。然而,如式(7)所示,同步后的散射波信号目标点距离历程发生了变化。因此,同步后的散射波信号的系统响应与传统的双站 SAR 系统存在较大差异。下面针对式(7)给出的信号模型,研究相应的成像算法。

1.1　回波信号二维频谱空变性分析

由于式(7)表现为三根号的形式,很难直接求解驻定相位点。在合成孔径中心时刻 $t_m = 0$ 对发射机及直达波距离历程进行泰勒级数展开,可以得到:

$$r_T(t_m, t_{0T}, r_{0T}) = K_{T0} + K_{T1}t_m + K_{T2}t_m^2 + \cdots \tag{8}$$

$$r_D(t_m) = K_{D0} + K_{D1}t_m + K_{D2}t_m^2 + \cdots \quad (9)$$

其中：$K_{Ti}, K_{Di}(i=1,2,\cdots)$ 分别为发射机距离历程和直达波距离历程泰勒展开式各项系数。

从而可得式(7)的泰勒级数展开式为：

$$r(t_m) = \mu_0 + \mu_1 t_m + \mu_2 t_m^2 + \mu_3 t_m^3 + \mu_4 t_m^4 + \cdots \quad (10)$$

其中：

$$\begin{cases} \mu_0 = K_{T0} + r_R(t_{T0}, r_{T0}) - K_{D0} \\ \mu_1 = K_{T1} - K_{D1} \\ \vdots \end{cases} \quad (11)$$

由级数反演法[6]，并保留 f_a 的四次及以下阶次的相位，可得式(6)的二维频谱为：

$$S(f_\tau, f_a) = W_r(f_\tau) W_a(f_a) \exp\{\mathrm{j}[\phi_c + \phi_0(f_a, r)]\} \cdot \exp\{\mathrm{j}[\phi_1(f_a, f_\tau, r) + \phi_2(f_a, f_\tau, r)]\} \quad (12)$$

相位项的具体表达式见文献[7]。下面以式(12)中第四项距离和方位耦合项进行分析，研究二维频谱的空变性。一般情况下，该耦合相位以场景中心点的二维耦合相位为参考，在二维频域统一进行补偿[6]。

图 2 为以场景中心点的二维耦合相位 $\phi_2(f_a, f_\tau, r_{\mathrm{ref}})$ 为参考，方位向 1000 m 位置处点目标耦合相位经过补偿后，残余相位在三个方位向多普勒频点处(0 Hz, 750 Hz, 1500 Hz)的分布。从图 2 可以看出，经过相位补偿后，多普勒零频处的耦合相位能够得到很好的校正。但当多普勒频率较大时，残余二维耦合相位非常大，从而说明点目标二维耦合相位的空变性比较严重。当以场景中心点为参考进行补偿后，残余相位会导致很难得到观测场景的聚焦图像。

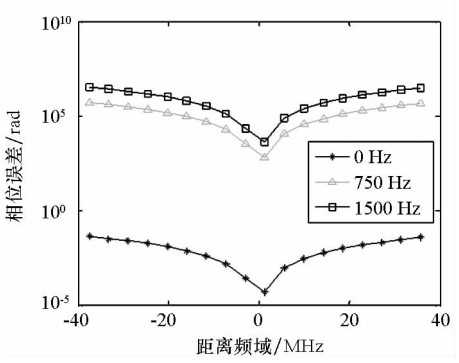


图 2 二维耦合相位空变性分析

Fig. 2 Spatial variation of the 2-D coupling phase

1.2 直达波距离历程估计

由上述分析可知，利用直达波信号作为距离向匹配滤波的参考信号，虽然一方面完成了收发站之间时频同步误差的补偿处理；但另一方面，该同步处理导致目标点距离徙动曲线空变性非常严重。为了减小目标点距离徙动的二维空变性，首先对直达波相位进行补偿，使得补偿后的点目标距离历程仅由收发站到目标点的距离历程构成，从而减小回波信号频谱的二维空变性[7]。然后利用星地双站成像算法对直达波补偿后的回波数据进行处理，实现对观测场景的聚焦。

通常，选择卫星到接收站的最短距离时刻作为时间参考，利用卫星轨道信息和接收站位置信息计算得到直达波的距离历程。但由轨道信息计算得到的零多普勒时间精度有限，估计值与真实值会存在一定的误差。为了提高直达波距离历程的估计精度，需要对收发站最近时刻进行解算，从而提高直达波采样序列对应的距离历程的估计精度[8]。

以预计的收发站最近距离时刻为时间参考点，根据卫星星历数据，收发站对应的直达波距离历程[8]为：

$$r_D(t_m) = a_0 + a_1 t_m + a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 + a_4 t_m^4 \quad (13)$$

其中，多相似系数 $a_i(i=0,1,2,3,4)$ 可以从星历数据获取。

设真实的收发站最近距离时刻为 t_0，则收发站之间实际的距离历程可以表示为：

$$r'_D(t_m) = r_D(t_m - t_0) \quad (14)$$

文献[8]根据直达波提取到的峰值相位信息，利用式(13)和式(14)多项式系数之间的关系，得到最近距离时刻的估计值 t'_0，进而获得直达波距离历程的估计值 $r'_D(t_m)$。

假设零多普勒时间估计误差为 Δt_0，则当利用直达波距离历程 $r'_D(t_m)$ 对散射波数据进行直达波补偿后，回波信号可以表示为：

$$s_1(\tau, t_m) = \sigma_p \omega_r[\tau - r(t_m)/c] \exp[-\mathrm{j}2\pi r(t_m)/\lambda] \quad (15)$$

其中：

$$\begin{aligned} r(t_m) &= r_T(t_m) + r_R(y) + r'_D(t_m) - r'_D(t_m - \Delta t_0) \\ &= r_T(t_m) + r_R(y) + \Delta r_D(t_m) \end{aligned} \quad (16)$$

由式(15)可以看出，零多普勒时间估计误差主要引入以下两个方面的影响：一是在距离向引入了一个包络偏移量 $\Delta r_D(t_m)/c$；二是在方位向引入了误差相位 $\exp[-\mathrm{j}2\pi\Delta r_D(t_m)/\lambda]$。下面分别对上述两类影响进行分析：

1)通常要求距离向包络偏移小于距离向脉压宽度的1/4。以表1中的参数为例，经过计算，此时要求零多普勒时间估计误差要不大于 0.02 s。

2)根据式(13)和式(14)，可以将合成孔径时间 T_{syn} 内的误差相位分解为固定相位、线性相位、

表 1　星地双站 SAR 仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters of bistatic SAR

参数	数值	参数	数值
载频	9.65 GHz	仿真信号带宽	30 MHz
PRF	3000 Hz	采样率	75 MHz
脉宽	10 μs	卫星波束宽度	0.33°
卫星高度	514 km	卫星入射角	45°
卫星速度	7600 m/s	卫星波足速度	2100 m/s
接收站高度	100 m	接收机入射角	85°

二次相位和高频相位分量[9]。

$$\phi(t_m) = \phi_c + 2\pi k_1 t_m + \pi k_2 t_m^2 + \Delta\phi \quad (17)$$

其中:ϕ_c 为固定相位偏差,不会对成像结果造成影响,因此下文不再进行分析;k_1 和 k_2 分别为误差相位的线性分量和二次分量系数;$\Delta\phi$ 为高频相位分量。

线性相位是误差相位的主要分量,该分量造成目标点方位向成像位置偏移 $\Delta x' = k_1 v_T / k_a$,$k_a$ 为方位向多普勒调频率。二次相位分量会在脉压的峰值位置引入相位误差 $QPE = \pi k_2 T_{syn}^2 / 4$。当零多普勒时间估计误差为 0.1 s 时,二次相位分量引入的最大相位误差为 0.005 rad,此时对成像的影响基本可以忽略。同理,此时三次相位分量系数 k_3 与 k_a 的比值 $k_3/k_a \approx 3.95\mathrm{E}-6$。经过验证,这个量级的高频相位分量对成像结果的影响也可以忽略。

2　频域成像算法

由于卫星工作于滑动聚束模式,从而使得观测场景方位向不同位置点目标的多普勒中心存在偏移。当观测场景较大时,边缘点目标的多普勒中心会超出脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF),进而导致方位向多普勒频谱出现混叠。因此,在直达波信号补偿之前,还需要利用方位向预处理方法对回波信号进行处理,从而使得直达波补偿后,回波数据方位向多普勒谱不会出现频谱混叠[10]。

因此,基于方位向预处理流程、直达波补偿方法以及改进的非线性 Chirp Scaling 算法[11],提出了基于直达波进行同步处理的星地双站 SAR 成像处理流程,如图 3 所示。

首先通过方位向预处理,提高方位向采样率,从而避免直达波补偿后方位向出现频谱混叠;然后利用估计得到的直达波距离历程,对回波数据进行直达波相位的补偿,从而降低点目标频谱的二维空变性,经过直达波补偿后,此时成像问题就简化为星地双站 SAR 成像问题;最后利用改进的非线性 Chirp Scaling 算法,实现对观察场景的成像处理。

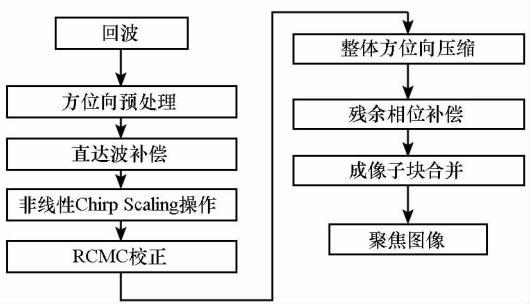


图 3　星地双站 SAR 成像处理流程

Fig. 3　Scheme of bistatic SAR imaging method

3　仿真及实测数据分析

下面首先通过点目标仿真及成像处理,验证提出的频域成像算法的有效性和性能。随后通过对滑动聚束模式星地双站 SAR 实测数据进行成像处理,进一步验证提出的成像算法的有效性。

3.1　仿真数据成像结果

收发站仿真参数见表 1。

设零多普勒时刻的预测误差 $t_0 = 0.38$ s,时频同步误差根据文献[12]进行设定。根据仿真设定的参数,生成含有时频同步误差的直达波信号和散射波信号,并利用直达波信号进行零多普勒时刻的估计。由于很难得到零多普勒时间估计误差的解析表达式,因此,通过蒙特卡洛仿真,分析零多普勒时间的估计精度。按照零多普勒时间估计方法,蒙特卡洛仿真 100 次,估计结果如图 4 所示。

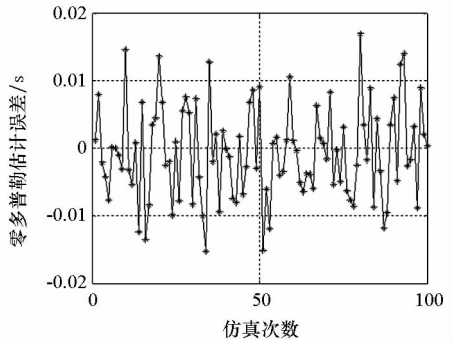


图 4　零多普勒时间估计误差

Fig. 4　ZDT estimate result

从图 4 可以看出,零多普勒时间估计误差小于 0.02 s。由 1.2 节的分析可知,该估计误差引入的距离向包络偏移满足成像对距离偏移的

要求。

如上所述,利用直达波作为距离向匹配滤波参考信号,完成回波数据的距离向脉压处理。然后按照所提成像算法流程,对回波数据进行处理,得到的成像结果如图 5 所示。其中,直达波零多普勒时间估计误差约为 0.011 s。

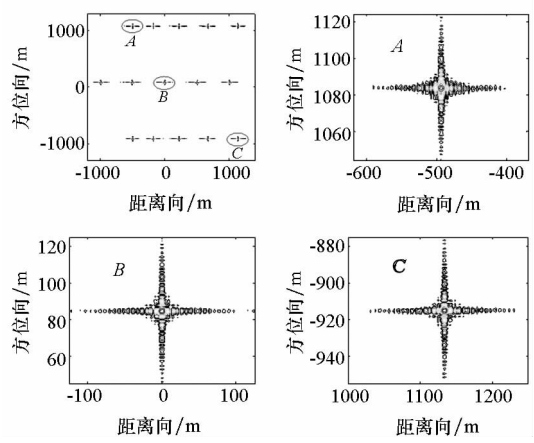


图 5 点目标成像结果

Fig. 5 Image of point targets

从图 5 可以看出,点目标聚焦性能较好,从而验证了所提成像算法的有效性。同时,从图 5 可以看出,直达波零多普勒时间估计误差的存在,导致成像结果方位向位置出现了偏移,偏移距离约为 85 m,这与由式 $\Delta x' = k_1 v_T / k_a$ 计算得到的位置偏移基本吻合。以分辨率和峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, RSLR)为例,对上述三个点目标的成像性能进行分析,见表 2。

表 2 点目标成像性能

Tab. 2 Image performance of point targets

	距离向分辨率/m	距离向 PSLR/dB	方位向分辨率/m	方位向 PSLR/dB
Ideal	5.25	-13.26	1.96	-13.26
A	5.86	-13.05	1.97	-13.12
B	5.27	-13.17	2.07	-13.14
C	5.73	-12.74	2.12	-13.05

通过图 5 及表 2 可知,所提双站成像算法能够实现对滑动聚束模式星地双站 SAR 的良好成像,且成像性能与理论值较为吻合。

3.2 实测数据成像结果

2009 年,德国 DLR 研究机构以 TerraSAR-X 卫星为星载照射源,HITCHHIKER 系统为地面接收系统,开展了一系列星地双站 SAR 实验[1,5]。实验过程中录取了大量的实测数据,对于研究双站 SAR 系统特性以及成像算法提供了可靠的数据来源。接下来处理的数据是在德国 Siegen 大学某楼顶录取的双站数据,其中 TerraSAR-X 工作于滑动聚束模式,信号带宽为 300 MHz。实测数据具体的参数见表 1。

对于该实测数据,直达波的距离历程已经提供。因此,利用所提基于直达波补偿的频域成像算法对实测数据进行成像处理,处理结果如下:

图 6(a)为德国 Sigen 大学提供的实测数据 BP 成像结果,成像场景宽度约为 3 km × 7 km。图 6(b)为所提成像算法成像结果。对比两幅图可以看出,两种方法得到的成像结果较为吻合,从而验证了所提成像算法的有效性。



(a) BP 成像结果(幅度和干涉相位叠加结果)

(a) Back project image (combined image of the interferometric phase and radar intensity)



(b) 所提算法成像结果

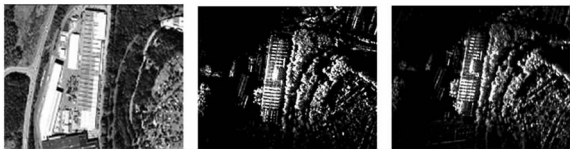
(b) Image of the proposed method

图 6 实测数据成像结果

Fig. 6 Image of real data

图 7 分别为观测场景某一观测区域的光学图像、BP 成像结果以及所提方法的成像结果。对比 BP 成像结果和所提方法的成像结果可以看出,两幅图像中的建筑物以及植被的包络均能得到很好

的聚焦,从而进一步验证了所提成像方法的准确性。同时,相比时域成像算法,所提算法能够大大节省成像时间,提高成像效率。



(a) 光学图像　(b) BP 成像　(c) 所提方法
(a) Orthophoto　(b) BP image　(c) Proposed method

图 7　成像结果对比
Fig. 7　Compare of the image

4　结论

基于方位向预处理方法、直达波补偿以及改进的非线性 Chirp Scaling 算法,本文提出了适合于星地双站 SAR 系统的双站频域成像算法。通过对点目标仿真结果的分析,验证了该算法的有效性和性能。将该算法应用于德国 Sigen 大学提供的实测数据,成像结果进一步验证了所提成像算法的有效性。

参考文献(References)

[1] Behner F, Reuter S, Nies H, et al. Synchronization and preprocessing of hybrid bistatic SAR data in the HITCHHIKER experiment [C]//Proceeding of the 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2014: 268 – 271.

[2] Zhou F, Sun G C, Xing M D, et al. A full-aperture imaging algorithm for hybrid sliding spotlight bistatic SAR [C]// Proceeding of IET International Radar Conference, 2013: 1 – 5.

[3] Wang R, Deng Y K, Loffeld O, et al. Processing the azimuth-variant bistatic SAR data by using monostatic imaging algorithms based on two-dimensional principle of stationary phase [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(10): 3504 – 3520.

[4] Wu J J, Li Z Y, Huang Y L, et al. Processing one-stationary bistatic SAR data using inverse scaled Fourier transform [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 129(2): 143 – 159.

[5] Behner F, Reuter S. HITCHHIKER—hybrid bistatic high resolution SAR experiment using a stationary receiver and TerraSAR-X transmitter [C]//Proceeding of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2010: 1 – 4.

[6] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(2): 770 – 780.

[7] Zhang Q L, Chang W G, Li X Y. An extended NLCS algorithm for bistatic fixed-receiver SAR imaging [C]// Proceeding of the 7th European Radar Conference, 2013: 252 – 255.

[8] Lopez-Dekker P, Mallorqui J J, Serra-Morales P, et al. Phase synchronization and Doppler centroid estimation in fixed receiver bistatic SAR systems [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 46(11): 3459 – 3471.

[9] Krieger G, Younis M. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 424 – 428.

[10] Sun G C, Xing M D, Wang Y, et al. Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1036 – 1040.

[11] Wong F H, Yeo T S. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2001, 39(5): 946 – 953.

[12] Tian W M, Long T, Yang J, et al. Combined analysis of time and frequency synchronization errors for BiSAR [C]// Proceeding of CIE International Conference on Radar, 2011: 388 – 392.