

# 基于 Bakhshali 近似的星载双站 SAR 成像方法<sup>\*</sup>

袁基力<sup>1,2,3†</sup>, 吕孝雷<sup>1,2</sup>, 林建和<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年12月21日收稿; 2017年2月27日收修稿)

Yuan J L, Lü X L, Lin J H. Spaceborne bistatic SAR imaging method based on Bakhshali approximation[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(6): 751-758.

**摘要** 随着卫星技术的发展与成熟, 星载分布式 SAR 和中高轨 SAR 越来越受到关注, 但是其较长的合成孔径时间和大基线距对双站 SAR 成像提出了新的要求。基于单站等效思路, 提出一种基于 Bakhshali 近似的双曲等效方法, 设计了适用于该方法的 CS 成像流程。与基于泰勒二阶近似的双曲等效方法相比, 该方法满足长合成孔径时间和基线距变化较大的情况下的成像要求。最后通过星载双站 SAR 的仿真实验验证了该方法的有效性。

**关键词** Bakhshali 近似; 星载双站 SAR; 改进的双曲等效方法; CS 算法

**中图分类号:** TN957 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2017. 06. 012

## Spaceborne bistatic SAR imaging method based on Bakhshali approximation

YUAN Jili<sup>1,2,3</sup>, LÜ Xiaolei<sup>1,2</sup>, LIN Jianhe<sup>1,2,3</sup>

(1 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 Key Laboratory of Spatial

Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Distributed spaceborne SAR and medium- or high-orbit SAR are receiving increasing focus with the development of satellite technology, while the extended synthetic aperture length and long baseline pose new challenges to the bistatic SAR imaging. In this work we propose a new hyperbolic equivalence method based on Bakhshali approximation. Besides, an appropriate CS imaging procedure is designed. Compared to the original method, the proposed method meets the requirements. Finally, the simulation results verify the validity of the proposed method.

**Keywords** Bakhshali approximation; spaceborne bistatic SAR; advanced hyperbolic approximation; CS algorithm

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种具有全天候、全天时对地观测能力的主动式微波成像雷达, 并对地表有一定的穿透能力。它通过主动照射地物目标, 获取后向散射回波生

成高分辨率的二维影像, 在资源勘探、军事侦查、灾害与环境监测等方面有重要作用, 其中星载合成孔径雷达卫星是以 SAR 为有效载荷的对地观测卫星<sup>[1-3]</sup>。与传统单站 SAR 收发共用不同的

<sup>\*</sup> 中国科学院“百人计划”项目(Y53Z180390)和民政部国家减灾中心项目(8435-01)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: yuanjili14@mails.ucas.ac.cn

是,双站 SAR 的发射机和接收机分别放置在不同平台上<sup>[4]</sup>,它具有以下优势:1)收发分离,卫星隐蔽能力提高;2)多角度观测地物,信息获取量增加;3)同时观测,地物时间去相干低,大气效应可以互相抵消;4)接收机不含大功率器件,成本低<sup>[1,5]</sup>。

然而,双站特有的飞行构型会引入两个技术难点,一是发射机和接收机之间的同步问题,对于同步问题,目前已经有较好的解决方法,如文献[6-7]中提出的空间同步和相位同步方法。还有一个关键问题是双站距离历程的近似问题,对于脉冲体制雷达,单站 SAR 采用“走停走”假设,其收发距离历程相同,因此其二维频谱具有解析解;但对于双站 SAR,收发斜距由于平台的分离不再相等,其距离历程为二者之和,表现为双根号形式,这导致其二维频谱很难求得解析表达式,无法直接沿用单站的成像方法。LBF 方法<sup>[8-9]</sup>和级数反演方法(method of series reversion, MSR)<sup>[10]</sup>均是基于显式二维频谱的近似求解思路,但需要重新推导成像算法。BP 算法<sup>[11]</sup>可用于各种复杂的成像模式,如移变模式双站 SAR,但其计算量较大,无法满足星载 SAR 成像对实时性的要求。Aria 等<sup>[12-13]</sup>借鉴地震信号处理中的 DMO 方法,并将该方法应用于双站 SAR 成像中,其主要思路是对双站 SAR 回波数据进行预处理转换为单站 SAR 回波,缺点是只可用于顺飞模式。文献[14]提出一种基线中点单站等效方法,然而其只能适用于基线较短的情况。Bamler 等在文献[15-16]中提出两种方法,一种是基于数值计算的 NuSAR(numerical SAR)方法,还有一种是双曲等效方法。后一种方法相对于基线中点单站等效方法的精度更高,且能沿用单站 SAR 的成像算法;但是其三次等效误差会随合成孔径时间的增加而迅速变大,此外随收发平台之间的基线增大其等效误差也会增加。

本文基于单站等效思路,采用 Bakhshali 近似<sup>[17-18]</sup>重新计算等效参数,提出一种改进的双曲等效方法,有效地降低了等效误差。同时,基于 Bakhshali 近似设计了新的 CS 成像算法流程,提高了成像质量。最后通过计算机仿真进行点目标成像,与改进前的双曲等效方法进行成像结果的对比,仿真结果表明,本文算法提高了星载双站 SAR 的成像质量。

## 1 双站 SAR 成像几何模型与信号模型

### 1.1 双站 SAR 成像几何模型

图 1 给出双站 SAR 成像的几何模型示意图。本文主要研究平飞模式下的双站 SAR 成像算法并采用正侧视模型进行分析,此外,为保证获取原始数据时方位向的时不变性,假设发射机和接收机的速度近似相等。如图 1 所示,  $V_T = V_R = V$ ,  $R_{T,c}$  和  $R_{R,c}$  分别是波束中心穿越时刻  $\eta_c$  发射机和接收机到目标的斜距,在正侧视模型下,波束中心穿越时刻即零多普勒时刻。在任意  $\eta$  时刻,发射机和接收机与目标点  $P$  之间的瞬时斜距分别为

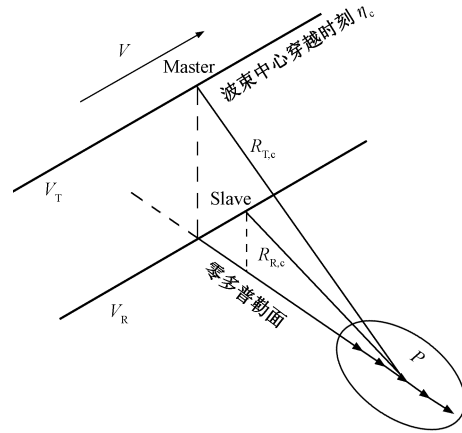


图 1 双站 SAR 成像几何模型

Fig. 1 Geometry model of bistatic SAR imaging

$$\begin{aligned} R_T(\eta) &= \sqrt{R_{T,c}^2 + V_T^2 (\eta - \eta_c)^2}, \\ R_R(\eta) &= \sqrt{R_{R,c}^2 + V_R^2 (\eta - \eta_c)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

则双站距离历程为

$$R_{bi}(\eta) = R_T(\eta) + R_R(\eta) = \sqrt{R_{T,c}^2 + V_T^2 (\eta - \eta_c)^2} + \sqrt{R_{R,c}^2 + V_R^2 (\eta - \eta_c)^2}. \quad (2)$$

采用双曲等效方法<sup>[19]</sup>,对  $R_{bi}(\eta)$  进行单站等效:

$$R_{bi}(\eta) \approx 2 \sqrt{R_{m,c}^2 + V_m^2 (\eta - \eta_c)^2}. \quad (3)$$

其中,  $R_{m,c}$  表示等效最短斜距,  $V_m$  表示等效速度。令  $\eta - \eta_c = \xi$ , 对式(1)和式(3)式泰勒展开到二阶:

$$\begin{aligned} R_T(\eta) &= R_{T,c} + \frac{V_T^2 \xi^2}{2R_{T,c}}, \\ R_R(\eta) &= R_{R,c} + \frac{V_R^2 \xi^2}{2R_{R,c}}, \\ R_{bi}(\eta) &= 2 \left( R_{m,c} + \frac{V_m^2 \xi^2}{2R_{m,c}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

可以求得等效参数:

$$\begin{aligned} R_{m,c} &= \frac{1}{2}(R_{T,c} + R_{R,c}), \\ V_m^2 &= \frac{1}{2}R_{m,c}\left(\frac{1}{R_{T,c}} + \frac{1}{R_{R,c}}\right)V^2. \end{aligned} \quad (5)$$

## 1.2 双站 SAR 信号模型

假设发射机发射的信号为线性调频信号,则接收机接收到的回波信号<sup>[20-21]</sup>为

$$\begin{aligned} s(\tau, \eta) &= A_p w_r\left(\tau - \frac{R_{bi}(\eta)}{c}\right) w_{az}(\eta) \times \\ &\exp\left\{-j\frac{2\pi f_0 R_{bi}(\eta)}{c} + j\pi K_r\left[\tau - \frac{R_{bi}(\eta)}{c}\right]^2\right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\tau$  是距离向时间, $\eta$  是方位时间, $K_r$  是距离向调频率, $A_p$  为目标的雷达后向散射系数, $f_0$  是中心频率, $w_r(\cdot)$  是距离向包络, $w_{az}(\cdot)$  是发射和接收天线方向图的综合表示。与单站 SAR 的信号模型相比,主要的不同之处是距离历程的改变,即收发距离历程为  $R_{bi}(\eta)$ , 还有天线方向图的变化。

## 2 基于 Bakhshali 近似的改进双曲等效方法

对于形如

$$\sqrt{S} = \sqrt{N^2 + d} \quad (7)$$

的平方根式, $d = S - N^2$ , 令

$$\begin{aligned} P &= \frac{d}{2N}, \\ A &= N + P, \\ \sqrt{S} &\approx A - \frac{P^2}{2A}. \end{aligned} \quad (8)$$

经过上述代数运算,即可得到  $\sqrt{S}$  的 Bakhshali 近似表达式<sup>[17]</sup>

$$\sqrt{S} = N + \frac{d}{2N} - \frac{d^2}{8N^3 + 4Nd}. \quad (9)$$

对于式(7)如果采用泰勒级数展开,保留至二阶,得

$$\sqrt{N^2 + d} = N + \frac{d}{2N} - \frac{d^2}{8N^3}. \quad (10)$$

在变量  $d$  处展开的泰勒二阶近似与 Bakhshali 近似的形式非常接近,区别在于二阶项系数中包含变量  $d$ 。相比于泰勒二阶近似, Bakhshali 近似的精度更高。

采用 Bakhshali 近似计算式(1)、式(3):

$$\begin{aligned} R_T(\eta) &= R_{T,c} + \frac{V_T^2 \xi^2}{2R_{T,c}} - \frac{V_T^4 \xi^4}{8R_{T,c}^3 + 4R_{T,c} V_T^2 \xi^2}, \\ R_R(\eta) &= R_{R,c} + \frac{V_R^2 \xi^2}{2R_{R,c}} - \frac{V_R^4 \xi^4}{8R_{R,c}^3 + 4R_{R,c} V_R^2 \xi^2}, \\ R_{bi}(\eta) &= 2\left(R_{m,c} + \frac{V_m^2 \xi^2}{2R_{m,c}} - \frac{V_m^4 \xi^4}{8R_{m,c}^3 + 4R_{m,c} V_m^2 \xi^2}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

根据式(11)重新计算等效参数,其中  $R_{m,c}$  保持不变,等效速度  $V_m$  的计算较为复杂,为了简化运算过程,直接给出结果:

$$\begin{aligned} a &= 2R_{T,c}R_{R,c}[4R_{T,c}^2R_{R,c}^2 + \\ &\quad 2V^2(R_{T,c}^2 + R_{R,c}^2)\xi^2 + V^4\xi^4], \\ b &= V^4(R_{T,c} + R_{R,c})\xi^4 + 8R_{T,c}^2R_{R,c}^2(R_{T,c} + R_{R,c}) + \\ &\quad 2V^2\xi^2[2R_{T,c}R_{R,c}(R_{T,c} + R_{R,c}) + (R_{T,c}^3 + R_{R,c}^3)]. \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_2 = a\xi^2,$$

$$P_1 = R_{m,c}(4aR_{m,c} - V^2b\xi^2), \quad (13)$$

$$P_0 = -2R_{m,c}^3V^2b.$$

$$V_m(R; \xi) = \frac{-P_1 + \sqrt{P_1^2 - 4P_2P_0}}{2P_2}. \quad (14)$$

需要注意的是,由于等效速度  $V_m$  与方位向时间有关,因此不但具有距离空变性,还随方位向时变。为满足后续成像处理对方位向均匀采样的要求,需要重新设计成像算法流程。

## 3 改进的 CS 成像算法流程

CS 算法是一种频域算法,通过相位相乘实现成像处理,是一种具有良好保相性的成像算法,它兼顾成熟、简单、高效和精确等因素,至今仍是应用最广泛的成像算法,适用于星载 SAR 成像<sup>[1,22]</sup>。采用 Bakhshali 近似计算的等效速度随方位向变化,所以需要重新设计成像算法流程,图 2 是改进后的 CS 成像算法流程。

因为采用基于单站等效思路的双曲等效成像方法,成像过程可直接沿用单站 SAR 的方法,这也是该方法的一大优点。CS 算法<sup>[23]</sup>的关键步骤是三步相位相乘,第一步相位相乘通过变线性标方程实现补余距离徙动校正,使所有目标残余的距离徙动轨迹保持一致,其相位方程为

$$\Phi_1 = \exp\{-j\pi K_{r0}C_{s0}(f_\eta)[\tau - \tau_{ref0}(f_\eta)]^2\},$$

$$K_{r0} = \frac{K_r}{1 + K_r R_{ref} \frac{2\lambda}{c^2} \frac{\left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}},$$

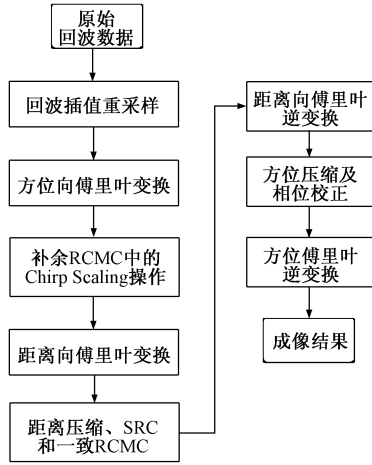


图 2 改进的 CS 成像算法流程

Fig. 2 Improved procedure of CS imaging algorithm

$$C_{s0}(f_\eta) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r}\right)^2}} - 1, \quad (15)$$

$$\tau_{\text{ref}0}(f_\eta) = \frac{2}{c} R_{\text{ref}} [1 + C_{s0}(f_\eta)].$$

式中:  $R_{\text{ref}}$  为参考目标的最短斜距, 即  $R_{m,c}$ ; 由于距离向和方位向耦合, 导致距离向调频率距有所变化,  $K_{r0}$  即为改变后的距离向调频率, 具有距离空变性;  $f_\eta$  为方位向频率;  $C_{s0}(f_\eta)$  是徙动因子。

第二步相位相乘通过参考函数实现距离压缩, 二次距离压缩 (SRC) 以及一致距离徙动校正, 其参考函数为

$$\Phi_2 = \exp \left\{ -j \frac{\pi f_\tau^2}{K_{r0} [1 + C_{s0}(f_\eta)]} \right\} \times \exp \left\{ j \frac{4\pi f_\tau R_{\text{ref}} C_{s0}(f_\eta)}{c} \right\}. \quad (16)$$

最后一步相位相乘通过与随距离变化的匹配滤波器进行相位相乘, 实现方位压缩与聚焦, 由于第一步相位相乘中的变标操作, 这一步中还需要附加一项校正相位<sup>[13]</sup>, 其补偿因子为

$$\Phi_3 = \exp \left\{ -j \frac{2\pi c \tau}{\lambda} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r}\right)^2} \right] + j\theta(f_\eta) \right\},$$

$$\theta(f_\eta) = \frac{4\pi}{c^2} K_{r0} [1 + C_{s0}(f_\eta)] C_{s0}(f_\eta) (R - R_{\text{ref}}). \quad (17)$$

式中,  $R$  为其他目标点对应的最短斜距。

改进的 CS 算法与传统 CS 方法的主要不同之处在于对回波数据的处理。等效速度由于具有时变性, 为后续成像处理带来了麻烦, 因此需要对其重采样, 使回波满足方位向均匀采样的要求。如图 3 所示, 采用线性插值的方法, 以某一距离单

元为例, 根据已知的相邻两个方位采样点插值出均匀采样点, 其线性插值基函数和插值点的计算公式如下:

$$l_k(x) = \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}},$$

$$l_{k+1}(x) = \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}. \quad (18)$$

$$L_1(x) = y_k l_k(x) + y_{k+1} l_{k+1}(x). \quad (19)$$

式中:  $x$  表示方位向采样点位置信息,  $y$  表示回波信息, 需要对回波数据的实部和虚部均进行插值。此外, 等效速度还具有距离空变性, 因此需要对每一距离单元都进行方位向的线性插值重采样。

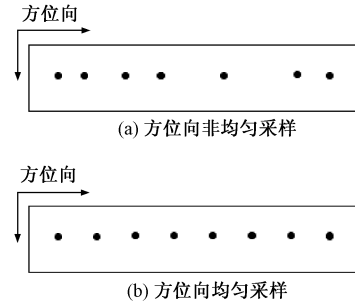


图 3 方位向插值重采样

Fig. 3 Resample by interpolation in azimuth

## 4 仿真结果与分析

本节针对星载双站 SAR 进行仿真实验, 并通过仿真验证本文中提出方法的有效性。本文采用平飞正侧视模型, 其成像几何示意图如图 1 所示, 成像模式为条带模式。星载双站 SAR 由主星和辅星构成, 星历参数如表 1 所示, 其中主星半长轴为 6 795.35 km 和 6 805.35 km 时, 对应主辅星间基线距分别 0.51 km 和 10.5 km。仿真卫星采用 X 波段的中心频率, 距离向和方位向的天线尺寸均设为 5 m 左右, 方位向分辨率约为 2.5 m, 主辅星的成像参数基本相同, 具体的成像仿真参数见表 2。

表 1 主辅卫星星历仿真实验参数

Table 1 Ephemeris simulation parameters of master and slave satellites

星历仿真参数	主星参数	辅星参数
半长轴/km	6 795.35 / 6 805.35	6 795.35
偏心率	0.001 1	0.001 134
升交点赤经/(°)	178.367	178.384
轨道倾角/(°)	92.358 6	92.358 6
近地点幅角/(°)	90	90
真近心角/(°)	0	0



多点目标的分布如图 4 所示,沿距离向设置 5 个点目标,其坐标分别为 A(188,0)、B(262,0)、C(336,0)、D(410,0)、(484,0),距离向分辨率为 0.983 8 m。

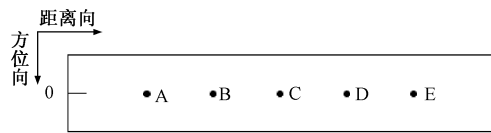


图 4 距离向多点目标分布示意图

Fig. 4 Distribution of multiple targets in range

表 2 主辅卫星成像仿真实验参数

Table 2 Imaging simulation parameters of master and slave satellites

成像仿真参数	主星参数	辅星参数
载频/GHz	9.57	
距离向带宽/MHz	120	
距离向采样率/MHz	135	
脉冲宽度/ $\mu$ s	43	
脉冲重复频率/Hz	3 650	
俯视角/ $^{\circ}$	34.421	32.444 71

首先分析比较泰勒展开近似与 Bakhshali 近似的近似精度,对于双站 SAR 的双根式距离历

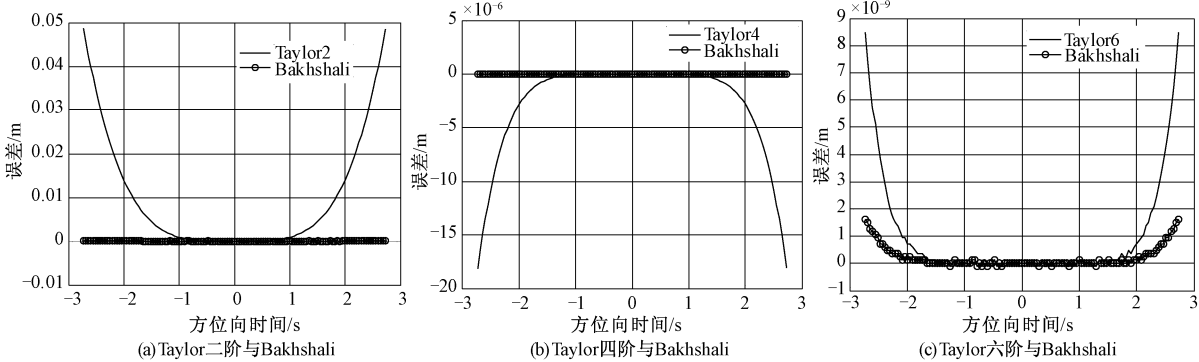


图 5 泰勒二阶、四阶以及六阶近似与 Bakhshali 近似误差对比

Fig. 5 Approximation error comparison between Bakhshali and the second-order, fourth-order, and sixth-order Taylor

改进前的双曲等效方法采用泰勒二阶近似计算等效斜距和等效速度,改进后的双曲等效方法采用 Bakhshali 近似计算等效参数,图 6(a)比较 2 种方法单站等效后的单根式距离历程与真实的双根式距离历程的近似误差,可以看到根据表 3 给出的仿真参数,随着合成孔径时间的增加,基于 Bakhshali 近似的精度相对于泰勒二阶展开整体上提高近 2 倍,以 -3 s 时刻为例,改进后的等效误差为  $9.843\text{e}-06$  m。

为了更好地比较两种双曲等效方法的近似误差,再从双星间基线距变化的角度进行分析,通过收发斜距差来体现,其中发射距离为 700 km,接

程,分别采用泰勒二阶、四阶、六阶近似和 Bakhshali 近似对其展开,以表 3 的一组星载仿真参数比较 2 种方法的近似误差,仿真结果如图 5 所示。

表 3 近似精度比较仿真参数

Table 3 Simulation parameters for comparison of approximation precision

仿真参数	
主星与目标斜距/km	700
辅星与目标斜距/km	710
主辅星速率/(km/s)	7
脉冲重复频率/Hz	3 000
方位向采样点数	16 384

从图 5 可知,对于双根式距离历程,当合成孔径时间较短时,泰勒二阶、四阶以及六阶的近似精度和 Bakhshali 近似的误差都非常小,接近 0,但是当合成孔径时间变长,如图所示超过 2 s 时,泰勒二阶近似与真实的双根式距离历程的误差迅速增大,而 Bakhshali 近似在整个仿真所给出的近 6 s 的合成孔径时间内均非常小。由此可知,对于星载 SAR 成像几何模型,当合成孔径时间较长时采用 Bakhshali 近似的距离模型精度更高。

收斜距  $R_1$  的变化范围为 700 ~ 1 700 km,方位向时刻固定为 -3 s。如图 6(b)所示,可以看到随着收发斜距差的增大,Bakhshali 近似误差变化趋势更平缓。图 7 对误差随合成孔径时间和收发斜距差的二维变化进行比较,改进后的双曲等效方法整体近似精度有了提高。

最后根据表 1 和表 2 所给的仿真参数以及按图 4 设置的多点目标,采用 CS 算法在未加窗的情况下得到两种双曲等效方法参考目标的聚焦图像和质量参数。

图 8 和图 9 分别表示主星和辅星间的基线在 0.51 km 和 10.5 km 情况下,经典双曲等效方

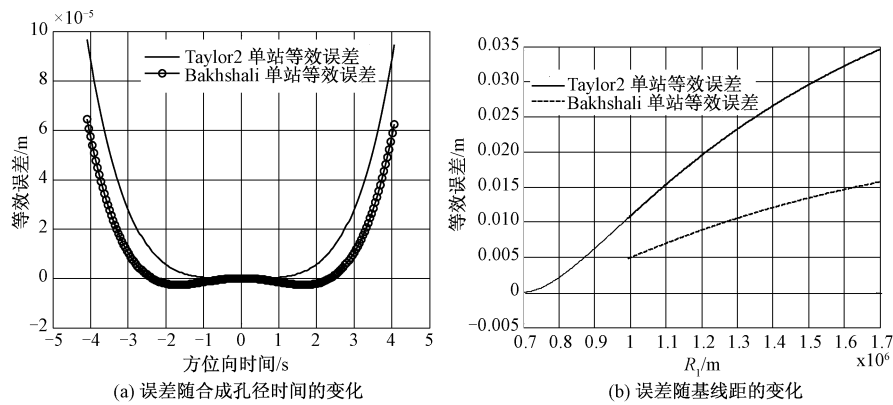


图 6 两种近似的单站等效误差

Fig. 6 Monostatic equivalence error comparison between two methods

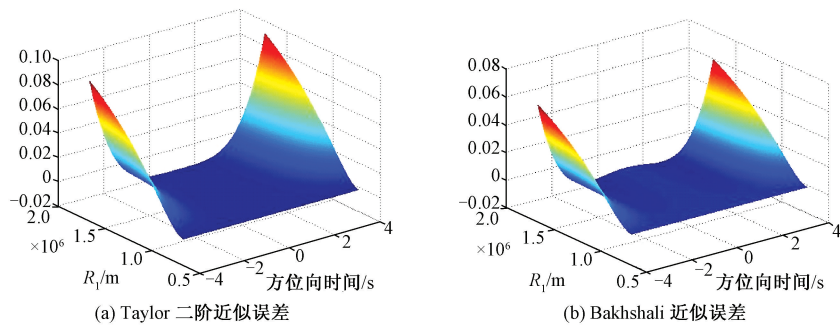


图 7 两种方法的二维误差

Fig. 7 Two-dimensional errors of two methods

法<sup>[15]</sup>和本文方法的距离向测绘带多点目标的成像结果,其中等高线图和方位向压缩波形图表示的是景中心 C 点的成像结果,表 4 和表 5 列出两种情况下所有点目标距离向和方位向的峰值旁瓣比和积分旁瓣比的结果。

当基线距为 0.51 km 时,主辅星间距离较近,相较于经典的双曲等效方法,即采用泰勒二阶近

似的方法,本文方法的成像结果质量有轻微的提高。但是当基线距增大到 10.5 km 时,两种方法方位向都开始散焦,但基于 Bakhshali 近似的双曲等效方法,其沿距离向多点目标成像结果的峰值旁瓣比和积分旁瓣比均比泰勒二阶近似要好,且有了较为明显的提高,随着基线距的增大,提升效果将会更显著。

表 4 基线距为 0.51 km 时两种方法的成像结果

Table 4 Imaging results with the baseline of 0.51 km

点目标序号	Taylor 二阶近似				Bakhshali 近似			
	距离向指标		方位向指标		距离向指标		方位向指标	
	PSLR/dB	ISLR/dB	PSLR/dB	ISLR/dB	PSLR/dB	ISLR/dB	PSLR/dB	ISLR/dB
A	-13.03	-9.93	-12.93	-9.82	-13.18	-10.11	-13.29	-10.45
B	-12.86	-9.80	-12.93	-9.82	-13.01	-9.98	-13.29	-10.45
C	-12.77	-9.78	-12.94	-9.82	-12.91	-9.96	-13.28	-10.45
D	-12.99	-9.87	-12.94	-9.82	-13.14	-10.05	-13.30	-10.46
E	-13.20	-10.05	-12.94	-9.82	-13.36	-10.23	-13.30	-10.45

表 5 基线距为 10.5 km 时两种方法的成像结果

Table 5 Imaging results with the baseline of 10.5 km

点目标序号	Taylor 二阶近似				Bakhshali 近似			
	距离向指标		方位向指标		距离向指标		方位向指标	
	PSLR/dB	ISLR/dB	PSLR/dB	ISLR/dB	PSLR/dB	ISLR/dB	PSLR/dB	ISLR/dB
A	-12.95	-9.84	-7.30	-5.04	-13.09	-10.00	-7.46	-5.71
B	-12.83	-9.64	-7.30	-5.03	-12.97	-9.80	-7.48	-5.70
C	-12.85	-9.67	-7.30	-5.03	-12.99	-9.83	-7.49	-5.69
D	-12.90	-9.66	-7.31	-5.04	-13.03	-9.82	-7.51	-5.72
E	-12.99	-9.81	-7.31	-5.05	-13.11	-9.98	-7.53	-5.73

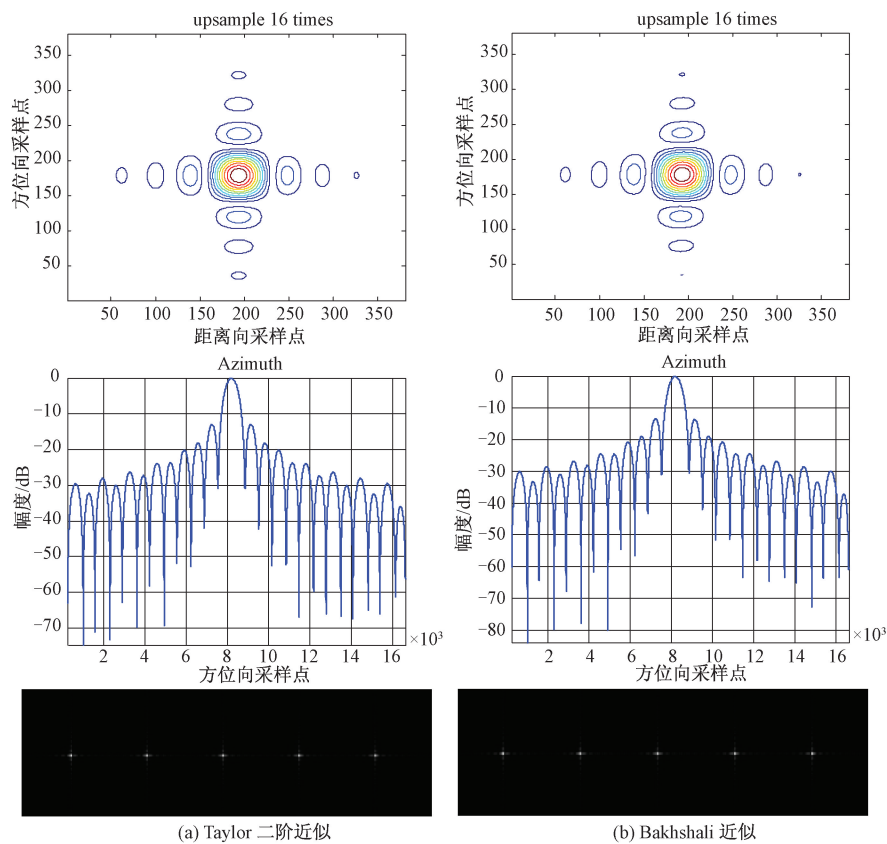


图 8 基线距为 0.51 km 时的多点目标成像结果

Fig. 8 Imaging results of multiple targets with the baseline of 0.51 km

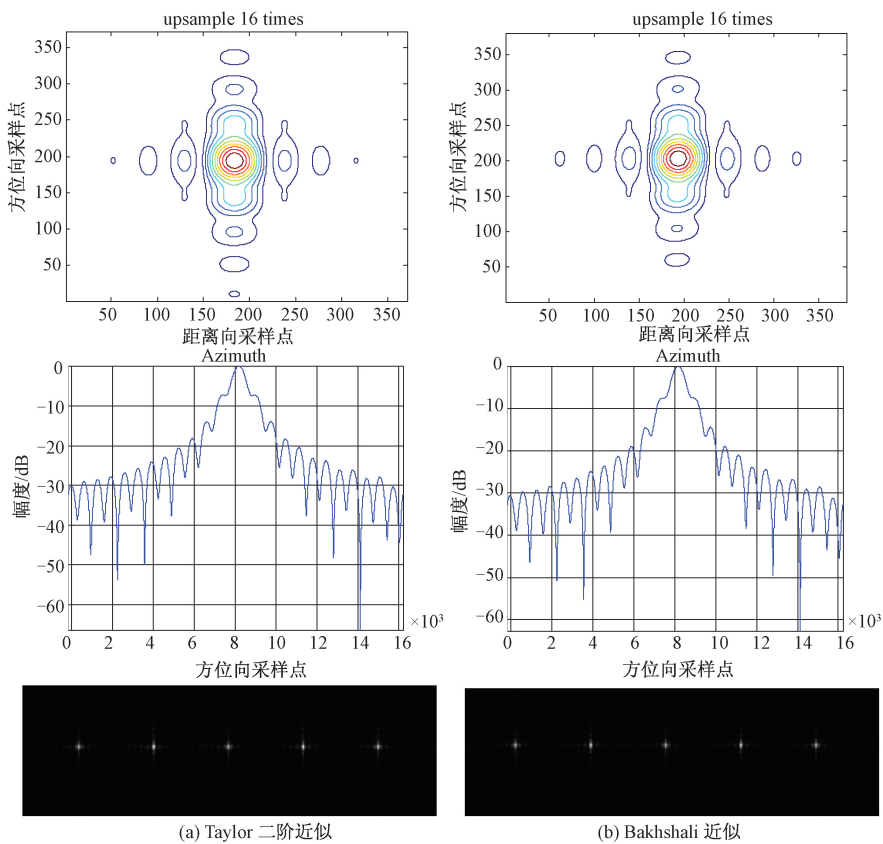


图 9 基线距为 10.5 km 时的多点目标成像结果

Fig. 9 Imaging results of multiple targets with the baseline of 10.5 km

## 5 总结

本文基于单站等效思路,提出一种新的基于 Bakhshali 近似的双曲等效方法,并重新设计适用于新方法的 CS 成像流程。相比于传统的基于泰勒二阶近似的双曲等效方法,采用 Bakhshali 近似的双曲等效方法对于双根式距离历程的近似精度更高,误差更低。本文最后通过星载双站 SAR 的仿真参数对两种等效方法进行误差对比和多点目标仿真,并分别对不同基线距下的成像结果进行指标分析,通过仿真验证了在基线增大和合成孔径时间增加的情况下本文方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-8.
- [2] 黄丽佳, 仇晓兰, 胡东辉, 等. 机载双站聚束 SAR 改进  $\omega$ K 算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2154-2160.
- [3] 胡继伟, 洪峻. 基于三维重建的分布式卫星 SAR 干涉测高模型及误差分析[J]. 中国科学院大学学报, 2011, 28(4): 489-497.
- [4] 陈立福, 林月冠, 彭曙蓉, 等. 一种用于机载双天线 InSAR 系统的实时 DEM 生成方法及实现[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(5): 678-684.
- [5] 仇晓兰, 丁赤飏, 胡东辉. 双站 SAR 成像处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 8-9.
- [6] 刘建平, 梁甸农. 主星带伴随分布式小卫星雷达系统的波束同步分析[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(2): 54-58.
- [7] Younis M, Metzger R, Krieger G. Performance prediction of a phase synchronization link for bistatic SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 429-433.
- [8] 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.
- [9] Natroshvili K, Loffeld O, Nies H, et al. Focusing of general bistatic SAR configuration data with 2-D inverse scaled FFT [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2718-2727.
- [10] Neo Y L, Wong F, Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93-96.
- [11] 李冉, 皮亦鸣, 张晓玲. 基于改进 Bp 算法的机载双基地 SAR 成像[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(6): 348-352.
- [12] Aria D, Guarnieri A M, Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [13] Ding J, Zhang Z, Xing M, et al. A new look at the bistatic-to-monostatic conversion for Tandem SAR image formation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(3): 392-395.
- [14] 闫鸿慧, 王岩飞, 于海锋, 等. 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基 SAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 771-774.
- [15] Bamler R, Meyer F, Liebhart W. Processing of bistatic SAR data from quasi-stationary configuration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3350-3358.
- [16] Bamler R, Boerner E. On the use of numerically computed transfer functions for processing of data from bistatic SARs and high squint orbital SARs [C] // International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, 86(86): 1051-1055.
- [17] Channabasappa M N. On the square root formula in the Bakhshali manuscript [J]. Indian Journal of History of Science Calcutta, 1976, 11: 112-124.
- [18] Duersch M I. Backprojection for Synthetic Aperture Radar [D]. Provo: Brigham Young University, 2013.
- [19] Qiu X L, Hu D H, Ding C B. Focusing bistatic images use RDA based on hyperbolic approximating [C] // International Conference on Radar. Shanghai, 2006: 1323-1326.
- [20] Clemente C, Soraghan J J. Approximation of the bistatic slant range using Chebyshev polynomials [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 682-686.
- [21] 田卫明, 曾涛, 胡程. 基于导航信号的 BiSAR 成像技术[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 39-45.
- [22] Cumming I G, Wong F. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 洪文, 胡光辉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 192-193.
- [23] 张升康, 杨汝良. 双基地合成孔径雷达扩展 Chirp Scaling 成像算法[J]. 中国科学院大学学报, 2008, 25(1): 101-109.