

一种新的星载双站 SAR 斜视等效距离模型

黄海风, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对星载双站合成孔径雷达, 提出单直线斜视等效距离模型, 并给出适用的充分条件, 与二阶距离模型、双直线同速等效距离模型、双直线双速等效距离模型进行理论和仿真分析比较, 表明单直线斜视等效距离模型是一种精确、有效、简洁的距离模型. 由于该模型具有单站 SAR 距离模型的形式, 因此可以采用单站 SAR 成像方法进行双站 SAR 成像处理, 最后基于该模型, 通过高精度斜视 CS 算法进行双站 SAR 成像仿真验证.

关键词: 等效距离模型; 星载双站合成孔径雷达; chirp scaling

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2209-04

A new effective squint range model of Spaceborne bistatic SAR

HUANG Hai feng, LIANG Dian nong

(College of Electronic Science and Engineer, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: As to spaceborne bistatic SAR, a new single line effective squint range model is presented. Its sufficient condition is given, too. It is compared with three other range models which are second order model, double line equal velocity model and double line double velocity model. The result of comparison in theory and simulation show that the single line range model is an accurate, valid and simple range model. Because the model have the same form as the monostatic SAR, it can be applied to bistatic SAR imaging processing by monostatic SAR imaging methods. Lastly, the chirp scaling algorithm is used to bistatic SAR imaging based on this model.

Key words: effective range model; Spaceborne bistatic SAR; chirp scaling

1 引言

星载分布式 SAR^[1,2]是目前提出的一种全新雷达概念系统, 是国际上研究的热点问题之一. 星载双站 SAR 是星载分布式 SAR 的基本组成单元, 高精度的距离模型是星载双站 SAR 乃至星载分布式 SAR 高分辨成像处理的关键. 目前的距离模型有二阶距离模型^[3-6]和双直线距离模型^[3,4]. 二阶模型由于忽略了三次以上项, 因此误差较大. 双直线模型必须已知孔径中心时刻的收发斜距 r_1 和 r_2 , 对于双站 SAR 收发平台相距较远的情况(超出极限基线), 即使发射卫星也可以接收, 它所成的图像与接收卫星所成的图像不相关, 二者无法配准, 不能得到同名点对应的斜距 r_1 和 r_2 , 因此双直线模型的应用受到很大限制. 并且双直线距离模型的参数确定方法和基于该模型的成像算法也十分复杂^[3,4].

本文提出一种用单直线轨迹近似实际双站 SAR 等效相位中心轨迹的星载双站等效直线轨迹距离模型. 该模型没有忽略三次以上各高次项, 误差远小于二阶模型. 这种模型将双站 SAR 问题简化为单站 SAR 问题, 给成像处理带来很大的方便.

2 四种距离模型

2.1 二阶距离模型

由多普勒中心频率和多普勒调频斜率构造的双基地收发

距离和的二阶距离逼近模型为:

$$R(t) = 2 * \left[\frac{r_1 + r_2}{2} - \frac{\lambda}{2} (f_{Dc} * t + \frac{1}{2} f_R * t^2) \right] \quad (1)$$

其中 r_1, r_2 分别为在合成孔径中心时刻发射卫星和接收卫星与目标的距离. 与单星 SAR 二阶距离逼近模型相比发现, 二者具有相同的形式, 因此可用相同的成像算法处理.

2.2 双直线双速距离模型

单星斜视等效距离模型^[5,6]是一种很精确的距离模型, 因此双站 SAR 的收发斜距可以分别用各自的斜视等效距离来近似.

发射等效斜距:

$$R_1(t) = \sqrt{r_1^2 + v_1^2 t^2 - 2r_1 v_1 t \sin \phi_1} \quad (2)$$

接收等效斜距:

$$R_2(t) = \sqrt{r_2^2 + v_2^2 t^2 - 2r_2 v_2 t \sin \phi_2} \quad (3)$$

收发距离和:

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) \quad (4)$$

等效速度 v_1 和 v_2 , 等效斜视角 ϕ_1 和 ϕ_2 与各自单站多普勒中心频率和调频率的关系如下:

$$f_{Di} = \frac{2V_i}{\lambda} \sin \phi_i, \quad j = 1, 2 \quad (5)$$

$$f_{Ri} = - \frac{2V_i^2 \cos^2 \phi_i}{\lambda r_i} \quad (6)$$

2.3 双直线同速距离模型(也称等效平行轨迹距离模型^[3,4])

由于发射卫星和接收卫星长期伴随飞行,卫星轨道要素差别微小,在一个成像孔径的时间内两卫星近似平行同步飞行,用平行直线轨迹近似收发卫星实际飞行轨迹是合理的,模型几何关系如图1所示,收发距离和表达式为:

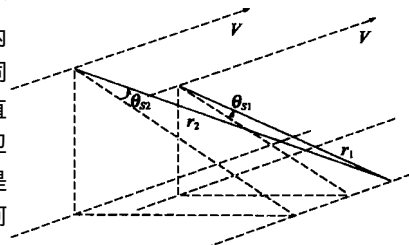


图1 双直线同速模型

$$R(t) = \sqrt{r_1^2 + v^2 t^2 - 2r_1 v t \sin\theta_{s1}} + \sqrt{r_2^2 + v^2 t^2 - 2r_2 v t \sin\theta_{s2}} \quad (7)$$

其中 r_1, r_2 定义同上, v 为等效同步飞行速度, θ_{s1}, θ_{s2} 为等效发射斜视角和等效接收斜视角,大小在 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 之间,正值表示前侧视.各等效参数的估值方法见文献[3,4].

2.4 单直线距离模型

既然在一个成像孔径的时间内两卫星近似平行同步飞行,可以认为两卫星的等效相位中心轨迹也近似为一条直线,如图2所示.因此得到与单站等效斜视距离模型类似的单直线等效模型:

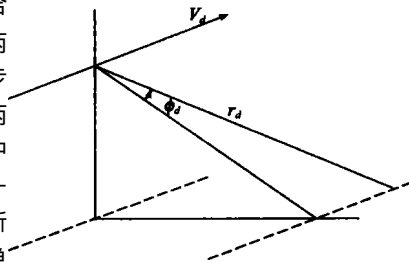


图2 单直线等效斜距模型

单直线等效斜距

$$R_d(t) = \sqrt{r_d^2 + v_d^2 t^2 - 2r_d v_d t \sin\phi_d} \quad (8)$$

孔径中心斜距

$$r_d = (r_1 + r_2)/2 \quad (9)$$

等效速度 v_d 和等效斜视角 ϕ_d 同理由双站 SAR 多普勒参数求得:

$$f_{Dc} = 2v_d/\lambda \sin\phi_d \quad (10)$$

$$f_R = \frac{2v_d^2 \cos^2\phi_d}{\lambda r_d} \quad (11)$$

其中,收发斜距和、多普勒参数由双站 SAR 接收回波数据估计得到^[5,6].它与单站多普勒参数的关系是:

$$f_{Dc} = (f_{Dc1} + f_{Dc2})/2, f_R = (f_{R1} + f_{R2})/2.$$

3 距离模型比较

二阶模型由于忽略了三次以上项,因此误差较大.双直线双速和同速模型必须已知 r_1 和 r_2 ,对于双站 SAR 的收发平台相距较远的情况,即使发射卫星也可以接收,它所成的图像与接收卫星所成的图像不相关,二者无法配准,不能得到同名点对应的斜距 r_1 和 r_2 ,因此这两种模型的应用受到很大限制.

实际上,星载双站 SAR 的空间几何关系十分复杂,卫星平台受摄动影响,运动规律无法解析表示,因此给出单直线等效模型误差的解析表达式是不现实的,这也是没有文献能够给出任何单星距离模型误差解析表示的原因.幸运的是,单星斜视等效距离模型的高精度和有效性在工程实践中已得到充分验证,而双直线双速模型来源于单星斜视等效距离模型,这为论证单直线等效模型的有效性提供了参考,即通过对单直线等效模型与双直线双速模型的距离差别量级进行比较,来判断单直线等效模型的有效性.以下对单直线等效模型与双直线双速模型误差量级进行比较.

斜距模型 $R(t) = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \sin\phi}$ 的泰勒展开如下:

$$R(t) \approx r - \sin\phi vt + \frac{\cos^2\phi v^2 t^2}{2} + \frac{\sin\phi \cos^2\phi v^3 t^3}{2r^2} + \frac{\cos^2\phi(5\sin^2\phi - 1)v^4 t^4}{8r^3} + o\left(\frac{v^4 t^4}{r^3}\right) \dots$$

由四次项引起的相位 $|n\pi \frac{\cos^2\phi(5\sin^2\phi - 1)v^4 t^4}{4\lambda r^3}| < n\pi \frac{\cos^2\phi(5\sin^2\phi - 1)L^4}{4\lambda r^3} \triangleq \Phi_1(\lambda, r, L, \phi)$, 其中 L 是孔径长度,等效斜视角 ϕ 可由多普勒参数得到,单程斜距对应 $n=1$,双程对应 $n=2$.

当满足:

$$\Phi_1(\lambda, r, L, \phi) < \frac{\pi}{16} \quad (12)$$

可以忽略斜距的四次和更高次项对成像的影响.

分别对式(2)(3)(8)进行泰勒展开:

$$R_1(t) \approx r_1 - v_1 \sin\phi_1 t + \frac{v_1^2 \cos^2\phi_1}{2r_1} t^2 + \frac{v_1^3 \sin\phi_1 \cos^2\phi_1}{2r_1^2} t^3 + \dots \quad (13)$$

$$R_2(t) \approx r_2 - v_2 \sin\phi_2 t + \frac{v_2^2 \cos^2\phi_2}{2r_2} t^2 + \frac{v_2^3 \sin\phi_2 \cos^2\phi_2}{2r_2^2} t^3 + \dots \quad (14)$$

$$R_d(t) \approx r_d - v_d \sin\phi_d t + \frac{v_d^2 \cos^2\phi_d}{2r_d} t^2 + \frac{v_d^3 \sin\phi_d \cos^2\phi_d}{2r_d^2} t^3 + \dots \quad (15)$$

单直线等效斜距的参考斜距 r_d , 等效速度 v_d 和等效斜视角 ϕ_d 根据下式得到:

斜距和项:

$$r_d = (r_1 + r_2)/2 \quad (16)$$

多普勒中心频率对应项:

$$v_d \sin\phi_d = (v_1 \sin\phi_1 + v_2 \sin\phi_2)/2 \quad (17)$$

多普勒调频率对应项:

$$\frac{v_d^2 \cos^2\phi_d}{r_d} = \frac{v_1^2 \cos^2\phi_1}{2r_1} + \frac{v_2^2 \cos^2\phi_2}{2r_2} \quad (18)$$

容易证明式(10)、(11)与式(17)、(18)等价.因此 $2R_d(t)$ 与 $R(t) = R_1(t) + R_2(t)$ 展开式的前三项相等.

利用关系式(17)(18)易得第四项之差:

$$\Delta 4R = \left[\frac{v_1^3 \sin\phi_1 + v_2^3 \sin\phi_2}{2r_d} \left(\frac{v_1^2 \cos^2\phi_1}{2r_1} + \frac{v_2^2 \cos^2\phi_2}{2r_2} \right) - \frac{v_1 \sin\phi_1}{r_1} \frac{v_1^2 \cos^2\phi_1}{2r_1} - \frac{v_2 \sin\phi_2}{r_2} \frac{v_2^2 \cos^2\phi_2}{2r_2} \right] t^3$$

$$= -\frac{\lambda_2 L^3}{4} \left[\frac{1}{r_d} \frac{f_{D1} + f_{D2}}{2} \frac{f_{R1} + f_{R2}}{2} - \frac{1}{r_1} f_{D1} f_{R1} - \frac{1}{r_2} f_{D2} f_{R2} \right]$$

$$< \left\{ |f_{R1}| \cdot \frac{(r_2 - r_1)^2}{2r_d r_2 r_1} \cdot \max(|f_{Dc1}|, |f_{Dc2}|) + \max(f_{R1}, f_{R2}) \right.$$

$$\cdot |f_{Dc2}| \cdot \frac{|r_2 - r_1|}{4r_d r_2} + |f_{R1} - f_{R2}| \cdot \max(|f_{Dc1}|, |f_{Dc2}|)$$

$$\left. \cdot \frac{1}{\min(r_1, r_2)} \right\} \times \frac{\lambda^2 L^3}{4}$$

因为 $\frac{(r_2 - r_1)^2}{2r_d r_2 r_1} \ll \frac{|r_2 - r_1|}{4r_d r_2}$, 所以由 $\Delta_4 R$ 引起的相位差

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta_4 R < [\max(f_{R1}, f_{R2}) \cdot |f_{Dc2}| \cdot \frac{|r_2 - r_1|}{4r_d r_2} + |f_{R1} - f_{R2}|$$

$$\cdot \max(|f_{Dc1}|, |f_{Dc2}|) \cdot \frac{1}{\min(r_1, r_2)}] \lambda^2 T_a^3$$

$$\triangleq \Phi_2(\lambda, r_1, r_2, f_{Dc1}, f_{Dc2}, f_{R1}, f_{R2}, T_a^3)$$

其中, T_a 是双站合成孔径时间。

当满足:

$$\Phi_2(\lambda, r_1, r_2, f_{Dc1}, f_{Dc2}, f_{R1}, f_{R2}, T_a^3) < \frac{\pi}{16} \quad (19)$$

可以忽略斜距第四项之差的影响。

在上面推导过程中, 令 $v_1 = v_2 = V$, $\phi_1 = \theta_{s1}$, $\phi_2 = \theta_{s2}$, 同理可以得到单直线等效模型与双直线同速模型的差别量级。根据上面的分析, 我们得到单直线斜距模型等效为双直线模型的充分条件是满足式(12)和(19), 其中 Φ_1 、 Φ_2 中的多普勒参数、孔径中心斜距、合成孔径长度和时间可以通过回波数据和空间几何估计得到。该条件对于一般的编队卫星双站 SAR 都是满足的, 因此与双直线双速模型和双直线同速模型一样, 可以认为单直线等效斜距模型也是一种十分精确的距离模型。

表 1 星载双基地 SAR 系统主要参数

系统卫星参数		系统雷达参数	
卫星轨道高度	800km	发射信号波长	5.6cm
收发卫星间距离	100km、200km	发射脉冲带宽	16MHz
轨道倾角差	σ	天线方位角尺寸	10m
升交点赤经差	σ	脉冲重复频率	2000Hz
观测区纬度	南纬 6σ	波束中心视角	3σ
Cartwheel 半长轴	5km	发射星斜视角	σ 、 1σ 、 2σ

4 仿真分析

采用表 1 仿真参数, 下面对四种距离模型的误差量级进行仿真比较。表 1 参数是根据 CNES 的 interferometric Cartwheel 构形提出的^[1], 以 Envisat 为设想的发射卫星, 斜视角指发射卫星距离-高度平面与轨道法平面的二面角, 收发卫星间距离考虑 100 公里和 200 公里两种情况。表 2 给出运行一圈内, 四种距离模型相对于实际收发距离和误差所引起的相位误差最大值比较。

表 2 四种距离模型一圈内相位误差比较

发射星斜视角	收发卫星间距离 / km	二阶模型型相位误差	双直线同速模型相位误差	双直线双速模型相位误差	单直线模型相位误差
σ	100	14.65°	0.17°	0.17°	0.13°
σ	200	50.35°	0.42°	0.47°	1.38°
10°	100	56.13°	0.30°	0.39°	0.42°
10°	200	70.37°	0.47°	0.41°	0.46°
20°	100	95.10°	0.82°	0.84°	0.86°
20°	200	113.07°	0.87°	0.87°	0.87°

图 3 (a) (b) 分别是斜视角 σ , 收发卫星相距 100km 时, 四种模型在一个孔径和一圈时间内的距离误差比较, (b) 中横坐标是纬度幅角(表示运行一圈)。为方便对比, 图 3 中除了二阶多项式模型误差为误差真值外, 其它模型的误差值都是各自误差真值的 100 倍。由表 2 和图 3 可知, 二阶多项式模型的误差最大, 双直线模型和单直线等效模型误差量级相当(经计算各种情况下的相位 Φ_1 、 Φ_2 都小于 0.1, 符合近似条件(12)和(19)), 约是二阶模型误差的百分之一。随着斜视角和星间

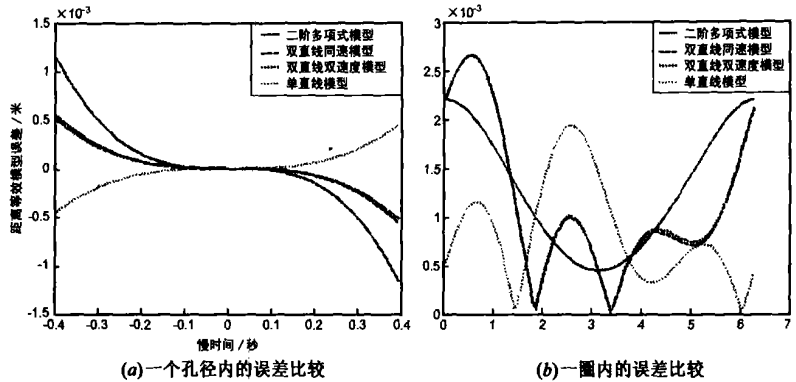


图 3 斜视角 0° 距离 100km, 各距离模型误差比较

距离增大, 二阶模型相位误差大到足以引起严重散焦, 而双直线模型和单直线等效模型在大斜视角和大星间距离下误差仍能满足精确聚焦的要求, 说明这些模型是十分精确的。

由于单直线等效斜距模型将一个双站雷达距离等效为单站雷达斜距, 因此可以采用斜视情况下的单站 Chirp Scaling 成像算法^[5-7]进行双站 SAR 成像, 如图 4 是点目标图像, 表 3 是各种情况下的成像性能统计表, 成像处理中未在方位向进行任何加窗处理。成像仿真结果表明在各斜视角和星间距离下均能取得较好的成像结果, 再一次验证了单直线模型是一种

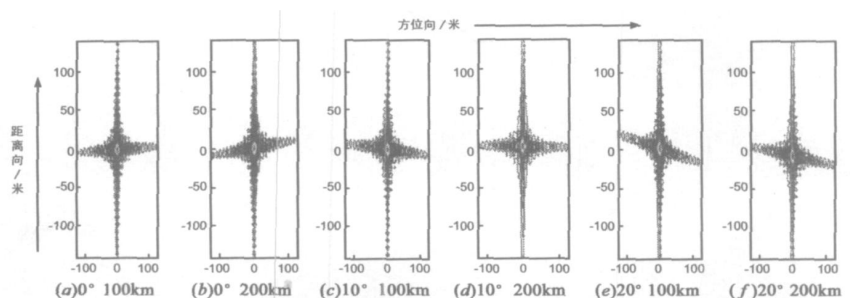


图 4 各种斜视角和星间距离下的点目标成像结果等高线图

精确、有效、简洁的距离模型。

表 3 四种距离模型一圈内相位误差比较

发射星 斜视角	收发星间 距离/km	理论方位 分辨率/m	实际方位 分辨率/m	PSLR _r /dB	LSLR _a /dB
0°	100	5.28	5.3	-13.2	-11.5
0°	200	5.33	5.3	-12.9	-11.2
10°	100	5.23	5.2	-13.4	-11.3
10°	200	5.25	5.3	-13.0	-11.2
20°	100	5.20	5.3	-12.9	-10.8
20°	200	5.22	5.3	-13.3	-11.1

5 结论

星载双站 SAR 是星载分布式 SAR 的基本组成单元, 高精度的距离模型是星载双站 SAR 乃至星载分布式 SAR 高分辨成像处理的关键。本文提出一种类似于单站 SAR 斜视距离模型的双站 SAR 单直线距离模型。该模型误差远远小于二阶模型, 与双直线同速等效距离模型、双直线双速等效距离模型误差量级相当。基于该模型, 通过高精度斜视 CS 算法进行双站 SAR 成像仿真, 仿真结果表明单直线模型是一种精确、有效、简洁的双站 SAR 距离模型。

参考文献:

- [1] D Massonnet. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001: 39(3).
- [2] Bums R, McLaughlin C A. TechSat 21: formation design, control and simulation[A]. Aerospace conference proceedings [C]. New York: IEEE, 2000, 7: 19~ 25.
- [3] 何峰, 梁甸农, 刘建平. 一种星载双基地 SAR 等效平飞距离模型[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(9): 185- 189.
He Feng, Liang Diannong, Liu Jianping. A parallel-track range model for spaceborne bistatic SAR imaging[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26(9): 185- 189. (in Chinese)
- [4] 何峰, 梁甸农, 董臻. 适于大斜视角的星载双基地 SAR

波数域成像算法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1011- 1014.
He Feng, Liang Diannong, Dong Zhen. A Wavenumber domain algorithm for spaceborne bistatic SAR imaging with large squint angle[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1011- 1014. (in Chinese)

- [5] 魏钟铨, 等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Wei Zhongquan, et al. Synthetic Aperture radar Satellite[M]. Beijing: China Science Publication, 2001. (in Chinese)
- [6] 黄岩, 李春升, 等. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35- 38.
Huang Yan, Li Churr sheng, Chen Jie, et al. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 35- 38. (in Chinese)
- [7] G W DAVIDSON, A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. IEEE Trans Aerospace and electronic systems, 1996, 32(1)

作者简介:



黄海风 男, 1976 年出生于江西弋阳, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向为干涉 SAR、分布式 SAR 系统理论等。E-mail: haifeng0728@vip.sina.com.



梁甸农 男, 1936 年出生于湖南涟源, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事超宽带雷达系统理论、分布式 SAR 系统理论及自适应信号处理、谱估计、空间信息获取与处理等研究工作。