

基于椭圆轨道的星载 SAR 面目标原始数据模拟

万 锋^{1,2}, 赵宇鹏^{1,2}, 杨汝良²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 提出了一种基于椭圆轨道的星载 SAR 面目标原始数据模拟的方法。首先通过建立椭圆轨道的卫星平台和地球上目标的运动模型, 求出卫星平台与目标的距离变化规律, 并分析了这个距离与由其它模型得到的距离的不同及其对方位向压缩成像的影响。然后给出了面目标的原始数据模拟的方法, 详尽地描述了整个模拟过程。最后给出并分析了原始数据压缩的方法及成像结果。

关键词: 星载 SAR; 椭圆轨道; 模拟; 面目标

中图分类号: TP 75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0323(2003)02-0103-06

1 引 言

星载合成孔径雷达(SAR)因为它的众多的优点越来越成为研究的热点^[1]。而由于经济及技术条件的限制, 新的星载 SAR 系统的特性及设计性能的验证实验非常少。SAR 模拟可以克服这个困难, 它能模拟出 SAR 的回波, 用于 SAR 系统的检验^[2,3]。它还可以用来测试和评价 SAR 成像处理模型的性能, 即检验各种成像算法, 并能分析出建立在不同模型上的算法的有效性。在原始数据里加上系统误差能预测它在成像处理后所带来的影响。

星载 SAR 由于考虑卫星轨道及地球自转等因素, 比机载 SAR 要复杂的多。模拟星载 SAR 原始数据时, 一般的方法是先利用椭圆轨道计算出中心时刻卫星的速度、加速度、坐标等参数, 然后在模拟一个合成孔径时间内成像中把卫星的轨迹近似看成圆轨道进行原始数据的模拟。为了模拟出更精确的星载 SAR 的原始数据, 本文数据模拟中卫星轨迹始终采用了椭圆轨道。接着本文分析了这个改变给成像过程中方位向压缩带来的影响。此时如果参考函数还是由中心点的多普勒中心频率和多普勒调频率估计出来, 则不能得到较好的方位向压缩效果。为了提供更好的方位向参考函数, 本文采用了拟合的方法由实际仿真出的距离拟合出一个三阶的距离函数来进行方位向的匹配。

为了验证星载 SAR 系统的性能, 除了点目标数据的模拟之外, 分布目标数据的模拟也非常重要。面

目标是有固定几何特征的分布目标, 它的数据模拟是一些人造目标原始数据模拟的基础^[4]。而高分辨率的星载 SAR 系统尤其需要模拟出精确的面目标的原始数据。本文给出了一种精确的星载 SAR 面目标数据的模拟方法。最后通过分析原始数据的成像压缩结果, 验证了本算法的有效性。

2 星载 SAR 平台及目标的模拟

要模拟出精确的星载 SAR 的原始数据, 首先必须精确的确定不同时间内星载 SAR 平台及目标的坐标^[5]。本文中, 星载 SAR 平台运动轨迹采用椭圆轨道模型, 地球采用椭球体模型。建立 8 个坐标系: 地平坐标系、转动的地心坐标系、惯性坐标系、卫星轨道面坐标系、卫星速度坐标系、卫星平台坐标系、天线坐标系和目标成像的斜面坐标系^[6]。由以下步骤可以求出精确的星载 SAR 平台与目标的距离。

2.1 星载平台坐标的计算

对于给定时间 t 与 t_a 求得 $T = t - t_a$, 由开普勒方程 $E - \sin E \cdot e = \sqrt{\frac{GM}{L^3}} \cdot T = 0$, 求得卫星的偏近点角 E 。其中开普勒方程的计算结果的精度对模拟的结果影响非常大, 本文采用了喷射推进实验室(Jet Propulsion Laboratory) Bruce E. Shapiro 的改进算法^[7], 精度可以达到 10^{-15} 弧度, 这个精度完全

满足仿真的需要。根据公式 $\lg \frac{1+e}{1-e} =$

$\operatorname{tg} \frac{E}{2}$, 由偏近点角 E 计算真近角 f 。由公式 $r =$

$\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos f}$ 可以求出卫星距地心的距离 r_0 。求出卫

星在卫星轨道坐标系下的坐标。将此坐标转换到惯性坐标系, 求得卫星在惯性坐标系的坐标。

2.2 星下点坐标的计算

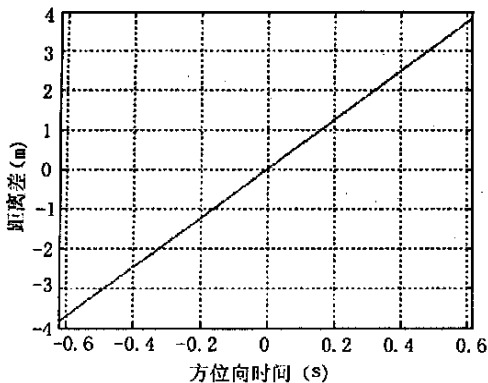
必需注意当考虑地球为椭球模型时, 星下点不能再简单地看成卫星地心连线与地球表面的交点。本文星下点定义是卫星平台到卫星轨道面与地球表面相割的椭圆的垂点, 这样星下点才在卫星的正下方。具体求解的方法就是, 在惯性坐标系下由卫星坐标求出星下点坐标, 算出星下点的经纬度。利用星下点的经纬度算出此点到地心的距离。

2.3 成像点坐标的计算

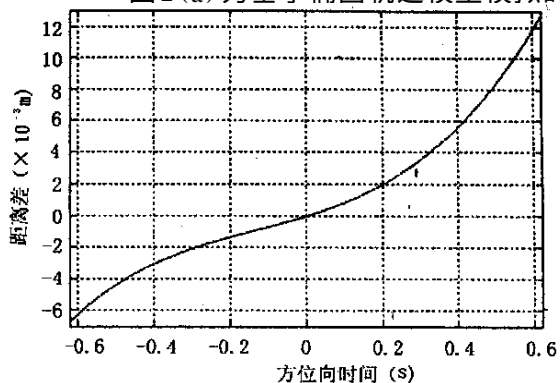
在星载 SAR 模拟的中心时刻, 考虑正侧视的情况下, 设天线的视角为 θ 。先求出当前时刻与卫星速度相垂直的平面与地球表面相割椭圆方程。求出卫星坐标, 星下点坐标的连线偏转 θ 角后与该椭圆相交的点的坐标, 即天线照射在地球上的中心点在惯性坐标系下的坐标。根据成像点与中心点的几何关系, 计算出成像点在惯性坐标系下的坐标。在其它时刻, 由于地球自转, 可以根据自转公式求出成像点在惯性坐标系下的坐标。

2.4 计算斜距

在惯性坐标系下分别求出卫星坐标及成像点的



(a) 卫星为椭圆轨道与圆轨道时和成像点的距离差



(b) 圆轨道模型下卫星和成像点的距离与由多普勒估计出的距离差

图1 不同方法得出的距离差

与由多普勒参数估计得到的方位向参考函数匹配压缩后的结果, 它的峰值旁瓣比为 10.5 dB。另外, 从图中可以看到非对称旁瓣的存在, 这是由于多普勒参数估计的最高阶只有 2 次, 而高次相差会造成非对称旁瓣。

为了提高方位向压缩效果, 本文采用了一个由

坐标, 根据距离公式计算出它们之间的距离, 即斜距。

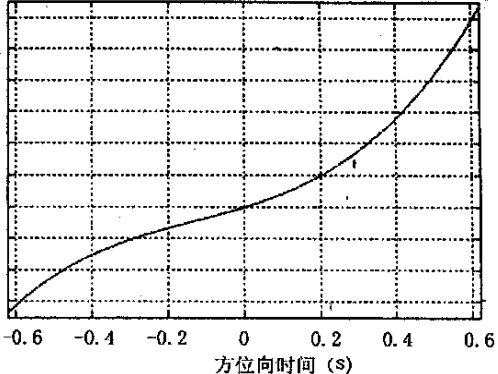
3 椭圆轨道模型下方方位向数据压缩算法的讨论

本文仿真的卫星轨道为近地轨道, 高度为 492 km, 倾角为 97° ; 偏心率为 0.0015。在一个合成孔径时间内, 由上文所介绍的方法计算得到采用椭圆轨道模型时每个方位向采样点时刻卫星到目标的距离。为了比较椭圆轨道与圆轨道的区别, 本文也计算出了相同条件下采用圆轨道模型时的距离。图 1(a) 给出了不同时刻的基于椭圆轨道和圆轨道模型的卫星到成像点的距离之差。从图中可以看出, 距离差的最大值接近 4 m。而方位向多普勒相位为:

$-j \frac{4\pi R(t)}{\lambda}$, 星载 SAR 的波长为 0.09 m 时, 这个距

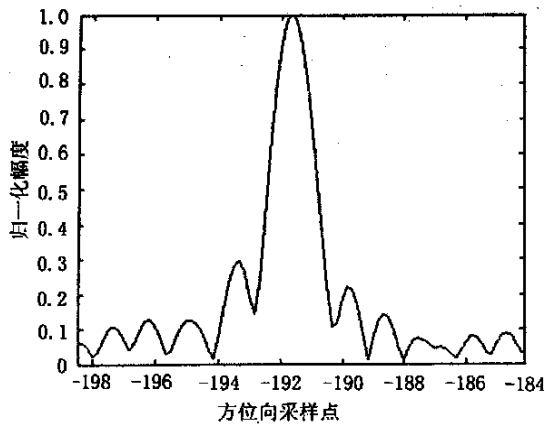
离差对方位向的数据影响很大。多普勒参数估计的模型是基于初速度及加速度模型的, 根据公式可以计算出由多普勒参数估计出的距离。图 1(b) 给出了由多普勒参数得到的距离与圆轨道计算得到距离之差, 由图中可以看出, 它的最大值为 0.012 m。很明显, 由椭圆轨道模型计算得到的卫星与成像点的距离, 与由多普勒参数估计得到的距离, 相差也非常大。这个距离差会造成方位向匹配压缩时的严重失配。

图 2(a) 为基于椭圆轨道模型模拟的方位数据

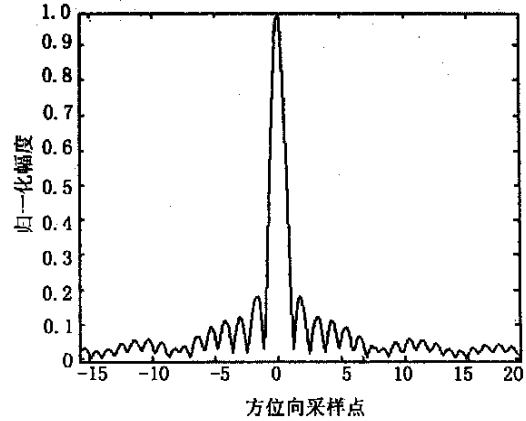


(a) 椭圆轨道模型下卫星和成像点的距离与由多普勒估计出的距离差

实际距离拟合产生三阶系数的方法, 获得方位向的参考函数。具体方法就是根据最小均方误差准则, 用一个三次的多项式逼近卫星与目标的距离, 然后用它产生方位向参考函数。图 2(b) 为用这种方法产生的方位向参考函数匹配压缩的结果, 它的峰值旁瓣比为 14.9 dB。



(a) 椭圆轨道模型下由多普勒估计参数为参考函数的压缩结果



(b) 椭圆轨道模型下由3阶拟合估计参数为参考函数的压缩结果

图 2 压缩结果

比较图 2(a) 和 2(b), 可以看出由拟合方法获得的参考函数压缩效果比由多普勒估计得到的参考函数要好。这就说明对于更加精确的椭圆轨道, 为了获得更好的压缩效果它的参考函数已经不能简单由中心 f_D 和 f_R 来估计。实际的星载成像是先用中心时刻的 f_D 和 f_R 进行初成像, 而后通过杂波锁定和自聚焦等运动补偿的方法来估计出精确的 f_D 和 f_R ^[8]。此外三阶、四阶的参数估计对于获得更好的压缩效果也非常重要^[9]。经过计算, 由三阶拟合计算出的距离与实际的距离最大相差只有 5×10^{-5} m。因为由拟合出的距离在最小均方准则意义下是最接近真实距离的, 所以对于同一阶次的参考函数, 由拟合得到的参考函数是最佳的。它可以用来检验用星载 SAR 压缩算法方法估计出的参考函数的性能。

4 面目标回波信号模型

SAR 发射一线性调频信号, 目标假设为矩形面目标(如图 3 所示)。接收到的面目标回波信号为:

$$s(t) = \sum_i \delta_i W_r[t - r_i(t)/c] W_a[t - r_i(t)/c] \cdot f[t - 2r_i(t)/c] = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \delta_{ij} W_r[t - r_i(t)/c] \cdot W_a[t - r_i(t)/c] f[t - nT - 2r_i(t)/c]$$

其中: i 为目标个数, δ_i 为目标后向散射系数, $W_r[\cdot]$ 为距离向加权函数, $W_a[\cdot]$ 为方位向加权函数。假设一个矩形的面区域的距离向长度为 L_r , 方位向为 L_a 。回波数据距离向的长度 $\Delta l_r = R_{far} - R_{near}$, 方位向的长度为 $\Delta l_a = L_a$ 。则回波数据的大小为:

$$N_r = T \cdot f_s + \Delta l_r \cdot f_s/c, \\ N_a = \lfloor \frac{\Delta l_r}{D} (R_{near} + \Delta l_r) + \Delta l_a \rfloor \cdot Pr f/V$$

取面目标的最小单元为分辨率的 1/2, 即数据点的

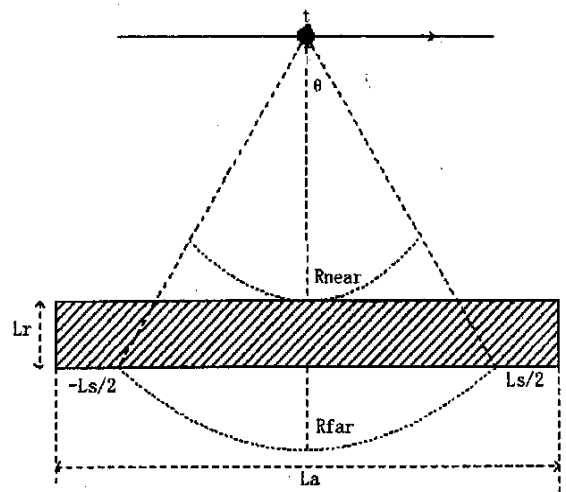


图 3 矩形面目标模型

空间间隔为 $(\Delta r_{ga}, \Delta r_{gr})$ 。

$$\Delta r_{ga} = \frac{V}{2Pr f}, \quad \Delta r_{gr} = \frac{c}{2f_s}$$

假设第 (i, j) 点的横坐标是 x_i , 各个时刻的卫星与成像点的距离是 $r_{ij}(x - x_i)$, R_{cij} 是第 (i, j) 点距卫星最近距离。以 $t = 0$ 时刻, R_{near} 点所在位置为原点, 则回波数据为:

$$s(m, n) = \sum_i \sum_j s_r \left(\frac{m}{Pr f/V} - i \cdot \Delta r_{ga}, \frac{n}{f_s/c} + 2R_{cij} \right) \\ = \sum_i \sum_j \delta_{ij} W_a \left[\frac{m}{Pr f/V} - i \cdot \Delta r_{ga} \right] \times \\ \exp \left\{ -j \left[4\pi r_{ij} \left(\frac{m}{Pr f/V} - i \cdot \Delta r_{ga} \right) / \lambda \right] - \right. \\ \left. j\Phi \left[\frac{n_i}{f_s/c} + 2R_{cij} - 2r_{ij} \left(\frac{m}{Pr f/V} - i \cdot \Delta r_{ga} \right) / c \right] \right\}$$

其中: $-\frac{N_a}{2} \leq m \leq \frac{N_a}{2}, 0 \leq n \leq N_r$

5 星载 SAR 的面目标原始数据的模拟

5.1 星载 SAR 面目标原始数据模拟的原理

首先,根据中心时刻建立卫星到成像点斜面投影坐标系,即确定方位向、距离向的方向。然后,把地平坐标系中的面目标的各点的坐标投影到斜面坐标系中。为了检验成像效果,直接在斜面坐标系下建立面目标。不同方位向时间内的回波数据的计算方法是求出此时卫星的坐标和所有成像点的坐标,进而求出它们之间的距离。然后由距离门的远近把所有点的回波数据在距离向上累加。最后对所有的方位向时间重复以上步骤,便得到了面目标完整的回波数据。

5.2 星载 SAR 面目标原始数据模拟的步骤

(1) 按照方位向上的时间顺序 $x_a = -\frac{N_a}{2}, \dots, \frac{N_a}{2} - 1$, 确定各个方位向的时间 t_a 。

(2) 在时刻 t_a , 计算哪些成像点是在天线照射范围之内, 计算出当前时刻的这些点的坐标和卫星坐标并计算它们的距离。

(3) 根据距离计算出各点的方位向多普勒相位并求出多普勒数据, 再根据方位向的位置乘上各点方位向天线加权值。

(4) 根据距离远近, 划分各个距离门里的成像点数。根据距离门由近向远的顺序, 同一距离门各个成像点回波乘以各自的后向散射系数进行叠加。

(5) 根据距离门的延时, 把各个距离门得到的回波数据进行叠加。

(6) 按照方位向的顺序重复以上步骤, 就可以

模拟出完整的回波数据。

通常模拟的面目标的最小单元是 SAR 分辨率的几分之一, 而方位向是按 PRF 来采样, 这就使得分辨单元小于采样点间距。此外在方位向上有连续的很多点, 必须确定各个目标点的成像的起始和结束时刻, 也就是求出在某个方位向采样时刻有多少目标点是在天线有效照射范围之内。本文采用了一个确定方位向成像点范围的方法来解决这个问题, 具体就是根据几何关系先确定不同时间内哪些范围内的点必须考虑成像, 然后对这些点进行数据模拟。

6 成像结果与分析

(1) 为了验证成像算法的有效性, 首先分析一下该算法的点目标压缩结果。

本文采用的是经典的 RD 算法, 匹配函数是由实际距离的三阶拟合函数产生。因为星载 SAR 成像存在严重的距离徙动, 所以必须首先做距离徙动校正, 本文的校正是在距离向压缩成像后进行的。图 4 就是压缩后归一化的方位向、距离向的结果。最后仿真得出的结果为: 距离向空间分辨率为 2.2 m, 距离向峰值旁瓣比为 13.2 dB, 方位向空间分辨率为 2.8 m, 方位向峰值旁瓣比为 14.9 dB, 这些结果与理论值相吻合。图 5 是点目标的二维压缩结果, 显示的结果经过了 9 倍的插值运算。

(2) 目标的成像结果及其分析

本文模拟了一个 150×150 点的面目标, 各点的后向散射系数由一幅图像的亮度来表示。本文方位向压缩中针对不同距离门的数据分段采用了不同的参考函数。图 6(a) 是原始的图像, 图 6(b) 是对原始数据压缩成像的图像。

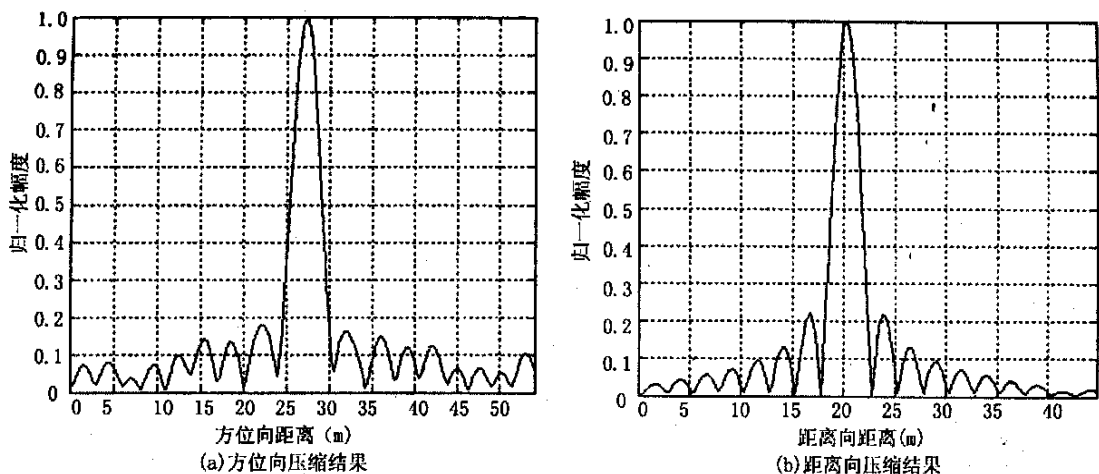


图 4 压缩结果

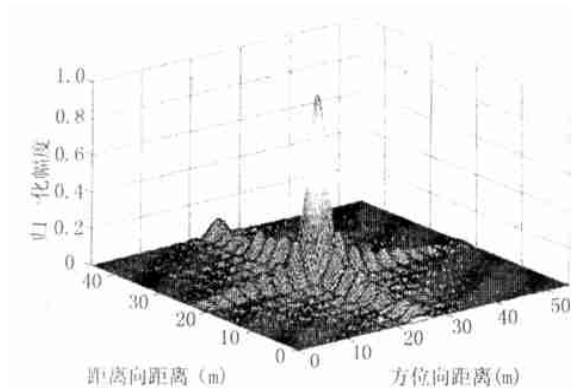
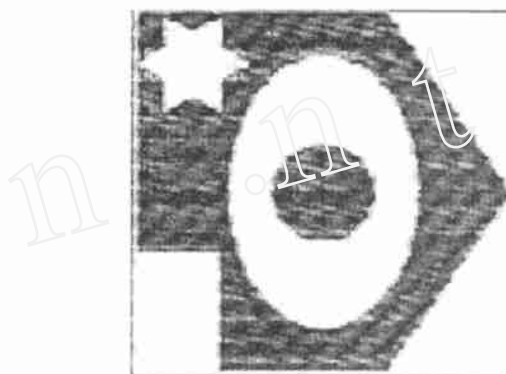


图 5 点目标二维压缩结果



(a) 原始图像



(b) 仿真压缩后图像

图 6 面目标图像

原始数据的成像结果, 验证了其有效性。必须指出, 由于实际 SAR 数据成像处理过程中确切的距离是难以获得的, 本文给出的由实际距离拟合出方位向参考函数的方法并不能应用到实际成像中。但是可以用这种拟合的方法验证其它实用成像算法的多普勒参数估计的准确性。此外, 为了模拟出更加真实的地面场景的星载 SAR 原始数据, 随机分布的三维目标及阴影和重叠效应必须加以考虑, 这些问题都将在下一步的工作中解决。

参考文献:

- [1] 张澄波 综合孔径雷达 [M] 北京: 科学出版社, 1989
- [2] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, *et al* SARA S: A Synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulator [J] IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110~ 123
- [3] Moccia A, Vetrella S, Salvatore Ponte Passive and Active Calibrator Characterization Using a Spaceborne SAR System Simulator [J] IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 715~ 721
- [4] 乌拉比 F T, 穆尔 R K, 冯健超 微波遥感(第二卷)- 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论 [M] 北京: 科学出版社, 1987
- [5] RuiWang, Ruliang Yang PRF Selection for Synthetic Aperture Radar in Ellipse Orbits [R]. SPIE Conference, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment III, Oct, 2002
- [6] 张守信 外弹道测量与卫星轨道测量基础 [M] 北京: 国防工业出版社, 1992
- [7] Shapiro B E. www.bruce-shapiro.net/pair/ElementConversionRecipes.pdf [OL]
- [8] Fuk.kwokLi, Held D N, Curlander J C, *et al* Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic Aperture Radars [J] IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1): 47~ 56
- [9] Eldhuset K. A New Fourth- Order Processing Algorithm for Spaceborne SAR [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 824~ 835

Area Target's Raw Data Simulation of Spaceborne SAR Based on Elliptical Orbit

WAN Feng^{1,2}, ZHAO Yu-peng^{1,2}, YANG Ru-liang²

(1. Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2 Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A method of area target's raw data simulation of spaceborne SAR based on elliptical orbit is presented. Foremost, based on models of satellite with elliptical orbit and targets with rotation of the earth, the distance between the satellite platform and target can be attained, which is compared with the one obtained by other models. The effect of the difference between the elliptical orbit model and circle orbit model on the azimuth compression is analyzed. An optimum method based on polynomial model is brought out. Then, the method and whole procedure of simulating area target's raw data are described. The detailed description of math model of area target's echoes is given first. Following are the steps of simulating raw data of area target. Lastly, the image of the compressed raw data is illustrated and analyzed. The validity of compression algorithm is proved by the compressed result of single point target. After the comparison between the compressed image of raw data simulated and the original image, the conclusion can be reached that this paper's method of simulating raw data of area target is right.

Key words: Spaceborne SAR, Elliptical orbit, Simulation, Area target