

# 地球自转对星载合成孔径高度计的影响

史灵卫<sup>1,2</sup>, 刘和光<sup>1</sup>, 许 可<sup>1</sup>, 杨双宝<sup>1</sup>, 徐曦煜<sup>1</sup>, 王 磊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**合成孔径高度计在方位向采用了合成孔径的方法, 是一种新型高度计。在回波数据处理中, 要在多普勒域进行延迟补偿, 故而需对回波的多普勒频率特性进行研究。通过对卫星雷达和地面目标相对运动速度的分析, 得到了回波的多普勒频率公式。地球自转所产生的多普勒频率对合成孔径高度计的回波波形、有效视数和测量精度存在一定影响。因此在延迟补偿、系统设计、信号处理等方面要加以考虑。

**关 键 词:**合成孔径; 高度计; 延迟补偿; 地球自转

**中图分类号:** TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)03-0277-06

## 1 引 言

雷达高度计主要测量卫星到海面的高度、海浪波高和海面后向散射系数等信息。传统高度计工作在脉冲有限模式下, 其距离分辨率取决于调频脉冲的带宽, 其空间分辨率取决于脉冲有限足迹, 一般在 2 km 左右。为了提高雷达高度计的性能, 提出了许多新型雷达高度计<sup>[1-2]</sup>。

合成孔径高度计又称延时多普勒雷达高度计<sup>[3-4]</sup>, 具有更高的空间分辨率和更高的测量精度。由于在方位向采用了合成孔径的方法, 距离向的回波数据产生了距离徙动, 故而在数据处理时需要距离向的相位进行延迟补偿。雷达与目标的相对位置和斜距一般难以知道, 所以需要校正的相位可以利用多普勒频率与相对方位的关系, 通过多普勒频率进行延迟补偿。

回波的多普勒频率由雷达和散射目标相对运动产生, 而相对运动主要由雷达平台运动和散射目标随着地球自转构成。在参考国内外文献的基础上<sup>[5-8]</sup>, 本文研究了合成孔径高度计的回波多普勒频率特性, 以便在信号处理中能够使用准确的多普勒频率。CryoSat-2 的发射成功表明延迟多普勒雷达高度计进入了实际应用阶段<sup>[9]</sup>。

本文首先简单介绍了合成孔径高度计, 随后推导了合成孔径高度计的回波多普勒频率, 最后给出

了地球自转对合成孔径高度计的影响。

## 2 合成孔径高度计

和传统雷达高度计的发射脉冲一样, 合成孔径高度计的发射脉冲也是线性调频脉冲。但是在方位向采用合成孔径技术, 其回波是脉冲多普勒有限足迹, 而不是脉冲有限足迹; 回波信号的空间由一维变成二维(图 1)。雷达高度计是底视观测, 图 1(b)中, 0 延迟时间对应的位置便是雷达轨迹, 被照亮的目标区域在雷达轨迹两侧。合成孔径高度计提高了顺轨方向的分辨率和整体信号的信噪比。

存储在存储器内的合成孔径高度计回波数据, 在顺轨方向进行傅立叶变换, 然后进行延迟补偿, 即对延时相位系数进行校正。延迟相位系数由下式确定:

$$\Phi(f, t) = \exp \left\{ +j2\pi k_R \frac{2}{c} \delta_r(f) t \right\} \quad (1)$$

其中:  $k_R$  为发射脉冲的线性调频率,  $\delta_r(f)$  是相对于脉冲有限足迹的相对延时。

高度计在距离方向的分辨率与发射信号带宽有关, 且回波是以距离分辨率为间隔的一系列回波信号组成, 若发射信号带宽为 320 MHz, 则高度计的回波序列间隔为 0.468 m, 这些间隔称为距离门。高度计测量的高度就是从这些回波序列中估计得到的, 只要目标的回波信号处于正确的距离门内, 就不会影响高度估计的精度。根据文献[7]:

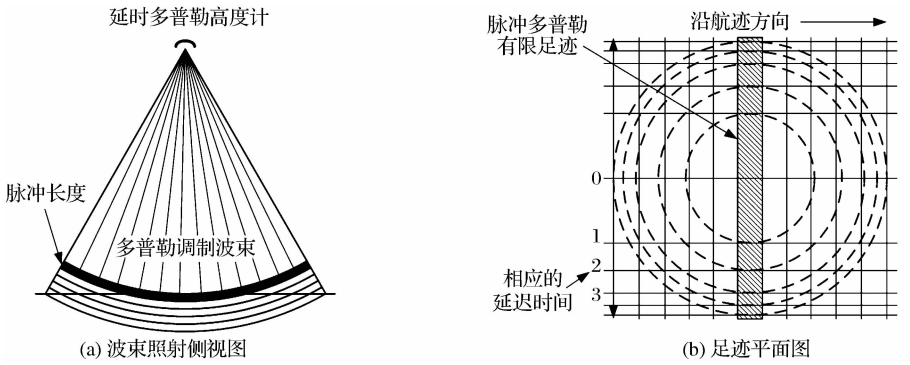


图 1 合成孔径高度计的波束照射侧视图和足迹平面图

Fig. 1 SAR altimeter's the illumination geometry side view and the footprint plan view

$$\delta_r(f_d) \approx \frac{\lambda^2 H}{8V_s V_g} f_d^2 \quad (2)$$

则：

$$\partial \delta_r(f_d) \approx \frac{\lambda^2 H}{4V_s V_g} f_d \partial f_d \quad (3)$$

其中： $\lambda$  是载波波长， $H$  是雷达到星下点距离， $V_s$  是雷达平台速度， $V_g$  为波束速度（波束扫过地面的速度）， $f_d$  为多普勒频移。

### 3 多普勒频率

多普勒频率是由雷达高度计和地面散射物体的相对运动产生的，影响多普勒的主要运动来自 3 个方面：平台速度、地球自转和目标移动，本文假设目标相对于地球是静止的。

当雷达位于地球上空高度为  $H$ ，星下点  $B$  到散射点  $D$  的距离为  $R$ ，雷达到散射点的距离为  $R_s$ ，地球半径为  $R_e$ ，并且定义天线仰角为  $\theta_{EL}$ ，卫星方位角为  $\theta_{AZ}$ 。雷达和地面散射目标的位置关系如图 2、图 3 所示。

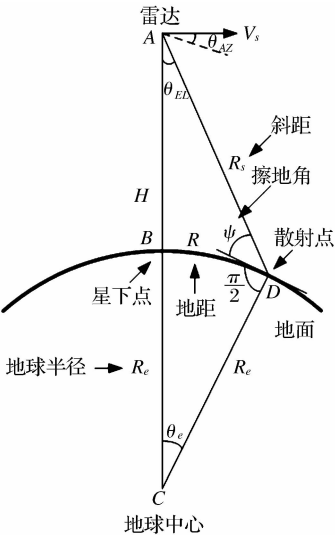


图 2 雷达几何关系

Fig. 2 SAR altimeter geometry

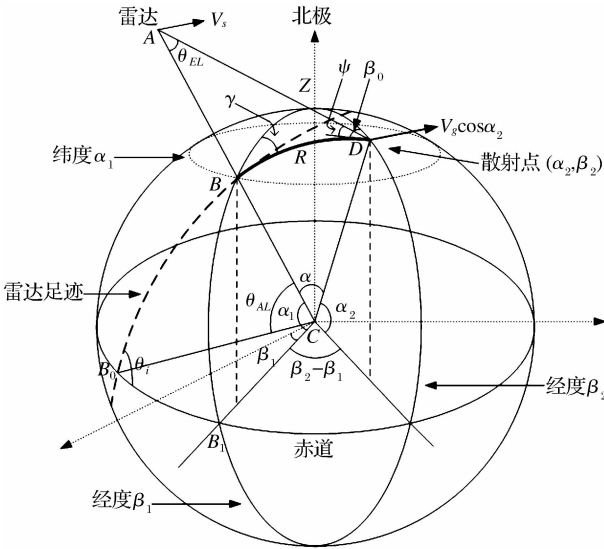


图 3 平台速度和地球自转对多普勒的贡献

Fig. 3 Doppler contributions from SAR altimeter velocity and rotation of Earth

经过计算可得地球自转和平台运动所带来的多普勒频率为：

$$f_d = \frac{2V_s}{\lambda} \sin \theta_{EL} \cos \theta_{AZ} \cdot$$

$$[1 - (\omega_e/\omega)(\epsilon \cos \theta_{AL} \sin \theta_i \tan \theta_{AZ} + \cos \theta_i)] \quad (4)$$

其中： $\omega_e$  为地球自转角频率， $\omega$  为卫星飞行角频率， $\epsilon = \pm 1$  代表天线的指向，当天线指向右侧时为正，反之为负， $\theta_i$  为轨道倾角。

### 4 结果分析

通过表 1 的参数可以计算得到在轨平均速度为 7 451.8 m/s，卫星角频率为  $1.04 \times 10^{-3}$  rad/s。当地球赤道半径取值为 6 378.14 km 时，按一天 23.9345 h 计算，可得赤道上地球自转速度为 0.465 km/s，地球自转角频率为  $7.3 \times 10^{-5}$  rad/s，则  $\omega_e/\omega = 0.07$ 。

表 1 合成孔径雷达系统参数  
Table 1 The SAR altimeter system parameters

天线张角/°	1.2
发射信号波长/cm	2.2
发射信号带宽/MHz	320
发射信号脉冲宽度/μs	52
平台高度/km	800
轨道倾角/°	92

4.1 偏航角和偏航幅度

由式(4)可得:

$$f_{\text{Dop}} = \frac{2V_s}{\lambda} \rho_c \sin\theta_{\text{EL}} \cos(\theta_{\text{AZ}} + \phi_c) \tag{5}$$

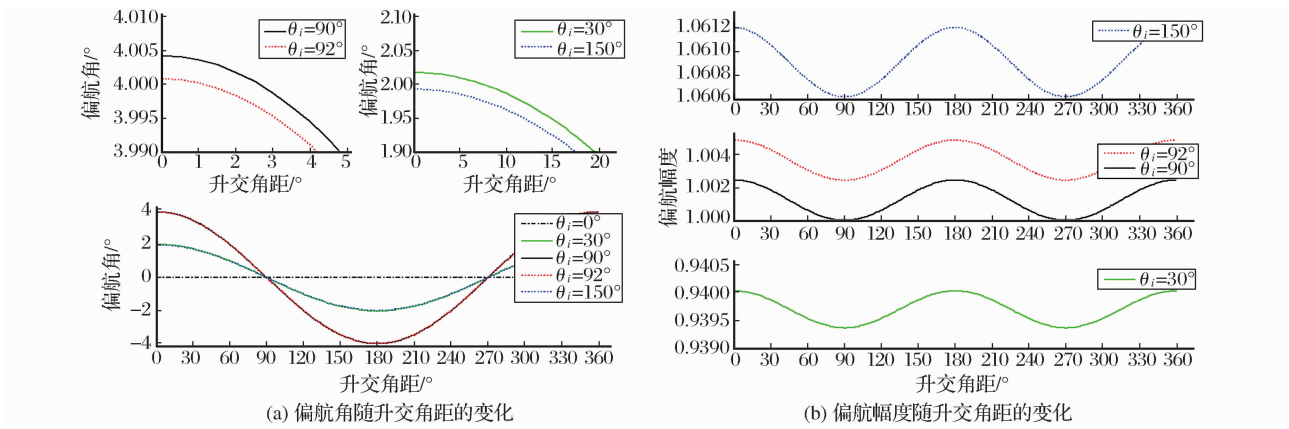


图 4 不同轨道倾角下,偏航角和偏航幅度与升交角距的关系

Fig. 4 The relationships between crab angle and crab magnitude with different argument of latitude and different inclination angle

条带产生了倾斜,在赤道上空时,倾斜大概为 4°。当采用极地轨道时,偏航幅度接近于 1。同时,图中还给出了轨道倾角为 92°时的偏航角和偏航幅度。

4.2 地球自转对多普勒频率的影响

定义地球自转相对于地球无自转的多普勒频率差为:

$$f_R = -\frac{2V_s}{\lambda} \sin\theta_{\text{EL}} \cos\theta_{\text{AZ}} (\omega_e/\omega) \cdot (\epsilon \cos\theta_{\text{AL}} \sin\theta_i \tan\theta_{\text{AZ}} + \cos\theta_i) \tag{8}$$

对于高度计而言,上式需改写为:

$$f_R = -\frac{2V_s}{\lambda} \sin(\theta_{\text{EL}} + \theta_{\text{ON}}) \cos\theta_{\text{AZ}} (\omega_e/\omega) \cdot (\epsilon \cos\theta_{\text{AL}} \sin\theta_i \tan\theta_{\text{AZ}} + \cos\theta_i) \tag{9}$$

$\theta_{\text{ON}}$  是高度计天线指向角。由于是垂直入射,  $\theta_{\text{EL}}$  为 0,地球自转对多普勒频率没有影响。但是如果高度计误指向角不为零时,地球自转对多普勒的影响便体现出来了。误指向角为 0.1°、0.2°、0.3°、0.4°、0.5°、0.6°时,多普勒的变化如图 5 所示。

由于合成孔径高度计在方位向进行回波处理时,

$$\phi_c = \epsilon \arctan\left(\frac{\omega_e/\omega \cos\theta_{\text{AL}} \sin\theta_i}{1 - \omega_e/\omega \cos\theta_i}\right) \tag{6}$$

$$\rho_c = \sqrt{1 + (\omega_e/\omega)^2 (1 - \sin^2\theta_{\text{AL}} \sin^2\theta_i) - 2\omega_e/\omega \cos\theta_i} \tag{7}$$

其中:  $\phi_c$  为地球自转引起的偏航角,  $\rho_c$  为偏航幅度,当  $H$  一定时,偏航角和偏航幅度由  $\theta_{\text{AL}}$  和  $\theta_i$  决定。在不同轨道倾角时,它们随着升交角距  $\theta_{\text{AL}}$  的变化如图 4 所示。

从图 4 中可知,在极轨情况下,地球自转引起的偏航角在赤道上方最大,此时对雷达回波的多普勒频率影响也最大。当轨道倾角相同时,顺轨与逆轨受地球自转的影响也不同。偏航幅度随着轨道倾角的增大而增大,偏航角使合成孔径高度计的多普勒

主要是对多普勒进行校正。这些多普勒误差将会影响回波波形,进而影响测量精度。当高度计在赤道上空时,如果不对地球自转所产生的多普勒进行校正时,它的影响如下图所示,此时不考虑指向角的影响,其中精度估计时脉冲平均次数为 4 000。合成孔径高度计回波模型的计算方法可以根据雷达方程来计算<sup>[10-11]</sup>,并且用最大似然估计方法来进行测量精度估计<sup>[12-13]</sup>。

由图 6 可知多普勒误差对回波波形、相关系数以及精度都有一定影响,特别对有效波高的精度有较大影响,尤其是有效波高比较小时,有效波高的精度值增加了一倍多。由于精度估计与回波波形的进行有关,影响波形的因素除了多普勒频率带来的变化外,还与天线指向有关。在精度估计中要考虑指向角、方位角和地球自转所带来的多普勒频率三者对波形的影响。图 6 给出了三者耦合的回波和精度。

从图 7 可知,多普勒误差、指向角和方位角的耦合使回波下降沿的差别进一步增大,从相对误差图能看出差别量级。同时对相关系数的影响也增大,相关系数决定着回波在多视处理时,所能叠加的有效脉冲

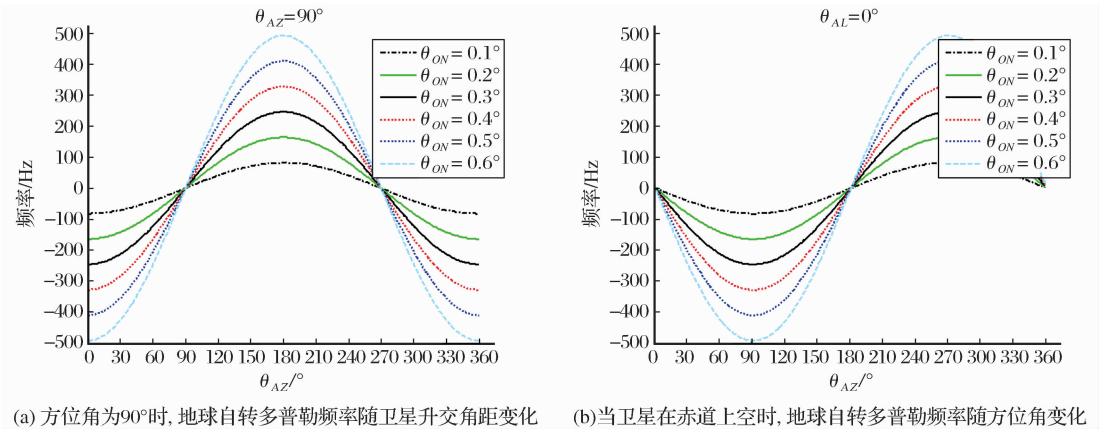


图 5 不同指向角下地球自转产生的多普勒频率

Fig. 5 The Doppler frequency from the earth rotation in different point angles

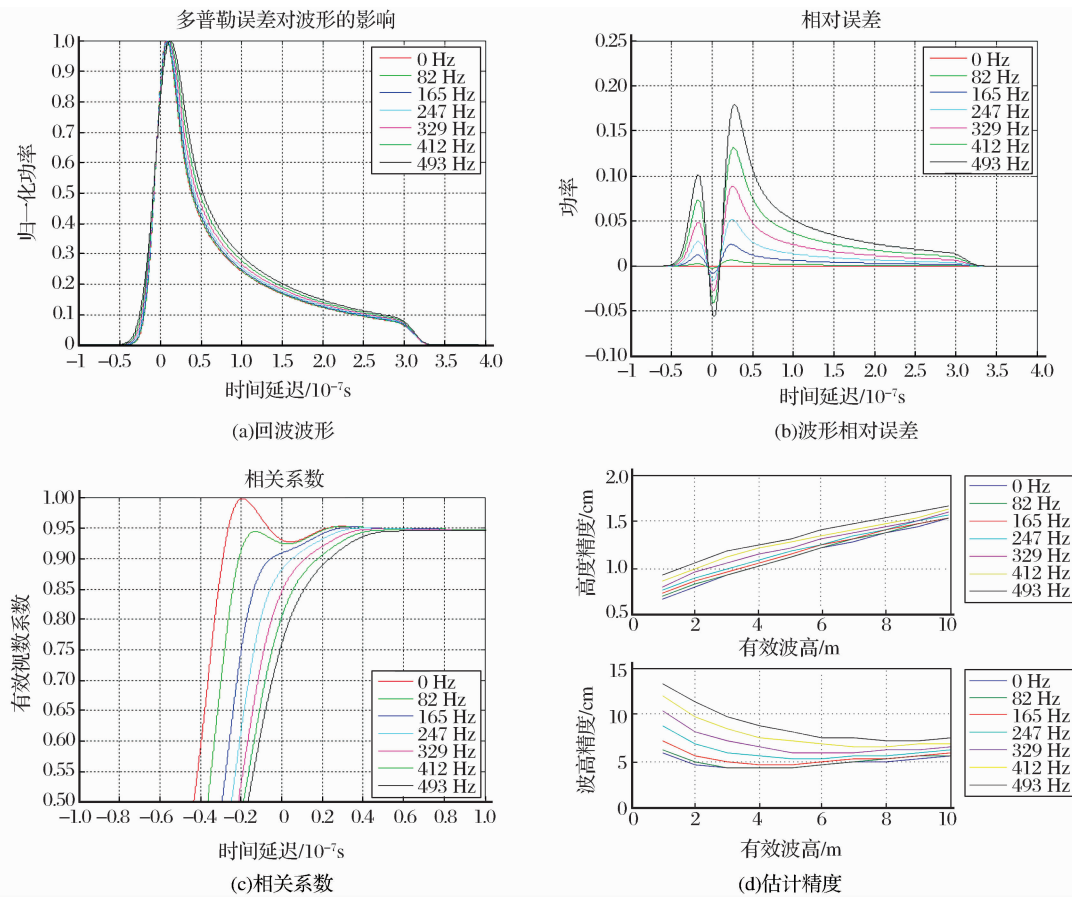


图 6 不考虑指向角、方位角与地球自转耦合时的回波分析及估计精度

Fig. 6 Wave analysis and estimation precision without the coupling of point angle, azimuth angle and the earth rotation

个数,随之影响测量的估计精度。从估计精度图可以看到在高度精度方面,随着海面有效波高的增加,精度值增加,且精度值随着有效波高和多普勒误差增大而增大,和耦合前相比,高度精度有所下降但是并不是太大,这是因为耦合后对回波的影响在上升沿比较小。耦合后的回波对下降沿影响比较大,所

以对有效波高精度影响比较大。从图 7(f) 中可知指向角和多普勒误差对散射系数影响几乎不变。

为了给出定量分析,表 2 给出了指向角为  $0.6^{\circ}$ 、方位角为  $45^{\circ}$ ,海面有效波高为 4 m 时,地球自转产生的多普勒频率在不同纬度对精度的影响。由于轨道倾角的存在,在纬度为  $90^{\circ}$  时精度和理想值不同。

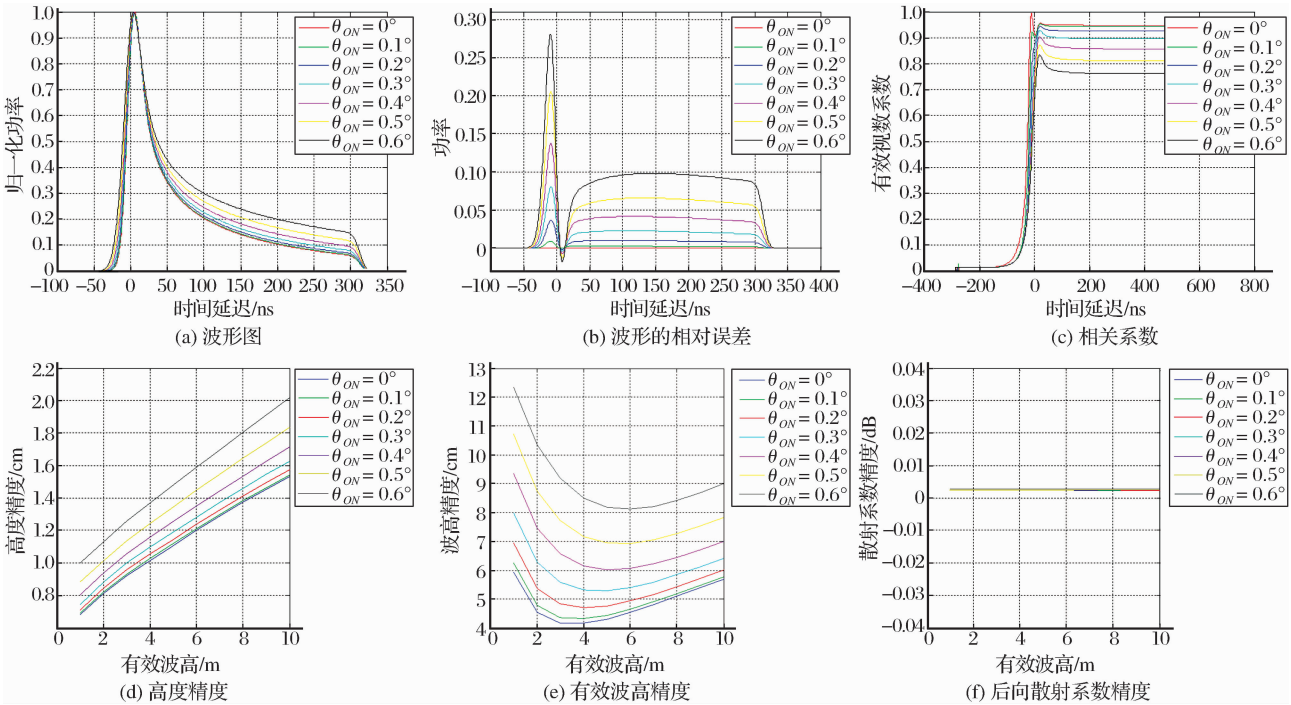


图 7 耦合后的波形、相关系数和估计精度

Fig. 7 The echo waveform, coefficient of the effective number of look and measuring accuracy with the coupling of point angle, azimuth angle and earth rotation

表 2 指向角为 0.6°,方位角为 45°.不同纬度的精度

Table 2 The accuracy of different latitude with the point angle (0.6°) and azimuth angle (45°)

精度	纬度							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	理想值
高度/cm	1.37100	1.36300	1.33800	1.30500	1.26500	1.23300	1.21800	1.01500
波高/cm	2.12400	2.09000	1.98300	1.83500	1.66300	1.51500	1.43100	1.04100
散射系数/dB	0.00268	0.00268	0.00268	0.00269	0.00269	0.00270	0.00270	0.00237

4.3 调频率

方位调频率是多普勒频移对时间微分。且距离

一定时,  $d\theta_{EL}/dt = 0$ , 且  $d\theta_{AZ}/dt = V_g/(R\sin\theta_{EL})$ ,  $d\theta_{AL}/dt = \omega$ 。计算得到的调频率为:

$$\frac{df_d}{dt} = -\frac{2V_s V_g}{\lambda R_s} \left\{ \sin\theta_{AZ} - \frac{\omega_e}{\omega} [\cos\theta_i \sin\theta_{AZ} + \epsilon \sin\theta_i \sin\theta_{AL} \sin\theta_{AZ} \sin\theta_e - \epsilon \sin\theta_i \cos\theta_{AL} \cos\theta_{AZ}] \right\}$$
 (10)

当  $\theta_{AZ}$  为 90° 时,调频率变为:

$$\frac{df_{Dop}}{dt} = -\frac{2V_s V_g}{\lambda R_s} \cdot \left\{ 1 - \frac{\omega_e}{\omega} [\cos\theta_i + \epsilon \sin\theta_i \sin\theta_{AL} \sin\theta_e] \right\}$$
 (11)

其中:  $\theta_e$  是地心对卫星和地面散射点的张角。式(11)中的第一项是雷达所产生的调频率,后面几项是地球自转产生的多普勒调频率可以忽略。

当雷达为侧视时:

$$\Delta f_{Dop} = \frac{2V_s}{\lambda} \Delta\xi \left( 1 - \frac{\omega_e}{\omega} \cos\theta_i \right)$$
 (13)

这也是延迟多普勒雷达高度计的多普勒带宽,地球自转所产生的影响可以忽略。同时研究也表明地球自转对雷达方位积分时间也可以忽略。

5 结 语

本文对在圆轨道上雷达的多普勒特性进行了研究,它主要由雷达的轨道倾角与升交角距决定。在

4.4 多普勒带宽

多普勒带宽是在轨雷达一个基本的参数。在雷达高度固定时,对于任意的方位角和俯仰角,  $\Delta\xi = \Delta\theta_{AZ} \sin\theta_{EL}$ ,  $\Delta\xi$  是天线方位角。式(4)对  $\theta_{AZ}$  求偏导:

$$\Delta f_{Dop} = \frac{2V_s}{\lambda} \Delta\xi \sin\theta_{AZ} \cdot \left[ 1 + \frac{\omega_e}{\omega} (\epsilon \cos\theta_{AL} \sin\theta_i \cot\theta_{AZ} - \cos\theta_i) \right]$$
 (12)

天线指向角不为零的情况下,地球自转所产生的多普勒对合成孔径高度计的波形、多普勒条带间的相关系数和测量精度都有一定的影响,并给出了多普勒和天线指向耦合时的回波,在数据处理时要考虑这些影响,可以根据轨道参数和天线指向参数预先算出这些精度误差,然后以查表法校正这些误差,以便得到较为准确的估计精度。

当卫星处于赤道上空时,地球自转使雷达产生了  $4^\circ$  的偏航角,这使多普勒条带产生了倾斜,因为多普勒条带垂直于速度合成方向。在合成孔径高度计信号处理时,地球自转产生的多普勒频率是不可忽略的,要对其进行校正,而对多普勒带宽,多普勒条频率产生的影响可以忽略。

#### 参考文献 (References):

- [1] Vincent P, Steunou N, Caubet E, *et al.* AltiKa: a Ka-band Altimetry Payload and System for Operational Altimetry During the GMES Period[J]. *Sensors*, 2006, 6(3): 208-34.
- [2] Guijarro J, Santoleri R, Nardelli B B, *et al.* Innovative Radar Altimeter Concepts[C]// *Proceedings of the IGARSS'03*. Toulouse, France, 2003, 2: 1080-1082.
- [3] Raney R K. The Delay/Doppler Radar Altimeter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1578-88.
- [4] Le Roy Y, Deschaux-beaume M, Mavrocordatos C, *et al.* SRAL SAR Radar Altimeter for Sentinel-3 Mission[C]// *Proceedings of the IGARSS'07*. Barcelona, Spain, 2007, 1(12): 219-222.
- [5] Raney R K. Doppler Properties of Radars in Circular Orbits [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(9): 1153-62.
- [6] Pillai S U, Himed B, LI K Y. Effect of Earth's Rotation and Range Foldover on Space Based Radar Performance [J]. 2005 IEEE International Radar, Conference Record, 2005: 137-142.
- [7] Wang Wensheng, Wang Xiaomo, Xu Jianfeng. Doppler Frequency Characteristics of Ground Clutter for Space-based Radar[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 3: 268-271. [王文生, 王小漠, 许建峰. 天基雷达地面回波的多普勒频率特性 [J]. *北京理工大学学报*, 2006, 3: 268-271.]
- [8] Wen Chunyan, Wang Xuegang, Chen Zhuming, *et al.* Ground Echo Doppler Frequency Analysis of Space-based Radars[J]. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(4): 6-9. [文春艳, 汪学刚, 陈祝明, 等. 天基雷达地面回波多普勒频率分析[J]. *电讯技术*, 2009, 49(4): 6-9.]
- [9] Francis R. ESA'S Ice Mission CryoSat: More Important than Ever[J]. *European Space Agency Bulletin*, 2010, 141: 10-18.
- [10] Yang S, Liu H, Xu K, *et al.* A New Concept of Radar Altimeter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6200( 620008): 1-7.
- [11] Cristina M-P, Ruffini G, Marquez J, *et al.* Theoretical Model of SAR Altimeter over Water Surfaces [C]// *Proceedings of the IGARSS'08*. Boston, Massachusetts, US, 2008, 3: 242-245.
- [12] Martin-Puig C, Ruffini G. SAR Altimeter Retracker Performance Bound over Water Surfaces [C]// *Proceedings of the IGARSS'09*. Cape Town, South Africa, 2009, 1(5): 3874-3877.
- [13] Phalippou L, Enjolras V. Re-tracking of SAR Altimeter Ocean Power-waveforms and Related Accuracies of the Retrieved Sea Surface Height, Significant Wave Height and Wind Speed [C]// *Proceedings of the IGARSS'07*. Barcelona, Spain, 2007, 1(12): 3533-3536.

## Earth Rotation Effect on Satellite Synthetic Aperture Altimeter

SHI Ling-wei<sup>1,2</sup>, LIU He-guang<sup>1</sup>, XU Ke<sup>1</sup>, YANG Shuang-bao<sup>1</sup>,  
XU Xi-yu<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Compared with the conventional radar altimeter, the synthetic aperture altimeter that uses the synthetic aperture technology in along track is a new-concept altimeter. As the delay compensation is corrected in the Doppler domain in the data processing, it is important to know the Doppler properties of the return waves. The formula about Doppler frequency is deduced from the relative velocity of the radar and the scattering point. As a result, the Doppler frequency from the earth rotation has an important effect on the echo waveform, measuring accuracy and effective number of look for satellite synthetic aperture altimeter. These must be considered in the delay compensation, system design and signal processing.

**Key words:** Synthetic aperture; Radar altimeter; Delay compensation; Earth rotation