

卫星总体参数对 SAR 多普勒参数影响分析及仿真研究¹

张锦绣 曹喜滨

(哈尔滨工业大学 卫星技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要: 该文从星载合成孔径雷达 (SAR) 空间几何关系出发, 建立了星载 SAR 多普勒参数的表达式。在考虑地球自转和扁率的情况下, 分析了轨道摄动、卫星姿态指向误差和稳定度对 SAR 多普勒参数的影响, 并进行了数字仿真。分析仿真结果表明轨道摄动是造成星载 SAR 多普勒参数误差的主要因素; 姿态稳定度的提高在减小多普勒参数误差变化频率的同时可以使误差量降低。该文的研究结果对于分析总体参数对图像质量的影响和卫星总体参数的确定和设计优化具有参考价值。

关键词: 星载 SAR, 多普勒参数, 轨道摄动, 姿态误差, 稳定度

中图分类号: TN958, TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)11-1746-06

Analysis and Simulation of Satellite System Parameter Effect on SAR Doppler Parameters

Zhang Jin-xiu Cao Xi-bin

(Satellite Technology Institute, Harbin Institute of Tech., Harbin 150001, China)

Abstract On the basis of the space geometry relation of spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR), its Doppler parameters formulation is built in this paper. Taking the earth rotation and oblateness into consideration, the orbit perturbation, attitude errors and its stability effects on SAR Doppler parameters are analyzed. The simulation result shows that orbit disturbance is the key factor to Doppler error, and the enhancement of attitude stabilization can lead to the decline of Doppler error as well as its variability. The conclusion is valuable for the determination and optimization of the system parameters.

Key words Spaceborne SAR, Doppler parameter, Orbit perturbation, Attitude errors, Stabilization

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种全天时、全天候高分辨率微波遥感成像雷达。SAR 作为一类重要的卫星有效载荷已经广泛应用于各种大小型卫星。在星载 SAR 成像处理过程中, 我们必须采用精确的多普勒参数, 这样才能得到高质量的 SAR 图像。如果成像处理时采用的多普勒参数 (包括多普勒中心频率和多普勒调频率) 带有误差, 将会影响图像质量。多普勒中心频率不准确会使信噪比降低, 方位模糊度增加, 输出图像会发生位置偏移, 影响图像的定位。多普勒调频率误差会带来参考函数或补偿因子中的相位误差, 影响图像的聚焦性能^[1]。

在卫星设计中如何针对多普勒参数对成像质量的影响来进行卫星总体参数的确定和优化设计是一个非常重要的问题, 引起了国内外学者的普遍重视。大多文献都是考虑姿态指向误差对 Doppler 参数的影响^[2-4], 分析姿态稳定度和轨道摄动对多普勒参数影响的文献很少。田增山等推导得到不考虑地球自转和扁率时的多普勒参数表达式, 分析得到地球纬度与多普勒参数变化的关系^[5]; Jin 在不考虑地球自转和扁率情况下, 分别就轨道六要素对 SAR 多普勒中心频率的影响进行了理论分析^[6]。本文将在考虑地球自转和地球扁率的基础上, 从轨道摄动、卫星

¹ 2003-05-25 收到, 2003-12-17 改回

的姿态指向误差和稳定度等因素出发, 分析其对星载 SAR 多普勒参数的影响, 从而对星载 SAR 多普勒参数的精确估计和卫星总体参数的确定和优化提供依据和验证.

2 星载 SAR 空间几何关系基本数学模型

首先定义描述卫星姿态和轨道运动的参考坐标系, 建立星载 SAR 空间几何关系数学模型, 在此基础上给出星载 SAR 多普勒特性数学表达式, 分析轨道摄动等对多普勒特性的影响.

2.1 参考坐标系

习惯上在地心惯性坐标系 F_I 内描述卫星的运动状态, 其原点在地心 O_e ; X_I 轴指向春分点; 地球自转轴为 Z_I ; Y_I 满足右手坐标系. 为了进一步描述卫星的运动, 还需建立卫星体坐标系 F_b (原点 O 为卫星的整体质心, 3 个单位矢量 X_b, Y_b, Z_b 分别与飞行器的惯性主轴一致); 质心轨道坐标系 F_o (原点 O 在卫星的整体质心; Z_o 轴由质心 O 指向地心 O_e ; X_o 轴在轨道平面内与 Z_o 垂直并指向卫星的速度方向; Y_o 在轨道平面法线方向与 X_o, Z_o 满足右手系; 地心轨道坐标系 F_v (原点在地心 O_e ; X_v 轴指向轨道升交点; Y_v 沿卫星运行方向在轨道平面内与 O_e 垂直; 选择 Z_v, Y_v 满足右手系).

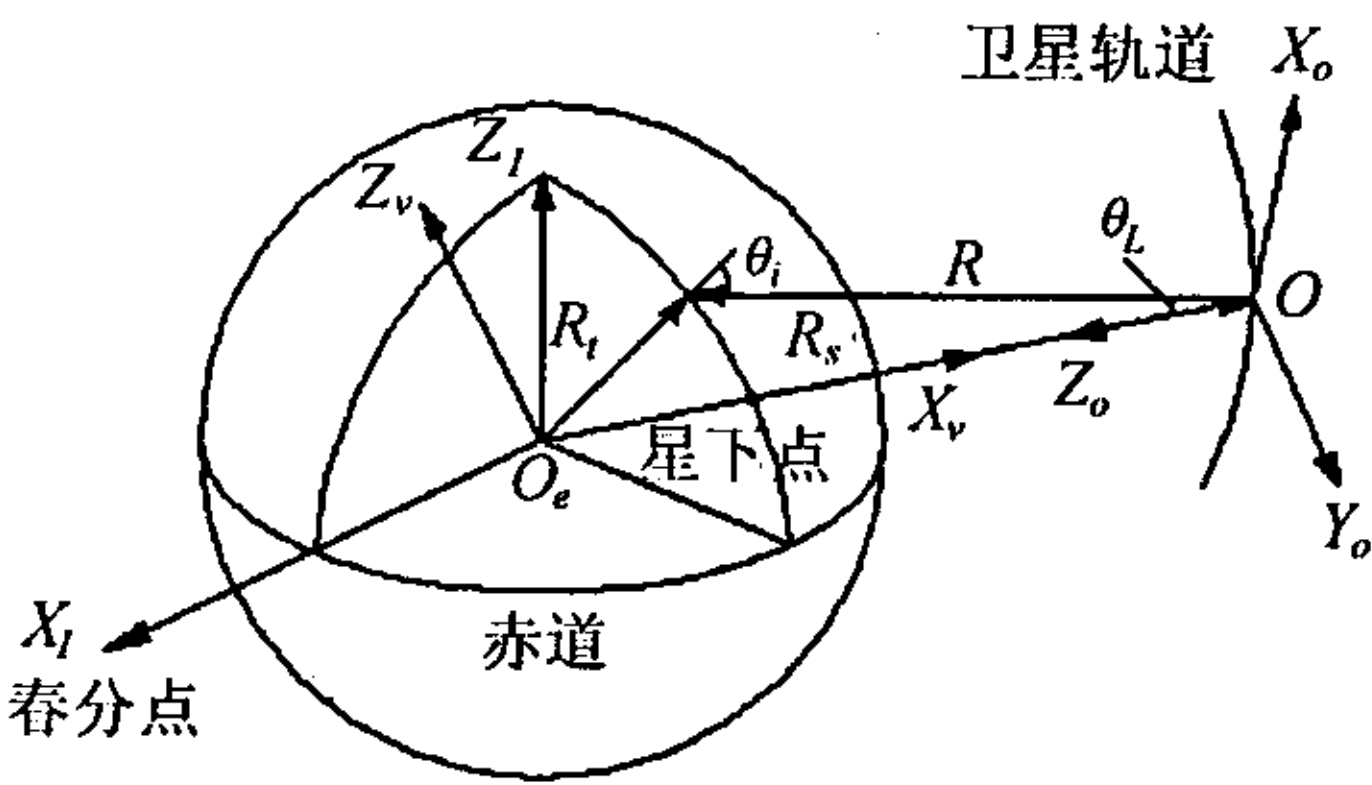


图 1 星载 SAR 空间几何关系

2.2 地球模型和轨道摄动方程

通常用扁椭球体方程来描述地球, 即

$$(x_t^2 + y_t^2)/R_e^2 + z_t^2/R_p^2 = 1 \tag{1}$$

式中 R_p 为极轴半径, 且 $R_p = (1 - f_p)R_e$, f_p 为地球平坦度因子, $f_p = 1/298.25$

卫星在轨道上始终受着空间环境各摄动力的作用, 包括: 地球扁率和质量不均匀产生的附加力, 大气动力等. 假设卫星在近地轨道运行, 经整理后的轨道摄动方程如式 (2)~ 式 (7) 所示, 这里仅考虑带谐项 J_2 的影响 [5].

$$\frac{da}{dt} = \frac{2e \sin f}{n\sqrt{1 - e^2}} F_r + \frac{2a\sqrt{1 - e^2}}{nr} F_t \tag{2}$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{\sqrt{1 - e^2}}{na} [F_r \sin f + F_t (\cos E + \cos f)] \tag{3}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{r \sin(\omega + f)}{na^2 \sqrt{1 - e^2} \sin i} F_n \tag{4}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{r \cos(\omega + f)}{na^2 \sqrt{1 - e^2}} F_n \tag{5}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\sqrt{1 - e^2}}{nae} [-F_r \cos f + F_t \frac{2 + e \cos f}{1 + e \cos f} \sin f] - \cos i \frac{d\Omega}{dt} \tag{6}$$

$$\frac{dM}{dt} = n - \frac{1 - e^2}{nae} \left[F_r \left[\frac{2er}{p} - \cos f \right] + F_t \left[1 + \frac{r}{p} \right] \sin f \right] \tag{7}$$

式中 $a, e, \Omega, i, \omega, M, f, n, r, p$ 分别为卫星轨道的半长轴、偏心率、升交点赤经、轨道倾角、近地点幅角、平近点角、真近点角, 平均速率、卫星的地心距和轨道半通径. F_t, F_r, F_n 为近地轨道考虑带谐项 J_2 的影响情况下摄动力在质心轨道坐标系下的分量.

2.3 星载 SAR 距离方程

为了在一个统一的坐标系下描述卫星的运动状态以及卫星与目标的相对位置和距离, 建立星载 SAR 距离方程, 需要进行适当的坐标变换. 从图 1 可知卫星在地心惯性坐标系中的 t 时刻位置矢量 R_s 、速度矢量 V_s 和加速度矢量 A_s 分别表示为

$$R_s = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = C_{Iv} \cdot \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = C_{Iv} \cdot \begin{bmatrix} r \cos f \\ r \sin f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sx} \\ V_{sy} \\ V_{sz} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{\mu}{a(1-e^2)}} \cdot C_{Iv} \cdot \begin{bmatrix} r \sin f \\ e + \cos f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_s = \begin{bmatrix} A_{sx} \\ A_{sy} \\ A_{sz} \end{bmatrix} = -\frac{\mu(1+e \cos f)^2}{a^2(1-e^2)^2} C_{Iv} \begin{bmatrix} \cos f \\ \sin f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $C_{Iv} = C_Z(\Omega) \cdot C_X(i) \cdot C_Z(\omega)$ 为地心轨道坐标系到地心惯性坐标系变换矩阵.

星载 SAR 波束在地面投射点 t 时刻在地心惯性坐标系中的矢量为

$$R_t = [X_t Y_t Z_t]^T = C_{Ib} \cdot R_g + [X_s Y_s Z_s]^T \quad (11)$$

式中

$$C_{Ib} = C_Z(\Omega) \cdot C_X(i) \cdot C_Z(\omega + f) \cdot C_Z(-\pi/2) \cdot C_X(-\pi/2) \cdot C_Z(\varphi) \cdot C_X(\theta) \cdot C_Y(\psi)$$

为星体坐标系到地心惯性坐标系的变换矩阵, θ, φ, ψ 分别为俯仰角、偏航角、滚动角 (对 θ, φ, ψ 均是逆时针旋转为正). $R_g = [0 \ R_\gamma \sin \theta_L \ R_\gamma \cos \theta_L]$ 为在体坐标系 F_b 中表示的星载 SAR 波束中心矢量. 在 θ, φ, ψ 为小量角时, 可认为

$$R_\gamma = [0 \ 0 \ R_s \cos \theta_L - \sqrt{R_t^2 - R_s^2 \sin^2 \theta_L}]^T \quad (12)$$

3 星载 SAR 多普勒参数特性

星载 SAR 的空间几何关系决定了回波信号的多普勒历程. 约定 $R_s(t)$ 表示卫星的位置矢量, $R_t(t)$ 表示地面目标随时间 t 变化的位置矢量, 那么星载 SAR 与地面目标的斜距变化矢量 $R(t)$ 为

$$R(t) = R_s(t) - R_t(t) \quad (13)$$

在分析 SAR 回波信号相位历程时, 对于一个合成孔径时间内的信号, 令波束中心照射目标的时刻 $t = 0$, 则有

$$R(t) = R + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2 \quad (14)$$

式中, R, V_{st}, A_{st} 分别为 $t = 0$ 时刻雷达与地面目标间的相对距离矢量、速度矢量和加速度矢量.

雷达与地面目标间的双程距离 $2R(t)$ 直接影响回波信号的相位, 令 $R(t) = |R(t)|$, 则有

$$R(t) = R + \frac{V_{st} \cdot R}{R}t + \frac{1}{2} \left[\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{R} \frac{A_{st} \cdot R}{R} - \frac{(V_{st} \cdot R)^2}{R^3} \right] t^2 \quad (15)$$

其中 $R = |R|$.

回波信号中由回波延迟带来的相位误差 $\Phi(t)$ 为

$$\Phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot [R - R(t)] \quad (16)$$

其中, λ 为波长, 瞬时频率 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = -(f_D + f_R) \quad (17)$$

其中普勒中心频率 f_D 为

$$f_D = \frac{1}{\lambda} \cdot \left. \frac{dR(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d[R_s(t) - R_t(t)]}{dt} = \frac{2V_{st} \cdot R}{\lambda R} \quad (18)$$

多普勒调频率 f_R 为

$$f_R = \frac{2}{\lambda} \cdot \left. \frac{d^2 R(t)}{dt^2} \right|_{t=0} = \frac{2}{\lambda} \left[\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{R} + \frac{A_{st} \cdot R}{R} - \frac{(V_{st} \cdot R)^2}{R^3} \right] \quad (19)$$

考虑到地球的自转, 有 $V_t = \omega_e \times R_t$, 其中 $\omega_e = [0 \ 0 \ \omega_e]^T$. 因此有多普勒频率:

$$\begin{aligned} f_D &= \frac{2}{\lambda R} [V_s \cdot (R_s - R_t) + \omega_e \cdot (R_s \times R_t)] \\ f_R &= \frac{2}{\lambda R} \left\{ A_s \cdot (R_s - R_t) + V_s \cdot V_s + (\omega_e \times R_t) \cdot (\omega_e \times R_s) \right. \\ &\quad \left. + 2\omega_e \cdot (V_s \times R_t) - \frac{[V_s \cdot (R_s - R_t) - \omega_e \cdot (R_s \times R_t)]^2}{R^2} \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

分析可知, 由于地球自转和地球扁率、轨道摄动以及卫星的姿态指向误差和稳定度的变化使得位置矢量 R_s 、速度矢量 V_s 和加速度矢量 A_s 和波束指向目标的矢量 R_t 发生变化, 从而导致星载 SAR 的多普勒参数也随之发生变化.

4 仿真算例及结果分析

为了分析总体参数对星载 SAR 多普勒参数的影响, 以日本 JERS-1 卫星为算例. JERS-1 是一颗低轨道三轴稳定 SAR 卫星, 其轨道高度为 568km、半长轴为 6946km、轨道倾角为 97.66°、降交点地方时为 10:45、轨道偏心率为 0.005、星载 SAR 中心视角为 35°、卫星设计姿态指向误差小于 0.3° 和姿态稳定度小于 0.003°/s.

首先分析卫星轨道摄动对星载 SAR 多普勒参数影响, 用前两节所建立的数学模型和上述给出的仿真参数, 得到考虑轨道摄动前后的星载 SAR 多普勒参数变化曲线如图 2 所示.

由图 2 并结合图 3 可知, 轨道摄动是造成多普勒调频率变化的主要因素, 其引起的调频率的变化为几十赫 / 秒, 是卫星指向误差的姿态角引起的调频率变化的 10 倍以上. 在估计星载 SAR 多普勒调频率时轨道摄动应占主要因素, 姿态角误差可以作为次要因素来考虑. 轨道摄动的存在使得星载 SAR 多普勒中心频率发生严重的徙动, 需要在成像处理时进行距离徙动补偿.

分析图 3, 可得在相同指向误差和稳定度 (同为 JERS-1 卫星设计值的 10 倍) 时, 俯仰和偏航角是影响多普勒中心频率误差的主要因素, 对调频率误差影响来说则是次要因素; 滚动角则正好相反. 俯仰和偏航角对中心频率误差的影响是滚动角影响的 20 倍以上, 故此在小角度误差时滚动角对中心频率误差的影响可以忽略. 虽然滚动角影响是俯仰和偏航角的两倍, 调频率

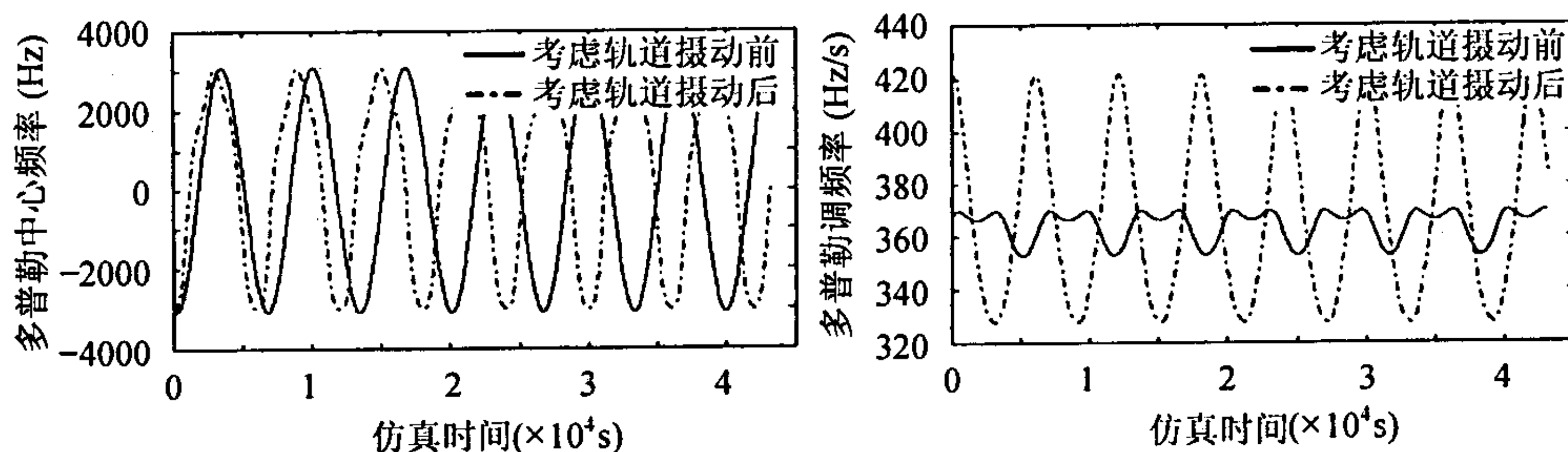


图 2 轨道摄动对多普勒频率的影响

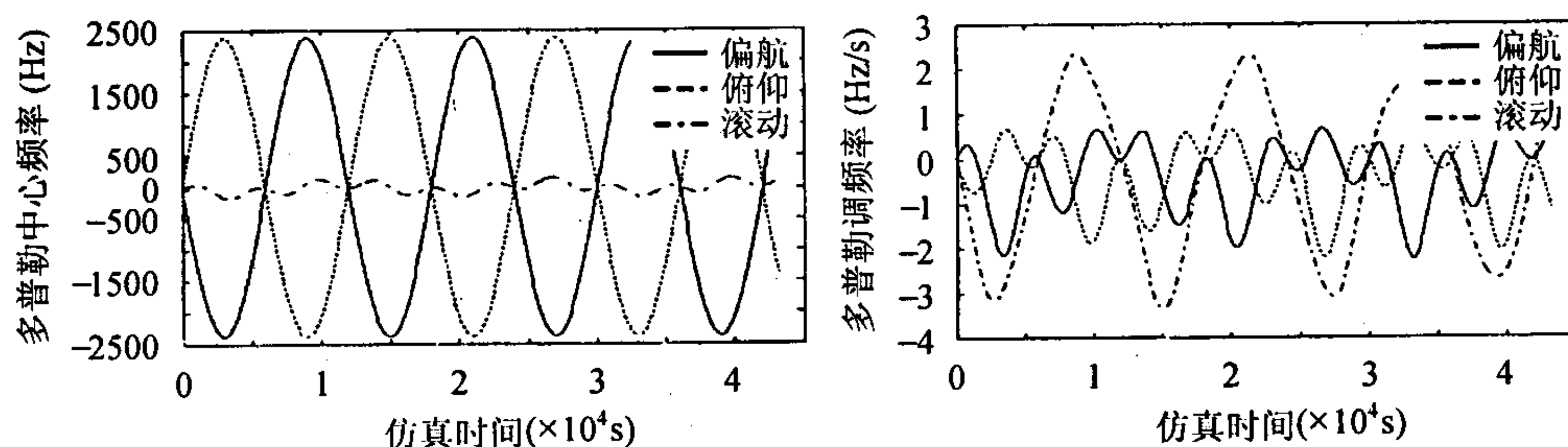


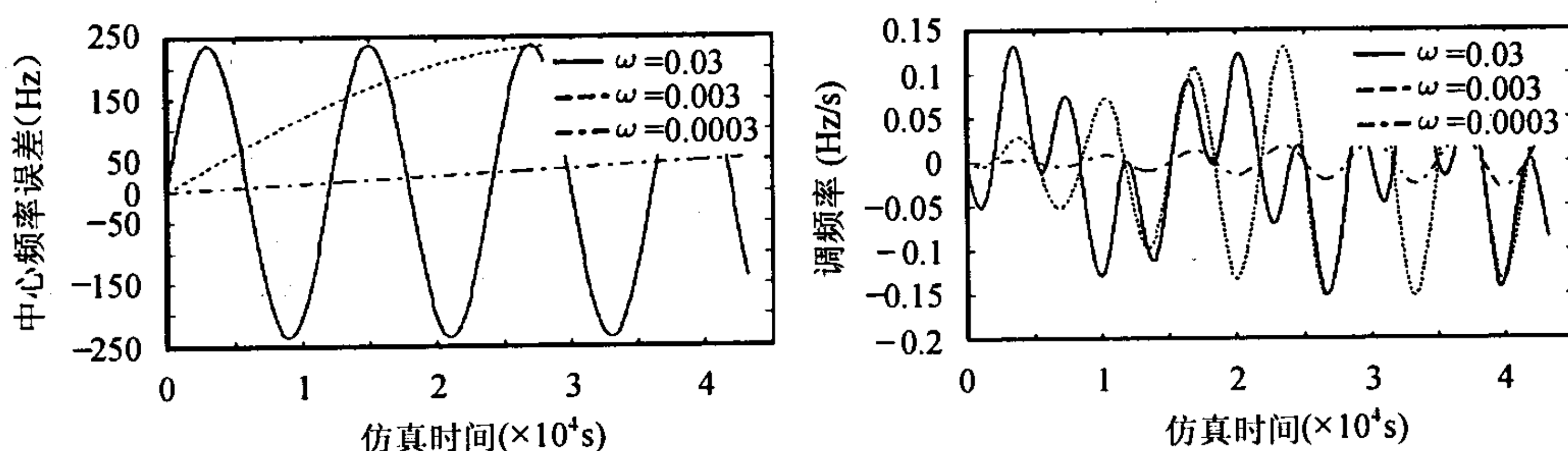
图 3 姿态误差对多普勒频率误差的影响

误差是三者共同作用的结果。在卫星控制系统设计中, 根据多普勒参数的要求更准确地控制卫星姿态角误差是需要优先考虑的。

同时在相同指向误差和稳定度情况下, 偏航向和俯仰向误差信号对多普勒中心频率误差的影响大小几乎相等, 但是符号相反。如果两信号同时存在, 可以近似认为对多普勒中心频率误差的影响为零。

下面以俯仰通道为例, 来分析姿态指向误差和稳定度的不同对星载 SAR 多普勒参数的影响。

如图 4 所示, 在三轴姿态指向误差相同的情况下, 不论是对多普勒调频率误差还是中心频率误差, 稳定度越高对多普勒参数的影响将越趋向于平稳。如果将 JERS-1 的设计稳定度提高 10 倍, 即从 $0.003^{\circ}/s$ 提高到 $0.0003^{\circ}/s$, 由于三轴姿态扰动引起的星载 SAR 多普勒中心频率误差将会降低到原来的五分之一, 误差也将几乎呈线性变化。同时对多普勒调频率误差的影响也降低到了原来的 30% 左右, 影响也更显的平缓。

图 4 俯仰向稳定度对多普勒频率误差的影响 (指向误差为 0.3°)

分析图 5 可以得到, 在相同稳定度条件下, 多普勒中心频率误差随指向误差的减小而迅速减小; 调频率误差在指向误差比较大时, 变化频率比较明显, 随着指向误差的减小, 调频率误差的变化频率随之减小。

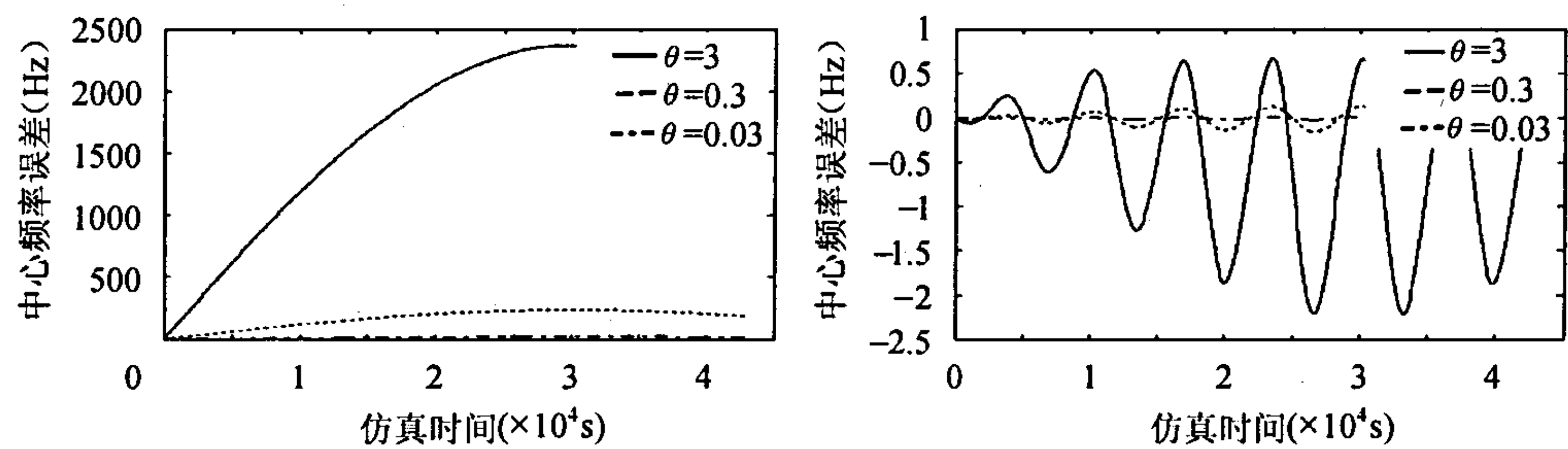


图 5 俯仰误差对多普勒频率误差的影响 (稳定度为 0.003°/s)

结合图 4 和图 5，卫星姿态误差和稳定度的变化是影响星载 SAR 多普勒参数的一个重要因素。为了得到理想的图像产品，只有根据用户要求合理选择和设计卫星的总体参数，尤其是姿态控制系统才能在成像处理时精确估计星载 SAR 的多普勒参数。

在 SAR 卫星系统性能的分析论证阶段，尚不能实际获得雷达回波数据，为了分析研究各种误差因素对回波多普勒频率参数的影响，进而理解和控制对成像质量的危害，很有必要从理论推导星载 SAR 回波多普勒频率的解析计算公式。在上述分析的基础上，结合实际中需要考虑的因素，可以比较精确地计算出星载 SAR 的回波多普勒参数，从而验证其对成像质量的危害，为整星总体参数的确定和在满足多普勒参数要求下进行优化设计提供理论依据。

5 结论

在影响星载 SAR 多普勒参数的诸多因素中，轨道摄动造成多普勒中心频率的严重频移，同时也是造成多普勒调频率误差的主要因素。对三轴姿态角来说，俯仰和偏航向误差引起中心频率误差的主要原因，甚至达到滚动向的 20 倍以上。尽管滚动向误差相对来说要大，但是调频率误差的变化则是三轴姿态误差结合的结果。姿态稳定度的增强使得其对多普勒频率误差的变化频率减小，甚至可以减小多误差变化量。

本文的分析过程可以适用于不同的任务，分析卫星的总体参数对星载 SAR 多普勒参数的影响，从而比较精确地计算出星载 SAR 回波多普勒参数，进而验证其对成像质量的影响，为卫星总体参数的确定和优化设计有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] 刘永坦. 雷达成像技术. 北京: 科学出版社, 1999: 97-110.
[2] Aster B, Stasio P D. Modelling earth rotation and spaceborne attitude errors for theoretic Doppler parameters evaluation[A]. Proceedings of IGARSS'91 Symposium[C], Helsinki, 1991: 2409-2411.
[3] Olivier P. Analytical formulation of the Doppler parameters for spacebrone SAR processing[A]. Proceedings of IGARSS'91, Helsinki, 1991: 1051-1054.
[4] Fernandez D E, Meadows P J, Schattler B, Mancini P. ERS attitude errors and its impact on the processing of SAR data[A]. CEOSAR Workshop'99[C], ESA-CNES, Toulouse, 1999: 98-104.
[5] 田增山, 刘丽川, 黄顺吉. 矢量法确定星载 SAR 多普勒参数. 系统工程与电子技术, 2001(7): 75-78.
[6] Jin M Y. Prediction of SAR focus performance using ephemeris covariance. IEEE Trans. on Geoscience and Sensing, 1993, 31(4): 914-920.

张锦绣: 男, 1978 年生, 博士生, 飞行器设计专业, 研究方向为卫星总体设计及仿真。
曹喜滨: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 飞行器设计专业, 研究方向为卫星总体设计及仿真。