

合成孔径雷达卫星姿态指向稳定度 与图像质量关系的研究

陈 杰,周荫清,李春升
(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘 要: 姿态指向稳定度是合成孔径雷达(SAR)卫星平台设计的重要参数.本文基于成对回波畸变理论研究了存在姿态指向变化时星载 SAR 的点目标扩展函数表达式,在理论分析与大量计算机仿真实验基础上,总结了姿态指向变化对星载 SAR 图像质量影响的本质规律,推导了工程上分析卫星姿态指向稳定度同 SAR 图像质量之间定量关系的解析表达式,提出了适用于 SAR 卫星特点的姿态指向稳定度定量分析方法,为 SAR 卫星系统总体分析与设计提供了理论依据.根据 L、C 和 X 波段 SAR 卫星参数进行计算机仿真实验,验证了结论的正确性.

关键词: 合成孔径雷达; 雷达回波; 卫星姿态

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1785-05

On the Relationship between Satellite Attitude Stability And Spaceborne SAR Imaging Qualities

CHEN Jie, ZHOU Yin-qing, LI Chun-sheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics Department of Electronic Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Attitude stability is a very important parameter for the platform design of Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite. The mathematical expression of spaceborne SAR impulse response function with attitude jitter is studied using paired echo theory. The effect of attitude jitter on spaceborne SAR image qualities is summarized based on the theoretical analysis and computer simulation. The analytical mathematical expression is deduced, which is useful in analysis of attitude stability and SAR image qualities. A method for quantitatively analyzing attitude stability is proposed in this paper basing on the characteristics of SAR satellite. The conclusion is validated by large quantities of computer simulation according to the L, C and X-band SAR satellite parameters. It provides theoretical foundation for SAR satellite system analysis and design.

Key words: spaceborne synthetic aperture radar; radar echo; satellite attitude

1 引言

姿态指向稳定度是 SAR 卫星平台设计的重要参数,是 SAR 有效载荷对卫星平台提出的主要性能指标之一.确定姿态指向稳定度同图像质量指标之间的定量关系是 SAR 卫星任务分析(Mission Analysis)的重要问题,对卫星系统总体方案的设计具有重要意义.

SAR 卫星采用动量轮(Momentum Wheel)或反作用轮(Reaction Wheel)来吸收周期性空间扰动力矩所产生的角动量,并与推力器和磁力矩器组合提供沿轴向的控制力矩,实现高精度三轴姿态稳定.通常将卫星姿态变化分为低频和高频两种分量,低频分量的频率范围为 0~5Hz,称为姿态指向漂移(Attitude Drift),主要来自姿态与轨道控制系统,如:动量轮卸载、轨道机动等;高频分量的频率范围一般为 5~100Hz,称为姿态指向抖动(Attitude Jitter),主要来自于卫星的机械装置,如:

动量轮的章动、挠性组件(如:太阳能电池阵和雷达天线)的扰动等^[1-3].

姿态指向稳定度直接关系到卫星姿态控制系统与星体机械构形的方案设计.关于卫星姿态与成像质量关系的文献大都针对姿态指向误差对 Doppler 参数的影响展开讨论^[4-7],涉及定量分析姿态指向变化对成像质量影响的文献很少.文献[8]给出了姿态扰动的定性分析方法.文献[9]介绍了利用成对回波畸变理论分析系统误差对 SAR 图像质量影响的方法,仅给出了定性分析结果.

卫星姿态指向角变化对 SAR 多普勒频谱的幅频特性产生调制作用,影响方位向点目标图像质量.文献[10]基于成对回波畸变理论推导了单频姿态指向角变化导致的成对回波数学表达式.

本文在此基础上,通过大量的计算机仿真实验与深入的

理论分析,总结了姿态指向变化对星载 SAR 图像质量影响的本质规律,提出了 SAR 卫星姿态指向稳定度的定量分析方法,推导了适于工程分析卫星指向稳定度同 SAR 图像质量关系的解析表达式.根据 L、C 和 X 波段 SAR 卫星参数进行计算机仿真实验,验证了结论的正确性.

2 卫星姿态指向稳定度定义

SAR 卫星的姿态指向稳定度定义为合成孔径时间 T_s 内姿态指向角速率的均方根,它是衡量卫星姿态指向稳定程度的系统指标.卫星姿态指向稳定度可以用符号 s 表示,即

$$s = \left\{ E[\dot{\phi}(t)]^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

为了便于分析卫星姿态指向变化对 SAR 图像质量影响的本质规律,本文首先讨论单频姿态指向变化的情况.若卫星存在频率为 f_0 、幅度为 ϕ_m 的单频姿态指向变化,则此时卫星的姿态指向稳定度 s 为

$$s = \frac{\sqrt{2}}{2} \phi_m \quad (2)$$

3 姿态指向变化对点目标方位冲击响应的影响

实际中 SAR 卫星姿态指向变化的幅度非常小,即满足 ϕ_y 、 ϕ_p 和 $\phi_r \ll 1$ rad.因此在工程分析中,可以推导出姿态指向变化角同雷达天线波束指向变化角之间满足如下关系^[4,10]:

$$\begin{cases} \alpha = \phi_y \sin L + \phi_p \cos L \\ \gamma = \phi_r \end{cases} \quad (3)$$

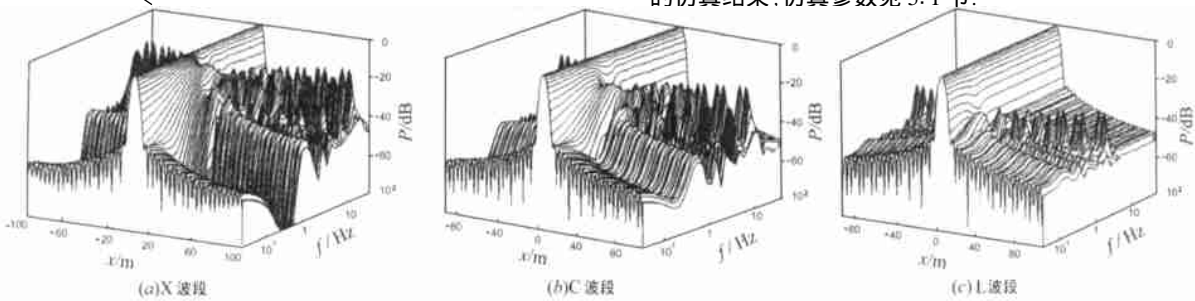


图 1 当偏航与俯仰指向变化引起天线方向向波束存在幅度 $a_m = 0.1$ 的单频指向变化时,X、C 和 L 波段星载 SAR 的方位向点目标冲击响应函数(IRF)随波束指向变化频率 f 改变的计算机仿真结果.

3.2 滚动角指向变化对方位向点目标性能的影响

若滚动角仅存在单频指向变化分量,引起距离向天线波束指向变化为 $r(t) = m \sin(\omega t + \theta)$,其中 m 、 ω 和 θ 分别为距离向波束抖动的幅度、角频率和相位角.成像处理器输出方位向点目标扩展函数 $s_o(t)$ 为^[10]

$$s_o(t) = s(t) - s_r(t) \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} s_r(t) = & A_m e^{-j f \int (\frac{f_0}{f_r})^2 + 2 \frac{f_0}{f_r} t} \cdot s(t + \frac{f_0}{f_r}) \\ & - A_m e^{-j f \int (\frac{f_0}{f_r})^2 - 2 \frac{f_0}{f_r} t} + j \omega \cdot s(t - \frac{f_0}{f_r}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $s_r(t)$ 是滚动角姿态指向变化引起的附加点目标冲激响

式中 α 和 γ 分别表示天线方向向和距离向波束指向变化角; ϕ_y 、 ϕ_p 和 ϕ_r 分别表示偏航、俯仰和滚动向姿态指向变化角; L 为天线视角.

3.1 偏航和俯仰角指向变化对方位向点目标性能的影响

若偏航与俯仰角指向变化仅存在单频分量(且互不耦合),引起天线波束方向指向变化为 $a(t) = a_m \sin(\omega t + \theta)$,其中 a_m 、 ω 和 θ 分别为方位向天线波束指向变化的幅度、角频率和相位角,且 $\omega = 2 f_0$.成像处理后,输出的方位向点目标扩展函数 $s_o(t)$ 为^[10]

$$s_o(t) = s(t) - s_a(t) \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} s_a(t) = & A \left(-f_0 - f_r t \right) e^{-j f \int (\frac{f_0}{f_r})^2 + 2 \frac{f_0}{f_r} t} \cdot s(t + \frac{f_0}{f_r}) \\ & - A \left(f_0 - f_r t \right) e^{-j f \int (\frac{f_0}{f_r})^2 - 2 \frac{f_0}{f_r} t} + j \omega \cdot s(t - \frac{f_0}{f_r}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$A = a_m \frac{R}{V \sin} \quad (6)$$

式中, f_r 为多普勒调频率; V 为卫星同目标之间的相对速度;

θ 为等效斜视角; λ 为信号波长; $s(t)$ 是理想条件下的点目标冲击响应函数; $s_a(t)$ 为俯仰或偏航姿态指向变化引起附加点目标冲激响应函数,即成对回波.成对回波的峰值幅度为 $A a_m = [D_a / (4 \lambda)] \cdot a_m$,其中 D_a 为雷达天线的长度.

天线方向向波束宽度越窄,偏航与俯仰姿态指向变化对点目标性能的影响越大.图 1 分别给出了 X、C 和 L 波段星载 SAR 点目标扩展函数随俯仰或偏航姿态指向变化频率 f 改变的仿真结果.仿真参数见 5.1 节.

应函数,呈现为成对回波.其幅度 $A_m = \frac{G_r \left(\frac{D_r}{r} \right)}{G_r \left(-\frac{D_r}{r} \right)} \cdot \frac{D_r}{2} \cdot m$,

其中 $G_r(x) = \frac{\sin^2(x)}{x^2}$; $G_r(\cdot)$ 为理想条件下的距离向天线方向图; $G_r(\cdot)$ 为 $G_r(\cdot)$ 的一阶微分函数; D_r 为雷达天线的宽度; r 为目标相对于距离向天线波束的离轴角.

卫星滚动角指向变化所引起的成对回波峰值幅度分别为 A_r 和 $-A_r$,可知:(1)滚动角姿态指向变化对观测带边沿的图像质量影响越大;(2)天线距离向的波束宽度($B_{wr} = 0.886 / D_r$)越窄,则滚动角姿态指向变化对点目标图像性能的影响越大.图 2 分别给出了 X、C 和 L 波段星载 SAR 点目标扩展函数随滚动角姿态指向变化频率 f 改变的仿真结果,仿真参数参

见 5.1 节.

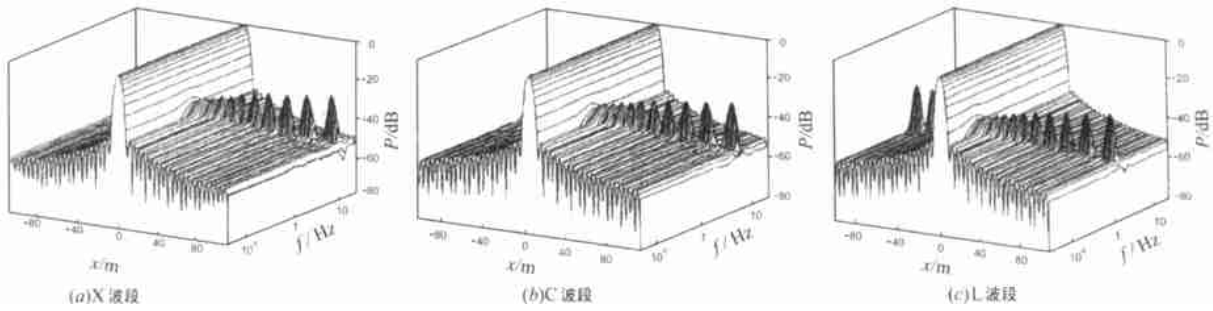


图 2 当滚动角指向变化引起天线距离向波束存在幅度 $\theta_m = 0.1$ 的单频指向变化时, X、C 和 L 波段星载 SAR 的方位向点目标冲击响应函数 (IRF) 随天线波束指向变化频率 f 改变的计算机仿真结果.

4 卫星姿态指向稳定度与 SAR 图像质量的关系

4.1 SAR 卫星姿态指向稳定度分析

通过计算机仿真, 得到方位向图像质量指标与天线波束指向变化频率 f 之间的关系曲线 (如图 3 所示). 仿真结果表明: (1) 当偏航与俯仰角姿态指向变化的频率 f 等于 $1/T_s$ (T_s 为合成孔径时间) 时, 成对回波对方位积分旁瓣比和峰值旁瓣

比的影响达到最大, 并且随波长的减小而增大; (2) 当滚动角姿态指向变化的频率 f 等于 $2/T_s$ 时, 成对回波对方位积分旁瓣比和峰值旁瓣比的影响达到最大, 且同波长无关; (3) 若姿态指向变化频率 f 小于 $1/T_s$, 由姿态指向变化导致的成对回波主要位于点目标主瓣内, 对方位积分旁瓣比和峰值旁瓣比的影响较小, 但引起点目标主瓣展宽.

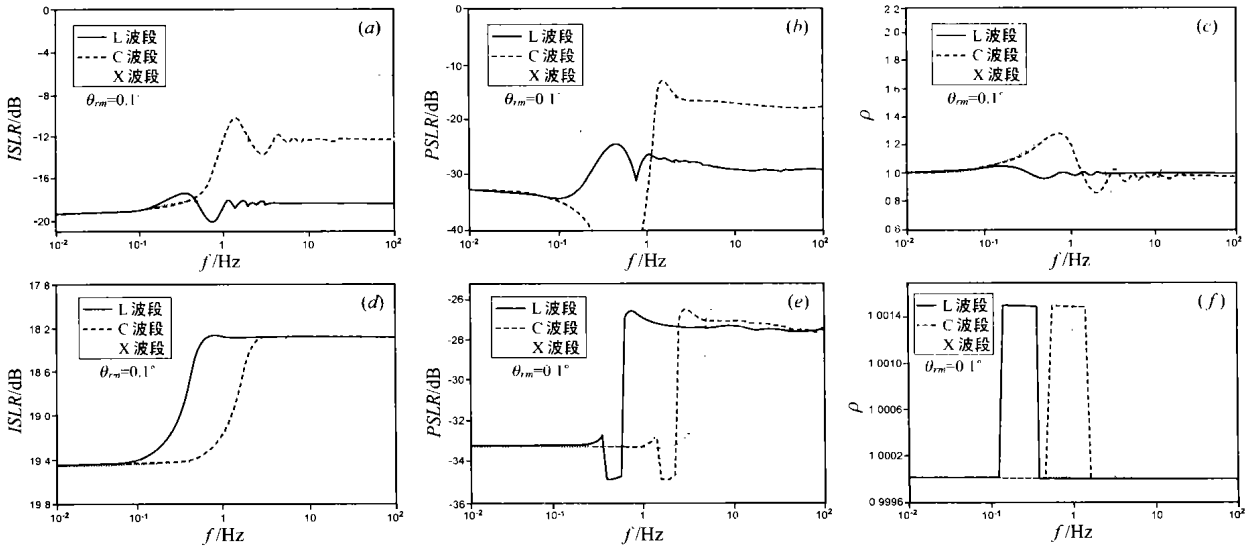


图 3 当卫星姿态指向变化引起天线波束存在幅度为 0.1 的单频指向变化时, 计算机仿真得到 L、C 和 X 波段星载 SAR 方位向的积分旁瓣比 (ISLR)、峰值旁瓣比 (PSLR) 和分辨率 与天线波束指向变化频率 f 的关系曲线, 仿真参数参见 5.1 节. 其中, (a) ~ (c) 为方位向天线波束指向变化的仿真结果; (d) ~ (f) 为距离向天线波束指向变化的仿真结果

由于实际中卫星姿态指向的变化规律非常复杂, 包含各种频率分量. 为了便于工程分析, 同时考虑到指标分配的余量, 本文基于姿态指向变化对图像质量影响最严重的情况进行分析. 假定偏航与俯仰角姿态指向变化的频率 f 等于 $1/T_s$, 而滚动角姿态指向变化的频率等于 $2/T_s$, 在上述条件下计算姿态指向稳定度, 推导姿态指向稳定度与图像质量之间近似的数学关系表达式.

4.2 姿态指向稳定度与图像质量的定量关系

(1) 令偏航与俯仰角姿态指向变化的角频率 $\omega = 2 / T_s =$

$2 \cdot \frac{D_a V}{R}$, 则根据式 (6) 推导出如下近似估算公式:

$$ISLR = ISLR_0 + \frac{\sqrt{2} \cdot ISLR_0 \cdot R}{4V} \cdot s_a + \frac{R^2}{32 \cdot V^2} \cdot \frac{2}{s_a} \quad (9)$$

$$PSLR = PSLR_0 + \frac{R^2}{32 \cdot V^2} \cdot \frac{2}{s_a} \quad (10)$$

式中, s_a 表示方位向天线波束指向的稳定度, 根据式 (1) 可以将它分配到偏航与俯仰角姿态指向稳定度指标; $ISLR_0$ 和 $PSLR_0$ 分别表示理想条件下的方位积分旁瓣比和峰值旁瓣比; $ISLR$ 和 $PSLR$ 分别表示存在姿态指向变化时的方位积分旁瓣比和峰值旁瓣比.

(2) 令滚动角姿态指向变化频率 $\omega = 4 / T_s = 4 \cdot D_a V / R$, 则根据式 (8) 推导出如下近似估算公式:

$$ISLR = ISLR_0 + \frac{k^2 D_r^2 R^2}{16 D_a^2 V^2} \sigma_{sr}^2 \quad (11)$$

$$PSLR = PSLR_0 + \frac{k^2 D_r^2 R^2}{32 D_a^2 V^2} \sigma_{sr}^2 \quad (12)$$

式中, σ_{sr} 表示滚动角姿态指向稳定度, 它同距离向天线波束指向的稳定度相等; k 为常数, 表示观测带边沿处 (对应天线 3dB 宽度的一半) 的距离向天线增益梯度系数, 这里取 $k = 1.075$.

由于偏航与俯仰姿态指向变化引起的成对回波具有类似正弦形式的波形^[10], 同方位向点目标冲击响应函数的形状存在较大的差别, 因此式(9)中需要包含 σ_{sr} 的线性项. 本文推导的上述公式可以用于工程上近似估算姿态指向稳定度对图像质量的影响.

5 计算机仿真

5.1 计算机仿真参数

利用计算机仿真的方法对上述理论分析结果进行验证. 分别选择 L、C 和 X 波段进行仿真, 参数如下: 卫星轨道高度 $H: 630\text{km}$; 天线视角 $\theta_L: 45^\circ$; 发射信号带宽 $B: 60\text{MHz}$; 采样率 $f_s: 66.6\text{MHz}$

表 1 计算机仿真中采用的主要雷达系统参数

雷达参数	波长	天线宽度 D_r	天线长度 D_a	脉冲重复频率 f_p
波段	(m)	(m)	(m)	(Hz)
L 波段	0.24	3.60	9.0	1800
C 波段	0.06	0.90	9.0	1800
X 波段	0.03	0.45	9.0	1800

为保证各波段星载 SAR 距离向天线波束宽度相等, 计算机仿真中所选择的的天线宽度 D_r 同信号波长成正比. 将点目标摆放在在观测带边沿位置上 (即 $\theta_0 = 1/2 \theta_{BWR}$). 按上述参数仿真存在姿态抖动的点目标回波信号, 然后利用 Chirp Scaling 算法进行成像处理, 最后对生成的 SAR 图像进行质量评估.

5.2 计算机仿真结果

根据上述系统设计参数进行计算机仿真, 图 4 给出了 L、C 和 X 波段星载 SAR 的图像质量与指向稳定度的关系曲线, 包括仿真实验评估的结果和利用本文推导的近似公式进行估算的结果. 图中, 横坐标采用对数坐标, 表示指向稳定度, 单位为 $^\circ/\text{s}$.

由图标曲线可知: (1) 偏航与俯仰角姿态指向变化对图像质量的影响同雷达波长无关; (2) 滚动角姿态指向变化对图像质量的影响随波长增加而增大; (3) 按照式(9)~(12)进行估算的结果同仿真实验评估的结果非常接近, 验证了本文推导的理论分析公式的正确性. 上述近似估算公式给出了姿态指向变化对方位积分旁瓣比和峰值旁瓣比指标影响的上限值.

本文提出的卫星姿态指向稳定度的分析方法充分考虑了工程余量, 估算结果对应于姿态指向稳定度对图像质量影响最严重的情况. 在工程应用中, 首先根据系统总体对图像质量指标的要求, 利用式(9)~(12)确定天线波束指向稳定度, 然后根据式(3)对卫星姿态指向稳定度指标进行分配.

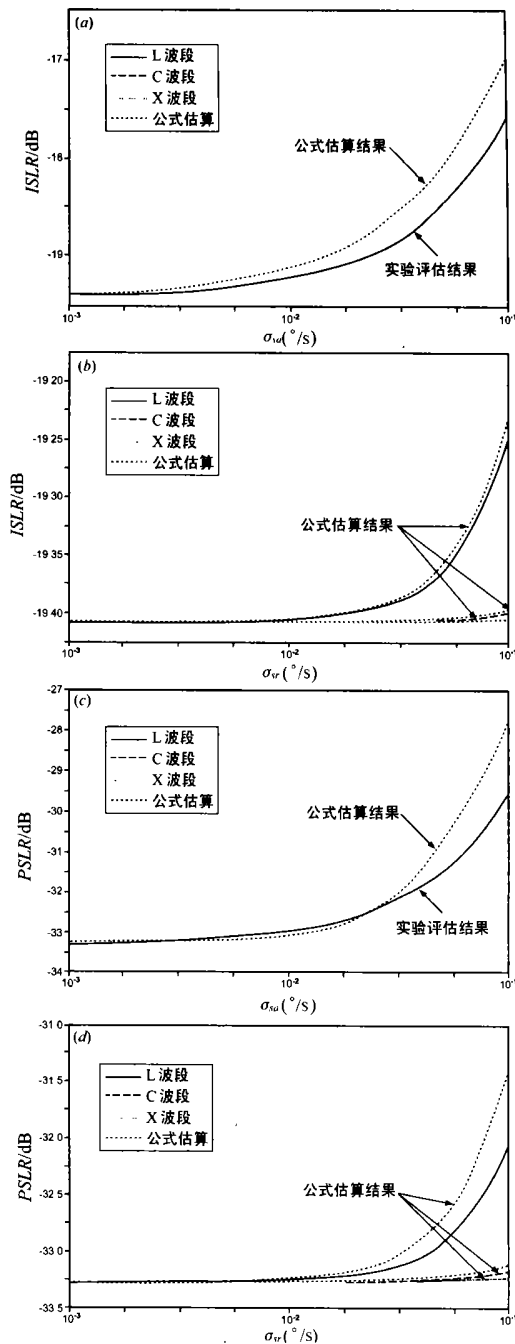


图 4 L、C 和 X 波段星载 SAR 的方位积分旁瓣比 (ISLR) 和峰值旁瓣比 (PSLR) 随方位向与距离向天线指向稳定度变化规律的计算机仿真结果与理论公式估算结果对比. (a) ISLR 与方位向天线波束指向稳定度 σ_{sr} 的关系; (b) ISLR 与距离向天线波束指向稳定度 σ_{sr} 的关系; (c) PSLR 与方位向天线波束指向稳定度 σ_{sr} 的关系; (d) PSLR 与距离向天线波束指向稳定度 σ_{sr} 的关系

6 结论

卫星姿态指向变化对 SAR 方位多普勒频谱的幅频特性产生调制作用, 影响方位向的分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比等图像质量指标. 本文基于成对回波畸变理论研究了单频

姿态指向变化所导致的成对回波的数学表达式.通过对大量计算机仿真实验结果的分析,总结了姿态指向变化对星载 SAR 图像质量影响的本质规律.并根据 SAR 有效载荷的特点,提出了 SAR 卫星姿态指向稳定度的定量分析方法,推导了适于工程分析卫星姿态指向稳定度同 SAR 图像质量关系的解析表达式,为星载 SAR 系统总体分析与设计提供重要的理论依据.计算机仿真结果验证了本文方法的正确性.

参考文献:

- [1] Fortescue P W, Stark J P W. Spacecraft System Engineering [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- [2] Hughes P C. Spacecraft Attitude Dynamics [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1985.
- [3] James R Wertz. Spacecraft Attitude Determination and Control [M]. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1999.
- [4] C Wu, J C Curlander, A Di Cenzo. Determination of spacecraft attitude using synthetic aperture radar data [A]. The AIAA Sensor Systems for the 80's Conference [C], Dec. 2-4, 1980.
- [5] Aster B, Stasio P D. Modelling earth rotation and spaceborne attitude errors for theoretic Doppler parameters evaluation [A]. Proceedings of IGARSS '91 Symposium [C], June 1991, 4: 2409 - 2411.
- [6] Olivier P. Analytical formulation of the Doppler parameters for spaceborne SAR processing [A]. Proceedings of IGARSS '91 [C], 1991, 2: 1051 - 1054.
- [7] D Esteban Fernández, P J Meadows, B Schättler, P Mancini. ERS attitude errors and its impact on the processing of SAR data [A]. CEOS

SAR Workshop '99 [C], ESA-CNES, Toulouse, October 1999.

- [8] Curlander J C, McDonough, R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- [9] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [10] 陈杰, 李春升, 周荫清. 卫星姿态指向抖动与 SAR 成像质量关系的研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 518 - 521.

作者简介:



陈 杰 男, 1973 年 6 月生于河南郑州. 1996 年获北京航空航天大学学士学位, 现为北京航空航天大学电子工程系博士研究生, 主要从事信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 星载 SAR 系统总体分析与仿真等方面的研究工作.



周荫清 男, 1936 年 4 月生于湖南湘潭. 现任北京航空航天大学电子工程系教授, 博士生导师. 中国电子学会会士. 主要从事信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的研究工作.