

星载 SAR 相控阵天线展开误差的模糊性能分析

陈 杰

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 根据星载 SAR 天线的特点建立了天线展开误差模型, 定义了展开不平直度指标, 基于成对回波理论推导了存在展开误差条件下天线方向图函数的表达式, 推出单频天线展开误差分量与方位模糊度之间统计关系, 给出了天线展开误差影响方位模糊度指标的上界. 大量的计算机仿真验证了本文分析方法的正确性.

关键词: 合成孔径雷达; 相控阵天线; 误差分析

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2026-05

Ambiguity Analysis of Deployment Errors in Phased Array Antenna of Spaceborne Synthetic Aperture Radar

CHEN Jie

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

Abstract: The thermal mechanism errors of deployment distortion in phased array antenna of spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) play an important role in the ambiguity performance analysis. A mathematic model for deployment distortion error is founded according to the characteristics of the phase array antenna on SAR satellite. Based on paired echo theory, the expression of antenna pattern function under deployment distortion errors is obtained. The statistic model of the SAR ambiguity performance analysis with antenna deployment distortion errors is proposed. The ambiguity performance analysis method for deployment distortion errors is presented. The computer simulation results are presented with a L-band space-borne SAR phase array antenna, by which the correctness of the conclusion is validated.

Key words: synthetic aperture radar; phased array antenna; performance analysis

1 引言

天线分系统是星载合成孔径雷达(SAR)的重要组成部分之一. 在空间环境中, 由于非理想因素引起的天线误差对星载 SAR 模糊度指标的分析与设计产生严重的影响. 星载 SAR 天线展开误差的模糊性能分析是星地一体化 SAR 系统分析的关键技术之一. 模糊度是一项关键的星载 SAR 总体技术指标, 直接影响 SAR 系统的覆盖性能和辐射性能等总体参数的设计.

星载 SAR 通常采用平面相控阵天线, 其口径尺寸一般在 10~20m², 甚至达到 30m² 以上. 由于运载火箭整流罩包络半径的限制, 星载 SAR 天线通常被分成若干(4~8)块子阵面板, 折叠收拢在星体周围. 当卫星进入预定轨道后, 通过伸展机构将天线阵面展开^[1]. 由于空间外力干扰或天线子阵面板之间及子阵面板与伸展机构之间的导热耦合引起伸展机构出现机械变形, 导致天线阵面出现展开误差, 造成天线方向性图畸变, 对星载 SAR 的模糊性能产生较为严重的影响.

文献[2]给出了系统误差对天线性能影响的统计分析, 文

献[3, 4]分析了典型的机械误差对天线方向图函数的影响. 文献[5~8]给出了理想条件下的模糊度计算公式, 文献[9]基于模糊度分析研究了星载 SAR 天线的优化设计问题. 天线展开误差对星载 SAR 图像质量的影响是星地一体化 SAR 系统性能分析的重要研究工作, 然而目前的文献资料中很少涉及这方面的内容.

本文根据星载 SAR 天线的特点建立了天线展开误差模型, 定义了天线展开不平直度指标, 推导了存在天线展开误差条件下天线方向图函数的表达式, 并对天线方向图函数进行了统计分析. 在此基础上, 推导出单频天线展开误差分量与方位模糊度之间统计关系, 给出了天线展开误差影响方位模糊度指标的上界. 以 L 波段星载 SAR 天线为例进行了计算机仿真, 验证了本文分析方法的正确性.

2 星载 SAR 模糊度分析

Bayman(1975)提出了星载 SAR 模糊度计算公式^[6], 文献[7]和[8]发展了模糊度的计算方法. 模糊度的计算公式为

$$ASR(\tau) = \frac{\sum_{\substack{m, n \in I \\ m, n \neq 0}} \sum_p \int_{-B_p/2}^{B_p/2} G^2(f_d + \Delta f_{DC} + mf_p, \tau + n/f_p) \frac{\sigma^0[\theta_i(\tau + n/f_p)]}{R^3(\tau + n/f_p) \sin\theta_i(\tau + n/f_p)} df_d}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} G^2(f_d + \Delta f_{DC}, \tau) \frac{\sigma^0[\theta_i(\tau)]}{R^3(\tau) \sin\theta_i(\tau)} df_d} \quad (1)$$

式中, m 和 n 为整数, 且 m, n 不同时等于 0; τ 为回波信号的时间延迟; f_d 和 Δf_{DC} 分别表示多普勒频率和多普勒中心频率偏差; $G(f_d, \tau)$ 表示双程天线方向图; f_p 和 B_p 分别表示脉冲重复频率和成像处理器带宽; θ_i 为波束入射角; $R(\tau)$ 为模糊区和观测区域的斜距; σ^0 为地面目标的后向散射系数, 通常采用等 γ 模型描述 σ^0 随入射角变化的规律, 忽略雷达工作频率和极化方式对 σ^0 的影响。

理想条件下, 雷达天线方向图二维可分离, 即 $G(f_d, \tau)$ 近似满足 $G(f_d, \tau) = G_a(f_d) \cdot G_r(\tau)$, 则^[9]

$$ASR(\tau) = RASR(\tau) + AASR + XASR \approx RASR(\tau) + AASR \quad (2)$$

其中

$$RASR(\tau) = \frac{\sum_{\substack{m \in I \\ n \neq 0}} G_r^2(\tau + n/f_p) \frac{\sigma^0[\theta_i(\tau + n/f_p)]}{R^3(\tau + n/f_p) \sin\theta_i(\tau + n/f_p)}}{G_r^2(\tau) \frac{\sigma^0[\theta_i(\tau)]}{R^3(\tau) \sin\theta_i(\tau)}} \quad (3)$$

$$AASR = \frac{\sum_{\substack{m \in I \\ n \neq 0}} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} G_a^2(f_d + f_{DC} + mf_p) df_d}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} G_a^2(f_d + f_{DC}) df_d} \quad (4)$$

$$XASR \approx RASR(\tau) \cdot AASR \quad (5)$$

式中, $G_r(\tau)$ 和 $G_a(f_d)$ 分别表示俯仰向和方位向的双程天线方向图, $RASR$ 和 $AASR$ 分别表示距离模糊度和方位模糊度; $XASR$ 表示交叉项模糊度。

本文采用 FT Ulaby 在大量实验基础上建立的地面目标雷达散射统计模型, 可以针对不同的雷达工作频率、极化方式和地物类型进行模糊度分析。FT Ulaby 模型的数学表达式为^[10]

$$\sigma^0 = P_1 + P_2 \exp(-P_3 \theta_i) + P_4 \cos(P_5 \theta_i + P_6) \quad (6)$$

式中, $P_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 为模型参数, 文献^[10] 给出了不同的雷达工作频率和极化方式条件下 P_i 的取值。

3 星载 SAR 天线展开误差分析

3.1 相控阵天线方向性图

对于具有 $M \times N$ (M 行 $\times N$ 列) 个阵元的星载 SAR 相控阵天线(图 1), 在理想条件下且波束扫描角为 (φ_0, ψ_0) 时, 其天线方向图函数为^[11, 12]

$$F(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0) = F_1(\varphi; \varphi_0) \cdot F_2(\psi; \psi_0) \quad (7)$$

其中

$$F_1(\varphi; \varphi_0) = \sum_{m=0}^{M-1} I_m \cdot \exp[jmkd_y(\sin\varphi - \sin\varphi_0)] \quad (8)$$

$$F_2(\psi; \psi_0) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \cdot \exp[jnkd_x(\cos\psi - \cos\psi_0)] \quad (9)$$

式中 φ 和 ψ 分别表示天线俯仰角和锥角; φ_0 和 ψ_0 分别表示

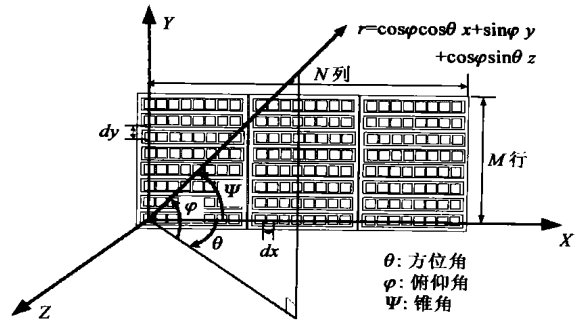


图 1 星载 SAR 相控阵天线阵列坐标系

天线波束扫描角; d_x 和 d_y 分别表示沿天线 x 轴和 y 轴的阵元间距; $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数; I_{mn} 表示阵元 (m, n) 的电流激励加权系数, 且二维可分离; $F_1(\varphi; \varphi_0)$ 、 $F_2(\psi; \psi_0)$ 分别表示距离和方位向天线方向图函数。

3.2 天线展开误差模型

假设星载 SAR 相控阵天线长度为 L_a , 由 K 个子阵板组成(如图 2 所示)。则在 XY 平面内存在 $K+1$ 个自由节点(面板连接点)。由于节点高度误差 h_i 远远小于面板尺度, 则节点位置误差 $|\Delta x_i| \ll |h_i|$, 即相对于面板尺度为高阶小量, 它们对天线展开误差的贡献可以忽略不计^[5]。因此, 天线展开误差可用一元函数 $H_e(x)$ 表示。将误差函数 $H_e(x)$ 进行傅立叶级数展开, 表示为简谐波之和的形式

$$H_e(x) = a_0 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l \sin\left(\frac{2\pi l x}{L_a} + \beta_l\right) \quad (10)$$

式中, a_l, β_l 分别表示第 l 次项的傅立叶系数、初始相角; L_a 表示天线长度。

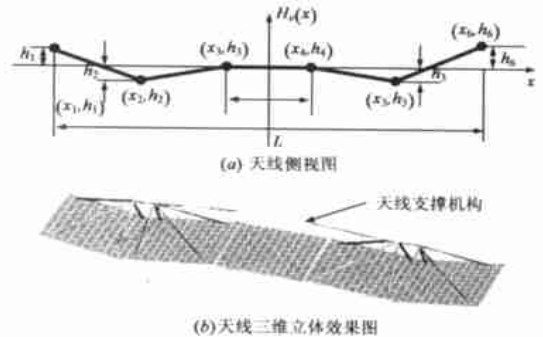


图 2 天线展开误差示意图

天线展开误差可以用展开不平直度描述, 用符号 σ_D 表示。定义为展开误差的均方根

$$\begin{aligned} \sigma_D &= \sqrt{\frac{1}{N} \int_{-L_a/2}^{L_a/2} [H_e^2(x) - \overline{H_e(x)}]^2 dx} \\ &= \sqrt{\sum_{l=1}^{\infty} \frac{a_l^2}{2}} = \sqrt{\sum_{l=1}^{\infty} \sigma_l^2} \quad (11) \end{aligned}$$

其中
$$\overline{H_e(x)} = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} H_e(x) dx$$

式中, $\overline{H_e(x)}$ 表示天线展开误差的均值; σ_l 为第 l 次项傅立叶展开分量的均方根。

3.3 展开误差对天线性能的影响

3.3.1 天线方向图函数表达式 在天线主瓣附近, 由天线展开误差引起的空间相位误差 $\varphi_e(x)$ 与 $H_e(x)$ 之间近似满足 $\varphi_e(x) \approx kH_e(x) = \sum_{l=0}^{\infty} b_l \sin\left(\frac{2\pi k}{L_a} + \beta_l\right)$, 其中 $b_l = 2\pi a_l / \lambda$ 则存在展开误差的天线方向图函数为

$$F_D(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0) = F_1(\varphi; \varphi_0) \cdot F_H(\psi; \psi_0) \quad (12)$$

其中 $F_H(\psi; \psi_0) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \cdot \exp\{jnkd_x(\cos\psi - \cos\psi_0) + j\varphi_e(nd_x)\}$

对于具有单频简谐波动形式的空间相位误差 $\varphi_e(x) = b \sin(\omega x + \beta)$, 其中 b 、 ω 和 β 分别表示相差的幅度、频率和初始相位。将式(12)中空间相位误差项进行傅立叶级数展开, 即

$$\exp\{j\varphi_e(x)\} = J_0(b) + \sum_{i=1}^{\infty} J_i(b) [e^{j(i\omega x + \beta)} + (-1)^i e^{-j(i\omega x + \beta)}] \quad (13)$$

式中, $J_i(b)$ 为 i 阶第一类贝塞尔函数。

令 $\omega = 2\pi l / L_a$, 将式(13)代入式(12), 推导出 $F_D = (\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0)$ 的近似解析表达式为

$$F_D = (\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0) \approx J_0(b) F(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0) + \sum_{i=1}^{\infty} J_i(b) \left\{ F[\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0 + \sin^{-1}(iN/L_a \sin\psi_0)] \cdot e^{i\beta} + (-1)^i F[\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0 - \sin^{-1}(iN/L_a \sin\psi_0)] \cdot e^{-j\beta} \right\} \quad (14)$$

式中, $J_0(b) F(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0)$ 为主天线方向图; 其余各项为误差方向图, 它们偏离天线主瓣的角度 $\Delta\psi_i = \sin^{-1}(iN/L_a \sin\psi_0) \ll 1$, 则有 $\Delta\psi_i \approx iN/L_a \sin\psi_0$ 。

若 $b < 0.5 \text{ rad}$, 则 $J_0(b) \approx 1$, $J_1(b) \approx b/2$, 式(14)可近似为 $F_D = (\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0)$

$$\approx J_0(b) F(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0) + \frac{b}{2} F\left(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0\right) \cdot e^{j\beta} + F\left(\varphi, \psi; \varphi_0, \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0\right) \cdot e^{-j\beta} \quad (15)$$

3.3.2 天线方向图函数的统计特性 假设 β 为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量, 若天线加权因子 I_{mn} 二维可分离, 推导出方位向单程天线增益 $G_H(\psi; \psi_0) = |F_H(\psi; \psi_0)|^2$ 和双程天线增益函数 $G_H^2(\psi; \psi_0)$ 的均值和方差为

$$E\{G_H(\psi; \psi_0)\} \approx |F_2(\psi; \psi_0)|^2 + \frac{b^2}{4} |F_2(\psi; \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0)|^2 + \frac{b^2}{4} |F_2(\psi; \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0)|^2$$

$$D\{G_H(\psi; \psi_0)\} \approx \frac{b^2}{2} \cdot |F_2(\psi; \psi_0)|^2 \cdot \{ |F_2(\psi; \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0)|^2 + |F_2(\psi; \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0)|^2 \} + \frac{b^2}{8} \cdot |F_2(\psi; \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0)|^2$$

$$\cdot |F_2(\psi; \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0)|^2 \quad (16)$$

$$E\{G_H^2(\psi; \psi_0)\} \approx |F_2(\psi; \psi_0)|^4 + \frac{b^4}{16} \{ |F_2(\psi; \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0)|^2 + |F_2(\psi; \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0)|^2 \}^2 + \frac{b^2}{2} \cdot |F_2(\psi; \psi_0)|^2 \cdot \{ |F_2(\psi; \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0)|^2 + |F_2(\psi; \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0)|^2 \}$$

$$D\{G_H^2(\psi; \psi_0)\} \approx \frac{b^4}{8} |F_2(\psi; \psi_0)|^4 \cdot \{ |F_2(\psi; \psi_0 + N/L_a \sin\psi_0)|^2 + |F_2(\psi; \psi_0 - N/L_a \sin\psi_0)|^2 \} + \frac{b^2}{8} |F_2(\psi; \psi_0)|^4 \quad (17)$$

式中, 符号 $E[\cdot]$ 表示数学期望; 符号 $D[\cdot]$ 表示方差。

4 天线展开误差的模糊性能分析

将式(16)和式(17)代入式(4), 推导出单频天线展开误差分量与方位模糊度之间统计关系

$$\begin{cases} E[AASR] \approx AASR_0 + \frac{2}{(\pi l)^2} \sigma_\varphi^2 + \frac{1}{2} \sigma_\varphi^4 \\ \sigma_{AASR} \approx \frac{1}{(\pi l)^2} \sigma_\varphi^2 \end{cases} \quad (18)$$

其中
$$\sigma_\varphi = k\sigma_D = \frac{2}{\lambda} a_l \quad (19)$$

式中, $AASR_0$ 表示理想条件下的方位模糊度; σ_D 表示天线展开不平直度, 且 $\sigma_D \ll 1$; k 表示波数, 且 $k = 2\pi/\lambda$; σ_φ 表示天线展开误差引起的阵元空间相位误差的均方根。

实际中星载 SAR 相控阵天线的展开误差以低频分量 ($l = 1, 2$) 为主。根据式(18), 若将天线展开误差等效到 $\omega = 2\pi/L_a$ 的分量上, 即令 $l = 1$, 且 $\sigma_\varphi = k\sigma_1$, 求得 $AASR$ 指标的均值和上界

$$\begin{cases} E[AASR] \approx AASR_0 + \frac{2}{\pi^2} \sigma_\varphi^2 + \frac{1}{2} \sigma_\varphi^4 \\ AASR_{\max} \approx AASR_0 + \frac{5}{\pi^2} \sigma_\varphi^2 + \frac{1}{2} \sigma_\varphi^4 \end{cases} \quad (20)$$

式中, 假设 $AASR$ 的最大值满足 $AASR_{\max} \approx E[AASR] + 3\sigma_{AASR}$ 。

式(20)确定的数学关系, 本文提出了天线展开误差的模糊性能分析方法。在工程上可根据星载 SAR 总体对 $AASR$ 的指标要求, 利用式(20)确定天线展开不平直度指标。

5 计算机仿真

5.1 计算机仿真参数

为了验证本文提出的天线展开误差模糊性能分析方法的有效性, 选择 L 波段的星载 SAR 天线进行仿真分析。假设天线口面的激励电流采用均匀加权, 即 $I_{mn} = 1$ 。表 1 给出了天线

表 1 计算机仿真参数

| 几 何 参 数 | | 系 统 参 数 | |
|----------|------|---------------------|------|
| 天线长度 (m) | 10.0 | 信号波长 (m) | 0.24 |
| 天线宽度 (m) | 3.6 | 雷达天线视角 ($^\circ$) | 34.5 |
| 方位阵元数目 | 50 | 处理带宽 B_r (Hz) | 1380 |
| 距离阵元数目 | 26 | 重复频率 (Hz) | 1620 |

仿真的参数.

5.2 天线方向图分析

当天线存在 $l = 5, b = 2\pi/\lambda \cdot 0.1 - 0.2617\text{rad}$ 的单频展开误差分量时, 根据表 1 给出的参数进行仿真计算. 图 3 和图 4 分别给出初始相角 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 90^\circ$ 时, 方位向天线方向图以及误差方向图的仿真结果. 图中误差方向图的主瓣位置偏移为 $\Delta\phi = \pm 5\sqrt{L_a} = \pm 7.6^\circ$, 峰值增益为 $\Delta G_{\max} = 10\log_{10} L_b^2/4l = -17.7\text{dB}$. 仿真结果同式(15)的理论分析结果一致, 验证了公式推导的正确性.

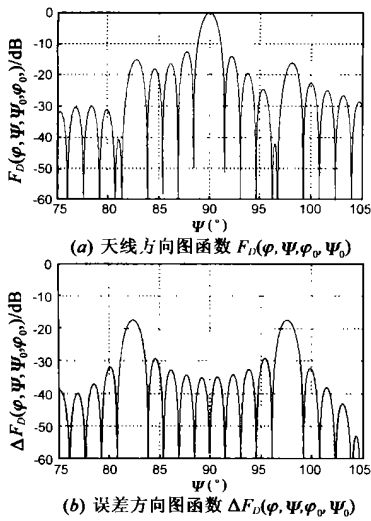


图 3 方位向天线方向图及误差方向图的计算机仿真结果(初始相角 $\beta = 0^\circ$)

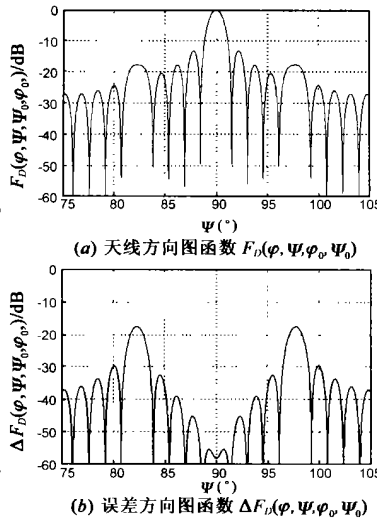


图 4 方位向天线方向图及误差方向图的计算机仿真结果(初始相角 $\beta = 90^\circ$)

5.3 模糊性能仿真分析

由于相控阵天线展开误差主要引起方位向天线方向图畸变, 导致方位模糊度(AASR)指标变差, 而对距离模糊度和交叉项模糊度影响可忽略. 因此, 总的模糊度(ASR)指标主要取决于 AASR 的变化. 图 5 给出了 AASR 随天线展开误差的相位仿真结果表明: (1) 采用式(3.15)对 AASR 均值的估计结

β 、波动频率 l/L_a 和展开不平直度 σ_D 变化的规律. 图中, 纵轴表示 AASR, 横轴 Phase 表示相位 β , 横轴 Frequency 表示波动频率 l/L_a .

仿真结果表明: (1) AASR 随相位 β 发生周期性变化; (2) AASR 随展开不平直度 σ_D 的增加而变差(如图 5b 所示); (3) AASR 随波动频率 l/L_a 的变化规律具有上凸性(如图 5a 所示), 当 $l = 1$ 时 AASR 存在极大值, 即波动频率为 $1/L_a$ 的天线展开误差分量对方位模糊度影响最大.

图 6 分别给出了 $l = 1, 2, 3, 4$ 时(即在不同的天线展开误差波动频率条件下), AASR 随 σ_D 变化的规律. 图中分别给出了计算机仿真得到的 AASR 的最大值、最小值和均值, 同时给出了根据式(20)计算得到的平均 AASR 以及 $3\sigma_{AASR}$ 的变化范围.

果同仿真结果非常接近, 具有较高的估算精度; (2) AASR 的最大值基本上落在 $3\sigma_{AASR}$ 的范围之内, 即 $AASR_{\max} < E[AASR] + 3\sigma_{AASR}$; (3) 当 $l = 1$ 时, 天线展开误差分量对方位模糊度的影响最大, 给出了工程误差分析的上界.

根据式(20), 若要求 AASR 指标优于 -16dB , 单独考虑天线展开误差的影响, 则对于波长 $K = 0.124\text{m}$ 的 L 波段 SAR 天线的展开不平直度 R_D 应满足: $R_D < 5\text{mm}$, 即峰峰值 141.14mm . 而对于波长 $K = 0.103\text{m}$ 的 X 波段 SAR 天线, 则要求: $R_D < 0.16\text{mm}$, 即峰峰值 11.7mm . 雷达工作波长越短, 则系统对天线展开不平直度指标的要求越高.

6 结论

本文应用 F T Ulaby 地面目标雷达散射统计模型提出了一种适用于不同雷达工作波段、极化方式和地物类型的模糊度分析模型. 根据星载 SAR 相控阵天线的特点, 建立了天线展开误差模型, 提出了天线展开不平直度指标. 基于成对回波理论, 推导出存在天线展开误差条件下天线方向函数的表达式. 在此基础上, 进一步推导出单频天线展开误差

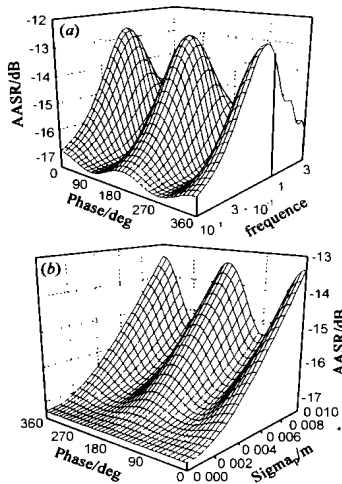


图 5 AASR 同相位 β 、频率 l/L_a 和 σ_D 的关系

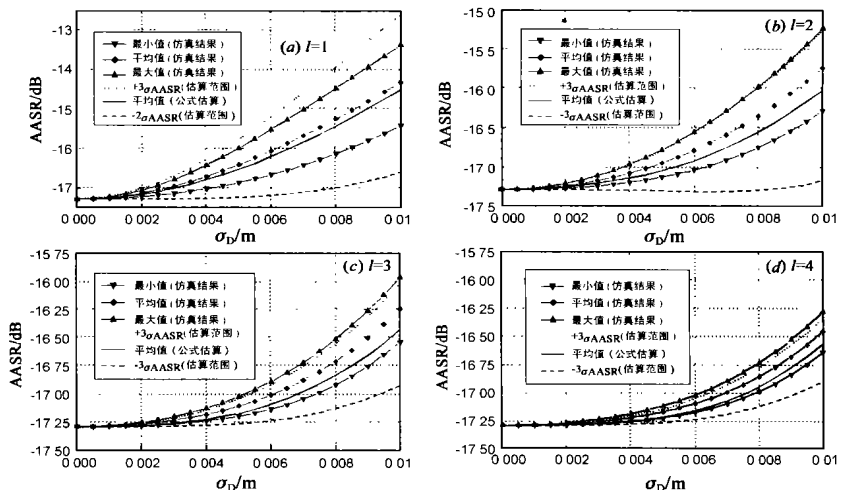


图 6 AASR 随 σ_D 变化规律的计算机仿真和公式估算的结果

分量与方位模糊度之间统计关系,提出了定量分析天线展开误差对模糊性能影响的方法.基于 L 波段星载 SAR 天线进行了大量仿真计算,验证了本文推导的模糊性能估算公式的正确性.本文提出的星载 SAR 相控阵天线展开误差分析方法为 SAR 系统星地一体化性能分析与指标分配提供了重要的理论依据.

参考文献:

- [1] 魏钟铨.合成孔径雷达卫星[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] Hsi-cao J K. Array Sidelobes, Error Tolerance, Gain and Beamwidth [R]. USA: ADA 147004, 1984.
- [3] Purdy D S, et al. In orbit active array calibration for NASA. sLightSAR [A]. IEEE International Radar Conference-Proceedings[C]. Waltham, MA, USA: IEEE, 1999. 172- 176.
- [4] Wang H S C. Performance of phase array antennas with mechanical errors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 535- 545.
- [5] 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.
- [6] Bayma R W. Aperture size and ambiguity constraints for a synthetic aperture radar [A]. IEEE 1975 int radar conf [C]. Arlington, Va: IEEE, 1975. 499- 504.
- [7] Mehlis J G. Synthetic aperture radar range-azimuth ambiguity design

and constraints[A]. Proceedings of the International Conference on Thermoelectric Energy Conversion[C]. Arlington, Va: IEEE, 1980. 143- 152.

- [8] Li F K, Johnson W T K. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar systems[J]. IEEE Transaction on Aerospace Electronic System, 1983, 19: 389- 396.
- [9] Barnarossa S, Levini G. An antenna pattern synthesis technique for spaceborne SAR performance optimization[J]. IEEE Trans on Geos and Remote Sensing, 1991, 29(2): 1523- 1528.
- [10] Ulaby F T, Dobson M C. Handbook of radar scattering statistics for terrain[M]. New York: Artech House editor, 1988.
- [11] 郭燕昌,等.相控阵和频率扫描天线原理[M].北京:国防工业出版社,1978.
- [12] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.

作者简介:



陈杰男,1973年生于河南郑州,现为北京航空航天大学在读博士后,曾于2000年9月赴意大利参加中国雷达卫星总体技术国际合作研究项目,主要研究方向: SAR 系统星地一体化任务分析与仿真、高分辨率星载 SAR 成像处理以及分布式星载干涉 SAR 系统设计与信号处理等.