星载 SAR 相控阵天线热变形误差分析

陈 杰 周荫清
(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 相控阵天线结构特点,建立了天线热变形误差的数学模型,定义了阵面不平整度指标. 基于成对回波畸变理论,推导了天线阵面存在热变形误差时的方向图函数表达式,导出了单频热变形误差分量与模糊度之间的统计关系,提出了定量分析星载 SAR 相控阵天线热变形误差对模糊性能影响的有效方法. 基于 L 波段星载 SAR 天线进行了计算机仿真,验证了分析方法的正确性.

关 键 词: 合成孔径雷达; 相控阵天线; 性能分析
中图分类号: TN 957
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2004)09-0839-05

Ambiguity performance analysis of spaceborne SAR with thermal mechanism errors in phased array antenna

Chen Jie Zhou Yinqing
(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To analyze the ambiguity performance of spaceborne synthetic aperture radar (SAR) with on-board thermal mechanism errors in phased array antenna, a mathematical model for thermal mechanism errors was established, based on the characteristics of spaceborne SAR antenna. The formula of the antenna pattern with thermal mechanism errors were presented, on the basis of paired echo distortion theory. The statistical model for ambiguity performance analysis of thermal mechanism errors in phased array antenna was proposed. The maximum boundary of ambiguity performance requirement was educed. The computer simulation results of a L-band spaceborne SAR was proposed, by which the conclusion was validated.

Key words: synthetic aperture radar; phase array antennas; performance analysis

星载 SAR 天线在空间环境中不仅受到太阳直接辐射、地球反射和红外辐射的影响,还受到空间近 40 K 的低温及卫星进出阴影区时的极端冷热交变环境的影响[1,2]. 在这些因素的共同作用下使天线阵面在空间和时间上都存在较大的温度梯度,导致阵面出现热变形误差,造成天线性能和雷达图象质量变差.

文献[3]给出了系统误差对相控阵天线性能影响的统计分析,文献[4,5]分析了典型机械误差对天线方向图函数的影响. 文献[6~8]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.

本文第一部分给出了星载 SAR 模糊度计算方法. 第二部分建立了天线热变形误差分析的数学模型. 第三部分推导出天线热变形误差分量与模糊度的统计关系,提出了分析热变形误差影响模糊度指标的方法. 第四部分通过大量计算机仿真实验,验证了方法的正确性.

1 星载 SAR 模糊性能分析

Bayman 提出了星载 SAR 模糊度 S_{ASR}(Ambiguity to Signal Ratio)的分析方法[6],文献[7~9]发展了模糊度计算方法.

$$S_{ASR}(\tau) = [S_{RASR}(\tau) + 1] \cdot [S_{AASR} + 1] - 1 =$$

收稿日期: 2003-06-04
基金项目: 国家"863"计划资助项目(2001AA135050);博士后科学基金资助项目(2002031041)
作者简介: 陈 杰(1973-),男,河南郑州人,博士后, chenjie@buaa.edu.cn.

$$S_{\mathrm{RASR}}(\tau) + S_{\mathrm{AASR}} + S_{\mathrm{XASR}} \tag{1}$$

其中

$$S_{\mathrm{RASR}}(\tau) = \left[\sum_{\substack{n\in I,\\ n\neq 0}} G_{\mathrm{r}}^2(\tau + n/f_{\mathrm{p}}) \cdot \frac{\sigma^0[\theta_i(\tau + n/f_{\mathrm{p}})]}{R(\tau + n/f_{\mathrm{p}})^3 \sin\theta_i(\tau + n/f_{\mathrm{p}})}\right] \Big/ \left[G_{\mathrm{r}}^2(\tau)\frac{\sigma^0[\theta_i(\tau)]}{R^3(\tau)\sin\theta_i(\tau)}\right] \tag{2}$$

$$S_{\mathrm{AASR}}(\tau) = \left[\sum_{\substack{m\in I,\\ m\neq 0}} \int_{-B_{\mathrm{p}}/2}^{B_{\mathrm{p}}/2} G_a^2(f_{\mathrm{d}} + f_{\mathrm{DC}} + mf_{\mathrm{p}})\,\mathrm{d}f_{\mathrm{d}}\right] \Big/ \left[\int_{-B_{\mathrm{p}}/2}^{B_{\mathrm{p}}/2} G_{\mathrm{a}}^2(f_{\mathrm{d}} + f_{\mathrm{DC}})\,\mathrm{d}f_{\mathrm{d}}\right] \tag{3}$$

$$S_{\mathrm{XASR}} \approx S_{\mathrm{RASR}}(\tau) \cdot S_{\mathrm{AASR}} \tag{4}$$

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；$G(f_{\mathrm{d}},\tau)$ 表示双程天线方向图，$G_{\mathrm{r}}(\tau)$ 和 $G_{\mathrm{a}}(f_{\mathrm{d}})$ 分别表示距离向和方位向的双程天线方向图；f_{p} 和 B_{p} 分别表示脉冲重复频率和成象处理器带宽；θ_i 为波束入射角；$R(\tau)$ 表示斜距；σ^0 表示地面目标后向散射系数，本文采用文献[10]给出的地面目标散射统计模型进行模糊度计算；S_{RASR}、S_{AASR} 和 S_{XASR} 分别表示距离模糊度、方位模糊度和交叉项模糊度.

2 天线阵面热变形误差分析

2.1 相控阵天线方向性图

对于具有 $M\times N$ 个阵元的星载 SAR 相控阵天线，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]

$$F(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0) = \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} \cdot \exp\{\mathrm{j}[nkd_x(\cos\psi - \cos\psi_0) + mkd_y(\sin\varphi - \sin\varphi_0)]\} = F_1(\varphi;\varphi_0)\cdot F_2(\psi;\psi_0) \tag{5}$$

式中，φ、ψ 分别表示天线俯仰角和锥角；φ_0、ψ_0 分别表示天线波束扫描角；d_x、d_y 分别表示天线方位向和距离向阵元间隔；$k=2\pi/\lambda$ 表示波数；I_{mn} 表示第 (m,n) 个阵元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.

2.2 天线阵面热变形误差模型

为了降低天线阵面的热变形量，将 SAR 天线各子阵板划分为若干尺度较小的矩形子板(Tile). 通常天线子板热变形的基本形态有两种，即弯曲和扭曲(如图1所示).

对于整个天线来说，热变形引起的天线阵面高度误差函数 $H_{\mathrm{T}}(x,y)$ 具有某种简谐波动特性. 因此，将 $H_{\mathrm{T}}(x,y)$ 进行二维傅立叶级数分解，建立天线热变形误差的数学模型，即

$$H_{\mathrm{T}}(x,y) = \sum_{i=0}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty} a_{il} \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{L_{\mathrm{a}}}x + \beta_{xi}\right)\cdot\sin\left(\frac{2\pi l}{L_{\mathrm{r}}}y + \beta_{yl}\right) \tag{6}$$

式中，a_{il} 表示阵面起伏的幅度；L_{a} 和 L_{r} 分别表示天线的长度和宽度，β_{xi} 和 β_{yl} 分别为沿天线阵面 X 轴和 Y 轴方向简谐波动分量的初始相角.

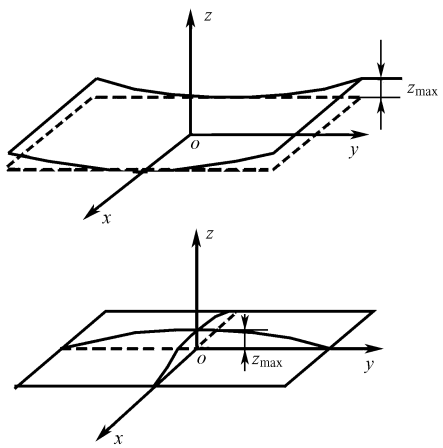


图1 天线子阵面板热变形的基本形态示意图

本文将天线阵面不平整度作为定量地衡量天线阵面起伏程度的技术指标. 它的定义为热变形误差函数 $H_{\mathrm{e}}(x)$ 的均方根，用符号 σ_{T} 表示.

$$\sigma_{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{1}{A}\iint[H_{\mathrm{T}}^2(x,y) - \overline{H_{\mathrm{T}}(x,y)^2}]\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{7}$$

其中

$$\overline{H_{\mathrm{T}}(x,y)} = \frac{1}{A}\iint H_{\mathrm{T}}(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

式中，$\overline{H_{\mathrm{T}}(x,y)}$ 表示天线阵面的平均高度误差；A 表示天线阵面的面积.

2.3 阵面热变形误差对天线性能的影响

在天线主瓣附近，由热变形引起的阵元空间相位误差函数可近似为 $\varphi_{\mathrm{T}}(x_n,y_m)\approx kH_{\mathrm{T}}(x,y)$，则天线方向图 $F_{\mathrm{T}}(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)$ 为

$$F_{\mathrm{T}}(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0) = \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} I_{mn}\exp\{\mathrm{j}[nkd_x(\cos\psi - \cos\psi_0) + mkd_y(\sin\varphi - \sin\varphi_0)]\}\cdot\exp\{\mathrm{j}\varphi_{\mathrm{T}}(x_n,y_m)\} \tag{8}$$

假设 $H_{\mathrm{T}}(x,y)$ 具有单频简谐波动形式，即 $H_{\mathrm{T}}(x,y)=a\sin(2\pi ix/L_{\mathrm{a}}+\beta_x)\cdot\sin(2\pi ly/L_{\mathrm{r}}+\beta_y)$，其中 a

表示热变形的幅度,β_{xi} 和 β_{yl} 是服从[0,2π]内均匀分布的随机变量. 根据成对回波畸变理论推导出存在热变形星载 SAR 天线方向图可近似为

$$F_{\mathrm{T}}(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)\approx J_0^2\left(\frac{ka}{2}\right)F(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)+$$
$$J_0\left(\frac{ka}{2}\right)\cdot J_1\left(\frac{ka}{2}\right)\{F[\varphi,\psi;\varphi_0-\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),$$
$$\psi_0+\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\beta_x+\beta_y)}-$$
$$F[\varphi,\psi;\varphi_0-\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),$$
$$\psi_0-\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-\beta_x+\beta_y)}-$$
$$F[\varphi,\psi;\varphi_0+\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),$$
$$\psi_0+\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\beta_x-\beta_y)}+$$
$$F[\varphi,\psi;\varphi_0+\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),$$
$$\psi_0-\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\beta_x+\beta_y)}\}+\cdots \tag{9}$$

式中,$F(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)$ 为理想天线方向图;其余各项为由热变形误差引起的误差方向图.

若天线加权因子 I_{mn} 二维可分离,则双程天线增益的数字特征为

$$E[G_{H_{\mathrm{T}}}^2(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)]\approx|F(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)|^4+\frac{b^4}{256}\{|F_a|^2+|F_b|^2+|F_c|^2+|F_d|^2\}^2+\frac{b^2}{8}\cdot|F(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)|^2\cdot\{|F_a|^2+|F_b|^2+|F_c|^2+|F_d|^2\} \tag{10}$$

$$D[G_{H_{\mathrm{T}}}^2(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)]\approx\frac{b^4}{128}\cdot|F(\varphi,\psi;\varphi_0,\psi_0)|^4\cdot\{|F_a|^4+|F_b|^4+|F_c|^4+|F_d|^4\} \tag{11}$$

其中

$$F_a=F[\varphi,\psi;\varphi_0-\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),\ \psi_0+\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]$$
$$F_b=F[\varphi,\psi;\varphi_0-\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),\ \psi_0-\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]$$
$$F_c=F[\varphi,\psi;\varphi_0+\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),\ \psi_0+\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]$$
$$F_d=F[\varphi,\psi;\varphi_0+\arcsin(\lambda l/L_{\mathrm{r}}),\ \psi_0-\arcsin(\lambda i/L_{\mathrm{a}})]$$

式中,$E[\cdot]$ 表示数学期望; $D[\cdot]$ 表示方差;热变形引起空间相位误差的幅度 $b=ka\ll1$;F_a、F_b、F_c 和 F_d 分别表示式(9)中的前四项误差方向图.

3　阵面热变形对模糊度性能的影响

将式(10)和式(11)代入式(1),推导出阵面不平整度 σ_{T} 同 S_{ASR} 之间的近似解析表达式

$$\left.\begin{aligned}E[S_{\mathrm{ASR}}]&\approx S_{\mathrm{ASR0}}+\frac{2}{(K\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2+\frac{1}{2^J}\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^4\\ \sigma_{\mathrm{ASR}}&\approx\frac{1}{(K\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

其中　$S_{\mathrm{ASR0}}=S_{\mathrm{AASR0}}+S_{\mathrm{RASR0}}+S_{\mathrm{XASR0}}$

$\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}=k\sigma_{\mathrm{T}}=2\pi\sigma_{\mathrm{T}}/\lambda$

式中,S_{ASR0}、S_{AASR0}、S_{RASR0} 和 S_{XASR0} 为理想条件下的模糊度指标;σ_{T} 为阵面不平整度.

K 和 J 由标号 i 和 l 决定.

1) 当 $i=0,l\neq0$ 时,表示天线子板发生弯曲形变,有 $K=l,J=1$. 热变形误差模型为 $H_{\mathrm{T}}(x,y)=\sum_{l=0}^{\infty}a_l\sin(2\pi ly/L_{\mathrm{r}}+\beta_{yl})$,其误差方向图位于距离向副瓣,主要影响 S_{RASR},即

$$\left.\begin{aligned}E[S_{\mathrm{RASR}}]&\approx S_{\mathrm{RASR0}}+\frac{2}{(l\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2+\frac{1}{2}\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^4\\ \sigma_{\mathrm{RASR}}&\approx\frac{1}{(l\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

式中,$\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}=k\sigma_{\mathrm{T}}=\sqrt{2}\cdot ka_1/2$,$a_1$ 表示天线子板仅沿距离向翘曲的幅度.

2) 当 $l=0,i\neq0$ 时,天线子板仅沿方位向发生弯曲形变,有 $K=i,J=1$. 热变形误差模型 $H_{\mathrm{T}}(x,y)=\sum_{l=0}^{\infty}a_i\sin(2\pi ix/L_{\mathrm{a}}+\beta_{xi})$,其误差方向图位于方位向副瓣中,主要影响 S_{AASR},即

$$\left.\begin{aligned}E[S_{\mathrm{AASR}}]&\approx S_{\mathrm{AASR0}}+\frac{2}{(i\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2+\frac{1}{2}\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^4\\ \sigma_{\mathrm{AASR}}&\approx\frac{1}{(i\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2\end{aligned}\right\} \tag{14}$$

式中,$\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}=k\sigma_{\mathrm{T}}=\sqrt{2}\cdot ka_i/2$,$a_i$ 表示天线子板仅沿方位向翘曲的幅度.

3) 当 $i\neq0$ 和 $l\neq0$ 时,天线子板仅沿距离向发生弯曲形变,有 $K=il,J=2$. 阵面热变形误差分量主要影响 S_{XASR}

$$\left.\begin{aligned}E[S_{\mathrm{XASR}}]&\approx S_{\mathrm{XASR0}}+\frac{2}{(il\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2+\frac{1}{4}\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^4\\ \sigma_{\mathrm{XASR}}&\approx\frac{1}{(il\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}^2\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

式中,$\sigma_{\varphi_{\mathrm{e}}}=k\sigma_{\mathrm{T}}=ka_{il}/4$,$a_{il}$ 表示天线子板弯曲的幅度.

将天线阵面热变形误差等效到典型频率分量上,估算阵面热变形误差对图象模糊性能影响的

上限,则 S_{ASR} 的均值和最大值满足

$$\left.\begin{aligned} E[S_{ASR}] &\approx S_{ASR0} + \frac{2}{(il\pi)^2}\cdot\sigma_{\varphi_e}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{\varphi e}^4 \\ S_{ASRm} &\approx S_{ASR0} + \frac{5}{(il\pi)^2}\sigma_{\varphi_e}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{\varphi_e}^4 \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

式中,假设 $S_{ASRm}<E[S_{ASR}]+3\sigma_{ASR}$.

利用式(16)可以对天线阵面不平整度进行分析. 例如,若要求 $S_{ASR}<-16$ dB,则对于波长 $\lambda=0.24$ m 的天线,阵面不平整度满足:$\sigma_T<15$ mm.

4 计算机仿真

4.1 计算机仿真参数

选择 L 波段星载 SAR 天线进行了计算机仿真. 表 1 给出了天线仿真的参数,并假设天线口面的激励电流采用均匀加权,即 $I_{mn}\equiv 1$.

表 1 计算机仿真参数

几何参数		系统参数	
项	值	项	值
天线长度 L_a/m	10.0	信号波长 λ/m	0.24
天线宽度 L_r/m	3.6	卫星高度 H/km	625.6
阵元间距 d_x/m	0.20	地球半径 R_{et}/km	6 378.14
阵元间距 d_y/m	0.14	雷达天线视角/(°)	34.5
方位阵元数目 N	50	处理带宽 B_w/Hz	1 380
距离阵元数目 M	26	重复频率 f_p/Hz	1 620

4.2 天线方向图

假设由热变形导致 SAR 天线阵面存在 $a=2$ cm,$i=5$,$l=2$,$\beta_{xi}=\beta_{yl}=0°$ 的简谐波动,根据式(10)算得成对回波误差方向图的主瓣位置为 $(\pm 7.63°, 90°\pm 6.89°)$,峰值幅度为 −17.7 dB. 仿真测得误差方向图的峰值幅度为 −17.67 dB,位置同式(9)估算出的位置相同(如图 2 所示). 仿真结果与理论估算结果一致,验证公式的正确性.

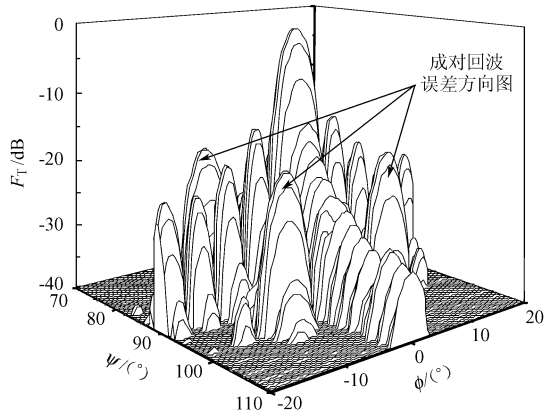


图 2 天线存在阵面热变形误差的方向图

4.3 模糊性能仿真分析

图 3 ~ 图 5 分别给出了三种典型条件下,仿真得到的模糊性能指标的最大值、最小值和平均值随天线不平整度 σ_T 变化的规律,并同时给出了由公式估算得到的 S_{ASR} 均值及 $3\sigma_{ASR}$ 变化范围.

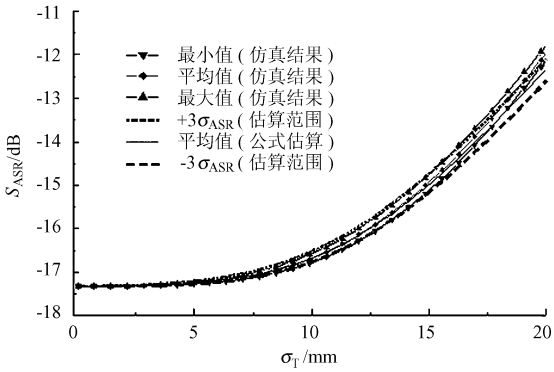


图 3 当 $i=5$,$l=2$ 时,S_{ASR} 变化规律仿真结果

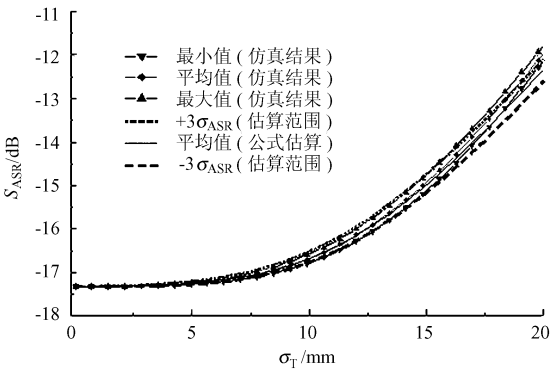


图 4 当 $i=5$,$l=0$ 时,S_{ASR} 变化规律

仿真结果表明:

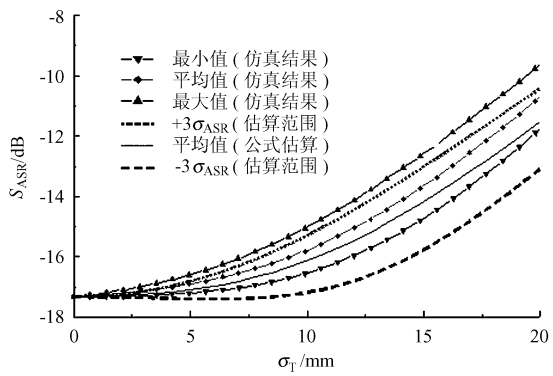


图 5 当 $i=0$,$l=2$ 时,S_{ASR} 变化规律仿真结果

1）本文推导的估算公式对 S_{ASR} 均值的估计结果与计算机仿真结果非常接近;

2）S_{ASR} 的最大值基本上落在 $3\sigma_{ASR}$ 的范围之内,即 $S_{ASRm}<E[S_{ASR}]+3\sigma_{ASR}$;

3）当天线子板发生沿方位向或距离向的弯曲形变时,热变形误差对 SAR 图象模糊性能的影响最严重.

5　结 束 语

本文基于星载 SAR 相控阵天线的特点,建立了天线阵面热变形误差的数学模型,定义了阵面不平整度指标. 基于成对回波理论推导了存在热变形误差条件下天线方向图函数表达式及其统计特性,进而推导出单频热变形误差分量与模糊度之间统计关系,提出了分析天线阵面热变形误差模糊性能的有效方法,为 SAR 系统星地一体化分析与设计提供了理论依据. 计算机仿真结果同理论分析结果一致,验证了分析方法的有效性.

参考文献（**References**）

[1] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京:科学出版社,2001
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese)

[2] 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
Zhang Chengbo. Synthetic aperture radar-theory, system analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1989(in Chinese)

[3] Hsicao J K. Array sidelobes, error tolerance, gain and beam-width[R]. ADA147004, 1984

[4] Purdy D S. In orbit active array calibration for NASA's LightSAR [A]. IEEE International Radar Conference-Proceedings[C]. Waltham,1999. 172 ~ 176

[5] Wang H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2):535 ~ 545

[6] Bayma R W. Aperture size and ambiguity constraints for a synthetic aperture radar [A]. IEEE 1975 International Radar Conference[C]. Arlington, Va, 1975. 499 ~ 504

[7] Mehlis J G. Synthetic aperture radar range-azimuth ambiguity design and constraints[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Thermoelectric Energy Conversion[C]. Arlington, 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, Levrini 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. 相控阵和频率扫描天线原理[M]. 北京:国防工业出版社,1978
Guo Yanchang. Theory of phased array and frequency scanning antenna[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1978(in Chinese)

[12] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1994
Zhang Guangyi, Phased array radar system[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1994(in Chinese)