

距离向多孔径超宽测绘带成像体制中各项误差分析

郭琨毅*** 王小青*** 盛新庆*

*(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

** (中科院研究生院 北京 100039)

摘要: 理论上已经证实可实现超宽测绘带的距离向多孔径成像方法在增加测绘带宽的同时又可获得较高的分辨率。为了正确地评定距离向多孔径成像方法的实用性, 该文给出了体制中各项误差的定量分析, 并对一些误差给出了相应的算法上的修正。

关键词: 超宽测绘带, 距离向多孔径, 成像算法, 误差分析

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1383-05

Error Analysis About Range Multi-aperture SAR Imaging System

Guo Kun-yi*** Wang Xiao-qing*** Sheng Xin-qing*

*(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

** (Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Range multi-aperture imaging algorithm is proved by theory that it can widen the swath and obtain high resolution at the same time. To evaluate the practicality of range multi-aperture SAR system, this paper gives quantitative errors analysis of this system and presents the corresponding amendment to the imaging algorithm.

Key words Wide-swath, Range multi-aperture, Imaging algorithm, Error analysis

1 引言

超宽测绘带微波成像技术对建立观测面积大, 周期短的成像系统, 譬如海洋目标监视系统, 具有十分重要的意义。对于机载超宽测绘带雷达和星载合成孔径雷达而言, 由于作用距离较远, 且受方位向模糊和信噪比要求的限制, 发射脉冲的重复频率(PRF)不能很低, 所以发射的脉冲经几个脉冲重复周期后才能返回, 这样会造成远近测绘带回波的混叠, 产生距离模糊。

目前有多种方法可实现超宽测绘带微波成像, 如波束扫描(SCAN), 距离向/方位向多波束(Multiple elevation/azimuth beam), 相位编码(Phase coding)^[1]。波束扫描是以牺牲方位向的分辨率来换取超宽测绘带宽。这种方式的系统、成像算法都较为简单, 技术也颇为成熟, 目前国际上已有的最宽测绘带宽星载合成孔径雷达 RadarSAT 便是采用波束扫描方法。在测绘带宽和分辨率都有严格要求时, 这种扫描方式很难满足。相位编码方式实施简单, 但成像质量较差, 而且抑制模糊的效果受地物的散射特征的影响较大, 使用场所受到限制。多波束方式虽成像质量较好, 但系统过于复杂。

多孔径方法是一种高精度的超宽观测带的成像方法, 该方法在增加测绘带宽的同时可获得较高的分辨率^[2]。其原理是利用不同天线接收的混叠回波的相位差异, 将远近测绘带的回波分离开来, 有效地减少距离模糊度, 且不受照射区域散射特性差异的影响^[3,4]。然而目前距离向多孔径方法还仅停留在理论阶段, 为了评定该方法的实际可行性, 下文对该成像体制中的各项误差进行了定量分析。

2 距离向多孔径成像算法原理分析

距离向多孔径成像方法是对多个天线接收的混叠回波数据作特殊的处理, 将远近测绘带的回波分离开来, 从而达到抑制距离模糊的目的。下面给出正侧视工作下的距离向多孔径 SAR 成像处理的数学分析。设子天线的个数为 k , 系统的几何关系图见图 1。天线 A_1 发射脉冲, 天线 A_l ($l=1, 2, \dots, k$) 接收回波, L_r 为天线距离向的长度, $\alpha(\cdot)$ 为目标到天线 A_1 法线的夹角, ψ 为天线的仰角, P_h ($h=1, 2, \dots, k$) 为第 h 测绘带内的点目标。

设天线 A_1 发射的脉冲为

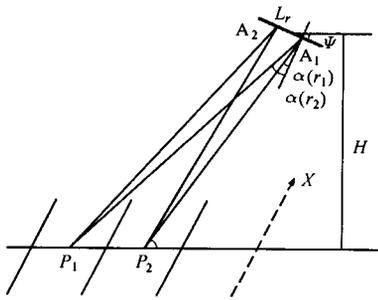


图1 距离向多孔径几何关系图

$$f_1(t) = \exp(j2\pi f_c \cdot t) \cdot P(t - t_n) \cdot \text{rect}\left[\frac{t - t_n}{t}\right] \quad (1)$$

其中 $P(t - t_n) = \exp[j\pi \cdot k_r \cdot (t - t_n)^2]$, f_c 为载频, t 为脉冲持续时间, t_n 为重复发射脉冲的时刻. $x_n = vt_n$, 为天线相位中心的坐标, $w(\cdot)$ 为子天线的方位方向图, 这里近似认为各子天线的 $w(\cdot)$ 相同. 记天线 A_l 接收来自第 h 测绘带的回波为 $S_{hl}(\cdot)$, 依据天线与目标的位置关系, $S_{hl}(\cdot)$ 可表示为 (解调后)

$$S_{hl}(x', r') \approx \iint dx dr_h \gamma(x, r_h) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot [r_h + (l-1) \cdot L_r \sin(\alpha(r_h))]\right\} \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda r_h} \cdot (x' - x)^2\right] \cdot \exp\left\{j\pi \cdot k_r \cdot \left[\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x' - x)^2}{r_h c}\right]^2\right\} \cdot \text{rect}\left[\left(\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x' - x)^2}{r_h c}\right) / t\right] \cdot w^2(x_n - x, r_h) \quad (2)$$

$S_{hl}(x', r')$ 经距离压缩处理后记为 $\bar{S}_{hl}(x', r')$:

$$\bar{S}_{hl}(x', r') \approx \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \times (l-1) \times L_r \sin(\alpha(r_h))\right] \cdot \iint dx dr_h \gamma(x, r_h) \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda r_h} \cdot (x' - x)^2\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_h\right] \cdot \text{sinc}\left\{\pi k_r \left[\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x' - x)^2}{r_h c}\right]^2\right\} \cdot \text{rect}\left[\left(\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x' - x)^2}{r_h c}\right) / t\right] \cdot w^2(x_n - x, r_h) \approx \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (l-1) \cdot L_r \sin(\alpha(r_h))\right] \cdot \bar{S}_{hl}(x', r') \quad (3)$$

其中 $t - t_n = t'$, $(ct')/2 = r'$, x_n 表示为连续形式 x' , r_h 为天线 A_l 的相位中心到第 h 测绘带目标的斜距.

依据距离向多孔径接收原理, 天线 A_l 接收的回波经距离向压缩后的结果为

$$\bar{A}_l(x', r') = \sum_{h=1}^k \bar{S}_{hl}(x', r') = \sum_{h=1}^k \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (l-1) \cdot L_r \sin(\alpha(r_h))\right] \cdot \bar{S}_{hl}(x', r') \quad (4)$$

将上式改为方程组形式为

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_1(x', r') & \bar{A}_2(x', r') & \dots & \bar{A}_k(x', r') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11}(\tau, x) & \bar{S}_{21}(\tau, x) & \dots & \bar{S}_{k1}(\tau, x) \end{bmatrix} \times W_{k \times k} \quad (5)$$

其中

$$W_{k \times k} = \begin{bmatrix} 1 & \exp[-D \sin(\alpha(r_1))] & \dots & (k-1) \exp[-D \sin(\alpha(r_1))] \\ 1 & \exp[-D \sin(\alpha(r_2))] & \dots & (k-1) \exp[-D \sin(\alpha(r_2))] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \exp[-D \sin(\alpha(r_k))] & \dots & (k-1) \exp[-D \sin(\alpha(r_k))] \end{bmatrix}$$

式中 $D = j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot L_r$.

这里称 W 为叠加矩阵, 距离向多孔径成像处理中关键技术是利用反解矩阵(记为 W_1)将混叠的远近测绘带的回波信号还原, 基本方法如下:

由式(5)可得

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{11}(\tau, x) & \bar{S}_{21}(\tau, x) & \dots & \bar{S}_{k1}(\tau, x) \end{bmatrix} \times W \times W_1^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1(x', r') & \bar{A}_2(x', r') & \dots & \bar{A}_k(x', r') \end{bmatrix} \times W_1^{-1}$$

当反解矩阵 $W_1 = W$ 时有

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{11}(\tau, x) & \bar{S}_{21}(\tau, x) & \dots & \bar{S}_{k1}(\tau, x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1(x', r') & \bar{A}_2(x', r') & \dots & \bar{A}_k(x', r') \end{bmatrix} \times W_1^{-1} \quad (6)$$

可见经过反解处理后得到的各通道的信号分别是子测绘带自身的回波数据, 对各子测绘带的信号分别做通用的成像处理, 如RD成像算法, 最终可获的各子测绘带的雷达图像.

3 距离向多孔径体制中成像误差的本质

距离向多孔径算法的关键技术是利用各个子天线接收的回波数据通过反解处理将不同测绘带的回波分离出来, 只有当反解矩阵与回波的叠加矩阵相等时, 反解处理才有效, 若叠加矩阵发生变化而反解矩阵不做调整时, 反解处理后各通道的回波数据都不同程度地存在着距离模糊. 造成叠加矩阵变化的根本原因是回波在叠加时引入非一致性延时误差. 一般解调以后, 采样所引入的非一致性误差远小于信号最小波长, 可以忽略.

设天线 A_l 接收 k 个不同测绘带的回波时存在非一致性延时误差 Δt_{hl} ($h = 1, 2, \dots, k$), 这里非一致性指 $\Delta t_{h1} - \Delta t_{l1} \neq 0$ ($h = 2, 3, \dots, k$), 则回波信号变为

$$\begin{aligned} \bar{S}_{hl}^*(x', r') &\approx \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (l-1) \cdot L_r \sin(\alpha(r_h))\right] \\ &\cdot \iint dx dr_h \gamma(x, r_h) \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda r_h} \cdot (x'-x)^2\right] \\ &\cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_h\right] \cdot \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta t_{hl} \cdot c) \\ &\cdot \text{sinc}\left\{\pi \cdot k_r \left[\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x'-x)^2}{r_h c}\right]^2\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \cdot k_r \cdot 2 \cdot \left[\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x'-x)^2}{r_h c}\right] \cdot \Delta t_{hl}\right\} \\ &\cdot \exp(j\pi \cdot k_r \cdot \Delta t_{hl}^2) \\ &\cdot \text{rect}\left[\left(\frac{2r'}{c} - \frac{2r_h}{c} - \frac{(x'-x)^2}{r_h c}\right) / t\right] w^2(x_n - x, r_h) \\ &\approx \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta t_{hl} \cdot c) \\ &\cdot \exp(j\pi \cdot k_r \cdot \Delta t_{hl}^2) \cdot \bar{S}_{hl}(x', r') \end{aligned} \quad (7)$$

则叠加矩阵变为

$$W'[h, l] = W[h, l] \cdot \exp(-j(2\pi/\lambda) \cdot \Delta t_{hl} \cdot c) \cdot \exp(j\pi \cdot k_r \cdot \Delta t_{hl}^2) \quad (8)$$

若反解矩阵还为原来的叠加矩阵时, 此时的反解处理就会产生误差。下面以 $k=2$ 为例定量分析非一致性延时误差对成像造成的影响。为了简化运算, 令

$$W' = \begin{bmatrix} a_{11} & b_1 \cdot a_{12} \\ a_{21} & b_2 \cdot a_{22} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} 1 & b_1 \\ 1 & b_2 \end{bmatrix}, \quad \text{则有}$$

$$\begin{aligned} E &= W' \times W^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & b_1 \cdot a_{12} \\ a_{21} & b_2 \cdot a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & b_1 \\ 1 & b_2 \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \frac{1}{b_2 - b_1} \begin{bmatrix} a_{11} \cdot b_2 - a_{12} \cdot b_1 & (a_{12} - a_{11}) \cdot b_1 \\ (a_{21} - a_{22}) \cdot b_2 & a_{22} \cdot b_2 - a_{21} \cdot b_1 \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

在矩阵 E 中的 $(a_{11} \cdot b_2 - a_{12} \cdot b_1)$ 和 $(a_{22} \cdot b_2 - a_{21} \cdot b_1)$ 为反解处理操作对信号的放大系数, 显然当 $(b_2/b_1) =$

$$\exp\left\{j\frac{2\pi L_r [\sin(\alpha(r_2)) - \sin(\alpha(r_1))]}{\lambda}\right\} = -1 \text{ 时, 反解操作可获得}$$

$$\text{最大的信噪比, 此时 } L_r = \frac{\lambda \cdot (n+1/2)}{[\sin(\alpha(r_2)) - \sin(\alpha(r_1))]}, \quad n=1, 2, \dots$$

由下文的分析可知, L_r/λ 越大反解误差造成的模糊比越大,

$$\text{因此这里 } L_r/\lambda \text{ 应取最小值, 即 } L_r = \frac{\lambda/2}{[\sin(\alpha(r_2)) - \sin(\alpha(r_1))]}.$$

最佳的天线间距随斜距变化而不同。采用实际数据计算最佳天线间距见图2。下文的误差定量计算的原始参数中, L_r 满足最佳的天线间距的要求。

矩阵 E 中, 交差项 $(a_{12} - a_{11}) \cdot b_1$ 和 $(a_{21} - a_{22}) \cdot b_2$ 为干扰噪声, 是延时误差产生模糊的原因。

$$\text{定义 } \mu_{1,2} = |1 - \gamma_{1,2}| \text{ 为两通道的模糊系数, } \gamma_1 = a_{11}/a_{12} = \exp[j\pi \cdot k_r \cdot (\Delta t_1)^2] \cdot \exp[-j2\pi/\lambda \cdot (\Delta t_1) \cdot c], \quad \gamma_2 = a_{22}/a_{21} =$$

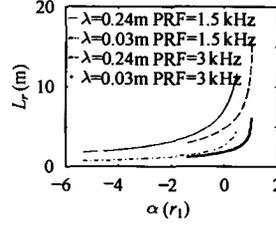


图2 最佳天线间距

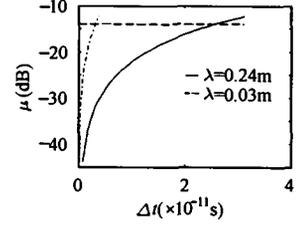


图3 不同波段的模糊比

$\exp[-j\pi \cdot k_r \cdot (\Delta t_2)^2] \cdot \exp[-j(2\pi/\lambda) \cdot (\Delta t_2) \cdot c]$, 其中 $\Delta t_1 = \Delta t_{11} - \Delta t_{12}$, $\Delta t_2 = \Delta t_{21} - \Delta t_{22}$ 记为两通道的延时误差。一般地, $\exp[j\pi \cdot k_r \cdot (\Delta t_{1,2})^2]$ 影响较小可以忽略。当通道严格校准时, 即 $\Delta t_1 = \Delta t_{11} - \Delta t_{12} = 0$; $\Delta t_2 = \Delta t_{21} - \Delta t_{22} = 0$, 此时 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$, 则 $\mu_{1,2} = 0$, 表示无模糊, 当 $\Delta t_1 \neq 0$, $\Delta t_2 \neq 0$ 时说明反解后两个通道对应测绘带的回波数据中都存在着距离模糊。取实际数据计算延时误差造成的模糊比, 这里模糊比由 $10 \lg[\cdot]$ 转化为分贝。见图3, 可见波长越短对于延时误差限制越严格。更直观地, 不同模糊系数下的距离向多孔径实际成像的结果如下图4, 图中的分布目标 A, B 位于不同的子测绘带。

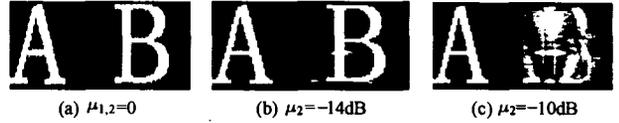


图4 第二通道不同模糊系数下的成像结果

4 实际应用中造成成像误差的各种因素

基于上述分析可知任何能够造成通道非一致性延时误差的一般性误差对于距离向多孔径成像都会造成严重的距离模糊, 在实际应用中产生通道延时 Δt 的各种因素如下:

4.1 高度向目标

当在测绘带高空存在目标时, 如高楼, 高山, 飞机等, 成像后会产生高度向模糊。如图5, 位于高度向上的目标点 P_2 点与天线 A_1 的法线的夹角发生变化, 记为 α'_2 , 此时 $\alpha'_2 = \psi + \alpha_2$, 这一角度误差会造成回波的延时误差:

$$\Delta t_2 = \frac{L_r \cdot |\sin(\alpha'_2) - \sin(\alpha_1)|}{c} = \frac{L_r \cdot |\sin(\psi + \alpha_2) - \sin(\alpha_1)|}{c}.$$

$$\text{其中 } \psi = \arcsin\left[\frac{H - \frac{L_r}{2} \sin(\varphi)}{R_0 + \frac{c}{2\text{PRF}}}\right] - \arcsin\left[\frac{H - \frac{L_r}{2} \sin(\varphi) - h_e}{R_0 + \frac{c}{2\text{PRF}}}\right]$$

则模糊系数为

$$\mu_2 = \left| 1 - \exp\left[j\frac{2\pi \cdot L_r \cdot |\sin(\psi + \alpha_2) - \sin(\alpha_1)|}{\lambda}\right] \right| \quad (10)$$

由式(10)可知, 模糊系数还与 L_r/λ 有关, $L_r/\lambda = 1/\beta_0$, 可见高度 h 越大, 子天线的距离向波束张角越大, 则模糊系数越大。实际雷达参数如表1, 计算结果见图6。

表1 雷达参数

波段	B(MHz)	$\phi(^{\circ})$	PRF(Hz)	$R_0(m)$	H(m)	T(μs)	$L_r(m)$	β_0
L 波段	30	45	3000	848,000	600, 00	30	1	4.17
X 波段	30	45	3000	848,000	600, 00	30	0.135	4.50

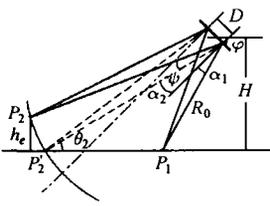


图5 高度向目标示意图

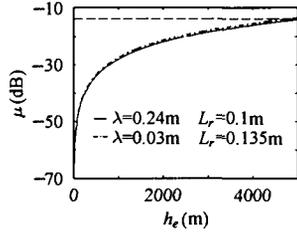


图6 高度向目标造成的模糊系数

4.2 方位向目标

如图7, 在同一个距离门不同方位向的点目标 P_2 也会如 P'_2 一样与第一测绘带的 P_1 点混叠。 P_2 与 P'_2 位置不同使得叠加矩阵发生变化, 那么当用 P'_2 对应的反解矩阵分离 P_2 与 P_1 混叠的回波时就会产生误差。

由上图的几何关系可知:

$$\Delta t_2 = \frac{(R'_{22} - R_{22})}{c} \approx \frac{L_r \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\phi \cdot [1 - \cos(\beta/\cos\theta_2)]}{c}, \text{ 则有}$$

$$\mu_2 = \left| 1 - \exp \left\{ -j \frac{2\pi L_r}{\lambda} \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\phi \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\beta}{\cos\theta_2}\right) \right] \right\} \right| \quad (11)$$

由式(11)可知, 方位向偏角 β 越大, 子天线的距离向波束张角 β_0 越大, 则模糊系数越大, 取实际参数计算结果如图8。

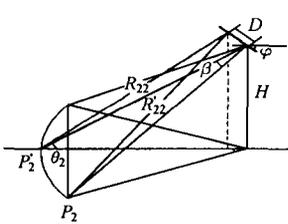


图7 方位向目标示意图

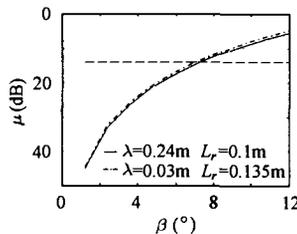


图8 方位向目标造成的模糊系数

4.3 大气影响

大气会影响回波的传播距离和入射角。由于两天线距离很近, 可以认为大气对两子天线回波的传播距离影响相同。这里只讨论大气折射的影响, 大气折射可以分为距离向折射和方位向折射, 其中距离向折射对叠加矩阵的影响更明显, 下面给出距离向折射而引起的模糊比分析。

设大气折射产生的两测绘带回波的角度偏差分别为 δ_1, δ_2 , 如图9, 则两通道的延时误差分别为

$$\Delta t_1 = \frac{L_r \cdot [\sin(\alpha_1 - \delta_1) - \sin(\alpha_1)]}{c}, \Delta t_2 = \frac{L_r \cdot [\sin(\alpha_2 - \delta_2) - \sin(\alpha_2)]}{c}$$

则模糊系数分别为

$$\mu_{1,2} = \left| 1 - \exp \left\{ -j \frac{2\pi L_r \cdot [\sin(\alpha_{1,2} - \delta_{1,2}) - \sin(\alpha_{1,2})]}{\lambda} \right\} \right| \quad (12)$$

实际计算结果如图10, 可见距离向多孔径成像对大气折射角度的限制非常严格, 必须依据当时当地的大气折射参数对反解矩阵进行修正。

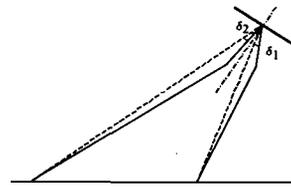


图9 大气折射影响示意图

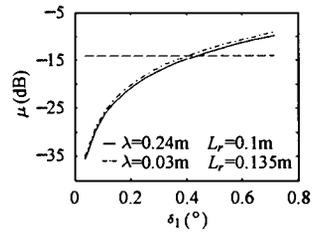


图10 大气折射造成的模糊比

4.4 天线姿态(角度)误差

天线姿态的误差包括正交的3个方向的旋转误差, 绕平台运动方向的旋转, 称为横滚; 绕垂直于轨道方向的旋转, 称为俯仰; 绕铅垂方向旋转, 称为偏航。下面分别分析3种天线姿态误差对距离向多孔径成像处理造成的影响。

(a) 当天线横滚时, 如图11所示, 天线横滚会造成目标到天线相位中心的斜距与天线法线的夹角的偏差, $\alpha'_1 = \alpha_1 \pm \theta_x$, 同理 $\alpha'_2 = \alpha_2 \pm \theta_x$, 由此造成的通道延时分别为

$$\Delta t_1 = \frac{L_r \cdot \sin(\alpha_1 \pm \theta_x) - L_r \cdot \sin(\alpha_1)}{c}, \Delta t_2 = \frac{L_r \cdot \sin(\alpha_2 \pm \theta_x) - L_r \cdot \sin(\alpha_2)}{c}$$

则两通道的模糊系数为

$$\mu_{1,2} = \left| 1 - \exp \left\{ -j \frac{2\pi L_r \cdot [\sin(\alpha_{1,2} \pm \theta_x) - \sin(\alpha_{1,2})]}{\lambda} \right\} \right| \quad (13)$$

天线横滚与大气折射造成模糊系数计算公式相同, 原因都是目标到天线相位中心的斜距与天线法线的夹角发生偏差。由图10可知反解处理对天线绕平台运动方向的旋转误差限制非常严格, 如在文中选定的参数下, $\theta_x < 0.4^{\circ}$ 。

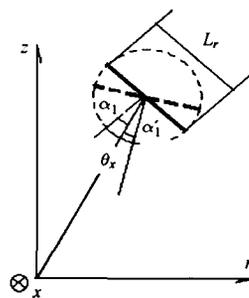


图11 天线横滚示意图

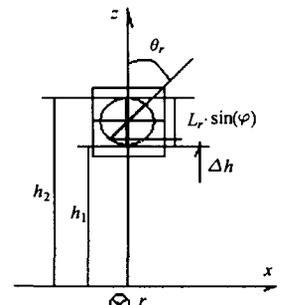


图12 天线俯仰示意图

(b) 当天线俯仰时, 如图 12, $\theta_r \neq 0$ 产生高度的偏差:

$$\Delta h = \frac{L_r \cdot \sin(\varphi) \cdot [1 - \cos(\theta_r)]}{2}, \text{ 因而导致延时误差的产生:}$$

$$(R'_{21})^2 - (R_{21})^2 = (h_1 + \Delta h)^2 - (h_1)^2 \approx 2\Delta h \cdot h_1 \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{R_{12} - R_{11}}{c}$$

$$\approx \frac{2\Delta h \cdot h_1}{2c \cdot R_{11}} \approx \frac{\Delta h \cdot \sin(\theta_1)}{c}, \text{ 同理, } \Delta t_2 \approx \frac{\Delta h \cdot \sin(\theta_2)}{c}, \text{ 则模糊比}$$

为

$$\mu_{1,2} = \left| 1 - \exp \left\{ -j \frac{\pi L_r \cdot \sin(\varphi) \cdot [1 - \cos(\theta_r)] \cdot \sin(\theta_{1,2})}{\lambda} \right\} \right| \quad (14)$$

其中 θ_1, θ_2 为两测绘带内对应目标的擦地角。 $\theta_2 < \theta_1 \Rightarrow \Delta t_2 < \Delta t_1$, 所以只分析第一通道的模糊系数即可。实际计算结果如图 13 所示。

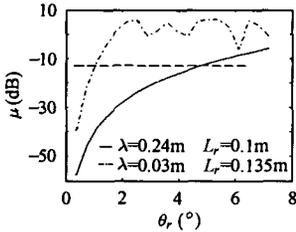


图 13 天线俯仰引起的模糊比

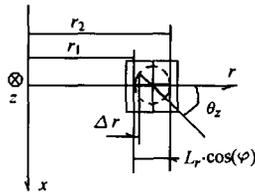


图 14 天线偏航示意图

(c) 当天线偏航时如图 14 所示, 由于 $\theta_z \neq 0$, 导致地距偏差: $\Delta r = [L_r \cdot \cos(\varphi) \cdot (1 - \cos(\theta_z))]/2$, 此时延时误差为 $(R'_{21})^2 - (R_{21})^2 = (r_1 + \Delta r)^2 - (r_1)^2 \approx 2\Delta r \cdot r_1 \Rightarrow \Delta t_1 = (R_{12} - R_{11})/c \approx (2\Delta r \cdot r_1)/(2c \cdot R_{11}) \approx \Delta r \cdot \cos(\theta_1)$, 同理 $\Delta t_2 \approx \Delta r \cdot \cos(\theta_2)$, 则模糊系数为

$$\mu_{1,2} = \left| 1 - \exp \left\{ -j \frac{\pi L_r \cdot \cos(\varphi) \cdot [1 - \cos(\theta_z)] \cdot \cos(\theta_{1,2})}{\lambda} \right\} \right| \quad (15)$$

由于 $\theta_2 < \theta_1 \Rightarrow \Delta t_2 > \Delta t_1$, 只需分析第二通道的模糊系数即可。比较式(14), 式(15), 显然, 偏航引起的模糊比小于由天线俯仰而产生的模糊比, 因此在系统设计时只考虑天线俯仰造成的误差即可。

基于上述对各种因素造成距离向多孔径成像误差的分析, 可知任何造成两通道延时的误差都会不同程度地影响叠加矩阵, 当无视此影响时, 反解处理就会产生模糊, 模糊程度可用模糊系数来衡量:

$$u = \left| 1 - \exp \left[-j \frac{2\pi \cdot c \cdot \Delta t(h_e, \beta, \delta, \theta_x, \theta_r, \theta_z)}{\lambda} \right] \cdot \exp \left\{ j\pi k_r [\Delta t(h_e, \beta, \delta, \theta_x, \theta_r, \theta_z)]^2 \right\} \right| \quad (16)$$

其中 h_e 为高度向误差参数, β 为方位向误差参数, δ 为大气折射误差参数, θ_x 为天线横滚的误差参数, θ_r 为天线俯仰的误差参数, θ_z 为天线偏航的误差参数。

通过对大气折系数的监测, 可以估算大气折射造成的延时误差对反解矩阵进行修正。同样, 利用 IMU(惯性测量单元)或 INS(惯性导航系统)对天线的姿态变化的纪录, 则可以依据天线各个角度抖动引起的延时误差对反解矩阵进行修正, 则修正后的反解矩阵为

$$W''[h,l] = W[h,l] \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi \cdot c \cdot \Delta t(h_e, \beta, \delta, \theta_x, \theta_r, \theta_z)}{\lambda} \right] \cdot \exp \left\{ j\pi \cdot k_r [\Delta t(h_e, \beta, \delta, \theta_x, \theta_r, \theta_z)]^2 \right\} \quad (17)$$

5 结束语

通过距离向多孔径成像误差的成因分析可知, 反解处理前各通道引入的延时误差是距离模糊产生的本质。文中详细列举了实际成像中引入各通道延时误差的各种因素, 并给出了其造成成像误差程度的定量分析。从文中给出的各种误差因素的模糊系数计算结果发现, 距离向多孔径体制对天线横滚以及大气折射误差限制最为严格, 因而对天线姿态的稳定度(或 IMU, INS 的重建载体三维运动的精度)和大气的状况监测提出了特殊的要求。最后文章给出了针对各种误差因素的影响而修正的反解矩阵, 通过该反解矩阵的成像处理, 混叠的回波可获得更好的分离效果。

参考文献

- [1] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR. *IEE Proc.-F*, 1992, 139(2): 122 - 135.
- [2] Callaghan G D, Longstaff I D. Wide-swath space-born SAR using a quad-element array. *IEE Proc.-F* 1999, 146(3): 159 - 165.
- [3] Griffiths H D, Mancini P. Ambiguity suppression in SARs using adaptive array techniques. *Proceedings of IGARSS'91 Symp. Helsinki*, 1991: 1015 - 1018.
- [4] 王小青, 郭琨毅, 盛新庆, 朱敏慧. 距离向多孔径接收宽测绘带 SAR 成像方法的研究. *电子与信息学报*, 2004, 26(5): 739 - 745.

郭琨毅: 女, 1976 年生, 博士生, 研究方向为微波成像新体制及仿真技术。

王小青: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理。

盛新庆: 男, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为计算电磁学和微波遥感。