

合成孔径雷达模糊度分析¹

张永军 李彩萍

(北京市遥感信息研究所 北京 100011)

摘要: 该文分析了合成孔径雷达 (SAR) 的模糊度问题及其对图像质量的影响, 详细描述了模糊度的表达式, 分析了不同系统参数对模糊度的影响, 对所谓的重影现象作了定量分析。

关键词: 合成孔径雷达 (SAR), 模糊度, 重影

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1455-06

Analysis of Synthetic Aperture Radar Ambiguities

Zhang Yong-jun Li Cai-ping

(Beijing Remote Sensing Information Institute, Beijing 100011, China)

Abstract This paper analyzes ambiguities in Synthetic Aperture Radar(SAR) and its impact on the image quality. The definition of ambiguities is described in detail. The influence of system parameters on ambiguities is analyzed and the relationship between "ghost" and system parameters is given.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Ambiguity, "Ghost"

1 引言

模糊度作为衡量合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 图像模糊程度的指标, 越来越受到 SAR 图像应用部门和系统设计人员的重视。SAR 图像的模糊是来自观察区域外的回波信号对观察区域回波信号的干扰, 造成图像质量下降, 甚至出现所谓的“重影”现象, 给 SAR 图像应用造成困难。模糊问题是 SAR 工程设计中要解决的一个重要问题, 特别是在星载 SAR 设计中模糊的问题更为重要。文献 [1-3] 研究星载 SAR 的模糊问题, 给出了星载 SAR 设计中应该注意的原则, 并给出了模糊的度量指标 (模糊度) 的定义和计算方法, 文献 [4] 给出了一种用滤波处理的方法抑制模糊信号。本文研究了 SAR 模糊的来源、性质、定义和计算方法, 分析了模糊对图像质量的影响以及模糊的 SAR 图像特征。

2 模糊度与图像质量

SAR 图像的模糊是来自观察区域外的回波信号对观察区域回波信号的干扰, 根据其干扰信号来源不同又可分为距离模糊和方位模糊^[5], 距离模糊主要是由于雷达发射脉冲的重复频率过高引起的。这主要是在观察带内有有用回波信号与前一个发射脉冲的回波信号或后一个发射脉冲的回波信号在时间上重叠造成对当次发射脉冲回波信号的干扰, 从模糊度的定义上讲, 所有非当次发射脉冲的回波信号都是模糊信号 (包括星下点回波), 图 1 示出了前一个脉冲回波信号产生的模糊信号的几何关系示意图。

方位向模糊是由于发射脉冲的重复频率 (PRF) 过低, 回波信号的多普勒频谱欠采样引起的。图 2 示出了方位向模糊的频谱关系图。SAR 回波信号的方位多普勒频谱是被天线的双程

¹ 2003-03-24 收到, 2003-11-20 改回

方位方向图加权的，并且用发射脉冲的重复频率来采样的。高于脉冲重复频率的多普勒信号频谱将折叠到位于方位频谱部分的处理带之内，从而造成与主信号频谱的混叠。

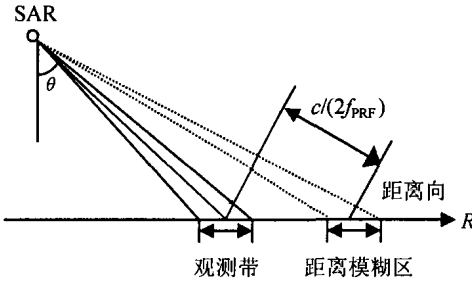


图1 距离向模糊产生示意图

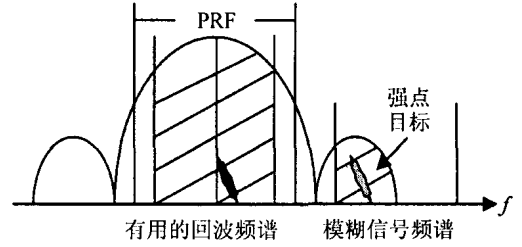


图2 方位向模糊产生示意图

二维模糊度 ASR 的定义为 [5,6]

$$ASR(\tau) = \frac{\sum_{m,n \neq 0} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f + mf_p, \tau + n/f_p) df}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f, \tau) df} \tag{1}$$

其中 B_p 是处理的回波信号多普勒频率带宽， $S(f, \tau)$ 是回波信号强度， f 是回波信号的多普勒频率， f_p 是发射脉冲重复频率，由式 (1) 定义可知，模糊度 ASR 还是脉冲回波时间 τ 的函数，也就是说，对于观测带内的不同时间分辨单元，其模糊度是不同的 [6]。

在式 (1) 定义的基础上可分别定义方位向模糊度和距离向模糊度，根据文献 [5] 的方位向模糊度定义，我们给出其方位向模糊度的表达式为

$$\begin{aligned} AASR(\tau) &= \frac{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m \neq 0} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f + mf_p, \tau + n/f_p) df}{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f, \tau + n/f_p) df} \\ &\approx \frac{\sum_{m=-\infty, m \neq 0}^{+\infty} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f + mf_p, \tau) df}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f, \tau) df} \end{aligned} \tag{2}$$

同样可获得距离向模糊度为

$$\begin{aligned} RASR(\tau) &= \frac{\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n \neq 0} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f + mf_p, \tau + n/f_p) df}{\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f + mf_p, \tau) df} \\ &\approx \frac{\sum_{n=-\infty, n \neq 0}^{+\infty} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f, \tau + n/f_p) df}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} S(f, \tau) df} \end{aligned} \tag{3}$$

文献 [1] 根据雷达方程, 给出了 $S(f, \tau)$ 的计算由下式确定

$$S(f, \tau) = kG^2(f, \tau) \cdot \sigma_0(f, \tau) / [R^4(f, \tau)] \quad (4)$$

其中 k 是与系统参数有关的常数, $G(f, \tau)$ 是天线方向图, σ_0 是发射脉冲信号照射区域的地物后向散射系数, $R(f, \tau)$ 是雷达到照射区域的距离。

文献 [3] 给出了 $S(f, \tau)$ 的计算由下式确定:

$$S(f, \tau) = k_0 G^2(f, \tau) \cdot \sigma_0(f, \tau) / [R^3(f, \tau)] \quad (5)$$

其中 k_0 是与系统参数和成像处理有关的常数。为了便于分析和比较, 本文对原文中的式 (4) 和式 (5) 作了适当的修改, 目的是要强调, 在式 (4) 中回波信号强度 $S(f, \tau)$ 与距离 $R(f, \tau)$ 的 4 次方成反比, 而在式 (5) 中回波信号强度 $S(f, \tau)$ 与距离 $R(f, \tau)$ 的 3 次方成反比。

式 (4) 中是雷达接收到的有用信号和模糊信号功率之比计算的, 没有考虑成像处理的影响, 其比值与成像处理后图像信号和模糊信号功率之比是不同, 本文将分析这种不同的程度与系统的参数和图像质量指标有关系, 也就是说, 式 (4) 定义的模糊度并不能准确反映模糊信号对图像信号的污染程度。

式 (5) 中定义的模糊度是假设成像处理后有用信号和模糊信号在方位向聚焦后的结果, 事实上在实际系统中并非如此, 成像处理对有用信号和模糊信号聚焦的情况是不同的, 本文将给出其详细的分析结果。

3 模糊度与重影

SAR 成像处理在距离向主要由线性调频信号进行压缩获得高的距离分辨率, 而在方位向是利用目标相对于雷达运动的多普勒频率进行压缩获得高的方位向分辨率。距离向线性调频压缩对有用信号和模糊信号基本上是一样的, 不同目标的不同多普勒频率特性相对来说对距离压缩的影响不大。由于方位向压缩是利用目标相对于雷达运动的多普勒频率, 不同目标的不同多普勒频率特性对方位向压缩效果的影响非常之大, 甚至会出现模糊信号区域内的目标不能在其真实空间位置上实现方位向压缩, 从而出现重影。

方位向压缩主要由多普勒中心频率 f_{DC} 和多普勒调频率 f_{DR} 两个参数确定, 多普勒中心频率和多普勒调频率具有如下表达式^[5],

$$f_{DC} = 2\mathbf{V} \cdot \mathbf{R} / (\lambda |\mathbf{R}|) \quad (6)$$

$$f_{DR} = 2(|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R}) / (\lambda |\mathbf{R}|) \approx 2v^2 / (\lambda R) \quad (7)$$

其中 ‘ \cdot ’ 表示两矢量点积; \mathbf{R} , \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 分别表示卫星与波束中心点目标 A 的相对位置矢量、速度矢量和加速度矢量, λ 为雷达发射信号波长, v, R 为 \mathbf{V}, \mathbf{R} 的模。

在式 (7) 中括号里的两项第 1 项远大于第 2 项, 在分析位置误差的影响时, 忽略第 2 项。在此条件下分别对式 (7) 求 \mathbf{R} 的偏微分, 可得到如下误差表示式:

$$\Delta f_{DR} \approx -[2v^2 / (\lambda R^2)] \Delta R = -f_{DR} \Delta R / R \quad (8)$$

其中 ΔR 是有用信号回波目标和模糊信号回波目标到雷达的距离差。

对于距离模糊区的目标, 这一距离差比较大, 导致模糊区的回波信号很难在有用信号聚焦的同时实现聚焦, 对于高分辨率的 SAR 图像更是如此。对于方位模糊区的目标, 这一距离差比较小, 往往在有用信号聚焦的同时也实现了模糊区的回波信号的聚焦, 这就是所谓的“重影”现象。

由多普勒调频率与二次相位误差的关系式,可以得到多普勒调频率误差 Δf_{DR} 引起的二次相位误差 $\Delta\varphi(t)$ 项可表示为

$$\Delta\varphi(t) = \pi\Delta f_{DR}t^2 \quad (9)$$

由 SAR 原理很容易得到合成孔径时间 T 与波长 λ , 距离 R , 卫星速度 v 和方位向分辨率 ρ_a 具有如下关系:

$$T = \lambda R / (2v\rho_a) \quad (10)$$

将式 (10) 和式 (8) 代入式 (9), 并注意到在 $t = T/2$ 处二次相位误差最大, 可得到

$$\Delta\varphi(t) = -\pi\lambda\Delta R / (8\rho_a^2) \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出相对于聚焦图像, 模糊信号的二次相位误差与波长 λ , 距离差 ΔR 和方位向分辨率 ρ_a 有关, 距离向模糊信号与有用信号最少相差了一个 f_p 距离, 由此引起的二次相位误差为

$$\Delta\varphi(t) = -\pi\lambda c / (16f_p\rho_a^2) \quad (12)$$

其中 c 为电磁波传输速度, 因此距离向模糊信号难以实现方位向的距离向模糊信号聚焦。

方位向多普勒频率为

$$f_D = (2v/\lambda) \sin(\theta) \approx (2v\theta/\lambda) \quad (13)$$

其中 θ 为在成像平面内回波信号方向与卫星飞行垂直方向的直线的夹角。

由此可得, 当 $f_D = f_p$ 时 (方位向第一个模糊区中心), 可以推导出距离差 ΔR 为

$$\Delta R = \lambda^2 f_p^2 R / (8v^2) \quad (14)$$

若要把二次相位误差控制在 $\pi/2$ 范围内, 将式 (14) 代入式 (8), 再代入式 (9), 可得模糊信号的有效合成时间 T_a 为

$$T_a = 4v / (\lambda f_p f_{DR}^{1/2}) \quad (15)$$

将式 (7) 代入式 (15) 得到

$$T_a = (4/f_p) [R/(2\lambda)]^{1/2} \quad (16)$$

另一限制模糊信号有效合成时间的因素是模糊区与成像区域的距离走动不一致, 主要因为模糊区与成像区域的多普勒中心频率相差

$$\Delta f_{DC} = n f_p \quad (17)$$

其中 $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 为相对于有用信号回波区域的第 n 个方位向模糊区。

由此产生的距离走动量为

$$\Delta R(t) = (\lambda/2) \Delta f_{DC} t \quad (18)$$

要使模糊信号能够聚焦, 其距离走动量不能超过一个距离分辨单元 ρ_r , 则有效合成时间 T_w 不能超过

$$T_w = 2\rho_r / (n\lambda f_p) \quad (19)$$

比较式 (14) 和式 (19), 在 $R > \rho_r^2/2\lambda$ 的条件下, 模糊信号的有效合成时间主要受式 (19) 的影响, 比较式 (10) 和式 (19), 模糊信号的有效合成时间与有用信号的合成孔径时间之比为

$$(T_w/T) = 4v\rho_a\rho_r / (n\lambda^2 f_p R) \quad (20)$$

由于方位向分辨率与合成孔径时间成正比，将式 (20) 改写一下，可得模糊图像的分辨率为

$$\rho_m = (T/T_w)\rho_a = n\lambda^2 f_p R / (4v\rho_r) \tag{21}$$

式 (21) 成立的条件是 $T_w \leq T$ ，当 $T_w \geq T$ 时，取 $T_w = T$ ，因此，模糊信号的方位向分辨率与波长的平方成正比，与图像距离向分辨率成反比。所以，对于高分辨率或波长比较长的 SAR 模糊信号，在方位向聚焦比较差一些，模糊信号不能聚焦还使得相应的图像幅度也降低。取 $n = 1$ ， $R = 870 \text{ km}$ ， $f_p = 1600 \text{ kHz}$ ， $v = 7.9 \text{ km/s}$ 可得模糊图像的分辨率随有用图像分辨率和雷达发射波长的变化结果。如表 1 所示，当 $\lambda = 0.235 \text{ m}$ ， $\rho_r = 25 \text{ m}$ 时，就是 Seasat 雷达卫星的结果。由表 1 可以看出在距离向分辨率较低、波长比较短的情况下，容易形成模糊图像，模糊图像与真实图像相差一个脉冲重复频率 f_p ，由式 (13) 可知，模糊图像与真实图像在方位向的距离与波长成反比。模糊图像与真实图像在方位向和距离向的位置误差分别为 [5]

$$\Delta R_{RA} = (n\lambda f_p / f_{DR}) [f_{DC} + n f_p / 2] \tag{22}$$

$$\Delta R_{AZ} = n f_p v / f_{DR} \tag{23}$$

其中 ΔR_{RA} ， ΔR_{AZ} 分别为模糊图像与真实图像在方位向和距离向的位置误差。

图 3 给出了具有方位向模糊图像的 Seasat 雷达卫星图像，模糊图像与真实图像在方位向和距离向的位置误差分别为 23km 和 0.2km。

表 1 模糊图像分辨率随有用图像分辨率的变化

$\rho_r(\text{m})$	50	25	15	9	5	1
$\lambda=0.057\text{m}$	$\rho_m(\text{m})$ 50	25	15	15.6	28	141
$\lambda=0.235\text{m}$	$\rho_m(\text{m})$ 50	97	162	270	487	2432

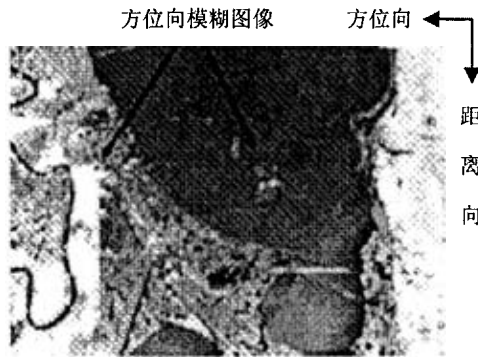


图 3 具有方位向模糊图像的 Seasat 图像

4 结论

本文研究了 SAR 模糊性的来源、性质、定义和计算方法，分析了不同系统参数的模糊图像聚焦特性，给出了相关定量表达式，分析表明：对于距离模糊，模糊区的回波信号很难在有用信号聚焦的同时实现聚焦，而对于方位模糊，模糊区的回波信号的聚焦特性与方位向分辨率和雷达发射信号的波长等参数有关，模糊图像的方位向分辨率与波长的平方成正比，与图像方位向分辨率成反比，所以，对于高分辨率或波长比较长的 SAR 模糊信号，在方位向聚焦比较差一些。

参 考 文 献

- [1] Li F K, *et al.*. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar systems. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1983, 19(3): 389-395.
- [2] Barbarossa S, Levrini G. An antenna pattern synthesis technique for spaceborne SAR performance optimization. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(2): 254-259.
- [3] Miller D. X-SAR specification, design and performance modeling. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(2): 170-176.
- [4] Moreira A. Suppressing the azimuth ambiguities in synthetic aperture radar images. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(4): 885-895.
- [5] Curlander J C, McDonough R H. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing. New York: John Wiley&Sons, Inc. 1991: 182-309.
- [6] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社, 2003: 156-186.

张永军: 男, 1960 年生, 研究员, 主要研究方向: 星载合成孔径雷达系统及其信息处理.

李彩萍: 女, 1975 年生, 工程师, 主要研究方向: 星载合成孔径雷达系统及其信息处理.