

基于分辨椭圆的前斜 SAR 分辨率分析方法

龙 杰¹, 姚 迪¹, 孙英钦², 田卫明¹

(1. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 俯冲前斜 SAR (Synthetic Aperture Radar, SAR) 具有各方向分辨特性非均匀的特点, 传统的合成孔径雷达分辨率描述方法具有一定的局限性, 不适用于俯冲前斜 SAR 的分辨率分析. 为了完备地描述前斜 SAR 系统的分辨率特性, 提出了一种基于分辨椭圆的前斜 SAR 分辨率分析方法, 采用广义模糊函数推导了前斜 SAR 斜平面和地平面分辨椭圆的表达式. 仿真结果表明: 该方法可以适应 SAR 系统不同的几何构型和系统参数条件, 为前斜 SAR 系统的参数设计和几何构型配置提供了理论依据.

关键词: SAR; 分辨椭圆; 广义模糊函数

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 12-2493-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.027

The Method of Resolution Analysis Based on Distinguishable Ellipse in Squinted SAR

LONG Jie¹, YAO Di¹, SUN Ying-qin², TIAN Wei-ming¹

(1. School of Information & Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The diving squinted SAR (Synthetic Aperture Radar, SAR) has the feature of non-uniform resolution in different direction. The resolution description is seriously restricted in the traditional SAR, which is not applied to the analysis of resolution in the diving squinted SAR. In order to illustrate a complete description of the resolution characteristics, a method of resolution analysis of squinted SAR based on distinguishable ellipse is presented. The expression of distinguishable ellipse on the slant and ground plane is derived respectively by GAF (Generalized Ambiguity Function, GAF). The simulation results show that this method is adaptive to the conditions of different geometry and system parameters, which can provide a theoretical basis for the design of system parameters and geometry configuration in squinted SAR.

Key words: SAR (Synthetic Aperture Radar); distinguishable ellipse; GAF (Generalized Ambiguity Function)

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 作为一种雷达成像传感器, 可以全天候、全天时产生二维高分辨图像信息. 在传统的正侧视条带 SAR 成像系统中^[1~3], 点目标冲击响应的形式对应为两个正交辛格函数的乘积, 根据瑞利分辨率的定义可知, SAR 图像的分辨区域对应于目标峰值点功率衰减 4dB 的等值线. 在二维分辨率相等的条件下, SAR 分辨率特性近似表征为一个等分辨率圆域, 它具备各向均匀性, 因此 SAR 成像系统中通常只需要距离向和方位向分辨率就能完备描述.

但是在前斜 SAR 成像系统中^[4~6], 点目标冲击响应对应的二维旁瓣方向不再正交, 分辨率特性近似演变

为一个椭圆, 具备各向非均匀性. 并且分辨椭圆的长轴和短轴不一定对应 SAR 系统定义的距离向和方位向, 因此传统的分辨率描述方法受到一定的限制, 需要采用分辨椭圆的描述方法完备地表征前斜 SAR 系统的分辨率特性.

2 前斜 SAR 分辨椭圆分析

2.1 SAR 广义模糊函数

传统的雷达模糊函数 (Ambiguity Function, AF) 表示为时延和多普勒频率的函数, 用于分析不同信号波形对距离和多普勒频率的分辨能力. 对于 SAR 系统而言, 模糊函数可以表示为地面点目标相对位置的函数^[7], 文献 [8] 提出用广义模糊函数 (Generalized Ambiguity Function,

GAF)对 SAR 距离和方位分辨率进行分析,文献[9]从数学角度通过对电磁波的传播模型和点扩展函数(PSF)的相干积累来描述 GAF,并分析了传统条带侧视 SAR 的距离和方位分辨率.文献[10]利用 GAF 分析了双基地 SAR 的分辨特性和典型双基地 SAR 的系统特性.

前斜 SAR 系统的空间几何构型如图 1 所示, xoz 为目标区域所在的平面, SAR 载体在目标平面的投影点位于坐标原点 o , 载体速度矢量 \mathbf{V} 在目标平面的投影为 x 轴正方向, 速度矢量与 x 轴构成的平面且垂直于 x 轴向上的方向为 y 轴正方向, z 轴符合右手规则. 其中, \mathbf{U} 为中心时刻雷达载体与目标相对位置的矢量; 前斜角 θ 为速度矢量与目标视线方向的夹角; 俯冲角 α 为速度矢量与目标平面的夹角; 俯仰角 β 为目标视线方向与目标平面的夹角; 方位角 φ 为前斜角在目标平面的投影角.

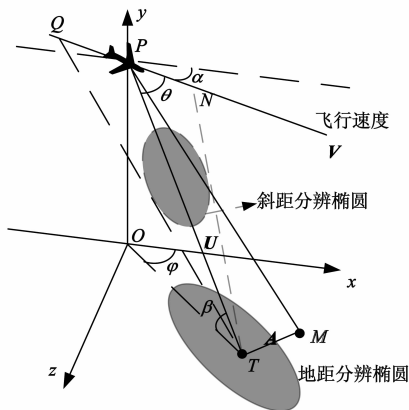


图1 前斜SAR系统几何构型

设发射信号为 $x(t)$, 假定它为窄带信号, 则其傅里叶变换可以表示为:

$$X(f) = \begin{cases} E_a, f_c - B_r/2 < f < f_c + B_r/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_a 为信号频谱的幅度; B_r 为信号带宽; f_c 为中心频率, 且满足 $B_r \ll f_c$.

设雷达载体的合成孔径时间为 T_a , 则在任意时刻 s 雷达载体与目标的位置矢量可以表示为:

$$\mathbf{R}(s) = \mathbf{U} + s\mathbf{V}, \quad -T_a/2 \leq s \leq T_a/2 \quad (2)$$

按照 SAR 载体“stop and go”的假设, SAR 回波信号可以表示为发射信号 $x(t)$ 的延迟:

$$h(t, s) = x\left(t - \frac{2|\mathbf{R}(s)|}{c}\right) \quad (3)$$

其中, c 为光速. 我们假设目标区域比较小, 可以近似认为 SAR 系统具备空不变特性. 选取目标区域 xoz 中一点 T 作为参考点, 该参考向量记为 $\mathbf{P}_T = (x_0, y_0, z_0)$, 设另一目标点 M 的位置矢量 $\mathbf{P}_M = (x, y, z)$, 这里定义广义模糊函数为目标回波信号与参考点回波信号的互相关

函数, 则 SAR 系统的广义模糊函数^[10]可以表示为:

$$\chi(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_A(t, s) h_0^*(t, s) dt ds \quad (4)$$

其中, 参考点 T 和目标点 M 的回波信号分别为:

$$h_0(t, s) = x\left(t - \frac{2|\mathbf{R}_0(s)|}{c}\right) \quad (5)$$

$$h_A(t, s) = x\left(t - \frac{2|\mathbf{R}_0(s) + \mathbf{A}|}{c}\right) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{A} = (x - x_0, y - y_0, z - z_0)^T$, $\mathbf{R}_0(s)$ 为任意时刻 s 雷达载体与参考点 T 之间的距离矢量, 根据帕萨瓦尔定理, GAF 可以表示为:

$$\chi(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) X^*(f) \exp\left(-j \frac{4\pi f}{c} (|\mathbf{R}_0(s) + \mathbf{A}| - |\mathbf{R}_0(s)|)\right) df ds \quad (7)$$

设 $\mu(s) = \frac{4\pi f}{c} (|\mathbf{R}_0(s) + \mathbf{A}| - |\mathbf{R}_0(s)|)$, 由于合成孔径比较小, 将 $\mu(s)$ 在 $s=0$ 处二阶泰勒展开, 可以得到:

$$\chi(x, y, z) = E_a^2 \int_{f_c - B_r/2}^{f_c + B_r/2} \int_{-T_a/2}^{T_a/2} \exp\left(-j(\mu(0) + \mu^{(1)}(0)s + \frac{1}{2}\mu^{(2)}(0)s^2)\right) df ds \quad (8)$$

设中心时刻雷达载体与参考点 T 的相对距离为 r , 当 $|\mathbf{V}T_a| \ll r$, $B_r \ll f_c$ 时, 对式(8)进行积分, 可以得到 GAF 为:

$$\chi(x, y, z) = E_a^2 B_r T_a \text{sinc}\left(\frac{2\pi B_r \Phi^T \mathbf{A}}{c}\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi T_a \omega \mathbf{H}^T \mathbf{A}}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi \Phi^T \mathbf{A}}{\lambda}\right) \quad (9)$$

其中, $\lambda = c/f_c$, $\Phi = \mathbf{U}/r$, $\omega = |\mathbf{V}|/r$, $\omega \mathbf{H}^T = \mathbf{V}^T \cdot (\mathbf{I} - \Phi \Phi^T)/r$, \mathbf{I} 表示单位矩阵. 根据瑞利分辨率定义为峰值点与第一零点之间的距离, 我们可以得到, 峰值点两侧衰减 4dB 位置间的距离即为分辨率, 则分辨率的边界曲线可以表示为:

$$\frac{|\chi(x, y, z)|}{|\chi(x, y, z)|_{\max}} = \left| \text{sinc}\left(\frac{2\pi B_r \Phi^T \mathbf{A}}{c}\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi T_a \omega \mathbf{H}^T \mathbf{A}}{\lambda}\right) \right| = 0.631 \quad (10)$$

设向量 Φ 与 \mathbf{H} 构成的平面为斜平面, 容易知道 $\Phi \perp \mathbf{H}$, 其中向量 Φ 沿目标视线方向, 向量 \mathbf{H} 沿垂直目标视线方向. 并分别令 $x_\Phi = \Phi^T \mathbf{A}$, $y_H = \mathbf{H}^T \mathbf{A}$, 然后将式(10)二阶泰勒展开, 进行近似处理后可以得到斜距分辨椭圆为:

$$\frac{x_\Phi^2}{(\rho_r/2)^2} + \frac{y_H^2}{(\rho_a/2)^2} = 1 \quad (11)$$

其中, $\rho_r = c/2B_r$, $\rho_a = \lambda/2\omega T_a$, 它们分别表示 SAR

系统在斜平面上沿 Φ 和 H 两个方向的分辨率。

设 $\mathbf{A} = (\cos\gamma, \sin\gamma)$, 它为斜平面上任意的方向向量, 其中 γ 表示向量 \mathbf{A} 与 \mathbf{H} 之间的夹角, 那么根据式 (11) 可以得到斜平面上任意方向的分辨率为:

$$\rho_A = \frac{\rho_a \rho_r}{\sqrt{\rho_r^2 \cos^2 \phi + \rho_a^2 \sin^2 \phi}} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 在斜距平面内, 各方向的分辨率具备不均匀性, 距离旁瓣方向的分辨率沿目标视线方向, 只与信号带宽有关; 方位旁瓣方向的分辨率沿垂直视线方向, 只与目标相对转角有关, 而其它方向的分辨率由这两维分辨率和方向角 γ 共同决定。

2.2 SAR 地距分辨椭圆的推导

在 SAR 系统中, 通常将斜平面定义为 SAR 系统收集回波和成像的平面, 它对应速度向量和目标视线矢量构成的平面, 将地平面定义为目标区域所在的平面 (忽略地形起伏的影响), 它对应 SAR 图像几何校正处理后的结果。

根据图 1 所示的几何构型, 则有斜平面分辨椭圆上的任意向量可以表示为:

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{H}}{|\mathbf{H}|} \frac{\rho_a}{2} \cos\phi + \frac{\mathbf{U}}{|\mathbf{U}|} \frac{\rho_r}{2} \sin\phi \quad (13)$$

其中, ϕ 为参变量, 取值为 $\phi \in [0, 2\pi]$, 则地平面上的投影向量可以表示为:

$$\mathbf{\Omega} = \frac{1}{\cos\alpha \cos\beta \sin\varphi} (x\mathbf{i} + z\mathbf{k}) \quad (14)$$

其中, \mathbf{i} 和 \mathbf{k} 分别表示 x 轴和 z 轴方向的单位向量, 并且满足:

$$x = -(\sin\theta \cos\beta \sin\varphi) \frac{\rho_a}{2} \cos\phi - (\cos\theta \cos\beta \sin\varphi) \frac{\rho_r}{2} \sin\phi \quad (15)$$

$$z = (\sin\theta \cos\beta \cos\varphi) \frac{\rho_a}{2} \cos\phi + (\cos\theta \cos\beta \cos\varphi - \cos\alpha) \frac{\rho_r}{2} \sin\phi \quad (16)$$

令

$$\begin{cases} A = \frac{\rho_a}{2} \sin\theta \cos\beta \cos\varphi \\ B = \frac{\rho_r}{2} (\cos\theta \cos\beta \cos\varphi - \cos\alpha) \\ C = \frac{\rho_a}{2} \sin\theta \cos\beta \sin\varphi \\ D = \frac{\rho_r}{2} \cos\theta \cos\beta \sin\varphi \\ E = \frac{\rho_a \rho_r}{2} \sin\theta \cos\beta \sin\varphi \cos\alpha \end{cases} \quad (17)$$

联立式(15)和(16), 消去参数 ϕ , 则有地距分辨率的边界曲线满足如下方程:

$$(A^2 + B^2)x^2 + (C^2 + D^2)z^2 + 2(AC + BD)xz = E^2 \quad (18)$$

从式(18)可以看出, 地距分辨率的边界曲线表现形式如下:

(1) 当 $E = AD - BC = 0$ 时, 地距分辨率的边界曲线退化为直线, 此时 SAR 系统不具备二维分辨能力, SAR 载体的几何构型满足如下几种情况:

- (a) 第一种情况属于正前视工作模式 ($\theta = 0$);
- (b) 第二种情况属于下前视工作模式 ($\varphi = 0$);
- (c) 第三种情况属于下视工作模式 ($\beta = \pi/2$);
- (d) 第四种情况属于雷达载体垂直下降工作模式 ($\alpha = \pi/2$);

(2) 当 $E = AD - BC \neq 0$ 时, 地距分辨率的边界曲线表征为一个椭圆, 此时 SAR 系统具备二维分辨能力, 包括如下几种表现形式:

(a) 当 $AC + BD \neq 0$ 时, 地距分辨率的边界曲线表征为一个斜椭圆;

(b) 当 $AC + BD = 0$ 且 $A^2 + B^2 \neq C^2 + D^2$ 时, 地距分辨率的边界曲线表征为一个正椭圆; (例如: 当 $\rho_a = \rho_r$ 且 $\alpha = 0$, 或 $\theta = \pi/2$ 且 $\alpha = 0$, 即平飞模式, 斜距分辨率相等或平飞正侧视模式)

(c) 当 $AC + BD = 0$ 且 $A^2 + B^2 = C^2 + D^2$ 时, 地距分辨率的边界曲线表征为一个圆; (例如: 当 $\rho_r = \rho_a \cos\beta$ 且 $\alpha = 0$, $\theta = \pi/2$ 时, 即平飞正侧视, 且斜距分辨率满足约束条件)

下面重点研究条件(2)下地距分辨椭圆的特性, 以及不同的几何参数和系统参数对分辨椭圆特性的影响。

根据矩阵的性质, 式(18)也可以表示为:

$$\mathbf{W} \begin{bmatrix} A^2 + B^2 & AC + BD \\ AC + BD & C^2 + D^2 \end{bmatrix} \mathbf{W}^T = E^2 \quad (19)$$

其中: $\mathbf{W} = [xz]$, $[\cdot]^T$ 表示矩阵转置。

令 $\mathbf{Y}^T = [u \ v]^T = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \mathbf{W}^T$, 则有:

$$\mathbf{Y} \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \mathbf{Y}^T = E^2 \quad (20)$$

其中:

$$\tan 2\phi = \frac{2(AC + BD)}{A^2 + B^2 - C^2 - D^2} \quad (21)$$

$$G = \frac{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}{2} + \frac{\sqrt{(A^2 + B^2 - C^2 - D^2)^2 + 4(AC + BD)^2}}{2} \quad (22)$$

$$H = \frac{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}{2} - \frac{\sqrt{(A^2 + B^2 - C^2 - D^2)^2 + 4(AC + BD)^2}}{2} \quad (23)$$

根据式(14)和(20)可以得到地距分辨椭圆的长半

轴和短半轴分别为:

$$a = \frac{E}{\sqrt{H} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi} \quad (24)$$

$$b = \frac{E}{\sqrt{G} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi} \quad (25)$$

另外,根据斜平面点目标冲击响应的旁瓣扩展方向,可以得到地距方位向和距离向的旁瓣方向与 x 轴的夹角分别为:

$$\Theta_{Azimuth} = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (26)$$

$$\Theta_{Range} = \arccos\left(\frac{\cos \alpha - \cos \beta \cos \varphi \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \cos^2 \theta - 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \varphi \cos \theta}}\right) \quad (27)$$

根据方位向和距离向的旁瓣方向,代入分辨椭圆方程(20)可以得到地距分辨椭圆的旁瓣方向分辨率分别为:

$$\rho_{Azimuth} = \frac{\rho_a \sin \theta}{\cos \alpha \sin \varphi} \quad (28)$$

$$\rho_{Range} = \frac{\rho_r (2 \sin \alpha \sin \beta \cos \theta + \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \cos^2 \theta - 2 \cos^2 \theta)^{1/2}}{(\cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha \sin \beta \cos \theta + \cos^2 \beta + \sin^2 \theta - 2)^{1/2}} \quad (29)$$

从上面分析可以看出,点目标冲击响应的旁瓣扩展方向只与几何构型参数有关,当 SAR 几何构型一定时,旁瓣方向的分辨率只与各自对应方向的斜距分辨率有关,而其它方向的分辨率与两维斜距分辨率都有关系,两维分辨率之间存在一定的耦合。

若 $\rho_a = \rho_r$ 且 $\alpha = 0$,即斜距分辨率相等时,地距分辨率表征为一个正椭圆,可以得到:

$$(A^2 + B^2)x^2 + (C^2 + D^2)z^2 = E^2 \quad (30)$$

同样地,当 $\rho_r = \rho_a \cos \beta$ 且 $\alpha = 0, \theta = \pi/2$ 时,分辨椭圆表征了传统正侧视 SAR 的分辨率特性。

通过上面分析可以得出, SAR 地距图像的分辨率不仅与斜距分辨率有关,还与 SAR 系统的几何构型紧密相关,它们共同决定地距分辨椭圆的形状,以及长轴和短轴方向的分辨率。

3 仿真结果与分析

根据不同的系统参数和几何构型,采用 BP 成像算法^[11-13]对地距分辨椭圆的特性进行仿真分析, SAR 系统参数和几何构型参数分别如下表 1 和表 2 所示。

表 1 SAR 系统参数

系统参数	值
波长	0.03m
信号带宽	50MHz
飞行速度	100m/s
高度	3km
作用距离	10km

表 2 不同几何构型下的参数表

工作模式	α	θ	ρ_a
正侧视 1	0°	90°	3m
前斜视 1	0°	20°	3m
俯冲前斜视	15°	20°	3m
正侧视 2	0°	90°	5m
前斜视 2	0°	20°	5m

(1)在保持斜距分辨率不变的条件下,当几何构型参数变化时,分辨椭圆的变化情况如下图 2 所示,图 2(a)中的虚线间隔表示点目标冲击响应的长轴和短轴方向的分辨率,图 2(b)中的黑色粗实线表示地距分辨椭圆,圆圈表示方位旁瓣方向,方形表示距离旁瓣方向,虚线表示椭圆长轴方向,箭头表示椭圆短轴方向。其中,横轴表示目标平面 x 轴方向,纵轴表示它的垂直方向。

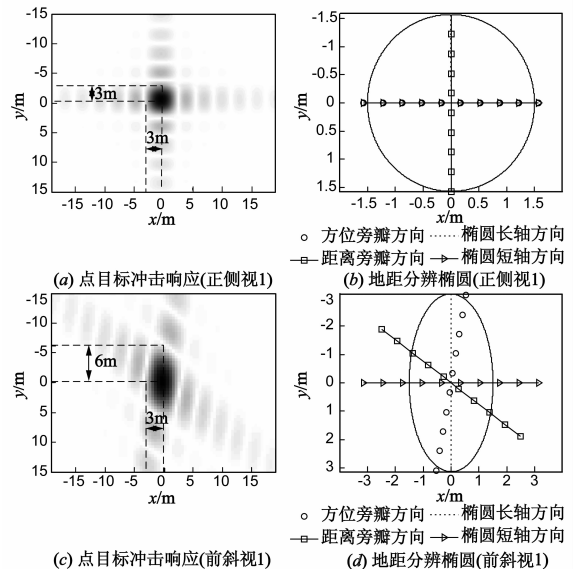


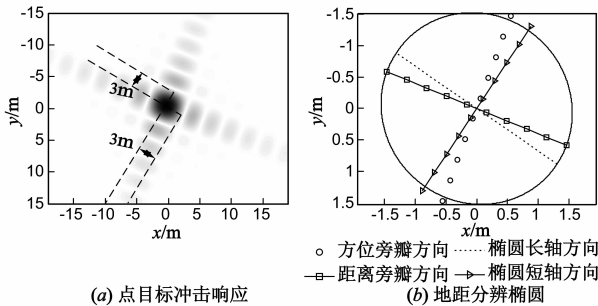
图 2 不同模式下点目标冲击响应与分辨椭圆

通过理论计算,在正侧视条件下分辨椭圆的长轴和短轴均为 3m,而在前斜视条件下分辨椭圆的长轴和短轴分别为 6.24m 和 3m,从图 2(a)~(d)可以看出,点目标冲击响应的分辨区域与分辨椭圆相吻合。其中,正侧视条件下点目标冲击响应的两维旁瓣扩展方向相互垂直,并且与地距分辨椭圆的长轴和短轴重合。此时椭圆长轴与短轴相等,地距分辨椭圆退化为一个圆,分辨率各向分布均匀,这与传统正侧视条件下的分辨率计算结果相同。

当雷达载体处于平飞前斜视模式,斜距分辨率相等时,地距分辨率表征为正椭圆,如图 2(c)和(d)所示。与图 2(a)和(b)所示的正侧视相比,地距分辨椭圆的长轴和短轴方向不变,但是旁瓣扩展方向发生了变化,与

长短轴之间有一定的夹角.在这种模式下,传统方法^[14~17]中采用梯度方向分别计算距离向和方位向分辨率,没有考虑两维分辨率的耦合情况,存在较大的误差,并且无法计算最优和最差分辨率;而文献^[18]只给出了旁瓣方向的分辨率计算方法,无法表示出其它方向的分辨率.

在图 3 所示的俯冲前斜视条件下,理论计算得到分辨椭圆的长轴和短轴分别为 3.15m 和 3m,从图 3(a)和图 3(b)可以看出,当雷达载体处于俯冲前斜视模式,斜距分辨率相等时,地距分辨率表征为斜椭圆.与前斜视^[19,20]相比,地距分辨椭圆的长轴和短轴方向,以及旁瓣扩展方向都发生了变化,此时椭圆的离心率比较小,但是具体变化情况由各个参数共同决定.



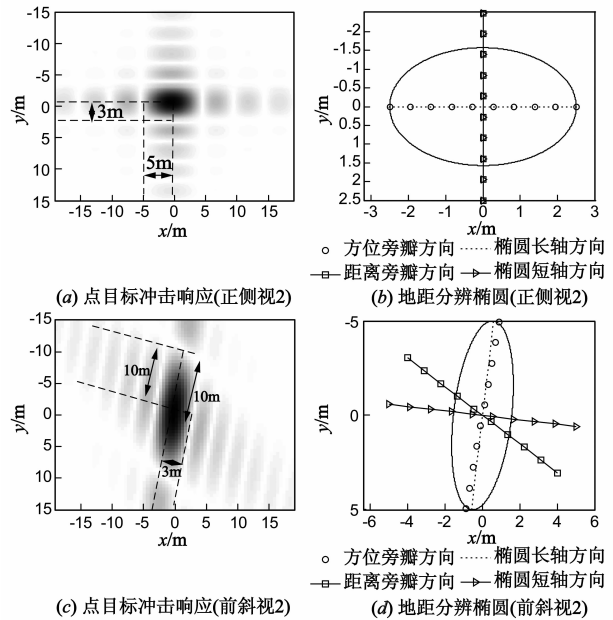
(a) 点目标冲击响应
图3 俯冲前斜视下点目标冲击响应与分辨椭圆

综上,SAR 系统几何构型参数对地距分辨椭圆的形状影响较大,它们决定了椭圆的长轴和短轴方向,即对应 SAR 系统的最差和最优分辨率方向,并且分辨率大小随几何角度的变化很明显.采用分辨椭圆的计算方法得到的分辨率与成像结果保持一致,而采用传统分析方法无法解析表示出该方向的分辨率,这可以为成像几何构型优化提供手段.

(2)在保持几何构型不变的条件下,当改变斜距分辨率时,分辨椭圆的变化情况如下图 4 所示,其中,图 4(a)中的虚线间隔表示点目标冲击响应的长轴和短轴方向的分辨率.

通过理论计算,在图 4(a)和(b)所示的正侧视 2 条件下,分辨椭圆的长轴和短轴分别为 5m 和 3.1m,与图 2(a)和(b)中的平飞正侧视模式相比,当斜距分辨率变化时,地距分辨率由圆形演变为正椭圆,并且椭圆的长轴分辨率进一步恶化.但是分辨椭圆的长轴和短轴方向,以及旁瓣扩展方向保持不变.在图 4(c)和(d)所示的前斜视 2 条件下,分辨椭圆的长轴和短轴分别为 10.1m 和 3.1m,与图 2(c)和(d)中的平飞前斜视模式相比,当斜距分辨率变化时,地距分辨率由正椭圆演变为斜椭圆.同时,分辨椭圆的长轴和短轴方向发生了变化,并且椭圆的长轴分辨率进一步恶化,但是旁瓣扩展方向保持不变.

综上,SAR 系统几何构型参数唯一决定了两维旁瓣扩展方向,该结论也可以通过式(28)和式(29)得出,但是地距分辨椭圆的长轴和短轴方向却由 SAR 系统参数和几何构型参数共同决定.



(c) 点目标冲击响应(前斜视2)
图4 正侧视2与前斜视2的结果对比

4 结论

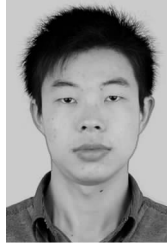
采用分辨椭圆的分析方法完备地描述了前斜 SAR 系统的分辨率特性,解决了前斜 SAR 分辨率分析与设计的问题.通过广义模糊函数推导地距分辨椭圆的表达式,指出了 SAR 地距图像的分辨率存在耦合,它与斜距分辨率和几何构型参数都相关,并通过 SAR 成像仿真验证了分析结论的正确性.因此,本文的分析结果可以为前斜 SAR 系统设计和几何构型配置提供理论依据.

参考文献

- [1] Cafforio C, Prati C, Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(2): 194 - 205.
- [2] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 786 - 799.
- [3] Hu Cheng, Long Teng, Zeng Tao, et al. The accurate focusing and resolution analysis method in geosynchronous SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3548 - 3563.
- [4] Davidson G W, Cumming I G, Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 32(1): 121 -

- 133.
- [5] 彭岁阳,张军,沈振康.基于斜飞模式的双基地 SAR 成像算法[J].电子学报,2011,39(9):1967-1974.
Peng Sui-yang, Zhang Jun, Shen Zhen-kang. The bistatic SAR imaging algorithm based on the slanting flight mode[J]. Acta Electronic Sinica, 2011, 39(9):1967-1974. (in Chinese)
- [6] 王亮,练有品,黄晓涛,等.大斜视角与大波束角 SAR 成像比较[J].电子学报,2006,34(9):1672-1676.
Wang Liang, Lian You-pin, Huang Xiao-tao, et al. Comparison of large-squint and large-beamwidth SAR imaging[J]. Acta Electronic Sinica, 2006, 34(9):1672-1676. (in Chinese)
- [7] 易予生,张林让,刘昕,刘楠,申东.机载双站合成孔径雷达模糊函数分析[J].系统工程与电子技术,2009,31(11):2597-2601.
Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Liu Xin, Liu Nan, Shen Dong. Analysis of the ambiguity function for airborne bistatic SAR system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11):2597-2601. (in Chinese)
- [8] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1990. sect. 21.4.
- [9] Cheney M. A mathematical tutorial on synthetic aperture radar[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Review, 2001, 43(2):301-312.
- [10] Zeng T, Cherniakov M, Long T. Generalized approach to resolution analysis in BSAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2005, 41(2):461-474.
- [11] 皮亦鸣,杨建宇.合成孔径雷达成像原理[M].成都:电子科技大学出版社,2007.22-57.
- [12] 保铮,刑孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.75-210.
- [13] Li Yong, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda, et al. Automatic mosaicing for airborne SAR imaging based on subaperture processing [A]. Proceedings of IEEE IGARSS'05[C]. Seoul: IEEE, 2005.4644-4647.
- [14] 孙寒冰,曲长文,侯海平.一种精确的大斜视 SAR 方位高分辨分析方法[J].中国雷达,2009,(2):27-29.
- [15] 朱仁飞,张群,罗迎,于涛.双基地 ISAR 二维分辨率分析研究[J].弹箭与制导学报,2010,30(1):182-186.
Zhu Ren-fei, Zhang Qun, Luo Ying, et al. Resolution characteristic analysis of bistatic ISAR[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1):182-186. (in Chinese)
- [16] 杨晓亮,梁兴东,丁赤飏.基于转台成像的 SAR 分辨率分析[J].微计算机信息,2009,25(7):287-289.
Yang Xiaoliang, Liang Xingdong, Ding Chibiao. SAR resolution analysis based on turntable imaging[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(7):287-289. (in Chinese)
- [17] 汤子跃,林卫明,张守融.双站合成孔径雷达的距离分辨率特性[J].电子学报,2003,31(S1):2005-2008.
Tang Zi-yue, Lin Wei-ming, Zhang Shou-rong. The range resolution performance of bistatic synthetic aperture radar[J]. Acta Electronic Sinica, 2003, 31(S1):2005-2008. (in Chinese)
- [18] Li Zengliang, Zhao Xin, Ding Zegang. Analysis of diving squint SAR resolution[A]. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011. 875-878.
- [19] 宋雪岩,李真芳,保铮.大斜视 DBS 成像[J].现代雷达,2004,26(1):30-34.
Song Xue-yan, Li Zhen-fang, Bao Zheng. Highly squint DBS imaging[J]. Modern Radar, 2004, 26(1):30-34. (in Chinese)
- [20] Curlander J C. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991. 28.

作者简介



龙杰男,1985年12月出生于湖北省孝感市.2008年毕业于武汉科技大学电子工程系,现为北京理工大学博士研究生,从事雷达信号处理方面的研究工作.

E-mail: jielong000@163.com



姚迪(通信作者)男,1978年10月出生,于湖北省武汉市.2001年毕业于华中科技大学电子与信息工程系,2006年获得北京理工大学信号与信息处理专业博士学位,现为北京理工大学信息与电子学院教师,从事雷达信号处理方面的研究工作.

E-mail: ddyao@bit.edu.cn