

用星载寄生式 SAR 提高空间二维分辨率的信号处理

何 峰, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 星载寄生式 SAR(Synthetic Aperture Radar) 是分布式小卫星 SAR 的一种典型形式. 本文用数学推导的方法, 以统一的形式给出了提高距离和方位分辨率的原理公式, 公式表明: 提高距离和方位分辨率的原理能以二维地面散射谱在距离维和方位维的频谱偏移这一统一的观点来解释, 进而可一并考虑并同时实现. 基于此提出一种提高系统空间分辨率的实现方法, 同时考虑了固定相位差和两个方向的频移, 可直接合成多幅图像. 实现中充分考虑了图像频域支撑区的规则分布问题, 以保证获得时域高质量图像. 仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 星载寄生式 SAR; SAR; 雷达分辨率; 分辨率增强

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)06-1128-04

Improving Spatial Resolution Using Spaceborne Parasitic SAR

HE Feng, LIANG Dianong

(School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Spaceborne parasitic SAR is a typical form of distributed small satellite system. With theoretical derivations, it's found that improving range and azimuth resolution by combination of several images from different small satellites can be explained uniformly by scattering spectrum two dimension shifting, and improving range and azimuth resolution can be completed at the same time. A processing method is given to combine multiple images for improving spatial resolution of spaceborne parasitic SAR, which compensates spectrum shifts in two directions and fixed phase difference. Regularity of cover area in frequency domain after combination is considered to assure to get high quality images in spatial domain. Simulated data show that theoretical derivations are in good agreement with practice.

Key words: spaceborne parasitic SAR; SAR; radar resolution; resolution improvement

1 引言

星载寄生式 SAR 是分布式小卫星的一种典型形式, 有广泛的应用前景^[1,2], 提高系统空间分辨能力是星载寄生式 SAR 的重要应用之一. 伴随小卫星之间方位角差异使各自雷达回波信号多普勒质心偏离, 下视角差异使得距离向地面散射谱偏移, 这两种现象是提高系统空间分辨能力的理论基础. 文[3]中最早提出利用下视角差异提高距离分辨率的原理, 文[4]中分析了多普勒频带合成提高方位分辨率的原理. 文[1]中将这两种方法应用于星载寄生式 SAR 系统. 国内在此问题上也有较深入的研究^[5,6]. 但以上工作均存在将二维空间分辨率的提高分开考虑和实现, 且提高一维分辨率并没有考虑另一维频移影响的问题.

本文用数学推导的方法, 以统一的形式给出了提高距离向和方位向分辨率的原理公式, 推导结果表明: 提高距离向和方位向分辨率的原理能以二维地面散射谱在距离维和方位维的频谱偏移这一统一的观点来解释, 进而提高距离向和方位向分辨率可一并考虑并同时实现. 由于星载寄生式 SAR 系统下视角差异和方位角差异一般同时存在, 地面散射谱在距离维和方位维的频移是同时出现的, 若只考虑提高某一维

分辨率而不考虑另一维的影响, 会造成图像在频域支撑区的不规则分布, 严重降低图像质量. 实际上另一维的频谱偏移同时也给提高另一维分辨率提供了可能. 本文提出一种提高系统空间分辨率的实现方法, 同时考虑了固定相位差和两个方向的频移, 可直接合成多幅图像. 实现中充分考虑了图像频域支撑区的规则分布问题, 以保证获得时域高质量图像. 利用多颗小卫星间各自在距离和方位向上的差异, 结合小卫星编队形式, 可成数倍提高某一维空间分辨率, 也可同时提高二维空间分辨率.

2 成像信号模型

星载寄生式 SAR 系统空间几何关系如图 1 所示: 以 S_1, S_2 代表的编队小卫星群伴随大卫星 S_0 飞行, 各角度如图所标示, 其中编队中心下视角和方位角用 θ_b, ϕ_b 表示, 由于编队尺寸远小于它到大卫星及目标的距离, 可认为 θ_b, ϕ_b 为各编队小卫星对应量的均值. 地面位

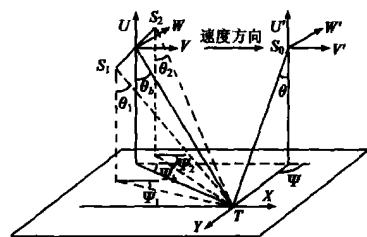


图 1 星载寄生式 SAR 系统空间几何示意图

置以 (x, y) 描述.

设发射信号为: $\exp[j2\pi(f_d t + Kt^2/2)]$, $|t| \leq \tau_p/2$, 信号带宽 $W_t = |K| \tau_p$. 对于分布式地面目标 $f(x, y)$, 雷达图像 $g_{bi}(x, t)$ 如式(1)所示. 式中 $r(y')$ 、 $r_i(y')$ 是散射点在合成孔径中心时刻到 S_0 、 S_i 的斜距, f_{Dc} 、 f_{Di} 为 S_0 多普勒参数, f_{Dc} 、 f_{Di} 为 S_i 雷达若为完整发射接收雷达时的多普勒参数. 当 S_i 接收 S_0

电磁波回波时, 其多普勒参数为 $f_{Dci}^b = \frac{f_{Dc} + f_{Di}}{2}$, $f_{Ri}^b = \frac{f_{Rc} + f_{Ri}}{2}$. $\rho_t = \frac{1}{W_t}$, $\rho_x = \frac{V}{W_d}$, W_d 为多普勒带宽.

$$g_{bi}(x, t) = \iint f(x', y') \exp\left\{-j2\pi \frac{r(y') + r_i(y')}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Di}}{V}(x - x')\right\} \cdot \sin\left\{\pi \frac{t - [r(y') + r_i(y')]/c}{\rho_t}\right\} \cdot \text{sinc}\left[\pi \frac{x - x'}{\rho_x}\right] dx' dy'$$

3 提高空间分辨率原理

现考虑小卫星 S_1 、 S_2 对以 (x_c, y_c) 为中心的一小块地面区域所成的雷达图像. 区域内附近点在合成孔径中心到 S_0 、 S_i 的斜距可近似表示为: $r(y') = r(y_c) + u' \sin\theta$, $r_i(y') = r_i(y_c) + u' \sin\theta_i \cos\Delta\phi_i$, 其中 $u' = y' - y_c$, $\Delta\phi_i = \phi - \phi_i$. 若令 $t - \frac{r(y_c) + r_i(y_c)}{c} = \tau$, 又令 $\tau = \frac{u(\sin\theta + \sin\theta_i \cos\Delta\phi_i)}{c}$, 且记

$$g'_{bi}(x, \tau) = g_{bi}\left(x, \frac{r(y_c) + r_i(y_c)}{c} + \tau\right), \text{式(1)可改写为:}$$

$$g'_{bi}(x, \frac{\sin\theta + \sin\theta_i \cos\Delta\phi_i}{c} u) = \{f(x, y_c + u) \exp\{-j2\pi \frac{r(y_c) + r_i(y_c) + (\sin\theta + \sin\theta_i \cos\Delta\phi_i)u}{\lambda}\} \otimes_x u \{ \exp\{j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Di}}{V} x\} \text{sinc}\{\pi \frac{(\sin\theta + \sin\theta_i \cos\Delta\phi_i)/c}{\rho_t} u\} \text{sinc}\{\pi \frac{x}{\rho_x}\}\}, i = 1, 2 \quad (2)$$

这里近似认为 $W_{d1} = W_{d2}^{[7]}$, 因此 $\rho_{x1} = \rho_{x2} = \rho_x$. 地面同一相对位置 u 在 S_1 、 S_2 图像中因 θ_i 、 ϕ_i 的差异而引起幅度包络和相位上的差异. 幅度包络上的差别是可忽略的^[7], 式(2)改写为:

$$g'_{b1}(x, \frac{\sin\theta + \sin\theta_1 \cos\Delta\phi_1}{c} u) \approx g'_{b1}(x, \tau) = \{f(x, y_c + \tau) \cdot \exp\{-j2\pi \frac{r(y_c) + r_1(y_c) + \tau(\sin\theta + \sin\theta_1 \cos\Delta\phi_1)}{\lambda}\} \otimes_{\tau} \sin c\{\pi \frac{\tau}{\rho_t}\} \otimes_x \{ \exp\{j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{V} x\} \text{sinc}\{\pi \frac{x}{\rho_x}\}\} \quad (3)$$

$$g'_{b2}(x, \frac{\sin\theta + \sin\theta_2 \cos\Delta\phi_2}{c} u) \approx g'_{b2}(x, \tau) = \{f(x, y_c + \tau) \cdot \exp\{-j2\pi \frac{r(y_c) + r_2(y_c) + \tau(\sin\theta + \sin\theta_2 \cos\Delta\phi_2)}{\lambda}\} \otimes_{\tau} \sin c\{\pi \frac{\tau}{\rho_t}\} \otimes_x \{ \exp\{j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc2}}{V} x\} \text{sinc}\{\pi \frac{x}{\rho_x}\}\} \quad (4)$$

式中 $\eta = \frac{c}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b}$, $\tau = \frac{u(\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b)}{c} =$

$\frac{u}{\eta}$. 则 $g'_{b1}(x, \tau)$ 、 $g'_{b2}(x, \tau)$ 的二维频谱为:

$$G_{b1}(k_x, \omega) = e^{-j(\omega_c/c)[r(y_c) + r_1(y_c)]} \cdot F(k_x, \omega) + \omega_c \frac{\sin\theta + \sin\theta_1 \cos\Delta\phi_1}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b} \cdot W_{\omega}(\omega) \cdot W_{kx}(k_x - \pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{V}) \quad (5)$$

$$G_{b2}(k_x, \omega) = e^{-j(\omega_c/c)[r(y_c) + r_2(y_c)]} \cdot F(k_x, \omega) + \omega_c \frac{\sin\theta + \sin\theta_2 \cos\Delta\phi_2}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b} \cdot W_{\omega}(\omega) \cdot W_{kx}(k_x - \pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc2}}{V}) \quad (6)$$

$W_{\omega}(\omega)$ 为宽度为 $2\pi W_t$ 的矩窗, $W_{kx}(k_x)$ 为宽度为 $2\pi \cdot W_d/V$ 的矩窗. 比较式(5)、(6), 两图像频谱间有固定相差 ϕ_0 :

$$\phi_0 = \exp\{-j(\omega_c/c)[r(y_c) + r_1(y_c)] + j(\omega_c/c)[r(y_c) + r_2(y_c)]\} = \exp\{j \frac{2\pi}{\lambda}[r_2(y_c) - r_1(y_c)]\} \quad (7)$$

在方位向波数域谱偏移为:

$$\Delta k_x = \pi \frac{f_{Dc1} + f_{Dc2}}{V} - \pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc2}}{V} = 2\pi \frac{\Delta f_{Dc}}{V} \quad (8)$$

其中 $\Delta f_{Dc} = \frac{f_{Dc1} - f_{Dc2}}{2} = f_{Dc1}^b - f_{Dc2}^b$. 在快时间频谱上的频率偏移为:

$$\Omega = -\omega_c \frac{\sin\theta + \sin\theta_1 \cos\Delta\phi_1}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b} + \omega_c \frac{\sin\theta + \sin\theta_2 \cos\Delta\phi_2}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b} = \omega_c \frac{\sin\theta_2 \cos\Delta\phi_2 - \sin\theta_1 \cos\Delta\phi_1}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b} \quad (9)$$

观察式(5)、(6)知, 虽在 k_x 域和 ω 域均有频移, 但表现形式不同. 二维地面散射谱 $F(k_x, \omega)$ 本身在 k_x 域和 ω 域均可看成是无限带宽, 在 k_x 域地面散射谱本身无移位, 窗函数 W_{kx} 位置不同. 而在 ω 域, 窗函数 W_{ω} 位置相同, 地面散射谱本身有移位.

若已知固定相位差 ϕ_0 和 Ω , 构造相位补偿函数 $\phi_{12}(\tau) = \exp\{j[\phi_0 + \Omega\tau]\}$, 将 S_2 图像与之相乘, 易求得乘积 $\phi_{12}(\tau) * g'_{b2}(x, \tau)$ 对应的频谱为:

$$e^{-j(\omega_c/c)[r(y_c) + r_1(y_c)]} \cdot F(k_x, \omega + \omega_c \frac{\sin\theta + \sin\theta_1 \cos\Delta\phi_1}{\sin\theta + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b}) \cdot W_{\omega}(\omega - \Omega) \cdot W_{kx}(k_x - \pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc2}}{V}) \quad (10)$$

与 S_1 图像频谱式(5)比较知: 两幅图像相位一致, 二维地面散射谱无相对偏移, 只有窗函数 W_{ω} 、 W_{kx} 位置不同, 截取了不同的频段, 因此可在时域直接叠加. 叠加后图像的频域支撑区为叠加前二者支撑区的并集, 方位谱最宽处对应提高方位分辨率 $1 + \Delta k_x / (2\pi W_d/V)$ 倍, 快时间谱最宽处对应提高距离分辨率 $1 + \Omega / (2\pi W_t)$ 倍. 若距离、方位上均有较大的相对偏移, 叠加图像的频域支撑区在两个对角上会出现支撑空白, 影响成像效果, 理论上的高分辨率将无法实现.

对多幅图像, 可选取某一幅图像为基准图像, 分别求其他各幅图像对基准图像的相位补偿函数, 各幅图像经补偿后直接在时域叠加. 易知相位补偿函数有传递性质:

$$\phi_B(\tau) = \phi_{12}(\tau) \cdot \phi_{23}(\tau)$$

4 提高空间分辨率实现方法

4.1 参数估计方法

为进行地面散射谱合成, 关键是得到雷达图像间的相位

差 ϕ_0 和地面散射谱距离向频移 Ω 。本文应用两种方法确定 ϕ_0 和 Ω ：几何关系计算法和相干估计法。

4.1.1 几何关系计算法 理论上说，若成像几何关系完全确知，由已知的几何参数代入式(7)、(9)即可求得 ϕ_0 、 Ω 。由于相位和频偏对空间几何参数变化极为敏感，实际存在的几何误差使计算值难达需要的精度，因此几何关系计算法不具实用意义。但在验证仿真中可作为真值来评价其他方法估计的准确程度。

另外，估计分辨率提高倍数或估计图像频谱支撑区范围需要两维频偏的估算公式。在 $\Delta\phi_i$ 较小且 $\Delta\phi_1 \approx \Delta\phi_2$ ，地球自转对两颗小卫星多普勒频移的贡献近似相等近似下有：

$$\Omega \approx \omega_c \frac{\cos\Delta\phi_b \cos\theta_b}{\sin\theta_+ + \sin\theta_b \cos\Delta\phi_b} \Delta\theta \quad (11)$$

$$\Delta f_{Dc} = \frac{f_{Dc1} - f_{Dc2}}{2} = \frac{V_s}{\lambda} \sin\theta_b (\cos\phi_1 - \cos\phi_2) \approx \frac{V_s \sin\theta_b \sin\phi_b}{\lambda} \Delta\phi \quad (12)$$

可见，在一定近似下，距离向频偏与下视角差成正比，方位向频偏与方位角差成正比。

4.1.2 相干估计法 对散射系数是分布均匀的高斯白噪声的地面，由式(2)易求得 $g'_{b1}(x, \tau)$ 、 $g'_{b2}(x, \tau)$ 间的复相干为：

$$\langle g'_{b1}(x, \tau) g'^*_{b2}(x, \tau) \rangle = \rho_0 \rho_t \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [r_2(y_c) - r_1(y_c)]\right\} \cdot \exp\{j\Omega\tau\} \cdot \left[1 - \frac{\Omega}{2\pi W_t}\right] \left[1 - \frac{\Delta k_x}{2\pi W_d/V}\right] \quad (13)$$

可见，两幅图像相干结果忽略幅度项，正是要构造的相位补偿函数 $\phi_{12}(\tau)$ 。 $1 - \frac{\Omega}{2\pi W_t}$ 和 $1 - \frac{\Delta k_x}{2\pi W_d/V}$ 分别为 ω 域和 k_x 域频移造成的去相关效应，当 ω 域或 k_x 域频移量超过对应域频带宽，两幅图像频谱无重叠区域时，相关性为零。要估计的相位补偿函数也无法得到。结合式(11)、(12)，临界下视角差和方位角差为：

$$\Delta\theta_c = \frac{\lambda}{\rho_y \cos\Delta\phi_b \cos\theta_b}, \Delta\phi_c = \frac{W_d \lambda}{V_s \sin\theta_b \sin\phi_b} \quad (14)$$

为获得较高的分辨率提高倍数，频偏相对较大，图像对的相干性较弱。为获得较理想的相位补偿函数 $\phi_{12}(\tau)$ ，按处理顺序依次采取以下几种手段：

- (1) 干涉进行之前对两幅图像在距离和方位向分别滤波，滤掉不重合的频率段，增强图像相关性。
- (2) 得到的干涉图做多视处理降低噪声。
- (3) 可将干涉图沿方位向求平均，因为由式(13)知 $\langle g'_{b1}(x, \tau) g'^*_{b2}(x, \tau) \rangle$ 只是 τ 的函数，与 x 无关。实际中由于地面沿方向坡度等因素， $\langle g'_{b1}(x, \tau) g'^*_{b2}(x, \tau) \rangle$ 也是 x 的缓变函数，因此平均只能在一定方位向范围内。
- (4) 用圆周期均值滤波法^[8]对得到的干涉相位进行滤波处理，进一步平滑相位。
- (5) 进一步对干涉相位进行一维相位展开^[9]后，再用线性

性回归法准确估计出参数 ϕ_0 和 Ω 。

4.2 实现步骤

根据算法原理和以上的讨论，算法实现的具体步骤为：

- (1) 估计编队中各小卫星图像间的相对频偏量，确定各图像频谱支撑区间的关系，确定要进行合成处理的图像集，保证各图像频谱支撑区间互有重叠且频谱支撑区并集为较规则的矩形，估计预期分辨率提高倍数。这一步应与小卫星编队形式相结合来完成。
- (2) 选择一幅图像作为基准图像，用最大相关法对其他各幅图像进行复图像配准。
- (3) 估计各幅图像对基准图像的参数 ϕ_0 和 Ω ，构造相位补偿函数。利用相位补偿函数的传递性质，只要求频域相邻图像间频谱有重叠即可。
- (4) 基准图像以外的各幅图像与各自相位补偿函数时域相乘后，在时域与基准图像叠加。为消除频谱重叠引起的频谱支撑区内幅度不均还要进行幅度均衡滤波处理。

5 仿真结果

现以小卫星双基地回波仿真数据进行提高空间分辨率的仿真。以 Envisat 为假想主星，主要参数为：半长轴 7159.5m，波长 5.6cm，带宽 16MHz，天线长 10m，中心视角 35°。编队用类似 Pendulum 的构形^[7]，但不局限于三颗小卫星，其在距离和方位向耦合较小，可灵活设置得到所需各种构形。

各小卫星仿真回波数据经成像算法得到雷达图像，按上节步骤完成提高分辨率处理。首先用离散点目标图像来验证。由于稀疏分布的点目标图像无法干涉得到所需相位补偿函数，采用几何关系计算法确定参数。结果如图 2 所示。图 2(a) 为沿航向分布的三颗小卫星提高方位分辨率，相邻两星方位角差异等于临界值，下视角差异与临界值比较很小。地面两点目标方位向上相距 4.5m。由图可见单星图像中无法分辨的两点在双星和三星合成图像中得到很好的分辨，分析显示：单星、双星、三星图像的分辨率依次为 4.9m、2.4m、1.7m，分辨率提高倍数与理论值吻合。

图 2(b) 为切航向分布的三颗小卫星提高距离分辨率的结果。相邻下视角差等于临界值，方位角差与临界值比很小，地面两点目标斜距上相距 8.6m。单星、双星、三星图像的斜距分辨率依次为 9.4m、4.7m、3.1m，也与理论值吻合。

图 2(c) 为用距离和方位间隔均略小于单星分辨率的 2×2 点阵验证同时提高距离和方位分辨率。单星成像结果如左

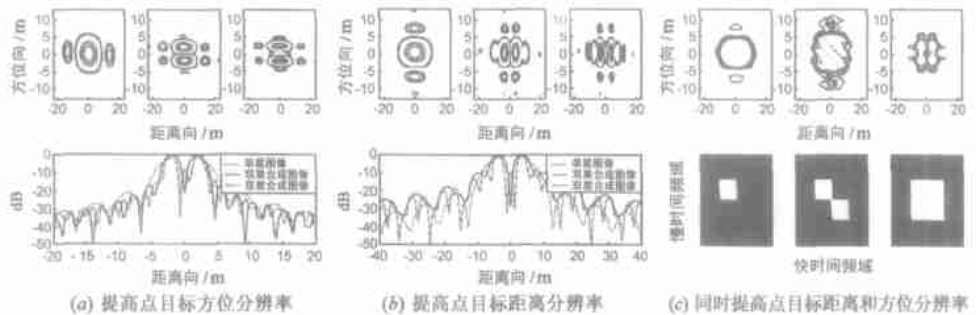


图 2 提高点目标图像空间分辨率结果

上所示, 四点完全不能分辨, 左下为对应的频域支撑区. 若选在方位角和下视角差异均接近临界值的两颗小卫星图像进行合成, 结果如中间所示. 可见尽管在频域二维均扩展到单星的两倍, 但由于在对角出现支撑空白, 时域图像不但没有提高分辨能力, 反而恶化了时域图像. 右边显示的是加上沿航向和切航向对称的两颗卫星后的结果, 频域支撑区重新变为规则矩形, 四点得到较好的分辨.

接着对仿真平地均匀面目标进行处理. 用相干估计法来确定相位补偿函数. 图 3(a) 左为切航向分布两星提高距离分辨率的结果. 两星下视角差取临界值的 0.75. 在左上显示了单星和双星合成后的图像. 为定量分析图像分辨率, 求图像在距离向的自相关函数并用其度量空间分辨率, 如左下所示, 由其知距离分辨率提高 1.76 倍, 接近理论值 1.75 倍. 图 3(a) 右为沿航向分布两星提高方位分辨率的结果, 相邻小卫星方位角差取临界值的 0.6, 方位分辨率提高 1.58 倍.

图 3(b) 为利用沿航向和切航向对称分布的四颗小卫星同时提高距离和方位分辨率的结果. 下视角差为临界值的 0.75, 方位角差为临界值的 0.6, 地面沿距离和方位各两条相隔 0.8 倍单星分辨尺寸的平行亮线, 散射强度比周围高 30dB. 同时提高距离向和方位向分辨率后, 单星图像在两个方向均不能分辨的平行线得以有效分辨.

6 结论

通过对离散点目标和分布式散射系数的平地目标图像的提高空间分辨率仿真表明, 本文提出的处理方法精确有效, 仿真结果与理论分析有很好的吻合. 结合小卫星编队形式, 用本文的方法可有效的在一次处理中成数倍提高星载寄生式 SAR 系统某一维空间分辨率, 也可同时提高二维空间分辨率. 该方法在形式上加以修改, 也可应用到诸如多发多收模式的其他分布式小卫星 SAR 系统提高空间分辨率的成像处理中.

参考文献:

- [1] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506-520.
- [2] Krieger G, Wendler M. Comparison of the interferometric performance for spaceborne parasitic SAR configurations[A]. EUSAR 2002[C]. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2002. 467-470.
- [3] Prati C, Rocca F. Improving slant range resolution with multiple SAR surveys[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 135-143.
- [4] Jakowatz C, et al. Spotlight Mode SAR: A Signal Processing Approach[M]. Boston: Kluwer, 1996.
- [5] 徐华平, 周荫清, 等. 基于频谱偏移估计的分布式星载 SAR 提高距离向分辨率的数据处理方法[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1790-1797.
XU Huaping, ZHOU Yingqing, LI Chunsheng. An algorithm based on spectrum shift estimation for improving range resolution using distributed spaceborne interferometric SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1790-1794.
- [6] 禹卫东. 用分布式小卫星提高星载 SAR 的方位向分辨率[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(7): 43-45.
YU Weidong. Using distributed small satellite system to improve azimuth resolution of spaceborne SAR[J]. System Engineering and Electronics, 2002, 24(7): 43-45.
- [7] 何峰, 等. 星载寄生式 SAR 多普勒特性分析[J]. 信号处理, 2004, 20(5): 475-480.
- [8] Eichel P.H, Ghiglia D.C, et al. Spotlight SAR Interferometry for Terrain Elevation Mapping and Interferometric Change Detection[R]. Albuquerque: Sandia National Labs Tech. Report, 1993. 2539-2546.
- [9] Dennis C Ghiglia, Mark D Pritt. Two Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and software[M]. New York: Wiley, 1998.

作者简介:



何 峰 男, 1976 年 10 月生于湖北孝感, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 主要从事信息获取与实时处理、星载双/多基地 SAR 系统及信号处理方法等方面的研究工作. E-mail: riversummit@sina.com.

梁甸农 男, 1936 年出生于湖南涟源, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事超宽带雷达系统理论及自适应信号处理、谱估计、空间信息获取与处理等研究工作.