

## 多基站 ISAR 三维转动转台目标成像研究

云日升

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

**摘要:** 该文建立了多基站 ISAR 3 维转动转台目标的成像模型和成像算法, 同时分析了多基站 ISAR 3 维转动转台目标的成像约束。通过在多基站 ISAR 3 维转动转台目标成像模型的基础上构造多基站距离向投影方程组和方位向多普勒方程组, 实现了同时对目标散射点位置参数和运动参数的估计。仿真实验验证了多基站 ISAR 平面转台模型成像算法。

**关键词:** ISAR; 多基站; 3 维转动; 成像

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)07-1692-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2009.00905

## Multi-static ISAR Three-Dimension Turntable Imaging and Simulation

Yun Ri-sheng

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In this paper, the multi-static ISAR three-dimension turntable model and imaging algorithm are proposed. Furthermore, the multi-static ISAR three-dimension turntable imaging constraints are analyzed. Based on the range projection equations and azimuth doppler equations deduced by multi-static ISAR three-dimension turntable model, the positions and movement parameters of target scattering points are obtained. The multi-static ISAR three-dimension turntable model and imaging method are verified with simulation experiments.

**Key words:** ISAR; Multi-static; Three-dimensional rotation; Imaging

### 1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)用来对一般雷达的目标, 如飞机、舰船、导弹等进行成像。ISAR 通过发射宽带信号获得目标距离向的高分辨率, 通过目标和雷达间相互运动获得方位向高分辨率<sup>[1]</sup>。单站 ISAR 成像通常将运动目标平动补偿为转台目标后, 采用经典的距离-多普勒算法对目标进行成像<sup>[1]</sup>。在常规的单站 ISAR 中, 只能获得目标的单幅图像, 即使成像平面上的尺度已知, 仍然不能形成其它方向的成像平面, 因此常规的 ISAR 不能获得目标的 3 维图像。另一方面, 对于机动飞行目标, 目标的转角无法获得, 因此 ISAR 图像的方位向尺度未知; 同时由于目标相对于雷达的转轴是时变的, 距离-多普勒成像平面未知。从而利用传统的单站 ISAR 系统通常不能确定成像平面上目标散射点的真实位置, 这就使得难以从 ISAR 图像正确识别目标。此外, 由于非平稳运动目标在成像的观测期间各散射点子回波的多普勒

不再保持不变, 采用时频分析方法虽然可以获得时变的图像, 但对机动性较大的目标难以适用<sup>[2]</sup>。单站 ISAR 一般采用缩短成像所需时间段, 减小所需的转角对惰性较大一类目标近似为平面转动来提高成像的成功率。但基于超分辨率的频谱估计通常需要估计雷达回波的相关矩阵, 计算量较大。

为了克服单站 ISAR 对目标成像的不足和局限性, 近年来国内外开始在双(多)站 ISAR 目标成像的理论和算法方面进行探索性的研究<sup>[3,4]</sup>。在单站雷达中, 当目标沿视线运动或进行战术抖动时, 目标的转角变化很小难以成像, 通过双站 ISAR 可以克服这样的成像限制<sup>[3]</sup>。Martorella 等<sup>[4]</sup>的实验研究表明在开阔的海域, 由双站 ISAR 海面多径反射的信号实现的虚拟多基站雷达在一定程度上克服了多基站雷达信号相关性的问题且成功获得了多个 LOS 的海面舰艇的 ISAR 图像。

多基站 ISAR 成像的研究目前主要是干涉式 ISAR 成像模型和算法的研究<sup>[5-8]</sup>。Wang 等<sup>[5]</sup>提出一种采用 3 个接收天线的 ISAR 成像系统, 在此基础上求解 3 维散射点位置信息, 获得 3 维 ISAR 图像。使用这 3 个接收机, 可以获得 3 个常规的 ISAR 复图像。利用回波不同的相位信息, 可以求解得到

2009-06-23 收到, 2009-12-21 改回

国家自然科学基金青年基金(60802071)资助课题

通信作者: 云日升 yrs@nmrs.ac.cn

散射点的 3 维几何位置,应用层析技术可以获得目标的 3 维信息。但对于投影到 ISAR 成像平面上的具有相同距离-多普勒值的合成散射点不能获得散射点位置的正确估计。文献[7]将 3 天线 ISAR 扩展为两个相互垂直的天线阵列,可以改善系统分离合成散射点的能力。干涉 ISAR 技术与干涉 SAR 原理不完全相同。干涉 SAR 中,飞机的运动方向垂直于天线基线方向,两幅复图像在斜距向自动对齐;在干涉 ISAR 中,成像平面不一定垂直于干涉基线,因此高度信息无法通过两个天线来获得。干涉 ISAR 图像是目标散射点在距离-多普勒平面上的投影,位置不同但具有相同的距离-多普勒值的散射点被投影到相同的距离-多普勒单元,造成常规双天线干涉技术测量的困难。此外,由于 ISAR 是对目标上离散分布的散射点进行成像,干涉 SAR 中用于分布目标的相位解缠绕技术无法应用于干涉 ISAR,这在一定程度上限制的干涉式 ISAR 的成像能力和性能。

ISAR 成像目标可用散射点模型近似表示。目标上散射点的分布虽然随视角的改变而变化,但其变化是比较缓慢的,当视角改变不超过 10 余度时,可认为目标上散射点分布近似不变<sup>[1]</sup>。因此对于距离雷达数千米以外的运动目标,分布范围在数百米之内的多个雷达获得的目标图像上的散射点具有近似一致对应的特点。由于运动目标回波经过平动补偿之后转化为转台模型,本文基于多基站 ISAR 目标散射点的特性,通过构造多基站距离向投影方程组和方位向多普勒方程组建立多基站 ISAR 转台成像模型,对目标三维转动转台模型条件下的目标散射点位置和运动参数进行估计,并通过仿真实验进行了验证。

## 2 多基站 ISAR 3 维转动目标转台模型

多基站 ISAR 3 维转动目标转台模型如图 1 所示。坐标原点为目标轴心,对应于目标用作平动补偿的参考点位置。考虑目标上一孤立散射点  $P(x_p, y_p, z_p)$ , 在图 1 中用向量  $\mathbf{r}_p$  表示。对 3 维转动目标转台模型,旋转向量表示为  $\boldsymbol{\Omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 。站点  $S_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 的雷达 LOS 单位向量表示为  $\mathbf{R}_i$ ,  $P$  点到各站点的观测几何不同,即雷达视向量不同,获得的目标多普勒不同:

$$f_{d,i} = \frac{2}{\lambda} \left( (\mathbf{R}_i \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_i)) \times \mathbf{r}_p \right) \cdot \mathbf{R}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中  $f_{d,i}$  是散射点  $P$  在各基站雷达所成图像上的多普勒频率,  $\lambda$  是发射信号波长,  $(\mathbf{R}_i \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_i))$  为相对于站点  $S_i$  有效旋转向量。

基于多基站 ISAR 3 维转动转台成像几何模型,多基站 ISAR 图像距离向投影满足:

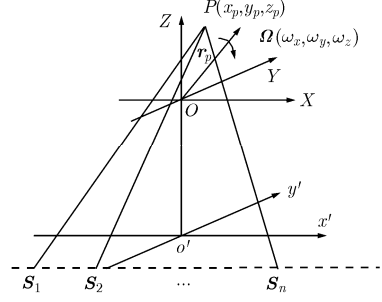


图1 多基站ISAR3维转动模型

$$\tilde{y}_i = \mathbf{r}_p \cdot \mathbf{R}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中  $\tilde{y}_i$  是散射点  $P$  在各基站雷达所成图像距离向的值。

目标上一孤立散射点  $P(x_p, y_p, z_p)$ , 绕向量  $\boldsymbol{\Omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  旋转  $\Omega t$  角度后的坐标为

$$\begin{bmatrix} x'_p(t) \\ y'_p(t) \\ z'_p(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}^T \cdot \mathbf{R}_{XY} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Omega t & \sin \Omega t \\ 0 & -\sin \Omega t & \cos \Omega t \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_{Y-X} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R}_{XY} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{Y-X} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

分别为绕  $X$  轴旋转  $\theta$  角和绕  $Y$  轴旋转  $\beta$  角的旋转矩阵和绕  $X$  轴旋转  $-\theta$  角和绕  $Y$  轴旋转  $-\beta$  角的旋转矩阵。

$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_y}{\omega_x} \right)$ ,  $\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_z}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} \right)$ 。

通过联合求解多基站 ISAR 图像散射点关于距离向投影方程组和方位向多普勒方程组,理论上可以求解得到  $P$  点位置和旋转向量  $\boldsymbol{\Omega}$ 。

## 3 多基站 ISAR 3 维转动目标转台成像

### 3.1 多基站 ISAR 3 维转台成像

应用多基站距离向投影方程组(2)求解散射点的位置转化为应用最小二乘算法求解超定线性方程组的问题。令多基站雷达 LOS 矩阵  $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n]^T = [\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z]^T$ , 其中  $\mathbf{R}_i = [R_{ix}, R_{iy}, R_{iz}]^T$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。则式(2)表示为

$$\tilde{\mathbf{y}}_p = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \quad (6)$$

其中  $\tilde{\mathbf{y}}_p = [\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n]^T$  为散射点  $P$  在  $n$  个基站下的

所成图像距离向的值;  $\mathbf{X} = [x_p, y_p, z_p]^T$  为散射点位置向量。由于在图1模型下, 各基站  $Y$  方向的坐标相同, 各基站的  $\mathbf{R}_{iy}$  分量近似相等, 应用最小二乘法求解式(6)的系数矩阵  $\mathbf{R}^T \mathbf{R}$  严重病态, 无法直接求解得到目标散射点的位置。本文采用如下搜索迭代算法求解。

将式(6)变换为

$$\tilde{\mathbf{y}}_p - \mathbf{R}_y \cdot y_{p,n} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x & \mathbf{R}_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_{p,n+1} \\ \hat{z}_{p,n+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $y_{p,n}$  在一定范围内按一定步长搜索的第  $n$  次取值,  $\hat{x}_{p,n+1}$  和  $\hat{z}_{p,n+1}$  为第  $n+1$  次最小二乘法估计值。搜索迭代使得  $\hat{\mathbf{X}}_n = [\hat{x}_{p,n+1}, y_{p,n}, \hat{z}_{p,n+1}]^T$  满足:

$$\|\mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} - \tilde{\mathbf{y}}_p\|_2 < \varepsilon_0 \quad (8)$$

其中  $\|\cdot\|_2$  为矩阵的欧氏范数,  $\varepsilon_0$  为预设迭代终止小量。

式(1)为只含散射点位置坐标和旋转向量各分量交叉项的非线性方程组。应用迭代法求解非线性方程组对未知项初值的选取较为苛刻, 难以直接稳定求解。应用式(7)求解得到位置坐标的估计值之后, 式(1)转化为关于旋转向量的线性方程组:

$$\mathbf{f}_d = \mathbf{A}\boldsymbol{\Omega} \quad (9)$$

其中  $\mathbf{f}_d = [f_{d1}, f_{d2}, \dots, f_{dn}]^T$  为  $n$  个基站目标散射点在图像上的多普勒值;  $\boldsymbol{\Omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  为目标散射点旋转向量;

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_n]^T = \frac{2}{\lambda} [\mathbf{C}_1 \mathbf{T}, \mathbf{C}_2 \mathbf{T}, \dots, \mathbf{C}_n \mathbf{T}]^T \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{C}_i = [R_{iz}, -R_{ix}, -R_{iz}, R_{ix}, R_{iy}, -R_{iy}] \quad (11)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} y_p & 0 & 0 & 0 & 0 & z_p \\ 0 & 0 & x_p & z_p & 0 & 0 \\ 0 & y_p & 0 & 0 & x_p & 0 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

矩阵  $\mathbf{T}$  中的  $(x_p, y_p, z_p)$  为由式(7)估计得到的目标散射点位置坐标。在由图1所示多基站 ISAR 成像模型条件下,  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  通常也是病态的, 因此求解式(9)也可采用式(7)搜索迭代过程, 应用最小二乘原理获得旋转向量  $\boldsymbol{\Omega}$  的估计值。

### 3.2 多基站 ISAR 3 维转动转台成像约束

多基站 ISAR 成像受到观测视角范围的限制。

对于图1所示模型, 最外侧基站的跨度  $D$  受目标观测的有效视角范围的限制:

$$D < 2R \cdot \tan \theta_0 \quad (13)$$

其中  $D$  为最外侧基站跨度范围;  $R$  对应于图1所示模型中目标参考点到多基站基线的垂直距离;  $\theta_0$  为满足 ISAR 散射点模型的最外侧站点雷达射线与  $R$

的夹角, 一般应小于  $10^\circ$ 。

在方位向多普勒方程组式(1)和距离向投影方程组式(2)中,  $f_{d,i}$  和  $y_{p,i}$  均由各基站所成目标图像得到, 因此要求满足如下多普勒和距离约束条件:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\lambda} ((\mathbf{R}_i \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_i)) \times \mathbf{r}_p) \cdot \mathbf{R}_i \\ & - \frac{2}{\lambda} ((\mathbf{R}_j \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_j)) \times \mathbf{r}_p) \cdot \mathbf{R}_j > \Delta f, \\ & i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_p \cdot \mathbf{R}_i - \mathbf{r}_p \cdot \mathbf{R}_j > \Delta r, i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (15)$$

其中  $\Delta f$  和  $\Delta r$  分别为方位向多普勒频率采样间隔和距离向采样间隔。

## 4 仿真实验

基于前述多基站 ISAR3 维转动目标转台模型, 本文对多基站 ISAR 三维转动目标转台成像进行了仿真研究。仿真采用的主要系统参数为载频波长 0.03 m, 系统带宽 400 MHz, 距离向采样率 850 MHz, 脉冲宽度 0.2  $\mu$ s, 脉冲重复频率 158 Hz, 回波采集时间 6.5 s。目标共 10 个散射点(不包括目标旋转轴心位置散射点), 散射点的位置坐标分别为 (15,5,10), (15,5,-10), (10,5,10), (10,5,-10), (10,5,15), (10,5,-15), (-10,5,10), (-10,5,-10), (-15,5,10), (-15,5,-10); 系统共 7 个基站, 站点位置分别为 (-500,-100,10000), (-300,-100,10000), (-100,-100,10000), (100,-100,10000), (300,-100,10000), (475,-100,10000), (650,-100,10000)。在式(13)中令  $\theta_0 = 10^\circ$ , 7 个基站跨度  $D = 1150 \text{ m} < 2R \cdot \tan \theta_0 = 2 \times 10000 \times 0.176 = 3526 \text{ m}$ 。式(14)左边多基站散射点多普勒最小频率差  $\Delta f_{d,\min} = 0.165 \text{ Hz} > \Delta f = 0.154 \text{ Hz}$ 。若在式(13)允许的范围内增大基站跨度  $D$ ,  $\Delta f_{d,\min}$  将随之增加。式(15)左边多基站最小投影距离差  $\Delta r_{\min} = 0.204 \text{ m} > \Delta r = 0.176 \text{ m}$ 。由以上分析可知, 实验中采用的多基站参数满足成像约束。目标散射点 3 维转动, 绕  $X, Y, Z$  3 个方向的转动速度分别为 (0.005, -0.012, 0.005) rad/s。

图2为其中4个基站获得的目标图像, 由图可以看出: 由于各基站观测目标的观测方位不相同, 各基站所成图像存在一定差异。图3为由3.1节成像算法求解得到目标散射点3个方向的位置误差, 图4表示由估计得到的目标散射点坐标还原散射点位置示意。由图3可知, 本例中大部分散射点的  $X$  方向坐标和  $Y$  方向坐标估计绝对误差在 0.4 m 之内,  $Z$  方向散射点位置估计值较为稳定, 绝对误差在 0.1 m 之内。所获得的散射点位置的均方估计误差为 (0.10, 0.112, 0.018) m。

图5为目标散射点绕  $X/Z$  两个方向旋转速度估

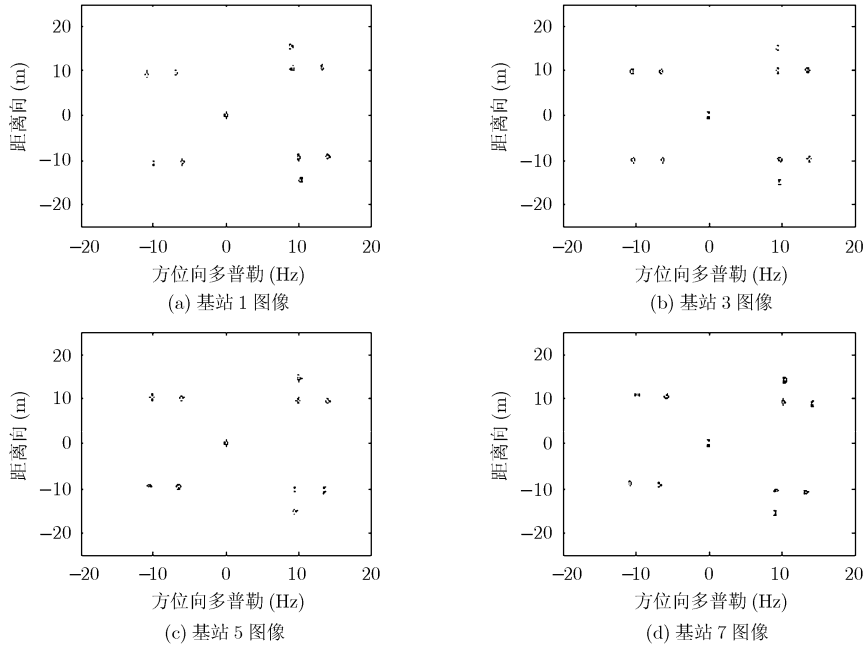


图2 多基站 3 维转动转台目标成像结果

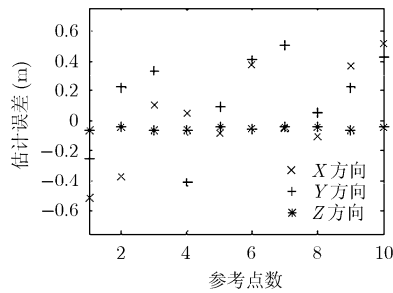


图3 散射点位置坐标误差

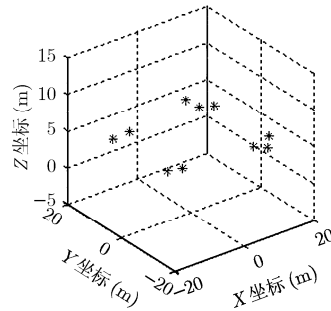


图4 目标散射点估计结果

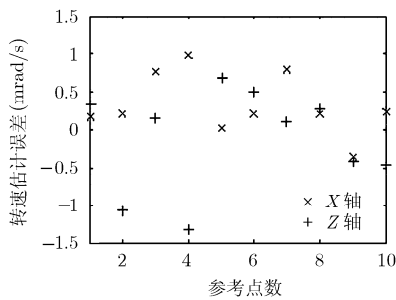


图5 X/Z轴转速估计误差

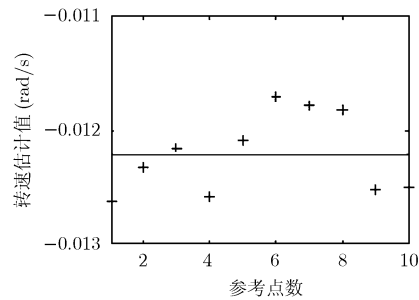


图6 Y轴转速估计

计误差分布。由图可知 X/Z 方向的各散射点获得的转速估计误差在  $\pm 0.001$  rad/s 之内，10 个散射点的 X/Z 方向的平均转速估计分别为 0.00467 rad/s 和 0.00512 rad/s。本例中绕 Y 方向旋转为主要旋转方向，10 个散射点获得的 Y 方向转速估计值如图 6 所示。绕 Y 方向平均转速估计值为  $-0.0122$  rad/s。实

验获得了目标位置和旋转速度的准确估计。

### 5 结论

本文就 3 维转动转台目标建立了多基站 ISAR 3 维转动转台目标的成像模型，给出了多基站 ISAR 3 维转动转台目标的成像算法，同时分析了多基站 ISAR 3 维转动转台目标的成像约束。通过在多基站

ISAR 3 维转动转台目标成像模型的基础上构造多基站距离向投影方程组和方位向多普勒方程组, 同时对目标的位置参数和运动参数获得了准确的估计。仿真实验验证了多基站 ISAR 平面转台成像模型和成像算法的正确性。

### 参 考 文 献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 230-276.
- [2] Bao Z, Sun C Y, and Xing M D. Time-frequency approaches to ISAR imaging of maneuvering targets and their limitations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 1091-1099.
- [3] Zhu Zhen-bo, Zhang Ya-biao, and Tang Zi-yue. Bistatic inverse synthetic aperture radar imaging[C]. *IEEE Proceedings of Radar Conference*, Arlington, 2005: 138-142.
- [4] Martorella M and Littleton B. ISAR imaging using an emulated multistatic radar system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(4): 1464-1472.
- [5] Wang G Y and Xia X G. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers[J]. *IEEE Transactions on Imaging Processing*, 2001, 10(3): 1057-1066.
- [6] 高昭昭, 邢孟道, 张守宏. 基于 InISAR 技术的三维成像[J]. *西安电子科技大学学报*, 2008, 35(5): 883-888.  
Gao Z Z, Xing M D, and Zhang S H. 3D image reconstruction using the InISAR technique[J]. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(5): 883-888.
- [7] Ma Chang-zheng, Yeo Tat-Soon, Zhang Qun, Tan Hwee-Siang, and Wang Jun. Three-dimension ISAR imaging based on antenna Array[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 504-515.
- [8] Ma Chang-zheng, Tan Hwee-Siang, Jun Wang, and Chen Bai-xiao. Three-dimensional ISAR imaging using a two-dimensional sparse antenna array[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 378-382.

云日升: 男, 1974 年生, 博士, 副研究员, 从事 SAR/ISAR/InSAR 信号处理及应用研究。