

基于数据的超宽带 SAR 的运动补偿方法

王建 王亮 薛国义 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 基于超宽带 SAR(UWB-SAR)回波数据估计多普勒调频率误差, 为了准确提取和补偿该误差, 本文提出了一种改进 MapDrift(MD)自聚焦方法, 消除了“正侧闪烁”和合成孔径长度太大造成的不利影响; 通过插值拟合运动误差以及循环误差补偿弥补了子孔径数目有限、飞机速度估计过于离散的不足, 实现了 MD 对二次以上高阶相位误差的补偿, 使 MD 能够适用于复杂的飞行条件(如无人机)。实际 UWB-SAR 数据的补偿结果验证了该方法的有效性。

关键词: 超宽带合成孔径雷达; 运动补偿; MapDrift; 自聚焦

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0360-05

Signal Based Motion Compensation for Ultra-wide Band SAR

Wang Jian Wang Liang Xue Guo-yi Zhou Zhi-min

(School of Electronics Science and Technology, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper presents a signal based Doppler rate estimation and compensation method to form a well focused Ultra-Wide Band Synthetic Aperture Radar (UWB-SAR) image. A refined MapDrift(MD) autofocus technique is promoted to improve its original performance in UWB-SAR. In the refined MD, some implementation skills are adopted to accommodate the “broadside sparking” and the long aperture. Further more, the estimated Doppler rate error is interpolated and compensated in an iteration manner. As a result, higher order phase errors are compensated and this enable the refined MD technique to be capable in applications with large motion error, for example in UAV SAR. Finally the refined MD technique is verified by real UWB-SAR data imaging.

Key words: UWB-SAR; Motion compensation; MapDrift; Autofocus

1 引言

超宽带雷达是指发射信号的瞬时相对带宽大于 25% 的一种新体制雷达。UHF/VHF 波段的超宽带系统与合成孔径成像技术相结合, 形成超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR), 它可穿透叶簇、地表探测隐蔽目标, 实现高分辨率成像^[1], 具有重要的军事应用价值。

SAR 利用了雷达与目标的相对运动产生的多普勒信号来获取方位向的高分辨率。理想的 SAR 模型要求载体按照直线运动并且等间隔采样, 而实际载体由于各种原因总是偏离理想航线的, 因此为了高分辨成像必须补偿这些运动误差。SAR 的运动补偿方法主要有两类: 一类是基于惯导和 GPS 数据的补偿; 另一类是基于回波数据的补偿。基于惯导和 GPS 的运动补偿实时性高, 但费用昂贵, 并对惯导和 GPS 的精度提出了很高的要求; 基于回波的运动补偿是通过从回波数据获取运动信息^[2]并加以补偿的方法, 这类方法灵活、精度高, 但是计算量较大、不利于实时处理。

与传统高频窄带 SAR 对运动参数精度的要求不同^[3], UWB-SAR 对波束指向精度要求很低, 而对飞机前向速度要

求很高。由于飞机前向运动误差将造成多普勒调频率的变化, 补偿其变化就可以有效地提高方位聚焦性能。多普勒调频率补偿的方法很多, 有基于数据的方法如: MapDrift (MD), Phase Difference (PD), Phase Gradient Autofocus (PGA), 也有基于图像的方法如: 最小熵方法、最大对比度方法等。

MD 方法能够准确估计出多普勒调频率, 并且计算量较小, 因此在高频窄带 SAR 得到了很好的应用。

但是为了准确估计调频率, MD 要求处理的数据长度大于合成孔径长度的一半; 而 UWB-SAR 的波束角非常大, 可达到 30° 以上, 此时合成孔径长度往往在数公里以上, 因此传统的 MD 不仅计算量大, 而且估计出的多普勒调频率也是不准确的, 因为在这么长的孔径内飞机的运动变化非常大, 所得的多普勒调频率只是一个平均值; 但如果数据长度太小, 估计出的多普勒调频率也是不准确的, 因为数据量不够, 无法利用回波中的冗余信息。因此必须改进 MD 自聚焦方法才能有效地用于对 UWB-SAR 的运动补偿。

2 UWB-SAR 回波的新特点

UWB-SAR 工作在低频、具有大波束角的特点给成像带来了许多新问题。

2.1 多普勒中心对天线指向的不敏感

正侧视 SAR 的多普勒中心频率应该为 0, 而实际上雷达天线波束指向的误差会造成多普勒中心频率的偏移。当天线姿态在方位向的指向为 θ 时, 若误差大小为 $\Delta\theta$, 则多普勒频偏 Δf 为

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta + \Delta\theta) \quad (1)$$

一般天线波束指向偏差可控制在 1° 以内。所以, 对 UWB-SAR, 天线波束指向偏差形成多普勒频偏很小, 不足以影响成像。另一方面, 天线姿态不稳使得多普勒信号幅度产生调制。以具有高斯形的针状波束为例, 当天线姿态在方位向的指向误差大小 $\Delta\theta$ 按正弦规律变化时, 由其引起的增益误差 ΔG 与天线增益 G 的比也将按正弦规律变化, 并可表示为^[5]

$$\frac{\Delta G}{G} = 2 \frac{SL}{ML} = \left(\frac{-2\alpha\theta}{\theta_{3dB}^2} \right) \Delta\theta \quad (2)$$

其中 α 为加权因子, θ_{3dB} 为天线的 3dB 宽度, (SL/ML) 为由于幅度调制产生的峰值旁瓣比。式(2)也可以决定天线波束的指向精度要求。假设, 某 UWB-SAR 波束角 $\theta_{3dB} = 55^\circ$, 则当飞机的偏航角达到 5.5° 时, 在波束边缘 $\theta = \theta_{3dB}$ 处, 还可以满足系统峰值旁瓣比小于 -25dB 的约束条件。

由以上分析可知, 正侧视 UWB-SAR 对天线波束指向精度要求很低, 不用估计多普勒中心频率。

2.2 正侧闪烁现象

UWB SAR 工作波长较长, 大多数目标处于雷达散射截面(RCS)衰减大的瑞利散射区, 雷达接收到的信号仅仅反映了散射体粗线条的总体轮廓, 而略去了大部分精细的结构信息。因此, 一般目标可简单模型化为目标主侧面与地表面之间形成的一个长直二面角^[6]。二面角目标的一个最重要特征是其散射特性随电磁波入射角的变化而变化。当 SAR 方位向天线波束指向为二面角法线方向时, 回波能量最强, 一旦偏离法线方向, 回波能量迅速衰减, 这种现象称为“正侧闪烁”。

在 UWB-SAR 中, 正侧闪烁现象使得目标回波延方位向起伏, 如图 1 所示, 因此如果回波中包含能量较强的二面角目标, 则多普勒参数估计必将存在较大误差。但我们可以通过去除“估计坏点”(偏离理想值较大的点)来提高多普勒参数估计精度。

2.3 要求前向运动误差小

载机前向运动误差将造成多普勒频率和多普勒调频率

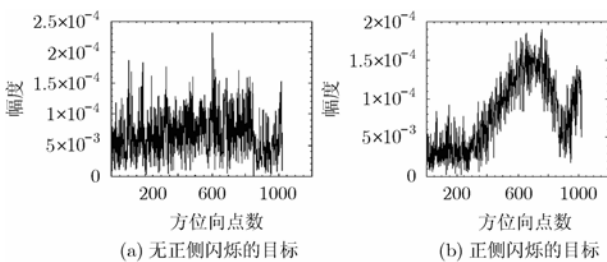


图 1 两种目标的方位向回波信号

的变化, 飞机速度和多普勒调频率具有如下对应关系:

$$K_d(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Phi(t)}{dt^2} = K_0 + \Delta K_d(t) + \delta K_d(t) \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad K_0 = -\frac{2V^2}{\lambda R_0} \quad (4)$$

$$\Delta K_d(t) = -\frac{4V\Delta v(t) + 2\Delta v^2(t)}{\lambda R_0} \quad (5)$$

$$\delta K_d(t) = -\frac{2}{\lambda R_0} [x(t) - x_0] \frac{d\Delta(t)}{dt} \quad (6)$$

多普勒调频率的准确性在方位压缩中至关重要, 因此必须精确补偿调频率的变化。但是当飞机速度变化剧烈时, 造成的多普勒调频率误差的却不可能精确补偿, 不过文献[7]给出了忽略 $\delta K_d(t)$ 近似补偿调频率误差的条件。但是在 UWB-SAR 中, 为了精确补偿这些误差, 还需要一些额外的处理过程, 这些过程将在 3.2 节中介绍。

由于 MD 自聚焦方法可以有效地估计和补偿多普勒调频率误差, 因而在高频 SAR 中得到了广泛的应用, 但它用于 UWB-SAR 中还存在很多问题有待解决。

3 UWB-SAR 中改进的 MapDrift

3.1 MD 原理

文献[8]详细分析了 MD 自聚焦方法的原理。MD 方法提出后, 得到了广泛的应用, 为了使 MD 方法能够用于长孔径 SAR 运动补偿, 邢孟道提出了子孔径补偿方法^[9]。文献[10]对 MD 方法中噪声的影响进行了分析, 提出了自适应 MD 方法。

MD 的实现方法主要有 3 种: (1) 直接相关子孔径前后两半信号来估计调频率; (2) 分别匹配压缩前后两半信号生成图像, 计算两幅图像的平移量, 由此得出调频率; (3) 去调频后将方位信号分成前后两半, 估计信号频谱间的平移量, 由此得出调频率。

第 1 种方法直接利用 MD 的原理, 但由于实际数据包含多个目标并且信噪比较低, 所以估计精度很差。后两种方法的本质相同, 都是估计图像间的变化, 而方位压缩后的信噪比提高, 因此估计的稳健性大大提升。此外由于去调频方法比匹配压缩的运算量小, 所以第 3 种实现方法是最优的。

第 3 种方法的信号分析始于距离压缩后的信号, 其方位向信号分量为

$$s_a(t) = \exp\left\{-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R} t^2\right\}, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (7)$$

其中 v 为飞机速度, λ 为发射信号波长, R 为目标到航迹的最小距离, t 为方位时间, T 为方位时间长度。

采用参考信号 $s(t)$ 去调频后, 将该信号划分成前后长度相同的两部分。

$$s(t) = \exp\left\{j\pi \frac{2v_0^2}{\lambda R} t^2\right\}, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (8)$$

$$s_{a1}(t) = \exp\left[-j\pi \frac{2(v^2 - v_0^2)}{\lambda R} t^2\right], \quad -\frac{T}{2} \leq t < 0 \quad (9)$$

$$s_{a2}(t) = \exp\left[-j\pi \frac{2(v^2 - v_0^2)}{\lambda R} t^2\right], \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (10)$$

式(9), 式(10)经过 FFT 变换, 就可以得到图像 M_1 , M_2 :

$$M_1(f) = C \cdot S\left[f - \frac{(v^2 - v_0^2)T}{2\lambda R}\right] \quad (11)$$

$$M_2(f) = C \cdot S\left[f + \frac{(v^2 - v_0^2)T}{2\lambda R}\right] \quad (12)$$

其中 C 为无关的常数项, $S(f)$ 为

$$S(f) = \int_{-T/4}^{T/4} \exp\left[-j\pi \frac{2(v^2 - v_0^2)}{\lambda R} t^2\right] \exp(-j2\pi ft) dt \quad (13)$$

M_1 、 M_2 间的位移 Δn 可以通过相关得到, 由此可得多普勒调频率偏差为

$$\Delta k = \frac{\Delta n}{T/2} = \frac{-2(v^2 - v_0^2)}{\lambda R} \quad (14)$$

因此多普勒调频率为

$$k = k_0 + \Delta k = \frac{-2v_0^2}{\lambda R} + \Delta k = \frac{-2v^2}{\lambda R} \quad (15)$$

欲有效应用 MD 自聚焦方法, 除了信噪比应该足够大之外, 必须满足以下条件: (1) 成像地域中存在较强的点目标, 而在均匀场景下(如农田)的聚焦性能下降; (2) 子孔径长度大于半个合成孔径, 以保持子图像间的相关性, 提高估计精度。

UWB-SAR 的波长要比传统高频 SAR 的波长大很多, 要达到米级的分辨率, 合成孔径时间数十秒, 而飞机在合成孔径孔径内的运动很复杂, 所以 MD 估计出的速度将是一种等效速度, 而不是飞机瞬时速度。因此要想准确得到飞机的飞行速度, 必须减小处理子孔径的长度。

但是子孔径长度又不能太小, 否则估计的调频率存在很大的误差, 因为回波采样后, 生成的图像也是离散的, 像素间的采样间隔为 prf/N (prf , N 分别为脉冲重复频率和孔径点数的一半), 所以图像间的位移 Δn 服从一种平均分布。该分布的最大误差是采样间隔的一半, 对应的最大多普勒调频率误差为

$$\delta(k) = \text{prf}^2 / (2N^2) \quad (16)$$

可见 UWB-SAR 中子孔径的划分受到相互矛盾因素的限制。

3.2 改进的 MD 方法

首先改进的 MD 方法将子孔径长度划分的足够小, 以保证调频率尽量真实反映飞机的瞬时运动; 同时为了减小孔径过短造成的方差, MD 方法估计多个距离门上的回波, 然后求平均。由于调频率不仅与飞机速度有关还与目标距离有关, 所以在目标距离已知的条件下, 可以将飞机速度作为估

计量:

$$V = \sqrt{K\lambda R/2} \quad (17)$$

将每个距离门估计得到的不同调频率转换为统一的飞机速度, 然后求平均就可以有效地降低估计方差; 另外在求平均的过程中, 剔除那些误差较大的估计值, 以进一步提高估计的稳健性; 同时可以通过循环估计(内循环)更进一步提高估计精度。

改进的 MD 方法有效融合了子孔径思想, 可满足长孔径数据成像处理的要求。同时本文提出的改进 MD 方法通过相位误差循环补偿(外循环), 解决了子孔径数目有限, 飞机速度估计过于离散, 多普勒调频率误差不能彻底补偿的问题。

如果以某一单位幅度正弦运动误差为例, 假设用两个子孔径来估计误差, 并且在此期间飞机速度刚好变化一个周期, 如图 2 所示。由于在一个孔径内飞机速度是变化的, 所以用 MD 方法估计出的速度将是该孔径内速度变化范围内的一个中间值, 如图 2 中的 A , B 两点, 由这两个估计值可以插值得到该子孔径内每个采样时刻的飞机速度, 如图 2 中虚线所示, 所以经过一次相位补偿后, 飞机的运动误差就会减小, 如图 2 中粗虚线所示。我们可以由此推断得到, 经过多次运动误差补偿之后, 可以将飞机的复杂运动误差降到设定的程度。

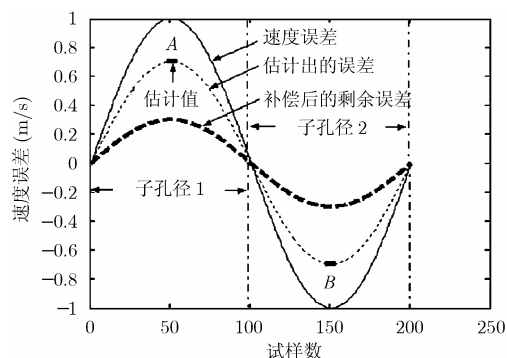


图 2 循环相位误差补偿

这种外循环, 形式上很简单, 但是却可以补偿复杂的高阶运动误差, 从原理上将 MD 方法扩展。分析可以发现: 当速度估计频率不小于飞机运动变化频率时, 飞机的运动基本可以完全补偿; 当估计频率小于变化频率时, 估计误差就将会正弦波动。当飞机的运动变化频率和变化幅度都很大时, 这种改进的 MD 方法也会失效。

本文提出的改进的 MD 方法如图 3 所示, 其具体流程如下:

(1) 将方位向信号划分成互不重叠的若干个子孔径, 按照某种准则(如能量最大), 选取若干个(如 20%)距离门上的方位信号以构成一个临时矩阵。

(2) 根据飞机速度 v_0 对应的调频率 $k_0 = 2v_0^2/(\lambda R)$ 生成去调频参考信号, 然后进行去调频处理。

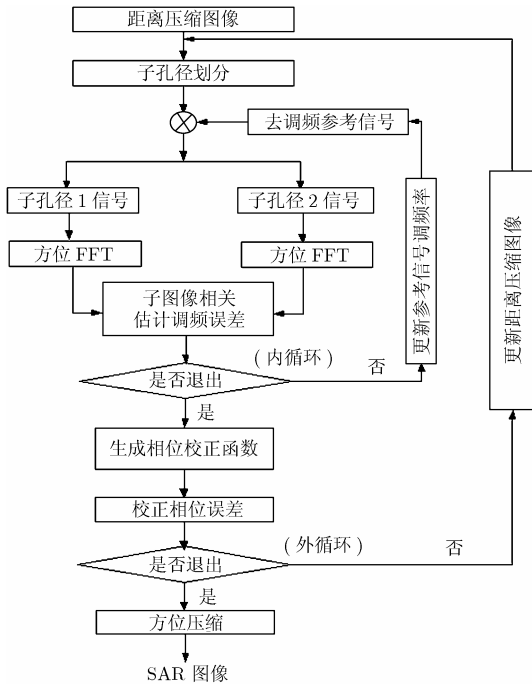


图3 改进 MD 流程图

(3) 将去调频后信号划分为前后长度都为 N 的两部分, 分别作 FFT 变换。

(4) 求频谱的相关, 寻找相关的最大值点, 计算其偏离中心位置的大小 Δn , 得出调频率偏差的估计值 $\Delta k = \Delta n \cdot \text{prf}^2 / N^2$, 去除调频率偏差绝对值较大的估计, 然后平均剩余的偏差估计值, 得到误差估计。更新信号的调频率 $k = k + \Delta k$ (第一次循环时令 $k = k_0$)。

(5) 以某种规则(如固定循环 2 次)判断是否退出循环(内循环)。如果退出, 则根据各个子孔径的估计值得到调频率的变化量, 通过二次积分得到相位误差校正函数; 否则跳转到第 2 步, 用 k 更新 k_0 , 继续下一次误差估计。

(6) 校正相位误差。

(7) 以某种规则(如固定循环 2 次)判断是否退出循环(外循环)。如果退出, 则用更新后的速度值生成方位压缩函数, 然后进行方位压缩后得到最终的 SAR 图像; 否则用相位误差校正后的数据更新距离压缩图像, 跳转到第 1 步继续下一次误差估计。

改进后的 MD 方法通过内循环、坏点剔除策略有效地控制了调频率估计的精度; 通过外循环多次相位校正, 保证了在多普勒调频率估计次数有限的情况下, 尽可能有效地补偿飞机的复杂运动造成的二次以及高次相位误差, 并最终得到聚焦优良的 UWB-SAR 图像。内外两层循环相结合, 可确保该改进的 MD 方法在一定程度上适用于均匀场景。我们也可以称内循环为“调频率估计循环”, 称外循环为“相位补偿循环”。

4 改进 MD 方法实际数据补偿效果

为了验证改进 MD 方法的有效性, 我们选取某段

UWB-SAR 实际数据进行成像, 所选取数据方位向 8192 点, 长度约为 4km; 距离向 4096 点, 长度约为 2km, 初始约为 105m/s。(下文各图是从这段数据所成图像中抽取的一部分, 如此便于比较)

图 4 为不作 MD 运动补偿的成像结果; 图 5, 图 6 分别为 MD 不作内循环和不做外循环的成像结果; 图 7 为改进 MD 方法的成像结果。对比这 4 幅图像中的目标(如农田、道路、房屋等)可见: 成像质量依次变好。

图 5, 图 7 的结果表明了内循环的必要性, 图 5 在估计多普勒调频率时没有作内循环, 所以估计出的参数不准确, 不可能补偿真实的运动误差, 因而图像散焦; 图 6 中结果表明了外循环的必要性。图 5 没有经过外循环补偿相位误差, 所以不能有效补偿子孔径中飞机的运动变化, 因而图像质量虽然较图 5 有明显改进, 要比图 7 差。由于图 7 的飞行较稳定, 高次相位误差较小, 所以图 6, 图 7 间的变化不是非常突出, 但是图 7 成像质量也有明显改善。

我们将这些图中的同一点目标分别取出并放大显示, 点目标的聚焦性能更明显地说明了改进 MD 方法的有效性。经过改进 MD 方法补偿后, 图像聚焦良好、对比度得到很大的提升。

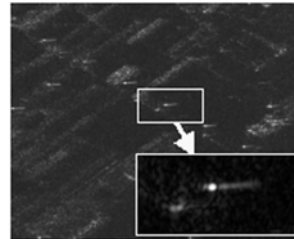


图4 MD 前的散焦图像

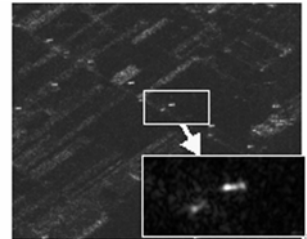


图5 MD 不作内循环估计调频率的图像

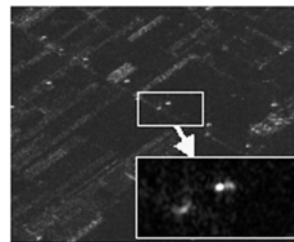


图6 MD 不作外循环补偿相位误差的图像

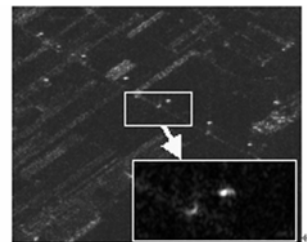


图7 经过改进 MD 自聚焦的图像

5 结束语

UWB-SAR 的波长长, 合成孔径时间长, 数据量大, 因此运动补偿存在很多难点。本文提出的改进 MD 运动补偿方法, 消除了传统 MD 方法用于 UWB-SAR 运动补偿的缺陷, 通过内外两重循环估计和补偿, 有效补偿了 UWB-SAR 中存在的运动误差, 得到了聚焦优良的图像。内循环, 保证了调频率估计的稳健性; 外循环, 保证了二次以及高次相位误差补偿的准确性。改进的 MD 方法简单, 可有效应用于多种不同散射环境下。

参 考 文 献

- [1] Soumekh M. Reconnaissance with ultra wideband UHF synthetic aperture radar[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1995, 12(4): 21-40.
- [2] Madsen S N. Estimating the Doppler centroid of SAR data. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*[J]. 1989, AES-25(2): 134-140.
- [3] Mancill C E and Swiger J M. A map drift autofocus technique for correcting higher order SAR phase error[C]. 27th Annual Tri-Service Radar Symposium Record, Monterey, CA, 1981: 391-400.
- [4] 郭微光. 机载超宽带合成孔径雷达运动补偿研究. [博士学位论文], 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [5] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 第 6 章: 324-326.
- [6] Allen M R and Jauregui J M. FOPEN SAR detection by direct use of simple scattering physics [J]. *IEEE International Radar Conference*, Alexandria Virginia USA, 1995: 152-157.
- [7] 黄源宝等. 载机速度不稳定对 SAR 成像的影响及补偿方法 [C]. CSAR 会议集, 合肥, 2003: 323-326.
- [8] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*[M]. Norwood, MA: Artech House, 1995: 246-252.
- [9] 邢孟道. 基于实测数据的雷达成像方法研究[D]. [博士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2002.
- [10] 姚萍等. 采用方位向自适应滤波器提高 SAR 自聚焦性能[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(8): 1066-1072.
- [11] 郭微光等. 一种基于机载SAR原始回波的多普勒参数估计方法[J]. *国防科技大学学报*, 2003, 25: 41-44.
- 王 建: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为超宽带 SAR 实时成像算法及运动补偿研究.
- 王 亮: 男, 1979 年生, 博士生, 从事 SAR 雷达成像、图像后处理等领域的研究工作.
- 薛国义: 男, 1975年生, 博士生, 从事实时信号处理与SAR运动补偿方面的研究工作.
- 周智敏: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事 SAR 系统设计、高速实时信号处理等领域的研究工作.