

方位多通道合成孔径雷达数据重建方法

李云涛^{*①} 陈永光^{①②} 邓云凯^③ 尹灿斌^①

^①(装备学院 北京 101416)

^②(军械工程学院 石家庄 050003)

^③(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 多通道合成孔径雷达可以突破传统 SAR 不能同时实现高分辨宽测绘带的限制, 是 SAR 发展的必然趋势, 在成像处理时, 它必须重建方位均匀采样数据。该文提出了一种基于升降调频斜率技术的处理方法, 利用线性调频信号特性对方位非均匀数据进行解线性调频处理, 然后采用升采样参考函数进行逆解线性调频处理, 即完成方位数据的均匀重建。文中给出了信号处理流程, 并与重建滤波器组法进行了比较。仿真结果证明了理论分析的正确性。

关键词: 多通道合成孔径雷达; 非均匀间隔; 重建滤波器组法; 升降调频斜率法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)03-0628-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00702

Data Reconstruction Method for Azimuth Multi-channel SAR

Li Yun-tao^① Chen Yong-guang^{①②} Deng Yun-kai^③ Yin Can-bin^①

^①(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

^②(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

^③(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Multi-channel SAR can achieve high resolution and wide swath at the same time, which overcoming the inherent limitations of conventional SAR system. Azimuth uniformly sampled data must be reconstructed in imaging procession. A novel method based on fall-rise chirp rate technology is proposed. The original signal is dechirped firstly; then, it is up sampled, and reconstructed by inverse processing of dechirping. Data processing flow is given, and the reconstruction effect of this new method and classical ways using reconstruction filter banks are compared. All simulation results prove the correctness of theoretic analysis.

Key words: Multi-channel SAR (MSAR); Nonuniform sampling; Reconstruction filter banks method; Fall-Rise Chirp Rate (FRCR) method

1 引言

多通道合成孔径雷达以其能够获取更多的目标信息和同时实现高分辨率宽测绘带的优点, 受到国内外学者的广泛关注。1991年, Griffiths等人提出在俯仰向采用平面阵列天线抑制距离模糊, Currie等人提出在方位向切分天线来抑制方位模糊及两种方式的结合, 这些技术推动了多通道 SAR 系统的研究。2001年, Suess等人提出了一种俯仰向处理的新方法, 这种被称为 HRWS(高分辨率宽测绘带)SAR 的系统, 这种方法可以在抑制距离模糊的同时获得很高的天线增益。

方位MSAR处理时, 为了在合成孔径期间形成等间隔的空间采样, 以便利用常规SAR的处理算法进行方位压缩, 需要对脉冲重复频率(PRF)进行严格限制。方位向采用 N 个子孔径接收信号, 为保证

在相邻脉冲间形成的空间采样点方位向上等间隔分布, 平台速度 V_a 和PRF需满足关系: $PRF = 2V_a / (N \cdot d)$, 其中 d 为子孔径间距, 这是最优PRF选取值。在此PRF下工作的方位向多通道SAR相当于以脉冲重复频率 $N \times PRF$ 工作的单通道SAR, 然而在实际星载SAR系统中, PRF的选择还需考虑到星下点回波时刻、脉冲回波时刻以及方位模糊比等因素, 因此PRF不一定能恰好选取到最优值, 这时相邻脉冲形成的空域采样点将不再是等间隔分布, 若不经预处理而直接对这些非等间隔分布采样点进行常规SAR的方位向压缩, 必然导致成像性能的恶化。为此, 很多学者开展了多通道SAR方位处理算法的研究。Younis^[1]提出了相位补偿算法, 对原始信号进行相位修正以实现方位信号的重采样。文献[2]提出了一种空时方法应用于小卫星星座构成的稀疏阵列。此方法的基本思想是白噪声和色噪声混合能量的最小化, 其实现是抑制多普勒模糊的方位信号空间滤波器和匹配滤波器的折衷。文献[3]中对实测数据处

2011-07-08 收到, 2011-11-03 改回

*通信作者: 李云涛 03107002@163.com

理的滤波器组方位处理算法能够实现多个混叠子孔径信号方位频谱的无模糊恢复。文献[4]对该算法进行了详细阐述，并扩展到了猝发工作模式^[5]。该算法基于一系列线性方程的求解以实现混叠甚至是非均匀间隔数据采样的方位频谱无模糊恢复。文献[6]根据采样序列的数字谱由原始谱加权而成，加权系数和采样频谱无关的原理，计算出加权系数即可得到均匀采样序列的频谱。文献[7]提出了具有较高补偿精度和计算效率的非周期内插零的方法，在两个采样点之间插入非周期的零值，利用快速傅里叶变换在频域实现均匀采样重构。文献[8]通过频谱重构方法对周期性非均匀 SAR 信号进行频谱重构，得到了性能良好的非均匀信号频谱。

然而，上述算法均需要通道间隔，平台速度等先验知识，同时计算成本较高。本文提出一种基于降升调频斜率的处理方法，能够快速实现多通道 SAR 方位非均匀数据的无模糊恢复，提高了运算速度，适应于实时处理。

2 方位多通道 SAR 方位信号重建

方位 MSAR 若以偏置相位中心(DPCA)模式工作，则方位采样是均匀的，而在非最优 PRF 下，一系列发射脉冲经方位向多孔径接收后，方位向上形成的空间采样点是并非等间隔分布的，方位采样点模型如图 1 所示。

图 1 中 d_{epc} 为等效相位中心(EPC)间隔， d_T 为相邻脉冲重复周期(PRI)发射阵元的间隔， d_R 为相邻 PRI 两组 EPC 间隔。由图 1 可见，当系统满足 DPCA 条件，有 $d_R = d_{epc}$ ；当 PRF 非最优时， $d_R \neq d_{epc}$ ，多通道 SAR 方位采样不均匀。

然而，对于一个发射脉冲， N 个子孔径接收信号在方位向形成的采样点为等间隔分布；另外，针对其中任意的一个子孔径，即使在非最优 PRF 下，这一子孔径的全部接收采样点在方位向上也是等间隔分布的。下面对采用空时 2 维处理的滤波器组法

进行分析，并引出降升调频斜率法对方位数据进行重建。

2.1 重建滤波器组法方位数据重建

以 $1/N$ 倍 Nyquist 采样率对信号进行采样得到 N 个独立表示，则可以由这 N 个表示的混叠多普勒频谱无模糊重建信号。这就是说任意带限信号 $U(f)$ 可以由输入为 $U(f)$ 的 N 个线性系统响应函数 $H_j(f)$ 唯一确定，其输出为以 $1/N$ 倍 Nyquist 采样率采样的信号 $U_j(f)$ 。这就意味着数据在平均意义上完全满足 Nyquist 采样率，即每一时刻的采样数目是充足的，与由空间采样不一致造成的空间分布无关^[9]。

每个通道的信号以 PRF 进行方位采样接收，根据有效采样率可知，信号最大方位带宽为 N 倍 PRF，系统特性由系统矩阵 $\mathbf{H}(f)$ 给定，其包括以 PRF 的整数倍移频的所有通道响应 $H_j(f)$ 。 $\mathbf{H}(f)$ 的表达式为

$$\mathbf{H}(f) = \begin{bmatrix} H_1(f) & \cdots & H_N(f) \\ H_1(f + \text{PRF}) & \cdots & H_N(f + \text{PRF}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(f + (N-1)\text{PRF}) & \cdots & H_N(f + (N-1)\text{PRF}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $H_j(f) = \exp\left\{-j\pi\left[\frac{\Delta x_j^2}{2\lambda R_0} + \frac{\Delta x_j}{V_a}f\right]\right\}$ ， Δx_j 为第 j 个接收阵元与发射阵元间的距离。

对 $\mathbf{H}(f)$ 求逆即可得到矩阵 $\mathbf{P}(f)$ ，它的行由 N 个函数 $P_j(f)$ 组成，每一列的 $P_{jm}(f)$ 定义为中心频率 $f_{0,m} = (-N/2 + m - 1/2)\text{PRF}$ 附近宽度为 PRF 第 m 个子带函数，相应的间隔可表示为

$$I_m = f_{0,m} \pm \frac{\text{PRF}}{2} = \left[\left(-\frac{N}{2} + m - 1\right)\text{PRF}, \left(-\frac{N}{2} + m\right)\text{PRF} \right] \quad (2)$$

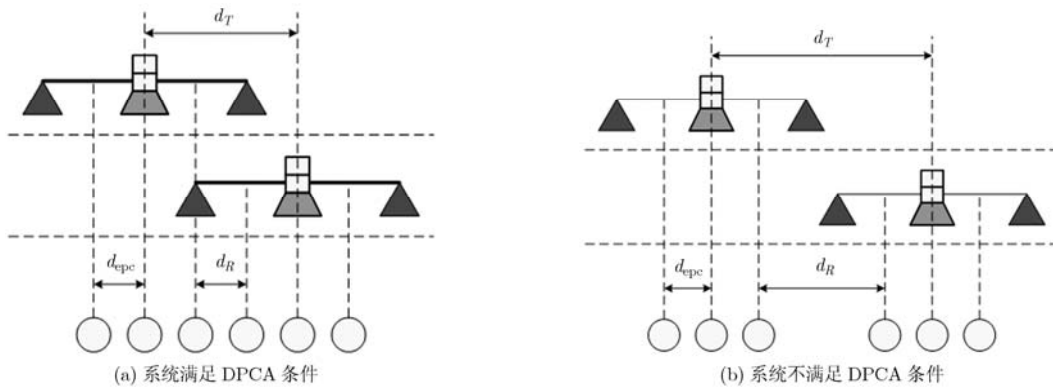


图1 方位MSAR相位中心分布情况

式中 $m = 1, 2, \dots, N$ 。所有的 I_m 组成了系统的整个多普勒频谱, 且所有 $P_{jm}(f)$ 组成了通道 j 的多通道处理滤波器表示函数 $P_j(f)$ 。

原始信号 $U(f)$ 可由适当重建滤波器 $P_j(f)$ 及所有加权接收通道相关叠加来对每个通道滤波恢复。需要注意的是重建滤波器函数 $P_j(f)$ 随系统的 PRF 是变化的, 即 $P_j(f, \text{PRF})$ 将是更精确的表示。

由式(1)可知, 重建滤波器组法恢复数据需要已知平台速度, 每个接收阵元与发射阵元间的距离及成像几何参考距离等先验知识来构建重构函数, 同时还要进行矩阵求逆过程, 计算量较大。为此, 本文借鉴解线性调频技术, 对多通道 SAR 方位非均匀采样数据进行恢复处理, 此方法对系统先验知识需求较少, 同时还能降低计算开销。

2.2 降升调频斜率处理方法

SAR 系统中多采用线性调频(LFM)脉冲信号。由于 LFM 信号的特殊性质, 对它的处理不仅可以采用一般的匹配滤波方式, 还可用特殊的解线性调频(dechirping)方式来处理。解线性调频脉冲方式是针对 LFM 信号提出的, 对不同延迟时间信号进行脉冲压缩, 在一些特殊场合, 不仅运算简单而且可以简化设备。

SAR 发射信号为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\{j2\pi f_0 t + j\pi k_r t^2 + j\varphi\} \quad (3)$$

式中 k_r 为调频斜率, f_0 为载频, t 是快时间, φ 为信号传输造成的随机相位。参考信号为

$$s_{\text{ref}}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{pd}}}\right) \exp\{j2\pi f_{\text{ref}} t + j\pi k_{\text{ref}} t^2 + j\Omega\} \quad (4)$$

式中 T_{pd} , f_{ref} , k_{ref} , Ω 分别表示参考的脉冲宽度、多普勒中心频率、调频斜率、初始相位。若 T_{pd} 大于 T_p , 则在解线性调频后存在残余相位, 该残余视频相位可通过去斜处理进行补偿, 即是解线性调频后的距离频域信号乘以相位因子 $\exp(-j\pi f_i^2 / K_r)$, $f_i = -2K_r R_{\Delta} / c$ 。

将本地参考信号取共轭后与接收到的雷达信号相乘, 结果可表示为

$$\begin{aligned} s_{\text{ifout}}(t, \tau) &= s(t) \times s_{\text{ref}}^*(t) = \text{rect}(t/T_p) \text{rect}(t/T_{\text{pd}}) \\ &\cdot \exp\{j\pi(k_r - k_{\text{ref}})t^2\} \exp\{j2\pi(f_0 - f_{\text{ref}})t\} \\ &\cdot \exp\{j(\varphi - \Omega)\} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)相位中的第 1 项为 2 次相位项, 表现为以 $k_r - k_{\text{ref}}$ 为调频斜率的线性调频信号。利用降调频原理, 可以使接收信号带宽降低, 从而降低对采样频率要求。其基本思想可用图 2 和图 3 所示。

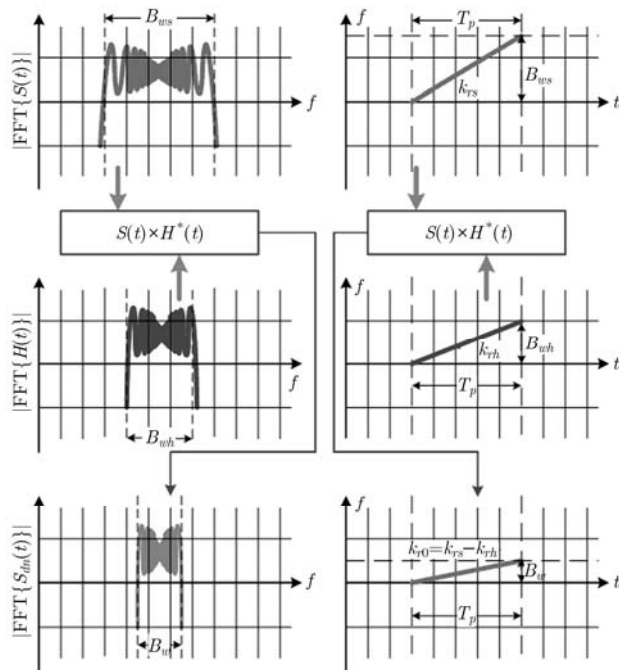


图 2 调频斜率存在误差时的降调频示意图

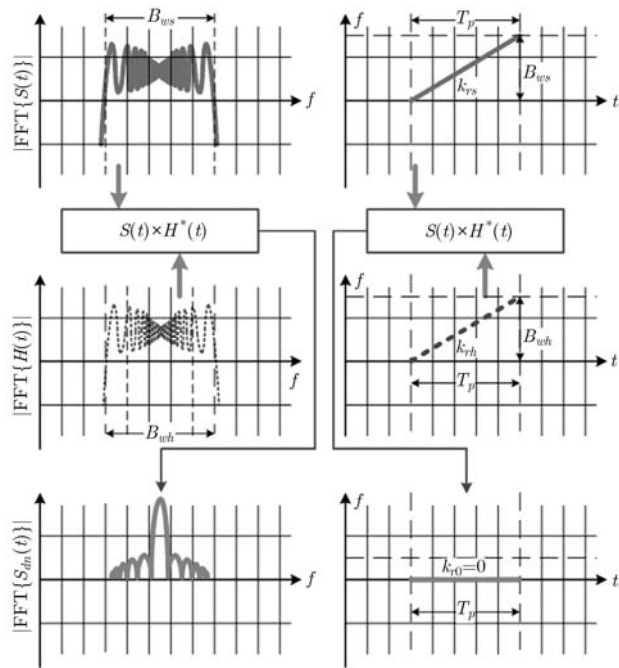


图 3 调频斜率相等时的降调频示意图

由图 2 和图 3 可知, 当参考信号与 SAR 信号调频斜率不同时, 两信号进行降调频处理的结果仍然是 LFM 信号, 只是信号调频斜率为两者之差, 信号带宽也随着降低; 而当参考信号与原始 SAR 信号调频斜率相等时, 降调频操作后的信号频谱表现为脉冲形式, 即信号的调频斜率为零, 信号带宽也为零, 这时仅需要很小的采样率就可完成对信号的无模糊采样。

依据 SAR 成像原理可知，SAR 回波信号经距离压缩后的方位信号仍然是 LFM 信号，因此，同样可以采用解线性调频技术进行处理。对于多通道 SAR，将每一通道信号进行方位降调频，其中参考函数中的 f_{ref} 为多普勒中心频率，而对于正侧视 SAR 来说，其值为零。然后依据通道数目，采用相同调频斜率的升采样率参考函数对通道信号进行升调频处理，这样每一通道的方位信号将转变为无失真均匀采样信号，最后对通道间信号进行综合处理，即可完成多通道 SAR 的方位数据重建，其处理流程如图 4 所示。

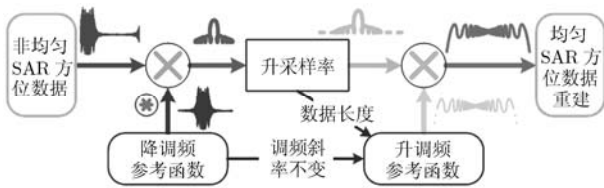


图 4 降升调频斜率方位数据重建流程图

3 方位数据重建方法实验仿真

本节以方位三通道 X 波段星载 SAR 为例对方位重建算法进行验证。以非最优发射 PRF 工作，对点目标和面目标回波进行采集，然后用方位重建算法进行处理，对结果进行分析。其中面目标模型以清晰的 BMP 格式 SAR 图像为蓝本，以成像区域为边界设定场景目标坐标，图像归一化灰度值设为目标散射系数。

3.1 仿真参数

借鉴 TerraSAR-X 的系统参数设置，对采用表 1 所示参数的方位多通道 SAR 系统进行成像处理。

为节省计算开销，仿真场景设为 $1.0 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ ，如图 5 所示。

3.2 方位数据重建结果比较

采用表 1 所示参数分别对点目标和面目标的回波进行数据采集，然后用滤波器组法和降升调频斜

表 1 多通道 SAR 方位重建系统参数

参数	表示符号	数值
卫星高度	H_s	514 km
发射信号载频	f_c	9.65 GHz
发射信号带宽	B_r	100 MHz
信号时宽	T_p	4 μs
天线俯仰尺寸	h_{ant}	0.704 m
子孔径方位尺寸	l_{ant}	3 m
天线方位孔径	N_{az}	3
多普勒带宽	B_d	1129 Hz
最优发射 PRF	PRF_{opt}	1268 Hz
实际发射 PRF	PRF	631 Hz

率法对方位非均匀数据进行重建。

图 6 为多通道相位补偿点目标方位剖面，由图可见主信号两侧出现明显的旁瓣，即方位信号混叠；图 7 为多通道相位补偿面目标成像结果，图像出现模糊，这是方位数据非均匀采样所致。

图 8 为滤波器组法点目标方位剖面，在方位向上仅有目标响应，即滤波器组法可以重建方位非均匀采样数据，图 9 中面目标图像验证了这点。图 10 为降升调频斜率点目标方位剖面，同样消除了旁瓣，即降升调频斜率法可以实现方位非均匀采样数据重建并可得到与图 9 相似的面目标图像，如图 11 所示。

由图 6，图 8 和图 10 点目标图像可见，仅利用通道相位补偿后的点目标方位剖面 3 dB 宽度为 5 m，而经滤波器组法和降升调频斜率法重建的方位 3 dB 宽度均为 2 m，基本达到了理论方位分辨率，可见本文所述的降升调频斜率方位处理方法可以对方位非均匀数据进行重建，同时也能够达到和滤波器组法同样的方位分辨率。

4 结束语

方位多通道星载 SAR 系统的发射 PRF 一般不满足最优条件，为获得方位高分辨，非均匀方位数据的均匀重建算法是成像处理中的核心问题。文中引入基于降升调频斜率技术的处理方法，克服了重

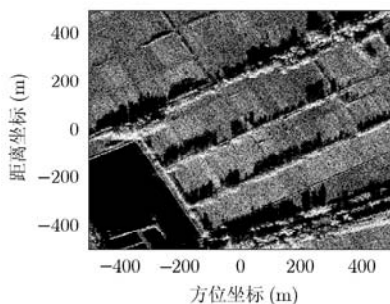


图 5 成像场景设置

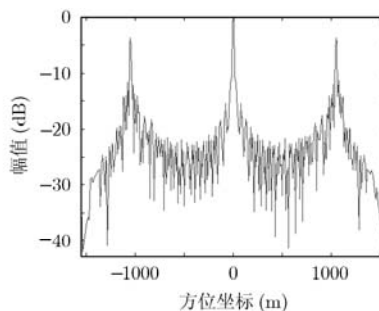


图 6 多通道相位补偿点目标方位剖面，3 dB 宽度 5 m

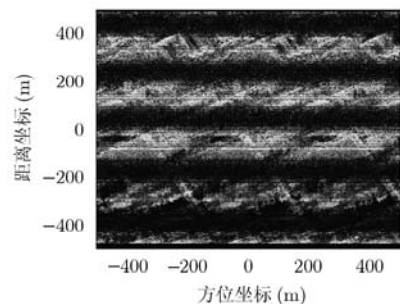


图 7 多通道相位补偿面目标成像

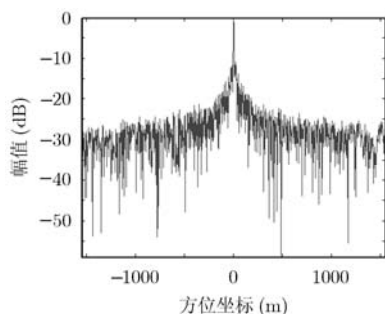


图8 滤波器组法点目标方位剖面, 3 dB 宽度 2 m

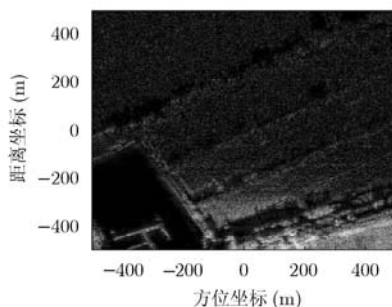


图9 滤波器组法面目标成像

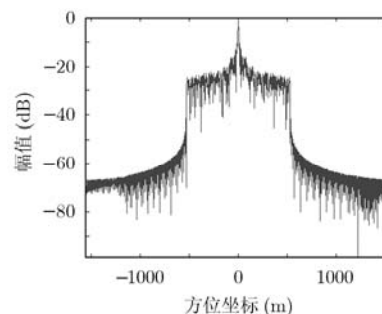


图10 升降调频斜率法点目标方位剖面, 3 dB 宽度 2 m

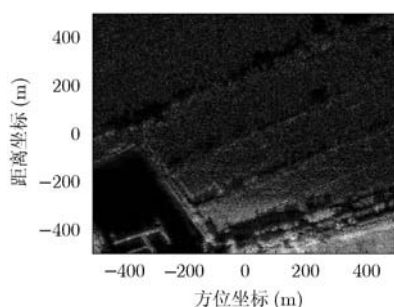


图11 升降调频斜率法面目标成像

建滤波器组法需要较多系统先验知识的缺陷, 并给出了处理流程; 采用上述两种方法对工作在非最优 PRF 条件下的方位三通道星载 SAR 的回波进行了处理。仿真结果表明两种方法均可以实现方位非均匀采样数据的均匀重建, 同时可以获得同样的理论方位分辨率, 而降升调频斜率法仅需要已知回波的方位调频斜率, 且计算量较小, 适合实时处理。

如何自适应地对真实数据进行方位解线性调频处理, 同时与 DBF 技术的结合是进一步研究的方向。

参考文献

- [1] Younis M. Digital beam-forming for high resolution wide swath real and synthetic aperture radar[D]. Forschungsbericht aus dem Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe (Dissertation), Karlsruhe, Germany, 2004.
- [2] Li Z, Wang H, Su T, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82-86.
- [3] Krieger G, Fiedler H, Rodriguez-Cassola M, *et al.* System concepts for bi- and multistatic SAR missions[C]. Proceedings of the ASAR Workshop 2003, Saint-Hubert, Quebec, Canada, June 2003: 331-339.
- [4] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260-264.
- [5] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Multi-channel scanSAR for high-resolution ultra-wide-swath imaging[C]. Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Friedrichshafen, Germany 2008: 79-83.
- [6] 梁波, 储彬彬, 郭泽成. SAR 方位向非均匀采样频谱重构算法及误差分析[J]. *电子质量*, 2010, (2): 2-6.
Liang Bo, Chu Bin-bin, and Guo Ze-cheng. Spectrum reconstruction algorithm for non-uniformly sampled SAR signals in azimuth and error analysis [J]. *Electronics Quality*, 2010, (2): 2-6.
- [7] 陈龙永, 梁兴东, 丁赤飏. 一种 SAR 成像中的非均匀采样重构方法[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(5): 1242-1245.
Chen Long-yong, Liang Xing-dong, and Ding Chi-biao. Non-uniform reconstruction method in SAR imaging[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 22(5): 1242-1245.
- [8] 刘光炎, 孟喆, 胡学成. 非均匀采样 SAR 信号的不模糊重构与成像[J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(6): 850-853, 858.
Liu Guang-yan, Meng Zhe, and Hu Xue-cheng. Unambiguous reconstruction and imaging of nonuniform sampling SAR signal[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, 39(6): 850-853, 858.
- [9] Gebert Nicolas. Multi-channel azimuth processing for high-resolution wide-swath SAR imaging[D]. Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH) (Dissertation), April 2009.

李云涛: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为新体制 SAR 信号处理与空间信息对抗技术。

陈永光: 男, 1962 年生, 副院长, 教授, 博士生导师, 研究方向为强电磁环境模拟与防护、电子战作战效能评估等。

邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像技术、SAR 系统总体设计。

尹灿斌: 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 研究方向为电子对抗技术。