

高分辨率宽测绘带星载 SAR 距离向 DBF 处理

李 杨^{*①②} 黄杰文^{①②} 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 该文在研究星载 SAR 使用距离向数字波束形成(DBF)实现宽测绘带的基础上, 通过理论推导和仿真分析了仅做时域加权 DBF 处理对成像结果幅度和分辨率的影响, 并进一步针对 DBF-SAR 扫描接收方式研究了 4 种适用于不同发射信号脉宽的距离向 DBF 处理方法。仿真验证了 4 种处理方法在各自的前提下能有效实现距离向宽测绘带接收。

关键词: 合成孔径雷达; 高分辨率宽测绘带; 距离向数字波束形成; 扫描接收

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1510-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01157

Range DBF Processing for High-resolution Wide-swath Spaceborne SAR

Li Yang^{①②} Huang Jie-wen^{①②} Yu Wei-dong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper studies the principle of realizing wide swath of space-borne SAR by using range Digital Beam-Forming (DBF). Then the effect of the time domain DBF processing on the amplitude and resolution of spaceborne SAR image is summarized based on the theoretical analysis and simulation. Four range DBF processing methods corresponding to scan-on-receive are explored, which are suitable for different duration of transmit signals. Simulation results show that all methods can realize wide swath signal receiving effectively in its precondition.

Key words: SAR; High-resolution wide-swath; Range digital beam-forming; Scan-on-receive

1 引言

高分辨率宽测绘带是下一代星载合成孔径雷达(SAR)一个重要的发展方向。为了缓解常规星载 SAR 方位向分辨率和距离向测绘带宽的矛盾^[1], 需要研究新的星载 SAR 工作模式。文献[2]提出采用方位多波束实现高分辨率宽测绘带成像的思想, 文献[3]提出了利用方位向和距离向多个接收孔径实现高分辨率宽测绘带星载 SAR 的方案。文献[4]提出了多维波形编码和 DBF 技术相结合实现星载 SAR 高分辨率宽测绘带的方法。近年来国内外多篇文章提出了多种新的星载 SAR 工作模式, 其基本思想都是基于 DBF 技术灵活发射多波束以及接收端多孔径接收^[5-9]。为了实现宽测绘带成像, 要求发射天线高度很小或采用脉内波束发射指向不同方向的距离向波束。目前距离向 DBF 处理的研究都侧重于对子孔径加权系数的研究以实现目标的增益接收以及距离模糊抑制, 而没有针对 SAR 发射信号的特点详细研究各距离向孔径接收信号的具体处理过程。

本文基于平面相控阵天线系统, 在研究距离向 DBF 技术实现宽测绘带原理的基础上, 详细叙述了接收信号的距离向 DBF 处理过程, 分析了传统时域直接加权 DBF 处理对成像幅度和分辨率的影响, 针对不同脉宽的信号研究了 4 种接收端距离向 DBF 的处理方法, 并分析了这 4 种处理方法的不同适用范围和处理复杂度, 仿真验证了 4 种方法的有效性。

2 距离向 DBF 原理

传统星载 SAR 条带模式采用单发单收, 对于系统工作的每一波位, 天线波束指向测绘带中心, 收发天线加权函数为常数, 这就导致测绘带中心回波增益最大, 而位于测绘带边缘的目标增益最小。

在接收端距离向使用 DBF 技术, 距离向 DBF 模型如图 1 所示, 星载 SAR 使用有源相控阵天线, 距离向有 N 个孔径, 相应地有 N 个通道。使用中间一个或部分孔径发射宽波束照射宽测绘带区域, 接收时各个孔径单独接收回波, 通过 DBF 处理产生窄的高增益笔状波束, 最大利用天线的增益。在每一时刻接收波束中心与垂直方向的夹角决定于对回波方向 $\theta(t)$ 的估计, 为先验知识。天线法线与垂直方向

2010-11-01 收到, 2011-02-23 改回

*通信作者: 李杨 liyang_lee1983@126.com

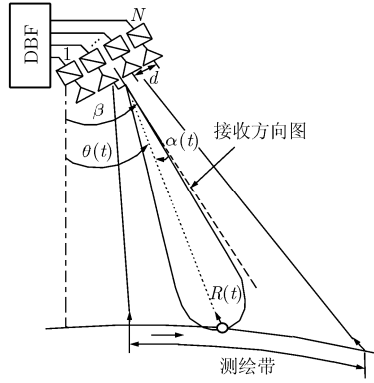


图1 距离向发射和接收信号几何模型

夹角为 β ，接收波束中心与天线法线的夹角 $\alpha(t) = \theta(t) - \beta$ 。回波时间变量 t 和 $\theta(t), \alpha(t)$ 间的关系是一一对应的。

3 距离向 DBF 处理

简化的距离向 DBF 处理结构图如图 2 所示，信号只用距离向快时间 t 表示，孔径 n 接收信号为 $s_n(t)$ ，加权系数为 $w_n(t)$ ，输出信号

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n(t) \cdot s_n(t) \quad (1)$$

在 t 时刻，波束指向为 $\alpha(t)$ ，根据经典波束形成理论^[10]，加权系数 $w_n(t)$ 为

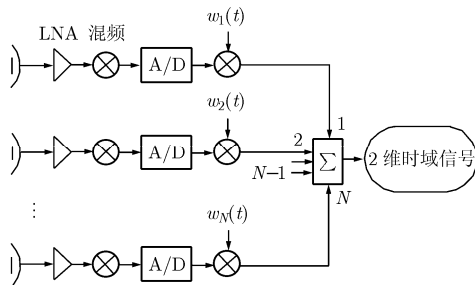


图2 距离向接收 DBF 处理一般模型

$$w_n(t) = \exp\left\{-j2\pi d_n \sin(\alpha(t))/\lambda\right\} \quad (2)$$

其中 d_n 为第 n 个孔径与参考位置间的间距，加权求和相当于形成一个时变的高增益窄波束在一个脉冲重复周期内扫描整个测绘带，跟踪接收地面回波。

星载 SAR 发射线性调频信号，信号有一定脉宽，因此图 2 的接收模型存在误差，需根据不同情况改进距离向 DBF 的处理方法。

3.1 时域直接加权 DBF 处理误差物理解释

设点目标斜距为 R_0 ，其回波时间范围为 $2R_0/c - T/2 \leq t \leq 2R_0/c + T/2$ ，根据图 2 加权处理，波束只在 $t_0 = 2R_0/c$ 时刻指向该目标方向，而其它回波时间都得不到天线的最大增益。如图 3， $\theta(t_0)$ 处目标

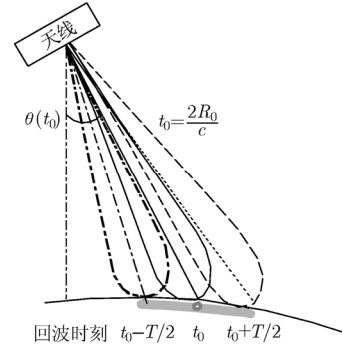


图3 距离向 DBF 误差分析模型

的回波持续时间内得到了不同的加权。若接收波束较窄而回波持续时间 T 较长，则会造成目标的部分回波增益极低或回波方向正好位于接收波束零陷区域，进而造成信号带宽的损失，严重影响最终成像结果的分辨率和对比度。

设在回波持续时间内接收波束扫过的角度为 θ_p ，则 $\theta_p \approx c \cdot T \cdot \cos \eta / (2 \sin \eta \cdot R_0)$ ， η 为入射角，接收波束宽度为 θ_{ant} ，当 $\theta_p < \theta_{ant}$ 时，成像结果的幅度和分辨率变化不大，可以利用直接时域 DBF 处理。若发射信号脉宽较长，使 $\theta_p \geq \theta_{ant}$ ，即用式(3)估算

$$\frac{T \cdot c \cdot \cos \eta}{2 \sin \eta \cdot R} \geq \frac{\lambda}{N \cdot d} \Rightarrow T \geq \frac{2\lambda \cdot \sin \eta \cdot R}{N \cdot d \cdot c \cdot \cos \eta} \quad (3)$$

这时，成像结果幅度明显降低，分辨率变低，需要对每个孔径加权后的结果进一步处理之后才能正确成像。

3.2 距离向 DBF 改进处理

以点目标为例分析，设点目标斜距为 R_0 ，图 2 中第 n 个孔径接收的回波的基带信号为

$$s_n(t) = \gamma \cdot \text{rect}\left[\frac{t - t_n}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\kappa_r \pi (t - t_n)^2 - j2\pi f_c t_n\right\}, n=1, \dots, N \quad (4)$$

其中 γ 为与后向散射和入射角有关的复常数， f_c 为信号载频， κ_r 为调频斜率。

距离向天线排列为均匀线性阵列，利用中间一个或部分子孔径发射信号，全部子孔径同时接收，发射天线与接收天线为同一中心。设目标到发射天线中心距离为 R_0 ，则第 n 个孔径回波的时延为

$$t_n = t_0 - \frac{d_n \cdot \sin(\theta_0 - \beta)}{c} \quad (5)$$

其中 t_0 为发射天线相位中心到目标往返时间，相邻孔径间的距离为 d ， $d_n = (n - (N + 1)/2) \cdot d$ 。时延包括了目标的空间位置信息， θ_0 为波束视角， β 为天

线倾角, 令 $\alpha_0 = \theta_0 - \beta$, 可知 $\alpha_0 = \alpha(t_0)$ 。

每个孔径经过式(2)加权后的信号为

$$y_n(t) = \gamma_1 \cdot \text{rect}\left(\frac{t-t_n}{T}\right) \exp\left[j\pi\kappa_r(t-t_n)^2 + j(2\pi/\lambda)d_n \sin \alpha_0 - j(2\pi/\lambda)d_n \sin \alpha(t)\right] \quad (6)$$

其中 $\gamma_1 = \gamma \cdot \exp\{-j \cdot 2\pi f_c t_0\}$, $\alpha(\cdot)$ 通常在 $\pm 5^\circ$ 之内, 因此 $\sin \alpha(t) \approx \alpha(t) \approx \alpha(t_0) + \alpha'(t_0)(t-t_0)$, 代入式(6)中得

$$y_n(t) = \gamma_1 \cdot \text{rect}\left(\frac{t-t_n}{T}\right) \exp\left[j\pi\kappa_r(t-t_n)^2 - j(2\pi/\lambda)d_n \cdot \alpha'(t_0)(t-t_0)\right] \quad (7)$$

将信号变换到频域, 忽略式常数项, 结果为

$$Y_n(f) = \exp\left\{j2\pi d_n f \left[\frac{\sin \alpha_0}{c} - \frac{\alpha'(t_0)}{\lambda\kappa_r}\right]\right\} \cdot \text{rect}\left(\frac{f}{\kappa_r T}\right) \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{\kappa_r}\right\} \cdot \exp(-j2\pi f t_0) \quad (8)$$

图 2 中最终结果的距离频域表示为

$$Y(f) = \sum_{n=1}^N Y_n(f) = \frac{\sin(Nd\phi(f)/2)}{\sin(d\phi(f)/2)} \cdot \text{rect}\left(\frac{f}{\kappa_r T}\right) \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{\kappa_r}\right\} \cdot \exp(-j2\pi f t_0) \quad (9)$$

其中 $\phi(f) = 2\pi f \left[\frac{\alpha'(t_0)}{\lambda\kappa_r} - \frac{\sin \alpha_0}{c}\right]$ 。

由式(9)可见, 直接时域 DBF 处理后信号频谱被加权, 使信号高频分量减小, 按照傅里叶变换理论, 这将导致波形展宽, 压缩波形主瓣展宽, 将导致分辨率下降, 并且由于加权处理, 信号畸变, 导致与压缩滤波器失配, 失配的结果, 必然引起输出幅度和信噪比下降, 因此需改进处理方法。

式(9)中 $\frac{\sin(Nd\phi(f)/2)}{\sin(d\phi(f)/2)}$ 第一过零点为 $f_0 =$

$\pm 1/Nd \left[\frac{\alpha'(t_0)}{\lambda\kappa_r} - \frac{\sin \alpha_0}{c}\right]$, 当 $2|f_0|$ 大于信号带宽时,

可以在匹配滤波时对信号统一处理, 如图 4(a), 改进的距离向频域匹配滤波器为

$$H(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{\kappa_r T}\right) \cdot \exp\left\{j\pi \frac{f^2}{\kappa_r}\right\} / \frac{\sin(Nd\phi(f)/2)}{\sin(d\phi(f)/2)} \quad (10)$$

当 $2|f_0|$ 小于信号带宽时, 加权求和的结果使信号频谱被截断, 则需在求和之前分别处理每个孔径信号, 补偿时域加权引起的损失, 如图 4(b), 由式(8)得每个孔径频域加权系数为

$$w_n(f) = \exp\left\{j2\pi f \frac{d_n \cdot \alpha'(t_0)}{\kappa_r \lambda}\right\} \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{d_n \cdot \sin \alpha_0}{c}\right) \quad (11)$$

式(11)右边第 2 项相当于将各个孔径信号配准的过程。相位与频率的关系是线性的, 因此图 4(c)和图 4(b)是等价的。

3.3 匹配滤波后波束形成处理

不采取先时域 DBF 处理然后再补偿处理的方法, 如图 5, 将各个孔径的接收信号先进行距离压缩, 结果为

$$y_n(t) = \sigma_1 \exp(j2\pi d_n \sin \alpha_0 / \lambda) \cdot \exp\{-j2\pi d_n \sin \alpha(t) / \lambda\} \cdot \text{sinc}[\kappa_r T(t-t_0)] \quad (12)$$

频域匹配滤波器为

$$H_n(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{\kappa_r T}\right) \cdot \exp\left\{j\pi \frac{f^2}{\kappa_r}\right\} \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{d_n \cdot \sin \alpha_0}{c}\right)$$

波束形成结果为

$$y(t) = \sum_{n=1}^N y_n(t) \cdot w_n(t) = \sigma_2 \frac{\sin[N\pi d(\sin \alpha_0 - \sin \alpha(t))/\lambda]}{\sin[\pi d(\sin \alpha_0 - \sin \alpha(t))/\lambda]} \cdot \text{sinc}[\kappa_r T(t-t_0)] \quad (13)$$

σ_1, σ_2 为与目标后向散射系数和处理有关的常数, 对于式(13)等式右边来说, 第 1 项的主瓣范围比第 2 项大得多, 对于最终压缩结果所关心的时间范围内,

$$y(t) = \sigma_2 N \text{sinc}[\kappa_r T(t-t_0)] \quad (14)$$

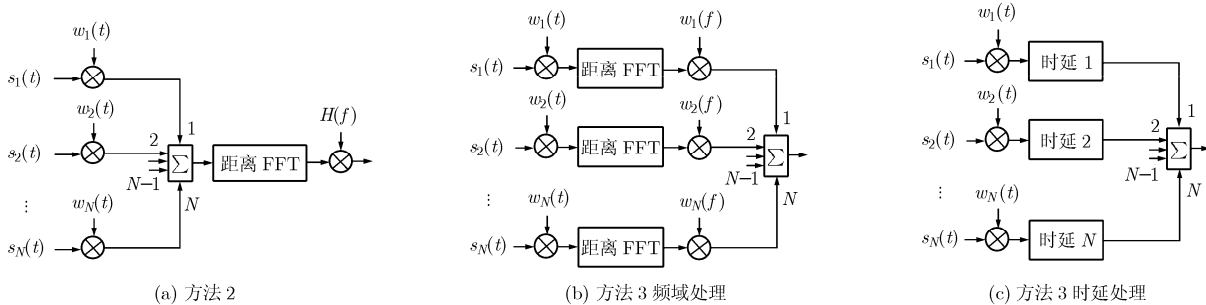


图 4 距离向 DBF 改进处理

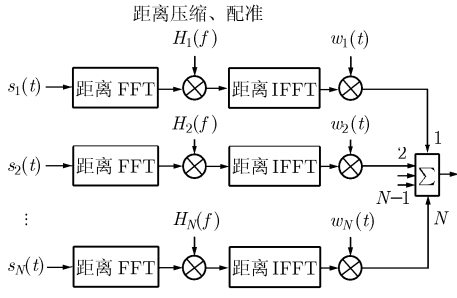


图 5 距离压缩后 DBF 处理

3.4 距离向 DBF 处理总结

上述分析都是针对点目标的，在处理宽测绘带回波时，各公式中的 α_0, t_0 近似取测绘带中心对应的角度和回波时间。不同情况距离向 DBF 处理如下：

方法 1 时域直接 DBF 处理，如图 2 及式(2)，发射信号时间长度 T 需满足：

$$T < \frac{2\lambda \cdot \sin \eta \cdot R}{N \cdot d \cdot c \cdot \cos \eta} \quad (15)$$

此方法距离向接收时距离向只需传输和存储单通道数据，有利于星上实现且能够极大减小数据率。

方法 2 时域 DBF 处理，对加权求和后的数据频域补偿，如图 4(a)及式(10)，星上处理复杂度以及数据率的要求与时域直接加权相差不大，发射信号脉宽 T 需满足：

$$T < \frac{2\lambda}{\alpha'(t_0)Nd} + \text{sgn}(\kappa_r) \cdot \frac{\lambda B_r \sin \alpha_0}{\alpha'(t_0)c} \quad (16)$$

方法 3 时域 DBF 处理后频域 DBF 处理，或时域 DBF 处理后再延时处理，如图 4(b)，图 4(c)及式(11)，这是距离向 DBF-SAR 扫描接收时通用的方法，对系统的数据率和处理能力要求较高。通常系统在扫描接收的基础上，还需做其他处理，还需根据 $w_n(t)$ 调整 $w_n(f)$ 。

方法 4 先距离压缩后 DBF 处理，如图 5。此方法适用于各种情况下的距离向 DBF 处理，距离压缩处理之后，可利用经典窄带波束形成算法以及 DOA 估计算法，系统的数据率和处理复杂度较高。

4 仿真分析

针对表 1 中的参数，方法 1 适用范围 $T_1 < 25 \mu\text{s}$ ，方法 2 适用范围 $T_2 < 50 \mu\text{s}$ 。选择 $T=20 \mu\text{s}, 40 \mu\text{s}, 60 \mu\text{s}$ 3 种情况讨论不同处理方式下点目标成像的距离向压缩结果。

采用时域直接加权 DBF 处理时，最终成像结果

表 1 系统参数

测绘带距星	(400 km,	PRF	1600 Hz
下点距离	500 km)	视角	(27.66°, 32.98°)
卫星高度	750 km	波长	0.031 m
测绘带中心斜距	890 km	斜距分辨率	1.33 m
发射信号带宽	100 MHz	距离向孔径数	13
天线法线方向视角	30.6°	发射天线高度	0.33 m
接收天线总高度	4.29 m		

距离向分辨率和幅度随地距的变化如图 6 所示，图中的值都是按理论计算所得的分辨率和幅度归一化所得。当 $T=20 \mu\text{s}$ 时，整个测绘带内图像的距离分辨率和幅度保持平稳，且与理论值相差较小，随着 T 的增大，测绘带内图像的距离分辨率和幅度变化越来越剧烈，且与理论值相差越来越大。

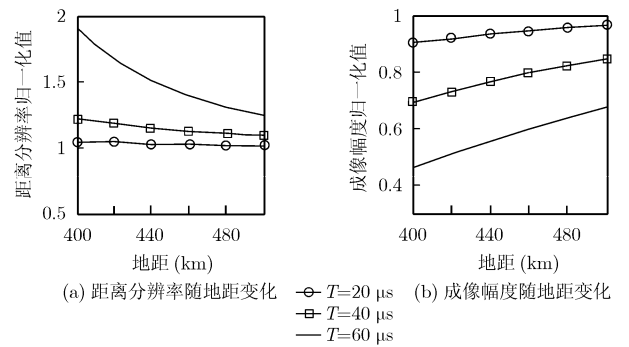


图 6 距离分辨率和成像幅度随地距的变化

利用不同处理方法处理不同脉宽的信号，结果如图 7 所示。随信号脉宽的增加，方法 1 对信号频域的加权越来越严重，成像结果的幅度和分辨率越来越差。方法 2 为对方法 1 处理后的信号距离压缩时频域统一补偿的结果。 $T=20 \mu\text{s}, T=40 \mu\text{s}$ 时，频域信号带宽范围内有不同程度轻微加权，频域补偿效果明显，但当 $T=60 \mu\text{s}$ 时，信号频谱被截断，频域补偿后不能正确成像，因此方法 2 不适用。利用方法 3 和方法 4 处理时，适用于任何情况。

5 结束语

本文在研究距离向 DBF 技术实现宽测绘带原理的基础上，推导分析了直接时域 DBF 处理对最终成像结果幅度和分辨率的影响，并针对发射信号的不同脉宽范围研究了 4 种距离向 DBF 的处理方法，通过仿真验证了 4 种处理方法的适用范围和有效性，本文的研究为系统设计和距离向 DBF 处理的实现提供了参考。

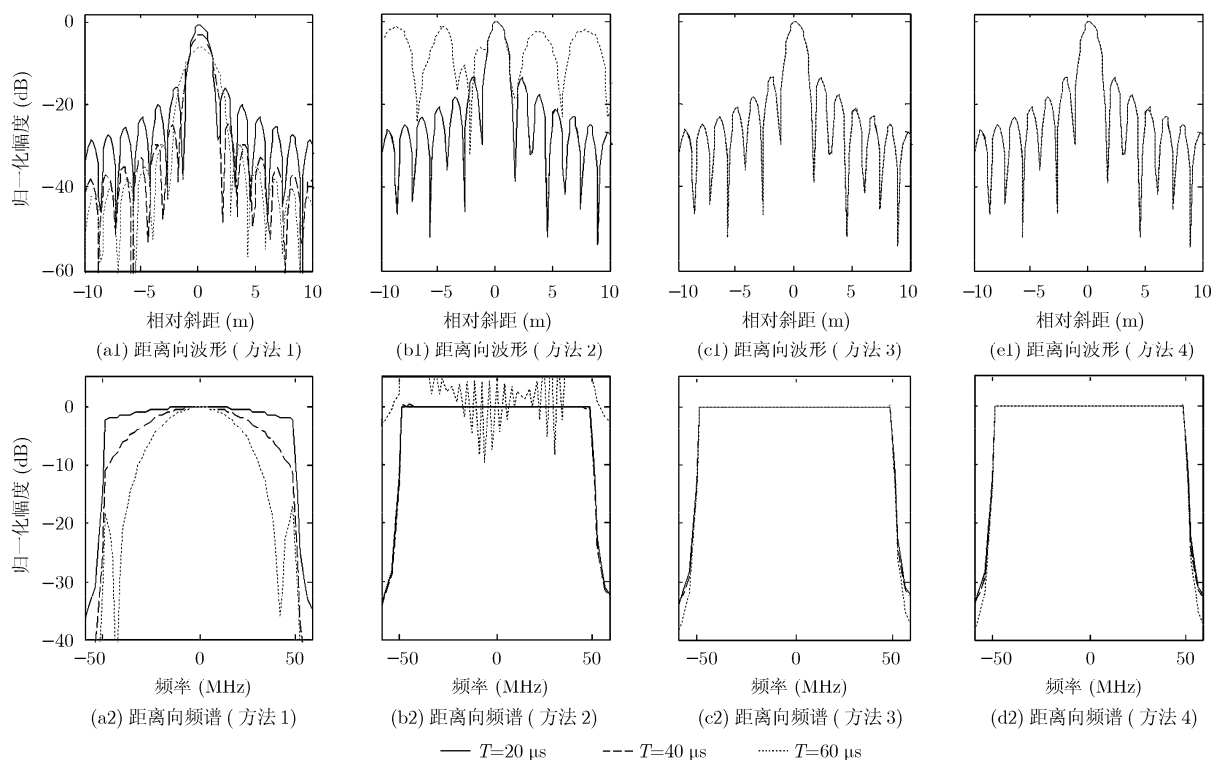


图 7 4 种处理方法得到点目标成像距离向时域和频域结果

参考文献

- [1] Freeman A, Johnson W, and Huneycutt B, *et al.* The 'myth' of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320-324.
- [2] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 122-135.
- [3] Suess M, Zubler M, and Zahn R. Performance investigation on the high resolution, wide swath SAR system[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Koeln, Germany, 2002: 187-191.
- [4] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-46.
- [5] Krieger G, Younis M, and Gebert N, *et al.* Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 524-527.
- [6] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564-592.
- [7] 宋岳鹏, 杨汝良. 应用多收发孔径实现高分辨率宽测频带的合成孔径雷达研究[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(9): 2110-2113.
Song Yue-peng and Yang Ru-liang. Study on high resolution wide swath synthetic aperture radar using multiple transmit-receive apertures[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(9): 2110-2113.
- [8] Younis M, Huber S, and Patyuchenko A, *et al.* Digital beam-forming for spaceborne reflector and planar antenna SAR — a system performance comparison[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symp, Cape Town, South Africa, July 12-17, 2009, 3: 733-736.
- [9] Younis M, Patyuchenko A, and Huber S, *et al.* A concept for a high performance reflector-based X-band SAR[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 974-977.
- [10] Harry L. Van Trees 著. 汤俊译. 最优阵列处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 35-40.

李 杨: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为新体制星载 SAR 系统设计和信号处理。

黄杰文: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 数字接收及星上处理技术。

禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 系统设计与信号处理。