

星载 ScanSAR 等效斜视距离模型的 ECS 成像算法

魏 杰, 周荫清, 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 本文提出一种适用于大距离徙动星载 ScanSAR 成像处理的等效斜视距离模型 Extended Chirp Scaling (ECS) 成像处理算法. 根据误差最小的等效斜视距离模型, 改进了 ECS 成像算法的部分因子, 给出了实现步骤. 此外, 为消除 ScanSAR 成像时的 Scalloping 效应, 算法中还结合了视加权处理. 最后, 计算机仿真验证了算法的有效性, 并进行了成像性能分析.

关键词: 等效斜视; ECS 算法; 星载 ScanSAR; 大距离徙动; 视加权处理

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2005) 09 1545 04

Equivalent Squint Extended Chirp Scaling Algorithm for Spaceborne ScanSAR

WEI Jie, ZHOU Yin qing, LI Chun sheng

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To resolve the precise imaging problem of spaceborne Scanned beam Synthetic Aperture Radar (ScanSAR) with large range cell migration, a novel Equivalent Squint Extended Chirp Scaling (ES ECS) algorithm is proposed. The full derivation and the realizing approach of the algorithm are presented with the squinted equivalent range model, which describes the relationship of spaceborne geometrical more precisely than the broadside range model. And the optimum look weighting approach is also introduced to avoid the scalloping effect. Finally, the algorithm is verified by simulations.

Key words: equivalent squint; extended chirp scaling algorithm; spaceborne ScanSAR; large range cell migration; look weighting processing

1 引言

星载 SAR 是高分辨率主动微波遥感仪器, 具有全天候、全天时工作的能力. 常规的 SAR, 由于模糊度的限制而被严格地局限于一个窄的观测带, 但对于变化较快的海洋目标和地面目标信息, 常常需要在很短的时间内完成大面积的监测. 正是基于这种应用需求, 星载 SAR 的宽测绘带技术应运而生了. Moore 于 1975 年首次提出一种可以实现宽测绘带模式的方法, 即 ScanSAR 模式^[1], 它使用在距离向扫描的天线波束, 将整个测绘带分成若干个子测绘带时分别成像, 再拼接成完整的宽测绘带雷达图像.

目前, 在 ScanSAR 成像处理中, 常用的算法主要有: SPECAN、RD、Chirp Scaling、ECS 等. SPECAN^[2] 算法通过降低分辨率来获取较快的成像处理速度, 且不进行完整的距离徙动校正, 因此不适用于 ScanSAR 距离徙动较大的情况. Frank 提出一种修正的距离多普勒算法^[3], 能够实现距离徙动校正和相位保持, 但是由于采用了插值运算, 在徙动量较大的情况下, 它的运算量将无法忍受. Chirp Scaling (CS) 算法^[4] 的优点在于无需插值运算, 只需 FFT 和复数乘法即可完全校正距离徙动, 同时相位补偿精确. 但由于 ScanSAR 信号的数据特点, 采用 CS 算法时, 必须将方位向缺失的数据填补为零, 导致计算

效率下降.

针对 ScanSAR 应用, Moreira 等人根据机载正侧视距离模型提出 Extended Chirp Scaling (ECS) 算法^[5], 是 CS 的变形算法, 在距离向通过修改 CS 因子, 可以实现 ScanSAR 在距离向的自动配准, 方位向则采用 SPECAN 算法完成聚焦. 但星载 ScanSAR 的空间几何关系近似为斜视模型, 正侧视的 ECS 算法已不再适用, 因此本文工作主要研究 ECS 算法在大距离徙动星载 ScanSAR 成像中的应用. 从原始回波信号模型入手, 基于误差最小的等效斜视距离模型, 重新推导了 ECS 算法, 并对相应的各个因子进行了修正. 此外, 在成像处理中, 为了消除方位向天线增益的不均匀性引起的 Scalloping 效应, 算法中结合了视加权处理.

2 星载 ScanSAR 原理及回波信号模型

2.1 星载 ScanSAR 基本原理

图 1 给出了星载 ScanSAR 工作的空间几何关系. 最初天线波束指向宽观测带的近端(第一个子测绘带)并在那里停留一定的时间以合成一幅单波束照射区的雷达图像, 然后波束再指向下一个子测绘带以合成那里的雷达图像, 以此类推. 当卫星飞到最近端原来覆盖区的边缘时, 扫描和图像合成都在最远端的波束位置处. 此时波束再次指向最近端相邻的覆

盖区的位置, 并且开始重复前面的过程. 就是以这种方式, ScanSAR 模式产生了一个加宽了的雷达镶嵌图^[9].

2.2 回波信号模型

分析 ScanSAR 的工作原理, 可知 ScanSAR 和常规 SAR 的发射接收方式是一致的, 只是 ScanSAR 这一方式被人多地控制了时间长度, 以保证此时间长度内回波信号的多普勒带宽达到满足方位分辨力的要求的一定值. 点目标的 ScanSAR 回波信号可以表示为:

$$ss(\tau, t; r) = \sigma \times W_a(t) \times \text{rect}\left[\frac{t}{T_s}\right] \times \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R(t, r)/c}{T_p}\right] \times \exp\left\{j\pi b\left[\tau - \frac{2}{c}R(t, r)\right]^2\right\} \times \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t, r)\right\} \quad (1)$$

式中 c 为光速, λ 为载波波长, b 为线性调频率, σ 为点目标后向散射系数, T_p 为脉冲宽度, T_s 为 ScanSAR 子孔径波束驻留时间, $W_a(t)$ 为方位向天线方向性函数. τ, t 分别为距离向和方位向时间, $R(t, r)$ 是点目标到雷达的斜距. $\text{rect}(t)$ 为矩形

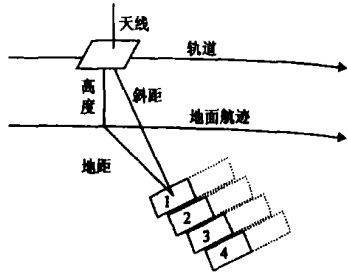


图 1 星载 ScanSAR 模式空间几何关系

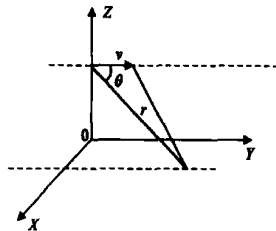


图 2 等效斜视距离模型

窗函数, 当且仅当 $|t| \leq T_s/2$ 时不为零.

3 等效斜视距离模型

如图 2 所示, 等效斜视距离模型为^[7]

$$R(t, r) = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \cos\theta} \quad (2)$$

星载 SAR, 目标与卫星之间的距离变化规律十分复杂, 没有显示解. ScanSAR 的块数据是整个孔径数据的一小部分, 每个点目标的多普勒历程是全孔径的多普勒历程的一小部分, 因此各子孔径的距离变化规律仍近似为斜视模型, 式(2)是一种比较精确的星载 ScanSAR 距离模型.

式(2)中 θ 为等效斜视角, r 为雷达波束中心扫过目标时雷达与目标的距离, v 为卫星的等效速度. θ 和 v 可以通过精确估计多普勒中心频率 f_d 和多普勒调频率 f_r 求出.

$$v = \sqrt{(\chi_d/2)^2 + \lambda f_r / 2} \quad (3)$$

$$\theta = \arccos(-\chi_d/2v) \quad (4)$$

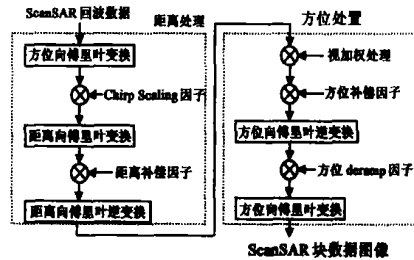


图 3 等效斜视 ECS 成像处理算法流程图

4 等效斜视 ECS 算法

如图 3 所示, 等效斜视 ECS 算法的步骤与原始 ECS 算法大致相同, 但是在方位相位补偿之前需要进行视加权处理, 而且由于本文中的信号模型与文献[5]中的信号模型有所区别, 采用的距离模型也不同, 因此在推导时对文献[5]中的各补偿因子分别进行了修正. 由于散射系数 σ 的数值不会影响算法推导的正确性, 所以后面公式中均取 σ 等于单位值 1. 推导中忽略复常数, 不影响整个算法.

4.1 距离处理

应用相位驻留原理, 对式(1)的回波信号作方位向傅里叶变换, 将信号转换到距离-多普勒域, 乘以改进的 Chirp Scaling 因子^[7], 从而将不同距离上的距离徙动曲线修正到与参考距离处的距离徙动曲线相同. Chirp Scaling 后的信号为

$$S_l(\tau, f) = W_a\left[-\frac{r\chi \sin\theta}{2v^2 \sqrt{1 - (\chi/2v)^2}}\right] \times \text{rect}\left[-\frac{r\chi \sin\theta}{2v^2 T_s \sqrt{1 - (\chi/2v)^2}}\right] \times \text{rect}\left[-\frac{\tau + \frac{2}{c}r_f(f; r)}{T_p}\right] \times \exp\left\{j\pi b_r(f; r_{ref}) \cdot [1 + C_s(f)] \cdot \left[\tau - \frac{2}{c}\left(r \frac{\sin\theta}{\sin\theta_{ref}} + r_{ref} \cdot C_s(f)\right)\right]^2\right\} \times \exp\left\{j\frac{4\pi}{c} b_r(f; r_{ref}) \cdot [1 + C_s(f)] \cdot C_s(f) \cdot \left[r \frac{\sin\theta}{\sin\theta_{ref}} - r_{ref}\right]\right\} \times \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi r \sin\theta}{\lambda} \sqrt{1 - (\chi/2v)^2} + \frac{2\pi f}{v} \cos\theta\right]\right\} \quad (5)$$

式中 f 为方位频率, 其中

$$b_r(f; r_{ref}) = \frac{b}{1 - b_{r_{ref}} \sin\theta_{ref} \frac{2\lambda}{c^2} \frac{(\chi/2v)^2}{[1 - (\chi/2v)^2]^{3/2}}} \quad (6)$$

$$C_s(f) = \frac{\sin\theta_{ref}}{\sqrt{1 - (\chi/2v)^2}} - 1 \quad (7)$$

$$\tau_{ref}(f) = \frac{2}{c} r_{ref} [1 + C_s(f)] \quad (8)$$

θ_{ref} 为选定参考距离 r_{ref} 对应的等效斜视角. 参考距离没有特殊限定, 通常选择合成孔径中心处雷达与场景中心点的斜距. 通过简单计算可知, 式(7)对 CS 因子的修正与文献[5]的式(18)是相同的, 但文献[5]是在斜视情况下直接对 CS 因子进行修正, 并没有对回波信号进行修改, 因此回波信号在距离-多普勒域的表达式不够精确.

由式(5)可以看出, 经过 CS 因子相乘之后的信号仍然是一个调频信号, 只是每个距离线性调频信号的调频率和相位中心产生微小的变化, 新的调频率和相位中心分别变为

$$b'_r(f; r) = \{ - b_r(f; r_{ref}) \cdot [1 + C_s(f)] \} \quad (9)$$

$$\tau(f) = \frac{2}{c} \left[r \frac{\sin\theta}{\sin\theta_{ref}} + r_{ref} \cdot C_s(f) \right] \quad (10)$$

此时不同距离处的距离徙动曲线的形状近似相同, 这样采用参考距离处的距离补偿因子即可完成整个成像区域的距离压缩, 实现精确成像.

对信号 $S_l(\tau, f)$ 进行距离向傅里叶变换, 在二维频域乘以改进的距离补偿因子 $\Theta_2(\tau, f; r_{ref})$ ^[7], 完成距离徙动校正

和距离聚焦处理. 再经距离向傅里叶逆变换变回距离-多普勒域, 完成距离处理.

4.2 方位处理

在 ScanSAR 工作模式下, 方位向天线方向图特性会导致最终的图像产生 Scalloping 效应, 所以在成像处理时需要采用视加权来解决这个问题. 常用的主要有单视加权和多视加权方法. 单视加权法简单直接, 易于实现, 但会破坏图像噪声的各态历经性, 使图像的辐射校正复杂化. 多视加权法的加权函数能够使得信噪比为常数, 但加权函数复杂, 不易实现, 且以牺牲图像的空间分辨率^[8]为代价. 本文采用一种简单的单视加权方法是在单视成像处理的方位处理之前, 对回波信号在方位向乘以方位向天线增益的倒数来消除天线增益的不均匀性.

单视加权因子 $W_a(f)$ 为

$$W_a(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{f_{\text{prf}}}\right) \times \left| \text{sinc}\left[\frac{\pi \cdot D_a}{\lambda} \cdot \tan^{-1}\left(-\frac{\chi \sin\theta}{2v \sqrt{1 - (\chi/2v)^2}}\right)\right] \right|^{-2} \quad (11)$$

式中 f_{prf} 为脉冲重复频率, D_a 为天线方位向尺寸, $\text{rect}(f)$ 为矩形窗函数, 当且仅当 $|f| \leq f_{\text{prf}}/2$ 时不为零.

经过视加权处理后的信号, 沿方位向乘以改进的方位补偿因子 $\Theta_3(\tau, f)$,

$$\Theta_3(\tau, f) = \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{c^2} b_r(f; r_{\text{ref}}) \cdot [1 + C_s(f)] \cdot C_s(f) \cdot \left(r \frac{\sin\theta}{\sin\theta_{\text{ref}}} - r_{\text{ref}}\right)^2\right]\right\} \times \exp\left\{j\frac{2\pi f}{v} \cos\theta\right\} \times \exp\left\{-j\frac{4\pi r}{\lambda} [1 - \sin\theta \cdot \sqrt{1 - (\chi/2v)^2}]\right\} \times \exp\left\{j\frac{\pi f^2}{f_{r, \text{scl}}}\right\} \times \exp\left\{j\frac{\pi \chi f_d}{v^2 f}\right\} \quad (12)$$

因为距离徙动在上一步已完全校正, 所以有关系式

$$r = \frac{c\tau}{2} \frac{\sin\theta_{\text{ref}}}{\sin\theta} \quad (13)$$

式(12)中, 第一指数项补偿残余相位. 第二指数项是改进算法增加的一个新的相位补偿项, 该项在方位 FFT 后对应时域方位位移, 本文通过补偿这种时间位移, 减小了谱分析所需的额外方位时间展宽, 而文献[5]采用正侧视模型, 对应的 $H_s(f_a; r_0)$ 没有该相位项. 第三指数项完成方位聚焦, 补偿信号中的二次相位, 同时对斜距为 r 的目标保留相位 $-4\pi r/\lambda$. 第四指数项在所有距离处引入相同的线性频率调制, 避免了谱分析方法中插值操作, 该项是精确谱分析的关键, $f_{r, \text{scl}}$ 是选定的 Scaling 距离 r_{scl} 处的多普勒调频率. 此外, 通过线性相位乘法引入一定方位时间位移, 即式(12)中的第五指数项, 可使需要的方位时间展宽与方位位置中心对称.

在方位补偿之后, 作方位傅里叶逆变换, 乘以改进的方位 deramp 因子 $\Theta_4(t, r_{\text{scl}})$

$$\Theta_4(t, r_{\text{scl}}) = \exp\left\{j\chi f_{r, \text{scl}} [t - t_c(r_{\text{scl}})]^2\right\} \quad (14)$$

方位位移时间 $t_c(r_{\text{scl}}) = -\frac{\chi r_{\text{scl}} - f_d}{2v^2}$

做方位向傅里叶变换即完成了方位压缩, 得到 ScanSAR 图像.

$$sS_4(\tau, f) = \text{sinc}\left[\frac{2\pi v^2 T_s \sqrt{1 - (\chi/2v)^2}}{r \chi_{r, \text{scl}} \sin\theta} f\right] \times \text{sinc}\left[\tau - \frac{2r \sin\theta}{c \cdot \sin\theta_{\text{ref}}}\right] \times \exp\left\{-j\frac{4\pi R}{\lambda}\right\} \quad (15)$$

经过以上步骤, 就完成了整个成像处理过程. 等效斜视 ECS 算法是 ECS 算法在斜视情况下的推广, 采用等效斜视距离模型, 更符合星载 ScanSAR 空间几何关系.

5 计算机仿真结果

5.1 仿真参数

首先利用仿真回波数据进行成像处理, 仿真参数如表 1.

表 1 仿真参数

波长/m	0.21	脉冲重复频率/Hz	2000.0
信号带宽/MHz	57.0	合成孔径时间/s	2.9
脉冲宽度/ μ s	33.0	多普勒中心频率/Hz	2102.643
采样率/MHz	60.0	多普勒调频率/(Hz/s)	599.778

5.2 成像处理结果

根据表 1 中的参数, 仿真生成星载 ScanSAR 的四分之一子孔径的点阵目标回波信号, 其距离徙动量大约为三百多个距离门. 应用等效斜视 ECS 算法和原始 ECS 算法分别对其进行成像处理, 然后从测绘带近距、中心、远距位置各取出一个点目标进行成像结果分析. 成像结果三维图见图 4 至图 5, 性能指标见表 2. 其中 ρ 表示分辨率, ISLR 表示积分旁瓣比, PSLR 表示峰值旁瓣比, 下标 r, a 分别表示斜距向和方位向. P_n, P_c, P_f 分别表示测绘带中的近距点、中心点和远距点. 考虑到天线特性类似对信号进行频域加权, 因此成像处理中加权函数为 $F = 1/3$ 的简化泰勒加权.

表 2 两种算法点目标成像性能对比分析

算法名称	点目标位置	指 标					
		斜距向			方位向		
		ρ_r (m)	ISLR _r (dB)	PSLR _r (dB)	ρ_a (m)	ISLR _a (dB)	PSLR _a (dB)
等效斜视 ECS 算法	P_n	2.81	-18.91	-25.63	24.81	-19.16	-25.37
	P_c	2.79	-19.10	-26.04	24.09	-19.45	-25.82
	P_f	2.81	-18.94	-25.66	25.07	-19.02	-25.26
原始 ECS 算法	P_n	2.86	-17.70	-23.95	35.77	-7.49	-8.69
	P_c	2.88	-17.73	-23.68	35.81	-7.57	-9.17
	P_f	2.86	-17.41	-23.27	35.44	-7.16	-8.78

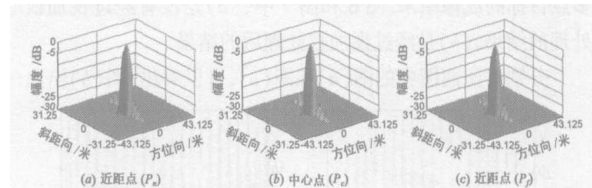


图 4 等效斜视 ECS 算法点目标成像三维图

从图 4 和图 5 的对比中可以看出, 两种算法对大距离徙动星载 ScanSAR 的斜距向成像性能相差无几, 而在方位向则有很大的不同. 原始 ECS 算法方位向成像性能急剧恶化, 第一旁瓣的能量和主瓣的能量较接近, 分辨率达不到指标要求; 而本文提出的等效斜视 ECS 算法则明显改善了方位向成像

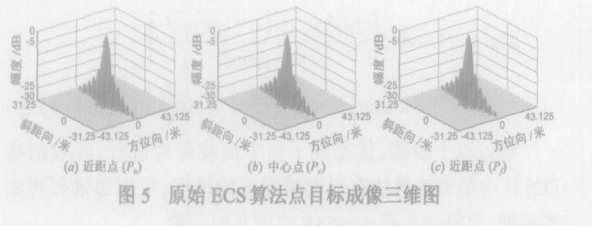


图 5 原始 ECS 算法点目标成像三维图

质量, 满足设计要求。

从图 4 中可以进一步看出, 子测绘带三个位置的点目标成像结果稍有不同, 中心点的成像指标略优于边缘处的, 这是因为多普勒参数在距离向随着距离门的不同而发生变化, 成像时使用的是子测绘带中心处的多普勒参数, 所以有所差异。但根据表 2 提供的结果可知, 三个位置的点目标成像指标均达到了设计指标要求, 说明等效斜视 ECS 算法可以实现大距离徙动星载 ScanSAR 的精确成像。

为了验证等效斜视 ECS 算法的运算速度, 在微机平台上进行了测试, 仿真参数见表 1。微机平台的基本配置如下: 2.0GHz 主频 P4CPU (512K 二级缓存), 1GB 内存 (DDR266), 80GB7200rpm 硬盘。表 3 给出了距离孔径 4096 点, 方位向部分孔径分别为 1000 点和 2000 点时, 两种算法的运算时间。从表中可以看出, 两种算法在运算时间上相差无几, 当距离向孔径数目相同时, 运算时间随着方位向孔径点数的增加而增大。两种算法在推导过程中, 由于各自采用的距离模型不同, 因此引入的误差也不同。由于等效斜视距离模型的误差小于正侧视模型和二次逼近距离模型, 能够更好地逼近星载 ScanSAR 的斜距变化规律, 因此, 等效斜视 ECS 算法在处理星载 ScanSAR 数据时, 引入的误差要比原始 ECS 算法小。

表 3 两种算法运算速度

算法名称	方位向部分孔径 1000 点/s	方位向部分孔径 2000 点/s
等效斜视 ECS 算法	68.735	143.047
原始 ECS 算法	68.890	145.750

5.3 视加权处理对成像结果的影响

根据表 1 中的参数, 仿真生成星载 ScanSAR 的四分之一子孔径的点阵目标回波信号, 应用等效斜视 ECS 算法对其进行成像处理。图 6 给出了方位向归一化后的频域功率图, 其中横坐标为方位向距离, 纵坐标为归一化后的增益。图 7 给出了多点目标的成像结果。图 6 和图 7 中, (a) 是没有经过视加权处理的结果, (b) 是经过视加权处理后的结果。

分别对比两图中的图 (a) 和图 (b), 可以看出: 图 (b) 给出

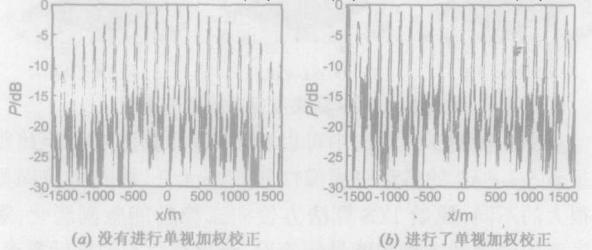


图 6 方位向归一化后的频域功率图

的单视加权处理后的图像已经很好的消除了方位调制效应, 图像增益均匀。因此在运用等效斜视 ECS 算法对星载 ScanSAR 进行成像处理时必须进行视加权校正。

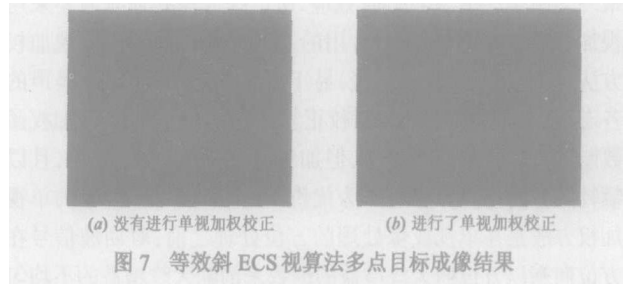


图 7 等效斜视 ECS 算法多点目标成像结果

6 结论

本文基于星载 ScanSAR 等效斜视距离模型, 从原始回波信号模型入手, 推导了等效斜视 ECS 成像算法, 给出了修正因子及实现步骤。为了消除 ScanSAR 成像时的方位 Scallop 效应, 减少图像增益的不均匀性, 算法中还结合了视加权处理。通过对仿真点目标的成像结果及性能的分析, 验证了该算法的有效性。因此, 该算法可适用于大距离徙动星载 ScanSAR 精确成像。

致谢 感谢陈杰副教授, 文竹博士生以及徐华平博士后给本文提出的参考意见。

参考文献:

- [1] Moore R K. Scanning phase synthetic aperture radar with integrated radiometer[J]. IEEE Trans, 1981, GE 17(3): 410-420.
- [2] Chang C Y, et al. First SIR C ScanSAR results[J]. IEEE Trans, 1996, GE 34(5): 1278-1281.
- [3] Wong F, et al. Phase preserving processing of ScanSAR data with a modified range doppler algorithm[J]. IEEE Trans, 1997, 35: 725-727.
- [4] Raney R K, et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans, 1994, GE-32(4): 786-799.
- [5] Moreira A, et al. Extended chirp scaling algorithm for air and space borne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. IEEE Trans, 1996, GE 34(5): 1123-1136.
- [6] Tomiyasu K. Conceptual performance of a satellite borne, wide swath synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans, 1981, GE 19(2): 108-116.
- [7] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38. Huang Yan, Li Chunsheng, Chen Jie, Zhou Yinqing. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 35-38. (Chinese Source)
- [8] Bamler R. Optimum look weighting for burst mode and ScanSAR processing[J]. IEEE Trans, 1995, GE 33(3): 722-725.

作者简介:

魏杰 女, 1979 年出生于黑龙江省肇东市, 在读博士研究生, 主要从事信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 星载 ScanSAR 等方面的研究工作。E-mail: weijie_2@sohu.com.

周荫清 男, 1936 年出生于湖南湘潭。教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究方向包括: 自适应信号处理、高分辨率雷达成像、阵列信号处理与时变谱估计、信息处理与对抗。