

星载聚束式 SAR 子孔径成像处理方法¹

王国栋 周荫清 李春升

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

摘要 该文分析了星载聚束式 SAR 的信号特性。在分析比较几种常见聚束式 SAR 成像算法的基础上, 引入适用于星载聚束式 SAR 成像的改进 chirp scaling 算法, 为解决高分辨率星载聚束式 SAR 具有的脉冲重复频率 (PRF) 过高, 多普勒带宽中心频率时变性问题, 深入分析了采用子孔径方法的必要性及其实现方法, 并将子孔径方法结合到 chirp scaling 算法中。最后, 通过计算机仿真, 验证了该算法适用于高分辨率星载聚束式 SAR 成像处理。

关键词 合成孔径雷达, 雷达成像, 子孔径处理, Chirp scaling 算法

中图分类号 TN951

1 引言

在使用同一天线的情况下, 聚束式 SAR 可以取得比条带式 SAR 更高的方位分辨率^[1]。在合成孔径期间, 通过操纵天线长时间持续照射于成像区域中心, 这种对于成像区域中心的跟踪过程使得天线波束视角随载体的飞行而不断转动变化, 而正是这种转动变化提供了比条带式 SAR 更长的合成孔径时间, 这意味着存在更大的多普勒带宽, 即可获得更高的方位分辨率。因而, 聚束式 SAR 天线波束宽度不再是方位分辨率的限制因素。由于合成孔径期间天线的转动变化, 聚束式 SAR 信号的特性更为复杂, 给成像处理带来一定难度。本文在分析、比较了几种常见聚束式 SAR 成像算法的基础上, 引入适用于星载聚束式 SAR 成像的改进 chirp scaling 算法。在分析星载聚束式 SAR 信号特性的基础上, 将子孔径处理与改进的 chirp scaling 算法相结合, 实现星载聚束式 SAR 的精确成像处理。

2 聚束式 SAR 成像算法分析

适用于聚束式 SAR 的成像算法主要有层析成像重建算法、极坐标格式算法、距离徙动算法和 chirp scaling 算法^[1]。

层析成像重建算法起源于医学上计算机辅助层析照相处理, 这是一种通过数字信号处理的方法, 由不同视角下的一维投影信息得到三维物体的二维截面图像的技术。但是该算法计算量较大, 而且在实时处理中往往很难将自聚焦处理结合到算法中。

极坐标格式算法只需两次 FFT 即可成像, 是一种成熟有效的成像处理算法。但是, 极坐标格式算法需在方位向和距离向进行复杂的二维插值运算, 将降低成像处理的精度和速度。此外, 极坐标格式算法对距离弯曲的补偿是不完全的, 限制了最大可成像区域范围。

距离徙动算法属于 SAR 成像处理的波数域算法, 只需三次 FFT 运算并可实现完全的距离徙动校正。其主要缺点是需进行 Stolt 插值, 这将增大算法的复杂性并降低成像处理精度。

Chirp scaling 算法优点在于无需插值运算并且只需复数乘法和 FFT 即可实现算法。经典的 chirp scaling 算法根据机载正侧视模型推出, 但星载聚束式 SAR 是一种斜视角持续变化的斜视模型, 而且对于高分辨率的星载聚束式 SAR 成像处理, 其距离徙动很大, 经典的 chirp scaling 算法无法精确校正。本文采用改进的 chirp scaling 算法^[2], 该算法基于斜视等效距离模型, 将经典的 chirp scaling 算法推广到斜视条件下。该算法具有与经典 chirp scaling 算法相似的处理

¹ 2001-07-22 收到, 2001-11-25 改回

流程和同数量级的计算量, 是一种高效率算法。改进的 chirp scaling 算法的详细推导参见文献 [2]。

3 星载聚束式 SAR 信号特性

由于星载条带式 SAR 的天线指向方向不变, 其信号特性, 如多普勒中心频率、多普勒带宽容易理解。而对于聚束式 SAR 模式, 斜视角随方位时间变化, 即天线指向方向持续变化, 则其信号特性与星载条带式 SAR 有一定差异。

由于卫星的运动极其复杂, 星载聚束式 SAR 的斜距没有显式解, 这里采用斜视距离等效模型 [2] 来逼近斜距变化。斜视距离等效模型为

$$R(t) = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \cos \varphi} \quad (1)$$

式中 r 是孔径中点时 ($t = 0$) 的斜距, v 是卫星运动的等效速度, φ 是等效斜视角。作泰勒级数展开, (1) 式可近似表示为

$$R(t) \approx r + \frac{\lambda}{2} \left(f_d t + \frac{1}{2} f_r t^2 + \frac{1}{6} \dot{f}_r t^3 \right) \quad (2)$$

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \left. \frac{dR(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{2v}{\lambda} \cos \varphi \quad (3)$$

$$f_r = \frac{2}{\lambda} \left. \frac{d^2 R(t)}{dt^2} \right|_{t=0} = \frac{2v^2}{\lambda r} \sin^2 \varphi \quad (4)$$

$$\dot{f}_r = \frac{2}{\lambda} \left. \frac{d^3 R(t)}{dt^3} \right|_{t=0} = \frac{6v^3}{\lambda r^2} \sin^2 \varphi \cos \varphi \quad (5)$$

式中 λ 为雷达波长, f_d 是多普勒中心频率, f_r 是多普勒调频率, \dot{f}_r 是多普勒调频率变化率。

等效斜视角 φ 的变化范围随方位分辨率的提高 (合成孔径的增长) 而增大。由于 f_d 与 $\cos \varphi$ 成正比, 则孔径时间内 f_d 的变化范围也随 φ 变化范围的增加而增大。此外, f_d 的显著变化会导致方位模糊, 而此种方位模糊在图像处理中不易补偿 [3]。

点目标信号的多普勒带宽 B_d 可近似表示为

$$B_d = [4v \sin(\Delta\varphi/2) \sin \varphi_c] / \lambda \quad (6)$$

式中 $\Delta\varphi$ 是合成孔径期间等效斜视角 φ 的变化范围, φ_c 为位于合成孔径中点处的等效斜视角。据 (6) 式, 不同距离或方位位置的点目标对应的等效斜视角不同, 其多普勒带宽亦不同; 再考虑到不同方位位置点目标的频率偏移, 总的多普勒带宽为

$$B_{d,\text{total}} = B_{d,\text{max}} + f_r W_a / v \quad (7)$$

$B_{d,\text{max}}$ 是孔径时间内点目标的最大多普勒带宽, W_a 是测绘带方位宽度, 一般为方位波束宽度形成的孔径长度。

由于合成孔径的增长, 聚束式 SAR 的多普勒带宽往往远大于对等的条带式 SAR, 这样, 就必须考虑 SAR 成像处理的一个基本限制, 即回波信号必须落在持续发射的脉冲信号之间, 且脉冲重复频率 (PRF) 必须大于多普勒带宽。据 (6) 式, 随着斜视角的增大, 多普勒带宽将有所降低, 这将允许采用较低的 PRF。然而, 这将导致回波长度的增长, 距离徙动的增大, 以及成

像处理时需要额外的多普勒带宽以避免混淆。因此, SAR 成像处理的这个基本限制要求根据成像性能需求在成像区域范围、多普勒带宽之间做出折衷处理并限定了雷达成像的最小测绘带。

此外, 对于斜视的聚束式 SAR, 可能需要持续改变 PRF 以便回波信号落在发射脉冲之间。对于这种情况, 应用本文算法进行成像处理时需以固定 PRF 对回波数据重新采样。

4 子孔径处理

4.1 子孔径处理的必要性

4.1.1 降低 PRF 及雷达功率限制 由于聚束式 SAR 合成孔径时间远大于相对应的条带式 SAR, 其多普勒带宽急剧增大。为避免方位频谱的混叠, 必须满足 $PRF > B_{d,\text{total}}$ 的基本限制。过高的 PRF 及数据率, 也是星载聚束式 SAR 设计及实现的一个基本限制。根据本文的卫星及雷达参数, 当方位分辨率达到 1m 精度时, $PRF > 10000\text{Hz}$ 方能满足成像要求。

此外, PRF 与测绘带带宽、脉冲宽度之间存在一个基本的限制关系:

$$2W_r \sin \phi / c + 2T_p + T_{sp} < 1/PRF \quad (8)$$

式中 c 为光速, W_r 是测绘带距离宽度, ϕ 是天线视角, T_p 是发射脉冲宽度, T_{sp} 是保护间隔时间, 通常允许随信号距离延迟时间的变化而调整。

由于 (8) 式的限制, PRF 很高时, 必然会限制测绘带的范围以及发射脉冲宽度。而发射脉冲宽度的减小, 则必须增大雷达发射峰值功率, 这将加大星载聚束式 SAR 的设计及实现难度。

考虑到上述的限制条件, 将整个合成孔径时间分为 $N(N \geq 1)$ 个子孔径, 子孔径之间的数据重复率为 $\varepsilon(0 \leq \varepsilon \leq 1)$ 。单个子孔径总的多普勒带宽可近似表示为

$$B_{d,\text{total, sub}} = \frac{1}{N(1-\varepsilon) + \varepsilon} B_{d,\text{max}} + f_r W_a / v \quad (9)$$

这样以较低的 PRF ($PRF > B_{d,\text{total, sub}}$) 进行信号采样, 将整个方位时间分为多个子孔径分别处理, 然后在相位上相干叠加, 产生高分辨率的聚束式 SAR 图像。此方法可以产生合成孔径时间很长的聚束式 SAR 图像。此外, PRF 及数据率可以保持很低, 其下限由天线的方位长度决定。

4.1.2 补偿多普勒中心频率的急剧变化 对于聚束式 SAR, 在合成孔径期间内, 测绘带内散射点的多普勒历史是随时间和空间变化的, 散射点的多普勒中心频率、多普勒调频率随斜视角而变化。根据本文的仿真参数, 图 1、图 2 给出波束中心点的多普勒调频率、多普勒中心频率在合成孔径时间内的变化情况, 天线视角为 20° , 35° 和 45° 。可以看出, 波束中心点的多普勒调频率变化范围达到 8Hz/s 左右, 多普勒中心频率变化显著, 达 7000Hz 左右。此外, 不同方位位置的多普勒中心频率亦存在明显的频率偏移。然而, 应用改进的 chirp scaling 算法进行成像处理时, 同一距离门内的方位信号数据需要一致的 chirp scaling 因子。而且对于急剧变化的多普勒中心频率, 为以固定的多普勒中心频率处理聚束式 SAR 回波数据, 通常要求采用较高的 PRF^[4]。应用于孔径处理, 则可以显著降低每个子孔径内多普勒中心频率的变化范围, 减少多普勒中心频率变化所导致的方位模糊的影响。

4.1.3 减小距离徙动量, 降低成像处理难度 由于斜距的二次项变化导致连续脉冲的回波位于不同的距离门, 此现象称作距离弯曲。未采用偏航控制时, 由于地球自转的影响, 星载聚束式 SAR 波束中心并非垂直指向测绘带, 存在一个等效斜视角, 产生线性的距离游走项 (远大于距离弯曲), 使得距离徙动大大增加。

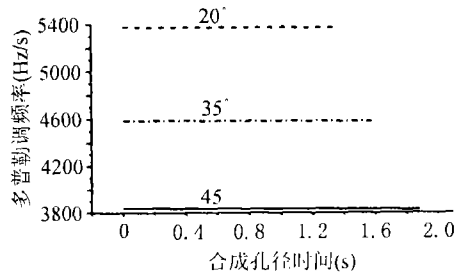


图 1 波束中心点多普勒调频率的变化规律

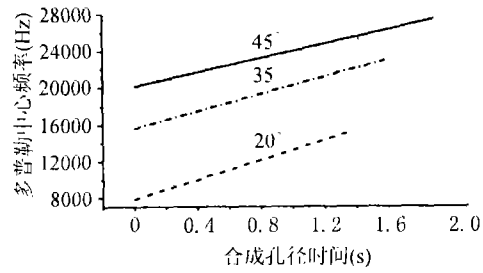


图 2 波束中心点多普勒中心频率的变化规律

对于星载聚束式 SAR, 最大、最小斜距分别产生于方位时间 $t = -(T_a/2)$ 和 $t = T_a/2$, T_a 为合成孔径时间。距离游走导致的斜距变化可表示为

$$\Delta R_w = v T_a \cos \varphi_c \quad (10)$$

移走距离游走项, 距离弯曲产生的最大、最小斜距分别产生于方位时间 $t = T_a/2$ 和 $t = 0$ 。距离弯曲导致的斜距变化可表示为

$$\Delta R_c = v^2 \sin^2 \varphi_c T_a^2 / (8r) \quad (11)$$

距离徙动包含了距离游走、距离弯曲这两类斜距变化。为说明距离徙动的影响, 根据本文的仿真参数, 给出未采用偏航控制情况下, 距离徙动数随卫星飞行的变化情况。给出天线视角为 20° , 35° 和 45° 时的典型曲线。

由图 3 可知, 距离徙动量随天线视角的增大而急剧增大。方位分辨率为 1m , 斜距分辨率为 0.5m , 视角 45° 时, 赤道地区的距离徙动数可达 1300 余个距离门。随着天线视角的进一步增大以及空间分辨率(方位或斜距)的提高, 距离徙动量还进一步急剧增大, 这将对成像处理造成很大困难。此外, chirp scaling 算法基于一定程度的近似而实现, 算法在多个步骤中应用相位驻留定理并通常在方位向傅里叶变换后舍弃三次项以上相位。Chirp scaling 算法采用线性近似替代距离徙动算法中理想的非线性 Stolt 插值, 随着分辨率的提高和成像测绘带的增大, 这种近似将可能变得不充分, 从而限制成像的精度。

通过子孔径处理, 据 (10) 式、(11) 式, 单个孔径内合成孔径时间的缩短将大大降低距离徙动量, 降低成像处理的难度, 并增大选择成像处理方法的灵活性。

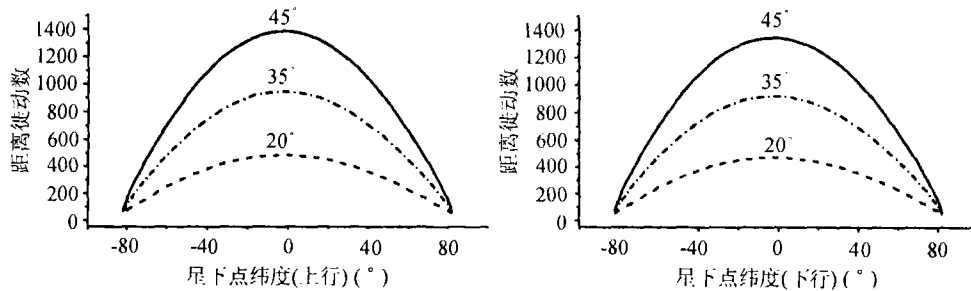


图 3 距离徙动随星下点纬度的变化规律

4.1.4 三次相位误差的限制 在许多成像算法的方位处理中, 包括 chirp scaling 算法, 往往忽略了 (2) 式中的相位三次项。最大三次相位误差产生于合成孔径两端 (即 $t = T_a/2$), 为

$$\Delta\text{Phase} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{12} f_r \left(\frac{T_a}{2} \right)^3 \right) = \frac{\pi}{3} f_r \left(\frac{T_a}{2} \right)^3 \leq \frac{3}{4}\pi \quad (12)$$

最大三次相位误差超出 $3\pi/4$ 的限制^[5], 则会造成方位向的失聚焦以及斜距向的模糊, 特别是在等效斜视角较大的情况下。

在本文的仿真条件下, 最大三次相位误差大约为 1.06π , 则三次相位误差的影响不可忽略。为补偿三次相位误差, 可考虑在 chirp scaling 算法中增加三次相位校正^[6], 这将增加约 60% 的计算量, 并加大了成像处理的复杂性。由于三次相位误差是 t^3 的函数, 应用子孔径处理, 可大大降低三次相位误差, 忽略其影响。

此外, 采用子孔径处理, 易于实现成像多视处理, 并可在子孔径处理中结合多普勒参数 f_d , f_r 的估计。

4.2 子孔径处理的实现

子孔径处理的示意图见图 4。方位信号 A 和 B 分别属于成像区域的方位起始点和结束点。应用改进的 chirp scaling 算法处理回波数据前, 原始回波信号按方位时间分为子孔径, 子孔径内信号的距离向保持不变, 方位向合成孔径时间相应缩短。为了保持相位连续, 抑制旁瓣, 避免脉冲响应函数性能恶化, 子孔径之间应有一段重叠, 重叠率与 PRF 有关。随 PRF 增大, 重叠率亦应增大。

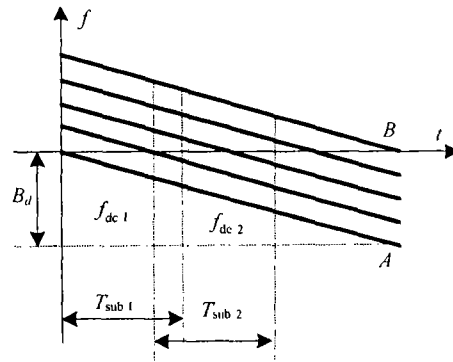


图 4 子孔径处理示意图

根据系统的 PRF 及 (9) 式计算子孔径点目标的最大多普勒带宽, 再根据 (6) 式计算子孔径对应的合成孔径锥角 $\Delta\varphi$, 即可计算出子孔径的合成孔径时间长度为

$$T_{\text{sub}} = 2 \sin(\Delta\varphi/2)r/(v \sin \varphi_c) \quad (13)$$

各个子孔径的 $\Delta\varphi$ 保持一致, 即子孔径的方位分辨率相同。本文仿真将整个合成孔径分为 4 个子孔径, 子孔径重复率为 0.5, 据 (13) 式即可计算出各个子孔径的合成孔径时间起始时间、结束时间及长度, 如表 1 所示。各个子孔径的孔径时间基本相同, 随着子孔径编号略有增加, 但考虑到子孔径的实现方法, 应将所有子孔径的孔径时间定为常数, 这个共同的子孔径时间长度应为各个子孔径时间中的最小值^[7]。此外, 为了便于在算法中应用 FFT 处理数据, 子孔径的数据量应是 2 的指数关系。

表 1 子孔径时间长度

	起始时间 (s)	结束时间 (s)	时间长度 (s)
总的合成孔径	0.0	1.700132	1.700132
子孔径 1#	0.0	0.679743	0.679743
子孔径 2#	0.339871	1.019773	0.679902
子孔径 3#	0.679822	1.359913	0.680091
子孔径 4#	1.019867	1.700132	0.680265

对于每个子孔径处理, 多普勒参数采用子孔径中心的 f_d, f_r 。完成距离处理及方位匹配滤波后, 得到了 SAR 图像的方位频谱, 在距离多普勒域重新合并子孔径。为恢复原有的方位分辨率, 需对合并后的孔径重新采样, 采样率应大于 $B_{d,\text{total}}$ 。最后再经方位 FFT 变换即可得到最终图像。在整个子孔径处理中, 只需最终的方位 FFT 是完整的长 FFT 变换, 这样子孔径的处理易于并行计算, 计算效率较高。

此外, 改进的 chirp scaling 算法存在距离向上的尺度随斜视角拉伸问题。成像处理后, 距离向时间为 $2r \sin \varphi / (c \sin \varphi_{\text{ref}})$, 与等效斜视角有关, 其中 φ_{ref} 为各个子孔径根据 f_d, f_r 计算出的参考等效斜视角^[6]。当子孔径之间等效斜视角变化较大, 距离向尺度变化超出一个分辨单元时, 会造成图像的模糊和失配准。子孔径处理时, 应对改进的 chirp scaling 算法的 $\text{CS}(f)$ 因子进行定标修正, 以保持各个子孔径尺度拉伸一致。原有的 $\text{CS}(f)$ 因子为^[2]

$$\text{CS}(f) = \sin \varphi_{\text{ref}} / \sqrt{1 - (\lambda f / (2v))^2} - 1 \quad (14)$$

修正后的因子为

$$\text{CS}_{\text{scl}}(f) = \sin \varphi_{\text{ref}} / \sqrt{1 - (\lambda f / (2v))^2} / \left(\sin \varphi_c / \sqrt{1 - (\lambda f_{\text{dc}} / (2v))^2} \right) - 1 \quad (15)$$

式中 φ_c, f_{dc} 分别是整个合成孔径中点处的等效斜视角和多普勒中心频率。

5 计算机仿真结果

为了验证本文算法的有效性, 进行了点目标成像仿真。卫星和雷达参数见表 2 和表 3。天线视角为 35° , 最大距离徙动量为 919 个距离门, 整个合成孔径分为 4 个子孔径, 子孔径重复率为 0.5。根据仿真参数, 产生点目标的回波信号, 然后应用本文算法进行成像处理, 成像结果见图 5 至图 7, 成像的性能分析见表 4。本文给出了近距点 $p_n(-1500\text{m})$ 、中心点 $p_c(0\text{m})$ 及远距点 $p_f(1500\text{m})$ 的仿真结果。

表 2 卫星平台参数

轨道半长轴 $a(\text{km})$	7000.3
卫星轨道倾角 $\alpha_i(^{\circ})$	96.2
卫星轨道偏心率 e	0.003
近心点角距 $\omega(^{\circ})$	71.5
升交点角距 $\Omega(^{\circ})$	119.0
轨道周期 $P(\text{s})$	5920.3

表 3 雷达参数

波长 $\lambda(\text{m})$	0.03
发射脉冲宽度 $T_p(\mu\text{s})$	50
发射脉冲带宽 $B_r(\text{Hz})$	2.8×10^8
发射脉冲调频率 $b(\text{Hz/s})$	5.6×10^{12}
距离向采样率 $f_s(\text{Hz})$	3.0×10^8
脉冲重复频率 PRF	6000
合成孔径锥角 $\Delta\varphi(^{\circ})$	0.9

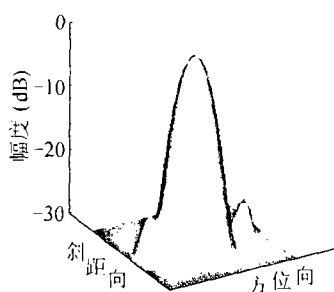


图 5 近距点的点目标响应

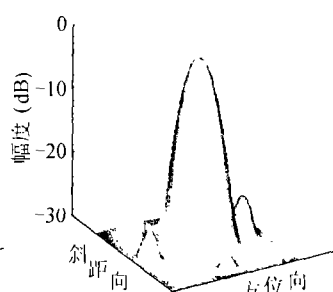


图 6 中心点的点目标响应

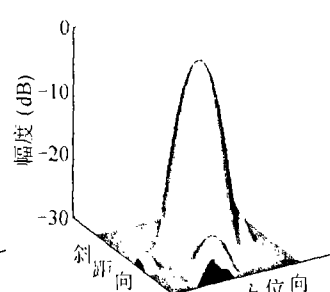


图 7 远距点的点目标响应

表 4 中 ρ_r 是斜距向分辨率, ρ_a 是方位向分辨率, ISLR 是积分旁瓣比, PSLR 是峰值旁瓣比, 下标 r 和 a 分别表示斜距向和方位向。表 4 的成像结果分析表明, 本算法适用于高分辨率和具有大距离徙动的星载聚束式 SAR 成像处理, 在未采用偏航控制的情况下亦能精确成像, 并通过子孔径处理, 大大降低了对 PRF 的要求。

表 4 点目标成像分析

	距离向			方位向		
	ρ_r (m)	ISLR _r (dB)	PSLR _r (dB)	ρ_a (m)	ISLR _a (dB)	PSLR _a (dB)
p_n	0.63	-17.9	-30.0	0.97	-15.9	-23.7
p_c	0.62	-19.6	-27.3	0.96	-16.5	-24.1
p_f	0.66	-16.5	-27.9	0.98	-15.2	-26.3

6 结 论

本文分析了星载聚束式 SAR 的信号特性。计算机仿真结果验证了结合子孔径处理的改进的 chirp scaling 算法可以实现星载聚束式 SAR 的精确成像处理。通过子孔径处理, 可以有效减小 PRF 及数据率, 降低星载聚束式 SAR 的设计和实现难度。此外, 子孔径处理可以减小距离徙动、三次相位误差, 以及多普勒中心的时变性对成像算法的影响, 减小成像处理难度, 增大选择成像处理方法的灵活性。

参 考 文 献

- [1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski, Spotlight Synthetic Aperture Radar, Boston, Artech House, 1995, 5-9.
- [2] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清, 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法, 电子学报, 2000, 28(3), 35-38.
- [3] G. W. Davidson, I. Cumming, Signal properties of spaceborne squint-mode SAR, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1997, 35(3), 611-617.
- [4] C. Prati, F. Rocca, Focusing SAR data with time-varying Doppler centroid, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1992, 30(3), 550-559.
- [5] Tat Soon Yeo, Ngee Leng Tan, Cheng Bo Zhang, Yi Hui Lu, A new subaperture approach to high squint SAR processing, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 2001, 39(5), 954-968.
- [6] 黄岩, 高分辨率星载合成孔径雷达成像处理技术研究, [博士论文], 北京航空航天大学, 1999, 第 5 章.

- [7] J. Mittermayer, A. Moreira, O. Loffeld, Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm, *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(5), 2198-2214.

A SUBAPERTURE IMAGING APPROACH OF SPACEBORNE SPOTLIGHT SAR

Wang Guodong Zhou Yinqing Li Chunsheng

(Dept. of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Signal properties of spaceborne spotlight SAR are discussed. Based on the analyses of a few spotlight imaging algorithm, a modified chirp scaling algorithm for spaceborne spotlight SAR is proposed. Besides, a subaperture method is combined with the algorithm. In order to resolve high Pulse Repetition Frequency (PRF) and the time-variant of Doppler center frequency, etc., the necessity and implementation approach of the subaperture method are analyzed thoroughly. The validity of the proposed method is tested by computer simulation.

Key words SAR, Radar imaging, Subaperture processing, Chirp scaling algorithm

王国栋: 男, 1971 生, 博士, 主要从事信号与信息处理、高分辨合成孔径雷达成像研究。

周荫清: 男, 1935 生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士。主要从事雷达、通信与信息系统等方面的教学和科研工作。

李春升: 男, 1963 生, 副教授, 博士, 中国电子学会高级会员。主要从事信号与信息处理、高分辨率雷达成像、时空二维自适应信号处理、时变谱估计等方面的研究工作。