

大斜视角与大波束角 SAR 成像比较

王 亮¹, 练有品², 黄晓涛¹, 周智敏¹

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2 后勤工程学院后勤信息工程系, 重庆 400016)

摘 要: 大斜视角与大波束角 SAR (Synthetic Aperture Radar) 成像中都要处理强耦合的回波信号, 获得聚焦性能良好的图像更加困难. 本文利用 SAR 回波的二维频谱表达式, 比较了在两种 SAR 成像中耦合项的来源和耦合程度, 通过分析非线性 Chip Scaling 算法中的解耦合方法, 得出了残余耦合与成像测绘带宽、目标最远距离的关系, 并利用这两个指标评价了非线性 Chip Scaling 算法应用于大斜视角和大波束角 SAR 成像的差异.

关键词: SAR 成像; 二维频域耦合; 非线性 CS 算法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1672-05

Comparison of Large-Squint and Large-Beamwidth SAR Imaging

WANG Liang¹, LIAN You-ping², HUANG Xiao-tao¹, ZHOU Zhim in¹

(1. Dept of Electronic Technology, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;

2 Dept of Logistics Information Engineering, LEU, Chongqing 400016, China)

Abstract In image formation of large-squint and large-beamwidth SAR, a high coupling and range-variant migration echo must be processed so that it is difficult to get a fine focusing synthetic aperture radar (SAR) image. In this paper, we first compared about the source and degree of the coupling in those two models by the mathematical two-dimension spectrum expression of SAR echoes. Next we mainly discuss the method of uncoupling in the nonlinear chip-scaling algorithm and attain a relation of residual coupling and two parameters which is mapping slant-range width and most far slant-range distance. Finally, we give the difference of those two parameters when that algorithm is used to large-squint and large-beamwidth SAR image formation.

Key words SAR image formation; two-dimension spectrum coupling; nonlinear chip-scaling algorithm

1 引言

通常情况下 SAR 以正侧视方式工作, 方位向天线波束指向与飞行方向成 90°角. 但在许多应用中需要将波束斜指, 观测前方场景, 例如战斗机、轰炸机等. 斜视工作模式还能够扩大观测带宽, 具有大幅面侦察的能力. 星载 SAR 中, 虽然天线波束指向为正侧视, 但由于地球自转的影响, 观测目标与雷达载体间的距离变化十分复杂, 可以用斜视等效距离模型来逼近^[1], 成像几何与斜视 SAR 相同. 大波束角 SAR 一般是指工作在低频段的超宽带 SAR, 它具有探测隐蔽在树林中或掩埋在浅地表目标的能力, 军事应用十分广泛. 由于方位向波束宽, 对天线指向不敏感, 超宽带 SAR 以正侧视方式工作^[2].

从成像来看, 大斜视角与大波束角 SAR 都需要处理强耦合、距离弯曲空变严重的回波信号, 要获得聚焦性能良好的图像更加困难, 文献 [3~6] 中分别提出了有效的解

决办法, 并获得了应用. 但是, 两者信号频段和成像几何是不同的, 回波信号的二维耦合无论在耦合程度、耦合对点目标聚焦的影响还是处理耦合的方法上都有差异. 本文正是基于这一考虑, 利用 SAR 回波的二维频谱分析比较了大斜视与大波束角成像的异同.

2 SAR 回波的二维频谱

设载机以速度 v 匀速直线运动, 飞行计时为 t . 波束中心通过 P 点的时刻记为 t_0 (一般可令 $t_0 = 0$ 表示回波计时的原点). 波束中心的斜视角为 β , t_0 时刻天线相位中心到 P 点的斜距为 R_0 , 载机航迹到点目标 P 的距离为 r_0 . 易知 $r_0 = R_0 \cos\beta$. 于是雷达到 P 点的斜距为 $P(t, R_0) = \sqrt{R_0^2 + (vt)^2 - 2R_0vt\sin\beta}$. 若 SAR 发射线性调频信号 $ss(t, t)$, 调频率为 k , 则点目标 P 回波信号的二维频域表达式可写为^[7]

$$SS(f_r, f_a; R_0) = \exp \left\{ j\varphi(f_r, f_a; R_0) - j\frac{p}{k}f_r^2 \right\}$$

$$\varphi(f_r, f_a; R_0) = -\frac{2\sqrt{f_a}R_0 \sin\beta}{v} - \frac{4pR_0 \cos\beta}{1} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v}\right)^2} \quad (1)$$

可将相位展开为 (f_r/f_c) 的级数为

$$\begin{aligned} \varphi(f_r, f_a; r_0) &= p_0(f_a; r_0) + p_1(f_a; r_0) \frac{f_r}{f_c} + p_2(f_a; r_0) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 \\ &+ p_3(f_a; r_0) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 + \dots \\ &= -\frac{2\sqrt{f_a}r_0 \tan\beta}{v} - \frac{4pr_0}{1} \gamma(f_a) - \frac{4pr_0}{1} \cdot \frac{1}{\gamma(f_0)} \\ &\cdot \frac{f_r}{f_c} + \frac{2pr_0}{1} \cdot \frac{1 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^3(f_a)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \frac{pr_0}{21} \\ &\cdot \frac{4 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^5(f_a)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 + \dots \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $\gamma(f_a) = \sqrt{1 - (f_a/2v)^2}$, $r_0 = R_0 \cos\beta$, $p_0(f_a; r_0)$, $p_1(f_a; r_0)$, $p_2(f_a; r_0)$, $p_3(f_a; r_0)$... 分别表示 (f_r/f_c) 的各阶系数. 常数项代表目标的方位向信息, 方位向聚焦后目标方位向位置对应的时刻为 $r_0 \tan\beta/v$; 一次项包含目标的距离向信息和距离迁徙, 距离向聚焦后目标距离向坐标为 r_0 ; 其余各项是距离方位耦合项, 定义 $\varphi_i(f_r, f_a; r_0) = p_i(f_a; r_0) (f_r/f_c)^i$, 为第 i 阶耦合项. 如何消除这些耦合项直接影响目标的二维聚焦性能.

3 耦合项分析

3.1 耦合项对成像的影响

实际上, 在式 (2) 中除过常数项, 其余各项中方位向频率 f_a 与距离向频率 f_r 均是耦合的, SAR 成像只能利用回波频谱特性近似解耦合, 尽量保证耦合项很小. 一阶和二阶耦合项可变换为

$$\begin{aligned} &\varphi_1(f_r, f_a; r_0) + \varphi_2(f_r, f_a; r_0) \\ &= -\frac{4p}{c} r_0 [1 + C_s(f_a)] f_r + p k_{src}(f_a; r_0) f_r^2 \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $C_s(f_a) = 1/\gamma(f_a) - 1$ 是 CS 因子, 能够表示距离弯曲的程度; $k_{src}(f_a; r_0) = [2f_0(1 - \gamma^2(f_a))]/[c^2 \gamma^3(f_a)]$, 是距离 r_0 的线性函数, 可以与信号的线性调频率 k 合成新的距离向调频率 $k_s(f_a; r_0) = (1/k - k_{src})^{-1}$, 成为距离 r_0 的非线性函数. 由于距离弯曲、距离向调频率都与目标距离向位置 r_0 有关, 而二维频域不能表征距离量, 所以必须选择一个参考距离 r_{ref} 通过 CS 操作将非参考点的距离弯曲统一到和参考点一致, 再利用参考距离构造距离弯曲校正因子和距离向压缩因子, 其中用到了 $k_s(f_a; r_0) \approx k_s(f_a; r_{ref})$ 的近似. 所以, 一阶耦合项可以完全消除, 不影响成像; 二阶耦

合项决定成像测绘带, 耦合越小, 新的距离向调频率近似程度越高, 成像测绘带就越宽.

CS 操作的基本前提是要求线性调频信号形式. 只存在一阶和二阶耦合的信号, 变换到距离向时域即满足要求. 若三阶及更高阶耦合项不能忽略, 将破坏线性调频性, 造成距离弯曲校正和距离向压缩性能变差. 体现在距离向响应曲线上, 奇数阶耦合造成主瓣位置偏移, 形成不对称距离向旁瓣, 偶数阶耦合使得主瓣展宽, 分辨率降低.

3.2 耦合项变化曲线

定义全部耦合项为

$$\varphi_{CP}(f_r, f_a; r_0) = \varphi(f_r, f_a; r_0) - p_0(f_a; r_0) \quad (4)$$

根据式 (2) 不难知道, 奇数阶耦合项的符号与 $\varphi_{CP}(f_r, f_a; r_0)$ 一致, 偶数阶恰恰相反. 也就是说, 偶数阶耦合对全部耦合的贡献为减少耦合, 奇数阶耦合对全部耦合的贡献为增加耦合, 且增加耦合之和大于减少耦合之和. 虽然奇偶耦合项可以抵消, 但从成像过程中是否可以忽略耦合的角度看, $\varphi_i(f_r, f_a; r_0)$ 的绝对值可以表征第 i 阶耦合的程度. $|\varphi_i(f_r, f_a; r_0)|$ 与 r_0 呈正比关系, 随 $|f_r|$, $|f_a|$ 的增加而增加, 而 $|f_r|_{max} = Br/2 = c/4\varrho$, $|f_a|_{max} = f_{ac} + Br/2 = f_{ac} + v/2\varrho$ 则令

$$\eta_i = r_0 \cdot \varphi_i(|f_r|_{max}, |f_a|_{max}), i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

表示第 i 阶耦合绝对值的最大值. 式中 ϱ_r , ϱ_a 分别表示点目标距离和方位分辨率, f_{ac} 与斜视角 β 有关. 成像中 $|\eta_1|$ 可以完全补偿, 所以只用讨论二阶以上耦合.

图 1(a) 给出了 $|\eta_2|/r_0$ 随斜视角 β 的变化曲线. 可以看到, 在二维分辨率要求一定时, 信号中心频率越低, 二阶耦合就越大; 中心频率越低, 随着斜视角的增加, 二阶耦合增加就越快; 对同一个中心频率, 二维分辨率要求越高, 二阶耦合就越大. 图 1(b) 给出了 $|\eta_3|/r_0$ 随斜视角 β 的变化曲线, 结论和图 1(a) 基本一致. 从图 1 还可得到, 中心频率为 500MHz 的正侧视 SAR ($\beta = 0^\circ$), 二阶耦合项只有 $0.01r_0$, 而 L 波段 ($f_c = 1.275\text{GHz}$) 或 C 波段 ($f_c = 5.3\text{GHz}$) SAR, 斜视角分别要求达到 30° 和 50° , 相应的二阶耦合项为 $0.08r_0$. 相比之下, 中心频率为 500MHz 正侧视 SAR 的三阶耦合项为 $0.028r_0$, 要大于 L 波段 30° 斜视时的 $0.012r_0$ 或 C 波段 50° 斜视时的 $0.003r_0$ 的三阶耦合项. 该结论对下文比较大斜视角和大波束角成像算法具有重要意义. 图 1(c) 给出的是三阶以上耦合项之和的绝对值随斜视角的变化曲线. 在一般的成像算法中这些耦合项会被忽略不计, 波段越高这种忽略就越合理, 例如二维分辨率为 1m 的曲线, L 波段 30° 斜视时为 $0.0075r_0$, C 波段 50° 斜视时 $0.00125r_0$, 但对中心频率为 500MHz 低频段回波, 在正侧视时三阶以上耦合之和仍然有 $0.03r_0$, 和前两阶耦合在一个量级上, 不能忽略不计.

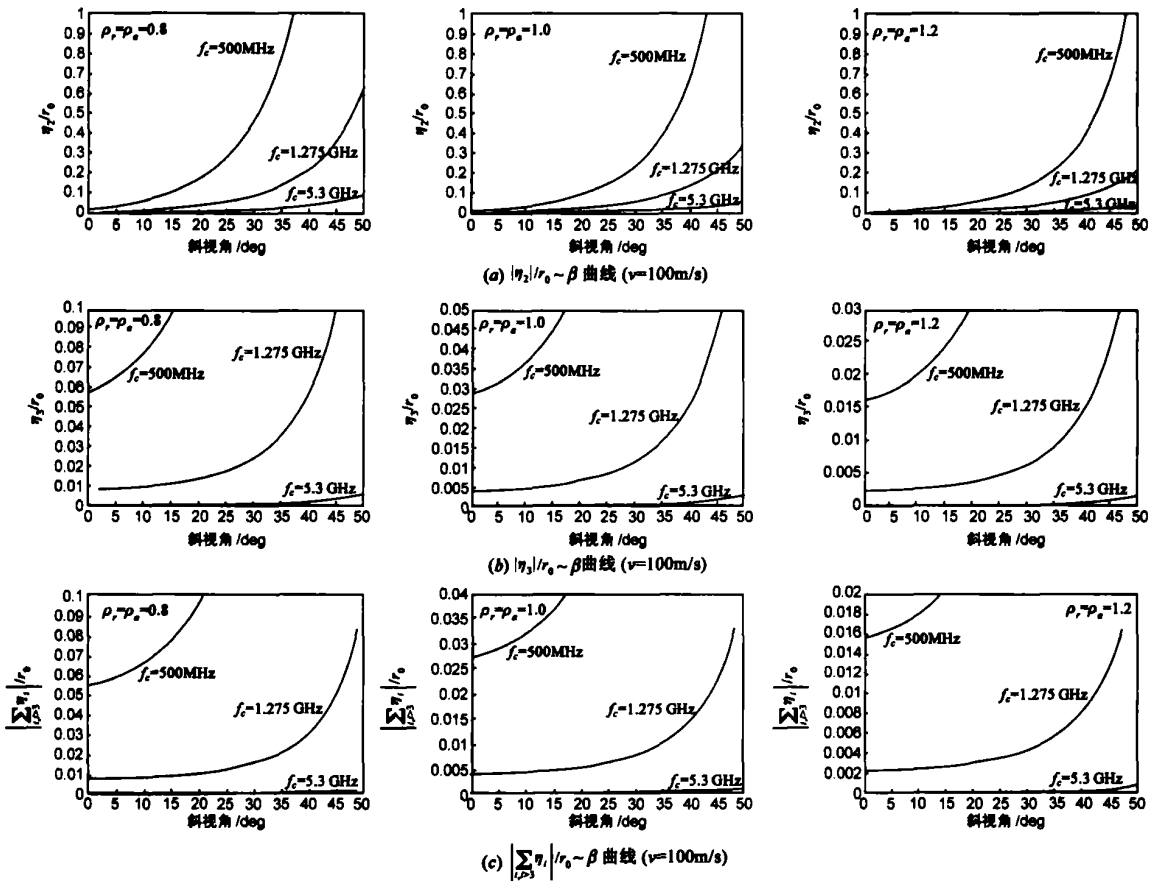


图 1 二阶、三阶及高阶耦合项随参数变化曲线

4 两种模式成像比较

4.1 非线性 CS算法的解耦能力

非线性 CS(NCS)算法^[6]适合于具有大耦合的 SAR 回波成像。算法对耦合项的处理有三处：一是忽略了三阶以上高阶耦合；二是在二维频率域用参考距离的三阶耦合项补偿回波的三阶耦合；三是对二阶耦合项的近似，通过在二维频域的三次非线性滤波和在距离-多普勒域的三次 CS 因子修正控制新的距离向调频率 $k_s(f_a; r_0)$ 随 r_0 线性变化，即

$$k_s(f_a; r_0) \approx k_s(f_a; r_{ref}) + k_s^2(f_a; r_{ref}) \cdot k_{src}(f_a; r_0 - r_{ref}) \quad (6)$$

根据 φ_i 的定义可求得由于线性近似在算法中形成的二阶残余耦合为

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_2(f_r, f_a; r_0 - r_{ref}) &= \frac{k_{src}(f_a; r_0 - r_{ref}) \cdot \varphi_r^2}{1 + \frac{k_s(f_a; r_0) - k_s(f_a; r_{ref})}{k_s(f_a; r_0)}} \\ &\approx k \cdot k_{src}^2(f_a; r_0 - r_{ref}) \cdot \varphi_r^2 \quad (7) \end{aligned}$$

注意到 k_{src} 是目标距离的线性函数，则 $\Delta \varphi_2$ 与 $|r_0 - r_{ref}|^2$ 成正比，比例因子可记为 $d(f_r, f_a)$ 。所以，由于这三处对耦合项的处理，NCS 算法中可以忽略不计的最大残余耦合有：

$$\varepsilon_R = \left| \sum_{i=2}^{\infty} \eta_i(r_0) \right|, \quad \varepsilon_S = \left| \eta_b(r_0 - r_{ref}) \right|,$$

$$\varepsilon_2 = d(|f_a|_{max}, |f_r|_{max}) \cdot |r_0 - r_{ref}|^2 \quad (8)$$

为更进一步消除三阶以上的耦合项，可采用一种改进的 NCS 算法^[2]。算法第一步在二维频率域乘以因子

$$\begin{aligned} H_{ref}(f_r, f_a; r_{ref}) &= -\varphi(f_r, f_a; r_{ref}) + \varphi_0(f_r, f_a; r_{ref}) \\ &\quad + \varphi_1(f_r, f_a; r_{ref}) + \varphi_2(f_r, f_a; r_{ref}) \quad (9) \end{aligned}$$

将参考点处的耦合项补偿到只保留二阶。此时点目标回波的二维频谱表达式为

$$\begin{aligned} \varphi(f_r, f_a; r_0) &= \varphi_0(f_r, f_a; r_0) + \varphi_1(f_r, f_a; r_0) + \varphi_2(f_r, f_a; r_0) \\ &\quad + \varphi_3(f_r, f_a; r_0 - r_{ref}) + \dots \quad (10) \end{aligned}$$

对照式 (2)，补偿后的二维频谱三阶及三阶以上耦合减小到只与 $(r_0 - r_{ref})$ 成正比。利用改进 NCS 算法处理中心频率为 500MHz 的超宽带 SAR 仿真数据，如图 2 示。无论目标位置为 2km 还是 10km，只要目标在成像参考距离位置上，二维聚焦性能仍然良好。若利用原始 NCS 算法成像，随着目标位置的增大，聚焦性能急剧恶化。不难分析，改进的 NCS 算法中忽略的二阶和三阶最大残余耦合表达式与 NCS 算法一致，但更高阶变为

$$\varepsilon'_R = \left| \sum_{i=3}^{\infty} \eta_i(r_0 - r_{ref}) \right| \quad (11)$$

4.2 大斜视角与大波束角成像比较

SAR 斜视工作的目的是扩大成像测绘带，一般选择在 L 波段或 C 波段。对照图 1 回波二维频谱耦合显著的主要

原因是斜视造成的多普勒中心不为 0 多普勒频率取值增大. P 波段超宽带 SAR 具有大波束角的特点, 对方位向波束指向不敏感, 一般以正侧视方式工作. 与斜视不同, 大波束角 SAR 回波二维频域耦合主要来自于低频或大的相对带宽. 从图 1 可以看到, 中心频率为 500MHz 的正侧视 SAR, 三阶耦合比 L 波段 35°斜视时还要大, 而且可以预料, 四阶甚至是五阶耦合项不可忽略. 因此, 需要利用改进 NCS 算法对大波束角 SAR 成像.

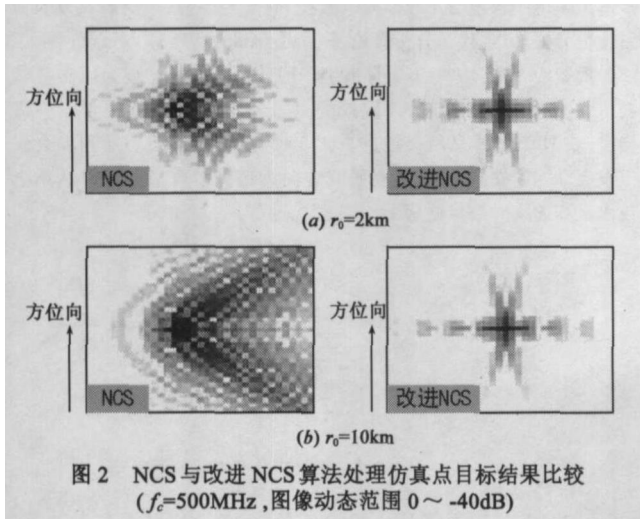


图 2 NCS 与改进 NCS 算法处理仿真点目标结果比较 ($f_c=500\text{MHz}$, 图像动态范围 0 ~ -40dB)

我们还可以利用式 (8)、(11) 从目标最大距离和最大

表 1 机载大斜视角与大波束角 SAR 成像比较 ($v=100\text{m/s}$, $\rho_a = \rho_r = 1.0\text{m}$)

波段	β	耦合来源	适用算法	可以忽略 ϵ_R	可以忽略 ϵ_3	可以忽略 ϵ_2
C 波段 ($f_c = 5.3\text{GHz}$)	50°	斜视	NCS	r_{0max}	w_{r3}	w_{r2}
L 波段 ($f_c = 1.275\text{GHz}$)	30°			$\frac{r_{0max}}{6}$	$\frac{3w_{r3}}{7}$	w_{r2}
P 波段 ($f_c = 500\text{MHz}$)	0°	低频或大相对带宽	改进 NCS	$w_{rR} = \frac{r_{0max}}{22}$	$\frac{3w_{r3}}{8}$	$14w_{r2}$

5 结论

斜视和大波束角 SAR 成像都面临如何解决二维频域高阶耦合的问题, 但二者耦合项的来源和耦合程度却不相同. 一般斜视 SAR 工作在 L 或 C 波段, 高阶耦合项凸现是由于大斜视角; P 波段 SAR 成像需要处理大波束角, 频段低造成高阶耦合项不能忽略, 而且耦合程度比斜视的情况更严重. 若用 NCS 算法成像, 能够满足理论聚焦性能的测绘带与目标最远距离随着波段的降低而逐渐减小, 而且这两个指标随斜视角的增大而迅速减小. 改进的 NCS 算法处理 P 波段大波束角 SAR 没有目标最大距离的限制, 但由于其两维耦合很大, 理想聚焦的测绘带范围比 C 或 L 波段大斜视角的还要小些.

参考文献:

[1] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨率星载 SAR 改进 Chip

测绘带的角度比较一下 NCS 算法对大斜视角和大波束角 SAR 成像处理的能力. 为此, 先做出 $d(|f_a|_{max}, |f_r|_{max})$ 随斜视角的变化曲线, 如图 3 所示, 发射脉冲时宽为 $10\mu\text{s}$ 其余仿真参数同图 1 由图可知, 在要求两维分辨率为 1m 的前提下, C 波段 50°斜

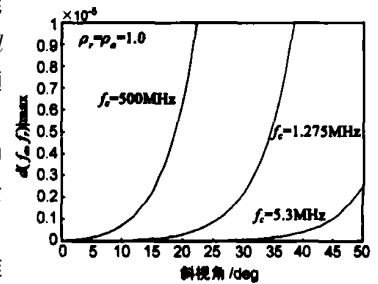


图 3 $d(|f_a|_{max}, |f_r|_{max})-\beta$ 曲线

视时 d_{max} 的与 L 波段 30°斜视时相差不大, 但几乎是 P 波段正侧视时 d_{max} 的 200 倍. 结合式 (8) 从另一个角度考虑可有表 1 结论. 利用 ϵ_2 限制, 若 NCS 算法处理 C 波段 50°斜视与 L 波段 30°斜视 SAR 时, 成像测绘带 w_{r2} 内点目标都能够理想聚焦, 那么用 NCS 算法 (或改进 NCS 算法) 处理 P 波段正侧视 SAR 的理想聚焦测绘带可达到 $14w_{r2}$. 同理可以利用 ϵ_3 限制 C 波段 50°斜视时的理想聚焦测绘带为 w_{r3} , 而 L 波段 30°斜视时不足 w_{r3} 的一半, 正侧视 P 波段还要小些. 利用 ϵ_R 限制 C 波段 50°斜视时理想聚焦的目标最远距离为 r_{0max} , L 波段 30°斜视时该参数只有 r_{0max} 的六分之一, 正侧视 P 波段 SAR 使用改进 NCS 算法, 不限制目标最远距离, 但限定理想聚焦的测绘带约为 r_{0max} 的百分之五. 所以 P 波段正侧视 SAR 的理想聚焦测绘带比 C 波段或 L 波段大斜视角要小些.

Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38

HUANG Yan, LI Chun-sheng, CHEN Jie, ZHOU Yin-qin. Refined chip scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 35-38 (in Chinese)

[2] 刘光平. 超宽带 SAR 高效成像算法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003

[3] Jin M Y, Wu C. A SAR correction algorithm which accommodates large-range migration [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1984, GE-22(6): 592-597

[4] Runge H, Naylor R. A novel high processing SAR focusing algorithm based on chip scaling [A]. Proc of IGARSS'92 [C]. NJ USA: IEEE, 1992, 372-375

[5] Alberto Moreira, Yonghong Huang. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chip scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans on Geoscience

and Remote Sensing 1996 32(5): 1029- 1040

- [6] G W Davidson, I G Cumming M R Ito A chip scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronics Systems 1996 32(1): 121- 133
- [7] 魏钟铨,等. 合成孔径雷达卫星 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 167- 168

作者简介:



王亮 男, 1978年 10月出生于陕西省陇县. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为超宽带 SAR 成像. E-mail joya_w@sohu.com



练有品 女, 1973年 10月出生于重庆市. 硕士. 现为后勤工程学院后勤信息工程系计算机教研室讲师. 主要研究方向为 SAR 仿真技术. E-mail lianyoupin@sohu.com

黄晓涛 男, 1972年 5月出生于湖北武汉. 博士. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为雷达信号处理、现代谱分析理论. E-mail hxttdt@yahoo.com.cn

周智敏 男, 1957年 2月出生于河北易县. 博士. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员. 获国家级、军队级科技进步奖 3项, 在国内外核心期刊和会议上发表学术论文数十篇. 主要研究方向为超宽带合成孔径雷达系统技术及高速实时信号处理.