

基于 ECS + FIR 的星载 SAR 快视成像算法

文 竹,周荫清,陈 杰

(北京航空航天大学电子信息工程学院 201 教研室,北京 100083)

摘 要: 常用的快视成像算法(SPECAN 算法、RD + FIR 算法等)无法满足大距离徙动条件下星载 SAR 成像处理的精度要求.针对以上问题,本文提出了一种基于等效斜视模型的 ECS + FIR 滤波的快视成像算法.该算法的运算量不随距离徙动量的增大而增加,适合于大距离徙动量的星载 SAR 数据快视成像.该算法在距离向采用 FIR 滤波来降低信号采样率,在方位向利用 SCANSAR 原理采用部分孔径数据进行成像,从而有效地减小了成像处理的运算量.论文详细地给出了 ECS + FIR 快视算法的原理和流程,并将该算法同 SPECAN 算法、RD + FIR 算法进行了比较.通过大量计算机仿真和对处理结果的对比分析,验证了算法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达;快视成像处理;ECS 算法;FIR 滤波

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0933-05

A New Quick-look Algorithm for Spaceborne Synthetic Aperture Radar Based on ECS + FIR

WEN Zhu, ZHOU Yin-qing, CHEN Jie

(School of Electronics and Information Engineering, BUAA, Beijing 100083, China)

Abstract: In the space-borne SAR quick-look processing, it can not satisfy the process precision and the process speed simultaneously with the conventional quick-look algorithms, SPECAN, RD + FIR, etc., to process the echo data which has large range migration. To solve this problem, this paper presents a quick look algorithm: ECS + FIR (Extended Chirp Scaling and FIR filter) algorithm, which is based on the equivalent slant range model. The computation amount of this algorithm will not change with the increase of the range migration, so it is quite suitable to process the space-borne SAR echo data with large range migrations. In addition, this algorithm uses sub-aperture data in the azimuth processing instead of the FIR filter in azimuth, which reduces the computing amount. The principle and flow chart of the algorithm are discussed in details, and a comparison between the ECS + FIR and other quick look algorithms has been made. Several simulation study results are given to demonstrate the feasibility of the algorithm.

Key words: synthetic aperture radar; quick look processing; ECS algorithm; FIR filter

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是对地观测的重要手段,星载 SAR 以其全天时、全天候、观测带宽大、覆盖面积广等优点获得了广泛的应用.由于星载 SAR 的数据处理量大,因此快速处理星载 SAR 回波数据,以实现图像快速浏览和信息快速检索,是星载 SAR 成像处理的一项重要任务.目前正在运行的星载 SAR 地面处理系统都包含了快视处理模块.通常快视成像处理要求处理速度达到实时.

目前常用的快视成像算法包括 SPECAN^[1,2]算法、FIR + RD^[3]算法.由于 SPECAN 算法无法进行距离徙动校正,而 FIR + RD 算法的计算量随距离徙动量的增加而迅速增加,因此对于大距离徙动量的星载 SAR 快视成像,不适合采用上述两种方法.针对这个问题,可以采用 CS 算法^[4,5]进行快视成像处

理.经典的 CS 算法采用正侧视模型,为了处理斜视情况下的回波数据,我们采用基于等效斜视模型^[6]的改进 CS 算法.为进一步减少计算量,可参考 ScanSAR^[7]模式在方位向利用部分孔径数据成像的原理,取代方位向 FIR 滤波.

基于上述分析,同时借鉴 Moreira^[8,9]提出的 ECS 算法,论文提出了基于等效斜视模型的 ECS + FIR 快视成像算法.

论文的第二部分将详细论述 ECS + FIR 快视算法的原理和处理流程,第三部分将对 ECS + FIR 快视算法同其他快视算法进行比较,ECS + FIR 快视算法的仿真与处理结果将在第四部分给出,第五部分对论文进行总结.

2 ECS + FIR 快视成像算法

本节中我们将详细论述 ECS + FIR 快视算法的原理和处理流程.

收稿日期:2003-09-18;修回日期:2003-12-28

基金项目:国家“863”计划课题(No. 2001AA135050)

文献[8]中的 ECS 算法采用正侧视模型,为了适合斜视成像处理,本文基于等效斜视模型对经典 ECS 算法进行了改进.

首先,根据等效斜视模型,给出单点目标部分孔径原始回波的数学模型的表达式

$$S_0(t, \tau) = A \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_{sub}}\right) W_a(t - t_A) W_r\left[\tau - \frac{2}{c}R(t - t_A; r_0)\right] \exp\left\{-j b\left[\tau - \frac{2}{c}R(t - t_A; r_0)\right]^2\right\} \exp\left\{-j \frac{4}{c}R(t - t_A; r_0)\tau\right\} \quad (1)$$

式中, A 表示后向散射系数, T_{sub} 表示部分孔径时间, t_A 对应目标方位向位置的时间, r_0 表示斜距,多普勒历程 $R(t - t_A; r_0)$ 表示为

$$R(t - t_A; r_0) = \left[r_0^2 - 2r_0v(t - t_A)\cos\theta + v^2(t - t_A)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

v 是等效星速, θ 是等效斜视角.

ECS + FIR 快视算法的处理流程如图 1.

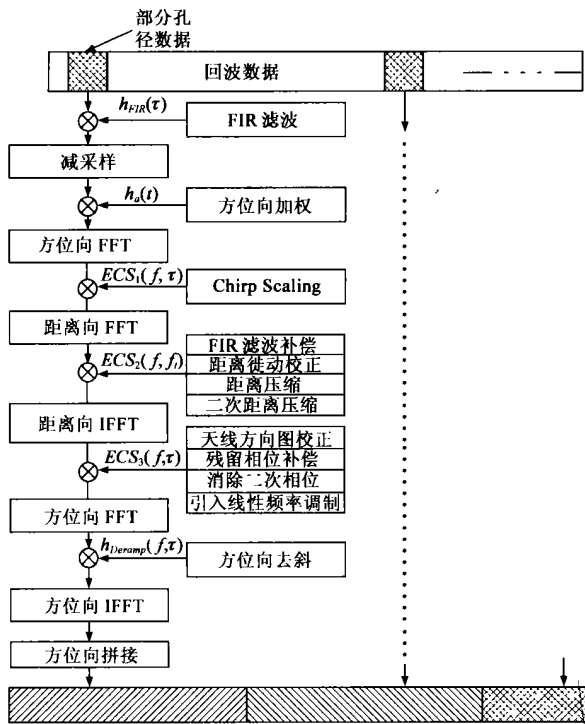


图 1 ECS + FIR 快视算法流程

2.1 方位向数据分割

ECS + FIR 快视算法首先进行方位向的数据分割. 设合成孔径时间为 T_s , 沿方位向, 每间隔时间 T_c 取出时间长度为 T_{sub} 部分孔径数据, 作为输入数据进行快视成像处理. 如图 2 所示.

在部分孔径时间 T_{sub} 内, 积累完全的目标 (积累时间为 T_{sub}) 对应的时间范围是 $T_s - T_{sub}$, 所以两个相邻部分孔径间隔时间 T_c 最大不能超过 $T_s - T_{sub}$.

由于多普勒时间 t 同多普勒频率 f 存在关系:

$$f = f_r(t - t_A) \quad (3)$$

所以, 部分孔径数据对应的多普勒带宽相应减少, 图像分

辨力降低, 这同降低方位向采样率的效果是相同的. 但是取部分孔径数据的方法不需要进行方位向 FIR 滤波, 所以相比 FIR 滤波加减采样的方法, 可以大大减少计算量.

2.2 距离向 FIR 滤波, 减采样

在整个成像处理的开始, 首先对原始回波数据进行 FIR 低通滤波, 滤波后信号

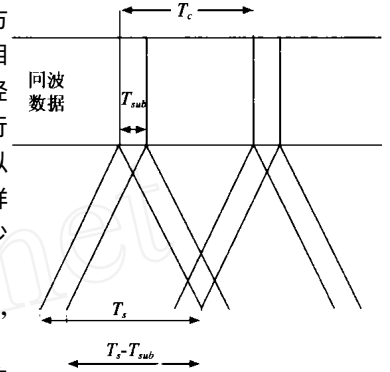


图 2 方位向数据分割

$$S_0(t, \tau) = S_0(t, \tau) \odot h_{FIR}(\tau) \quad (4)$$

式中 \odot 表示对变量 τ 进行卷积.

然后通过隔点抽取实现距离向的减采样, 由于滤波后的信号带宽减小, 所以可以避免信号的频谱混叠.

2.3 方位向时域加权及方位向 FFT

由式(1)知, 对于任一点目标, 取某一时间范围的部分孔径数据, 其多普勒带宽对应的频率范围

$$f_r(-T_{sub} - t_A) < f < f_r(T_{sub} - t_A) \quad (5)$$

同点目标的方位向位置有关. 因此, 方位向不同位置的目标在时域是重叠的, 而对应的多普勒频率范围不同. 所以方位向加权不能像处理全孔径数据那样在频域进行, 而应该在时域进行. 设加权函数 $h_a(t)$, 则加权后信号

$$S_1(t, \tau) = [h_a(t) S_0(t, \tau)] \odot h_{FIR}(\tau) = S_1(t, \tau) \odot h_{FIR}(\tau) \quad (6)$$

经过方位向 FFT 之后, 信号变换到距离-多普勒域, 由于 $h_{FIR}(\tau)$ 与多普勒时间 t 无关, 所以信号表达式为

$$S_1(f, \tau) = S_1(f, \tau) \odot h_{FIR}(\tau) \quad (7)$$

2.4 Chirp Scaling 因子相乘

同经典 CS 算法相同, 通过引入 Chirp Scaling 因子改变信号的调频率, 从而将不同距离处的距离徙动曲线校正成与参考距离处的距离徙动曲线相同. 修正的 Chirp Scaling 因子表达式

$$ECS_1(f, \tau) = \exp\left\{-j b_r(f; r_{ref}) C_s(f) \left[\tau - r_{ref}(f)\right]^2\right\} \quad (8)$$

其中 $b_r(f; r_{ref}) = \frac{b}{1 + b r_{ref} \sin^2 \frac{2}{c^2} \frac{(f/2v)^2}{[1 - (f/2v)^2]^{3/2}}}$ (9)

$$C_s(f) = \frac{\sin \theta_{ref}}{\sqrt{1 - (f/2v)^2}} - 1 \quad (10)$$

$$r_{ref}(f) = \frac{2}{c} [1 + C_s(f)] \quad (11)$$

Chirp Scaling 后的信号为

$$S_2(f, \tau) = [ECS_1(f, \tau) \cdot S_1(f, \tau)] \odot h_{FIR}(\tau) = S_2(f, \tau) \odot h_{FIR}(\tau) \quad (12)$$

2.5 距离向处理

距离向处理的方法同 CS 算法也基本相同, 先进行距离向 FFT 将信号变换到波数域,



$$S_2(f, f) = S_2(f, f) \cdot H_{FIR}(f) \quad (13)$$

乘以距离向补偿因子

$$ECS_2(f, f) = H_{FIR}^{-1}(f) \exp\left\{-j \frac{f^2}{b_r(f; r_{ref}) [1 + Cs(f)]}\right\} \exp\left\{j \frac{4}{c} f Cs(f)\right\} \quad (14)$$

式(2.14)中,第一项进行 FIR 滤波器的幅度校正,这是与经典 CS 或 ECS 算法不同的地方,第二项完成距离压缩和二次距离压缩,第三项进行距离徙动校正,经过距离向补偿后的信号

$$S_3(f, f) = ECS_2(f, f) \cdot S_2(f, f) \cdot H_{FIR}(f) \quad (15)$$

再经距离向 IFFT 变回距离 - 多普勒域,完成距离向的处理. 信号的表达式可写为

$$S_3(f,) = A \text{rect}\left[-\frac{r_0(f+f_d)\sin}{2v^2 D(f) T_{sub}} + \frac{t_A}{T_{sub}}\right] \cdot W_a\left(-\frac{r_0(f+f_d)\sin}{2v^2 D(f)}\right) \sin c\left[b\left(-\frac{2}{c} r_0 \frac{\sin}{\sin_{ref}}\right)\right] \exp\left\{-j \frac{4}{c} r_0 D(f) \sin\right\} \exp\left\{-j \frac{2n f_a}{v} \cos\right\} \exp\left\{-j 2 f t_A\right\} \exp\left\{-j \phi\right\} \quad (16)$$

其中 $D(f) = \sqrt{1 - (f/2v)^2}$, f_d 是多普勒中心频率,而 是 残留相位

$$\phi = \frac{4}{c^2} Cs(f) [1 + Cs(f)] \left(r_0 \frac{\sin}{\sin_{ref}} - r_{ref}\right)^2 b_r(f; r_{ref}) \quad (17)$$

2.6 方位向处理

对于距离压缩后的信号,沿方位向乘以修正的方位补偿因子

$$ECS_3(f,) = W_a^{-1}\left(-\frac{r_0(f+f_d)\sin}{2v^2 D(f)}\right) \exp\left\{-j \frac{4}{c} r_0 [1 - \sin D(f)]\right\} \exp\left\{j \frac{2n \cos}{v} f\right\} \exp\left\{j \phi\right\} \exp\left\{j \frac{f^2}{k_{scl}}\right\} \exp\left\{-j \frac{4v \cos}{k_{scl}} f\right\} \quad (18)$$

式(18)中,第一项补偿天线方向图的幅度加权,第二项补偿掉信号中的二次相位,第三项补偿掉信号中的线性相位,第四项补偿残留相位,第五项引入了一个新的二次相位,其调频率 $1/k_{scl}$ 是任意给定的固定值,不随距离 r_0 变化,通常取 k_{scl} 的数值为参考距离 R_{ref} 处的多普勒调频率,第六项则引入了新的线性相位,目的是校正信号在时间上的偏移.

经方位向补偿的信号进行方位向 IFFT,得到

$$S_4(t,) = D_A \text{rect}\left\{\frac{k_{scl}}{T_{sub} f_r} [t - (1 - \frac{f_r}{k_{scl}}) t_A]\right\} \exp\left\{-j k_{scl} t^2\right\} \exp\left\{j 2 k_{scl} t_A t\right\} \exp\left\{-j 2 f_d t\right\} \quad (19)$$

所有与 t 无关的项合并成 D_A , f_r 是 r_0 处的多普勒调频率.

2.7 去斜处理和方位向 FFT

对时域信号 $S_4(t,)$,乘以去斜因子

$$h_{Deramp}(t) = \exp\left\{j k_{scl} t^2\right\} \quad (20)$$

所得到的信号拥有固定频率为 $k_{scl} t_A - f_d$,其频率值与目标方位向位置 t_A 成线性关系.此时不同方位向位置的目标其

信号在时域是混叠的,但是经过方位向 FFT,各个目标在频域对应于不同的位置

$$S_5(f,) = D_A \sin c\left[(f + f_d - k_{scl} t_A) \frac{f_{scl}}{r_0} T_{sub}\right] \exp\left\{-j 2 (f + f_d - k_{scl} t_A) \left(1 - \frac{f_{scl}}{r_0}\right) t_A\right\} \quad (21)$$

式中 r_{scl} 是 k_{scl} 对应的参考斜距.这样,信号在频域完成了方位向压缩,并且其位置同 t_A 成线性对应关系.

2.8 方位向拼接

为了实现方位向的连续成像,方位拼接是必须的.各部分孔径数据经过上述处理过程后得到图像,图像中有效的区域范围是 $T_s - T_{sub}$,当相邻部分孔径的间隔 T_c 满足 $T_c < T_s - T_{sub}$ 时,为了完成方位向拼接,每个孔径的成像区域取 T_c 即可.

3 算法对比分析

相对于常用的快视成像算法, ECS + FIR 快视算法可以处理大距离徙动的星载 SAR 数据,运算速度上也较其它算法快,同时提供相同的图像分辨率.

3.1 空间分辨力性能对比

对于距离向分辨力, ECS + FIR 快视算法与其它同样采样 FIR 滤波加减采样的快视算法相同,分辨力为

$$r = N_r \frac{c}{B_w} \quad (22)$$

式中 B_w 是信号带宽, N_r 是距离向减采样倍数.

对于方位向分辨力,根据式(21),目标在频域的位置 $f_A = k_{scl} t_A - f_d$,于是目标的方位向分辨力

$$x_A = v_g \quad t_A = \frac{v_g}{k_{scl}} \quad f_A = \frac{v_g}{f_r T_{sub}} = \frac{V_g}{B} \quad (23)$$

对于 ECS 算法, $B = f_r T_{sub}$ 即是多普勒带宽,所以式(23)所表示的方位向分辨力同其它快视方法的方位向分辨力相同,相对于全分辨率成像处理(分辨力为 $V_g/f_r T_s$),其分辨力下降 T_s/T_{sub} .

3.2 距离徙动量比较

对于星载 SAR 快视成像,大距离徙动是一个必须考虑的问题.对于 L 波段 SAR,在不加偏航控制的情况下,赤道附近其距离徙动可达到几百个距离门.基于 SPECAN 的快视算法由于不能校正距离徙动,所以显然是不适合进行大距离徙动成像处理的;而基于 RD 的快视算法虽然可以处理有距离徙动的 SAR 数据,但是其二维匹配滤波器的大小随着距离徙动而增大,从而使运算量大大增加,所以也不适合大距离徙动成像处理; ECS + FIR 快视算法基于 ECS 算法改进而来,距离徙动校正距离徙动通过乘以补偿因子(式(14)的第三项)实现,距离徙动的增加不会造成运算量的增加,所以 ECS + FIR 快视算法非常适合处理大距离徙动的星载 SAR 数据.

3.3 运算量对比分析

设星载 SAR 原始数据大小为 $N_a \times N_r$, 距离徙动数为 N_{mig} , 并且假设方位向大小 N_a 恰好是一个孔径数据的长度.对于 ECS + FIR 快视算法,取部分孔径长度为全孔径的 $(1/4)$, 距离向 4 倍减采样, FIR 滤波器长度 N_{FIR} ; 对 RD + FIR 快视算

法,设方位向和距离向均作 4 倍减采样.下表给出两种算法运算量的表达式.

表 1 ECS + FIR 快视算法与 RD + FIR 快视算法运算量的比较

算法	运算量(浮点运算次数)
ECS + FIR	$N_a N_r (2N_{FIR} + \frac{15}{16} \log_2 N_a + \frac{5}{8} \log_2 N_r - 2)$
RD + FIR	$N_a N_r (4N_{FIR} + \frac{5}{8} \log_2 N_a + \frac{5}{8} \log_2 N_r - \frac{25}{8} + \frac{3N_{img}}{8})$

显然当距离徙动量很大时, RD + FIR 快视算法的运算量比 ECS + FIR 快视算法大得多.

综上所述,对于具有大距离徙动的星载 SAR 数据, ECS + FIR 快视算法能够在与 RD + FIR 快视算法分辨率相同的情况下,以更小的运算量进行快视成像处理,因此 ECS + FIR 快视算法是一种更加高效的快视算法.

4 计算机仿真

首先利用仿真回波数据进行成像处理,仿真参数如表 2.

表 2 仿真参数

波长(米)	0.2	重复频率(Hz)	2100
信号带宽(MHz)	62	多普勒中心频率(Hz)	2100
脉冲宽度(μs)	30	多普勒调频率(Hz/s)	600
采样率(MHz)	70	合成孔径时间(s)	2.8

设定数据大小为 16384 × 16384,对应卫星运行时间为 8 秒左右,距离徙动大约在 300 个距离门左右,场景设为间距 2000 米的点阵目标.应用 ECS + FIR 快视算法,距离向做 8 倍减采样,方位向取部分孔径长度为 512 点,每 4096 个脉冲取 512 个脉冲的部分孔径,共取 4 个部分孔径,成像后进行方位向拼接,得到的成像结果参见图 3.



图 3 仿真数据的 ECS 快视成像结果

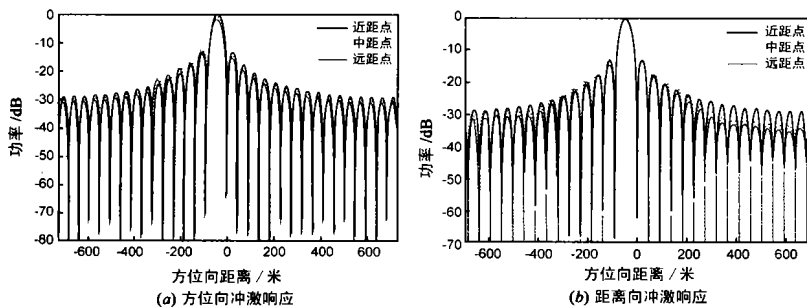


图 4 点目标成像结果剖面图

对图像进行成像质量评估,获得方位向和距离向冲激响应函数如图 4 所示.

分别测量近距、中距和远距的点目标的质量指标,见表 3. ECS + FIR 快视算法成像质量指标与理论分析的结果基本吻合,并且图像在不同距离上有着比较好的质量一致性.

表 3 点目标质量指标评估

		近 距	中 距	远 距	理论值
方 位 向	方位分辨率(m)	40.67	40.52	41.03	40.51
	积分旁瓣比(dB)	-10.46	-10.36	-10.74	-9.9
	峰值旁瓣比(dB)	-13.48	-13.22	-13.12	-13.26
距 离 向	距离分辨率(m)	16.00	15.98	15.94	15.95
	积分旁瓣比(dB)	-10.70	-10.51	-10.59	-9.9
	峰值旁瓣比(dB)	-13.74	-13.22	-13.30	-13.26

为了验证 ECS + FIR 快视算法的运算速度,分别在微机平台和 workstation 平台上进行了运行速度测试.微机平台基本配置如下: 2.0GHz 主频 P4CPU (512k 二级缓存), 2G 内存 (DDR266), 80G7200rpm 硬盘; SGI - O3200 服务器为 8CPU, 16G 内存, SCSI 硬盘,采用 SGI 特有的 OpenMP 方式对 ECS + FIR 快视算法进行并行,并行线程数为 8.

表 4 ECS + FIR 快视算法的运算速度

	距离向 4 倍减采样,方位向部分孔径 1024 点	距离向 8 倍减采样,方位向部分孔径 512 点
微机平台	58.124	14.682
SGI 工作站	11.45	3.49

可见,在微机平台上,在距离向降 8 倍采样率、方位向取 512 点部分孔径的情况下, ECS + FIR 快视算法可以达到 1/2 的实时率;而对于 SGI 工作站,在 8 线程并行的情况下, ECS + FIR 快视算法的处理速度已经远远超过了实时成像的速度要求.

5 结论

本文提出了一种 ECS + FIR 快视处理新算法,并详细论述了 ECS + FIR 快视算法的原理.通过与其它常用的快视算法 (SPECAN、FIR + RD) 进行比较, ECS + FIR 快视算法能够处理大距离徙动量的 SAR 回波数据,同时在提供相同分辨率的情况下,计算量更少,十分适合星载 SAR 的快视成像处理.通过仿真试验, ECS + FIR 快视算法在成像质量指标,以及图像一致性上都令人满意,在运算速度方面,距离向降 8 倍采样率、方位向部分孔径长度 512 点的情况下,使用 OpenMP 进行 8 线程并行运算,处理速度已经超过了实时成像的速度要求.因此 ECS + FIR 快视算法是一种快速、有效、通用性好的快视成像算法.

参考文献:

[1] 郑明洁.星载合成孔径雷达快视成像[J].上海航天,2000,17(5):1-4.

- [2] Liu Xiaoqin ,et al. Quicklook procesing for READSAT data [A]. Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Piscataway NJ USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc ,2000. 2281 - 2283.
- [3] Huang Shunji. Satellite-borne SAR quick-look processing algorithm [A]. Proceedings of 1996 CIE International Conference of Radar[C]. Piscataway NJ USA :IEEE,1996. 686 - 689.
- [4] R Keith Raney ,et al. Precision SAR processing using Chirp Scaling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994 ,32 (4) :786 - 799.
- [5] H Runge ,et al. A novel high precision SAR focussing algorithm based on Chirp Scaling [A]. Proceedings of IEEE 1992 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Piscataway , NJ , USA : IEEE ,1992. 372 - 375.
- [6] 黄岩. 高分辨率星载合成孔径雷达成像处理技术研究[D]. 北京 :北京航空航天大学研究生院 ,1999.
- [7] Richard Bamler ,et al. ScanSAR processing using standard high precision SAR algorithms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,1996 ,34(1) :212 - 218.
- [8] A Moreira ,et al. Extended chirp scaling algorithm for air-and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,1996 ,34 (5) :1123 - 1136.

- [9] A Moreira ,et al. Azimuth and range scaling for SAR and ScanSAR processing[A]. Proceedings of IEEE 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium , ' Remote Sensing for a Sustainable Future. ' [C]. Piscataway NJ USA :IEEE ,1996. 1214 - 1216.

作者简介 :



文 竹 男,1978 年出生于辽宁沈阳,北京航空航天大学 2001 年本科毕业,同年被推荐为通信与信息系统专业直博生,主要从事合成孔径雷达系统仿真、高分辨力 SAR 成像处理、分布式 SAR 信号处理技术等方面的研究工作. email : who . @163. com

周荫清 男,1936 年出生于湖南湘潭,北京航空航天大学教授、博士生导师,中国电子学会会士,主要研究方向:信息获取与处理、阵列信号处理、高分辨率 SAR 成像处理、SAR 星地一体化系统分析、分布式 SAR 系统设计与信号处理等.

陈 杰 男,1973 年出生于河南郑州,现在北京航空航天大学从事博士后研究,主要研究方向:SAR 系统星地一体化任务分析与仿真、高分辨率星载成像处理以及星载分布式干涉 SAR 系统设计与信号处理.