

一种改进的星载合成孔径雷达快视处理算法¹

刘晓芹 吴一戎 彭海良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 该文针对合成孔径雷达 (SAR) 发射线性调频波形和多普勒历程的特点, 提出了一种改进的星载 SAR 快视处理算法。首先建立了算法的数学模型, 给出了 SAR 快视图像精确拼接的方法, 最后通过对 ERS-1 条带数据的快视处理, 验证了该快视算法的有效性和高效性。

关键词 合成孔径雷达, 快视处理, 线性调频, ERS-1

中图分类号 TN951

1 引言

合成孔径雷达 (SAR, Synthetic Aperture Radar) 是自五十年代发展起来的一种新型对地观测手段, 是一种高分辨率的二维成像雷达, 特别适于全天候大面积的地表成像, 在民用遥感及军事侦察领域都有广阔的应用前景。

合成孔径雷达高数据率及二维成像的特点, 决定了其成像处理器应具有高的 I/O 吞吐能力, 大的总线带宽以及矢量运算的能力, 对系统提出了很高的要求。现在国际上有多颗 SAR 卫星在轨运行, 每天每颗卫星具有 1TB 以上的数据测绘能力。随着世界各国对 SAR 数据应用的日益深入, 尤其在军事应用领域, 越来越迫切地要求 SAR 数据的地面处理中心具备对较大量 SAR 数据的快速反应能力。对地面数据处理中心来说, 每天对所有接收的数据进行全分辨率的成像处理, 在现有的计算平台上, 既无法实现也没有必要。但对所有接收的数据进行快视浏览是现代每个地面数据处理中心所必须具有的能力, 因此人们在探索对 SAR 数据进行更精确处理的同时, 也同样重视在 SAR 快视处理方面的研究。在经典 Range-Doppler (RD) 算法广泛应用于地面精处理时, 人们也很快开发出基于 RD 算法的 SAR 快视处理算法, 该算法通过对 SAR 原始数据预滤波, 降低 SAR 原始数据的采样率, 实现了低分辨率的 SAR 快速成像。后来人们又利用雷达信号处理中的 dechirp 技术实现了比 RD 算法更快的 SPECAN 算法, 该算法在方位向处理上节省了预滤波和一次傅里叶变换, 从而进一步提高了 SAR 快速处理的速度, 受到了 SAR 处理领域专家们的高度评价。

本文将聚束 (spotlight) 模式极坐标算法中景中心相位基准化 (scene center stabilizing) 的概念引入到 SAR 的快视处理中, 利用子孔径处理技术和对处理数据的跳跃选取特性, 降低了对成像处理器的资源 (包括系统 I/O 及内存等资源) 要求, 从处理量的角度看比 SPECAN 算法又省去了距离向的预滤波和一次傅里叶变换, 在距离和方位向均大大减少了运算量, 从而实现了 SAR 数据的快视处理。

2 SAR 快视处理的改进算法

2.1 快视处理与拼接

2.1.1 数据子块的快视处理 对于发射线性调频脉冲信号的星载合成孔径雷达, 其回波信号为

$$S_r(t, \tau) = a_t \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_t/c}{T_p}\right) e^{j2\pi f_c(t-2R_t/c)} e^{j2\pi \gamma(\tau-2R_t/c)^2} \quad (1)$$

¹ 1999-07-20 收到, 1999-12-04 定稿
863-308 主题经费资助项目

式中 a_t 为回波信号的幅度, R_t 是雷达与目标间的距离, T_p 为发射信号脉冲时宽, γ 为距离向调频率, f_c 为信号载频, $\text{rect}(x)$ 为矩形函数。在此只考虑理想情况, 暂不考虑雷达天线的增益, 传输过程中信号幅度的衰减, 目标散射因子的变化等因素对回波信号表达式带来的影响。

极坐标算法中景中心相位基准化的过程, 即利用景中心回波信号作为参考信号, 对回波信号作基准化处理, 使其中来自景中心的回波信号分量具有固定的频率。设景中心的回波信号为

$$S_{\text{ref}}(t, \tau) = a_t \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_0/c}{T_p}\right) e^{j2\pi f_c(t-2R_0/c)} e^{j2\pi\gamma(\tau-2R_0/c)^2} \quad (2)$$

相位基准化后有

$$S_{if}(t, \tau) = A \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_t/c}{T_p}\right) e^{-j\frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{f_c}{\gamma} + \tau - \frac{2R_0}{c}(R_t - R_0)\right)} e^{j\frac{4\pi\gamma(R_t - R_0)^2}{c^2}} \quad (3)$$

在待处理景物半径 r_0 满足 (4) 式:

$$r_0 < \rho c / (\lambda \sqrt{\gamma}) \quad (4)$$

的条件下, 快视算法能忽略掉 (3) 式中的残余视频相位项 $e^{j\frac{4\pi\gamma(R_t - R_0)^2}{c^2}}$ 。 (4) 式中 ρ 为距离和方位向分辨率的最小值^[1]。

忽略残余视频相位后, 来自整个目标区域的聚束 SAR 的解调信号近似为

$$S_d(t, \tau) = \iint e^{j\phi_d(t, \tau)} dx dy = \iint e^{-j\frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{f_c}{\gamma} + \tau - \frac{2R_0}{c}(R_t - R_0)\right)} dx dy \quad (5)$$

通过分析被照射景中散射体与雷达相位中心的位置关系 (图 1), 可以推知在满足 R_t 与 R_0 均远大于 x_t 和 y_t 的条件下, 有 (6) 式成立:

$$R_t - R_0 \approx \sin \phi_a (x_t \cos \theta_a + y_t \sin \theta_a) \quad (6)$$

令

$$K_p(t, \tau) = K_R \sin \phi_a = (4\pi\gamma/c)(f_c/\gamma + \tau - 2R_0/c) \sin \phi_a \quad (7)$$

$$K_x = K_p \cos \theta_p = K_p \cos \theta_a \quad (8)$$

$$K_y = K_p \sin \phi_p = K_p \sin \phi_a \quad (9)$$

此时整个目标区域散射体回波的解调信号近似为

$$S_d(t, \tau) = \iint e^{j\phi_d(t, \tau)} dx dy = \iint e^{-(K_x x_t + K_y y_t)} dx dy \quad (10)$$

显见对 $S_{if}(t, \tau)$ 进行二维傅里叶变换即可得到二维雷达图像。注意到这样处理并未进行极坐标到直角坐标的转换, 即没有进行 MTRC (Motion Through Resolution Cells) 的校正, 因此这种方法只适用于低分辨率的 SAR 成像, 而 SAR 的快视处理正属于这种情况。工程应用中可以接受的情况是距离迁移小于一个距离分辨单元以及在方位向上的迁移小于一个方位分辨单元。在这样的约束条件下, 对成像的区域大小限制为

$$r_0 < 2\rho^2 / (\lambda K) \quad (11)$$

式中 r_0 为成像区域的半径, λ 为雷达波长, K 为主瓣加宽因子。综合考虑 (4) 和 (11) 式后, 最终对成像的区域大小限制为

$$r_0 < \min \left(2\rho^2/(\lambda K), \rho c/(\lambda\sqrt{\gamma}) \right) \quad (12)$$

2.1.2 快视图像的拼接 由于 (12) 式限制了被成像区域的大小, 亦即限制了算法处理数据块的大小, 因此必须进行数据子块的划分及快视图像的拼接处理。本文对数据的划分如图 2 所示^[2]。

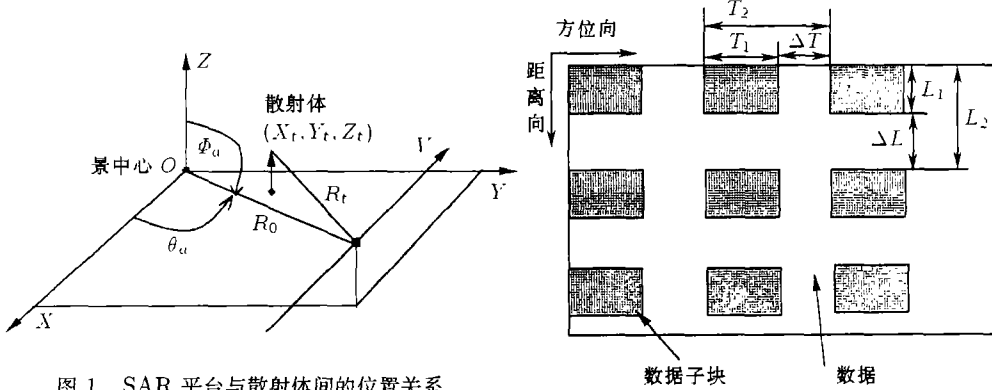


图 1 SAR 平台与散射体间的位置关系

图 2 快视算法对数据的取样

注意到在图 2 中对数据分块处理, 相当于对回波信号进行加窗处理, 先不考虑天线增益带来的影响, 有

$$s(t, t_0) = \sigma_0 \text{rect}\left(\frac{t - t_1}{T_1}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left\{-j2\pi\left[f_{DC}(t - t_0) + \frac{f_{DR}}{2}(t - t_0)^2\right]\right\} \quad (13)$$

式中 t_1 为子孔径 T_1 的中心位置, 实际处理中一般都有 $T_1 < T/2$ 成立。参考差频信号为

$$h(t) = \exp\{j2\pi(f_{DC}t + f_{DC}t^2/2)\} \quad (14)$$

易得

$$S'(f, t_0) = C_0 \frac{\sin \pi T_{\text{sub}}(f - f_{DR}t_0)}{\pi(f - f_{DR}t_0)} \quad (15)$$

其中 $C_0 = \sigma_0 \exp\{j2\pi(f_{DC}t_0 - f_{DR}t_0^2/2)\}$ 。

$$T_{\text{sub}} = \begin{cases} t + T_1/2 - T/2, & -T_1/2 - T/2 < t < -T/2 + T_1/2 \\ T_1, & -T/2 + T_1/2 < t < T/2 - T_1/2 \\ T/2 + T_1/2 - t, & T/2 - T_1/2 < t < T/2 + T_1/2 \end{cases} \quad (16)$$

显见, 由 (15), (16) 式, 如果没有天线增益带来的影响, 对 SAR 数据子孔径数据进行快视处理后, 对于均匀场景, 其图像灰度在方位向 (或距离向) 近似为梯形分布。

对于实际数据必须考虑天线方向图对雷达回波的影响, 一般 SAR 天线在距离向波束很宽, 可以不考虑天线在距离向上对雷达回波的影响。假设天线方向图为

$$G[x(t), r(\tau)] = G_a(x) \text{rect}\left(\frac{x - x_2}{X}\right) = G_a(t) \text{rect}\left(\frac{t - t_2}{T}\right) \quad (17)$$

式中 x_2 , t_2 为天线相位中心在照射场景中的位置 and 对应时刻。令 $t_2 = 0$, 此时有

$$\begin{aligned} s(t, t_0) &= \sigma_0 G_a(t) \text{rect}\left(\frac{t-t_1}{T_1}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left\{-j2\pi(f_{DC}(t-t_0) + \frac{f_{DR}}{2}(t-t_0)^2)\right\} \\ &= g(t)h(t) \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} g(t) &= G_a(t) \text{rect}\left(\frac{t-t_1}{T_1}\right) \\ h(t) &= \sigma_0 \text{rect}\left(\frac{t-t_1}{T_1}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left\{-j2\pi(f_{DC}(t-t_0) + \frac{f_{DR}}{2}(t-t_0)^2)\right\} \end{aligned}$$

参考差频信号保持不变, 易得

$$S'(f, t_0) = C_0 \frac{\sin \pi T_{\text{sub}}(f - f_{DR}t_0)}{\pi(f - f_{DR}t_0)} * F\left\{G_a(t) \text{rect}\left(\frac{t-t_1}{T_1}\right)\right\} \quad (19)$$

其中 $F\{G_a(t) \text{rect}[(t-t_1)/T_1]\}$ 为点目标在该子孔径中对应有效天线方向图的傅氏变换, * 表示卷积。因此在子孔径中, 虽然部分点目标的合成孔径时间是相同的, 但由于同一时刻被照射时对应天线增益不同, 因而即使是均匀场景的雷达快视图像灰度在方位向 (或距离向) 也不可能为梯形分布。显见, 必须对天线方向图的影响进行校正, 不然会影响快视图像拼接后的目视效果, 形成明显的斑马条纹。在实际快视处理中, 卫星天线的方向图是不可能准确获知的, 一个近似的办法是对距离向求平均, 获得近似的天线方位图影响曲线。

一般星载 SAR 中 PRF 很接近于 F_{\max} , 以 ERS-1 为例, PRF 为 1678Hz, 信号多普勒带宽为 1496Hz。因此, 要求参考差频信号的带宽足够低 (即长度足够短), 才能满足 Nyquist 采样定理而不会混叠, 但如果被处理的子孔径太短, 则很难达到需要的分辨率。因此在实际处理中, 在适用的分辨率下, 混叠是不可避免的, 但我们可以将两端混叠部分剔除而只保留未混叠部分。

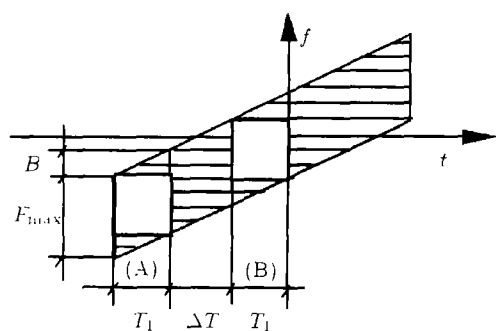


图 3 差频后信号历程

对于方位向混叠带宽为

$$\Delta B = F_{\min,a} + B - \text{PRF} \quad (20)$$

对于距离向有

$$\Delta B_r = F_{\max,r} + B_r - F_s \quad (21)$$

在综合考虑子孔径效应及混叠带来的影响后, 可以得出快视图像要实现无缝拼接所需的 ΔT 为 (图 3)

$$\Delta T = (F_{\max,a} - 2B)/f_R = T - 2T_1 \quad (22)$$

上式中 $F_{\max,a}$ 为方位最大多普勒带宽, B 为子孔径参考信号带宽, f_R 为方位多普勒调频率, T 为合成孔径时间, T_1 为子孔径时宽, ΔT 为数据子块方位向间隔。对应于距离向有

$$\Delta L = (F_{\max,r} - 2B_r)/f_r = L - 2L_1 \quad (23)$$

上式中 $F_{\max,r}$ 为发射信号带宽, B_r 为参考信号带宽, f_r 为距离脉冲调频率, L 为脉宽, L_1 为数据子块距离时宽, ΔL 为数据子块距离向间隔。

快视图像的方位分辨率由下式决定:

$$\rho_a|_q = V/B = \rho_a T_1/T \quad (24)$$

(24) 式中 V 为 SAR 平台速度。快视图像的距离分辨率由下式决定:

$$\rho_r|_q = C/2B_r = \rho_r L_1/L \quad (25)$$

2.2 快视算法的计算效率及优点

最后我们不妨将本算法与距离-多普勒 (Range-Doppler) 算法和 SPECAN 算法进行计算效率的比较。本文提出的快视算法和 RD 算法及 SPECAN 算法流程图如图 4, 图 5, 图 6 所示。由这 3 个图可看出, 新的快视算法比 RD 算法主要是少了距离和方位向的预滤波和两次 FFT 的运算量, 相对 SPECAN 算法主要是少了距离向的预滤波和一次 FFT 的运算量, 而 FFT 是 SAR 成像中的主要运算。考虑到这一因素, 可以粗略推出快视算法相对于 RD 算法运算量的提高效率近似为

$$E|_{RQ} = C_{RD}/C_{\text{quicklook}} \approx 2 \quad (26)$$

相对于 SPECAN 算法运算量的提高效率近似为

$$E|_{SQ} = C_{\text{SPECAN}}/C_{\text{quicklook}} \approx 1.5 \quad (27)$$

实际上, 本文提出的快视算法相对基于 RD 算法的快视处理, 还存在不需要预滤波和占用系统内存资源少的优势。

以 RD 算法为基础的降分辨率快视处理需要将雷达的全部原始数据从计算机外设读入, 先进行距离和方位向的预滤波处理, 以避免信号混叠, SPECAN 算法同样需要在距离向进行预滤波以降低信号采样率, 而本文提出的新算法不需预滤波, 大大减轻了工程中系统的 I/O 及总线负担, 同时也减少了大量的滤波运算。

由图 2 我们还知道在方位和距离向都是分块进行处理, 因此可以对不同的数据子块并行处理, 这样就不必将大量数据同时读入内存同时进行处理, 降低了系统的资源要求, 最后对分别处理出来的快速子图像进行拼接即可得到整幅的快视图像。

因此, 考虑到这些因素, 在图像质量相当的情况下, 本算法实际处理将比 RD 算法的降分辨率快视处理速度提高 2 倍以上, 比 SPECAN 算法处理速度提高将近 1 倍, 实际数据的处理验证了这一点。

3 实际数据处理

3.1 对欧空局的 ERS-1 数据 (表 1) 进行快视处理

假设快视处理在距离向分辨率降为 $1/4$, 在方位向分辨率降为 $1/8$, 由 (12) 式, 在满足相位误差小于 $\pi/2$ 的情况下, 各数据子块对应区域可达 $r_0 < 2\rho^2/(\lambda K) = 50\text{km}$, 因此快视算法对相位误差的要求是满足的。再考虑到各数据子块快视处理的独立性, 具有很好的并行处理特性, 运算效率的提高还有较大的空间。对于算法中存在的波束定位问题, 可以通过计算星历并辅助以参数估计的方法得到多普勒参数, 这样就等效解决了波束定位的难点。对 ERS-1 数据快视处理的结果见图 7。(由于各算法处理出图像质量差别不大, 因此只列出本文算法对应 SAR 图像)。ERS-1 卫星轨道参数和主要系统参数示于表 1。考虑到快视的处理速度, 我们没有采用多视的方法来抑制相干斑, 而采用成像后的滤波方法来处理, 对于本文, 则是选择改良 K-均值

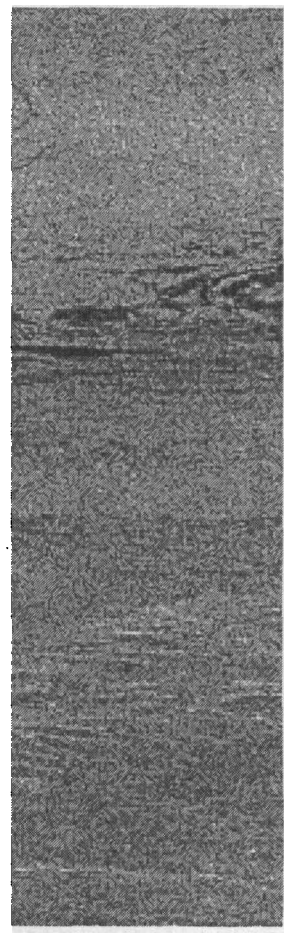
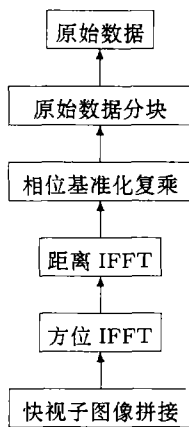
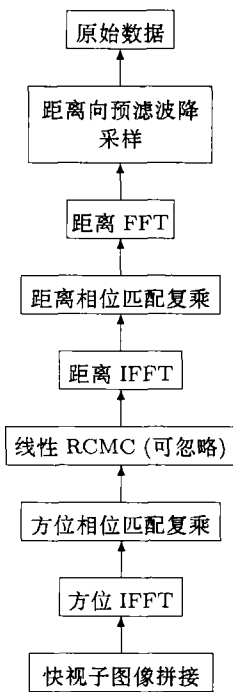
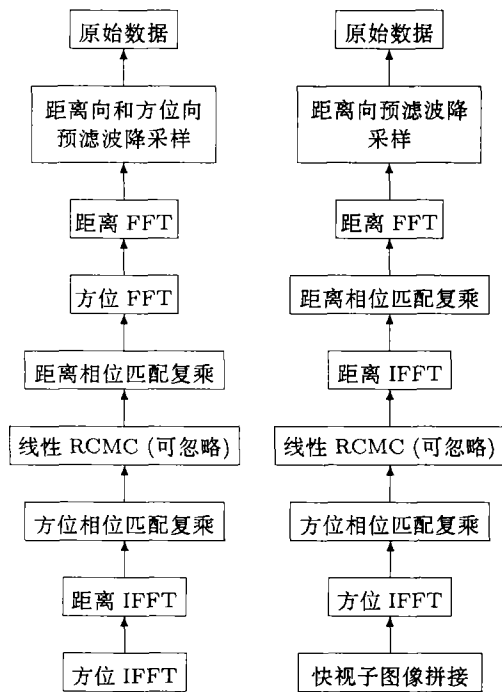


图 4 RD 算法流程图 图 5 SPECAN 算法流程 图 6 改进的快视算法流程 图 7 ERS-1 快视图像

自适应滤波法来进行消斑处理。实验表明，在 SGI origin200(4CPU, 512M RAM) 计算平台上，新算法的处理速度约为 30M byte/s，RD 算法的处理速度平均为 9M byte/s，SPECAN 算法的处理速度平均约为 17M byte/s(均为距离向分辨率降为 1/4，在方位向分辨率降为 1/8)。

表 1 ERS-1 卫星轨道参数和主要系统参数

主要系统参数	卫星轨道参数
发射信号载频 $f_0=5.3\text{GHz}(\text{C-band})$	平均高度 $h=777\text{km}$
发射脉冲宽度 $T=37.1\mu\text{s}$	平均半长轴 7153.135km
回波信号采样率 $f_s=18.96\text{MHz}$	平均偏心率 1.165×10^{-3}
方位全分辨率 $\rho_a=5\text{m}$	平均节点周期 6027.907s
距离全分辨率 $\rho_r=9.68\text{m}$	平均轨道倾角 98.5227°
脉冲重复频率 $\text{PRF}=1678.712\text{Hz}$	地球平均半径 $R_e=6368.47\text{km}$
发射信号带宽 $B=15.55\text{MHz}$	
测绘带宽度 100km	

用各算法处理出的 SAR 图像质量在分辨率以及几何特征上无大的差别，考虑到快视图像的用途，细微的差别不影响算法的应用。

3.2 本文算法对 L 波段的适用性

本文算法也能应用于 L 波段 SAR 信号处理。考虑 (12) 式, 一般有 $\rho c/(\lambda\sqrt{\gamma}) > 2\rho^2/(\lambda K)$, 因此, 不考虑 K 的影响, 有 $r_0 < 2\rho^2/(\lambda K)$ 。设 $\lambda = 0.25\text{m}$, 则 $r_0 < 8\rho^2$, 取 $\rho=40\text{m}$, 则 r_0 可达 12.8km , 设距离向波束辐照带宽为 W_r , 则在距离向上分块数大于 W_r/r_0 , 即可满足成像的要求。

4 结 束 语

本文将聚束模式极坐标算法中景中心相位基准化的概念引入到星载 SAR 条带数据的快视处理中, 通过对 ERS-1 条带数据的快视处理, 完成了快视图像的无缝拼接, 验证了该快视处理算法的精确性和高效性。

参 考 文 献

- [1] W. G. Carrara, Spotlight Synthetic Aperture Radar, Signal Processing Algorithm, Boston, London, Artech House, 1995, chapter 3.
- [2] 刘晓芹, SPOTLIGHT SAR 信号处理研究, [硕士论文], 北京, 中国科学院电子学研究所, 1999.2
- [3] 张澄波, 综合孔径雷达: 原理、系统分析和应用, 北京, 科学出版社, 1989, 第三章.
- [4] B. C. Mather, Fourier Domain Interpolation Techniques for Synthetic Aperture Radar: [PH.D Thesis]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986

A MODIFIED SPACEBORNE SAR QUICKLOOK ALGORITHM

Liu Xiaoqin Wu Yirong Peng Hailiang

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract Base on the analysis of SAR linear FM waveform and Doppler history, a modified spaceborne SAR quicklook algorithm is proposed, the algorithm's mathematical model is also constructed. Then a method of how to mosaic the sub-image together is given by analyzing Doppler history. Finally, by processing ERS-1 raw data, the results indicates that the quicklook algorithm is precise and efficient.

Key words Synthetic aperture radar, Quicklook, Linear FM, ERS-1

刘晓芹: 男, 1974 年生, 硕士, 主要从事信号与信息处理的研究.

吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 主要从事雷达信号与信息处理以及遥感技术的研究.

彭海良: 男, 1939 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事雷达、信号与信息处理以及遥感技术的研究.