

文章编号: 1001-2486 (2001) 05-0059-04

条带式合成孔径雷达数字聚束算法*

董臻, 朱国富, 梁甸农, 陈虹

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:与聚束工作模式的合成孔径雷达(SAR)相比,条带式SAR能够在相同时间内对更大范围的区域进行微波成像。但是在分析条带式SAR图像时,往往需要着重分析某些局部热点区域(ROI, Region-Of-Interest),而ROI外散射体的回波会降低ROI图像的对比度。本文的数字聚束(Digitally-Spotlight)算法可以在成像前将ROI外的回波“过滤”,实现等效的聚束工作模式,从而提高SAR对比度。仿真验证了该算法的有效性。

关键词:合成孔径雷达;数字聚束;参考信号;低通滤波;图像对比度

中图分类号:TN958 **文献标识码:**A

The Digitally-Spotlight Algorithm for Stripmap-Mode SAR

DONG Zhen, ZHU Guo-fu, LIANG Dian-nong, CHEN Hong

(College of Electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: The Stripmap-mode SAR is able to image larger area during the same time than the Spotlight-mode SAR. There are always some ROIs which should be emphasized in the whole SAR image. But the signature from those scatters outside the ROI will decrease the contrast of ROI's image. The digitally-spotlight algorithm is able to filter the unwanted signature before imaging to achieve the equivalent purpose to spotlight-mode SAR and increase the contrast of the SAR image. The simulation results prove its validity.

Key words: SAR; digitally-spotlight; reference signal; lowpass filter; image contrast

1 数字聚束的概念

机载SAR常用的工作模式有两种:聚束式(Spotlight-mode)和条带式(Stripmap-mode),二者各有特点,常根据具体情况予以选择。图1表明了两种模式下,成像区域和雷达平台运动轨迹相对几何关系的区别:在雷达平台行进过程中,聚束式SAR的波束始终指向地面上的固定区域;而条带式SAR的波束指向保持不变,扫过的地区呈条带状。

在条带式SAR应用中,往往要对条带状地区中的某些局部热点区域(ROI)着重分析。受工作模式所限,条带式SAR的回波信号中既有ROI内的成分,又有ROI外的成分,无论是在时域还是在频域二者都无法直接分开。前者是成像必需的,后者带来的消极影响是降低了ROI图像的对比度^[1]。本文研究如何通过数字信号处理的手段在对ROI成像前去除雷达信号中不需要的成分,经过这种处理后的雷达信号与聚束式SAR的雷达接收信号近似等效,所以称之为“数字聚束”技术。

2 数字聚束算法

假设雷达沿直线作匀速运动,将地面成像区域投影至斜距平面,如图2所示建立成像几何的自然坐标系^[2]。

测绘带中心距雷达 Y_c ,测绘带宽 $2Y_w$,ROI区是测绘带内方位限于 $(-X_w, X_w)$ 的区域。假设雷达发射信号 $f(t)$,则当雷达位于 x_r 时,测绘带内的位于 (x_t, y_t) 处理想点目标的回波 $s(t, x_r)$

* 收稿日期:2001-02-16
基金项目:国家部委基金项目资助(7.5.3.2)
作者简介:董臻(1973-),男,博士生。

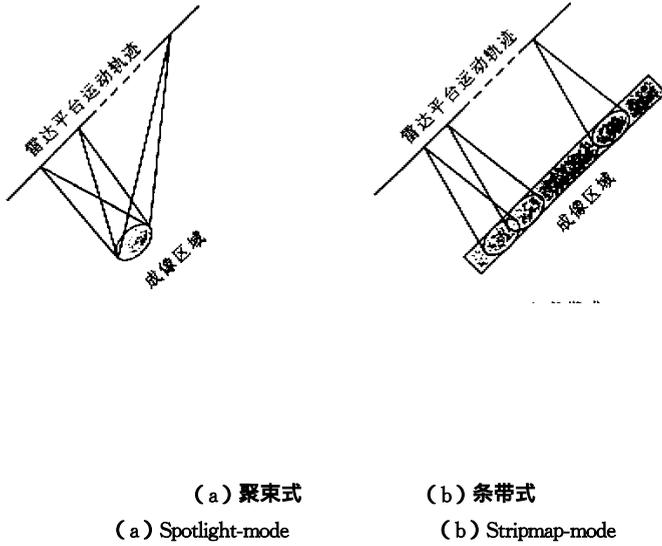


图1 两种工作模式的成像几何

Fig.1 Geometry of SAR imaging in two mode

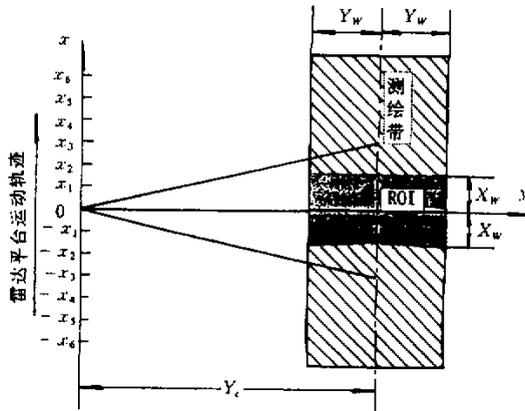


图2 条带式 SAR 的成像几何

Fig.2 Geometry of SAR imaging in Stripmap-mode

为：

$$S(t, x_r) = P\left(t - \frac{2\sqrt{(x_t - x_r)^2 + y_t^2}}{c}\right) \tag{1}$$

式中 t 、 x_r 分别表示快、慢时间， c 为光速。对回波信号函数的快时间变量作傅立叶变换：

$$S(f, x_r) = P(f) e^{-j2\pi f \frac{2\sqrt{(x_t - x_r)^2 + y_t^2}}{c}} = P(f) e^{j\kappa(f)\sqrt{(x_t - x_r)^2 + y_t^2}} \tag{2}$$

式中 $\kappa(f) = \frac{4\pi f}{c}$ 。

定义参考信号为 ROI 中心的回波延迟相位函数：

$$S_{\text{ref}}(f, x_r) = e^{-j2\pi f \frac{2\sqrt{x_r^2 + Y_c^2}}{c}} = e^{-j2\kappa(f)\sqrt{x_r^2 + Y_c^2}} \tag{3}$$

将式 (2) 乘以 $S_{\text{ref}}(f, x_r)$ 的共轭得：

$$S_{\text{mixed}}(f, x_r) = S(f, x_r) S_{\text{ref}}^*(f, x_r) = P(f) e^{j\kappa(f)\sqrt{(x_r)^2 + y_t^2}} \tag{4}$$

式中：

$$\phi(x_r) = \sqrt{x_r^2 + Y_c^2} - \sqrt{(x_r - x_t)^2 + y_t^2} \quad (5)$$

由于：

$$x_r \ll Y_c, \quad |x_r - x_t| \ll y_t, \quad \frac{1}{Y_c} \approx \frac{1}{y_t} \quad (6)$$

所以式(5)可作如下近似处理：

$$\begin{aligned} \phi(x_r) &\approx (Y_c + \frac{x_r^2}{2Y_c}) - (y_t + \frac{(x_r - x_t)^2}{2y_t}) \\ &= \frac{x_t}{Y_c}x_r + (\frac{1}{Y_c} - \frac{1}{y_t})\frac{x_r^2}{2} - x_t x_r + (Y_c - y_t - \frac{x_t^2}{2y_t}) \\ &\approx \frac{x_t}{Y_c}x_r + (Y_c - y_t - \frac{x_t^2}{2y_t}) \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)得：

$$S_{\text{mixed}}(f, x_r) \approx [P(f)] e^{j\phi(f)Y_c - y_t - \frac{x_t^2}{2y_t}} e^{j\frac{\phi(f)x_t}{Y_c}x_r} \quad (8)$$

上式表明, $S_{\text{mixed}}(f, x_r)$ 是慢时间变量 x_r 的余弦函数, 频率恰与目标的方位位置 x_t 成正比。记 k 为与 x_r 对应的傅立叶变换频率变量, 如果对 $S_{\text{mixed}}(f, x_r)$ 进行低通滤波：

$$S_{\text{filtered}}(f, k) = S_{\text{mixed}}(f, k) Lpf(f, k) \quad (9)$$

就滤除了 ROI 外的信号分量。式中低通滤波器定义为：

$$Lpf(f, k) = \begin{cases} 1, & k \in [-\frac{2f}{Y_c}X_w, \frac{2f}{Y_c}X_w] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

将 $S_{\text{filtered}}(f, x_r)$ 乘以参考信号 $S_{\text{ref}}(f, x_r)$, 得到：

$$S_{\text{DS}}(f, x_r) = S_{\text{filtered}}(f, x_r) S_{\text{ref}}(f, x_r) \quad (11)$$

$F_f^{-1}\{S_{\text{DS}}(f, x_r)\} \Rightarrow S_{\text{DS}}(t, x_r)$, 它和聚束式 SAR 的接收信号近似相同。

综上所述, 数字聚束处理的步骤如下：

- (1) 将雷达回波信号 $s(t, x_r)$ 对快时间变量 t 作傅立叶变换得 $S(f, x_r)$;
- (2) $S(f, x_r)$ 乘以 $S_{\text{ref}}^*(f, x_r)$ 得 $S_{\text{mixed}}(f, x_r)$;
- (3) 将 $S_{\text{mixed}}(f, x_r)$ 对慢时间变量 x_r 作傅立叶变换得 $S_{\text{mixed}}(f, k)$;
- (4) 低通滤波: $S_{\text{mixed}}(f, k)$ 乘以 $Lpf(f, k)$ 得 $S_{\text{filtered}}(f, k)$;
- (5) 将 $S_{\text{filtered}}(f, k)$ 对 k 作逆傅立叶变换得 $S_{\text{filtered}}(f, x_r)$;
- (6) $S_{\text{filtered}}(f, x_r)$ 乘以 $S_{\text{ref}}(f, x_r)$ 得 $S_{\text{SD}}(f, x_r)$;
- (7) 将 $S_{\text{SD}}(f, x_r)$ 对 f 作逆傅立叶变换得 $S_{\text{DS}}(t, x_r)$;

3 仿真

仿真中, 将雷达发射信号选择为中心频率 350 MHz, 带宽 300 MHz, 脉宽 0.3 μs 的线性

调频信号。测绘带中心距雷达 100 m, 测绘带宽 20 m, 天线波束张角 24° , 则一个孔径的方位跨度为 $[-110 \tan(12^\circ), +110 \tan(12^\circ)]\text{m}$, 即 $[-23, +23]\text{m}$ 。成像区域中, 选择方位范围 $[-10, +10]\text{m}$ 的区域为 ROI, ROI 中心有一个反射系数为 2 的理想点目标, 同时将 100 个杂波点均匀地随机分布在 ROI 以外的区域中, 这些杂波点的反射系数是复数, 实、虚部均为标准正态分布的随机变量。成像算法分两步: (1) 距离压缩, 通过线性调频信号匹配滤波实现, 为了消除距离向旁瓣, 使用了汉明窗; (2) 方位压缩, 使用了 BP 算法的一种快速实现方式^[5]。

根据(10)式, 二维滤波器 $Lpf(f, k)$ 的形状如图 3 阴影部分所示。

可以看出，二维滤波器的通带在 (f, k) 平面上呈梯形分布。图4分别为数字聚束处理前后 ROI 的 SAR 图像相对值的灰度显示，动态范围是 $-40\text{dB} \sim 0\text{dB}$ ：

图4表明经过数字聚束处理后，绝大部分的杂波被滤除，ROI中心的点目标的非正交旁瓣更加清晰，图像的对比度得到了显著改善。

4 结束语

本文研究了一种数字聚束算法，它通过数字信号处理的手段在成像前去除雷达信号中不需要的成分。条带式 SAR 的雷达接收信号经过这种处理后，与聚束式 SAR 的雷达接收信号近似相同，从而提高了局部热点区域的 SAR 图像质量，有利于 SAR 图像解读等应用。

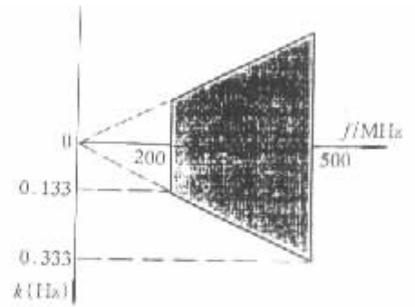


图3 二维滤波器形状
Fig.3 The shape of 2-D filter

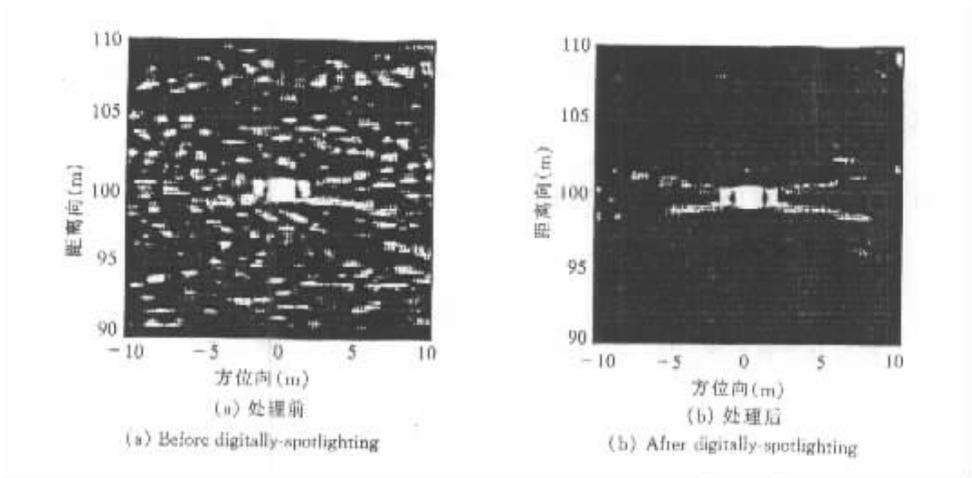


图4 数字聚束处理的效果
Fig.4 The effect of digitally-spotlighting

参考文献：

- [1] Soumekh M. Reconnaissance with Ultra Wideband UHF Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE SP Magazine, July 1995.
- [2] Cafforio C, prati C, Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques [J]. IEEE Trans. on AES. 1990, 28 (2).
- [3] Carra W G et al. Spotlight synthetic aperture radar - signal processing algorithm [M]. Artech House. Boston. London. 1995.
- [4] John W. McCorcle. Focusing of Synthetic Aperture Ultra Wide Band Data [J]. Proc. IGRASS '89, proceedings Vancouver, 1989: 1-5.
- [5] 董臻, 朱国富, 梁甸农. BP 算法的快速实现 [J]. 国防科技大学学报, 2000, 22 (6).

