温哥华场景的 CSA 算法成像

一、参数说明

温哥华场景的 RADARSAT-1 参数表			
采样率	F_r	32.317	MHz
脉冲宽度		30.111	MHz
脉冲中心频率		0	MHz
距离调频率	F_r	0.72135	MHz/us
数据窗开始时间		6.5956	ms
脉宽	T_r	41.74	us
复制信号采样数		1349	
没回波行采样数		9280	
雷达频率	f_0	5.300	GHz
雷达波长	λ	0.05667	m
脉冲重复频率	F_a	1256.98	Hz
有效雷达速率	V_r	7062	m/s
方位调频率	K_a	1733	Hz/s
多普勒中心频率	$f_{\eta c}$	-6900	Hz

二、算法原理

2.1 基本概念

◆**奈奎斯特采样频率 PRF：**由于是复采样，PRF 应大于信号带宽的主要部分。方位向过采样率 $\alpha_{os,a}$ 通常为 1.1~1.4

◆**距离测绘带宽度：**采样时间上限为$1/PRF-T_r$秒，相应的斜距间隔为$(1/PRF-T_r)c/2$

◆**处理器观测频率：**$(-F_a/2,+F_a/2]$

◆**距离线数：**N_{az}，**方位线数：**N_{rg}

◆**TBP:**时间带宽积

◆**PRF:**脉冲重复频率，**PRI**：脉冲重复间隔

◆ R_0：最短斜距

◆**距离向时间：**τ，**方位向时间：**η

◆**传感器到目标点的距离：**$R(\eta)=\sqrt{R_0^2+V_r^2\eta^2}=R'+RGD.c/2\approx R_0+\dfrac{V_r^2\eta^2}{2R_0}$，RGD 是从脉冲发射到第一个回波采样之间时间延迟，$c=2.997\,925\times10^8 m/s$

◆**距离脉冲调频率：**$K_m=\dfrac{K_r}{1-K_rZ}$，其中$Z(R_0,f_0)=\dfrac{cR_0f_\eta^{\ 2}}{2V_r^{\ 2}f_0^{\ 3}D^3(f_\eta,V_r)}$

◆**徙动因子：**$D(f_\eta,V_r)=\sqrt{1-\dfrac{c^2f_\eta^{\ 2}}{4V_r^{\ 2}f_0^{\ 2}}}=\sqrt{1-\dfrac{\lambda^2f_\eta^{\ 2}}{4V_r^{\ 2}}}$

在大斜视角情况：RD 域的距离徙动量为$R_{rd}(f_\eta)-R_0=R_0[\dfrac{1-D(f_\eta,V_r)}{D(f_\eta,V_r)}]$

◆**过采样因子：**$\alpha_{os}=\dfrac{f_s}{|K|T}$

◆**距离单元徙动：**$R_{rd}(f_\eta)=\dfrac{R_0}{\sqrt{1-\dfrac{c^2f_\eta^{\ 2}}{4V_r^{\ 2}f_0^{\ 2}}}}=\dfrac{R_0}{D(f_\eta,V_r)}\approx R_0+\dfrac{\lambda^2R_0f_\eta^{\ 2}}{8V_r^{\ 2}}$

◆**方位向的时频关系：**$f_\eta=-K_a\eta$

◆**变标所需的频率：**$f_{sc}=\alpha K_r\tau'$，（新的距离时间：$\tau'=\tau-\tau_{ref}=\tau-\frac{2R_{ref}}{cD(f_\eta,V_{ref})}$，$\tau_{ref}$：偏移量为 0 的参考距离时刻$\tau_{ref}$，通常设在测绘带中心）

◆**变标方程的相位：**$\phi_{sc}(\tau')=\pi\alpha K_r(\tau')^2$，变标方程：$S_{sc}(\tau')=\exp\{j\pi\alpha K_r(\tau')^2\}$

$$\alpha=\frac{1}{D(f_\eta,V_r)}-1$$

◆**参考目标：**测绘带中心；参考距离：参考目标最近距离R_0；参考方位频率：$f_{\eta_{ref}}$选为测绘带中心处的多普勒中心频率f_{η_c}（及参考目标的中心频率）

2.2 算法流程

1、首先将接受到的信号解调为基带信号：

$$s_0(\tau,\eta)=A_0w_r(\tau-2R(\eta)/c)w_a(\eta-\eta_c)e^{-j4\pi f_0\frac{R(\eta)}{c}}e^{j\pi K_r(\tau-2R(\eta)/c)^2}$$

再通过方位向 FFT 变换到距离多普勒域，得到距离多普勒域的信号表现形式：

$$S_{rd}(\tau,f_\eta)=Aw_r\{\tau-\frac{2R_0}{cD(f_\eta,V_r)}\}W_a(f_\eta-f_{\eta c})\exp\{-j\frac{4\pi f_0R_0D(f_\eta,V_r)}{c}\}\exp\{j\pi K_m[\tau-\frac{2R_0}{cD(f_\eta,V_r)}]^2\}$$

2、通过将线性变标方程与信号相乘来矫正补余 RCM,线性变标方程如下：

$$s_{sc}(\tau',f_\eta)=\exp\{-j\pi K_m[\frac{1}{D(f_\eta,V_r)}-1](\tau-\tau')^2\}=\exp\{-j\pi K_m[\frac{1}{D(f_\eta,V_r)}-1](\tau-\frac{2}{c}[R_{ref}+(\frac{1}{D(f_\eta,V_r)}-1)R_{ref}])^2\}$$

将距离多普勒域的信号与线性变标方程相乘后得到：

$$\begin{aligned}S_1(\tau,f_\eta)&=S_{sc}(\tau',f_\eta).S_{rd}(\tau,f_\eta)\\&=Aw_r\{\tau-\frac{2R_0}{cD(f_\eta,V_r)}\}W_a(f_\eta-f_{\eta c})\exp\{-j\frac{4\pi f_0R_0D(f_\eta,V_r)}{c}\}\exp\{j\pi K_m[\tau-\frac{2R_0}{cD(f_\eta,V_r)}]^2\}\\&\quad.\exp\{j\pi K_m[\frac{D(f_{\eta ref},V_{rref})}{D(f_\eta,V_{rref})}-1](\tau')^2\}\end{aligned}$$

3、对信号$S_1(\tau,f_\eta)$进行距离向傅里叶变换，变换到二维频域

$$
\begin{aligned}
S_2(f_\tau, f_\eta) = & A_1 w_r(f_\tau) w_a(f_\eta - f_{\eta c}) \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi R_0 f_0 D(f_\eta, V_r)}{c}\} \text{方位调制} \\
& \times \exp\{j \frac{\pi D(f_\eta, V_r)}{K_m D(f_{\eta_{ref}}, V_r)} f_\tau^{\ 2}\} \text{变标后距离调制} \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi R_0}{c D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})} f_\tau^{\ 2}\} \text{线性相位} \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi}{c} [\frac{1}{D(f_\eta, V_{r_{ref}})} - \frac{1}{D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})}] R_{ref} f_\tau\} \text{一致RCMC} \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi K_m}{c^2} [1 - \frac{D(f_\eta, V_{r_{ref}})}{D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})}] \times [\frac{R_0}{D(f_\eta, V_r)} - \frac{R_{ref}}{D(f_\eta, V_r)}]^2\} \text{附加相位}
\end{aligned}
$$

4、通过一个相位相乘同时完成：距离压缩、SRC、一致 RCMC，补偿掉上式的（2,4 指数项），得到多普勒频域的距离压缩后的信号：

$$
S_3(f_\tau, f_\eta) = S_3(f_\tau, f_\eta) \bullet H_2 = S_3(f_\tau, f_\eta) \times \exp\{-j \frac{\pi D(f_\eta, V_r)}{K_m} f_\tau^{\ 2}\} \text{距离调制}
$$

即

$$
\times \exp\{j \frac{4\pi R_{ref} f_\tau}{c} [\frac{1}{D(f_\eta, V_r)} - 1]\} \text{一致RCMC}
$$

得到如下信号表示：

$$
\begin{aligned}
S_3(f_\tau, f_\eta) = & A_1 w_r(f_\tau) w_a(f_\eta - f_{\eta c}) \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi R_0 f_0 D(f_\eta, V_r)}{c}\} \text{方位调制} \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi R_0}{c D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})} f_\tau^{\ 2}\} \text{线性相位} \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi K_m}{c^2} [1 - \frac{D(f_\eta, V_{r_{ref}})}{D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})}] \times [\frac{R_0}{D(f_\eta, V_r)} - \frac{R_{ref}}{D(f_\eta, V_r)}]^2\} \text{附加相位}
\end{aligned}
$$

5、通过 IFFT 完成所有距离处理，再变换到距离多普勒域

$$
\begin{aligned}
S_4(\tau, f_\eta) = & A_2 \mathrm{p}_r(\tau - \frac{2R_0}{c D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})}) w_a(f_\eta - f_{\eta c}) \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi R_0 f_0 D(f_\eta, V_r)}{c}\} \text{方位调制} \\
& \times \exp\{-j \frac{4\pi K_m}{c^2} [1 - \frac{D(f_\eta, V_{r_{ref}})}{D(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})}] \times [\frac{R_0}{D(f_\eta, V_r)} - \frac{R_{ref}}{D(f_\eta, V_r)}]^2\} \text{附加相位}
\end{aligned}
$$

6、接下来进行方位向匹配滤波和相位校正：

$$S_5(\tau, f_\eta) = S_4(\tau, f_\eta) \bullet H_3$$
$$= S_4(\tau, f_\eta) \bullet \exp[j \frac{4\pi R_0}{\lambda} D(f_\eta, V_r)] \exp[j \frac{4\pi}{c^2} K_m \alpha(\alpha+1)(R_0 - R_{ref})^2]$$

7、方最后进行方位向 IFFT，并进行聚焦图像输出：

$$S_6(\tau, \eta) = A_4 \mathrm{p}_r(\tau - \frac{2R_0}{cD(f_{\eta_{ref}}, V_{r_{ref}})}) P_a(\eta - \eta_C) \exp\{j\theta(\tau, \eta)\}$$

三、算法流程