

# 基于运动参数估计的 SAR 成像

邢孟道, 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 运动补偿是 SAR 成像, 特别是高分辨成像的关键步骤. 运动参数可由载机的导航仪器测得. 也可通过实测数据估计得到. 通常将两者结合. 虽然基于数据的运动参数估计已有很多研究, 并提出许多估计和补偿方法. 但如何结合实际选用适合的方法仍然是个问题. 本文针对实际雷达和运动情况, 对运动参数作了精确估计和补偿, 并提出了新的补偿和成像方法, 可在减小运算量的同时获得好的成像效果.

**关键词:** 合成孔径雷达; 多普勒中心; 多普勒调频率; 线调频变尺度

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1824-05

## Motion Parameter Estimation Based SAR Imaging

XING Meng dao, BAO Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Motion compensation is the key step of SAR imaging, especially for high resolution SAR imaging. The motion parameter can be measured by navigational instrument, and also can be estimated from data. These two methods usually need to be combined. Although there are many studies about motion parameter estimation, and many estimation and compensation methods have been proposed, how to select a proper method according to real situation is still problem. This paper proposes algorithms for estimating the motion parameter and SAR imaging for a given radar and motion state, which can obtain a good SAR image with reduced computation load.

**Key words:** SAR; Doppler centroid; Doppler rate; Chirp Scaling

### 1 引言

雷达成像的应用已十分广泛, SAR 和 ISAR 成像已不仅作为一种专用雷达, 而是作为一种新的功能广泛应用于各种类型的雷达. 国内多种不同用途的机载雷达也添加了宽带信号, 进行了 SAR 成像的试验. 与专用 SAR 成像不同, 由于雷达原有的功能, 雷达参数并不完全按 SAR 的需要确定, 载机虽然装备有 INS/GPS 系统, 但并不对雷达的状态和参数作实时调整, 天线上也未装捷联惯性测量组件 (IMU) (以后会作进一步改进), 从而导航仪器测得的运动参数的精度较低, 为作精确的运动补偿, 运动参数主要基于实测数据估计得到.

本实验雷达原来的主要功能为搜索动目标, 工作在 X 波段, 天线安装于载机的正侧面 (实际有误差), 波束方位向宽度为  $\delta_a 1.5^\circ$  (相应的天线方位孔径约为  $D_a = 1.2\text{m}$ ), 波束俯仰向宽度为  $\delta_e 6.7^\circ$ , 波束有一定的下俯角. 为增加成像功能, 雷达添加了宽带 LFM 信号, 频带宽度  $B_c$  为 70MHz, 脉宽  $\tau_c$  为 20 $\mu\text{s}$ , 即调频率为 3.5MHz/ $\mu\text{s}$ , 脉冲重复频率 PRF 为 700Hz.

对应于所处理的一段数据, 载机作水平飞行, 飞行高度约为 4300m, 惯导测得的前向速度为 116.4m/s, 而侧向速度为 -5.96m/s, 即载机的直线地速为 116.6m/s, 而载机指向与航向

的倾角为  $2.94^\circ$ . 由于系统并未根据偏航角来调整波束指向, 正侧向的波束对航线会有  $2.94^\circ$  的倾斜角.

我们用所录取的一段数据作条带式成像, 并选用 31.5km 的距离作为条带的中心线.

根据 70MHz 的信号频带, 考虑到加权的展宽效应, 雷达的距离分辨率为  $1.47c/2B_c = 3.15\text{m}$  ( $c$  为光速), 由于射线与地平面有一定的倾角, 地面的径向距离分辨率为 3.17m. 相对于  $1.5^\circ$  的方位波束宽度, 波束在条带中心线上所覆盖的横距约为 1100m, 即载机飞行 1100m, 波束将完整地扫过一个点目标, 其横向分辨率为  $D_w/2 = 0.6\text{m}$  (因波束函数是平缓的, 不再加权). 由此可见, 能得到的横向分辨率比纵向的高得多, 或者说, 只用部分波束就能得到与纵向相当的横向分辨率, 这样可使每段横向数据的利用率更高一些.

### 2 基于数据的运动参数估计

对于条带式成像, 首先应知道由于波束倾斜而使多普勒中心有一定偏移, 以及由于载机移动斜距变化而产生的方位多普勒调频率. 方位多普勒调频率与距离有关, 为此应先估计出条带中心线上的调频率, 并估计聚焦深度.

首先, 画出雷达收集信号的几何平面模型如图 1 所示. 我们对时间用  $t$  表示, 距离快时间用  $t_m$  表示, 方位慢时间用  $t_m$  表示, 则快时间  $t = t_m - mT$ ,  $m$  为整数,  $T$  为脉冲重复周期, 慢时间  $t_m = mT$ . 载机沿  $x$  轴飞行, 飞行速度为  $v$ , 轴上的粗黑线表示采集数据所相应的航线段, 其时间区间为  $[-T_a/2, T_a/2]$ ,  $A$  为其中心, 它为时间和慢时间的原点,  $P_0$  为场景中心线上的点,  $B$  为  $P_0$  点在飞行航线的垂直投影, 称为近距交点, 并设它为横向(飞行方向)坐标  $x(t)$  的原点,  $A$  点的横向坐标为  $x_0$ ,  $B$  点的横向时间为  $t_c$ , 右侧与  $x$  轴平行的虚线为成像条带的中心线. 波束的倾斜角为  $\beta$ , 从天线相位中心至条带中心线的斜距为  $R_0$ , 场景中心线到飞行航线的距离为  $r_0$ . 设回波信号已变换到基频, 并进行距离压缩后, 则在  $t_m$  时刻散射点  $P_0$  的回波信号可表示为:

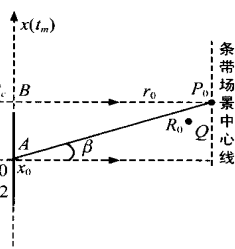


图 1 雷达收集信号的几何平面图

式(1)中  $p(t - 2R(t_m; R_0)/c)$  为沿距离的脉压包络, 延时变化为距离徙动(未考虑天线波束对回波信号的幅度调制);  $\exp\{-j4\pi R(t_m; R_0)/\lambda\}$  为散射点的相位历程, 那么  $t_m$  时刻散射点到雷达的瞬时斜距为:

$$R(t_m; R_0) = \sqrt{R_0^2 + (vt_m)^2 - 2R_0vt_m\sin\beta} \quad (2)$$

在  $t_m = 0$  时刻附近对式(2)作泰勒级数展开有:

$$R(t_m; R_0) = \sqrt{R_0^2 + (vt_m)^2 - 2R_0vt_m\sin\beta} \approx R_0 - v\sin\beta t_m + \frac{v^2\cos^2\beta}{2R_0}t_m^2 + \frac{v^3\sin\beta\cos^2\beta}{2R_0^2}t_m^3 + \dots \quad (3)$$

得到距离走动率  $RWR$  (Range Walk Ratio) 为

$$RWR = v\sin\beta \quad (4)$$

获得散射点回波的多普勒中心为

$$f_{dc} = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt_m} \Big|_{t_m=0} = \frac{2v\sin\beta}{\lambda} \quad (5)$$

多普勒调频率与斜距有关,

$$k_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{d^2R}{dt_m^2} = -\frac{2v^2\cos^2\beta}{R_0} \quad (6)$$

从上两式可以由  $v$ ,  $\beta$  和  $R_0$  求得  $f_{dc}$  和  $k_d$ , 解上两式也可由  $f_{dc}$ ,  $k_d$  和  $R_0$  求得  $v$  和  $\beta$ :

$$v = \sqrt{\left(\frac{f_{dc}\lambda}{2}\right)^2 - (k_d R_0/2)\lambda} \quad (7)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{f_{dc}\lambda}{2v}\right) \quad (8)$$

由于用导航仪器测得的  $v$  和  $\beta$  精度不高, 天线阵面指向也有误差, 不能用它们计算出精确的  $f_{dc}$  和  $k_d$ , 下面讨论用基于实测数据的方法直接估计这两个参数.

## 2.1 多普勒中心估计

雷达重复频率为 700Hz, 即相邻脉冲间隔时间约为 1.4ms, 载机的移动距离约为 0.16m, 因此相邻回波有很强的相关性, 但当波束有一定的斜视角时, 相同区域的回波将线性地向载机移近, 因此可对场景中心一小块区域, 用相关法<sup>[2, 3]</sup>

作包络对齐, 估计出包络移动量. 通常由于飞机的震动, 气流影响, 以及包络移动量估计误差, 包络移动量并不全在以斜率为  $v\sin\beta$  的斜线上, 所以, 需要通过对包络移动量作一次曲线拟合, 才能估计出距离走动率  $RWR$ , 然后可得到的多普勒中心频率的粗估计  $f_{dc \text{ align}} = 2RWR/\lambda$ . 由此估计得到多普勒中心的误差比较大, 但它不存在以重复频率为间隔的模糊, 可以用它来解模糊. 图 2 为从所处理数据中估计的包络移动量和拟合的斜线.

国内外文献讨论的多普勒中心估计方法主要有能量均衡法<sup>[4]</sup>、相关函数法<sup>[5]</sup>、最优估计法<sup>[6]</sup>. 本文采用相关函数法. 设在有多普勒中心偏移时, 回波在方位方向的功率谱为  $S_0(f)$ , 它和天线方向图相同, 以零频对称, 功率谱对应的相关函数为  $R_0(\tau)$  为实函数. 则在有多普勒偏移时, 功率谱  $S_h(f)$  为  $S_0(f - f_{dc})$ , 其相关函数变为

$$R_h(\tau) = e^{j2\pi f_{dc}\tau} R_0(\tau) \quad (9)$$

于是从  $R_h(\tau)$  的相角可以估计出  $f_{dc}$ .

由于方位回波是离散采样的, 所以  $R_h(\tau) = R_h(kT)$ ,  $T = 1/PRF$ ,  $k$  为整数, 取  $k = 1$ , 可得多普勒中心精估计为

$$f_{dc \text{ corr}} = \frac{1}{2\pi T} \arg\{R_h(T)\} \quad (10)$$

这样估计得到的  $f_{dc}$  的精度远比包络相关法高, 但由指数求得的相位范围为  $[-\pi, \pi]$ , 如果  $f_{dc}T > 1$  (有时会远大于 1), 则估计的  $f_{dc}$  存在  $1/T$  的模糊问题. 为此, 可结合前面包络相关的结果作去模糊处理.

最后得到精确的无模糊的多普勒中心频率为

$$f_{dc} = PRF \cdot \text{round}[f_{dc \text{ align}}/PRF] + f_{dc \text{ corr}} \quad (11)$$

这里  $PRF$  为脉冲重复频率.

用本数据估计得到的  $f_{dc} = 705.4\text{Hz}$ . 要注意, 本雷达的模糊多普勒范围为  $[-350\text{Hz}, 350\text{Hz}]$ , 现在的  $f_{dc}$  是解模糊的值.

## 2.2 多普勒调频率估计

多普勒调频率的估计, 主要有子孔径相关方法<sup>[4]</sup>, 反射率偏移法<sup>[7]</sup>和频移相关法<sup>[8]</sup>. 利用子孔径相关方法, 要求子孔径之间的相关性比较强, 在我们处理的实测数据中, 由于方位波束比较窄, 相关性比较弱, 调频率估计误差大, 需要另找方法.

我们知道雷达回波数据经过距离压缩后再经过方位压缩(这里采用解调频压缩)就可以得到雷达图像. 在方位压缩中的多普勒调频率不准确将引起谱展宽、峰值增益减小致使图像聚焦不好. 如果多普勒调频率准确则谱变得尖锐使图像聚焦好. 我们引入信息熵来衡量方位压缩后图像的聚焦程度.

对于  $M \times N$  的雷达图像为  $\{x_{m,n}\}$ . 其中  $m$  为方位单元号,  $n$  为距离单元号. 令  $P_{m,n} = x_{m,n}^2 / \|X_n\|$ , 其中  $\|X_n\| = \sum_{m=1}^M x_{m,n}^2$ , 则雷达图像  $\{x_{m,n}\}_{M \times N}$  的信息熵定义为:

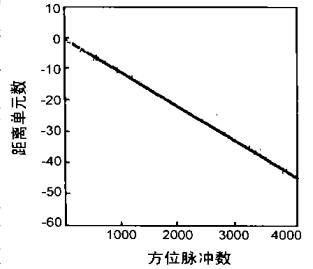


图 2 估计的包络移动量

$$H_{M \times N} = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P_{m,n} \log_{10} P_{m,n} \quad (12)$$

如果多普勒调频率越精确,则图像聚焦越好,熵也越小。如果多普勒调频率准确,则图像完全聚焦,熵最小。这样我们对前面包络已对齐好的小区域,利用最小熵准则对不同的多普勒调频率进行搜索,使图像熵最小的多普勒调频率就是正确的多普勒调

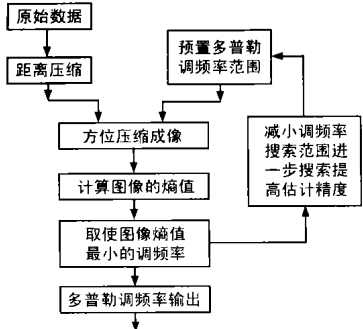


图 3 最小熵方法估计调频率的流程

频率。基于最小熵的多普勒调频率估计的流程如图 3 所示。

用搜索的方法确定多普勒调频率,若对它已有粗略估计,则可用作初始初始值,以缩短搜索时间,当有运动传感器时,可将调频率初始值按式(6)设定,速度  $v$  由运动传感器提供,场景中心的距离  $R_0$  是由录取的高分辨回波的时延确定的。

用上述方法估计得到的场景中心处的多普勒调频率为  $k_d = 26.62 \text{ Hz/s}$ 。根据估计得到的  $f_{dc}$  和  $k_d$ ,可以利用式(7)和(8)估计出载机速度  $v$  和雷达斜视角  $\beta$ ,估计得到  $\hat{v} = 115.0 \text{ m/s}$ ,  $\hat{\beta} = 5.5^\circ$ 。速度比从传感器得到的要小,误差相对小一些;斜视角要大得多,可能由于正侧视的天线本身有一定的斜视角。

根据估计得到的各个参数,还可估计聚焦深度

$$\Delta R = \lambda / (\delta_a^2 \cos^2 \beta) = 46.0 \text{ m} \quad (13)$$

可见所处理数据的聚焦深度是比较小的。在下面的成像聚焦处理中必须考虑多普勒调频率随距离的变化。

### 3 运动补偿的成像算法和成像结果

根据实测数据,以及精确估计得到的运动参数,结合实际雷达的具体情况,下面来研究成像算法。

SAR 成像的基本算法是匹配滤波,通过雷达采集,将场景分布映射到数据域,场景中的一个散射点在数据域[以快时间(距离)、慢时间(方位)表示]里表现为一条曲线。由于现在雷达是以窄波束斜视工作的,在波束扫过散射点时距离变化大,即存在较大的距离徙动。成像处理用匹配滤波从数据域映射到图象域,将二维数据曲线还原为点目标。在后面的讨论中将会看到,数据曲线的曲率与散射点离场景中心线的远近有关,即匹配函数是空变的,这将增加匹配运算的难度。虽然已有多种有效的成像算法,我们还必须结合实际情况进行处理,以保证成像质量良好,并减小运算量。

#### 3.1 结合运动补偿的 CS Dechirp 成像方法

雷达是以快时间  $t$  (相当于斜距)和慢时间  $t_m$  (相当于方位)来录取数据的,对条带式成像应以航线为方位轴( $x$ ),而以其垂直轴为距离轴( $r$ ),并用条带场景中心线为参考线(如图 1),参考线与航线平行,其距离为  $r_0$ 。随着载机运动,场景上任一散射点  $Q(r, x)$  的斜距变化方程为

$$R(t_m); r = \sqrt{r^2 + (vt_m - vt_c - x)^2} \quad (14)$$

图 1 中  $B$  点的横向时间  $t_c$  和多普勒中心  $f_{dc}$  以及和斜视角  $\beta$  及垂直距离  $r$  的关系为

$$t_c = \frac{R_{dc}}{2v^2 \sqrt{1 - (\lambda^2/4)(f_{dc}^2/v^2)}} = \frac{r \tan \beta}{v} \quad (15)$$

雷达接收得到的点目标  $Q$  的基频信号在此距离时间方位时间域( $t - t_m$  域)可写为,

$$s(\lambda, t_m; r) = a_r \left( t - \frac{2R(t_m; r)}{c} \right) a_a(t_m, Q) \cdot \exp \left[ -j\pi k_r \left( t - \frac{2R(t_m; r)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m; r) \right] \quad (16)$$

式中  $a_r(\cdot)$  和  $a_a(\cdot)$  分别为雷达 LFM 信号的窗函数和方位波束窗函数,前者在未加权时为矩形窗,后者与天线波束形状有关,表示波束对回波幅度的调制。前面已经提到过,雷达 LFM 信号宽度为  $20\mu\text{s}$ ,频带为  $70\text{MHz}$ ,  $k_r$  为 LFM 信号的调频率。

从式(16)可知,斜距  $R(t_m; r)$  是随慢时间  $t_m$  而变化,以场景中心线上的散射点( $r = r_0$ )为例,以前面提到的运动参数,在波束扫过时间里距离徙动为  $79.8$  米,且徙动量随  $r$  而有所不同,即不同的  $r$ ,数据曲线有弯曲差。

但是,从图 1 也可看出,位于场景中心线上的散射点( $r_0, x$ ),其回波数据是相同的,只是在慢时间轴上有不同的时间延时,即对一定的  $r$ ,数据对慢时间  $t_m$  是非空变的,为此可对式(16)数据作  $t_m \rightarrow f_a$  的傅立叶变换,可将沿  $x$  分布的散射点回波,在  $f_a$  轴作统一处理。由于雷达波束倾斜角为  $5.5^\circ$ ,波束的方位宽度为  $1.5^\circ$ ,任何散射点的  $f_a$  主要集中在  $[609.4 \text{ Hz}, 801.2 \text{ Hz}]$  的范围里,信号在此距离时间-方位频率域( $t - f_a$  域)可写成(推导这一结果须经历几个过程,由于容易从参考资料找到,如文献[1]、[9],这里从略):

$$s(\lambda, f_a; r) = Ca_r \left( t - \frac{2R(f_a; r)}{c} \right) a_a \left( \frac{r \chi_a}{2v^2 \sqrt{1 - [(\chi_a)/(2v)]^2}} \right) \cdot \exp \left[ -j2\pi f_a \left( t_c + \frac{x}{v} \right) \right] \cdot \exp \left[ -j\pi k(f_a; r) \left( t - \frac{2R(f_a; r)}{c} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left( \frac{\chi_a}{2v} \right)^2} \right] \quad (17)$$

这里的  $f_a$  就是方位频率,其范围为

$$f_{dc} - \frac{\text{PRF}}{2} \leq f_a \leq f_{dc} + \frac{\text{PRF}}{2} \quad (18)$$

由于波束方位宽度相应的多普勒宽度比 PRF 窄得多,处理时可适当取宽一些。这里的距离频率调频率为

$$\frac{1}{k(f_a; r)} = \frac{1}{k_r} - r \frac{2\lambda(\beta^2 - 1)}{c^2 \beta^3} \quad (19)$$

式中

$$\beta = \sqrt{1 - \left( \chi_a / 2v \right)^2} \quad (20)$$

在式(17)的窗函数  $a_a(\cdot)$  已由慢时间域变到方位多普勒域,式中还有三个指数函数,第一个指数项包括方位  $x$  的信息,是我们需要的。第二项要通过匹配滤波后得到距离信息,而第三项是方位调制项,聚束处理时须作补偿,它与快时间  $t$  无关。下面我们先研究第二项。

为了对式(17)中的第二项作匹配滤波,须考虑  $R(f_a, r)$

相对于  $f_a$  的弯曲影响, 经去弯曲处理后, 才能实现相干积累. 要指出的是式(17)中的包络  $a_r(\cdot)$  中心对于  $f_a$  也是移动的, 用前面的数字例子, 在波束扫过某散射点期间只是移动了 79.8m(相当于 0.52 $\mu$ s), 比起脉宽(20 $\mu$ s, 相当于 3km)来完全可以忽略不计, 只须分析第二个指数项.

在第二个指数项中主要是  $R(f_a, r)$  弯曲问题, 且弯曲率随  $r$  改变. 指数项相位函数的改变可以使脉冲压缩后的脉冲位置. 为此, 先在  $t-f_a$  域里将不同  $r$  的曲线的弯曲调整成一样, 即将距离向的空变调整为非空变, 然后再对快时间  $t$  作傅立叶变换, 变到距离频率-方位频率域( $f_r-f_a$  域), 对不同距离  $r$  的回波统一作脉冲压缩处理. 上述相位函数的调整主要是改变线调频率的尺度, 通称线调频变尺度(Chirp Scaling, 简称 CS)法.

在  $t-f_a$  域, 点目标的距离走动为

$$R(f_a; r) = r[1 + a(f_a)] \quad (21)$$

这里  $a(f_a)$  如下式所示, 它和距离  $r$  无关

$$a(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Y_a}{2v}\right)^2}} - 1 \quad (22)$$

$a(f_a)$  在  $f_a=0$  时等于 0, 而在  $f_a$  偏离 0 时,  $a(f_a)$  为小正值.

用于距离徙动补偿的 Chirp Scaling 二次相位函数为

$$H_1(t, f_a; r_0) = \exp\left[-j\pi k(f_a; r) a(f_a) \left(t - \frac{2R(f_a; r_0)}{c}\right)^2\right] \quad (23)$$

上式在  $f_a$  偏离 0 值时也是 Chirp 函数, 其调频率是很小的, 从而对不同距离  $r$  的回波起到 CS 的作用. 实际上, 式中  $k(f_a; r)$  随  $r$  变化较小, 为简化计算,  $k(f_a; r)$  中的  $r$  可用  $r_0$  代替.

对  $f_r-f_a$  域信号用此  $H_1$  的 Chirp Scaling 函数相乘后, 进行距离傅立叶变换, 将信号变换到  $f_r-f_a$  域, 即,

$$\begin{aligned} s(f_r, f_a; r) = & C a_r \left\{ \frac{f_r}{k(f_a; r)[1 + a(f_a)]} \right\} \\ & a_a \left\{ \frac{r Y_a}{2v^2 \sqrt{1 - [Y_a/(2v)]^2}} \right\} \\ & \cdot \exp\left[j\pi \frac{f_r^2}{k(f_a; r)[1 + a(f_a)]}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} [r + r_0 a(f_a)] f_r\right] \\ & \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \sqrt{1 - \left(\frac{Y_a}{2v}\right)^2}\right] \\ & \cdot \exp[-j \Theta_{\Delta}(f_a; r)] \cdot \exp\left[-j 2\pi f_a \left(t_c + \frac{x}{v}\right)\right] \end{aligned} \quad (24)$$

这里  $\Theta_{\Delta}(f_a; r) = \frac{4\pi}{c} k(f_a; r) a(f_a) [1 + a(f_a)] (r - r_{rf})^2$  为由于 Chirp Scaling 函数操作引起的剩余相位. 式(24)中的第一个指数项为距离频率域调制相位函数, 第二个指数项中  $r_0 a(f_a)$  为 CS 操作后所有点所具的相同的距离徙动量.

将用于距离压缩, 二次距离压缩, 距离徙动校正的相位函数写为

$$\begin{aligned} H_{21}(f_r, f_a; r_0) = & \exp\left[-j\pi \frac{1}{k(f_r, r_0)[1 + a(f_a)] f_r^2}\right] \\ & \cdot \exp\left[\frac{4\pi r_0 a(f_a) f_r}{c}\right] \end{aligned} \quad (25)$$

将此函数和  $f_r-f_a$  域信号相乘, 并进行距离逆傅立叶变换, 将

信号变换到  $t-f_a$  域, 完成了距离压缩, 距离徙动校正. 信号在  $t-f_a$  域为

$$\begin{aligned} s(t, f_a; r) = & C \text{sinc}_r \left\{ t - \frac{2r}{c} \right\} a_a \left\{ \frac{r Y_a}{2v^2 \sqrt{1 - [Y_a/(2v)]^2}} \right\} \\ & \cdot \exp\left[-j 2\pi f_a \left(t_c + \frac{x}{v}\right)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \sqrt{1 - \left(\frac{Y_a}{2v}\right)^2}\right] \\ & \cdot \exp[-j \Theta_{\Delta}(f_a; r)] \end{aligned} \quad (26)$$

下面作方位压缩处理, 并补偿由 Chirp Scaling 引起的剩余相位函数

$$H_{22}(t, f_a; r) = \exp[j \Theta_{\Delta}(f_a; r)] \quad (27)$$

标准 CS 算法<sup>[1,9]</sup>是在补偿式(26)第三个指数项的同时对式(26)第二个指数项(方位调制项)作方位压缩处理, 为了避免方位压缩时因圆卷积引起的混叠效应(由于部分波束扫描的场景也要利用)和不因在数据后加零而加大运算量, 我们对横向采用 Dechirp 方法<sup>[10,11]</sup>, 并将这种结合 Chirp Scaling 的 Dechirp 方法称为 CS Dechirp 方法.

如果将式(26)中第二个指数项的相位在  $f_a=0$  和  $r=r_0$  处作泰勒展开, 其可分解成初项、二次、三次和三次以上的相位项, 其中以  $r=r_0$  的  $f_a$  的二次项为主要的方位调制项, 我们将该项的作用保留下来在后面作 Dechirp 处理, 对式(26)乘以下面的补偿函数

$$\begin{aligned} H_3(t, f_a; r) = & \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} r \sqrt{1 - \left(\frac{Y_a}{2v}\right)^2} - j \frac{\pi}{k_{a0}} f_a^2\right] \\ & \cdot \exp[-j 2\pi f_a t_c] \end{aligned} \quad (28)$$

其中  $k_{a0}$  为参考距离回波信号的时域调频率, 即  $k_{a0} = -2v^2/\lambda x_0$ . 式中第二个指数项为将场景中心点移至图像中心用.

经过这些补偿后, 信号在此  $t-f_a$  域可写为,

$$s(t, f_a) = C \text{sinc}_r \left\{ t - \frac{2r}{c} \right\} a_a(\cdot) \cdot \exp\left(-j \frac{\pi}{k_{a0}} f_a^2 - j 2\pi \frac{x}{v} f_a\right) \quad (29)$$

对方位作逆傅立叶变换, 将信号变换到  $t-t_m$  域, 即

$$s(t, t_m) = C \text{sinc}_r \left\{ t - \frac{2r}{c} \right\} a_a(\cdot) \cdot \exp[j\pi k_{a0} \left(t_m - \frac{x}{v}\right)^2] \quad (30)$$

在时间域, 补偿方位解调函数

$$H_4(t, t_m) = \exp(-j\pi k_{a0} t_m^2) \quad (31)$$

解调频率后, 信号写为

$$\begin{aligned} s(t, t_m) = & C \text{sinc}_r \left\{ t - \frac{2r}{c} \right\} a_a(\cdot) \\ & \cdot \exp\left[-j 2\pi k_{a0} \frac{x}{v} t_m + j\pi k_{a0} \left(\frac{x}{v}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (32)$$

横向傅立叶变换进行方位压缩, 得到方位用频率表示位置的 SAR 图像

$$s(t, f) = C \cdot \text{sinc}_r \left\{ t - \frac{2r}{c} \right\} g_a \left\{ f - \frac{k_{a0} x}{v} \right\} \cdot \exp[j\pi k_{a0} \left(\frac{x}{v}\right)^2] \quad (33)$$

式中  $g(\cdot)$  为方位波束窗函数的谱, 如果方位重复频率为 PRF, 方位采样点为  $N$ , 则用此解调频率(Dechirp)技术进行方位聚焦后, 在频率域方位采样点所对应距离为

$$\Delta x = \text{PRF} \cdot v / (N \cdot k_{a0}) \quad (34)$$

$k_{a0}$  为参考距离回波的调频率其和距离变化无关, 所以  $\Delta x$  和

距离无关的,即方位向尺度不随距离变化。

以上分析假设载机作理想的平稳飞行,实际由于气流等影响,载机存在偏离航线的随机运动,需要运动补偿,我们设随机运动对包络移动的影响可以忽略不计,但初相的扰动必须考虑,应为

$$H_F(t_m; r_0) = \exp\{j\phi_{mc}(t_m; r_0)\} \quad (35)$$

随机相位一般采用自聚焦方式加以补偿,自聚焦需要在式(33)的横向傅立叶变换之前进行,可以采用相位梯度算法(PGA)<sup>[12]</sup>或加权最小二乘方法<sup>[13]</sup>,这里不再详细介绍。

最后给出 CS Dechirp 成像方法的流程图,如图 4 所示。

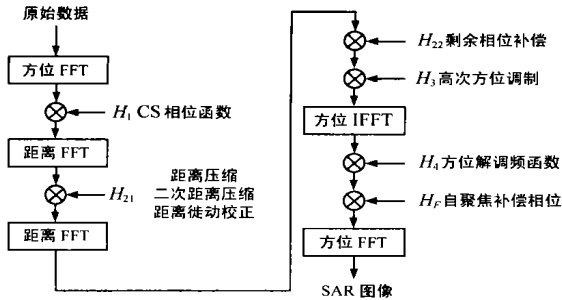


图 4 CS Dechirp 成像方法的流程图

### 3.2 实测数据的成像结果

我们对距离 6000 个点,方位 8192 个点的一段原始数据进行成像,载机到场景中心的距离为 31.5 公里。我们分两个子孔径处理,首先从实测数据中估计出前一孔径的载机速度为 115.1m/s,斜视角为 5.5°,后一个孔径的载机速度为 112.2m/s,斜视角为 5.79°,再分别采用上面讨论



图 5 38 所数据的 SAR 成像结果

的 CS Dechirp 成像,并将两子孔径像非相干相加。图 5 为其成像后的部分场景,大小为 3km × 2km,垂直方向为距离,从下到上距离逐渐增远,水平方向为方位,载机飞行从左到右。这里补充说明一下,估计出的两个孔径之间的速度和斜视角是不同的,如果后一个孔径采用和前一个孔径相同的参数,距离徙动不能很好的补偿,聚焦效果差。实际上由于速度和视角变化是逐渐变化的,在每个孔径中,速度和视角都有变化,但变化

小,距离徙动可以较好补偿,而相位误差补偿则通过自聚焦获得。严格地说,前后两孔径所成图象横坐标的尺度不完全一致,只是差别很小而影响不大。

### 4 小结

利用对本文提出运动参数估计方法,和结合运动补偿的 CS Dechirp 成像方法,对大部分数据成像获得良好的结果。可以想象到,在载机平稳飞行条件下,基于实测数据作运动补偿,可以在没有人工干预的情况下,实时获得清晰的 SAR 图像。但如果载机飞行有大的机动,必须借助精确的导航测量对雷达参数作合适的调整。

感谢 本文成像处理所用的数据是由信息产业部电子第三十八研究所提供的,在处理过程中曾与三十八所的同志进行了多次有益的讨论,特致谢意!

### 参考文献:

- [1] R K Raney, H Runge, R Banler, I G Cumming, F H Wong. Precision SAR processing using chirp scaling [J]. IEEE Trans. on GRS, 1994, 32 (4): 786- 799.
- [2] C C Chen, H C Andrews. Target motion induced radar imaging [J]. IEEE Trans. on AES, 1980, 16(1): 2- 14.
- [3] 邢孟道, 保铮. 一种逆合成孔径雷达成像包络对齐的新方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(1): 93- 96.
- [4] F K Li, D N Held, et al. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic aperture radar [J]. IEEE Trans. on GRS, 1985, 23(1): 47- 56.
- [5] S D Madsen. Estimating the doppler centroid of SAR data [J]. IEEE Trans. on AES, 1989, 25(2): 134- 140.
- [6] R Banler. Doppler frequency estimation and the Cramer Rao Bound [J]. IEEE Trans. on GRS, 1991, 29(3): 385- 389.
- [7] J Moreira. A New method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation [J]. IEEE Trans. on GRS, 1990, 28(7): 620- 626.
- [8] J Dall. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR [A]. IGARSS 91: 1134- 1136.
- [9] A Moreira, Y Huang. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans. on GRS, 1994, 32(5), 1029- 1039.
- [10] 程玉平. 机载 SAR 数据的成像研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(7): 90- 93.
- [11] Hong Wen, Jia Hongliang, Mao Shiyi, Li shaohong. A quick look imaging formation method in airborne SAR system [A]. International Conference of Radar Processings, Germany [C], 1998: 686- 689.
- [12] D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, C V Jakowatz, Jr. Phase gradient autofocus A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Trans. on AES, 1994, 30(3): 827- 830.
- [13] W Ye, T S Yeo, Z Bao. Weighted least square estimation of phase errors for SAR/ ISAR autofocus [J]. IEEE Trans. on GRS, 1999, 37(5): 2487 - 2494.