

# 基于先验知识的 SAR 二维自聚焦算法

毛新华, 曹海洋, 朱岱寅, 朱兆达

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016)

**摘要:** 传统的 SAR(Synthetic Aperture Radar)二维自聚焦算法没有充分挖掘残留相位误差所特有的内部结构信息,是对残留相位误差的一种盲估计,实际应用时在估计精度和计算效率等方面还受到一定限制.本文以极坐标格式算法为例,详细分析了成像算法处理后残留二维相位误差的解析结构,并利用这种先验辅助知识,提出了一种基于一维估计/二维校正的自聚焦算法.算法只需直接估计方位一维相位误差,然后利用二维相位误差内部所特有的结构信息,将一维相位误差映射得到二维相位误差,从而实现精确的二维自聚焦.实测数据处理结果验证了本文算法的有效性.

**关键词:** 合成孔径雷达; 二维自聚焦; 先验知识辅助; 极坐标格式算法

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013)06-1041-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.001

## Prior Knowledge Aided Two Dimensional Autofocus Approach for Synthetic Aperture Radar

MAO Xin-hua, CAO Hai-yang, ZHU Dai-yin, ZHU Zhao-da

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Conventional two dimensional (2D) autofocus algorithms didn't take advantage of the priori information on the structure of phase error. They often suffered from lack of redundancy to accurately estimate the 2D phase error. In this paper, a knowledge aided (KA) 2D autofocus approach is presented, which is based on exploiting the priori knowledge on the phase error structure. First, as a prerequisite for the proposed KA method, the analytical structure of residual 2D phase error in SAR (Synthetic Aperture Radar) imagery is investigated in the polar format algorithm framework. Then, by incorporating this prior information, a 2D autofocus approach is proposed. The new method only requires an estimate of azimuth 1D phase error, while the 2D phase errors can then be computed directly from the estimated azimuth phase error. Experimental results indicate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** synthetic aperture radar; 2D autofocus; prior knowledge aided; polar format algorithm

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)对目标的成像通过距离和方位两维高分辨实现,其中距离向高分辨率通过对宽带信号进行脉冲压缩处理得到,而方位高分辨率则通过对合成孔径数据进行相干处理实现,这种相干处理依赖于精确获知雷达和目标之间的瞬时相对位置信息.实际应用中,受雷达位置扰动和电磁波传播介质不均匀等因素影响,这种相干性往往很难直接得到保证.目前采取的主要措施是增加辅助的运动测量单元来测量获取雷达位置信息,而忽略传播介质不均匀的影响.然而,随着成像分辨率的提高,运动测量单元提供

的位置信息精度可能仍然无法满足相干性要求,而且,传播介质不均匀导致的雷达回波延迟误差效应也变得不可忽略<sup>[1]</sup>.因此有必要研究从雷达回波数据中提取并补偿误差的办法,即自聚焦方法.

回波的延迟误差对 SAR 信号有两个方面的影响,一是会在方位向引入一个相位误差,导致图像发生方位散焦,另外就是会产生额外的距离徙动,在 SAR 成像过程中无法得到补偿,而且经过成像算法处理后,残留距离徙动效应还会导致图像距离向出现二次散焦,因此 SAR 信号相位误差本质上是一种二维误差.当延迟误差较小,产生的额外距离徙动小于一个距离分辨单元时,这时残留距离徙动效应可以忽略不计,因此自聚焦时只

收稿日期:2012-06-20;修回日期:2012-10-08

基金项目:国防基础科研计划(No. B2520110008);国家自然科学基金(No. 61071165);航空科学基金(No. 20102052024);第三批中国博士后科学基金特别资助(No. 201003586);中央高校基本科研业务费专项资金(No. NS2012097);江苏高校优势学科建设工程资助项目;教育部博士点基金(No. 20123218120021)

需估计和补偿方位一维相位误差,这也是目前常规自聚焦算法(典型算法如子孔径算法<sup>[2]</sup>,相位差分算法<sup>[3]</sup>,相位梯度自聚焦算法<sup>[4]</sup>,特征值方法<sup>[5,6]</sup>等)假设的前提.然而,随着误差的增加,尤其是成像分辨率特别高时,残留距离徙动跨越距离单元将变得不可避免<sup>[7,8]</sup>,因此,在此条件下有效的自聚焦算法必须要考虑二维相位误差的估计和补偿.文献[9]将传统的一维相位梯度自聚焦算法(PGA)扩展到二维,提出了二维相位梯度自聚焦算法(2-D PGA)试图解决这一问题,但该方法由于没有足够的冗余度对相位误差进行精确估计,因此还无法像一维 PGA 一样达到实用.文献[10]则将相位误差简化为二维可分离误差,然后通过距离和方位分别进行一维 PGA 处理来实现二维相位误差校正,由于没有考虑相位耦合项,因此该算法的补偿精度仍然受到很大限制.文献[11,12]忽略距离向二次散焦,将二维相位误差近似为残留距离徙动和方位相位误差,并对两者分别进行估计和补偿.以上二维自聚焦方法都假设二维相位误差是完全未知的,没有利用相位误差内部所特有的结构信息,因此是对相位误差的一种盲估计,这势必给误差估计的精度和效率带来挑战.文献[13,14]注意到了二维相位误差的内部结构,并给出了极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)处理框架下的一些简化分析结果.但到目前为止,就作者所知,针对成像算法处理后残留二维相位误差内部结构的精确分析,以及利用这种先验内部结构信息的自聚焦算法,还未见诸报道.

本文对 PFA 的极坐标格式转换给出了一种新的解析解释,利用该解释,分析了 PFA 极坐标格式转换对残留误差的影响,得到了残留二维相位误差的精确解析结构.利用这种先验的解析结构信息,提出了一种基于一维估计/二维补偿的自聚焦算法,算法只需直接估计方位一维相位误差,然后利用先验知识将方位相位误差映射得到二维相位误差,从而完成二维相位误差的精确估计和补偿.

## 2 极坐标格式算法

### 2.1 信号模型

聚束 SAR 数据采集几何模型如图 1 所示,不失一般性,假设雷达沿着弯曲的轨迹做非匀速运动.以雷达波束照射的场景中心  $O$  为原点建立  $XYZ$  坐标系,在该坐标系内雷达天线相位中心瞬时位置为  $(x_a, y_a, z_a)$ ,它对应的瞬时方位角和俯仰角分别记为  $\theta$  和  $\varphi$ .将孔径中心时刻定义为方位时间的原点,并将其作为成像时的参考点,该参考点对应的方位角和俯仰角记为  $\theta_{\text{ref}}$  和  $\varphi_{\text{ref}}$ .假设地面场景中有一点目标,其位置为  $(x_p, y_p)$ .雷达天线相位中心到场景中心和到该目标的瞬时距离分

别记为  $r_c$  和  $r_p$ .

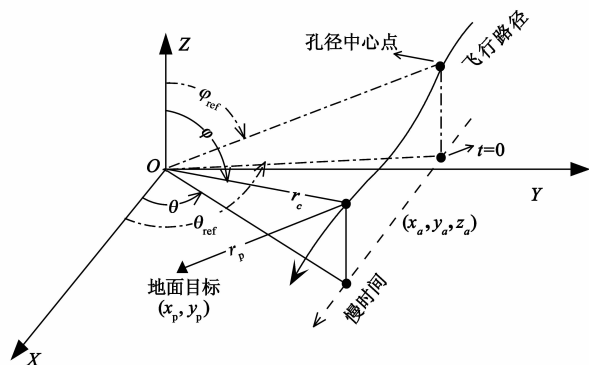


图1 聚束SAR数据采集几何模型

雷达发射宽带信号,被场景中点目标反射后接收到的回波信号通过解调、距离匹配滤波、运动补偿等预处理后可以表示为<sup>[15]</sup>

$$S(f_r, t) = A \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R_{\Delta}\right\} \quad (1)$$

其中  $c$  是电磁波传播速度,  $f_0$  是发射信号载频,  $f_r$  是距离频率,  $A$  代表回波信号幅度,  $R_{\Delta}$  是雷达天线相位中心到场景中心和到目标的差分距离

$$R_{\Delta} = r_c - r_p \equiv r_c(t) - r_p(t) \quad (2)$$

PFA 采用了平面波前假设,在此近似条件下,差分距离可以简化为<sup>[16,17]</sup>

$$\begin{aligned} R_{\Delta} &= \sin\varphi (x_p \cos\theta + y_p \sin\theta) \\ &= \sin\varphi [\bar{x}_p \sin(\theta_{\text{ref}} - \theta) + \bar{y}_p \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_p \\ \bar{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{ref}} & -\cos\theta_{\text{ref}} \\ \cos\theta_{\text{ref}} & \sin\theta_{\text{ref}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

是旋转后的目标坐标.

将式(3)代入式(1),可得到回波信号可近似为

$$S(f_r, t) = A \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) \sin\varphi [\bar{x}_p \sin(\theta_{\text{ref}} - \theta) + \bar{y}_p \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta)]\right\} \quad (5)$$

为方便后面分析,我们从距离徙动校正角度,将极坐标格式转换理解为距离频率和方位时间两个变量的解耦过程,其中距离重采样消除式(5)中目标距离位置项中两变量的耦合,方位重采样消除方位位置项中两变量的耦合.

### 2.2 距离重采样

距离重采样的目的是消除式(5)中  $\bar{y}_p$  项系数中距离频率与方位时间的耦合,使其仅为距离频率的线性函数.从数学表达式上,这一过程可以通过对距离频率做一个与方位时间有关的变量替换实现,即令  $f_r = \vartheta$ ,  $(\bar{f}_r; t)$  (其中  $\bar{f}_r$  为新的距离频率变量),使其满足

$$(f_0 + f_r) \sin \varphi \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta) \xrightarrow{f_r = \vartheta_r(\bar{f}_r; t)} (f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}} \quad (6)$$

根据式(6),我们很容易得到替换的变量为<sup>[16]</sup>

$$\vartheta_r(\bar{f}_r; t) = \delta f_r + f_0(\delta_r - 1) \quad (7)$$

其中  $\delta_r = \sin \varphi_{\text{ref}} / [\sin \varphi \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta)]$ .

因此,通过对式(5)中距离频率做如上变量替换,可以得到距离重采样后的信号

$$S_R(\bar{f}_r, t) = S[\vartheta_r(\bar{f}_r; t), t] \\ = A \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} (f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}} [\bar{x}_p \tan(\theta_{\text{ref}} - \theta) + \bar{y}_p]\right\} \quad (8)$$

从式(8)中可以看到,距离位置项  $\bar{y}_p$  系数仅为距离频率的线性函数,已完成解耦合.

### 2.3 方位重采样

与距离重采样类似,方位重采样的目的是消除式(8)中  $\bar{x}_p$  项系数中距离频率与方位时间的耦合,使其仅为方位时间的线性函数.同样,这一过程可以通过对方位时间做一个与距离频率有关的变量替换完成,即令  $t = \vartheta_a(\bar{t}; \bar{f}_r)$  (其中  $\bar{t}$  为新的方位时间),使其满足

$$(f_0 + \bar{f}_r) \tan(\theta_{\text{ref}} - \theta) \xrightarrow{t = \vartheta_a(\bar{t}; \bar{f}_r)} f_0 \Omega \bar{t} \quad (9)$$

其中  $\Omega$  是由方位重采样过程决定的一个常数,如果雷达平行于  $X$  轴以速度  $u_X$  飞行(此时  $y_a$  等于常数  $y_a$ ),可令  $\Omega = u_X \sin^2 \theta_{\text{ref}} / y_a$ .

不失一般性,我们假设雷达平台沿任意航迹飞行,在此条件下,根据式(9)无法得到  $\vartheta_a(\bar{t}; \bar{f}_r)$  的解析表示.为了后面误差分析方便,我们将方位重采样过程分解成如下两步实现<sup>[17]</sup>:

$$(f_0 + \bar{f}_r) \tan(\theta_{\text{ref}} - \theta) \xrightarrow{t = \vartheta_{a1}(i)} (f_0 + \bar{f}_r) \Omega i \\ \xrightarrow{i = \vartheta_{a2}(\bar{i}; \bar{f}_r)} f_0 \Omega \bar{i} \quad (10)$$

其中变量替换  $t = \vartheta_{a1}(i)$  表示在方位时间域做一个与距离频率无关的重采样,使  $\tan(\theta_{\text{ref}} - \theta)$  变为方位时间的线性函数,本文将这一过程称为距离徙动的线性化.在任意雷达航迹条件下,虽然我们仍然无法得到  $\vartheta_{a1}(i)$  的解析表达式,但这并不影响我们后面的误差分析.经过距离徙动线性化后,式(8)变为

$$S_L(\bar{f}_r, i) = S_R[\bar{f}_r, \vartheta_{a1}(i)] \\ = A \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} (f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}} (\bar{x}_p \Omega i + \bar{y}_p)\right\} \quad (11)$$

式(10)中第二个重采样  $i = \vartheta_{a2}(\bar{i}; \bar{f}_r)$  是一个与距离频率有关的方位时间重采样,根据式(10),很容易得到

$$\vartheta_{a2}(\bar{i}; \bar{f}_r) = \frac{f_0}{f_0 + \bar{f}_r} \bar{i} \quad (12)$$

上式表明第二次方位重采样实质上是一个 Keystone 变

换.

经过 Keystone 变换后,式(11)变为

$$S_{\text{KT}}(\bar{f}_r, \bar{i}) = S_L[\bar{f}_r, \vartheta_{a2}(\bar{i}; \bar{f}_r)] \\ = \bar{A} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} \sin \varphi_{\text{ref}} (\bar{x}_p f_0 \Omega \bar{i} + \bar{y}_p \bar{f}_r)\right\} \quad (13)$$

其中  $\bar{A} = A \cdot \exp\left(j \frac{4\pi \sin \varphi_{\text{ref}}}{\lambda} \bar{y}_p\right)$  是常数.

### 2.4 二维 FFT

从式(13)不难看出,经过距离和方位重采样后,距离频率和方位时间不再存在耦合,距离徙动得到完全校正,因此再对式(13)做一个二维 FFT 就能实现对目标的聚焦成像,即

$$F[S_{\text{KT}}(\bar{f}_r, \bar{i})] = \bar{A} \cdot \text{sinc}_r\left(\tau - \frac{2 \sin \varphi_{\text{ref}}}{c} \bar{y}_p\right) \\ \cdot \text{sinc}_a\left(f_i - \frac{2 \Omega \sin \varphi_{\text{ref}}}{\lambda} \bar{x}_p\right) \quad (14)$$

其中  $F[\cdot]$  表示二维 FFT,  $f_i$  是方位频率,  $\tau$  是距离时间,  $\text{sinc}_r(\cdot)$  和  $\text{sinc}_a(\cdot)$  分别表示距离和方位向的 sinc 函数.

### 3 残留相位误差分析

在上面的分析中,我们假设雷达到目标的相对距离是精确已知的,而且式(3)还采用了平面波前近似.实际上,受惯导测量精度和大气扰动等因素影响,距离误差通常不可避免,而且在高分辨率和近场成像时,波前弯曲效应也不能忽略.此时,实际的差分距离可以表示为

$$R_{\Delta} = [\bar{x}_p \sin \varphi \sin(\theta_{\text{ref}} - \theta) + \bar{y}_p \sin \varphi \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta)] + R_E \quad (15)$$

其中  $R_E \equiv R_E(t)$  表示距离误差.

将式(15)代入式(1),可以得到实际情况下雷达回波模型

$$S(f_r, t) = A \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) [\bar{x}_p \sin \varphi \sin(\theta_{\text{ref}} - \theta) + \bar{y}_p \sin \varphi \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta) + R_E]\right\} \quad (16)$$

跟理想条件下的信号式(5)相比,可以很容易得到回波相位历史域的两维相位误差

$$\phi(f_r, t) = \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R_E = \phi_0(t) + \phi_1(t) f_r \quad (17)$$

此相位误差由两部分构成,其中  $\phi_0(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R_E$  是方位相位误差,  $\phi_1(t) = \frac{4\pi}{c} R_E$  代表残留距离徙动(徙动量为  $R_E$ ).

从上一节的分析我们已经知道,距离重采样在解析表达上就是对信号做一个与方位时间有关的距离频率变量替换,因此我们可以得到式(16)经过距离重采样后将变为

$$S_R(\bar{f}_r, t) = S[\vartheta_r(\bar{f}_r; t), t] = A \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi(f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}}}{c} [\bar{x}_p \tan(\theta_{\text{ref}} - \theta) + \bar{y}_p + \varepsilon]\right\} \quad (18)$$

其中  $\varepsilon = \frac{\delta_r R_E}{\sin \varphi_{\text{ref}}} \equiv \varepsilon(t)$ .

对比式(18)和式(16), 不难发现距离重采样对相位误差也有影响, 重采样后的相位误差变为

$$\phi(\bar{f}_r, t) = \frac{4\pi(f_0 + \bar{f}_r)}{c} \delta_r R_E = \phi_0(t) + \phi_1(t) \bar{f}_r \quad (19)$$

同样  $\phi_0(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \delta_r R_E$  表示方位相位误差,  $\phi_1(t) = \frac{4\pi}{c} \delta_r R_E$  代表残留距离徙动.

极坐标格式转换的第二步是方位重采样, 上一节我们将其分解成了距离徙动的线性化和 Keystone 变换两个过程. 式(18)经过距离徙动线性化后可表示为

$$S_L(\bar{f}_r, i) = S_R[\bar{f}_r, \vartheta_{a1}(i)] = A \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} (f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}} (\bar{x}_p \Omega i + \bar{y}_p + \eta)\right\} \quad (20)$$

其中  $\eta = \varepsilon[\vartheta_{a1}(i)] \equiv \eta(i)$ , 对应残留相位误差

$$\phi(\bar{f}_r, i) = \frac{4\pi}{c} (f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}} \eta = \phi_0(i) + \phi_1(i) \bar{f}_r \quad (21)$$

其中  $\phi_0(i) = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \varphi_{\text{ref}} \eta$  和  $\phi_1(i) = \frac{4\pi}{c} \sin \varphi_{\text{ref}} \eta$  分别代表变换后的方位相位误差和残留距离徙动.

最后再对式(20)做 Keystone 变换, 得到

$$S_{\text{KT}}(\bar{f}_r, \bar{t}) = S_L[\bar{f}_r, \vartheta_{a2}(\bar{t}; \bar{f}_r)] = \bar{A} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} \sin \varphi_{\text{ref}} (\bar{x}_p f_0 \Omega \bar{t} + \bar{y}_p \bar{f}_r) + \phi(\bar{f}_r, \bar{t})\right\} \quad (22)$$

其中  $\bar{A} = A \cdot \exp\left(j \frac{4\pi \sin \varphi_{\text{ref}}}{\lambda} \bar{y}_p\right)$  是复常数,

$$\phi(\bar{f}_r, \bar{t}) = \frac{4\pi(f_0 + \bar{f}_r) \sin \varphi_{\text{ref}}}{c} \eta\left(\frac{f_0}{f_0 + \bar{f}_r} \bar{t}\right) \quad (23)$$

是 Keystone 变换后(也即极坐标格式转换后)的两维相位误差.

从式(23)不难看出, 该两维相位误差具有很好的内部结构, 其中的很多参数都是先验已知的, 唯一未知的量只有  $\eta(\bar{t})$ , 因此要估计该两维相位误差, 实际只需直接估计  $\eta(\bar{t})$  即可.

对于  $\eta(\bar{t})$  的估计, 实际实现时可以通过估计方位相位误差完成. 在式(23)中, 令  $\bar{f}_r = 0$ , 可以得到方位相位误差表达式为

$$\phi_0(\bar{t}) = \frac{4\pi f_0 \sin \varphi_{\text{ref}}}{c} \eta(\bar{t}) \quad (24)$$

根据式(23)和式(24), 可以得到两维相位误差和方位一维相位误差之间存在如下映射关系

$$\phi(\bar{f}_r, \bar{t}) = \frac{f_0 + \bar{f}_r}{f_0} \phi_0\left(\frac{f_0}{f_0 + \bar{f}_r} \bar{t}\right) \quad (25)$$

式(25)揭示了两维相位误差与方位一维相位误差之间的映射关系, 通过该式, 两维相位误差可以由方位一维相位误差直接计算得到.

## 4 残留误差的自聚焦校正

常规两维自聚焦算法在对相位误差进行估计时, 认为两维相位误差是完全未知的, 因此是对相位误差的一种盲估计. 这种盲估计方法在实际应用时目前至少还存在如下两个方面的缺陷: 首先, 它没有足够的冗余度来提高相位误差估计的精度, 常规方位一维相位误差估计时, 利用了距离向的数据冗余, 因此估计精度较高, 但估计两维相位误差时, 估计的维数增加, 而数据冗余度反而大大降低, 因此相位误差估计性能很难得到保证; 其次, 这种两维相位误差估计相比一维相位误差估计, 计算量成倍增加, 算法实时性能较差.

通过上一节的分析, 我们知道残留的两维相位误差并不是完全未知的, 而是具有很好的内部结构, 利用这种结构信息, 两维相位误差的估计, 实际可以简化为方位一维相位误差的估计. 基于这一思想, 我们提出了如图所示的基于一维估计/两维补偿的两维自聚焦算法. 算法的核心包括两个部分: 方位相位误差估计和两维相位误差计算.

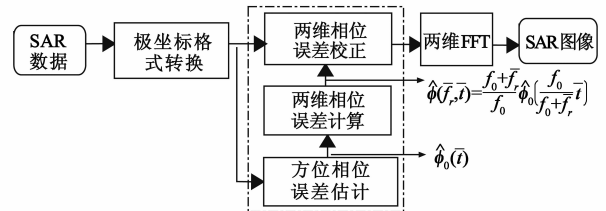


图2 两维自聚焦处理流程

### 4.1 方位相位误差估计

对于方位相位误差的估计, 可以利用常规的自聚焦算法完成, 但如果在残留距离徙动不能忽略时直接应用这些方法, 相位误差估计性能会受到很大影响. 最直接的改进方法是估计前先将数据在距离向降分辨率, 使分辨率降低后残留距离徙动不超过一个分辨单元. 这种改进方法在残留距离徙动跨距离单元数不多时能够很好的改善方位相位误差估计精度, 但在误差特别大时, 仍然存在一定的限制. 首先, 距离分辨率的降低, 减少了可用于方位相位误差估计的距离独立样本数, 而且分辨率降得越多, 独立样本数变得越少, 因此当残留误差特别大时, 相位误差估计会由于独立样本太少而影响估计精度. 其次, 常规自聚焦算法在对大的相位误差进行估计时也表现出一定的局限性. 为了克服上述问题, 我们提出了基于子孔径的自聚焦算法, 其处理流程如图3所示.

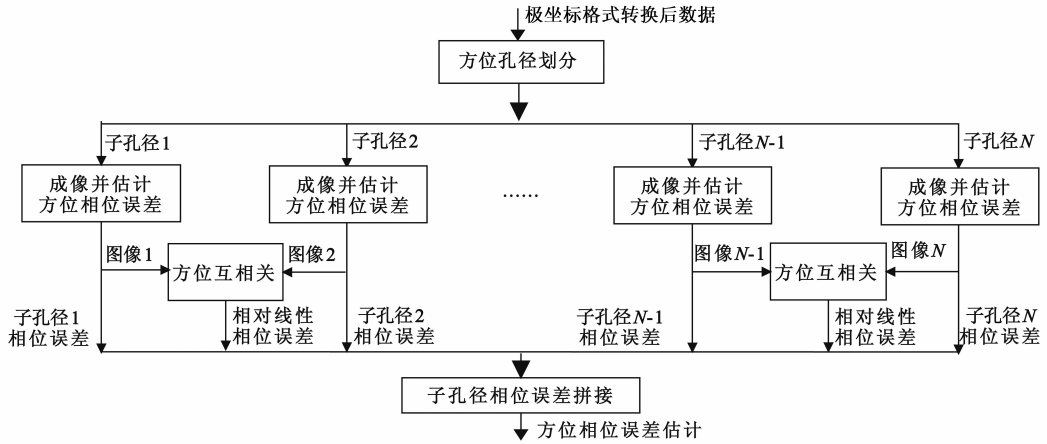


图3 基于子孔径的方位相位误差估计

首先,将极坐标格式转换后的数据在方位向分成多个子孔径,只要子孔径大小选取的足够小,在子孔径内,残留的距离徙动完全可以忽略不计,而且每个子孔径内的方位相位误差也相对较小,因此可以利用常规自聚焦算法进行估计。但常规自聚焦算法都只能估计子孔径内的高阶相位误差(二阶及以上),而无法正确估计出线性相位,虽然在整个孔径内的线性相位误差不会影响图像聚焦,但对于每个子孔径,其线性相位误差不同,对应在整个孔径内就是一个高阶相位误差,因此在相位误差拼接前,还必须对每个子孔径内的线性相位误差或者相邻子孔径的相对线性相位误差进行估计。考虑到方位线性相位误差对图像的影响是使图像在方位向发生偏移,因此如果能够估计出相邻子孔径图像之间的相对偏移量,就能直接计算出相邻子孔径之间的相对线性相位误差,典型地,相对偏移量可以通过对两个子图像在方位向做互相关处理估计得到。

#### 4.2 两维相位误差计算

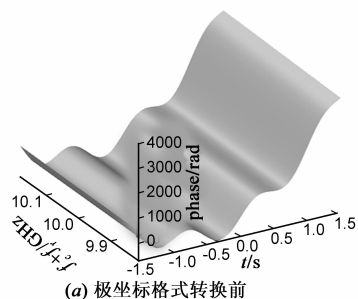
有了方位相位误差的估计,根据式(25)就可以由该估计的一维相位误差直接计算得到两维相位误差。观察式(25)不难看出,该映射本质上是在每个距离频率上对方位相位误差做一个与距离频率有关的尺度变换,典型地,该尺度变换可通过插值完成,也可以通过变尺度原理实现。值得注意的是,在上面的方位相位误差估计过程中,我们只是考虑了相邻子孔径间的相对线性相位误差,而没有办法得到每个子孔径内的绝对线性相位误差,因此拼接后的全孔径相位误差与真实的相位误差可能仍相差一个线性相位项。虽然该线性相位只会使重聚焦的图像产生一个方位移位,并不会影响图像方位聚焦,但是在我们的二维自聚焦方案中,两维相位误差的计算直接依赖于方位相位误差估计,如果这个多余的方位线性相位项会引入额外的高次距离相位项,则这一方法的实用性就会受到很大限制。然而,

根据式(25),我们不难得到即使方位相位误差估计有一个线性相位偏置,计算得到的两维相位误差中也不会引入额外的高次距离相位项。

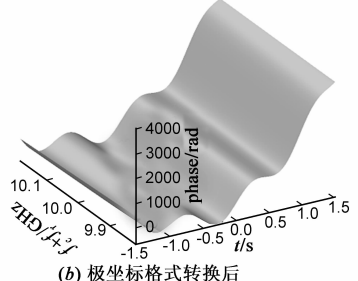
## 5 试验验证

### 5.1 仿真数据处理

成像处理后残留两维相位误差的解析结构是本文所提二维自聚焦方法处理的关键,因此首先我们通过仿真数据处理来验证式(25)的正确性。仿真过程中雷达主要参数:载频 10GHz,带宽 400MHz,作用距离 5000m,斜视角 45°,孔径长度 360m。又假设成像场景中只有场景中心有一个点目标,因此通过对该参考点进行运动补偿后,回波信号的相位只有残留的误差相位。同时仿真中不考虑信号幅度效应,因此运动补偿后的回波信号可以表示为  $s(f_r, t) = \exp\left[j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R_E\right]$  (其中  $R_E$  为斜距误差)。极坐标格式转换(这里我们用符号  $P$  来表示)本质上是对信号的一个重采样,它满足  $P\{\exp\{j\phi\}\} = \exp\{jP[\phi]\}$ 。考虑到本试验主要是验证极坐标格式转换对误差信号相位的影响,因此仿真中,我们采取直接对回波信号的相位(即  $\varphi(f_r, t) = \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R_E$ )而不是回波信号本身进行极坐标格式转换,这样带来的好处是可以避免在计算相位时的解模糊操作。试验中假设的两维相位误差  $\phi(f_r, t)$  如图 4(a) 所示,通过极坐标格式转换后,残留两维相位误差  $\phi'(f_r, t) = P\left[\frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R_E\right]$  变为如图 4(b) 所示,由于相位有一个很大的偏置,因此很难看出极坐标格式转换对两维相位误差的影响,为此,图 5(a) 给出了两者的差值  $(\phi'(f_r, t) - \phi(f_r, t))$ 。为了验证  $\phi'(f_r, t)$  是否具有式(25)所示解析结构,我们首先从  $\phi'(f_r, t)$  中提取出方位相位误差  $\phi_0(t) = \phi'(f_r, t)|_{f_r=0}$ ,然后由该方位相位误差根



(a) 极坐标格式转换前



(b) 极坐标格式转换后

图4 极坐标格式转换前后的两维相位误差

据式(25)直接计算得到两维相位误差  $\phi''(f_r, t)$ , 结果如图5(b)所示. 为了比较实际测得和理论计算结果是否一致, 图5(c)给出了两者的差值. 差值结果表明两者在

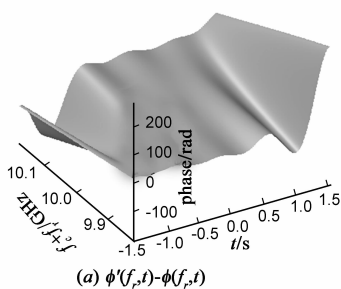
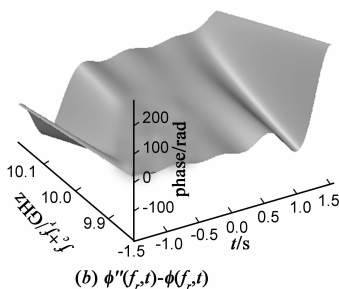
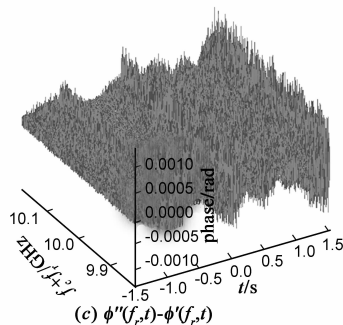
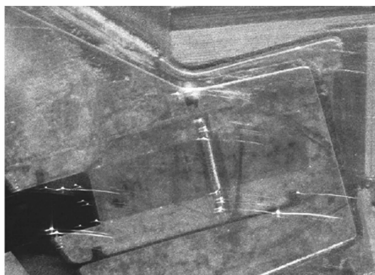
(a)  $\phi'(f_r, t) - \phi''(f_r, t)$ (b)  $\phi''(f_r, t) - \phi(f_r, t)$ (c)  $\phi''(f_r, t) - \phi'(f_r, t)$ 

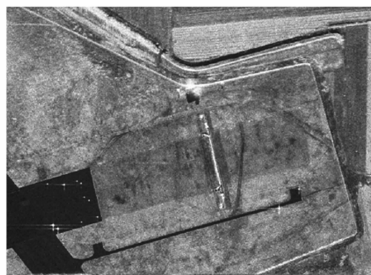
图5 残留两维相位误差



(a) 直接PFA处理结果



(b) PGA重聚焦结果



(c) 本文方法重聚焦结果

图6 实测数据处理结果

## 6 结束语

本文以极坐标格式算法为例, 详细分析了成像算法处理后残留两维相位误差的解析结构, 并利用这种先验辅助知识, 将两维相位误差估计问题转化为方位一维相位误差估计, 提出了一种基于一维估计/两维校

误差范围内是一致的(误差是由根据式(25)计算两维相位误差时的插值操作引入的), 因此也就验证了残留两维相位误差确实存在式(25)所示的解析结构.

## 5.2 实测数据处理

利用某高分辨机载试验 SAR 录取的数据对本文提出的两维自聚焦方案进行了验证. 实验雷达工作于 X 波段, 发射信号带宽为 1.18GHz, 对应距离向理论分辨率优于 0.15m, 处理时有效合成孔径长度为 2300m, 对应方位理论分辨率约为 0.067m. 由于没有运动测量单元提供的该雷达瞬时位置信息, 因此 PFA 处理时假设雷达做匀速直线运动. 图6(a)是直接 PFA 处理结果, 从图中可以很明显的看到, 虽然经过了 PFA 的距离徙动校正, 但目标仍然残留有很大的跨距离单元走动, 图像出现了明显的两维散焦. 对上述 PFA 图像进行常规一维自聚焦(本文采用 PGA)处理, 得到处理结果如图6(b)所示, 可以看到图像质量虽然有了很明显的改善, 但两维散焦现象并未完全消除. 图6(c)是采用本文两维自聚焦算法处理后的成像结果, 从图中可以看到两维散焦现象消除, 成像效果得到非常明显的改善.

正的自聚焦算法. 算法只需直接估计方位一维相位误差, 然后利用两维相位误差内部所特有的结构信息, 将一维相位误差映射得到两维相位误差, 从而实现两维相位误差的精确估计和补偿. 这种基于先验相位结构信息的降维估计方法不仅可以降低算法的计算复杂度, 而且克服了传统两维自聚焦算法由于缺少冗余度

而无法精确估计相位问题. 虽然如此, 本文还仅仅只是针对一种经典 SAR 成像算法, 即极坐标格式算法进行了深入分析, 考虑到不同成像算法处理后残留误差并不具备统一性, 因此后续工作中有必要对其它算法的误差特性进行分析和比较, 以进一步完善这种基于先验知识的二维自聚焦方法.

## 参考文献

- [1] Denny M, Scott I. Anomalous propagation limitations to high-resolution SAR performance[A]. Proceedings of the 2002 IEEE Radar Conference[C]. Long Beach: IEEE Press, 2002. 249 – 254.
- [2] Mancill C E, Swiger J M. A map drift autofocus technique for correcting high order SAR phase errors[A]. 27th Annual Tri-Service Radar Symposium[C]. Monterey: SENSIC, 1981. 391 – 400.
- [3] Yoji G N. Phase Difference Auto Focusing for Synthetic Aperture Radar Imaging[P]. United States Patent: 4999635, 1991 – 03 – 12.
- [4] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 827 – 834.
- [5] Jakowatz C V, Jr, Wahl D E. Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic aperture radar imagery[J]. Journal of the Optical Society of America, 1993, 10(12): 2539 – 2546.
- [6] 蒋锐, 朱岱寅, 沈明威. 基于投影近似子空间跟踪技术的自聚焦算法[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1251 – 1256.  
Jiang R, Zhu D Y, Shen M W, Zhu Z Z. An autofocus algorithm for spotlight SAR imagery using the projection approximation subspace tracking approach[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1251 – 1256. (in Chinese)
- [7] Kirk D, Maloney P. A new autofocus technique for wide-band wide-angle synthetic aperture radar[A]. Proceedings of SPIE[C]. Orlando: SPIE Press, 1998. 52 – 61.
- [8] Doerry A W. Autofocus Correction of Excessive Migration in Synthetic Aperture Radar Images[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2004.
- [9] Warner D W, Ghiglia D C, Fitzgerrel A, et al. Two-dimensional phase gradient autofocus[A]. Proceedings of SPIE[C]. Washington: SPIE Press, 2000. 162 – 173.

- [10] Gallon A, Impagnatiello F. Motion compensation in chirp scaling SAR processing using phase gradient autofocus[A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Seattle: IEEE Press, 1998. 633 – 635.
- [11] Zhu D. SAR signal based motion compensation through combining PGA and 2-D map drift[A]. Proceeding of 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. Shaanxi: IEEE Press, 2009. 435 – 438.
- [12] Kirk J C, Lefevre R, Van Dalen Wetters, et al. Signal based motion compensation (SBMC)[A]. The record of the IEEE 2000 international radar conference [C]. Alexandria: IEEE Press, 2000. 463 – 568.
- [13] Doerry A W, Heard F E, Thomas Cordaro J. Comparing Range Data across the Slow-time Dimension to Correct Motion Measurement Errors beyond the Range Resolution of a Synthetic Aperture Radar[P]. US Patent: 7777665, 2010 – 08 – 16.
- [14] Preiss M, Gray D, Stacy N J S. The effect of polar format resampling on uncompensated motion phase errors and the phase gradient autofocus algorithm[A]. Proceeding of IGARSS 2001[C]. Sydney: IEEE Press, 2001. 1442 – 1444.
- [15] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [16] Zhu D, Ye S, Zhu Z. Polar format algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1433 – 1448.
- [17] Zhu D, Mao X, Li Y. Far-field limit of PFA for SAR moving target imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 917 – 929.

## 作者简介



毛新华 男, 博士, 1979 年 12 月出生于湖南涟源. 现为南京航空航天大学电子信息工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为合成孔径雷达信号处理, 曾获国防科技进步三等奖一项, 已在国内外学术期刊和会议上发表论文 20 余篇.

E-mail: xinhua@nuaa.edu.cn