

一种基于 RELAX 的 SAR 自聚焦算法¹

郑义明 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 该文提出了一种基于 RELAX 的自聚焦算法。根据多个特显点和杂波同时存在的模型, 该算法交替迭代地进行相位校正和散射点参数估计, 在精确估计出散射点子回波参数的同时估计出自聚焦所需的相位误差。由于该算法未对杂波和噪声模型作任何假设, 可应用于绝大多数成像场景, 同时该算法可用于估计任何类型的相位误差, 因此是一种稳健的自聚焦算法。实际数据处理结果表明该方法是有效的。

关键词 合成孔径雷达 (SAR), 自聚焦, 相位误差

中图分类号 TN951

1 引 言

合成孔径雷达可获得高分辨率的雷达图像, 它具有全天候、远距离工作的特点, 已在军用 (战场侦察、目标识别、对地攻击) 和民用 (地形测绘、海洋观测、农作物评估) 的众多领域获得广泛应用^[1]。运动是雷达成像的根据, 也是产生问题的根源。不同的成像算法要求雷达与成像场景有不同的相对运动, 因此为获得高分辨率的图像, 必须对偏离规则运动 (成像算法所需的相对运动) 的运动误差进行补偿。SAR 的载体上一般都备有全球定位系统 (GPS), 惯性导航系统 (INS) 和捷联惯导 (IMU), 以综合检测出快变和慢变运动误差, 扰动的平面内分量和非平面分量, 并作相应的补偿。实际上, 由于仪器的监测范围和精度都受到一定的限制, 而难以满足高分辨率成像的要求 (特别是相位精确校正), 通常辅之以信号处理方法, 也就是自聚焦。在有些场合还主要用自聚焦方法进行补偿。自聚焦技术消除 SAR 经测量校正和空变校正仍然存在的相位误差, 这一相位误差除由未补偿的运动误差引起外, 还可能由信号传播的影响及系统的不稳定性等引起。绝大多数自聚焦方法认为相位误差是空不变的。对许多现有的 SAR 系统这一假设是合理的, 因为相位误差主要是由未补偿的运动误差 (如横向速度误差或雷达视线向的加速度误差) 引起的, 而经前期运动补偿和成像处理的测量校正和空变校正后, 运动误差的主要影响是在方位向引入近似空不变的相位误差。

针对不同的成像场景或相位误差已提出了很多自聚焦方法, 如 Map-Drift 法 (又称子孔径法)^[2,3]、特显点法 (DSA)^[4,5]、相位梯度法 (PGA)^[6]、秩一相位误差法 (ROPE)^[7] 及加权最小二乘法 (WLSA)^[8] 等。Map-Drift 法对场景不敏感, 但是 Map-Drift 法只适合于估计多项式形式的相位误差, 且随着相位误差阶数增大估计精度降低。特显点法适用于各类相位误差, 其成败的关键在于特显点单元中相位起伏分量的大小。相位梯度法的优点是通过对数据进行循环移位、加窗处理可提取局域特显点, 并利用多次迭代降低估计误差。文献 [9] 提出了一种改进的相位梯度法, 称为 Quality PGA。这一方法的出发点是提取更多的高质量局域特显点, 提高相位误差估计的统计精度。秩一相位误差法从信号相位的一次差分出发, 在距离和方位向交替迭代估计相位误差的一次差分及多普勒频率。秩一相位误差法必须给出多普勒频率的一个初始值, 且假定每个距离单元只有一个特显的散射点。文献 [10] 把 ROPE 与 PGA 的算法结构相结合, 对 ROPE 进行改进, 改进后的 ROPE 可获得比 PGA 更好的聚焦效果。加权最小二乘法在最小二乘意义上估计相位误差, 使剩余相位误差的方差最小。这

¹ 1999-06-11 收到, 1999-12-01 定稿

国家自然科学基金重点项目资助 (69831040)

一方法必须先去除强散射点的多普勒频率和初相。通过循环移位和局部相位展开可分别消除多普勒频率和估计散射点初相,但是用局部相位展开估计初相是极其繁琐的,降低了算法的效率。

特显点法(包括多特显点综合法)基于每一个距离单元只有一个大的特显点,无论是 SAR 还是 ISAR,实际可利用的距离单元数是很少的,因而估计精度不高。PGA 等方法用加窗的方法将一个距离单元内的特显点分离,并逐步缩窄窗宽以减小杂波的影响,从而使可利用的特显点单元大大增加,估计精度提高。这就给我们提出了一个问题,能否在距离单元内存在多个特显点的情况下,不用加窗分离的方法,而大幅度提高特显点回波参数精度。这是有可能的,根据多个特显点和杂波同时存在的模型,用最小二乘法完全有可能精确估计各回波参数。在自聚焦过程中,还要进行相位误差校正,因此可以用相位校正和散射点回波参数估计交替地迭代进行,在精确估计出回波参数的同时,估计出自聚焦所需的相位误差。本文提出了一种基于 RELAX 的自聚焦方法,该方法利用 RELAX 算法估计各距离单元散射点的参数,并用加权最小二乘方法估计相位误差。由于加权最小二乘估计并未对杂波和噪声做任何假设,因此是一种稳健的相位误差估计器,适用于各类场景及各种形式的相位误差。同时由于该方法利用 RELAX 算法估计各散射点的参数,避免了文献 [8] 所述的初始相位展开,提高了算法效率。

本文的具体安排如下:在第 2 节给出了相位误差的加权最小二乘估计;第 3 节给出了各距离单元散射点参数的估计及杂噪分量方差的估计;第 4 节给出了算法的流程,并以实际数据验证了算法的有效性。

2 相位误差的加权最小二乘估计

自聚焦通常在距离压缩后的相位历程域进行,我们称这一信号域为距离图像-方位信号域。假定在第 n 个距离单元有 K 个强散射点,散射点回波存在一定的相位误差,第 k 个强散射点回波复振幅为 $\alpha_{n,k}$,多普勒频率为 $f_{n,k}$, $k = 1, 2, \dots, K$ 。其它的弱散射点可认为是杂波。因此对距离单元 n ,在方位位置 m 上的信号可表示为

$$y_{n,m} = \sum_{k=1}^K \alpha_{n,k} \exp[j(2\pi f_{n,k}m + \gamma_m)] + e_{n,m}, \quad \begin{matrix} n = 1, 2, \dots, N \\ m = 1, 2, \dots, M \end{matrix} \quad (1)$$

式中 γ_m 为第 m 次回波的相位误差, $e_{n,m}$ 表示杂波及噪声之和,杂噪分量在各距离单元间是相互独立的。令

$$s_{n,m} = \sum_{k=1}^K \alpha_{n,k} \exp(j2\pi f_{n,k}m) \quad (2)$$

则 (1) 式可写成

$$y_{n,m} = s_{n,m} \exp[j(\gamma_m)] + e_{n,m}, \quad \begin{matrix} n = 1, 2, \dots, N \\ m = 1, 2, \dots, M \end{matrix} \quad (3)$$

上式用向量形式表示

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{s}_m \exp(j\gamma_m) + \mathbf{e}_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{y}_m &= (y_{1,m}, y_{2,m}, \dots, y_{N,m})^T \\ \mathbf{s}_m &= (s_{1,m}, s_{2,m}, \dots, s_{N,m})^T \\ \mathbf{e}_m &= (e_{1,m}, e_{2,m}, \dots, e_{N,m})^T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

自聚焦的目的是估计相位误差 γ_m , 同时由于各散射点子回波的复振幅 $\alpha_{n,k}$ 和多普勒频率 $f_{n,k}$ 也是未知的, 所以必须同时估计 $\alpha_{n,k}$ 和 $f_{n,k}$ 。若我们已知散射点信号的复振幅和多普勒频率的估计值 $\{\hat{\alpha}_{n,k}, \hat{f}_{n,k}\}_{k=1}^K$, $n = 1, 2, \dots, N$, 则 $\{\gamma_m\}_{m=1}^M$ 估计值的加权误差函数为^[11]

$$C_1(\{\gamma_m\}_{m=1}^M) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_n |y_{n,m} - \hat{s}_{n,m} \exp(j\gamma_m)|^2 \quad (6)$$

以矩阵形式表示为

$$C_1(\{\gamma_m\}_{m=1}^M) = \sum_{m=1}^M [\mathbf{y}_m - \hat{\mathbf{s}}_m \exp(j\gamma_m)]^H \mathbf{W} [\mathbf{y}_m - \hat{\mathbf{s}}_m \exp(j\gamma_m)] \quad (7)$$

式中 $\mathbf{W} = \text{diag}[w_1, w_2, \dots, w_N]$, 使 C_1 最小化即可得到 $\{\gamma_m\}_{m=1}^M$ 的加权最小二乘估计 $\{\hat{\gamma}_m\}_{m=1}^M$

$$\exp(j\hat{\gamma}_m) = (\hat{\mathbf{s}}_m^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{s}}_m)^{-1} \hat{\mathbf{s}}_m^H \mathbf{W} \mathbf{y}_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

或

$$\hat{\gamma}_m = \angle \{ (\hat{\mathbf{s}}_m^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{s}}_m)^{-1} \hat{\mathbf{s}}_m^H \mathbf{W} \mathbf{y}_m \}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

设各距离单元杂噪分量 $e_{n,m}$ 的方差为 σ_n^2 ($n = 1, 2, \dots, N$), e_m 的协方差矩阵可表示为 $\sigma = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2]$ 。容易证明, 使加权最小二乘估计 $\{\hat{\gamma}_m\}_{m=1}^M$ 具有最小方差的加权矩阵为各距离单元杂噪分量协方差矩阵 σ 的逆, 即 $\mathbf{W} = \sigma^{-1} = \text{diag}[1/\sigma_1^2, 1/\sigma_2^2, \dots, 1/\sigma_N^2]$ 。在第 3 节中我们给出了各距离单元杂噪分量方差的估计。

3 散射点回波参数估计

第二节假设各散射点参数为已知, 并据此给出了相位误差的加权最小二乘估计。反之, 若假设相位误差 $\{\gamma_m\}_{m=1}^M$ 的估计值 $\{\hat{\gamma}_m\}_{m=1}^M$ 已知, 则散射点回波的复振幅和多普勒频率的估计值 $\{\hat{\alpha}_{n,k}, \hat{f}_{n,k}\}_{k=1}^K$, $n = 1, 2, \dots, N$, 可由使下式最小化得到

$$C_2(\{\alpha_{n,k}, f_{n,k}\}_{n=1, k=1}^{N, K}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |y_{n,m} - \exp(j\hat{\gamma}_m) \sum_{k=1}^K \alpha_{n,k} \exp(j2\pi f_{n,k} m)|^2 \quad (10)$$

由于各距离单元的状况相互独立, 使 (10) 式中的 C_2 最小等价于对各距离单元误差函数分别最小化, 即对第 n 个距离单元, 其散射点信号的复包络和多普勒频率 $\{\alpha_{n,k}, f_{n,k}\}_{k=1}^K$, ($n = 1, 2, \dots, N$) 的估计由最小化下式得到

$$C_{3,n}(\{\alpha_{n,k}, f_{n,k}\}_{k=1}^K) = \sum_{m=1}^M |y_{n,m} - \exp(j\hat{\gamma}_m) \sum_{k=1}^K \alpha_{n,k} \exp(j2\pi f_{n,k} m)|^2 \quad (11)$$

最优化 $C_{3,n}$ 仍是一个多维空间的寻优问题, 十分复杂。本文应用 RELAX 算法^[12,13], 以快速求解 $C_{3,n}$ 的寻优问题。为此, 首先作以下准备工作。令

$$y_{n,m,k} = y_{n,m} - \exp(j\hat{\gamma}_m) \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{\alpha}_{n,k} \exp(j2\pi \hat{f}_{n,i} m), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

假定 $\{\hat{\alpha}_{n,i}, \hat{f}_{n,i}\} (i = 1, 2, \dots, K, i \neq k)$ 已经求出, 则 (11) 式的最小化等效于下式的最小化

$$C_{4,n}(\alpha_{n,k}, f_{n,k}) = \sum_{m=1}^M |y_{n,m,k} - \alpha_{n,k} \exp(j\hat{\gamma}_m) \exp(j2\pi f_{n,k} m)|^2 \quad (13)$$

对上式关于 $\alpha_{n,k}$ 和 $f_{n,k}$ 求最小值就获得 $\alpha_{n,k}$ 和 $f_{n,k}$ 的估计值

$$\hat{\alpha}_{n,k} = \sum_{m=1}^M y_{n,m,k} \exp[-j(2\pi f_{n,k} m + \hat{\gamma}_m)] / M \quad (14)$$

$$\hat{f}_{n,k} = \arg \max_{f_{n,k}} \left\{ \left| \sum_{m=1}^M y_{n,m,k} \exp[-j(2\pi f_{n,k} m + \hat{\gamma}_m)] \right|^2 \right\} \quad (15)$$

从 (14), (15) 式可以看出: $\hat{\alpha}_{n,k}$ 是序列 $\{y_{n,m,k} \exp(-j\hat{\gamma}_m)\}_{m=1}^M$ 归一化的离散傅里叶变换, $\hat{f}_{n,k}$ 是序列 $\{y_{n,m,k} \exp(-j\hat{\gamma}_m)\}_{m=1}^M$ 的周期图 $|\sum_{m=1}^M y_{n,m,k} \exp[-j(2\pi f_{n,k} m + \hat{\gamma}_m)]|^2 / M$ 主峰处的频率值, 所以对于给定的 $\hat{\gamma}_m$, 我们可用 FFT 快速计算 $\alpha_{n,k}$, $f_{n,k}$ 的估计值 $\hat{\alpha}_{n,k}$, $\hat{f}_{n,k}$ 。

RELAX 算法对第 $n (n = 1, 2, \dots, N)$ 个距离单元散射点的参数估计步骤如下:

第 1 步 假设散射点个数 $K = 1$, 分别利用 (14), (15) 式计算 $\{\hat{\alpha}_{n,1}, \hat{f}_{n,1}\}$ 。

第 2 步 假设散射点个数 $K = 2$, 首先将第一步计算所得到的 $\{\hat{\alpha}_{n,1}, \hat{f}_{n,1}\}$ 代入 (12) 式求出 $\{y_{n,m,2}\}_{m=1}^M$, 再分别利用 $\{y_{n,m,2}\}_{m=1}^M$ 和 (14), (15) 式计算 $\{\hat{\alpha}_{n,2}, \hat{f}_{n,2}\}$; 最后再将计算的 $\{\hat{\alpha}_{n,2}, \hat{f}_{n,2}\}$ 代入 (12) 式求出 $\{y_{n,m,1}\}_{m=1}^M$, 然后利用 $\{y_{n,m,1}\}_{m=1}^M$ 和 (14), (15) 式重新计算 $\{\hat{\alpha}_{n,1}, \hat{f}_{n,1}\}$, 这个过程反复迭代, 直至收敛。

第 3 步 假设散射点个数 $K = 3$, 首先将第 2 步计算所得到的 $\{\hat{\alpha}_{n,1}, \hat{f}_{n,1}\}$ 和 $\{\hat{\alpha}_{n,2}, \hat{f}_{n,2}\}$ 代入 (12) 式求出 $\{y_{n,m,3}\}_{m=1}^M$, 再分别利用 $\{y_{n,m,3}\}_{m=1}^M$ 和 (14), (15) 式计算 $\{\hat{\alpha}_{n,3}, \hat{f}_{n,3}\}$; 将计算得到的 $\{\hat{\alpha}_{n,3}, \hat{f}_{n,3}\}$ 和 $\{\hat{\alpha}_{n,2}, \hat{f}_{n,2}\}$ 代入 (12) 式求出 $\{y_{n,m,1}\}_{m=1}^M$, 然后利用 $\{y_{n,m,1}\}_{m=1}^M$ 和 (14), (15) 式重新计算 $\{\hat{\alpha}_{n,1}, \hat{f}_{n,1}\}$; 将计算得到的 $\{\hat{\alpha}_{n,1}, \hat{f}_{n,1}\}$ 和 $\{\hat{\alpha}_{n,3}, \hat{f}_{n,3}\}$ 代入 (12) 式求出 $\{y_{n,m,2}\}_{m=1}^M$, 然后利用 $\{y_{n,m,2}\}_{m=1}^M$ 和 (14), (15) 式重新计算 $\{\hat{\alpha}_{n,2}, \hat{f}_{n,2}\}$, 这个过程反复迭代, 直至收敛。

第 4 步 令 $K = K + 1$, 上述步骤持续进行, 直到 K 等于待估计的强散射点数。

上述过程中的收敛判据为比较代价函数 $C_{3,n}$ 在两次迭代过程中的变化值, 如果这个变化值小于某个值, 如 $\varepsilon = 10^{-3}$, 则认为过程收敛。

估计出各距离单元的散射点参数后, 由 (3) 式我们可得杂噪分量的估计值为

$$\hat{\varepsilon}_{n,m} = y_{n,m} - \hat{\delta}_{n,m} \exp(j\hat{\gamma}_m) \quad (16)$$

则各距离单元杂噪分量方差的估计为

$$\hat{\sigma}_n^2 = \sum_{m=1}^M |\hat{e}_{n,m}|^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

4 自聚焦算法流程及聚焦实例

在前面的分析中, 我们分别假设相位误差或散射点子回波参数已知, 但实际上它们都是未知的, 需要进行迭代估计, 例如先给出一个相位误差的初始估计值, 用以估计散射点子回波参数, 然后用估计出的这一参数再去估计新的相位误差, 反复迭代, 直至收敛。这样就可得到两者较精确的估计值。实际上自聚焦的目的只是精确估计相位误差, 并不要求估计所有散射点参数, 所以计算中可以只利用部分距离单元, 而且在距离单元中也不必估计所有散射点参数。自聚焦算法流程如图 1 所示。

算法首先对距离单元进行选择, 这主要从两个方面考虑: 一是由于在某些距离单元上几乎不存在散射点子回波, 而只存在一些很弱的杂波和噪声, 这样的距离单元对自聚焦不起任何作用, 必须予以剔除。这类距离单元一般能量较小, 我们可以通过设定一个门限, 舍弃能量低于这一门限的距离单元。二是有的距离单元分布有众多的散射点, 且其中没有明显的特显点。这时虽说用 RELAX 算法可以估计所有散射点的参数, 但由于需估计的散射点数太多, 参数估计时间长, 影响算法的效率, 因此对这类距离单元我们也予以剔除。文献 [5] 根据归一化幅度方差将散射点模型分为三类, 其中归一化幅度方差为 0.215 附近的一类属于散射点众多的一类, 在我们选择距离单元时应剔除归一化幅度方差介于 0.20~0.25 的距离单元。

经距离单元选择后, 我们利用归一化幅度方差最小的一个距离单元 $y_{1,m}$ 用简单的特显点法给出相位误差 γ_m 的初始估计 $\hat{\gamma}_{m,1}$ ($m = 1, 2, \dots, M$), 接着我们增加一个距离单元, 用第 3 节的估计方法从 $\hat{\gamma}_{m,1}$ 出发估计各散射点子回波的复振幅和多普勒频率, 然后从估计出的各散射点子回波参数出发, 用第 2 节的方法再估计相位误差 $\hat{\gamma}_{m,2}$, 然后再增加一个距离单元, 用 $\hat{\gamma}_{m,2}$ 重复上述步骤, 如此进行多

次迭代, 直至收敛。上述过程的收敛判据为以相邻两次估计的相位误差变化很小为准, 如两次估计值间的均方根值小于 0.05(rad.)。这里我们没有直接利用所选择的全部距离单元, 而是每次迭代增加一个。这样做的目的是为了降低计算量, 因为在某些场景中存在一些明显的强散射点单元, 只需要少量这样的距离单元就可得到精确的相位误差估计, 不需所有距离单元参与运算, 从而降低了计算量。同时一个距离单元中, 也不必估计出所有散射点参数, 只要将最强的一部分 (如 $K=6$) 估计出即可。

图 2(a) 所示为一原始 SAR 图像, 对图像在方位向作 FFT 变换到距离图像-方位数据域。为说明算法的有效性, 在距离图像-方位数据域加一相位误差, 添加的相位误差为 $[-\pi, \pi]$ 间均匀分布的宽带随机误差。图 2(b) 为添加相位误差后的 SAR 图像, 图 2(c), 2(d) 分别

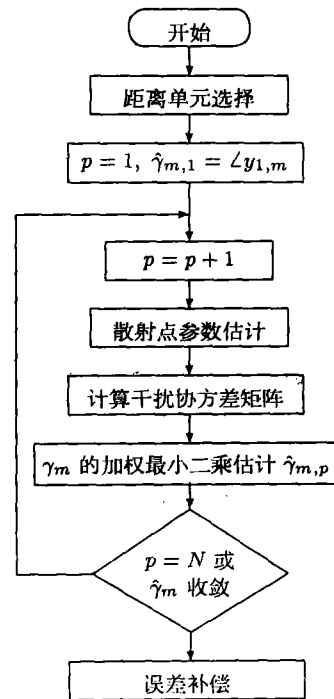


图 1 自聚焦算法流程框图

为用本文的自聚焦方法和用 PGA 作自聚焦后的 SAR 图像。用本文的方法处理时我们假定每个距离单元强散射点数 $K = 6$ ，从总数 512 中按归一化幅度方差可选择的距离单元数 $N=57$ ，我们实际只利用了 9 个距离单元数。图 2(c)，2(d) 与图 2(a) 非常接近，说明两种方法都能得到较好的聚焦效果。图 3(a) 给出了添加的相位误差，图 3(b)，3(c) 为分别用本文的方法和 PGA 估计的相位误差与实际相位误差的比较（为便于看清楚，在 512 个方位数据中只画出了前 50 个）。从图中可以看出两种方法都能很好地估计相位误差，本文的算法对相位误差估计的精度略优于 PGA。

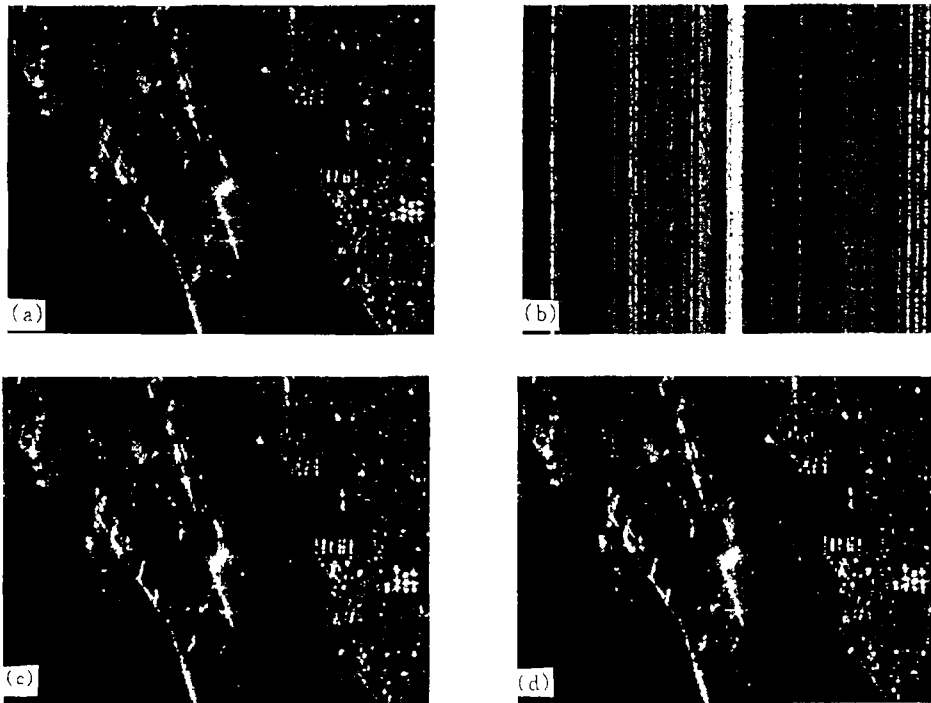
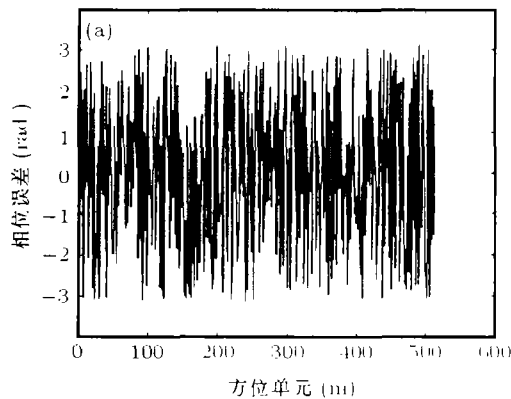
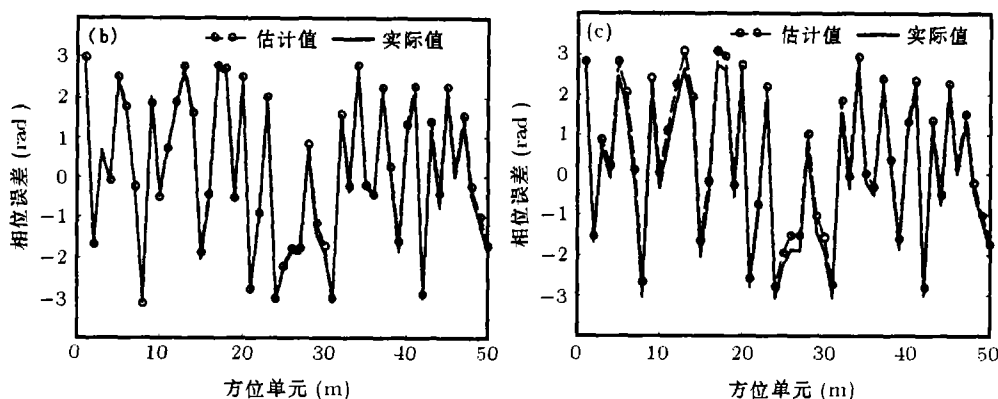


图2 SAR 聚焦实例
(a) 原始图像；(b) 加相位误差后图像；(c) 本文方法聚焦结果；(d) PGA 聚焦结果



(a) 实际相位误差

图3 添加的实际相位误差与估计相位误差比较



(b) 本文方法估计的相位误差

(c) PGA 估计的相位误差

图 3 添加的实际相位误差与估计相位误差比较

本文的聚焦算法同样适用于处理 ISAR 数据, 下面给出了对实际测量的 Yak-42 飞机数据处理的结果。雷达带宽为 400MHz, 纵向分辨率约为 0.4m。图 4(a) 为用特显点法处理的结果, 飞机的基本轮廓还比较清楚, 但由于自聚焦精度差, 背景干扰相对较多。图 4(b) 为用本文提出的方法处理的结果。这里我们仍假设每个距离单元存在 6 个强散射点, 可选择的距离单元数为 $N=29$, 实际利用的距离单元数为 6。从图中可以看出, 成像质量有明显提高。图 4(c) 为用 PGA 处理的结果, 与图 4(a) 相比, 成像质量有一定改善; 与图 4(b) 相比, 图像质量略差, 说明本文提出的方法对这类数据处理质量优于 PGA。

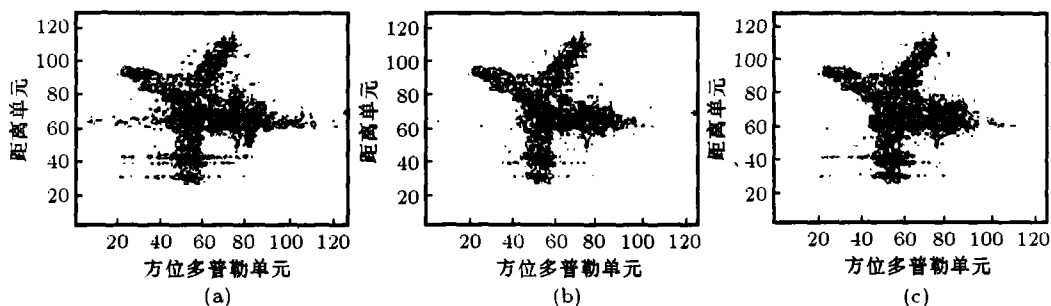


图 4 ISAR 数据处理实例 (a) 特显点法; (b) 本文方法; (c) PGA

前面的讨论完全是建立在相位误差空不变的基础之上, 但是由于实际 SAR 数据其相位误差只是近似空不变的, 总存在一定的空变相位误差 (如二次或更高次多项式相位误差), 一种好的自聚焦算法必须对空变相位误差有一定的稳健性。由于 PGA 在各距离单元只对一个点进行估计, 虽然各距离单元估计的相位误差除包含空不变相位误差外, 还包含用来估计的散射点处的空变相位误差, 不过由于各距离单元估计的空变误差相互不同, 经距离单元求平均后降低了空变相位误差的影响, 因此 PGA 对空变相位误差有很好的稳健性。与 PGA 不同, 本文的方法是在每个距离单元直接对多个散射点进行处理, 因此必须讨论同一距离单元内各散射点空变相位误差的影响。由于运动引起的瞬时相位变化在观测时间内为时间的连续函数, 可用低阶多项式近似表示。因此, 若 SAR 数据在方位向存在一定的空变相位误差, 则相当于各散射点子回波偏离正弦信号模型, 各散射点子回波除存在由多普勒引起的线性相位项外, 还存在二次或更高次相位项。由第 2 节的分析可知, 相位误差估计 $\{\hat{\gamma}_m\}_{m=1}^M$

的精度取决于散射点回波信号 $s_{n,m}(n=1,2,\dots,N;m=1,2,\dots,M)$ 的估计, 如果我们能够得到 $s_{n,m}$ 精确的估计, 则通过最小二乘法可得到 $\{\gamma_m\}_{m=1}^M$ 精确的估计, 所以本文算法对空变相位误差的稳健性主要取决于 RELAX 算法对信号 $s_{n,m}$ 估计的稳健性。在这里我们并不是用 RELAX 提取信号的具体特征, 我们的目的是用 RELAX 给出信号的一种近似估计, 而在这一点上 RELAX 具有很强的稳健性。因此本文的算法对空变误差也有一定的稳健性。正如前面所述, 这里我们只讨论空不变相位误差的自聚焦, 这时我们认为空变相位误差应在可接受的范围之内, 对图像质量的影响不大。在 SAR 处理中一般要求二次或高次相位误差小于 $\pi/4$, 认为这时的相位误差对图像的影响可以忽略。当空变相位误差较大, 严重影响 SAR 图像质量时, 显然我们只能寻求空变自聚焦方法。图 5 给出了方位向存在一定的二次空变相位误差时的聚焦实例。仿真时我们把图 2(a) 所示原始图像在方位向分成几段, 每段加上不同的二次相位误差(所加的二次相位误差最大不超过 $\pi/2$), 同时再加 $[-\pi, \pi]$ 间均匀分布的宽带随机空不变相位误差。图 5(a) 为添加二次空变相位误差后的 SAR 图像, 图 5(b) 为同时添加两类相位误差后的 SAR 图像, 图 5(c)、5(d) 分别为用本文的自聚焦方法和用 PGA 作自聚焦后的 SAR 图像。从图中可以看出本文的方法仍能得到较好的聚焦效果(当然算法无法补偿空变相位误差), 说明算法在存在空变相位误差时仍是稳健的。

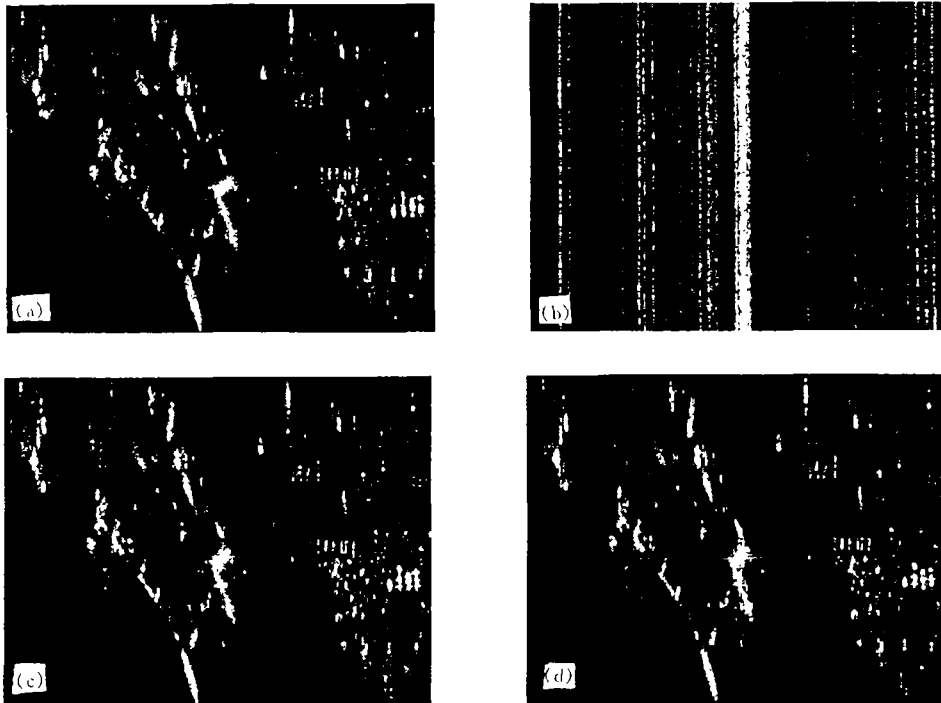


图 5 存在空变相位误差时 SAR 聚焦实例
(a) 只加空变相位误差时图像 ($\leq \pi/2$); (b) 加空变和空不变相位误差后图像
(c) 本文方法聚焦结果; (d) PGA 聚焦结果

5 结 论

本文提出了一种基于 RELAX 的自聚焦算法。该方法假定各距离单元存在多个强散射点, 利用 RELAX 估计各距离单元散射点的复振幅及多普勒频率, 用加权最小二乘方法估计相位误差。最小二乘方法在方差最小意义上是最优估计。与许多现有的自聚焦算法相比, 本文的自聚焦方法基于更一般的散射点回波模型, 由于该算法未对杂波和噪声模型作任何

假设, 可应用于绝大多数成像场景, 同时该算法适用于估计任何类型的相位误差, 因此是一种稳健的自聚焦算法。另外本文的算法对空变误差也有很好的稳健性。实际数据处理结果表明该方法是有效的。由于本文的方法实际用少量的距离单元就能获得好的结果, 运算量与 PGA 法相当。

参 考 文 献

- [1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski, Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms, Norwood, MA, Artech House, 1995, Chapter 1.
- [2] G. A. Bendor, T. W. Gedra, Signal-pass fine-resolution SAR autofocus, Proc. of IEEE National Aerospace and Electronics Conference, NAECON, Dayton, Ohio, May 1983, 482-488.
- [3] T. M. Callway, G. W. Donohoe, Subaperture autofocus for synthetic aperture radar, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(2), 617-621.
- [4] C. C. Chen, C. Andrews, Target-motion-induced radar imaging, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1), 2-14.
- [5] 叶炜, 逆合成孔径雷达运动补偿与成像研究, [博士论文], 西安, 西安电子科技大学, 1996.
- [6] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Chiglia, *et al.*, Phase gradient autofocus—A robust tool for high resolution SAR phase correction, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(2), 827-834.
- [7] C. A. Snarski, Rank one phase error estimation for range-Doppler imaging, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 32(2), 676-688.
- [8] W. Ye, T. S. Yeo, Z. Bao, Weighted least square estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5), 2487-2495.
- [9] H. L. Chan, T. S. Yeo, Noniterative quality phase-gradient autofocus (QPGA) algorithm for spotlight SAR imagery, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5), 1531-1538.
- [10] Li Liwei, Asif Raza, Mao Shiyi, Improvement of rank one phase estimation (ROPE) autofocus technique, Proc. of the International Radar Symposium, IRS'98, Munich, Germany, Vol. III, 1998, 1305-1310.
- [11] 张贤达, 信号处理中的线性代数, 北京, 科学出版社, 1997, 283-287.
- [12] J. Li, P. Stoica, Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction, IEEE Trans. on Signal Processing, 1996, 44(2), 281-294.
- [13] Z. S. Liu, J. Li, Synthetic-aperture-radar motion compensation and feature extraction by means of relaxation-based algorithm, Journal of Opt. Soc. Am. A, 1998, A-15(3), 599-610.

AN AUTOFOCUS ALGORITHM FOR SAR BASED ON RELAX

Zheng Yiming Bao Zheng

(National Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071 China)

Abstract An autofocus algorithm based on RELAX is presented. Assuming there exist multiple dominant scatterers in each range bin (other smaller scatterers are treated as clutter), the algorithm performs the phase error correction and the parameter estimation of the dominant scatterers alternatively by adopting an iterative procedure. The algorithm does not require that the clutter and noise in each range bin to be of certain distribution model, and it can be used to estimate all kinds of phase errors. Thus the algorithm is very robust. The results obtained in autofocusing experiments on real SAR/ISAR data show that the algorithm is very efficacious.

Key words Synthetic aperture radar, Autofocus, Phase error

郑义明: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像及自聚焦算法研究.

保 铮: 男, 1927年生, 教授, 中科院院士, 博士生导师, 主要研究领域为信号处理和雷达系统.