

基于图像准则的 SAR/ISAR 相位补偿技术的研究¹

李 玺 倪晋麟* 刘国岁 罗 毅 顾红 苏卫民

(南京理工大学电子工程系 南京 210094)

*(南京电子技术研究所 南京 210013)

摘 要 相位补偿是 SAR/ISAR 的关键技术。本文提出逐级逼近算法, 基于图像评价函数, 对 SAR/ISAR 中的随机干扰相位进行补偿。我们比较了四种典型的图像评价函数, 仿真和实测数据的计算结果表明, 逐级逼近算法是一种有效的计算方法。同时, 在四种图像评价函数中, 以最小 Shannon 熵准则性能最好, 它能确保对未知信号中干扰相位的正确估计。

关键词 SAR/ISAR 成像, 相位补偿, 图像评价函数

中图分类号 TN957.7

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 和逆合成孔径雷达 (ISAR) 都是基于距离-多普勒原理成像^[1]。它们通过发射大带宽的雷达信号获得纵向距离分辨力, 通过处理目标与雷达相对转动引起的多普勒频率获得横向距离分辨力。实际成像中, 由于雷达平台或目标的未知运动, 以及大气扰动, 系统误差等诸多因素引入对成像无益的平动分量。轻微的平动分量导致图像模糊, 旁瓣增高, 严重的则根本无法成像。因此, 在成像之前, 必须先将平动分量去掉, 仅保留对成像有贡献的转动分量, 即我们通常所说的运动补偿。SAR/ISAR 对运动补偿的精度要求很高, 一般需达到 $\lambda/10$ 的数量级 (λ 为发射信号波长)。这一级精度的补偿通常在相同的距离单元内进行, 也称为相位补偿。干扰相位的形式通常是未知的, 我们只能根据宽带回波信号, 先估计出干扰相位, 再进行补偿, 即所谓自聚焦技术。相位补偿是 SAR/ISAR 技术中的关键也是难点。现有的相位补偿技术较多, 常用的有: 子孔径法^[2], 特定点跟踪法^[3], 相位梯度法^[4]等。这些方法大多对干扰相位和信号的形式有要求, 因而存在一定的局限性。近来, 人们将图像准则引入 SAR/ISAR 成像中, 它的本质是以某一图像评价函数准则优化补偿相位的代估参数。该方法具有十分直观的物理意义。然而, 目前人们主要采用的是基于该技术的参数估计法, 估计低阶干扰相位并取得较好效果。对于更多实际情况中的高阶, 甚至随机的干扰相位, 图像准则方法是否依然能保证 SAR/ISAR 正确聚焦, 且不同准则的优化效果有何差别, 以及采用何种有效可行的算法, 这便是本文要回答的。

2 问题的提出

SAR/ISAR 成像时, 对于已完成脉冲压缩后的雷达回波, 若在第 n 个距离单元内包含 K 个理想散射点, 则在该距离单元, 回波信号的时域形式可写为

$$g_n(u, \Phi_e) = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k \exp\{j[2\pi f_k u + \phi_e(u)]\}, \quad (1)$$

¹ 1998-10-22 收到, 1999-01-31 定稿

其中 $u = 0, 1, \dots, M-1$; M 为回波个数; σ_k 为第 k 个散射点的反射率; $\Phi_e = [\phi_e(0) \phi_e(1) \dots \phi_e(M-1)]_{1 \times M}^T$ 为干扰相位向量, 它对各距离单元具有相同的形式.

进行 DFT 后, 得到该距离单元信号的频域形式, 即横向像, 记为

$$G_{m,n}(\Phi_e) = G_n(m, \Phi_e) = \text{DFT}_u[g_n(u, \Phi_e)] = a_n(m) * h(m), \quad (2)$$

其中 $h(m) = \text{DFT}_u[\exp(j\phi_e(u))]$ 为频域干扰相位; $a_n(m) = \text{DFT}_u\left[\sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k \exp(j2\pi f_k u)\right]$ 为信号的频域形式, 即无干扰的横向像; $*$ 为卷积. 可见, 由于干扰相位的引入, 其频域形式与原图像横向卷积, 使原图像展宽, 模糊. 定义回波信号的总能量为

$$E_0 = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |G_{m,n}(\Phi_e)|^2, \quad (3)$$

其中 N 为纵向距离单元个数.

我们知道, 干扰相位 Φ_e 的引入并不改变信号的总能量, 它仅改变原图像在横向上的能量分布, 即所谓散焦. 因而, 人们直观地想到可采用各种图像评价函数来衡量图像能量的聚散程度, 进而优化补偿相位. 从现有文献报道来看, 图像评价函数可分为熵函数类和对比度类. 本文比较研究以下四种较典型的图像评价函数.

最小 Shannon 熵准则 [5,6]:

$$c_1 = - \sum_m \sum_n I_{m,n} \ln I_{m,n}. \quad (4)$$

最小指数熵准则 [7]:

$$c_2 = \sum_m \sum_n I_{m,n} \exp(1 - I_{m,n}). \quad (5)$$

能量对比度最大准则 [8]:

$$c_3 = - \sum_m \sum_n I_{m,n}^2. \quad (6)$$

幅度最大准则 [8]:

$$c_4 = - \max(I_{m,n}). \quad (7)$$

(4)-(7) 式中, $m = 0, 1, \dots, M-1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, $I_{m,n}$ 对应能量归一化后的目标散射点强度在空域的二维分布, 即 SAR/ISAR 像.

我们的目的就是基于以上评价函数估计干扰相位, 使经相位补偿后的图像具有最小的评价函数值. 即

$$I_{m,n}(\Phi) = \frac{1}{E_0} \left| \sum_{u=0}^{M-1} g_n(u, \Phi_e) \exp[-j\phi(u)] \exp\left(-j\frac{2\pi}{M}mu\right) \right|^2, \quad (8)$$

$$\hat{\Phi}_e = \arg \min_{\Phi} \{c[I_{m,n}(\Phi)]\}. \quad (9)$$

其中 $\Phi = [\phi(0) \phi(1) \dots \phi(M-1)]_{1 \times M}^T$, $\phi(0) = 0$, $\phi(u) \in [-\pi \pi]$, $u = 1, 2, \dots, M-1$, 为补偿相位; c 为图像评价函数; $\hat{\Phi}_e$ 为干扰相位的估计值.

由 (9) 式定义, $\hat{\Phi}_e$ 是使评价函数 c 获得最小值的补偿相位. (9) 式中共有 $M - 1$ 个优化参数. 当然, 若干扰相位 Φ_e 为低阶形式时, 我们可采用如文献 [5, 8] 中的方法, 即用多项式对误差相位进行逼近, 从而优化各阶系数以减小估计参数个数. 这里, 我们不考虑干扰相位的具体形式, 以便使这种模型更具有普遍性, 它适合白噪声在内的任何形式的干扰相位.

3 逐级逼近算法

由前一节分析可知, (9) 式是一个 $M - 1$ 维的非线性优化问题. M 在实际问题中代表了回波的个数, 而成一幅 SAR/ISAR 像通常都需要上百个回波, 因此, 解空间的维数将十分高. 直接在如此高维数的解空间中进行最优解搜索, 计算量非常巨大. 我们在此提出一种基于逐级逼近思想以寻求最优解的优化算法.

该算法的主要步骤为

(1) 赋初值 $i = 1, \Delta\theta_1 = \pi, \hat{\Phi}_e = 0_{M \times 1}$, 容限 Tolerance1, Tolerance2.

(2) 在时域上估计当前采样点的干扰相位.

当前采样点共有三个估计相位候选值, 即 $\phi_1(u) = -\Delta\theta_i, \phi_2(u) = 0, \phi_3(u) = \Delta\theta_i, i$ 为当前逼近级. 其余采样点相位不变, 按 (8) 式分别计算按三种选项得到的图像 $I_{m,n}$, 并根据给定图像准则, 计算相应评价函数值 s_1, s_2, s_3 . 选取其中最小的对应的候选相位 $\phi_L(u), L = 1, 2, 3$ 为正确估计值.

补偿该采样点相位

$$g_n(u, \hat{\Phi}_e) \leftarrow g_n(u, \hat{\Phi}_e) \exp[-j\phi_L(u)];$$

更新该采样点的干扰相位的估计值

$$\hat{\phi}_e(u) \leftarrow \hat{\phi}_e(u) + \phi_L(u);$$

依次对每个采样点进行计算, 即 $u = 1, 2, \dots, M - 1$, 完成一次循环.

注: s_2 实际不必计算, 本次 s_2 可根据上次的 s_1, s_2, s_3 三者最小值获得.

(3) 循环结束后, 计算当前评价函数值 s_{new} 与本次循环前的评价函数值 s_{old} 的相对误差 $D_1 = |(s_{\text{old}} - s_{\text{new}})/s_{\text{old}}|$. 若 $D_1 < \text{Tolerance1}$, 则进入第 (4) 步; 否则返回到第 (2) 步再循环一次.

(4) 计算当前级评价函数值 s^i 与上一级评价函数值 s^{i-1} 的相对误差 $D_2 = |(s^{i-1} - s^i)/s^{i-1}|$, 若 $D_2 < \text{Tolerance2}$, 则到第 (5) 步, 结束计算; 否则 $i \leftarrow i + 1$, 改变相位补偿精度 $\Delta\theta_i = \Delta\theta_{i-1}/2$, 回到第 (2) 步, 进入下一级计算.

(5) 得到干扰相位估计值 $\hat{\Phi}_e$, 结束算法.

图 1 给出了该算法的流程图.

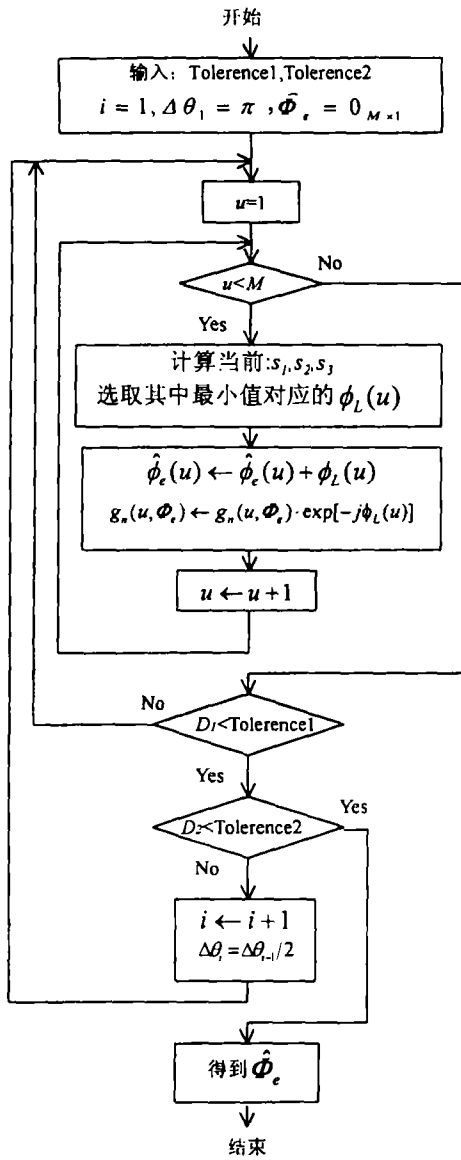


图 1 逐级逼近算法流程图

剩余相位误差的方差，按均匀分布计算为

$$\text{Var}(\Delta\Phi_e) = \pi^2 / (3 \cdot 4^i). \tag{12}$$

4 仿真和实例

本节主要基于不同图像评价函数，采用逐级逼近算法，对仿真和实测数据进行计算，以衡量逐级逼近算法的性能和各图像评价函数的合理性。计算中，我们均取 $\text{Tolerance1} = \text{Tolerance2} = 10^{-4}$ 。

在设计该算法时，我们主要考虑了以下几点：

(1) 逐级逼近的思想。由步骤 (4) 可见，因 $\Delta\theta_1 = \pi$ ，则第 i 级的补偿精度为 $\Delta\theta_i = \pi/2^{i-1}$ 。可见补偿精度是逐级增高的，这样能使算法向全局最优解逼近，避免优化过早陷入局部最小点。同时也便于我们控制估计值的精度范围。

(2) 步骤 (2) 中，确保了算法向评价函数值减小的方向搜寻，从而保证最终成像质量在给定的评价函数下，不会劣于优化前的水平。

(3) 步骤 (3) 中，采用相对误差 D_1 控制，目的是使在当前级条件下，尽量逼近最优解。因为我们对回波相位是依次调整的，仅一次循环，通常不能达到本级的最优逼近。同时，本级对最优解的精确估计，也减轻了下一级的搜索负担。

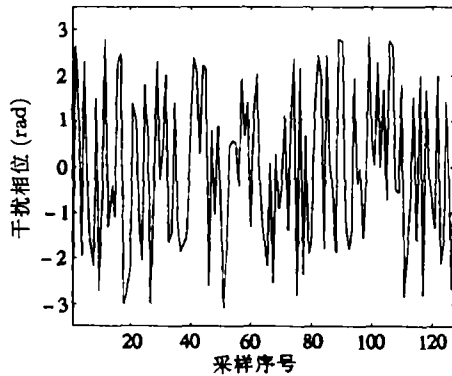
(4) 估计与补偿同时进行，当获得估计的干扰相位的同时，我们也得到了根据它补偿后的聚焦像。

因为逐级逼近算法在完成 i 级计算后，补偿精度达到

$$\Delta\theta_i = \pi/2^{i-1}. \tag{10}$$

所以理想情况下，最大剩余相位误差为

$$\Delta\phi_e = \Delta\theta_i/2 = \pi/2^i. \tag{11}$$

图 2 $[-\pi \pi]$ 均匀分布白噪声干扰相位序列

4.1 理想单目标情况

我们考虑横向距离单元上仅有一个理想散射点, 即单频率分量的情况. 采用一维图像评价函数准则. 图 2 为仿真实验中所加的 $[-\pi \pi]$ 均匀分布的白噪声干扰相位序列. 需要说明一点的是, 采用图像准则优化时, 最终图像相对于原图像可能在横向方位上有所偏移, 这实际上等价于有一线性相位, 它并不影响图像质量. 计算时, 为对比方便, 我们都将目标位置移至零频附近.

表 1 列出了采用逐级逼近算法, 基于四种评价函数对理想单目标 4 级补偿后, 剩余相位误差的结果 (10 次实验的统计平均).

表 1

| 图像准则 | c_1 | c_2 | c_3 | c_4 |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 最大剩余误差 $\Delta\phi_e(\text{rad})$ | 0.2073 | 0.1987 | 0.1987 | 0.1985 |
| 剩余误差方差 $\text{Var}(\Delta\phi_e)$ | 0.0123 | 0.0122 | 0.0122 | 0.0125 |

采用 (11) 式计算得到 4 级补偿后的最大剩余误差理论值为

$$\Delta\phi_e = \pi/2^4 = 0.1963(\text{Rad}).$$

根据 (12) 式理论剩余误差方差为

$$\text{Var}(\Delta\phi_e) = \pi^2/(3 \cdot 4^4) = 0.0129.$$

与表内结果比较, 理论值与实际计算值符合得很好, 这表明了逐级逼近算法的有效性, 同时, 也表明对于单目标情况, 四种准则均是可行的.

4.2 理想多目标情况

实际中, 单目标情况非常少见, 大量存在的是同一距离单元横向上分布多个目标的情况. 这时, 我们若仅采用一维图像评价函数对一路横向信号进行优化, 则有可能导致错误的优化结果. 为直观说明这个问题, 我们考虑横向上有两个目标的情况. 不失一般性, 令

$$g(u) = a_0 + a_1 \exp[j(2\pi f_1 u + \varphi_0)] = a(u) \exp[j\varphi(u)], \quad (13)$$

经 DFT 后, 得到该信号正确的一维横向像, 该像的评价函数值记为 s_c . 同时令

$$\tilde{g}(u) = g(u) \exp[-j\varphi(u)] = a(u). \quad (14)$$

(13), (14) 式中 $u = 0, 1, \dots, M-1$. (14) 式中 $\tilde{g}(u)$ 为 $g(u)$ 经错误的相位补偿后, 得到了 $g(u)$ 的模值 $a(u)$. 经 DFT 后, 得到该信号错误的横向一维像, 该图像的评价函数值记为 s_f . 通过计算发现, 对于所给四种准则, 在很多情况下均出现 $s_f < s_c$. 图 3 给出了 $f_1 = 1/8, M = 128$ 的四种图像评价函数值计算曲线. 图中横坐标为两信号的相对幅值比, 纵

坐标为 $s_f - s_c$ 。由图可见, 除 c_1 准则小部分外, 其余部分与另三种准则均为 $s_f - s_c < 0$, 即 $s_f < s_c$ 。也就是说, 经错误相位补偿后的像反而比正确的像“更聚焦”。在多于两目标情况下, 也存在这一问题, 找到反例并不困难。

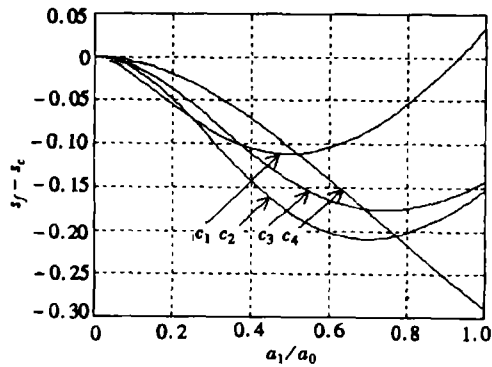


图3 两目标时, 各准则错判曲线
 $f_1 = 0.125\text{Hz}$

幸运的是, 在实际问题中, 不同距离单元的干扰相位虽然相同, 但各路散射点横向分布却总会存在差异。如果我们同时对多路距离单元进行优化, 即采用二维图像评价函数, 则在进行相位优化过程中, 某一路的“更聚焦”必以另一路的散焦为代价, 因此各路信号彼此间就能形成制约, 较好防止了错误优化结果的发生。同时, 由于实际成像都是二维的, 采用二维图像评价函数从本质意义上看也更为合理。

图4(a)为两路无相位干扰的目标横向像, 第一路对应的信号时域形式为

$$g_1(u) = \left[\sum_{k=0}^4 \sigma_k \exp(j2\pi f_k u) \right] \exp[j\phi_e(u)],$$

其中 $\sigma_0 = 0.2, \sigma_1 = 1, \sigma_2 = 0.8, \sigma_3 = 0.1, \sigma_4 = 0.2$; $f_0 = -13/64, f_1 = -3/64, f_2 = 5/64, f_3 = 5/32, f_4 = 1/4$ 。

第二路对应的信号时域形式为

$$g_2(u) = \left[\sum_{k=0}^5 \sigma_k \exp(j2\pi f_k u) \right] \exp[j\phi_e(u)],$$

其中 $\sigma_0 = 0.2, \sigma_1 = 0.6, \sigma_2 = 0.8, \sigma_3 = 0.8, \sigma_4 = 0.1, \sigma_5 = 0.1$; $f_0 = -39/128, f_1 = -25/128, f_2 = -3/64, f_3 = 3/64, f_4 = 5/32, f_5 = 1/4$ 。 $\phi_e(u)$ 为干扰相位序列, $u = 0, 1, \dots, 127$ 。

在第一路信号中, 包含了两个强散射点和三个弱散射点。在第二路信号中, 包含了三个强散射点和三个弱散射点。对信号施加了如图2所示的干扰相位后, 得到的横向像如图4(b)所示。我们采用逐级逼近算法, 基于二维图像准则对施加干扰相位后的信号 $g_1(u)$ 和 $g_2(u)$ 同时进行优化。图4(c)为在 c_1 准则下的计算结果。由图可见, 它给出了信号的正确形式。采用同样方法, c_2, c_3, c_4 的计算结果如图4(d), 4(e), 4(f)所示。由图可见, c_2, c_3 效果相似, 有较多低幅度伪目标出现, c_4 虽然也能聚焦, 但不能反映目标的真实情况。

从仿真结果来看: 在多目标情况下, 二维 c_1 准则能精确对干扰相位进行估计, 从而保证目标正确聚焦。二维 c_2, c_3 准则效果不及 c_1 , 而二维 c_4 准则则不能保证对目标正确聚焦。

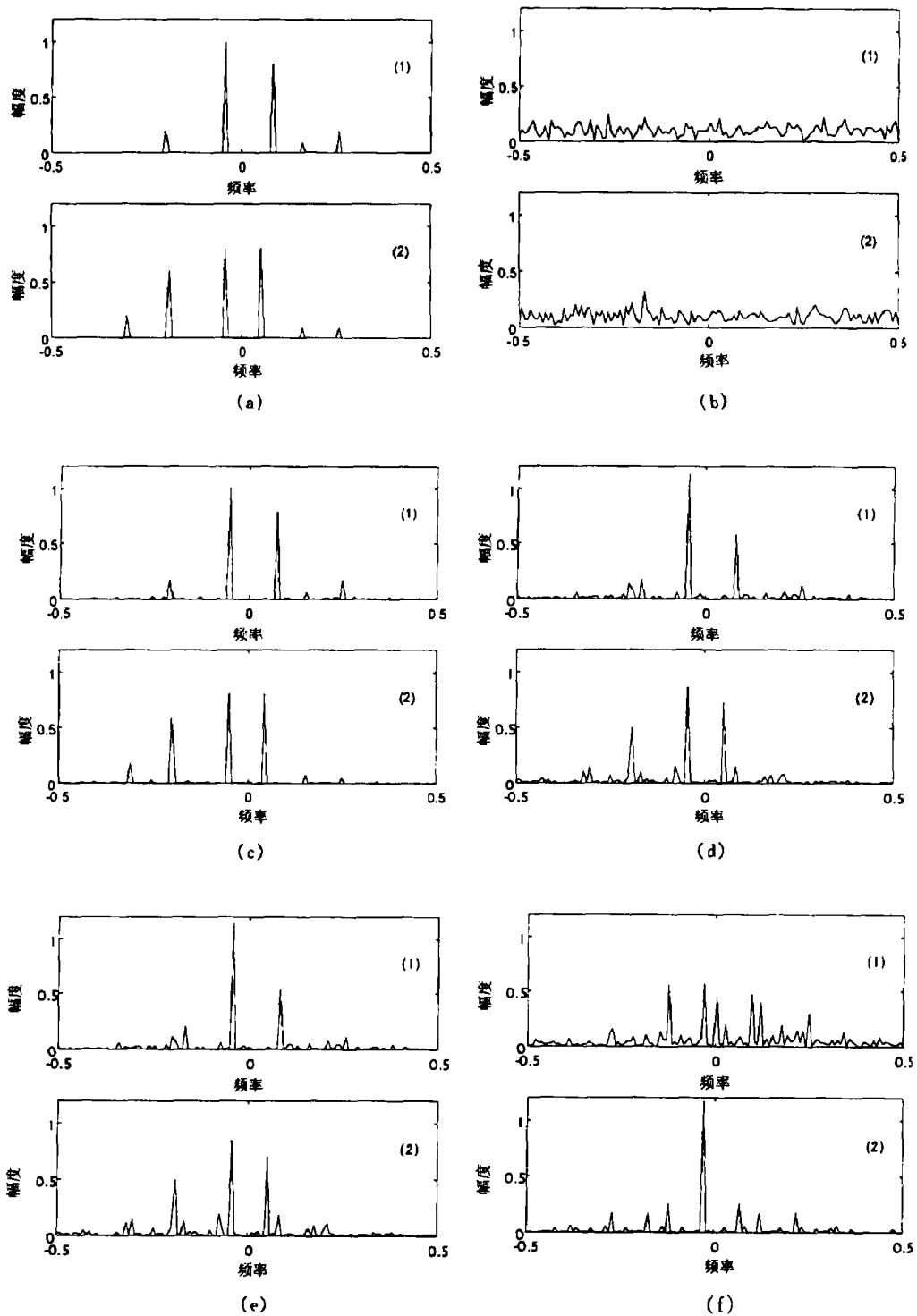


图 4 仿真结果

(a) 无干扰相位的像, (b) 施加白噪声干扰相位后的像, (c)-(f) 分别对应采用逐级逼近算法, 基于 c_1, c_2, c_3, c_4 准则的成像结果

4.3 实测数据的处理结果

本节，我们以一段实测 ISAR 数据来检测新方法的效果。目标为离雷达约 15km 处飞行的 Yark-42 飞机。观测时间为 7.68s。飞机俯视图如图 5 所示。该雷达系统对目标跟踪时，只能大概估计目标的距离范围，而不能保证对目标精确跟踪到同一点。因此，不同脉冲周期，目标一维距离像随机出现在距离观测窗的不同位置。成像前，我们首先要将各距离像包络对齐，以保证同一散射点始终位于相同的距离单元内。图 6 是包络已对齐的距离像。然后，再对每个回波的初相进行补偿。因系统误差，这里需补偿的是随机的干扰相位。本文根据所有距离像的和包络，选取了 20 个最大峰值点对应的距离单元路数进行二维图像准则优化，如图 7 所示。

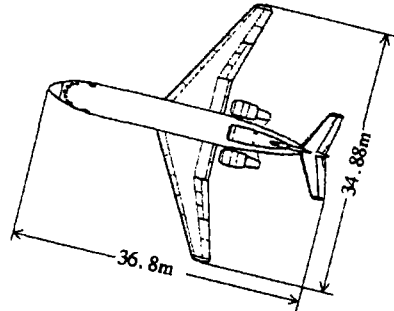


图 5 Yark-42 平面图

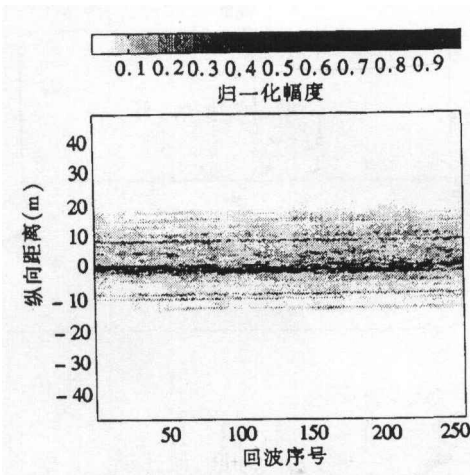


图 6 包络对齐后的距离像

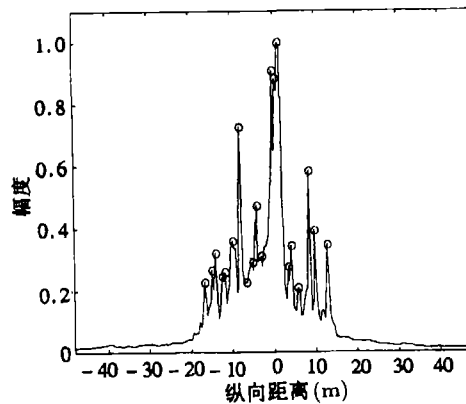


图 7 根据和包络选取 20 个最大峰值点 (图中加圈处) 对应的路数进行计算

图 8 为采用逐级逼近算法，基于 c_1 准则的成像结果。图中具体给出了算法中 0, 1, 2, 3, 9 级的补偿结果。各级补偿精度为：图 8(a)，第 0 级，无任何补偿；图 8(b)，第 1 级，补偿精度为 π ；图 8(c)，第 2 级，补偿精度为 $\pi/2$ ；图 8(d)，第 3 级，补偿精度为 $\pi/4$ ；图 8(e)，第 9 级，补偿精度为 $\pi/256$ 。图 9(a)–9(c) 是同样条件下，基于 c_2, c_3, c_4 准则的成像结果。各图的门限均为该图中最大值的 -27dB 。

由图 8 图 9 可见，采用逐级逼近算法，基于 c_1 准则，我们得到了高质量的像。对比图 5，图 8(e) 中目标的主要特征均能清晰辨认。 c_2, c_3 准则结果相似，目标轮廓尚可辨认，但细节模糊。 c_4 准则效果很差，目标整体像已非常模糊，难以辨认。各准则的性能结果与仿真的结论基本相同。仿真和实测数据都表明 c_1 准则最好，它在不需目标和干扰相位的任何先验信息下，能确保对干扰相位精确估计，从而获得正确聚焦的像。

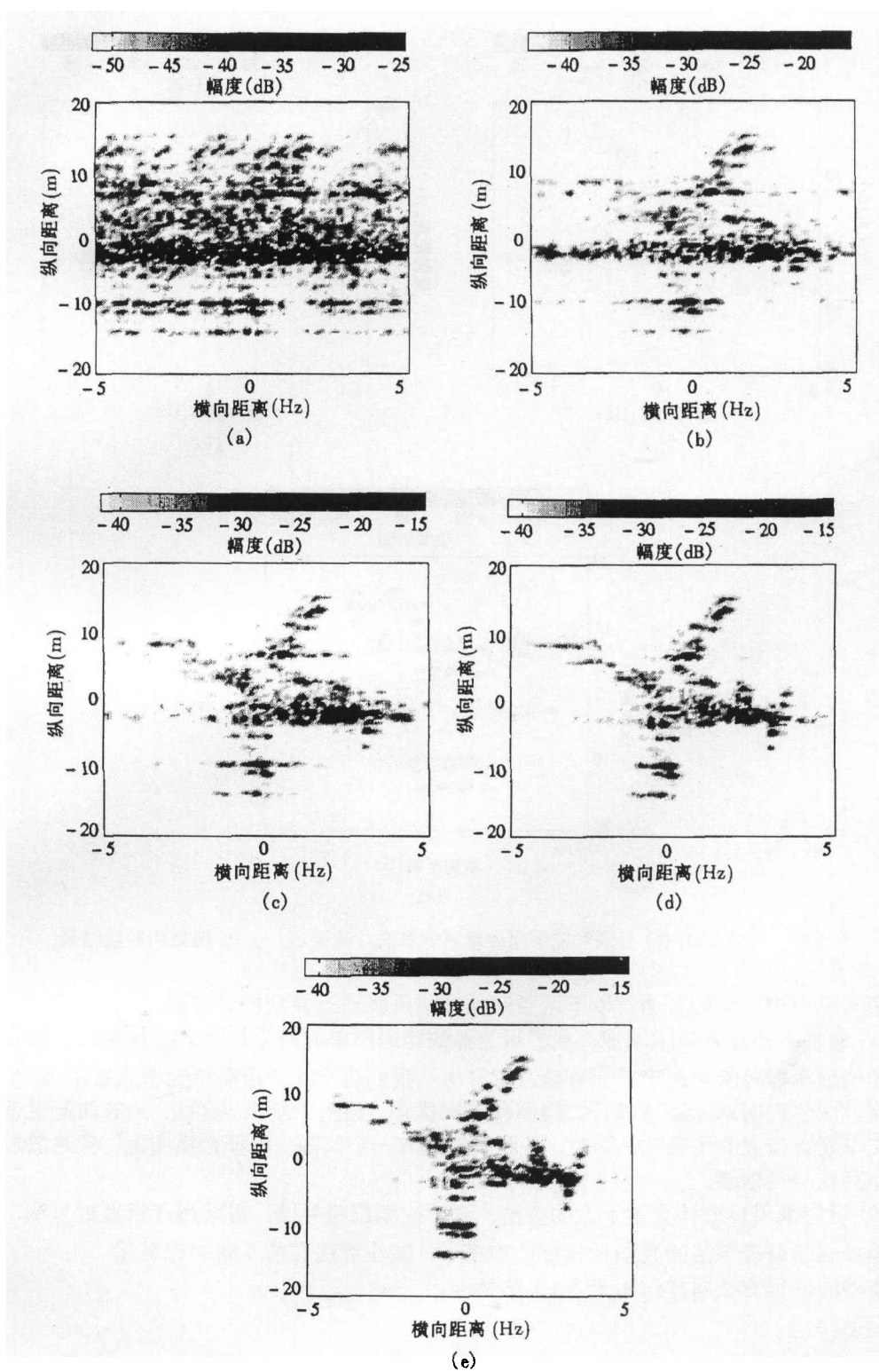


图 8 基于 c_1 准则，采用逐级逼近算法对实测 ISAR 数据的相位补偿结果
图中 (a)–(e) 分别对应算法中 0, 1, 2, 3, 9 级的补偿结果

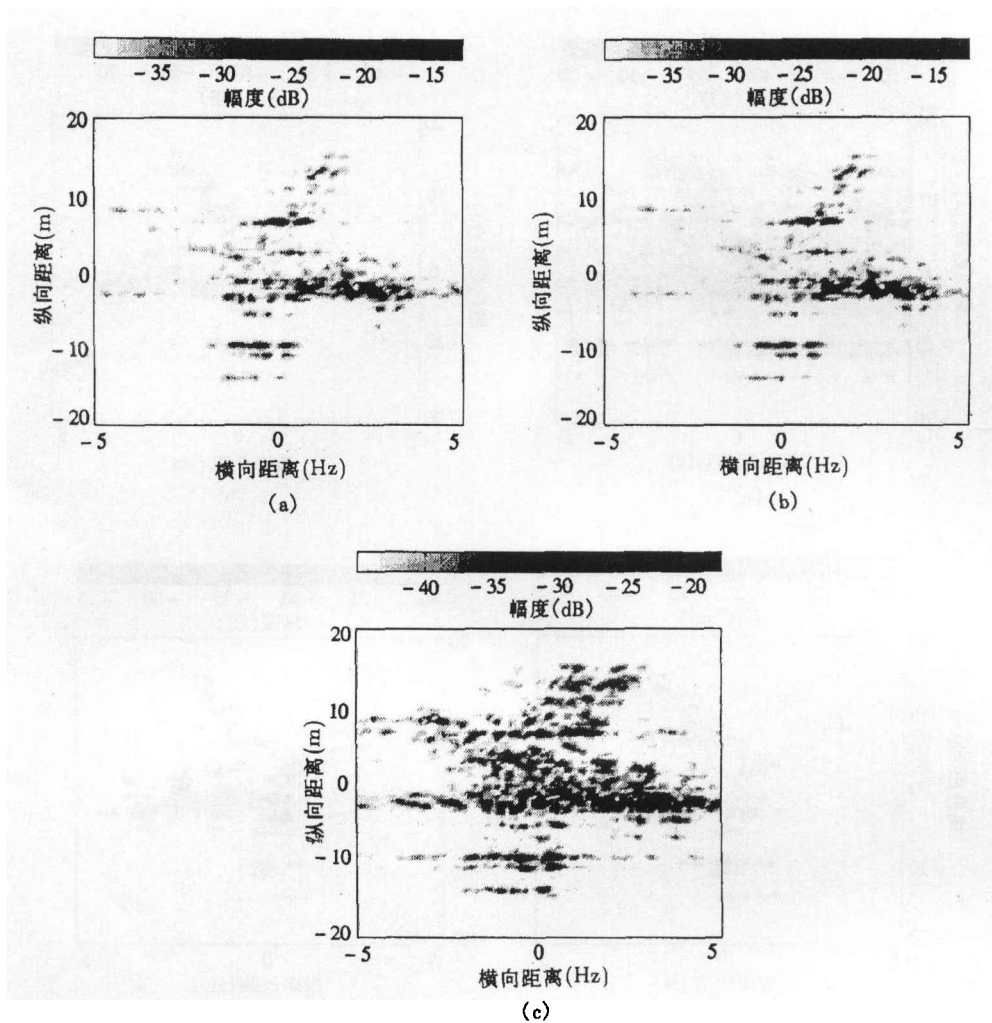


图9 (a), (b), (c) 分别对应采用逐级逼近算法, 基于 c_2 , c_3 , c_4 准则的补偿结果

实际应用中, 我们可通过以下两条途径减小逐级逼近算法的计算量。

(1) 通常不必计算整幅图像, 我们可选择数路距离单元对干扰相位进行估计, 得到估计干扰相位后, 再对所有距离单元补偿。本例中, 我们从 256 个距离单元中选取了 20 个最大峰值点对应的距离单元路数进行二维图像准则优化。如图 7 所示。这样, 一方面能保证所选的距离单元有较大的信噪比, 同时, 各距离单元有一定间隔, 保证在横向上, 各路散射点横向分布存在一定差异。

(2) 可先采用传统计算量不大的方法, 对干扰相位粗补偿, 再采用逐级逼近算法。这样能在确保逐级逼近算法的高估计精度的前提下, 减小算法在前几级的计算量。

本例的处理方法同样适用于 SAR 的情况。

5 结 论

本文比较研究了四种具有代表性的图像准则在相位补偿技术中的应用。本文提出采用逐级逼近优化算法, 对高维解空间进行搜索, 该算法为非参数估计法, 它不对干扰相位的形

式有要求, 因而可估计任何形式的干扰相位并加以补偿。仿真和实测数据的计算结果表明, 最小 Shannon 熵准则是一种性态优良的图像评价函数, 基于该评价函数, 采用逐级逼近优化算法就能对干扰相位精确估计。本文的工作进一步肯定了图像评价函数在相位补偿技术中应用的合理性。有关图像评价函数准则的具体理论证明以及寻求更加快速有效的优化算法是我们继续研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Ausherman D A, *et al.* Developments in radar imaging. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1984, AES-20(4): 363-400.
- [2] Jain A, Patel I. SAR/ISAR imaging of a nonuniformly rotating target. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1992, AES-28(1): 317-321.
- [3] Werness S, *et al.* Moving target imaging algorithm for SAR data. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1990, AES-26(1): 57-67.
- [4] Wahl D E, *et al.* Phase gradient autofocus—A robust tool for high resolution SAR phase correction. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1994, AES-30(3): 827-835.
- [5] Benjamin C F, Ugarte A. Refinement of range-Doppler imagery by feedback control. SPIE Vol.1960 Automatic Object Recognition III (36-46).
- [6] Benjamin C F, *et al.* Choise of an entropy-like function for range-Doppler processing. SPIE Vol.1960 Automatic object Recognition III (47-56).
- [7] Pal N R, Pai S K. Entropy: A new definition and its application. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics. 1991, SMC-21(5): 1260-1270.
- [8] Berizzi F, Cosini G. Autofocuing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimisation. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1996, AES-32(3): 1185-1191.

PHASE COMPENSATION OF SAR/ISAR USING IMAGE COST FUNCTIONS

Li Xi Ni Jinlin* Liu Guosui Luo Yi Gu Hong Su Weimin

(Dept. of Electron. Eng., Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

*(Naning Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013)

Abstract Phase compensation is a critical step of Synthetic Aperture Radar(SAR) and Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) imaging technique. This paper proposes a progressive approach algorithm based on image cost function to compensate the random phase error in SAR/ISAR imagery. Four kinds of image cost function are discussed. The comparison of the proposed function is performed by analyzing the simulation and experimental results. It is found out that Shannon entropy function is the best one. Based on it, the interference phase in unknown signal can be estimated accurately.

Key words SAR/ISAR image, Phase compensation, Image cost function

李 玺: 男, 1972 年生, 博士生, 从事雷达成像和信号处理方面的研究工作。

倪晋麟: 男, 1961 年生, 研究员, 主要从事雷达总体、阵列及雷达成像技术研究。

刘国岁: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事噪声雷达理论与应用研究。近年来从事“随机信号理论与应用”, “神经网络与模糊系统”和“近代信号处理”等项研究。

罗 毅: 男, 1964 年生, 博士生, 从事雷达信号处理方面的研究工作。