

DOI: 10.7652/xjtuxb201412017

采用子孔径分割的逆合成孔径雷达成像包络对齐方法

董祺, 张磊, 徐刚, 邢孟道
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对低信噪比情况下难以对逆合成孔径雷达(ISAR)目标回波进行精确包络对齐的问题,提出了一种采用子孔径分割的逆合成孔径雷达成像包络对齐方法。该方法首先将全孔径划分为若干个相同长度的子孔径,并将每个子孔径的包络误差建模为线性,然后利用最小熵准则对子孔径包络误差进行估计,最后通过高阶多项式拟合实现对全孔径包络误差的精确估计。该方法具有更好的抗噪性和更高的估计精度,能对 ISAR 目标回波数据进行较为精确的包络误差补偿。仿真结果表明,在-5 dB 的低输入信噪比下,相对于传统方法,该方法成像结果的熵值降低了约 0.6,说明取得了更好的包络对齐结果。

关键词: 逆合成孔径雷达;低信噪比;包络对齐;子孔径;高阶多项式
中图分类号: TN959.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)12-0107-06

Envelope Alignment Algorithm for Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Based on Splitting Sub-Apertures

DONG Qi, ZHANG Lei, XU Gang, XING Mengdao
(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel envelope alignment algorithm based on splitting sub-apertures is proposed to improve the problem that it is hard for the envelope alignment to be accurately carried out under the condition of low signal to noise ratio (SNR) in inverse synthetic aperture radar (ISAR). The full-aperture is divided into several sub-apertures with same length, and a linear model is built for envelope error of each sub-aperture. The minimum entropy criterion is used to estimate the envelope error of each sub-aperture. Then a high-order polynomial is used to fit the full-aperture envelope errors, and estimations of sub-apertures are used to successfully achieve the final envelope alignment precisely. Simulation results and comparisons with the traditional envelope alignment algorithms show that the proposed method has advantages in envelope alignment, and the entropy of imaging results reduces by about 0.6 when the input SNR is as severe as -5 dB.

Keywords: inverse synthetic aperture radar; low signal to noise ratio; envelope alignment; sub-aperture; high-order polynomial

逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)的关键技术包括平动补偿和转台成像等,其中平动补偿又分为包络误差补偿和相位误差补偿 2 个步骤。包络误差补偿一般利用包络对齐技术实现。精确的包络对齐是相位误差补偿的基础,又是对目标进行高分辨成像的前提条件。因此,包络对齐技术已成为 ISAR 成像领域研究的热点之一^[1-2]。

1980 年代初期由 Chen 等提出包络对齐的互相关法^[3]以来,国内外学者又相继提出了多种 ISAR

的包络对齐算法,大致可分为2类:第1类是最大相关处理方法^[3-4],此类方法运用相邻距离像的相关性估计目标回波的包络徙动量,然后进行包络对齐处理,但其具有较强的噪声敏感性;第2类是整体最优准则处理方法^[5-6],通常以平均距离像的熵最小或对比度最大为准则,通过优化算法求解各次回波间的包络偏移来进行包络对齐处理,此类方法利用了整体回波距离像的相关性信息,对噪声和散射起伏都具有较好的抑制作用,但一般需对全孔径包络误差进行搜索,相对于第1类方法运算量增大。实质上,2类包络对齐算法都是基于回波数据的相关性进行处理,在低信噪比条件下存在一定的缺陷。由于ISAR目标成像需要利用上百次回波(总转角一般要求 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$),所以强噪声的存在会产生较大的包络误差积累,造成包络漂移,实录数据还会产生回波突跳的现象,即突然有个别回波的距离像相对之前的回波有明显变化,然后又恢复正常,造成包络突跳^[6]。强噪声的影响和回波信号突跳都会影响传统算法的包络对齐精度,从而影响最终的ISAR成像。

因为传统包络对齐方法只着眼于回波数据的相关性,而没有利用观测目标的运动特性,所以易受到强噪声和回波信号突跳的影响,具有较强的噪声敏感性。在实际ISAR成像中,一定的观测时间内,目标的平动一般较为平稳,回波信号的包络误差调制也是平稳连续变化的,而且包络对齐的精度仅要求在距离分辨单元数量级(一般在米级或者分米级),所以在包络对齐处理中,根据上述平稳运动特性,将包络误差建模为慢时间的高阶多项式形式,就能够有效克服低信噪比情况下包络误差估计的突跳问题。

针对传统包络对齐方法的噪声敏感性,本文提出一种采用子孔径分割的ISAR包络对齐方法。区别于最大相关处理方法和整体最优准则的对齐方法,本文方法利用了观测目标连续平稳的运动特性,对于子孔径和全孔径包络误差分别进行线性和高阶多项式建模,在一定程度上抑制了包络突跳产生的影响;本文方法的包络误差求解运用了最小熵准则,能够实现对于子孔径包络误差较为精确的估计,有效提升包络对齐精度。

1 ISAR回波包络误差建模

对ISAR成像的研究通常是基于目标的转台模型,即对非合作目标进行平动补偿后,将目标的运动等效为相对雷达的匀速转动。图1给出了目标的运动分解模型。

图1中,目标由位置1到位置2的运动,可等效为先从位置1沿径向移动到位置3(平动部分),然后旋转 $\Delta\theta$ 角度(转动部分),再从位置3沿圆周移动到位置2(绕动部分)。其中,绕动部分不提供多普勒信息,在ISAR成像中可以忽略。所以目标相对雷达运动就可以分解为平动和转动2个部分。目标平动对应的各个散射点的多普勒完全相同,对雷达成像没有贡献,但会引起多普勒展宽,需要加以补偿^[5,7],以便进行后续的成像处理,而平动补偿的第1步就是包络对齐,这正是本文研究的内容。

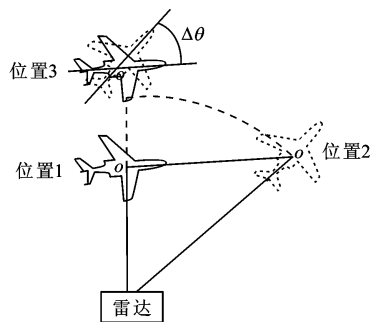


图1 ISAR中目标运动分解模型

假设雷达观测时间为 T ,在方位慢时间 t_m ($-T/2 \leq t_m \leq T/2$)时刻,目标上某一点 p 到雷达的瞬时距离表达式为

$$D_p(t_m) = R_0 + \Delta R(t_m) + x_p \sin \omega t_m + y_p \cos \omega t_m \quad (1)$$

式中: R_0 为目标与雷达间的初始距离; $\Delta R(t_m)$ 为目标平动引起的距离变化; (x_p, y_p) 为 p 点在成像平面的直角坐标; ω 为目标转动角速度。

在接收ISAR回波信号后,对其回波进行距离脉冲压缩处理,处理后的回波信号形式为^[8]

$$S(t_k, t_m) = \sum_p \sigma_p \text{sinc} \left[B \left(\hat{t} - \frac{2R_p(t_m)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi f_c R_p(t_m)}{c} \right] \quad (2)$$

式中: t_k 为快时间; B 为发射信号频谱宽度; σ_p 为目标上散射点的复散射系数; c 为光速; f_c 为雷达发射信号载频。回波信号中包含的 $\Delta R(t_m)$ 即为包络对齐处理中需要补偿的部分,补偿的精度会影响后续的ISAR成像。不精确的包络对齐将导致同一个目标的能量散布到相邻的几个距离单元,从而影响后续自聚焦处理的精度,造成图像在方位向散焦。

由于目标通常在观测时间内的运动轨迹连续并且较为平稳,且一般成像处理中只要求包络对齐精度达到 $1/2$ 个距离分辨单元^[10],所以采用高阶多项式近似包络误差函数就能够满足包络对齐所需精

度。因此,本文将包络误差进行高阶多项式建模,构造包络误差函数为

$$\Delta R(t_m) = \sum_{q=0}^Q a_q t_m^q \quad (3)$$

式中: Q 为包络误差拟合的阶数; q 为慢时间 t_m 的阶数, $q=1,2,\dots,Q$ 。 Q 值选取得越大,包络误差拟合的精度就越高,但会造成运算量增加,实际处理中需要依据包络对齐精度和运算时间要求合理选择 Q 值。

2 子孔径分割的 ISAR 包络误差求解

在进行 ISAR 二维高分辨成像特别是针对空间弱小目标的成像中,目标距离远、散射截面积小、存在空间杂波以及为了提升雷达抗截获能力需要发射低峰值功率的信号等原因,都将导致回波信噪比低^[9]。在这种强噪声条件下,运用最大相关准则的方法已经很难实现回波信号的包络对齐。虽然基于整体最优准则的方法(以最小熵算法为例)通常有比相关类方法更优越的噪声抑制能力,更适于低信噪比情况的 ISAR 成像,但其仍存在包络误差估计突跳的问题,因此有必要研究在低信噪比情况下如何有效进行精度较高且快速的包络对齐处理。

针对以上问题,本文提出了一种采用子孔径分割的 ISAR 包络对齐方法。该方法将全孔径观测均匀划分为若干个相同长度的子孔径,利用最小熵算法估计精度较高的优势,对各个子孔径进行包络误差估计,然后利用估计的子孔径包络误差进行全孔径包络误差的高阶多项式拟合。

2.1 包络误差求解

包络误差求解步骤如下。

(1)首先将全孔径时间分为 M 个子孔径,每个子孔径长度相同。当 M 足够大时,即每个子孔径的方位向采样时间足够小,近似认为动目标在这段时间内的速度不变,所以可将包络误差近似为线性,简化了子孔径的包络误差模型。分别对每个子孔径作线性拟合。采用最小熵准则对每个子孔径的线性系数进行搜索,得到线性系数估计向量,即为一阶包络误差导数向量

$$\xi = [\Delta R'_1, \Delta R'_2, \dots, \Delta R'_i, \dots, \Delta R'_{M-1}, \Delta R'_M]^T \quad (4)$$

式中: $\Delta R'_i$ 为第 i 个子孔径的一阶包络误差导数。

(2)对式(3)求导可以得到一阶包络误差导数为

$$\Delta R'(t_m) = \frac{\partial \Delta R(t_m)}{\partial t_m} = \sum_{q=1}^Q q a_q t_m^{q-1} \quad (5)$$

(3)用每个子孔径的中心时刻构造时间序列 $\alpha = [t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{M-1}, t_M]^T$, 则

$$\xi = \left[\frac{\partial \Delta R(t_1)}{\partial t_1}, \frac{\partial \Delta R(t_2)}{\partial t_2}, \dots, \frac{\partial \Delta R(t_M)}{\partial t_M} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 2t_1 & 3t_1^2 & \dots & Qt_1^{Q-1} \\ 1 & 2t_2 & 3t_2^2 & \dots & Qt_2^{Q-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 2t_M & 3t_M^2 & \dots & Qt_M^{Q-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_Q \end{bmatrix} = \Phi \beta \quad (6)$$

式中: $\beta = [a_1, a_2, \dots, a_Q]^T$ 为包络误差系数矩阵。

(4)对于 $\xi = \Phi \beta$ 形式的超定矩阵,此处采用最小二乘法实现对包络误差多项式系数 β 的估计

$$\hat{\beta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \xi \quad (7)$$

利用式(7)估计多项式系数需要 $(\Phi^T \Phi)$ 可逆,则至少需要 $M \geq Q$ 。

(5)将求得的多项式系数的估计结果 $\hat{\beta}$ 带入到式(3)中,得到包络误差的多项式估计形式 $\Delta \hat{R}(t_m)$ 。利用式(3)得到 N 个方位采样点对应的包络误差,对信号 $S(i, t_m)$ 的包络进行补偿。

经过一次高阶拟合处理后,包络形式更为平滑,可以减小子孔径的数量 M ,并且可根据补偿后的包络误差曲线的形状再次选取全孔径拟合阶数 Q 。由式(6)和(7)可知,子孔径数越多,能估计的包络误差阶数也越高,当减少子孔径数时,能估计的阶数也会降低。所以,要在满足 $M \geq Q$ 的条件下合理选取 Q 和 M 。重复执行上述 5 个步骤,直到包络误差估计精度达到实际 ISAR 成像工作的需求。本文方法的实施流程如图 2 所示。

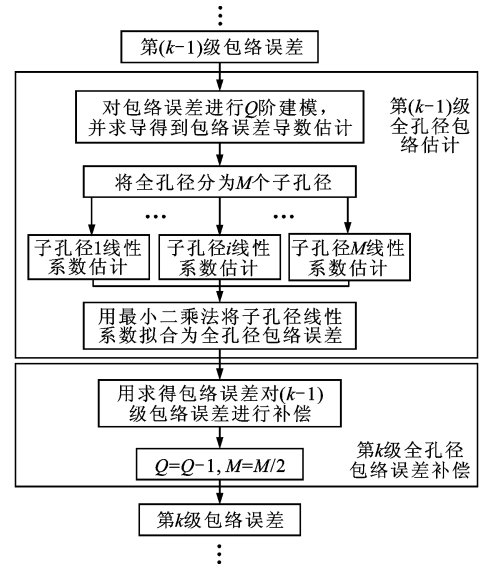


图 2 本文方法的实施流程

2.2 参数选择

2.2.1 参数 M 的选择 初始子孔径数选为 M , 选取原则是使得每个子孔径的包络误差小于 $1/2$ 距离单元^[10]。采用文献[11]中所述的自适应参数选取

的思想对参数 M 进行选取,具体操作如下。

(1)用最小熵准则对每个子孔径包络误差进行线性拟合,得到第 p 个子孔径包络误差为 $\Delta R_p(t_m)$, $(2p-2)T/(2M)-T/2 \leq t_m \leq (2p-1)T/(2M)-T/2$ 。

(2)将子孔径数增加 1 倍,则原来的第 p 个子孔径被分成 2 个相等的子孔径,对应的包络误差为

$$\Delta R_p^2(t_m) = \begin{cases} \Delta R_{p1}(t_m), & (2p-2)\frac{T}{2M} - \frac{T}{2} \leq t_m \leq (2p-1)\frac{T}{2M} - \frac{T}{2} \\ \Delta R_{p2}(t_m), & (2p-1)\frac{T}{2M} - \frac{T}{2} \leq t_m \leq 2p\frac{T}{2M} - \frac{T}{2} \end{cases} \quad (8)$$

(3)在包络对齐中,要求包络对齐精度小于 $1/2$ 距离单元^[10]。若 $\Delta R_p(t_m)$ 和 $\Delta R_p^2(t_m)$ 差异小于 $1/2$ 距离单元^[10],即

$$\begin{aligned} & |\max(\Delta R_p(t_m) - \Delta R_p^2(t_m)) - \\ & \min(\Delta R_p(t_m) - \Delta R_p^2(t_m))| \leq \\ & \frac{c}{4F_s}(2p-2)\frac{T}{2M} - \frac{T}{2} \leq t_m \leq 2p\frac{T}{2M} - \frac{T}{2} \quad (9) \end{aligned}$$

式中 F_s 为距离向采样频率,那么可以认为 2 次包络对齐结果一致。此时 M 的大小可以满足要求,不需要进一步增加初始子孔径数。

(4)若 M 不满足要求,则将初始子孔径数增加 1 倍,重复步骤(1)~(3),直到满足式(8)、式(9)。

参数 M 的选择过程如图 3 所示。在参数 M 的选择过程中,其运算主要包括熵值计算和逆傅里叶变换,其中逆傅里叶变换的运算量是组成整体运算量的最主要部分,所以参数 M 选择过程的运算量为 $O(N_a N_r \ln N_r)$,其中 N_a 和 N_r 分别是每个子孔径的方位采样点数和距离采样点数。

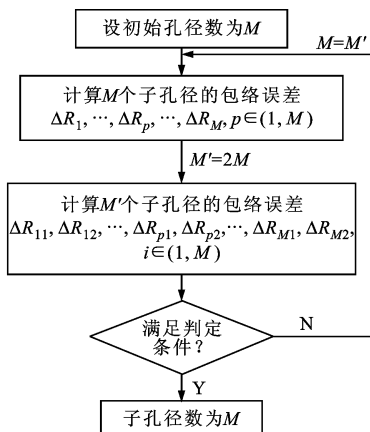


图3 参数 M 的选择流程图

2.2.2 参数 Q 的选择 合理选取了初始子孔径数

M 后,需要确定初始包络误差阶数 Q 。由于 ISAR 成像包络误差精度要求为 $1/2$ 距离单元^[10],而包络误差高阶部分的系数一般都非常小,因此对包络对齐质量的影响可以忽略。根据上述性质合理选择 Q 值,具体操作如下:

(1)选取初始包络误差阶数为 Q ,求得 Q 阶包络误差系数 $[a_1, a_2, \dots, a_Q]^T$,代入式(3)得到第 1 次全孔径包络误差 $\Delta R^{(1)}(t_m)$, $-T/2 \leq t_m \leq T/2$;

(2)将阶数增加 1,求得 $(Q+1)$ 阶包络误差系数 $[a_1, a_2, \dots, a_{Q+1}]^T$,代入式(3)得到第 2 次全孔径包络误差 $\Delta R^{(2)}(t_m)$, $-T/2 \leq t_m \leq T/2$;

(3)若 $\Delta R^{(1)}(t_m)$ 和 $\Delta R^{(2)}(t_m)$ 满足式(10),使得相邻 2 次全孔径包络补偿的差异小于 $1/2$ 距离单元^[10],则 Q 已经满足 ISAR 成像精度要求

$$|\max(\Delta R^{(1)}(t_m) - \Delta R^{(2)}(t_m)) - \min(\Delta R^{(1)}(t_m) - \Delta R^{(2)}(t_m))| \leq \frac{c}{4F_s} \quad (10)$$

(4)若当前 Q 值不满足要求,则将初始包络误差阶数加 1,重复步骤(1)~(3),直到满足式(10),认为更高阶的包络误差分量已经足够小,不会影响成像质量。

参数 Q 的选择过程如图 4 所示。运用 2.1 节所述内容求解包络误差系数时,运算量主要是由式(7)中矩阵求逆构成的,所以参数 Q 选择过程的运算量是 $O(Q^3)$ 。

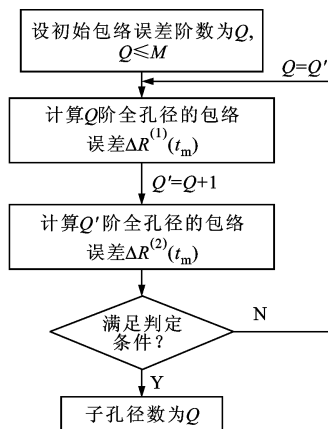


图4 参数 Q 选择流程图

3 实测数据处理结果与分析

下面对 ISAR 实测数据进行仿真实验,通过比较本文方法和基于平均距离像的相关包络对齐方法(GRA)^[12]以及基于整体最优准则的最小熵方法(MEA)^[13]的处理结果,验证本文方法的有效性。

ISAR 数据相对较小,在本文仿真实验中,以 Yak-

42 飞机的实测数据为例,其中心频率为 5.52 GHz,发射信号带宽为 400 MHz,脉冲重复频率为 100 Hz。该数据由 256 次回波组成,每次回波有 256 个距离离散采样。在实测数据中加入目标平动对应的距离误差调制,其中包络误差曲线如图 5a 中实线所示。

首先利用 GRA 方法、MEA 方法以及本文方法对实验数据进行包络对齐,为了保证包络对齐精度,在进行相关处理时对数据进行 8 倍插值处理。为验证本文算法在低信噪比情况下的有效性,在回波数据中加入高斯噪声以降低回波数据的信噪比。通过一系列仿真实验,发现当信噪比为 -2 dB 时,2 种传统算法只能得到模糊的飞机成像结果,在更低的信噪比下,已经难以分辨飞机的包络。为便于进行对比,本仿真实验将信噪比设置为 -2 dB,其中信噪比定义为信号功率均值与噪声方差的比值。

分别采用本文方法、GRA 方法和 MEA 方法对包络误差进行估计,仿真结果如图 5 所示。由图 5 可见,2 种传统方法的包络误差估计包含大量突跳,携带能量较大的突跳很难用一般方法去除,严重影响 ISAR 的方位向成像,造成方位成像的模糊,而本文方法的拟合结果与包络误差标准曲线基本一致,曲线平滑无包络突跳现象,说明本文方法对强噪声和散射起伏都有一定的抑制作用。

用 3 种方法得到的包络误差分别对回波信号进行包络补偿,得到在信噪比为 -2 dB 情况下的包络对齐结果,如图 6 所示。图 6a 是包络对齐处理前的包络,包络有明显的弯曲。由图 6b~6d 可以看出,相对于 2 种传统方法,本文方法的包络对齐结果更为准确,说明本文方法在低信噪比情况下要优于传统方法。

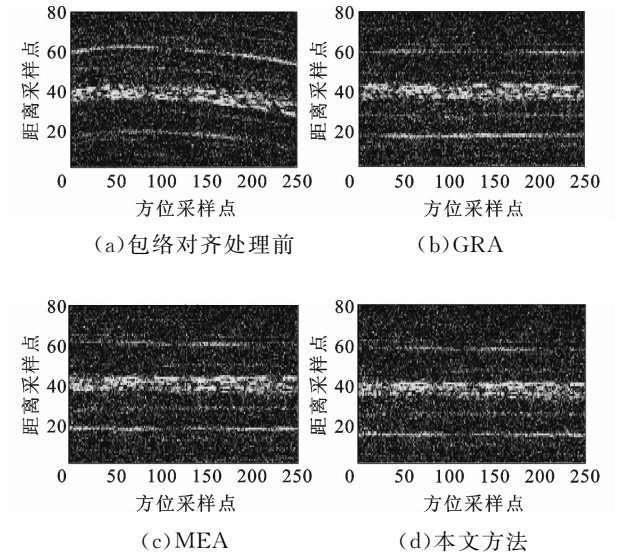


图 6 3 种方法的包络对齐结果图

使用多特显点法和加权最小二乘估计方法^[8]对 3 种方法包络对齐后的数据进行自聚焦,然后进行 ISAR 成像,结果如图 7 所示。2 种传统包络对齐方法的包络估计结果出现难以用一般途径消除的包络突跳现象,造成图 7a~7c 的成像结果出现严重的方位向散焦。相比之下,图 7c 成像效果远远优于图 7a~7b。在更低的信噪比下,传统方法已经不能实现对回波信号的成像,图像散焦布满整个成像域,而经过对实测数据的处理,发现本文方法在 -5 dB 的信噪比下仍能对目标进行较为清晰的成像,体现出了新算法在低信噪比下的明显优势。

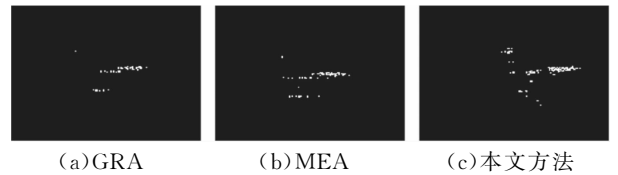
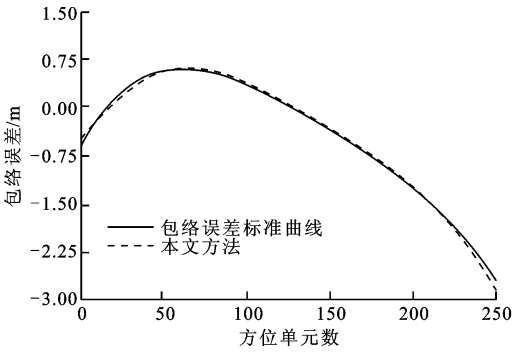
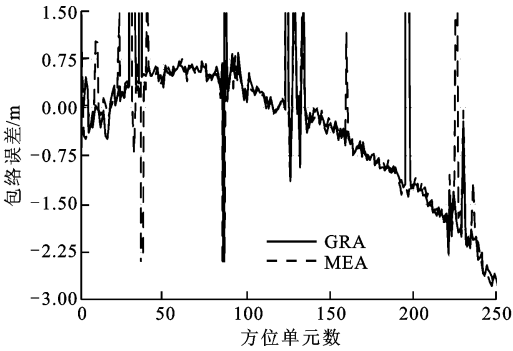


图 7 3 种方法的 ISAR 成像结果图

为了进一步验证本文算法的有效性,我们进行了 200 次 Monte-Carlo 实验,在不同信噪比情况下对 3 种方法的成像结果进行分析和比较,其信噪比设置为 4、3、2、1、0、-1、-2、-3、-4、-5。使用相同的自聚焦过程处理数据,图 7 中成像结果的差异



(a) 包络误差标准曲线与本文方法得到的包络误差



(b) GRA 与 MEA 方法得到的包络误差

图 5 3 种方法的包络误差对比图

只是由所用3种包络对齐方法的不同决定的,所以只需利用最终成像结果的熵值和对比度作为3种包络对齐算法效果的评判标准。图8绘制了200次重复实验得到的平均熵值和对比度曲线,分别如图8a、8b所示,并给出了熵值和对比度的方差曲线,如图8c、8d所示。

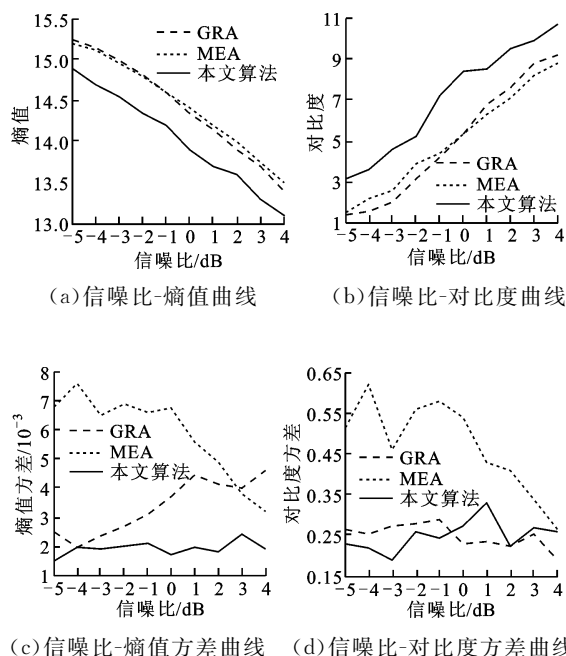


图8 成像结果分析

由图8可见,信噪比降低会造成图像的熵值增大,对比度降低。由于本文方法对包络误差的建模利用了运动的平稳连续性,一定程度上抑制了包络误差的积累和包络突跳现象,因此得到的成像结果的熵值和对比度始终优于2种传统方法。用本文方法得到的熵值和对比度的方差较小,并且在不同信噪比下平稳变化,证明了本文方法具有较强的鲁棒性。对3种方法的熵值和对比度的比较结果以及上文中的成像结果,都说明了本文方法在低信噪比情况下具有更优越的性能,进一步体现了本文方法在低信噪比情况下的包络对齐优势。

4 结 论

本文提出了一种采用子孔径分割的ISAR包络对齐方法,它将全孔径划分为若干个子孔径,对各个子孔径的包络误差进行线性建模和估计,最后利用子孔径估计结果,采用最小二乘算法实现对全孔径包络误差的高阶拟合。本文方法相对于传统包络对齐算法具有更好的抗噪性和更高的估计精度,能对ISAR目标回波数据进行较为精确的包络误差补

偿,在一定程度上提高了对目标ISAR成像的质量。通过对实测数据的仿真实验和分析,验证了本文算法的有效性。

参考文献:

- [1] XU J, LI G, PENG Y N. Parametric velocity synthetic aperture radar: signal modeling and optimal methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(9): 2463-2478.
 - [2] WANG Junfeng, LIU Xingzhao. Improved global range alignment for ISAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2007, 43(3): 1070-1075.
 - [3] CHEN C C, REWS H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 1980, 16(1): 2-14.
 - [4] DELISLE G Y, WU H Q. Moving target imaging and trajectory computation using ISAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 1994, 30(3): 887-899.
 - [5] 保铮, 邢孟道, 王彤, 等. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
 - [6] ZHANG S H, LIU Y X, LI X. Pseudomatched-filter-based ISAR imaging under low SNR condition [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(7): 1240-1244.
 - [7] APRILE A, MELEDANDRI D, PELLIZZERI T M, et al. Translational rotational motion compensation: a single algorithm for different radar imaging applications [J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 204-215.
 - [8] YE W, YEO T S, BAO Y. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2487-2494.
 - [9] ZHANG L, LI H L, QIAO Z, et al. Integrating autofocus techniques with fast factorized back-projection for high-resolution spotlight SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1394-1398.
 - [10] 徐刚, 张磊, 陈倩倩, 等. 基于稀疏约束最优化的ISAR相位自聚焦成像算法 [J]. 电子学报, 2013(9): 1772-1777.
- XU Gang, ZHANG Lei, CHEN Qianqian, et al. Novel autofocusing algorithm for ISAR imaging based on sparse constraint [J]. Chinese Journal of Electronics, 2013(9): 1772-1777.

(下转第139页)