

一种基于图像最大对比度的联合ISAR方位定标和相位自聚焦算法

邵 帅 张 磊* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

摘 要: 针对特选点选取易受噪声影响这一问题, 该文提出一种基于全局图像最大对比度的逆合成孔径雷达(ISAR)方位定标算法, 并在实现方位定标的同时完成距离空变相位补偿自聚焦。该方法以图像对比度作为代价函数, 利用BFGS算法实现代价函数的最大化高效求解, 获得目标信号的距离空变调频率, 进而计算目标有效转动角速度, 实现方位定标和距离空变相位自聚焦。仿真和实测数据实验对比验证了该算法的有效性和稳健性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 方位定标; 最大对比度; BFGS算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)04-0779-08

DOI: [10.11999/JEIT180521](https://doi.org/10.11999/JEIT180521)

A Novel Joint ISAR Cross-range Scaling and Phase Autofocus Algorithm Based on Image Contrast Maximization

SHAO Shuai ZHANG Lei LIU Hongwei

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding at

Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Due to the selection of dominant scatterers is easy to be affected by noise, a novel Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) cross-range scaling algorithm based on image contrast maximization is proposed, which can realize the cross-range scaling while achieving the range spatial-variant phase autofocus. With the image contrast as cost function, the cross-range chirp rate of received signal can be estimated accurately using Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) algorithm. Based on the estimated results, the cross-range scaling of ISAR image and precise phase autofocus can be implemented. Both simulated and real data experiments confirm the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Cross-range scaling; Maximum contrast; Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) algorithm

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)能够对非合作目标成像, 得到目标的2维高分辨率图像, 是一种有效的雷达目标识别途径^[1,2]。ISAR通常利用距离多普勒(RD)算法对目标成像^[3,4], 由于所得的ISAR图像在距离多普勒域, 即方位向表示的仅仅是目标多普勒频率的分布, 因此并不能反映出目标的真实尺寸。

为了更好地对目标进行识别, 需要对目标进行方位定标。

目前已有文献针对方位定标提出了一些估计算法, 主要可以分为以下3类。第1类如文献^[5,6]所提算法, 利用窄带雷达测得的目标运动信息进行轨迹拟合, 然后计算目标相对于雷达视线的总转角, 从而实现方位定标。由于窄带雷达跟踪目标的误差较大, 因此这类方法进行方位定标的精度较低。文献^[7-9]中的方位定标算法可归为第2类, 该类算法运用目标的几何形状等先验信息进行方位定标, 此方法直观明了, 但需要知道目标的先验几何特征信息并对用于定标的图像上的目标形状有较高要求, 因此适用范围较小。而第3类算法通过提取特选点对应的回波信号, 利用信号中包含的距离空变调频率信息来直接估计目标的转角速度, 进而实现方位定

收稿日期: 2018-05-28; 改回日期: 2018-12-06; 网络出版: 2018-12-24

*通信作者: 张磊 leizhang@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771372, 61771367), 国家杰出青年科学基金(61525105), 高等学校学科创新引智计划(111计划)(B18039)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771372, 61771367), The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (61525105), The 111 Project (B18039)

标,如文献[10,11]。该类方法运算量相对较小,准确度较高,得到了广泛的应用。但此方法要求目标信号具有较多的特显点,对其分别进行2次相位估计,通过最小二乘拟合近似求取目标有效转动角速度。实际情况并不能保证丰富的高质量特显点,且最小二乘拟合操作对各散射中心估计误差敏感。另外特显点独立调频率估计过程受噪声影响较大,方法在低信噪比下性能下降。除此之外,目标的距离空变调频率误差源于目标的转动运动,在小转角或小尺寸目标条件下,此误差项较小,对聚焦影响有限,在以上的方位定标方法中并未进行补偿;但在大转角或大尺寸目标情况下,此误差可能会影响图像聚焦效果,甚至产生距离走动,补偿后可以大幅提高图像质量。

针对以上问题,本文提出了一种基于全局图像最大对比度的方位定标算法,并且在实现方位定标的同时完成距离空变相位补偿自聚焦,以提高最终ISAR定标图像的聚焦性能。文中首先根据回波信号模型推导出距离空变调频率的表达式,此调频率对应的目标信号相位即为距离空变相位误差,它会导致最终ISAR定标图像产生散焦。接着,以图像对比度作为代价函数,利用BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)算法实现代价函数的最大化,准确估计出目标信号的距离空变调频率。其中,BFGS算法是一种高效的拟牛顿法,它具有收敛速度快和求解精度高的特点[12]。最后,利用估计得到的调频率计算出目标的有效转动角速度,进而实现ISAR图像的方位定标和距离空变相位自聚焦。与已有方法[10,11]相比,本文算法不仅不需要选取特显点,而且还避免了最小二乘拟合带来的近似误差。仿真和实测数据实验对比验证了本文算法的有效性,并证明了所提算法由于能够通过2维相干积累获得高信噪比增益,因此具有良好的稳健性。

2 ISAR回波信号模型

基于目标在相干处理间隔(CPI)内做平稳运动的假设,可认为在CPI内目标的有效转动角速度 ω_e 的大小和方向是恒定不变的。于是,目标的运动可由图1所示的转台成像模型表示。图中, p 为目标上的一个散射点,它在 XOY 平面内的坐标为 (x, y) 。根据转台模型,散射点 p 到雷达的瞬时距离 $R(t_m)$ 可表达为

$$R(t_m) \approx r(t_m) + x\omega_e t_m + y \frac{(\omega_e t_m)^2}{2} - y \quad (1)$$

其中, $r(t_m)$ 为由目标平动运动造成的目标质心与雷达间的瞬时平动距离, x 和 y 分别为散射点 p 在成像平面内的初始横纵位置坐标, t_m ($0 \leq t_m \leq T_a$)为

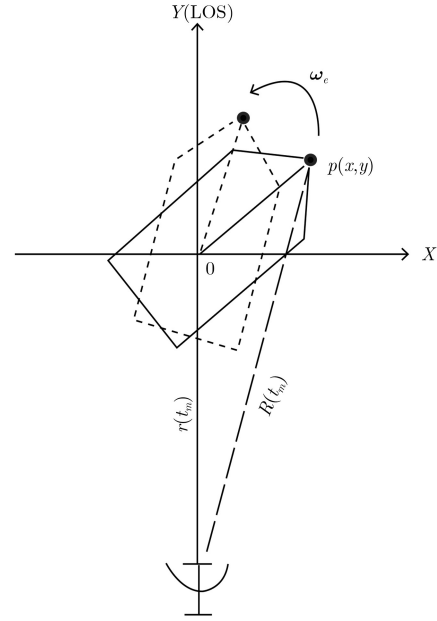


图1 ISAR转台成像模型

方位维慢时间, T_a 为成像相干处理间隔(CPI)。

假设发射信号为线性调频信号,回波信号已经过平动补偿,且目标的旋转运动没有造成越距离单元徙动(MTRC),根据式(1),忽略常数相位项,则散射点 p 的回波信号可写为

$$S_p(\hat{t}; t_m) = \sigma(x, y) \text{sinc} \left\{ B \left[\hat{t} + 2 \frac{y}{c} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[x\omega_e t_m + \frac{1}{2} y\omega_e^2 t_m^2 \right] \right\} \quad (2)$$

其中, $\sigma(x, y)$ 为 p 点的复散射系数,距离维快时间为 $\hat{t}$ ($0 \leq \hat{t} \leq T_p$), T_p 为发射信号的脉冲持续时间, B , λ 和 c 分别表示带宽,波长和电磁波速度, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ 。

由式(2)可知,各距离单元的散射点回波信号在慢时间维表现为LFM信号,其距离空变调频率 α 为

$$\alpha = 2y\omega_e^2 / \lambda \quad (3)$$

由于距离单元位置 y 可测,且 λ 已知,因此若能求得距离空变调频率 α ,则目标的有效转速 ω_e 便可获得。由ISAR成像结果的方位维分辨率 $\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} = \frac{\lambda}{2\omega_e T_a}$ ($\Delta\theta$ 为目标在一个CPI内转过的总转角($\Delta\theta = \omega_e T_a$))可知,若 ω_e 已知,则可求得方位维分辨率,从而实现方位定标。因此,下一节将提出一种新的方位定标算法来求取目标的有效转速 ω_e ,进而实现ISAR图像的方位定标。

需要特别指出的是,回波信号中2次项 $\exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} y\omega_e^2 t_m^2 \right)$ 不仅是慢时间的函数,而且还

与距离单元位置有关，它会使得最终的ISAR定标图像出现散焦，通常被称为距离空变相位误差。因此，若能以图像聚焦性能为指标精确地估计出目标的有效转动角速度 ω_e ，则在实现方位定标的同时，还能将距离空变相位误差精确补偿掉，从而提高最终ISAR定标图像的聚焦性能。

3 基于图像最大对比度的方位定标算法

由上节可知，如果目标的有效转动角速度 ω_e 精确已知，那么可对ISAR图像进行方位定标。故本节将介绍如何精确估计 ω_e ，从而实现ISAR图像的方位定标。

由式(3)可知，目标回波信号的距离空变调频率 α_n 和距离单元坐标 y_n 呈式(4)的简单线性关系

$$\alpha_n = k y_n \quad (4)$$

其中， k 为距离空变调频率与距离单元坐标之间的线性系数， $k = (2\omega_e^2) / \lambda$ ， λ 为雷达波长， α_n 和 y_n 分别为第 n 个距离单元的距离空变调频率和距离单元坐标。由以上可得目标的有效转动角速度 ω_e 为

$$\omega_e = \sqrt{(\lambda |k|) / 2} \quad (5)$$

因此，若估计出线性系数 k ，则可得到目标的有效转动角速度 ω_e ，从而实现ISAR图像的方位定标。

3.1 代价函数的建立

对于式(2)所示的散射点 p 的回波信号，将其离散化后，可得

$$S_p(n; l) = \sigma(x, y) \operatorname{sinc} \{B[n\Delta r + y]\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[x\omega_e l \Delta t + \frac{1}{2} y\omega_e^2 (l\Delta t)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

其中， Δr 为距离采样间隔， n ($0 \leq n \leq N-1$) 为距离单元序号， N 为总的距离单元个数， Δt 为慢时间采样间隔， l ($0 \leq l \leq M-1$) 表示离散慢时间序号， M 为总的脉冲数。假设目标总共包含 P 个散射点，则目标的总回波信号为

$$S(n; l) = \sum_{p=1}^P S_p(n; l) \quad (7)$$

给 $S(n; l)$ 乘上一个补偿项 $\exp[j\pi k y_n (l\Delta t)^2]$ 后做方位维快速傅里叶变换(FFT)，便可得到ISAR图像 $f_n(m)$

$$f_n(m) = \sum_{l=0}^{M-1} \left\{ S(n; l) \exp[j\pi k y_n (l\Delta t)^2] \cdot \exp \left(-j2\pi \frac{m}{M} l \right) \right\} \quad (8)$$

式中， m ($0 \leq m \leq M-1$) 表示ISAR图像的方位单元序号。

以图像对比度作为代价函数，根据ISAR图像 $f_n(m)$ ，通过使得代价函数最大化来获得最优参数

$$\langle \tilde{k} \rangle = \arg \max_k \{C\} \quad (9)$$

其中， $\tilde{k}$ 为线性系数 k 的估计值， C 表示图像对比度，其定义为

$$C = \sigma / \mu \quad (10)$$

其中，

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} |f_n(m)| \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|f_n(m)| - \mu)^2} \quad (12)$$

3.2 基于BFGS算法的线性系数 k 的最优估计

根据上一小节建立的代价函数，对于式(9)的非约束最优化问题，有很多求解方法，例如梯度下降法^[13]，牛顿法^[14]等，其中一个高效的方法是BFGS算法。BFGS算法是一种拟牛顿法，它能够达到牛顿法的收敛速度和求解精度(2次收敛)，但它只需计算代价函数的梯度，省去了牛顿法中对代价函数2阶导数的计算，因此它的运算复杂度要远小于牛顿法。这里，首先给出代价函数对应于变量线性系数 $\tilde{k}$ 的梯度表达式

$$\begin{aligned} \frac{dC}{d\tilde{k}} &= \frac{1}{MN} \left[- \left(\frac{2}{\sigma} + \frac{\sigma}{\mu^2} \right) \right] \\ &\cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ j(n\Delta r) \frac{f_n(m)}{|f_n(m)|} \right. \right. \\ &\cdot \left. \left[\sum_{l=0}^{M-1} (l\Delta t)^2 S^*(n; l) \exp \left(j2\pi \frac{m}{M} l \right) \right] \right\} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

其中， $S^*(n; l)$ 为 $S(n; l)$ 的共轭。

在BFGS算法中，用一个对称正定矩阵(定义为 B)来近似代替牛顿法中的Hesse矩阵。基于此，BFGS算法的更新公式为

$$\begin{aligned} \tilde{k}^{[u+1]} &= \tilde{k}^{[u]} - \varepsilon^{[u]} \left(B^{[u]} \right)^{-1} \left(\frac{dC}{d\tilde{k}} \right)^{[u]}, \\ u &= 0, 1, \dots, U-1 \end{aligned} \quad (14)$$

其中， u 表示循环次数， U 表示总的循环数， $\varepsilon^{[u]}$ 是对应于 $\tilde{k}^{[u]}$ 的第 u 次循环的搜索步长， $\left(\frac{dC}{d\tilde{k}} \right)^{[u]}$ 和

$B^{[u]}$ 分别表示第 u 次循环中代价函数的梯度和Hesse矩阵的近似矩阵。搜索步长 $\varepsilon^{[u]}$ 可以通过1维精确搜索(如黄金分割法^[15])确定,它可有效地避免代价函数陷入局部最优值,保证了算法得到全局最优解。

利用BFGS算法估计线性系数 $\tilde{k}$ 并同时完成距离空变相位自聚焦的具体步骤描述如下:

步骤 1 初始化。设置循环数 $u = 0$, 初始线性系数 $\tilde{k}^{[0]} = 0$ 和近似矩阵 $B^{[0]} = [1]$, 并计算初始梯度 $\left(\frac{dC}{d\tilde{k}}\right)^{[0]}$, $S^{[0]}(n; l)$ 和 $f_n^{[0]}(m)$ 分别为初始回波数据和初始ISAR图像;

步骤 2 根据黄金分割法确定搜索步长 $\varepsilon^{[u]}$;

步骤 3 根据式(14)更新 $\tilde{k}^{[u+1]}$, 并根据式(8)计算新的 $f_n^{[u+1]}(m)$, 通过方位维逆快速傅里叶变换(IFFT)获得 $S^{[u+1]}(n; l)$, 此时 $S^{[u+1]}(n; l)$ 和 $f_n^{[u+1]}(m)$ 即为补偿过距离空变相位误差的数据和ISAR图像;

步骤 4 根据式(13)计算 $\left(\frac{dC}{d\tilde{k}}\right)^{[u+1]}$;

步骤 5 根据式(15)确定 $B^{[u+1]}$

$$B^{[u+1]} = \begin{cases} B^{[u]}, & \left(y^{[u+1]}\right)^T s^{[u+1]} \leq 0 \\ B^{[u]} - \frac{B^{[u]} s^{[u+1]} \left(s^{[u+1]}\right)^T B^{[u]}}{\left(s^{[u+1]}\right)^T B^{[u]} s^{[u+1]}} \\ \quad + \frac{y^{[u+1]} \left(y^{[u+1]}\right)^T}{\left(y^{[u+1]}\right)^T s^{[u+1]}}, & \left(y^{[u+1]}\right)^T s^{[u+1]} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, $s^{[u+1]} = \tilde{k}^{[u+1]} - \tilde{k}^{[u]}$, $y^{[u+1]} = \left(\frac{dC}{d\tilde{k}}\right)^{[u+1]} - \left(\frac{dC}{d\tilde{k}}\right)^{[u]}$;

步骤 6 令 $u = u + 1$, 并转到步骤2, 直至 $u = U - 1$ 时停止循环。

通过以上BFGS算法对代价函数的最优化求解, 可以获得最优参数 $\tilde{k}_{\text{opt}}$, 并得到补偿掉距离空变相位误差后的聚焦ISAR图像 $f_n^{[U-1]}(m)$ 。因此, 根据式(5), 目标的有效转动角速度 ω_e 的最优估计值为

$$\tilde{\omega}_{e, \text{opt}} = \sqrt{\left(\lambda \left|\tilde{k}_{\text{opt}}\right|\right) / 2} \quad (16)$$

进而可完成聚焦的ISAR图像 $f_n^{[U-1]}(m)$ 的方位定标。

为了更清楚地描述本文算法, 其流程图如图2所示。

4 实验结果与分析

为了验证上述ISAR方位定标算法的有效性, 下面分别用仿真数据和实测数据进行验证, 并对处理结果进行分析。

4.1 仿真实验

在仿真数据处理中, 仿真模型是一个长度为134.12 m, 宽度为17.27 m, 高为31.12 m的舰船模型。在仿真中假设舰船目标做有效转动角速度恒定不变的匀转速转动运动, 且雷达系统采用dechirp方式进行距离脉冲压缩。相关雷达系统参数及定标参数如表1所示。

在本实验中, 分别给出本文所提ISAR方位定标算法和文献[10]算法对应的实验结果, 通过对比来说明本文算法的有效性。图3和图4分别给出了舰船目标俯视图和侧视图在信噪比(SNR)为10 dB情况下的方位定标结果, 表2和表3分别为对应的实验估计结果。

从表2和表3可知, 在两种姿态下, 本文算法的估计结果相较于文献[10]都更加接近真实值, 估计

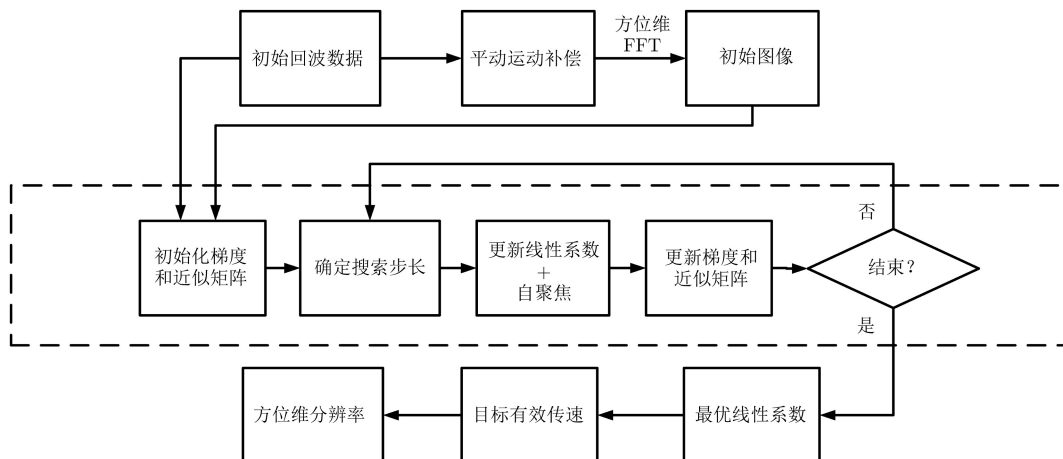


图2 本文算法流程图

表 1 仿真参数

参数	数值
载频 f_c (GHz)	10
带宽 B (GHz)	1
脉冲持续间隔 T_p (μ s)	200
脉冲重复频率PRF (Hz)	512
dechirp采样率 f_s (MHz)	2.56
距离维采样点数	512
方位维采样点数	512
距离维像素值(m)	0.150
方位维像素值(m)	0.3006

表 2 方位定标估计结果(m)

	文献[10]算法	本文算法	真实值
俯视图	0.3096	0.3015	0.3006
侧视图	0.3154	0.3027	0.3006

精度更高。由图3和图4所标定的对比度及框中所显示的部分可知，本文算法得到的最终定标图像的聚焦性能也比文献[10]算法更优。除此之外，从图3(c)和图4(c)可以看出，本文算法只需要少数的几次迭代处理便可达到最优值，具有很好的收敛性。因

表 3 目标几何尺寸估计结果(m)

	文献[10]算法	本文算法	真实值
船长	140.87	135.34	134.12
船宽	18.15	17.25	17.27
船高	30.75	30.90	31.12

此，由以上分析可知，本文算法不仅定标效果更佳，而且同时还完成了距离空变相位补偿自聚焦，提高了最终定标图像的聚焦性能。

图5给出了两种算法在不同信噪比下的定标结果。

由图5可以看出，本文算法的估计精度随着信噪比的降低有所下降，但估计结果仍十分接近真实值，而文献[10]算法的估计结果在低信噪比下远远偏离真实值，这证明了本文算法具有更好的稳健性。

4.2 实测数据实验

为进一步验证本文算法的有效性，对Yak-42飞机(长度为36.38 m，翼展为34.88 m)的实测数据进行处理，其相关的雷达参数如下：信号带宽 B 为400 MHz，距离向分辨率为0.375 m，距离向像素值为0.368 m，载频 f_c 为5.52 GHz，脉冲重复频率PRF为400 Hz。

图6给出了不同信噪比(10 dB, 0 dB, -10 dB)

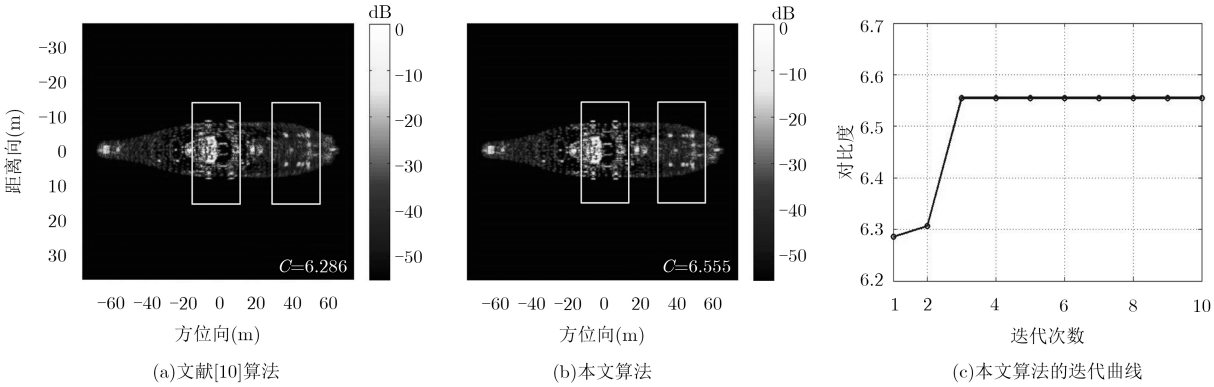


图 3 SNR为10 dB两种算法的俯视图方位定标结果

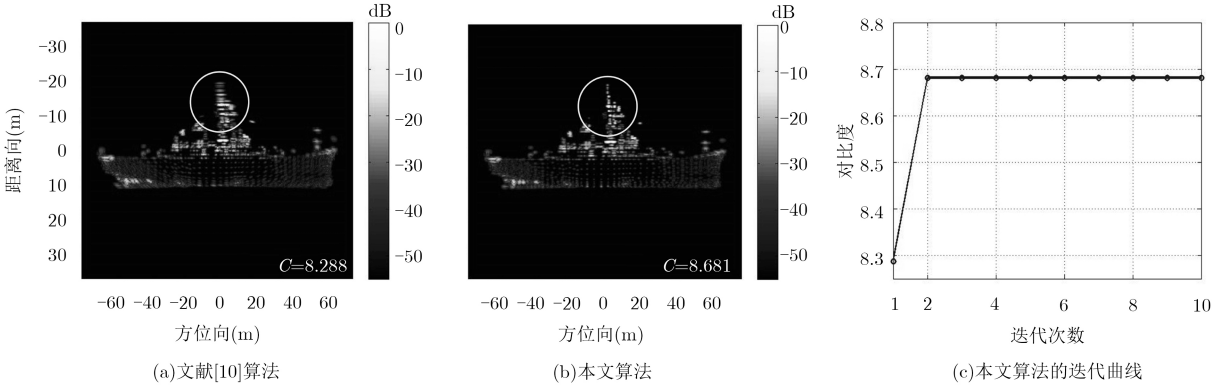


图 4 SNR为10 dB两种算法的侧视图方位定标结果

下本文算法和文献[10]算法的最终定标图像,并给出了本文算法的对比度迭代曲线。表4和表5分别由图6计算得到的飞机几何尺寸。

结合图6和表4、表5可知,本文算法相较于文献[10]算法精度更高且稳健性更强。除此之外,由图6中框中及所标示的图像对比度可以看出,本文算法由于补偿了由目标有效转动角速度产生的距离空变相位误差,因此所得图像具有更好的聚焦性能。图6中的对比度迭代曲线说明了该定标算法具有良好的收敛性。故由以上分析可以说明,本文算法不仅提升了方位定标的精度,还改善了最终生成

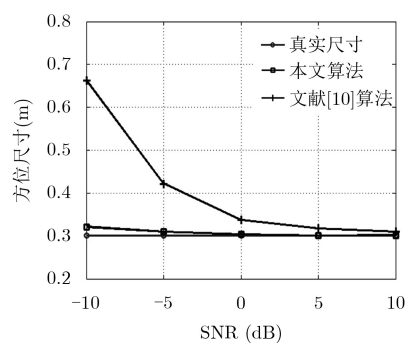


图5 SNR对两种算法的影响

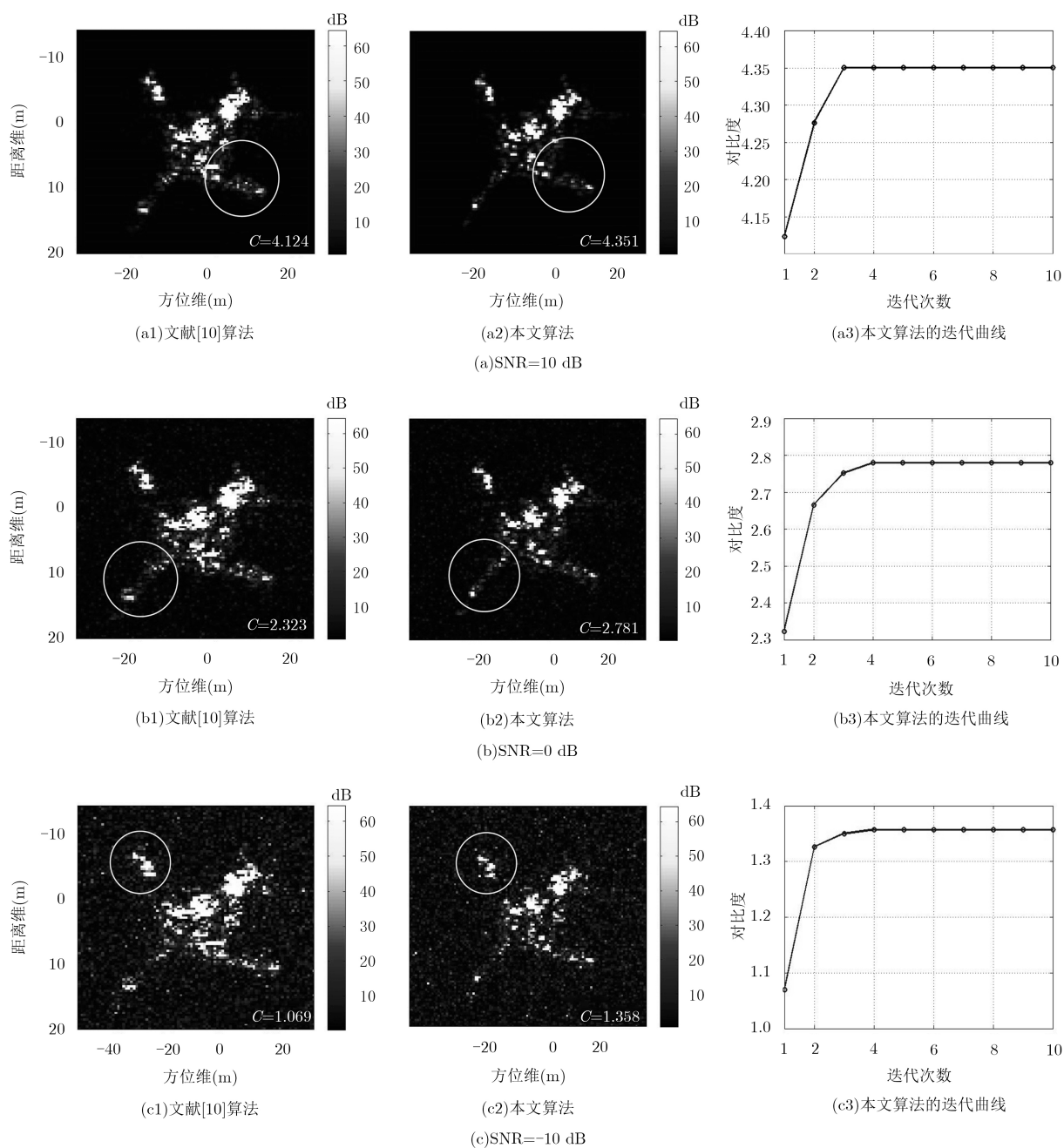


图6 两种算法在不同SNR下的定标结果

表 4 飞机长度估计(m)

	10 dB	0 dB	-10 dB
真实值	36.38	36.38	36.38
本文算法	36.85	37.29	38.35
文献[10]算法	35.47	40.29	57.54

表 5 飞机翼展估计(m)

	10 dB	0 dB	-10 dB
真实值	34.88	34.88	34.88
本文算法	34.94	35.68	36.45
文献[10]算法	34.51	38.31	55.58

的ISAR定标图像的聚焦性能，是一种有效的ISAR方位定标算法。

5 结束语

ISAR图像方位定标是实现目标特征提取和目标识别的基础。本文针对特显点选取易受噪声影响这一问题，提出了一种基于ISAR图像最大对比度的方位定标算法。该方法首先从回波信号模型出发，推导出了距离空变调频率和距离单元具有简单的线性关系。然后，将ISAR图像对比度作为代价函数，利用BFGS算法实现代价函数的最大化来获取最优线性系数。其中，BFGS算法是一种高效的拟牛顿法，具有收敛速度快和求解精度高的特点。最后，利用所得线性系数求解出目标的有效转动角速度，进而实现方位定标。与此同时，该算法还完成了距离空变相位补偿自聚焦，提高了最终ISAR定标图像的聚焦性能。仿真和实测数据实验对比都验证了本文算法的有效性。该算法结构简单，运算量适中，并且具有良好的稳健性，因此在ISAR图像的方位定标方面有着很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 马凯莉. 基于压缩感知技术的ISAR成像方法研究[D]. [硕士论文], 南京航空航天大学, 2017.
MA Kaili. Study on compressive-sensing-based ISAR imaging methods[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [2] WANG Yong and ZHU Pengkai. Novel and comprehensive approach for the feature extraction and recognition method based on ISAR images of ship target[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 24(5): 12–19. doi: [10.11916/j.issn.1005-9113.17038](#).
- [3] JACK L. WALKER Range-Doppler imaging of rotating objects[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 23–52. doi: [10.1109/TAES.1980.308875](#).
- [4] WANG Yong, KANG Jian, and JIANG Yicheng. ISAR imaging of maneuvering target based on the local polynomial wigner distribution and integrated high-order ambiguity function for cubic phase signal model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2971–2991. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2301158](#).
- [5] 吕少霞. ISAR成像的横向定标算法研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工业大学, 2007.
LÜ Shaoxia. Cross-range scaling algorithm based on ISAR imaging[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2007.
- [6] 张华. ISAR成像横向定标问题研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHANG Hua. Research on cross-range scaling in ISAR imaging[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2010.
- [7] PASTINA D and SPINA C. Slope-based frame selection and scaling technique for ship ISAR imaging[J]. *IET Signal Processing*, 2008, 2(3): 265–276. doi: [10.1049/iet-spr:20070122](#).
- [8] 汪玲. 逆合成孔径雷达成像关键技术研究[D]. [博士论文], 南京航空航天大学, 2006.
WANG Ling. Research on key technology of inverse synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [9] WANG Ling, ZHU Daiyin, and ZHU Zhaoda. Cross-range scaling for aircraft ISAR images based on axis slope measurements[C]. *IEEE Radar Conference*, Rome, Italy, 2008: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2008.4721024](#).
- [10] 李宁, 汪玲. 一种改进的ISAR图像方位定向定标方法[J]. *雷达科学与技术*, 2012, 10(1): 74–81. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2012.01.014](#).
- [11] LI Ning and WANG Ling. An improved cross-range scaling method for ISAR[J]. *Radar Science and Technology*, 2012, 10(1): 74–81. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2012.01.014](#).
- [12] MARTORELLA M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 281–294. doi: [10.1109/TAES.2008.4517004](#).
- [12] RAN Lei, LIU Zheng, ZHANG Lei, *et al.* An autofocus algorithm for estimating residual trajectory deviations in

- synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(6): 3408–3425. doi: [10.1109/TGRS.2017.2670785](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2670785).
- [13] ALAGOZ B B, ALISOY H Z, KOSEOGLU M, *et al.* Modeling and analysis of dielectric materials by using gradient-descent optimization method[J]. *International Journal of Modeling Simulation & Scientific Computing*, 2017, 8(1): 3–45. doi: [10.1142/S1793962317500143](https://doi.org/10.1142/S1793962317500143).
- [14] ZHANG Shuanghui, LIU Yongxiang, LI Xiang, *et al.* Fast ISAR cross-range scaling using modified Newton method[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1355–1367. doi: [10.1109/TAES.2017.2785560](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2785560).
- [15] 邱毅, 刘峥, 刘钦. 基于变步长搜索黄金分割优化的自聚焦算法[J]. 现代雷达, 2012, 34(4): 48–52. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2012.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2012.04.011).
- QIU Yi, LIU Zheng, and LIU Qin. A novel autofocus algorithm based on variable step searching and golden section method[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(4): 48–52. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2012.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2012.04.011).
- 邵 帅: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为ISAR成像.
- 张 磊: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为SAR/ISAR成像与运动补偿.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 教授, 研究方向为宽带雷达信号处理.