

## 一种微波光子雷达ISAR成像新方法

杨利超<sup>\*①</sup> 邢孟道<sup>①</sup> 孙光才<sup>①</sup> 王安乐<sup>②</sup> 盛佳恋<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(中国人民解放军空军预警学院 武汉 430017)

<sup>③</sup>(上海无线电设备研究所 上海 201109)

**摘要:** 微波光子雷达发射信号带宽大、波长小,能够实现分辨率更高的逆合成孔径雷达(ISAR)成像。但带宽大、波长小的回波信号也导致传统成像算法对目标转动分量的近似不成立,使得传统算法无法应用。在微波光子雷达成像中,目标转动分量在回波包络中形成空变的距离弯曲项,在方位相位中形成空变的2次相位误差,导致ISAR图像散焦。该文针对微波光子雷达系统提出一种新的ISAR成像算法,该算法同时考虑了目标转动分量对回波包络和相位的影响,以包络相关值为目标函数值迭代估计目标转速,根据转速估计值,在距离向进行重采样对齐包络,在方位向构造空变的方位补偿函数校正转动相位。仿真和实测数据的处理结果证明了该算法的有效性。

**关键词:** 微波光子雷达; 逆合成孔径雷达; 转速估计; 包络对齐; 方位相位补偿

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)06-1271-09

DOI: 10.11999/JEIT180661

## A Novel ISAR Imaging Algorithm for Microwave Photonics Radar

YANG Lichao<sup>①</sup> XING Mengdao<sup>①</sup> SUN Guangcai<sup>①</sup>  
WANG Anle<sup>②</sup> SHENG Jialian<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(Microwave Photonics Center, Wuhan Electronic Institute, Wuhan 430017, China)

<sup>③</sup>(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Microwave photonics radar generates signals with large bandwidth and small wavelength. It has capability of ultra-high resolution of Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) image. Because the approximation of rotational components is not tenable, traditional ISAR imaging algorithm is not suitable for microwave photonics radar. In the microwave photonics radar imaging, the rotational components result in range curvature and quadratic phase error changing with distance. To solve this problem, an effective ISAR imaging algorithm is put forward which considers the influence of the target's rotational component to echo envelope and phase. The value of envelope correlation is taken as objective function and the target's rotate speed is estimated by iteration; The range curvature is corrected by time resampling; The quadratic phase error is compensated by azimuth compensation function. Both simulated and real-measured data experimental results confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Microwave photonics radar; Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Rotate speed estimation; Envelope correction; Phase compensation

### 1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)是通过大带宽信号和雷达与目标之间

的相对运动实现非合作目标2维成像的雷达,在目标成像和识别中有重要的应用。它的距离成像分辨率由信号带宽决定,方位成像分辨率由雷达波长和脉冲积累时间决定<sup>[1]</sup>。微波光子雷达结合了光子学方法和电子学方法<sup>[2-5]</sup>,解决了大带宽信号的产生问题,提高了雷达的信号的距离向分辨力,配合较短的波长,能够实现分辨率更高的ISAR图像。文献<sup>[6]</sup>中所提微波光子雷达系统基于光子波形产生方法发射了具有4 GHz带宽以及10 GHz载频的线性调频信号。文献<sup>[7]</sup>中微波光子ISAR系统发射调频连

收稿日期: 2018-07-04; 改回日期: 2019-01-10; 网络出版: 2019-01-30

\*通信作者: 杨利超 ylc9310@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61621005), 上海市自然科学基金(17ZR1428700)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61621005), The Natural Science Foundation of Shanghai (17ZR1428700)

续波,并且采用解线频调模式接收信号,在降低计算量的同时实现了8 GHz带宽信号的高分辨率成像。但在针对运动目标的2维成像过程中,大带宽和较小波长的信号也使目标转动分量引起的2次项距离徙动不可忽略。在距离维中,该项形成空变的距离弯曲项,具体表现为离目标旋转中心距离越远的散射点的弯曲越大;在方位维中,该项形成空变的2次项相位误差,较大的2次项相位误差将导致图像严重散焦。

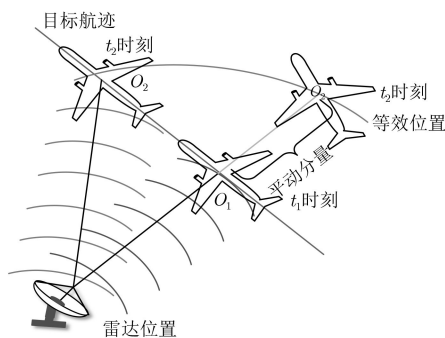
ISAR成像可分为包络对齐和相位补偿两个步骤。传统ISAR包络对齐方法有互相关法等<sup>[8,9]</sup>。传统方法通过计算相邻脉冲数据的相关系数确定回波包络的偏移量。此类方法没有考虑目标的转动分量对包络的影响。而在距离向高分辨的情况下,目标的转动分量会引起包络的偏移。在相位补偿方面,传统ISAR成像通常采用的自聚焦方法<sup>[10,11]</sup>(PGA,特显点,最小熵等)认为相位误差只和方位慢时间有关,忽略了相位误差的距离空变性。而微波光子雷达信号的信号波长较小,转动引起的2次相位误差不可忽略。

综上所述,在带宽较大、波长较小的微波光子雷达ISAR成像处理中,包络和相位的校正都需要更高精度的补偿。针对微波光子雷达中的成像难点,本文提出了一种基于转速估计的包络相位高精度联合运动补偿方法。该方法首先利用包络相关值为准则迭代求解目标转速,其次在距离时域进行时间重采样校正转动分量引起的包络弯曲,最后在方位时域构造距离空变的补偿函数校正转动分量引起的2次相位,从而实现2维高分辨成像。

## 2 ISAR成像模型

### 2.1 信号模型

图1(a)为目标运动和雷达录取回波示意图。微波光子雷达发射线性调频信号,采用Dechirp模式接收。雷达录取回波为



(a) ISAR平动模型

$$S_{\text{echo}}(t_r, t_m) = \sum_{i=1}^q A_i \text{rect} \left( \frac{t_r - 2R_i(t_m)/c}{T_p} \right) \cdot \exp \left[ -j \left( \frac{4\pi}{c} \Delta R_i(t_m) \gamma t_r + \frac{4\pi}{c} f_c \Delta R_i(t_m) \right) \right] \cdot \exp \left[ j \left( \frac{8\pi\gamma R_s}{c^2} \Delta R_i(t_m) + \frac{4\pi\gamma}{c^2} \Delta R_i(t_m)^2 \right) \right] \quad (1)$$

$$\Delta R_i(t_m) = R_i(t_m) - R_s \quad (2)$$

其中,  $t_r$  为快时间,  $t_m$  为慢时间,  $\text{rect}(\cdot)$  为门函数,  $T_p$  为脉冲时间宽度,  $\gamma$  为信号调频率,  $c$  为光速,  $q$  为散射点总数,  $A_i$  为目标散射点  $i$  的后向散射系数,  $R_i(t_m)$  为目标散射点  $i$  在慢时间时刻  $t_m$  与雷达的距离,  $R_s$  为系统参考斜距。在式(2)中,令  $f_r = \gamma t_r$ , 忽略RVP项、回波包络斜置项和相位常数项,并将目标的斜距历程  $R_i(t_m)$  展开为转动分量和平动分量,得

$$S_{\text{echo}}(f_r, t_m) = \sum_{i=1}^q A_i P(f_r) \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (f_r + f_c) \cdot (X_i \sin \omega t_m + Y_i \cos \omega t_m + \Delta R_{\text{TR}}(t_m)) \right] \quad (3)$$

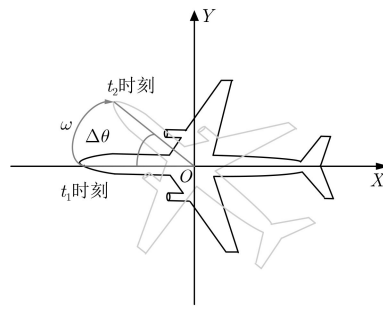
$$P(f_r) = \text{rect} \left( \frac{f_r/\gamma - 2R_i(t_m)/c}{T_p} \right) \quad (4)$$

其中,  $\omega$  为目标转速, 转角  $\Delta\theta = \omega t_m$ ,  $X_i$  和  $Y_i$  分别为散射点  $i$  的横、纵坐标,  $\Delta R_{\text{TR}}(t_m)$  为目标平动分量。

### 2.2 微波光子雷达成像分析

假设平动补偿后,旋转中心  $O$  的坐标为  $(X_o, Y_o)$ , 信号在  $t_m=0$  处进行泰勒展开得

$$S_{\text{rot}}(f_r, t_m) = \sum_{i=1}^q A_i P(f_r) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_r + f_c) \cdot \left[ (X_i - X_o) \omega t_m + (Y_i - Y_o) \left( 1 - \frac{1}{2} \omega^2 t_m^2 \right) \right] \right\} \quad (5)$$



(b) ISAR转台模型

图1 目标运动示意图

微波光子雷达带宽大, 距离分辨率高, 因此目标转动分量产生的2次项距离徙动是微波光子雷达信号处理中必须考虑的问题。另一方面微波光子雷达频段高, 中心频率 $f_c$ 较大, 转动分量产生的距离空变的2次相位误差会造成严重散焦<sup>[12]</sup>。设目标散射点坐标为 $(X_i, Y_i)$ , 聚焦位置为 $R_i(t_m)$ , 合成孔径时间为 $t_M$ , 散射点 $i$ 的2次距离徙动 $\Delta R$ 与相位误差 $\Delta P$ 为

$$\Delta R = R_i(t_M/2) - R_M(0) = \frac{1}{4} (Y_i - Y_0) \omega^2 t_M^2 \quad (6)$$

$$\Delta P(t_M/2) = \frac{\pi f_c}{2c} (Y_i - Y_0) \omega^2 t_M^2 \quad (7)$$

假设目标纵向长度为60 m, 转速 $\omega$ 为0.2 rad/s, 合成孔径时间 $t_M$ 为1 s, 选取目标最远点作为参考,

不同频段传统雷达与微波光子雷达在观测相同目标时的距离徙动与相位误差如表1所示。

图2(a)为不同频段雷达的距离徙动量分析, 纵坐标为目标最远点距离徙动 $\Delta R$ 与距离分辨率 $\rho_r$ 的比值 $(\Delta R/\rho_r)$ , 横坐标为慢时间 $t_m$ 。图2(b)为不同频段雷达的相位误差分析, 纵坐标为目标最远点相位误差, 横坐标为慢时间 $t_m$ 。由表1和图2可知: 相较于传统雷达, 在微波光子雷达ISAR成像处理中, 由于系统2维分辨率高, 目标转动分量对包络的影响远远大于传统雷达, 使得利用传统的相关法进行包络对齐处理的效果差。另外由于雷达波长较小, 中心频率高, 信号相位中的转动分量引起的2次相位误差对成像的影响也不可忽略, 而传统的自聚焦方法无法解决此类空变的相位误差问题。

表1 不同频段雷达成像误差分析

信号频段	发射带宽(GHz)	中心频率(GHz)	距离分辨率(m)	$\Delta R$ (m)	$\Delta P$ (rad)
L波段	0.3	1.5	0.500	0.6	3
C波段	0.5	6.0	0.300	0.6	12
X波段	1.0	10.0	0.150	0.6	20
微波光子	10.0	35.0	0.015	0.6	70

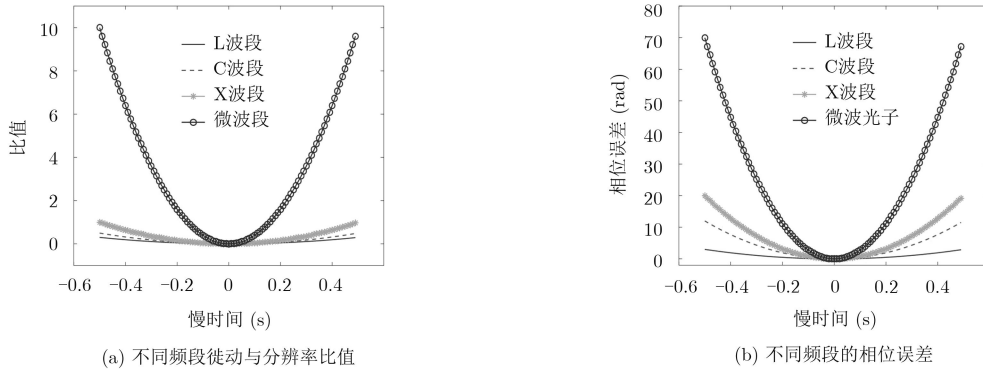


图2 距离徙动与相位误差分析

### 3 基于转速估计的包络相位高精度联合运动补偿方法

针对微波光子雷达ISAR成像处理中出现的问题, 本文提出了一种基于转速估计的包络相位高精度联合运动补偿方法。首先去除包络中的走动分量, 对式(5)作Keystone变换, 即令 $t_m = f_c / (f_r + f_c) \tau_m$ , 并对 $f_r$ 进行泰勒展开, 忽略相位常数项后为

$$S_{\text{krot}}(f_r, \tau_m) = \sum_{i=1}^q A_i P(f_r) \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \cdot [(X_i - X_0) \omega \tau_m - \frac{1}{2} (Y_i - Y_0) \omega^2 \tau_m^2] \right\} \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi f_r}{c} (Y_i - Y_0) \left( 1 + \frac{1}{2} \omega^2 \tau_m^2 \right) \right] \quad (8)$$

式(7)中存在随距离变化的2次项 $\frac{1}{2} (Y_i - Y_0) \omega^2 \tau_m^2$ , 经本文2.2节分析可得此项对包络有明显影响, 具体体现为与旋转中心相对距离越远的包络线有严重的弯曲现象。将式(8)变换到距离时域为

$$s_{\text{krot}}(t', \tau_m) = \sum_{i=1}^q A_i T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[ t' + \frac{2\gamma}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} \omega^2 \tau_m^2 \right) \cdot (Y_i - Y_0) \right] \right\} \exp \left( -j \frac{4\pi R_{\Delta i}}{c} t' \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ (X_i - X_0) \omega \tau_m - \frac{1}{2} (Y_i - Y_0) \omega^2 \tau_m^2 \right] \right\} \quad (9)$$

补偿距离弯曲项目的是令散射点包络重新聚焦在位置 $(Y_i - Y_o)$ 处。在距离频域补偿关于 $f_t$ 的距离弯曲项时,由于距离弯曲项是根据散射点距离向位置发生变化的,补偿函数应与散射点位置相关。而在距离频域时,不同距离向位置的散射点频域信号叠加在一起,因此使用同一补偿函数无法在频域对不同位置散射点的距离弯曲项进行统一补偿。所以本文从式(9)出发,使用时间重采样完成弯曲项校正。

重采样尺度由转速 $\omega$ 确定,即令 $t' = \left(1 + \frac{1}{2} \omega^2 \tau_m^2\right) t_n$ ,

$$a(\tau_m) = \left(1 + \frac{1}{2} \omega^2 \tau_m^2\right), \text{式(9)写为}$$

$$s_{\text{krot}}(t_n, \tau_m) = \sum_{i=1}^q A_i T_p \text{sinc} \left\{ a(\tau_m) T_p \left[ t_n + \frac{2\gamma}{c} (Y_i - Y_o) \right] \right\} \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi R_{\Delta i}}{c} a(\tau_m) t_n \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ (X_i - X_o) \omega \tau_m - \frac{1}{2} (Y_i - Y_o) \omega^2 \tau_m^2 \right] \right\} \quad (10)$$

在进行该操作之前需估计转速 $\omega$ 的值,常用的ISAR目标转角估计方法主要分为2类:一类是基于信号的转速估计<sup>[12-16]</sup>,此类方法需要包络完全对齐后提取信号调频率估计转速;另一类为基于图像匹配的转速估计方法<sup>[17-21]</sup>,此类方法需要完成成像后对图像进行匹配提取转速。而在微波光子成像处理中,由于包络和相位存在转动分量误差,传统转速估计方法的估计精度无法保证。

利用微波光子雷达距离分辨率高的特点,本文提出了一种以包络相关值为目标函数的转速迭代求解方法。因时间重采样不改变中心时刻 $\tau_m=0$ 时的包络,取中心时刻包络与其余时刻包络相关值之和作为判断整体包络对齐的准则。设参数 $\omega$ 第 $d$ 步迭代的转速估计值为 $\omega^{[d]}$ ,并用 $\omega^{[d]}$ 对式(10)进行时间重采样,令 $t' = \left[1 + \frac{1}{2} \left(\omega^{[d]}\right)^2 \tau_m^2\right] t_n$ ,  $K_{i,\omega} = \frac{2\gamma}{c} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \omega^2 \tau_m^2\right) (Y_i - Y_o)$ ,重采样并取实包络后写为

$$\left| s_{\text{krot}}(t_n, \tau_m, \omega^{[d]}) \right| = \sum_{i=1}^q A_i T_p \cdot \text{sinc} \left\{ T_p \left[ \left(1 + \frac{1}{2} \left(\omega^{[d]}\right)^2 \tau_m^2\right) t_n + K_{i,\omega} \right] \right\} \quad (11)$$

令中心时刻的实包络为 $L_0 = \sum_{i=1}^q A_i T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[ t_n + \frac{2\gamma}{c} (Y_i - Y_o) \right] \right\}$ ,则目标函数为

$$J(\omega^{[d]}) = \sum_{m=1, m \neq na/2}^M \sum_{n=1}^N \left[ \left| s_{\text{krot}}(t_n, \tau_m, \omega^{[d]}) \right| L_0 \right] \quad (12)$$

当 $\omega$ 的估计值准确时, $J(\omega^{[d]})$ 的值达到最大,即

$$\tilde{\omega} = \arg \max J(\omega^{[d]}) \quad (13)$$

由于 $J(\omega^{[d]})$ 是单峰函数,使用线搜索的方法可求 $\omega$ 的估计值,并利用 $\tilde{\omega}$ 进行运动补偿。算法步骤如下:

(1) 选取转速初始值 $\omega^{[0]}$ ,一般为0值,选取初始步长 $\Delta\omega_0$ ,计算 $J(\omega^{[d]})$ 的最大值: $J(\omega^{[d]})_{\max} = \sum_{m=1, m \neq na/2}^M \sum_{n=1}^N (L_0^2)$ ;

(2) 第 $d$ 步迭代:令第 $d$ 步步长为 $\Delta\omega_d = \Delta\omega_0$ , $\omega^{[d]} = \omega^{[d-1]} + \Delta\omega_d$ ,计算若 $J(\omega^{[d]})_{\max} > J(\omega^{[d-1]})$ ,继续执行第(2)步,进行下一次迭代。若 $J(\omega^{[d]}) < J(\omega^{[d-1]}) < J(\omega^{[d]})_{\max}$ ,转第3步操作。若 $J(\omega^{[d]}) = J(\omega^{[d]})_{\max}$ ,迭代停止,输出 $\tilde{\omega} = \omega^{[d]}$ ;

(3) 当 $J(\omega^{[d]}) < J(\omega^{[d-1]})$ 时,说明 $\omega^{[d]} > \tilde{\omega}$ ,此时进行反向搜索,并减小步长,令 $\Delta\omega_d = \alpha \Delta\omega_0$ ,  $\alpha < 1$ , $\omega^{[d]} = \omega^{[d-1]} - \Delta\omega_d$ ,若 $J(\omega^{[d]}) < J(\omega^{[d-1]})$ ,迭代停止,输出 $J(\omega^{[d]})$ , $d=0,1,2 \dots$ , $\tilde{\omega} = \arg \max J(\omega^{[d]})$ 。若 $J(\omega^{[d]}) = J(\omega^{[d]})_{\max}$ ,迭代停止,输出 $\tilde{\omega} \omega^{[d]}$ 。

在利用线搜索得到 $\omega$ 的估计值后,沿着方位向构造距离空变的相位补偿项

$$\text{phase}|_{x_o, y_i} = \exp \left[ j \frac{2\pi f_c}{c} (Y_i - Y_o) \omega^2 \tau_m^2 \right] \quad (14)$$

将式(10)与式(14)补偿相位共轭相乘得

$$s'_{\text{krot}}(t_n, \tau_m) = s_{\text{krot}}(t_n, \tau_m) \cdot \text{conj}(\text{phase}|_{x_o, y_i}) = \sum_{i=1}^q A_i T_p \text{sinc} \left\{ a(\tau_m) T_p \left[ t_n + \frac{2\gamma}{c} (Y_i - Y_o) \right] \right\} \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi R_{\Delta i}}{c} a(\tau_m) t_n \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} (X_i - X_o) \omega \tau_m \right\} \quad (15)$$

忽略残余相位的影响,将式(14)变换到方位频域即可完成ISAR成像。

$$s'_{\text{krot}}(t_n, f_a) = \sum_{i=1}^q A_i T_p \text{sinc} \left\{ a(\tau_m) \cdot T_p \left[ t_n + \frac{2\gamma}{c} (Y_i - Y_o) \right] \right\} \cdot \text{sinc} \left\{ T_a \left[ f_a - \frac{2\omega f_c}{c} (X_i - X_o) \right] \right\} \quad (16)$$

式(16)为本文算法的成像表达式，目标散射点方位向聚焦位置为 $(X_i - X_0)$ ，距离向聚焦位置为 $(Y_i - Y_0)$ 。本文算法成像流程如图3所示。

### 4 仿真实验与实测验证

#### 4.1 仿真实验分析

为验证本文算法的有效性，本文首先进行成像仿真实验。仿真参数如表2所示。

图4(a)为传统方法处理的包络线，在包络相关对齐之后使用Keystone变换校正包络。图4(b)和图4(c)为其局部放大图，可以看到信号中仍然存在由转动分量引起的距离弯曲项，传统包络对齐法往往不考虑这一影响，导致包络对齐效果不理想。图5(a)为

本文算法处理的包络线，在Keystone变换操作完成后，本文所讲转速估计方法确定重采样尺度，算法经过7次迭代计算后，得到转速估计值为0.115 rad/s。然后对数据进行时间重采样后对齐目标包络线。图5(b)和图5(c)为其局部放大图，数据段与图5(b)和图5(c)相对应，可以看到距离空变的弯曲已经消除。

图6(a)和图6(b)分别为传统RD算法成像结果和机翼部分放大结果，由于传统算法不考虑距离空变的2次相位对成像结果的影响，导致聚焦效果差。图7(a)和图7(b)为本文算法成像结果和机翼部分放大结果，在估计得到目标转速后根据相对距离位置构造2次补偿函数对数据进行补偿，使得聚焦效果明显提升。

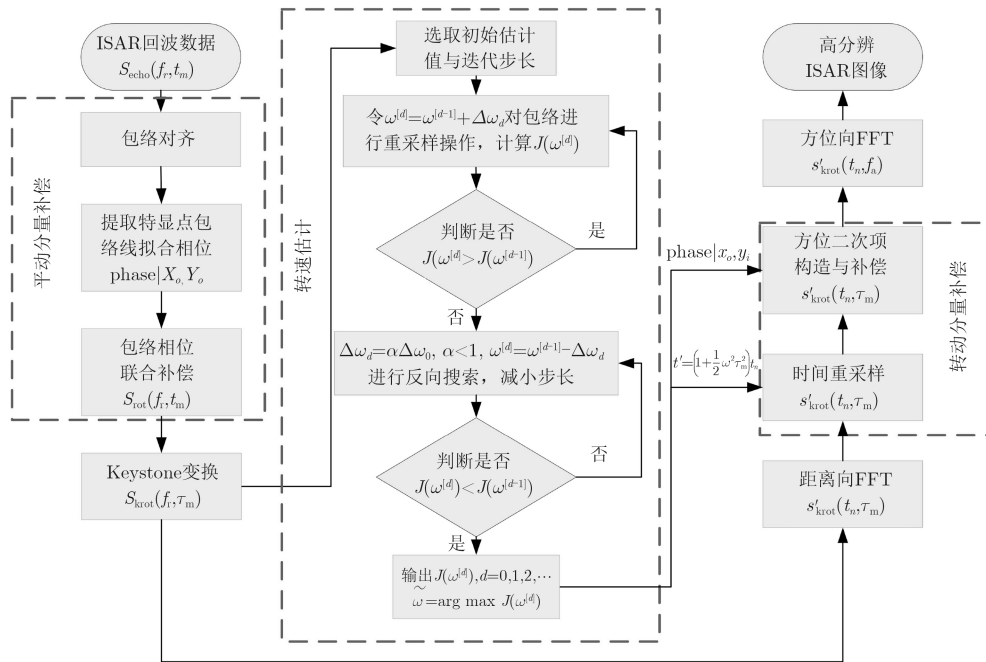


图3 算法流程图

表2 仿真数据参数

信号带宽	载频	脉冲宽度	脉冲重复频率	采样率	参考斜距	目标速度	观测时间
10 GHz	35 GHz	150 μs	6000 Hz	500 MHz	750 m	83 m/s	1.33 s

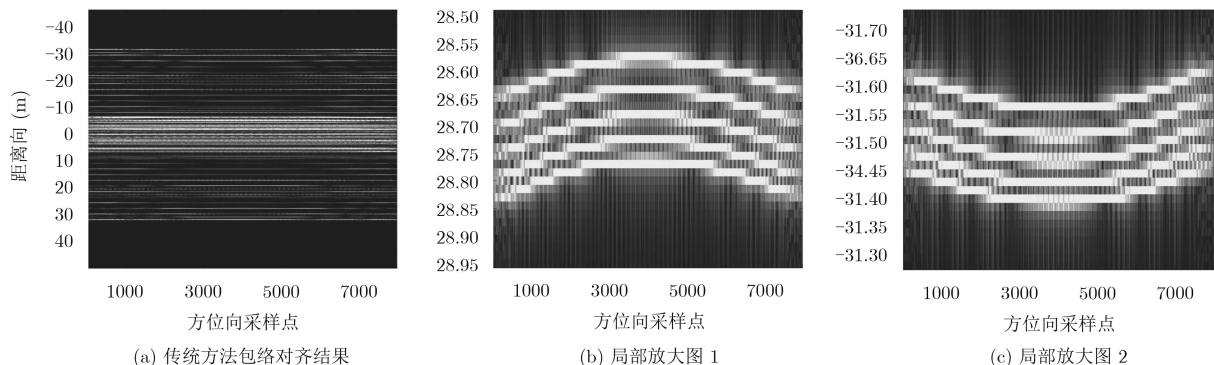


图4 传统方法包络对齐结果

## 4.2 实测数据验证

实验参数如表3所示, 目标为民航飞机。

图8(a)、图9(a)分别为传统算法和本文算法包络对齐结果, 图8(b)中的局部放大图中包络有明显的弯曲现象, 而经过本文算法处理后, 得到转速估计值为 $0.124 \text{ rad/s}$ , 经过时间重采样后相同区域的包络对齐结果如图9(b)所示, 可以看到距离空变的包络弯曲现象得到了校正。

图10(a)和图10(b)分别为传统RD算法成像结果和机翼部分放大结果, 图11(a)和图11(b)分别为本文算法成像结果和机翼部分放大结果。本文算法成像聚焦性能更好, 在飞机目标的机翼部分成像效果对比中可以看到: 传统RD算法因为忽略了转动相位对包络和相位的影响, 散射点严重展宽; 而本文算法有效地去除了目标转动对包络和相位的影响, 获得了更好的聚焦效果。

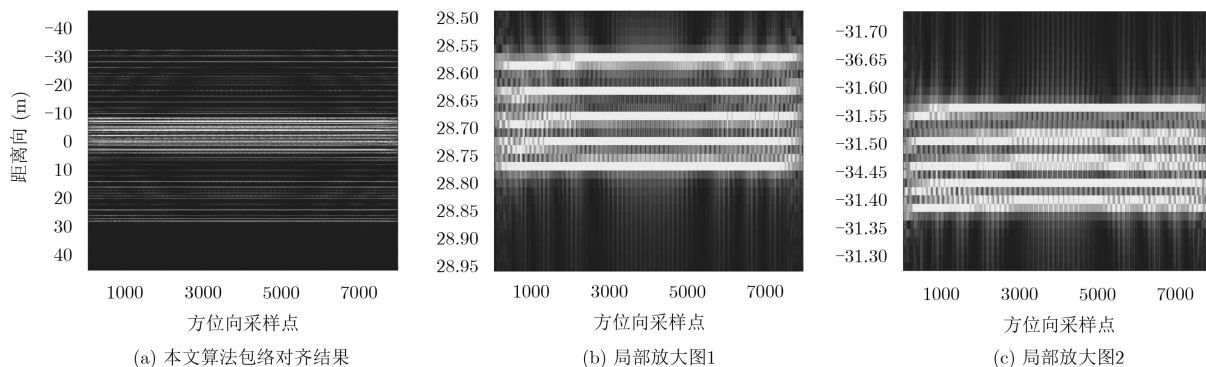


图5 本文算法包络对齐仿真结果

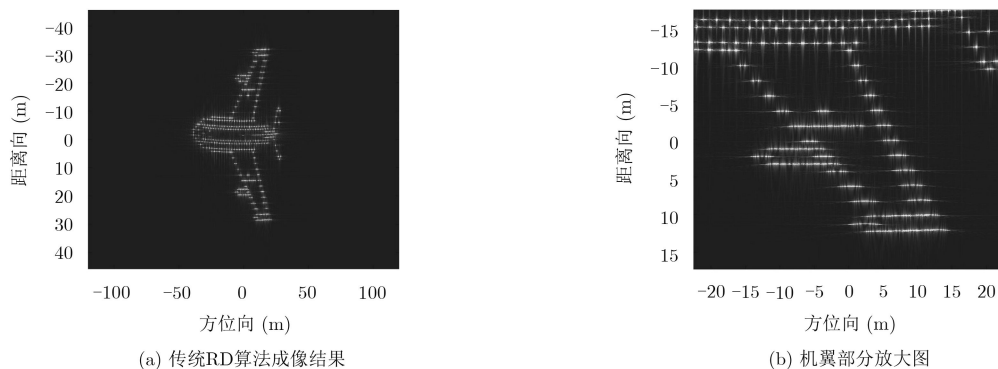


图6 传统算法成像仿真结果

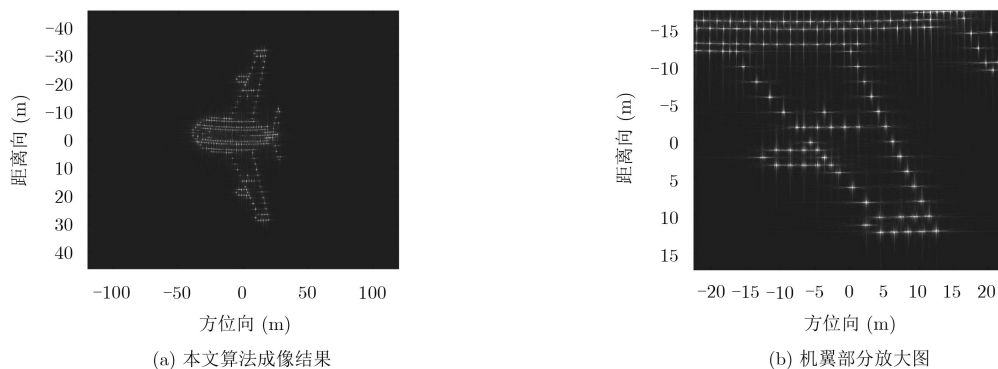


图7 本文算法成像仿真结果

表3 实测数据参数

信号带宽	载频	脉冲宽度	数据采样率	脉冲重复频率	观测时间
10 GHz	Ka波段	150 $\mu\text{s}$	500 MHz	6670 Hz	1.2 s

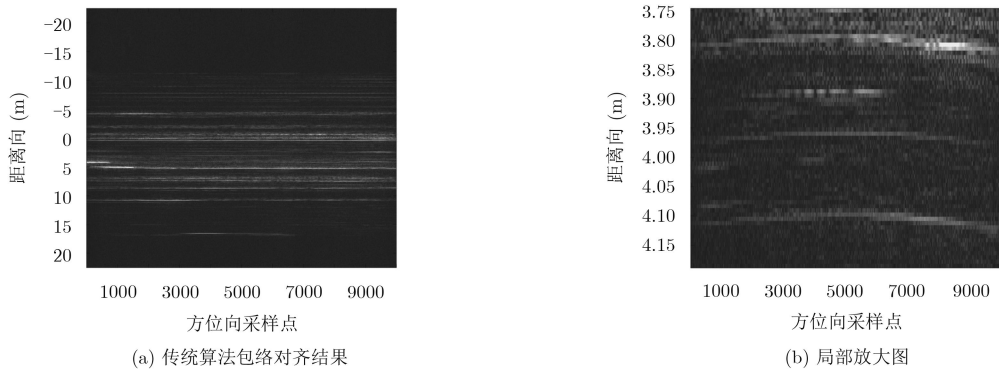


图8 传统算法包络对齐实测结果

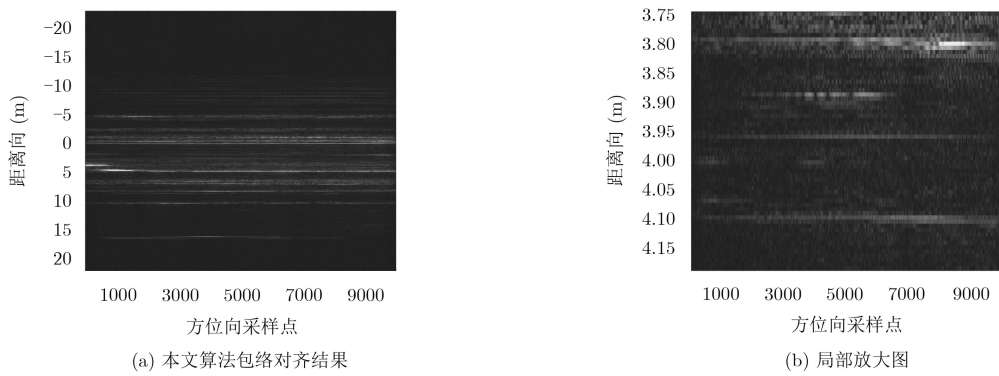


图9 本文算法包络对齐实测结果

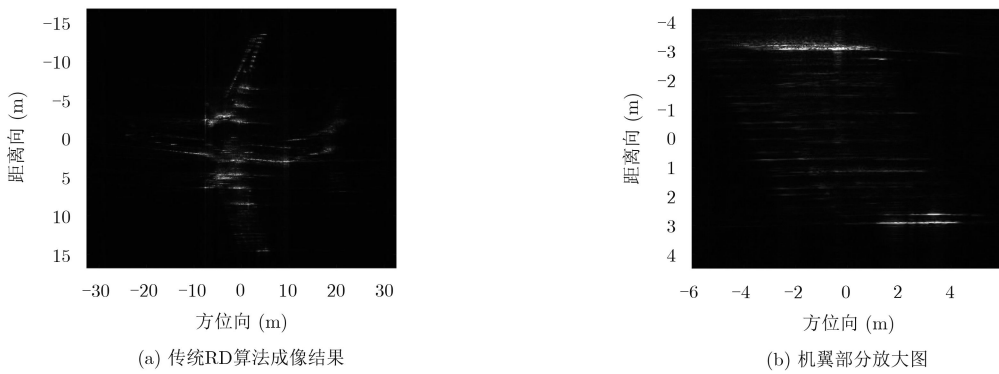


图10 传统RD算法成像实测结果

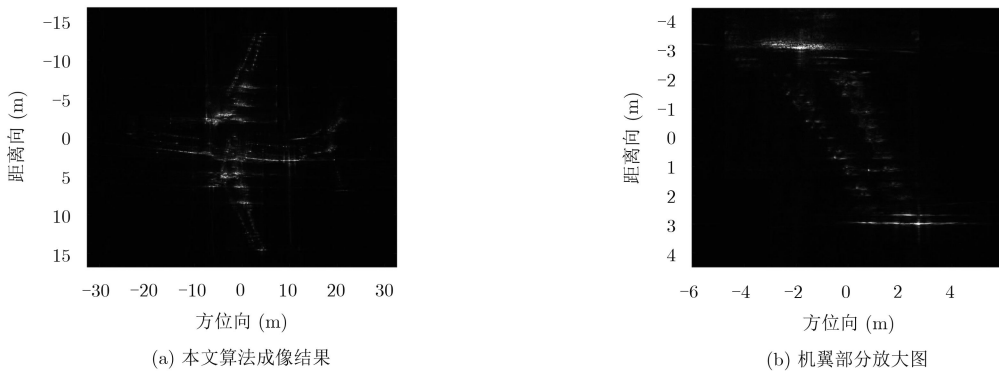


图11 本文算法成像实测结果

### 5 结束语

微波光子雷达具有超高2维分辨率，有着广阔

的应用前景。而在微波光子雷达信号处理中，由于信号带宽大、波长小，转动分量的影响不可忽略。

传统ISAR成像算法一般不考虑目标运动中的转动分量对回波包络和相位的影响,不适用于微波光子雷达成像。本文提出了更有效的ISAR成像算法,并且在ISAR目标转速估计方法上有所创新。该方法利用微波光子雷达距离分辨率高的特点,以包络相关值为目标函数迭代估计目标转速。然后利用得到的转速估计值有效校正了回波包络的弯曲现象,并对转动分量引起的方位2次相位作了有效补偿,获得了更好的聚焦效果。

### 参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 6–70.  
BAO Zheng, XING Mengdao, and WANG Tong. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005: 6–70.
- [2] 田跃龙, 刘志国. 微波光子雷达技术综述[J]. 电子科技, 2017, 30(5): 193–198. doi: [10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2017.05.052](https://doi.org/10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2017.05.052).  
TIAN Yuelong and LIU Zhiguo. A review of photonics-based radar techniques[J]. *Electronic Science and Technology*, 2017, 30(5): 193–198. doi: [10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2017.05.052](https://doi.org/10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2017.05.052).
- [3] PÉREZ D, GASULLA I, CAPMANY J, *et al.* Integrated microwave photonics: the quest for the universal programmable processor[C]. Proceedings of 2016 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, Newport Beach, USA, 2016: 144–145. doi: [10.1109/PHOSST.2016.7548751](https://doi.org/10.1109/PHOSST.2016.7548751).
- [4] WU Tingwei, ZHANG Chongfu, ZHOU Heng, *et al.* Photonic microwave waveforms generation based on frequency and time-domain synthesis[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 34372–34379. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2842250](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2842250).
- [5] GRODENSKY D, KRAVITZ D, and ZADOK A. Ultra-wideband microwave-photonic noise radar based on optical waveform generation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(10): 839–841. doi: [10.1109/LPT.2012.2188889](https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2188889).
- [6] XIAO Xuedi, LI Shangyuan, CHEN Boyu, *et al.* A microwave photonics-based inverse synthetic aperture radar system[C]. Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, USA, 2017: 1–2.
- [7] GUO Qingshui, ZHANG Fangzheng, WANG Ziqian, *et al.* High-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging based on a broadband microwave photonic radar[C]. Proceedings of 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics, Beijing, China, 2017: 1–3. doi: [10.1109/MWP.2017.8168724](https://doi.org/10.1109/MWP.2017.8168724).
- [8] CHEN C C and ANDREWS H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 2–14. doi: [10.1109/TAES.1980.308873](https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308873).
- [9] ZHU Daiyin, WANG Ling, YU Yusheng, *et al.* Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 204–208. doi: [10.1109/LGRS.2008.2010562](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.2010562).
- [10] 徐刚, 杨磊, 张磊, 等. 一种加权最小熵的ISAR自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1809–1815. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01153](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01153).  
XU Gang, YANG Lei, ZHANG Lei, *et al.* Weighted minimum entropy autofocus algorithm for ISAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1809–1815. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01153](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01153).
- [11] 符吉祥, 孙光才, 邢孟道. 一种大转角ISAR两维自聚焦平动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(12): 2889–2898. doi: [10.11999/JEIT170303](https://doi.org/10.11999/JEIT170303).  
FU Jixiang, SUN Guangcai, and XING Mengdao. A two dimensional autofocus translation compensation method for wide-angle ISAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2889–2898. doi: [10.11999/JEIT170303](https://doi.org/10.11999/JEIT170303).
- [12] 盛佳恋. ISAR高分辨成像和参数估计算法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2016: 61–76.  
SHENG Jialian. Study on ISAR high resolution imaging and parameter estimation techniques[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2016: 61–76.
- [13] 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](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4517004).
- [14] 王勇, 姜义成. 一种估计ISAR成像转角的新方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 521–523.  
WANG Yong and JIANG Yicheng. A new method for estimating the rotation angle of ISAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 521–523.
- [15] 张昆帆, 裴喜龙, 党同心, 等. 基于频谱包络自相关的ISAR转角估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(8): 1511–1516. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.08.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.08.11).  
ZHANG Kunfan, PEI Xilong, DANG Tongxin, *et al.* Estimating method for the rotation angle of ISAR image based on spectral envelope correlation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(8): 1511–1516. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.08.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.08.11).
- [16] SHENG Jialian, DUAN Jia, XING Mengdao, *et al.* Cross-range scaling combining motion compensation for ISAR imaging[C]. Proceedings of IET International Radar

- Conference 2013, Xi'an, China, 2013: 1–6. doi: [10.1049/cp.2013.0141](https://doi.org/10.1049/cp.2013.0141).
- [17] 陈倩倩, 徐刚, 李亚超, 等. 短孔径ISAR方位定标[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1854–1861. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01252](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01252).
- CHEN Qianqian, XU Gang, LI Yachao, *et al.* Cross-range scaling for ISAR with short aperture data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1854–1861. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01252](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01252).
- [18] 何兴宇, 童宁宁, 贺吉峰. 基于成像序列的弹道目标ISAR图像横向定标[J]. 激光与红外, 2014, 44(12): 1374–1378. doi: [10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.017).
- HE Xingyu, TONG Ningning, and HE Jifeng. Cross-range scaling of ISAR imaging for ballistic target based on image sequence[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(12): 1374–1378. doi: [10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.017).
- [19] KIM M, WU Guorong, YAP P T, *et al.* A general fast registration framework by learning deformation-appearance correlation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4): 1823–1833. doi: [10.1109/TIP.2011.2170698](https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2170698).
- [20] 许志伟, 张磊, 邢孟道. 基于特征配准的ISAR图像方位定标方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2173–2179. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01590](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01590).
- XU Zhiwei, ZHANG Lei, and XING Mengdao. A novel cross-range scaling algorithm for ISAR images based on feature registration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2173–2179. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01590](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01590).
- [21] LI Y, WU R, XING M, *et al.* Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2008, 2(6): 395–403. doi: [10.1049/iet-rsn:20070101](https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20070101).
- 杨利超: 男, 1993年生, 博士, 研究方向为逆合成孔径雷达成像。  
邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为雷达探测、雷达成像、运动目标检测成像。  
孙光才: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为新体制雷达成像、运动目标检测成像。