

类似虹膜轮廓曲线分割的 SAR 雷达成像技术

贾遂民, 王韞烨, 肖 汉

(郑州师范学院 信息科学与技术学院, 河南 郑州 450044)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)成像是跟踪探测机动目标的基础, 传统的 SAR 雷达成像基础采用数据融合和图像配准的雷达成像方案, 在获得具有相似测度的边缘轮廓特征时成像效果较好, 当运动目标边缘为断裂的非相似度特征时, 无法准确对快速运动目标成像. 引入虹膜边缘轮廓曲线分割技术, 提出一种基于虹膜边缘函数计算和区域灰度轮廓曲线分割的 SAR 雷达成像技术. 构建合成孔径雷达回波模型, 得到虹膜轮廓曲线分割的边缘函数的演化方程, 实现 SAR 雷达准确成像. 对 4 类高速飞行目标进行 SAR 成像仿真, 结果表明采用该算法能避免因距离色散和多普勒时变出现的成像散焦, 边缘轮廓特征能全面提取, 成像分辨率高. 在雷达目标识别等领域具有较好的应用性.

关键词: 虹膜分割; 雷达成像; 特征; 目标识别

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)09-0126-05

SAR Radar Imaging Technology Similar to Iris Contour Curve Segmentation

JIA Sui-min, WANG Yun-ye, XIAO Han

(School of Information Science and Technology, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging is the basis for tracking maneuvering target, the traditional radar imaging schemes are established based data fusion and image registration, when the non similarity characteristics of moving targets have fracture edge, the SAR imaging performance is bad for the fast moving target. The iris edge contour segmentation technique is introduced, a kind of SAR radar imaging method is proposed based on iris edge function calculation and region segmentation of gray level profile curve. The model of synthetic aperture radar echo is constructed, evolution equation of edge function of iris contour segmentation is obtained, and accurate SAR radar imaging is obtained. SAR imaging simulation is taken with 4 kinds of high-speed flight targets, the results show that the algorithm can avoid imaging defocusing resulted from the distance dispersion and Doppler time deviation, edge feature can be extracted comprehensively, imaging resolution is high. It has better application value in the field of radar target recognition.

Key words: iris segmentation; radar imaging; feature; target recognition

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像是空中机动目标探测和雷达目标识别等领域占有重要地位, 如何提高雷达成像的准确性, 实现高分辨 SAR 成像成为国内外雷达目标识别领域

研究的热点课题^[1].

SAR 雷达成像的难点在于如何有效提取完整的具有边缘轮廓曲线特征的目标表面信息, 传统的成像技术基础是采用数据融合和图像配准的雷达成像方案, 其优点是能客观直接地暴露目标的丰富结构信息特征, 结合采用带通滤波器活小波变换技术,

收稿日期: 2013-11-19; **修回日期:** 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(41171357); 河南省重点科技攻关项目(132102310003); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A520354); 郑州市科技攻关项目(131PPTGG419-2)

实现图像降噪滤波,得到能体现目标固有特征的多尺度特性,成像分辨率较好,但在运动目标边缘为断裂的非相似度特征时,由于激光误差相当大,不同的目标的材质、颜色、亮度会使激光光束散射,太阴暗的表面颜色会吸收激光光束而使反射光强度弱,太明亮的则会造成光束变为镜射式反射而非所需的散射模式,虽可由激光光源自动地调整功率改善,但无法准确对快速运动目标成像. 对此文献[2]中的算法进行了改进,引入 Gabor 幅值特征和相位特征,对其进行融合,改善镜射式反射造成的成像散射,提出一种 SAR 多尺度相位特征融合的雷达成像技术,算法在提取分块直方图特征时,不能对边缘断裂轮廓带进行有效提取,成像效果待改进;文献[3]中,王双喜等人引入信号检测的分数阶傅里叶变换 FrFT 理论,在波数域中进行测距校正和 IFT 变换,实现的 SAR 的成像,算法无法有效完成剩余方位的图像压缩,且计算复杂度大,识别能力不高.

事实上,随着生物识别技术的快速发展,虹膜组织结构在目标成像中具有独特的优势,引入人体眼组织的虹膜成像原理^[4],应用到合成孔径雷达成像中,具有很好的应用前景. 本文针对传统方法在 SAR 成像中出现的问题,结合虹膜分割及人眼成像中的高可靠性,把 SAR 雷达成像类比为与人眼的虹膜轮廓曲线分割成像,提出一种基于虹膜边缘函数计算和区域灰度轮廓曲线分割的 SAR 雷达成像技术,首先进行系统建模,构建雷达回波模型,分析对目标图像的多普勒特性,基于虹膜轮廓线分割计算边缘函数和曲线内外区域的灰度均值,设计了对机动目标的 SAR 雷达成像算法,最后通过仿真实验进行性能测试.

2 视觉图像采集与 SAR 回波模型

2.1 雷达目标图像采集

进行合成孔径雷达成像,实现视觉定位和目标探测与检测,首先是基于各种图像传感器数据的采集,目前,经常采用的图像传感器主要有以下几种:微光夜视仪、红外热像仪、TV、激光成像雷达、毫米波雷达、合成孔径雷达(SAR)、多光谱/超光谱成像仪等^[5-6]. 每种传感器的特点具体描述分别为:

(1)微光夜视仪. 主要优点是具有夜视功能,探测距离长,能够达到上千米. 缺点是分辨率低;

(2)红外热像仪. 主要优点是昼夜两用,探测距离几千米到几十千米,波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$. 缺点是系统

复杂,分辨率低;

(3)TV. 主要优点是处于可见光波段,可获得丰富的光色彩对比度、颜色和形状信息. 缺点是受天气影响较大;

(4)激光成像雷达. 优点是兼有测距、测速和成像三种功能,激光束很细,探测分辨能力强. 缺点是成像视觉效果差,色彩对比度低,颜色单调;

(5)毫米波雷达. 优点是全天候特性好,抗干扰性能好,分辨率较高. 缺点仍然是成像视觉效果差,色彩对比度低,颜色单调;

(6)合成孔径雷达. 优点是天线尺寸小,成像分辨能力高,可探测浅层地下和水下目标. 缺点是应用环境受限制,制约性很大;

(7)多光谱/超光谱成像仪. 主要优点是多个光谱谱段同时工作,图像信息融合处理,同时精确测量目标;可用于地形测绘、监测和分析等. 缺点暂无.

在进行 SAR 图成像处理需要基于以下几个原则:

(1)雷达成像时对目标图像的两个输入源信息需要提供尽可能相关的输入图像信息,如果两个传感器提供的图像相关性很差,例如不是一个地方的图像信息,图像内容不同,那么融合起来不但难度大,而且融合后的效果非常差;

(2)在雷达成像与图像融合过程中,需要避免引入任何的假象和矛盾,因为假象和矛盾会在图像融合过程汇总分散和误导观察者,同时使得图像后处理效果非常差.

(3)SAR 成像的过程,其实就是图像点元素信息输入输出信噪比的改善过程,为了得到更好的图像融合效果,需要在每张图像的输入源进行图像信噪比的改善,尽量抑制无关特征和噪声,从而有效提高图像融合效果.

2.2 合成孔径雷达回波模型构建

合成孔径 SAR 雷达系统在超视距成像过程中,会通过发射超宽带调频激光波束,通过波束形成实现指向性高分辨率成像, SAR 成像回波模型构建示意图如图 1 所示,图中,接收端所接收的信号为单个点源的回波,通过多个空间相近的点源回波的叠加构成 SAR 成像目标的回波模拟,即目标的建模.

假设接收合成空间雷达阵列为均匀线列阵,其发射的调频激光信号表示为

$$z(t) = \sum_{i=1}^p \int_{-\pi}^{\pi} a(\theta) s_i(\theta, \psi_i; t) d\theta + n(t) \quad (1)$$

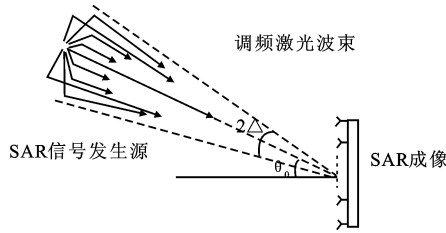


图1 SAR成像回波模型构建

式中, $s_i(\theta, \psi_i; t)$ 为第 i 个分布源的发射信号, 包含目标的方位信息及其他分布信息, ψ_i 是未知的参数向量, 表示为快速机动目标离雷达信号源的像谱峰分裂和展宽, 本文只考虑目标的方位及目标的扩展角度, 得到 ψ_i 是二维参数向量. $n(t)$ 为合成空间雷达信号的背景加性噪声,

均假设信号与噪声不相关, 得到雷达到目标参考点的初始距离为

$$b_i(\theta_i) = \int_{-\pi}^{\pi} a(\theta) g_i(\theta - \theta_i) d\theta \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, p$, p 为分布式目标个数, 假设信道为时不变信道, 即:

$$s_i(\theta, \psi_i; t) = s_i(\theta, \psi_i), \forall t \in R \quad (3)$$

由于脉冲持续时间很短, SAR 成像包络将出现时间上的展缩, 对 SAR 成像产生的图像更多是受到强脉冲干扰, 对强脉冲干扰的图像降噪索引, 一般分为线性滤波和非线性滤波两个方面, 本文构建基于非线性像点序列处理, 同时考虑到常规目标运动时具有较大的惰性, 构建雷达回波目标模型为

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) \sum_{n=1}^L \gamma_n(t) a(\theta + \tilde{\theta}_n(t)) + n(t) \\ &= s(t) v(t, \theta, \sigma_\theta) + n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $s(t)$ 是从分布源反射的信号, γ_n 是每一束信号的随机增益, $\tilde{\theta}_n$ 是相对于 DOA 的随机角度偏移. $\tilde{\theta}_n$ 的概率密度函数是 $p(\tilde{\theta}; \sigma_\theta)$, SAR 成像终端阵列接收信号协方差矩阵为

$$R_c = E[z(t) z(t)^H] = R_s(\psi) + R_n \quad (5)$$

其中

$p_{ij}(\theta, \theta'; \psi_i, \psi_j) = E[s_i(\theta, \psi_i) s_j(\theta', \psi_j)]$ 叫做角度互相关核, 它反映了不同角度回波信号之间的相关程度, 由于经过二值化的图像预处理, SAR 成像终端阵列坐标中所呈现的单点都不是正圆形. 所以本文的合成孔径雷达回波模型先计算出单点图形的 (X, Y) 上下边界, 再取中心点位置, 如果不同分布源之间的波达成分不相干, 则可进行距离向相位色散的分析, 从而得到回波信号多普勒特性, 综上模型

构建, 为 SAR 高分辨率成像奠定信号处理模型基础.

3 虹膜轮廓线曲线分割的提出及 SAR 成像实现

3.1 虹膜轮廓线曲线分割

本文把生物识别技术中的虹膜轮廓线曲线分割引入到雷达成像识别中, 对传统的成像技术进行改进, 把 SAR 雷达成像类比作人眼的虹膜轮廓曲线分割成像, 提出一种基于虹膜边缘函数计算和区域灰度轮廓曲线分割的 SAR 雷达成像技术, 基于合成孔径雷达回波模型构建, 定义雷达回波模型的虹膜能量函数为

$$\begin{aligned} E_{\text{ext}}(\varphi) &= \lambda L_g(\varphi) + v(I) A_g(\varphi) \\ &= \lambda \int_{\Omega} g(\nabla I) \sigma(\varphi) |\nabla \varphi| dx dy + \\ &\quad v \int_{\Omega} g(\nabla I) H(-\varphi) dx dy \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 图像梯度系数 λ, v 均为常数, 且 $\lambda > 0$, 定义成像面积变权系数表达式为

$$v(I) = c \cdot \text{sgn}(\Delta G_\sigma \times I) (|\nabla G_\sigma \times I|) \quad (7)$$

式中 $I(x, y)$ 为图像, $\text{sgn}(\cdot)$ 是符号函数, G_σ 是标准差为 σ 的几何活动轮廓区域函数, $\nabla G_\sigma \times I$ 是图像与边缘停止速度函数卷积后的梯度, 根据虹膜的先验知识, 虹膜结构为圆环状, 因此采用虹膜轮廓曲线分割方法对 SAR 成像的圆形约束的 CV 模型进行简化, 得到:

$$p_{ij}(\theta, \theta'; \psi_i, \psi_j) = p_i(\theta, \theta'; \psi_i) \delta_{ij} \quad (8)$$

这说明角度互相关核在 $i \neq j$ 时为零, SAR 成像在虹膜轮廓区间内的水平集函数为圆形方程, 图像背景与目标的权系数为一个连续函数

$$p_i(\theta, \theta'; \psi_i) \delta_{ij} = E[s_i(\theta, \psi_i) s_i^*(\theta', \psi_i)] \quad (9)$$

式(9) 也叫做第 i 个分布源的角度自相关核. 得到虹膜轮廓曲线分割的虹膜边缘函数演化方程:

$$\begin{aligned} \frac{dr_0}{dt} &= \\ &- \int_{\Omega} [\lambda_1 (u_0 - c_1)^2 - \lambda_2 (u_0 - c_2)^2] \delta(\varphi) \frac{1}{r_0} dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} &= \\ &- \int_{\Omega} [\lambda_1 (u_0 - c_1)^2 - \lambda_2 (u_0 - c_2)^2] \delta(\varphi) \frac{(x - x_0)}{r_0^2} dx dy \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{dy_0}{dt} =$$

$$-\int_{\Omega} [\lambda_1 (u_0 - c_1)^2 - \lambda_2 (u_0 - c_2)^2] \delta(\varphi) \frac{(y - y_0)}{r_0^2} dx dy \quad (12)$$

基于成像的原理,在虹膜几何活动轮廓模型下 SAR 测量空间范围内的任意一点,皆会对映成像得到的像平面上一个像素点实现曲线演化,选取空间中已知距离的特征点,经由分割外边缘进化拾取其图像的边缘特征,这些特征点在 SAR 雷达多普勒频移上会有其个别相对映的图像.若可以找出两者之间的关系,即可精确计算出两图像坐标点之间的距离,实现高精度成像.

合成孔径雷达成像模型类比与虹膜成像模型,当运动目标边缘为断裂的非相似度特征时,边缘轮廓曲线会准确停止在边缘目标上,然后演化分割内部轮廓,虹膜区域灰度轮廓曲线分割模型为下式所描述:

$$\begin{aligned} & \inf \{ E[c_1, c_2, \varphi | u_0] \} \\ &= \lambda_1 \int_{\Omega} (u_0 - c_1)^2 H(\varphi) dx dy + \\ & \lambda_2 \int_{\Omega} (u_0 - c_2)^2 (1 - H(\varphi)) dx dy + \\ & v(I) \int_{\Omega} g(\nabla u_0) H(-\varphi) dx dy \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 改进的 SAR 算法成像实现

运动目标边缘为断裂的非相似度特征时,无法准确对快速运动目标成像,本文采用一种基于虹膜边缘函数计算和区域灰度轮廓曲线分割的 SAR 雷达成像技术,二阶运动的机动目标为实包络线性调频信号,采用虹膜边缘轮廓曲线分割找出各散射点横向像平面的空间坐标与距离像谱峰分裂和展宽平面的图像坐标之间的对映关系,先通过已知大小的标准块(校正块)测量,将通过 SAR 回波模型的方位成像压缩图像先经二值化处理后得到坐标 (u, v) ,与对应的空间坐标位置 (X, Y) 值代入二次函数模型,以确定函数式中各个常数项 $(a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e_1, e_2, f_1, f_2)$ 的数值,再将其带回原式即可得到 SAR 成像函数模型.与实际运动目标的方位坐标进行比较,使误差降到最低,以找出最合适的函数模型

经过上述分析,本文算法流程为:

(1)求取快速机动目标离雷达信号源的像谱峰分裂和展宽,得到雷达到目标参考点的初始距离,进行分布式目标阵列模型构建;

(2)随机读入几幅 SAR 雷达目标图像,对图像进行预处理—高斯滤波器与原图像卷积,并采用高

斯滤波器进行去噪处理;

(3)计算雷达回波模型的虹膜能量函数 $E_{ext}(\varphi)$ 和边缘函数 g ;

(4)设置初始化水平集函数和图像梯度权系数的初始参数值 r_0, x_0, y_0 ;

(5)计算虹膜轮廓曲线内外区域的灰度均值 c_1, c_2 ,得到几何活动轮廓区域函数,实现图像分割;

(6)对虹膜边缘函数的演化方程进行迭代计算,对分离出的各散射点横向像作变坐标处理,得到方位成像结果;

(7)重复步骤(5)、(6),当活动轮廓曲线停止演化或超过设置迭代时间时,终止,最后得到 2 维 SAR 成像结果.

4 仿真实验

采用本文算法和经典的 SAR 成像算法机载合成孔径雷达的点目标进行成像仿真实验,仿真平台建立在 Greco 电磁仿真软件基础上,实验对象为 4 类高速空中飞行目标,采用本文提出的改进的 SAR 雷达成像方法对该 4 类飞机目标进行超视距雷达成像实验.实验中有两个分布式信号源,中心方位角分别为 $2^\circ, 4^\circ$;扩展角度分别为 $1^\circ, 2^\circ$,接收信号为单频信号,环境噪声简化为加性白噪声,目标的角信号分布函数同为高斯分布,信噪比为 5 dB,阵元数目为 20,合成孔径雷达成像的接收阵为 8 元的均匀列阵,阵元间距为单频信号的半波长的线性调频信号,中心频率的半波长为 $\lambda=1.3$,其他实验参数见表 1.

表 1 雷达仿真参数表

参数	数值
发射信号带宽/MHz	$B=120$
发射信号时宽/ μs	$T_p=1.32$
发射载频/GHz	$F_c=1.3$
飞机飞行速度/ $m \cdot s^{-1}$	$v=180$
SAR 雷达分辨率/m	1.0×1.0
合成孔径长度/m	$L_s=300$
虹膜区域灰度中心斜距/km	$r_0=10$
目标成像斜视角/ $^\circ$	$\theta=15$

仿真实验中,通过发射超宽带调频激光波束,采用波束形成实现指向性高分辨率成像,通过多个空间相近的点源回波的叠加构成 SAR 成像目标的回波模拟,发射的调频激光信号,构建合成孔径雷达回波模型,在第 1 个阵元的采样得到的 SAR 回波信号波形如图 2 所示.

应用阵元域的波束形成方法,对上述采样得到的

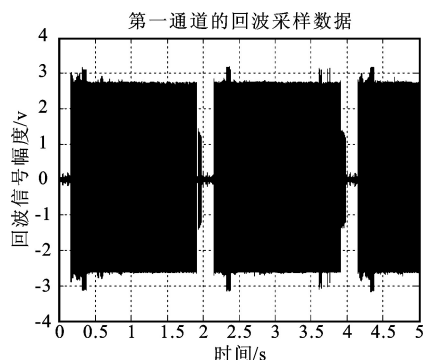


图2 雷达回波信号波形

雷达回波信号进行预处理,采用高斯滤波器进行去噪处理,采用 SAR 角度扫描,计算得到计算雷达回波模型的虹膜能量函数,得到扫描结果如图 3 所示。

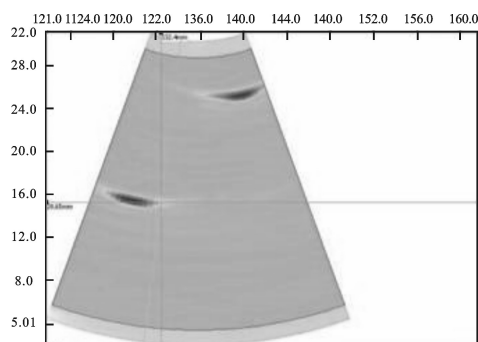


图3 阵元域角度扫描成像

在上述进行阵元域角度扫描成像的基础上,进行成像实现,得到 4 类高速飞行目标的 SAR 成像结果如图 4 所示。分析结果可见,采用本文方法进行 SAR 成像,能避免因距离色散和多普勒时变出现的成像散焦,单个点目标聚焦良好,分辨率较高。

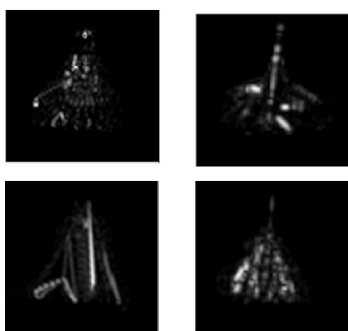


图4 SAR 雷达成像结果

采用本文方法和文献[2]中算法进行 SAR 成像效果对比,得到两种方法下对飞机的边缘轮廓曲线特征点的提取和成像仿真结果如图 5 所示,从图对比分析可见,采用本文方法成像,能完整提取目标的边缘轮廓曲线,没有出现散焦,特别是当运动目标边缘含有断裂的非相似度特征时,也能得到准确的成

像结果,能实现对目标的高分辨 2 维成像。

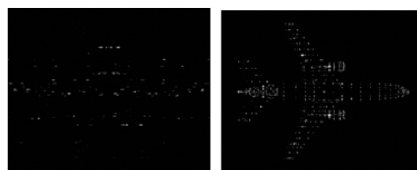


图5 两种方法对同一目标 SAR 成像轮廓点提取

为定量刻画成像性能,采用 PSLR 和 ISLR 两个典型的图像评价指标对两种算法的成像性能进行对比,得到对比结果见表 2,分析可见,采用本文呢算法能获得较好的峰值信噪比,成像品质比传统方法具有明显改善。

表2 成像性能定量评价表

算法	PSLR/dB	ISLR/dB
文献[2]方法	-15.782	-24.897
本文方法	-19.898	-32.908

5 结束语

本文结合生物识别技术中的虹膜成像原理,把 SAR 雷达成像类比作人眼的虹膜轮廓曲线分割成像,提出一种基于虹膜边缘函数计算和区域灰度轮廓曲线分割的 SAR 雷达成像技术,在复杂飞行环境下对 4 类快速机动空中目标进行成像实验,得出本文方法能完整提取目标的边缘轮廓曲线,避免了散焦现象,特别适用于边缘轮廓含有断裂的非相似度特征的目标 SAR 成像,成像品质相比传统方法具有明显提升,研究成果在雷达成像和目标识别等领域具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang L, Feng L, Wu M. AT-Mine: An efficient algorithm of frequent Itemset mining on uncertain dataset [J]. Journal of Computers, 2013, 8(6): 1417-1426.
- [2] 王芳,盛卫星,马晓. 基于 Gabor 幅值特征和相位特征相融合的 ISAR 像目标识别[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1813-1819.
- [3] 王双喜,谭鸽伟. 一种基于 FrFT 的波数域 SAR 成像算法[J]. 现代雷达, 2013, 35(8): 43-49.
- [4] 徐效文,张荷萍. 融合局部与全局特征提取的虹膜识别方法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(11): 4378-4380.
- [5] 刘美莲,李爽. 远距离弱小目标视觉测量系统探测能力模型研究[J]. 科技通报, 2012, 28(8): 177-180.
- [6] 杨全海,张志毅. 基于目标轮廓分割的图像卡通风格渲染仿真分析[J]. 计算机仿真, 2014, 1(31): 224-227.

(下转第 134 页)

