

一种用于单脉冲成像的自聚焦算法

吴 迪¹, 杨成杰¹, 朱岱寅¹, 沈明威²

(1. 南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 江苏南京 210016; 2. 河海大学计算机与信息学院, 江苏南京 211100)

摘 要: 本文针对单脉冲成像技术在实际处理中, 鉴角曲线误差引起的方位分辨率下降问题, 提出了一种用于单脉冲成像的自聚焦算法. 算法通过迭代, 自动从雷达接收数据中挑选孤立强散射点回波信号精确估计实际鉴角曲线, 将其用于单脉冲成像处理中, 实现图像方位自聚焦. 仿真及实测数据处理结果表明, 该方法能够有效降低测角误差对成像效果的影响, 且对多数地貌场景数据具备鲁棒性, 是一种实际可行的单脉冲成像自聚焦算法.

关键词: 单脉冲成像; 雷达成像; 前视成像; 自聚焦

中图分类号: TN958.4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)08-1962-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.08.027

An Autofocusing Algorithm for Monopulse Imaging

WU Di¹, YANG Cheng-jie¹, ZHU Dai-yin¹, SHEN Ming-wei²

(1. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 2. College of Computer & Information Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: To overcome the deterioration of azimuth resolution caused by errors of monopulse response curve (MRC) in practical processing, this paper proposes an autofocusing algorithm for monopulse imaging technique. By applying iterative steps, this algorithm automatically extracts the echo signals of isolated strong scatterers from the received data, and employs them to accurately estimate the actual MRC. The estimated curve is then used in the procedure of monopulse imaging to autofocus the image in azimuth. As is verified by simulation and experimental results, this algorithm can effectively reduce the impact of MRC errors on monopulse imaging and is robust to most of the ground scenes, making it feasible in practical processing.

Key words: monopulse imaging; radar imaging; forward-looking imaging; autofocusing

1 引言

为获取二维高分辨图像, 运动平台雷达往往采用合成孔径雷达 (SAR) 技术^[1,2]或多普勒波束锐化 (DBS) 技术^[3]实现成像. 然而, 现有的 SAR 与 DBS 成像无法覆盖飞行路线正前方, 形成所谓成像“盲区”. 而前视区域对于运动平台来说, 恰恰是一个极为重要、敏感的区域, 此类区域可视程度的降低, 无疑是雷达成像技术的一个重要缺憾.

针对这种情况, 各国研究者陆续开展了前视成像的研究工作, 取得了一些具有重要价值的成果. 主要采用的方法包括: (1) 实波束成像技术^[4], 该方法是早期雷达采用的成像方法, 方位分辨率完全受限于波束宽

度, 但近些年研究者们将一些新概念引入该成像过程, 使成像效果得到提升^[5,6]; (2) 视景增强扇区成像雷达 (SIREV)^[7,8], 在上世纪末由德国宇航中心 (DLR) 提出, 其采用前视阵列天线系统实现飞行路线正前方扇形区域的高分辨率成像; (3) 双基地 SAR 前视成像^[9,10], 将发射机和接收机分置在不同运动平台上, 通过发射与接收平台的不同飞行方向实现前视成像, 具备高分辨的特点; (4) 基于解卷积理论的实孔径前视成像^[11,12], 该方法通过解卷积的思想获取有关目标的准确信息, 从而提高图像方位分辨率; (5) 单脉冲成像技术^[13,14], 将天线扫描与单脉冲测角相结合, 利用测角改善图像质量, 得到更为清晰的雷达图像. 文献[15]对现有前视成像算法进行了较为全面的总结.

收稿日期: 2015-01-13; 修回日期: 2015-07-31; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61301212, No. 61201459); 航空科学基金 (No. 20132052030); 中国博士后科学基金 (No. 2012M511750); 江苏省博士后科研资助计划 (No. 1301027B)

在上述方法中,单脉冲成像具备系统结构复杂度低、实时性强、对载机飞行航迹无特殊要求等优点,是一种实际可行的前视成像方案.从其信号处理流程来看^[13,14],单脉冲测角是其中的一个关键环节,测角精度的高低直接影响方位清晰度改善效果.然而,作为一种典型的多通道系统,单脉冲雷达在实际处理中,不同接收通道间的误差不可避免,而该误差直接导致了实际鉴角曲线与设计值的偏差,进而影响成像效果.

针对这种情况,本文提出了一种用于单脉冲成像的自聚焦算法,该算法通过迭代步骤,能够从回波数据中准确估计实际鉴角曲线,克服测角误差对成像效果的影响,实现图像方位自聚焦.本文通过仿真实验以及多组实测数据对该方法进行验证,结果表明,该算法在实际处理中能够有效改善由测角误差导致的图像质量下降,同时具备较强的鲁棒性,对多数地貌有效.

2 单脉冲成像技术

2.1 单脉冲雷达鉴角曲线

单脉冲是火控、跟踪雷达系统中常用的技术之一,根据不同的和、差波束形成方式,目前较为常用的单脉冲包括比幅和比相两种模式^[16].以比相模式为例,令 $\sum(\theta)$ 、 $\Delta(\theta)$ 分别表示和、差波束天线方向图,在理想情况下,二者关系可表示为:

$$\Delta(\theta) = \sum(\theta) \cdot j \tan(k\pi\theta) \quad (1)$$

其中, j 为虚数单位, θ 表示相对于天线波束中心的方位角(方位偏轴角), k 为一常数,与系统参数以及天线俯仰角等因素有关.令

$$M(\theta) = \text{Im} \left\{ \frac{\Delta(\theta)}{\sum(\theta)} \right\} \quad (2)$$

其中, $\text{Im}\{\cdot\}$ 为取虚部运算.则由式(1)可知, $M(\theta)$ 与 θ 之间的关系可表示为:

$$M(\theta) = \tan(k\pi\theta) \quad (3)$$

上式揭示了单脉冲天线的测角原理,给出了单脉冲和、差比与波束中目标偏轴角的关系,故往往称为单脉冲雷达的鉴角曲线.

2.2 单脉冲成像算法信号处理流程

单脉冲成像技术采用单脉冲天线接收信号,将方位角估计与天线扫描相结合,通过测角对回波信号的方位信息进行提取,通过波束在成像区的扫描实现信号积累,以提高成像区特征目标方位精度的方式实现整个图像的方位分辨效果的改善.其信号处理的主要步骤包括:

(1) 和、差通道数据距离脉冲压缩.

(2) 和、差两路数据构造单脉冲和差比,对每个距离-脉冲单元信号的方位偏轴角进行估计,并根据波束

中心线瞬时指向推算实际方位.

(3) 根据每个距离-脉冲单元信号方位信息的估计值在距离-方位域对信号进行积累,获取距离-方位图像.

(4) 根据惯性导航信息及数据采集空间几何关系,将距离-方位图像转换为地面图像.

文献[13]、[14]对上述步骤均进行了详细描述,这里不在赘述.可以看出,该算法可以逐脉冲处理数据,系统资源占据量小,易于工程实现.

2.3 测角误差对分辨效果的影响

由单脉冲成像算法的处理流程可知,提高方位分辨率的核心步骤即为方位角估计,故测角中出现的误差,将直接影响强散射点信号在其真实位置的积累,导致图像方位分辨效果下降.

作为一种典型的多通道接收系统,单脉冲雷达在实际中必然存在通道误差,该误差会直接导致实际鉴角曲线与设计值之间的差异.此外,天线姿态在飞行过程中变化(如载机俯冲、横滚时)等因素,同样会导致等效鉴角曲线发生变化.此时,若采用理想的鉴角曲线(设计值)对数据进行处理,则测角误差必然会引起图像在方位上的“散焦”.

为验证这一现象,我们在 20dB 信噪比条件下,产生单个点目标的和、差波束雷达回波仿真数据,并对其进行单脉冲成像处理.产生回波信号时采用的鉴角曲线由公式(3)在 $k=30$ 时计算所得.随后,分别采用三条不同的鉴角曲线对数据成像,三条曲线分别在 $k=30$ 、 $k=31.5$ 及 $k=33$ 时由公式(3)计算所得.图 1 给出了成像方位剖面图(1000 次蒙特-卡洛平均),图中每条曲线均对最大值进行了归一化.可以看出,当成像鉴角曲线存在误差时,点目标在方位向明显“散焦”,分辨效果随误差的增加逐步下降.

3 单脉冲成像自聚焦算法

由上文可知,造成单脉冲成像方位分辨效果下降

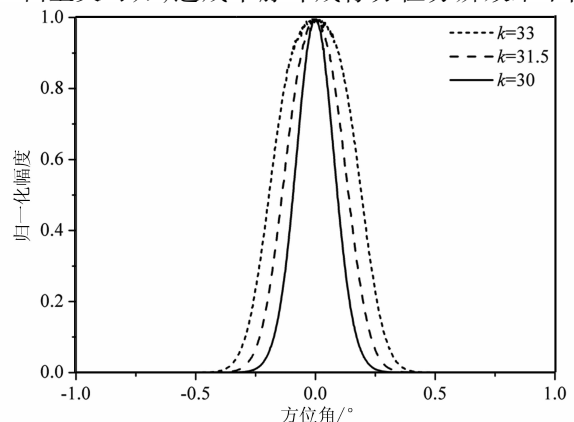


图1 鉴角曲线准确与存在误差时点目标单脉冲成像仿真结果

的主要因素为鉴角曲线误差,因此,若能够从数据中估计出实际鉴角曲线,并将其运用于成像处理中,则可显著改善方位散焦.众所周知,在天线扫描过程中,雷达数据的录取过程在方位向相当于天线方向图与地面散射系数的卷积.对于波束中一点目标,其和、差波束回波数据在慢时间域受和、差天线方向图调制,可由回波数据精确计算天线方向图并由此获取鉴角曲线.

图2给出了方位扫描模式下和、差波束天线数据录取二维空间几何关系示意图.设数据录取过程中,由和波束发射信号并由和、差波束分别接收,波束以角速度 v_θ 匀速扫过点目标,令 t 表示慢时间,并以波束中心线与点目标重合时刻为时间零点 ($t = 0$),则随着波束扫描,点目标的瞬时方位偏轴角可表示为:

$$\theta(t) = -v_\theta t \quad (4)$$

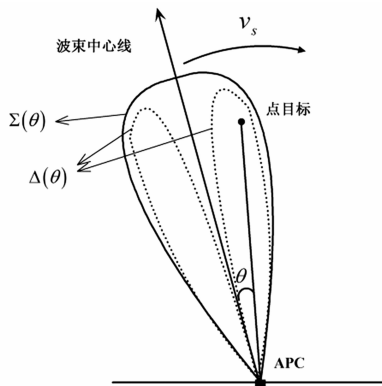


图2 扫描模式下和、差波束天线数据采集空间几何关系图

为便于讨论,暂不考虑回波信号距离维信息,则点目标和、差波束方位向回波信号 $S(t)$ 、 $D(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} S(t) = A\Sigma^{\circ}(-v_\theta t) \\ D(t) = A\Sigma[-v_\theta t]\Delta[-v_\theta t] \end{cases} \quad (5)$$

其中, A 为点目标散射系数.由上式可知,点目标回波数据中精确包含了天线方向图调制信息,可直接由其计算鉴角曲线,即

$$M(\theta) = \text{Im} \left\{ \frac{D(-t)}{S(-t)} \right\} \quad (6)$$

受这一点启发,本节提出了一种用于单脉冲成像的自聚焦算法.该算法通过迭代运算,自动从回波数据挑选类似于点目标的孤立强散射点信号,将其用于实际鉴角曲线的估计中,并将最终估计所得的曲线用于成像处理中,实现方位自聚焦.算法主要步骤如下:

(1) 设距离脉压后的和、差通道回波信号分别为 $S(r, t)$ 、 $D(r, t)$, 其中 r 表示距离门, t 表示慢时间.搜索和波束数据每个距离门中能量最大值所在位置 $t_{\max}(r)$, 以其为中心,提取该距离门在慢时间区间 $\left[t_{\max}(r) - \frac{T_\beta}{2}, t_{\max}(r) + \frac{T_\beta}{2} \right]$ 内和、差波束回波数据.其

中, T_β 表示天线扫过单个波束主瓣宽度的时间,即

$$T_\beta = \frac{\beta}{v_\theta} \quad (7)$$

其中, β 表示波束主瓣宽度.令 $s(r, \bar{t})$ 、 $d(r, \bar{t})$ 分别表示和、差波束在距离门 r 所提取的数据,则

$$\begin{cases} s(r, \bar{t}) = S(r, t_{\max}(r) + \bar{t}) \\ d(r, \bar{t}) = D(r, t_{\max}(r) + \bar{t}) \end{cases}, \quad -\frac{T_\beta}{2} \leq \bar{t} \leq \frac{T_\beta}{2} \quad (8)$$

该数据将用于鉴角曲线的估计,故称其为初始样本数据.

(2) 由样本数据平均的方法对鉴角曲线进行估计,该过程可表示为:

$$\tilde{M}(\theta) = \frac{\sum_r d(r, -\bar{t})s^*(r, -\bar{t})}{\sum_r s(r, -\bar{t})s^*(r, -\bar{t})} \quad (9)$$

其中, $\sum_r \cdot$ 表示对所有距离门求和,上标“*”表示共轭运算.

(3) 将 $\tilde{M}(\theta)$ 作为鉴角曲线,采用单脉冲成像算法对各距离门样本数据进行成像,结果记为 $I(r, \bar{t})$.若某距离门样本数据包含孤立强散射点的回波信号,且鉴角曲线准确,则成像结果在方位向应类似于冲激函数,即在目标所处方位位置出现峰值,且能量高度集中于峰值附近.因此,成像结果峰值附近区域(峰值区)与其他区域的能量分布情况可作为依据,对样本进行筛选,保留孤立强散射点数据.

(4) 在每个距离门成像结果中,搜索峰值所在位置 $\bar{t}_{\max}(r)$, 并设定峰值区对应的时间范围宽度 T_p (初始值可设为样本数据时间长度的一半或四分之一).分别计算各距离门成像结果在峰值区的能量 $P_1(r)$ 以及其他区的能量 $P_2(r)$, 将二者比值 $\eta(r) = \frac{P_2(r)}{P_1(r)}$ 与预先设定的门限 η_T (一般在 0.1 ~ 0.3 间取值) 比较,判断该样本是否包含孤立强散射点.此过程可表示为如下假设检验问题:

$$\begin{matrix} H_1 \\ \eta(r) \leq \eta_T \\ H_0 \end{matrix} \quad (10)$$

其中, H_1 、 H_0 假设分别表示该样本数据“包含孤立强散射点”和“不包含孤立强散射点”.

(5) 从样本数据中剔除判断结果为 H_0 的距离门,对判断结果为 H_1 的距离门,采用步骤(1)的方法重新提取样本数据.由于成像结果中的最大值反映了散射点的真实位置,故需根据样本成像结果中峰值位置 $\bar{t}_{\max}(r)$ 修正提取数据的中心位置 $t_{\max}(r)$, 即

$$t'_{\max}(r) = t_{\max}(r) + \bar{t}_{\max}(r) \quad (11)$$

其中, $t'_{\max}(r)$ 表示提取数据时新的中心位置.

(6)对新提取的样本数据重复步骤(2)~(5)形成迭代过程,每次迭代降低步骤(4)中峰值区时间宽度 T_p ,当 T_p 小于预先设定值时(即所选数据的单脉冲成

像结果能够良好聚焦),迭代终止,获得最终的鉴角曲线估计值.将该鉴角曲线用于整个数据的单脉冲成像处理,从而改善由测角误差导致的图像质量下降.

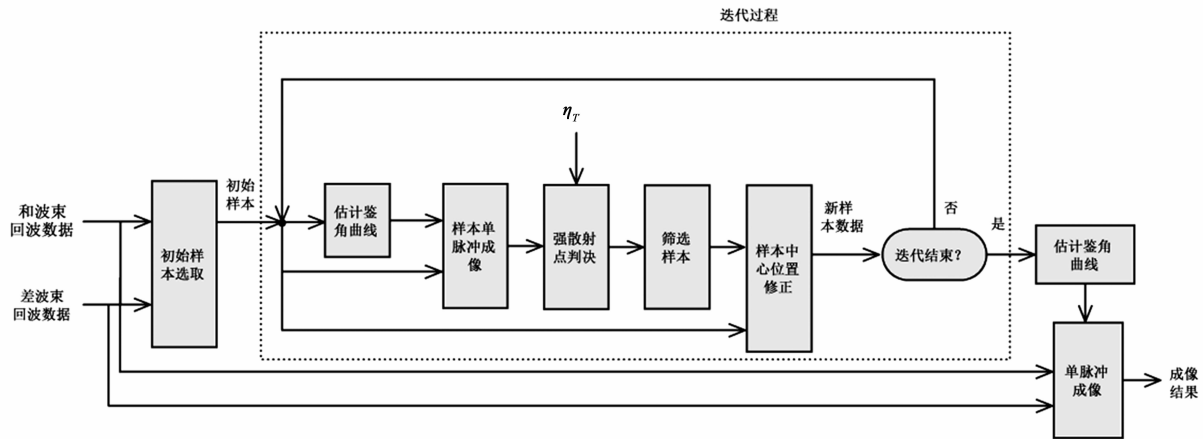


图3 单脉冲成像自聚焦算法信号处理流程图

图3给出了该算法的信号处理流程图.该算法可在鉴角曲线完全未知的情况下由回波数据自动估计鉴角曲线,实现单脉冲成像,且对不同数据具备较强的鲁棒性.

4 仿真实验结果

本节通过两组仿真数据对上节所提算法进行验证,两组实验均采用了机载和、差波束单脉冲雷达前视成像模型,选用的主要系统参数相同(如表1所示),地面场景回波由两幅不同地貌的高分辨率SAR图像生成.

表1 仿真实验系统参数列表

参数名称	参数值
雷达波长	0.03m
和波束方位向主瓣宽度	2.4°
波束方位向扫描速度	150°/s
波束扫描范围(相对于飞行方向)	-20°~20°
系统带宽	500MHz
脉冲重复频率	15kHz
载机地速	80m/s
成像区中心距离	1.5km

第1组实验的仿真场景为建筑区域,其SAR图像如图4所示.图5中虚线给出了产生仿真数据的鉴角曲线,为标准比相单脉冲鉴角曲线.对该数据进行自聚焦

处理,处理中, η_r 设为0.2, T_p 的初始值设为样本时间长度的1/4,每次迭代减小一半,最后一次迭代时 T_p 值为一个脉冲重复周期(PRI).图6给出了每次迭代样本数据单脉冲成像结果的方位剖面图,由所有样本平均所得.可以看出,随着迭代过程的进行,样本数据的成像结果逐步接近“点目标”,最后一次迭代时,成像结果约为波束主瓣宽度的1/15.最终鉴角曲线的估计结果如图5中实线所示,可以看出,估计值与真实值差距很小,精度较高.图7给出了自聚焦处理的单脉冲成像结果.

第2组实验的仿真场景为机场跑道区域,其SAR图像如图8所示.图9中虚线给出了仿真数据采用的鉴角曲线,与实验1不同,该鉴角曲线并非由公式(3)生成的标准比相鉴角曲线,其目的是用于验证算法在实际处理中对不同鉴角曲线的鲁棒性.图10给出了每次迭代时,样本数据成像结果的方位剖面图.最终鉴角曲线的估计结果如图9中实线所示,可以看出,对于非标准、非对称的鉴角曲线,该算法同样具备较高的估计精度.图11给出了自聚焦处理的成像结果.

5 实测数据结果

本节,我们对两组机载单脉冲雷达实测数据进行处理,主要系统参数如表2所示.两组数据在录取时,实际鉴角曲线与设计值均存在一定的误差,直接采用理论曲线进行单脉冲成像的结果在方位向清晰度上有待改善,从而能够对本文自聚焦算法进行验证.

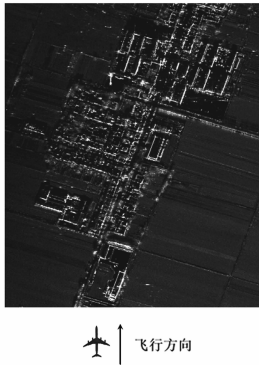


图4 地面仿真场景SAR图像及回波数据生成几何关系示意图(实验1)

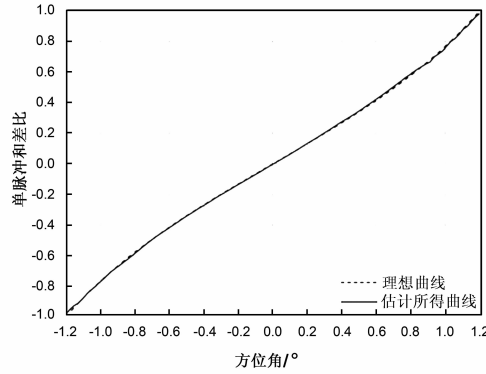


图5 单脉冲鉴角曲线(实验1)

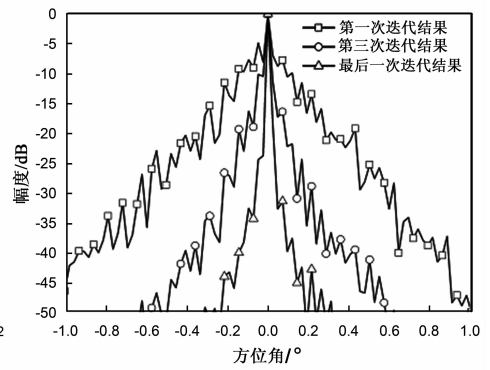


图6 不同迭代过程样本数据单脉冲成像结果距离平均图

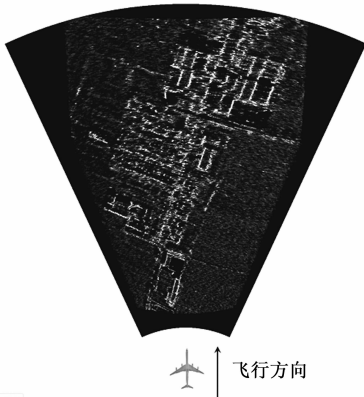


图7 单脉冲成像结果(实验1)

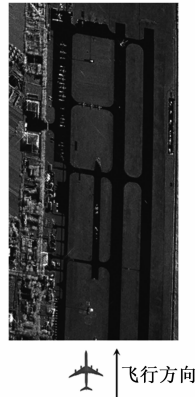


图8 地面仿真场景SAR图像及回波数据生成几何关系示意图(实验2)

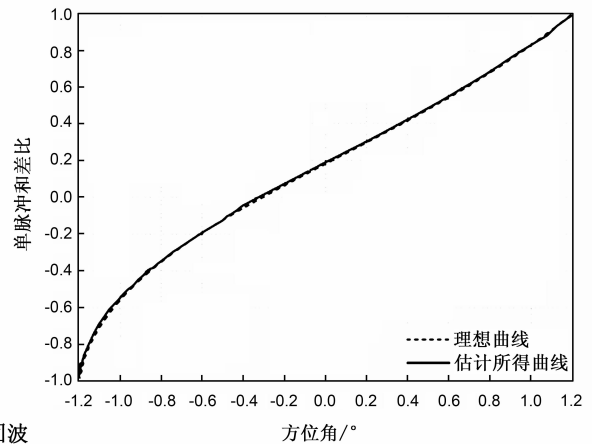


图9 单脉冲鉴角曲线(实验2)

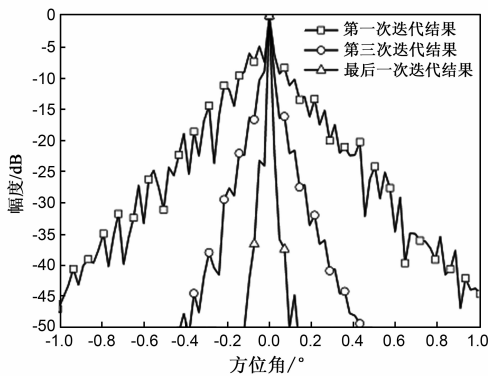


图10 不同迭代过程样本数据单脉冲成像结果距离平均图

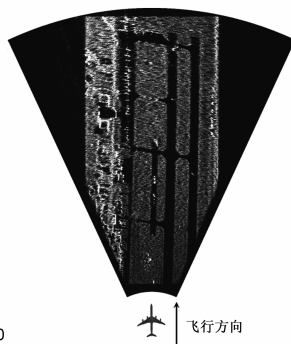


图11 单脉冲成像结果(实验2)

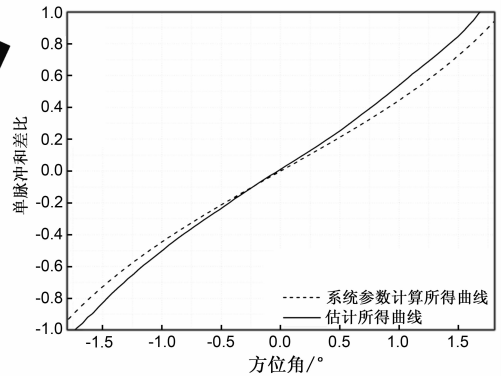


图12 单脉冲鉴角曲线(第一组实测数据)

表 2 实测数据系统参数列表

参数名称	第一组数据参数值	第二组数据参数值
雷达波长	X 波段	Ku 波段
和波束方位向主瓣宽度	3.8°	3°
波束方位向扫描速度	15°/s	200°/s
波束扫描范围 (相对于飞行方向)	-30° ~ 30°	-10° ~ 10°

续表

参数名称	第一组数据参数值	第二组数据参数值
系统带宽	2MHz	500MHz
脉冲重复频率	400Hz	20kHz
载机地速	90m/s	60m/s
载机高度	6km	350m
波束俯视角	6.9°	10°
成像区中心点距离	50km	2km

第一组数据由某型 X 波段机载单脉冲雷达录取,成像场景为海洋区域. 图 12 中实线和虚线分别给出了估计所得以及由系统参数计算所得的鉴角曲线,可以看出,两者存在一定的差异. 图 13 给出了经过自聚焦处理后的单脉冲成像结果,为了和自聚焦前进行对比,我们在图中选取了一块区域进行了放大,并在放大图中选取一强散射点(白色箭头所示),在图 13(b)中给出了其自聚焦前后的方位剖面图. 从这些图中可以明显看出本文自聚焦算法对单脉冲图像方位分辨效果的改善.

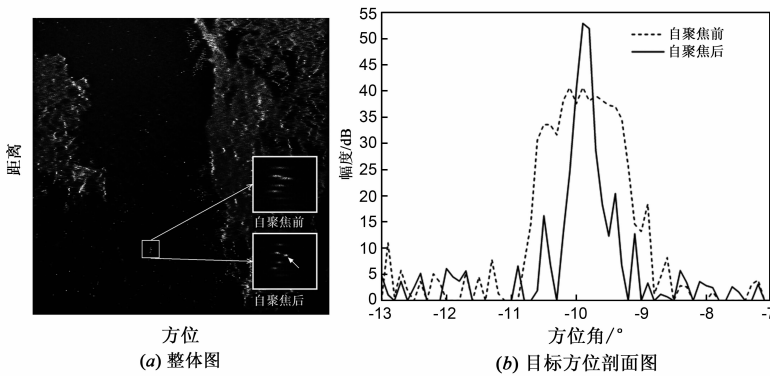


图13 单脉冲成像结果(第一组实测数据)

第二组实测数据由某型 Ku 波段高分辨率机载单脉冲雷达录取,理论距离分辨率达到 0.3m. 该数据录取的目的即为验证机载雷达前视成像在盲着陆中的应用,故成像场景为某机场跑道,且作用距离较近. 图 14 中实线和虚线分别给出了估计所得以及由系统参数计算所得的鉴角曲线. 图 15 给出了最终单脉冲成像结果,由于雷达在飞行过程中不断在前方区域扫描,故最终图像为多次扫描的拼接图(距离向拼接),为便于对比,图 15(a)给出了该跑道的光学图片. 从图 15(b)、(c)成像结果的对比可以明显看出本文算法的有效性.

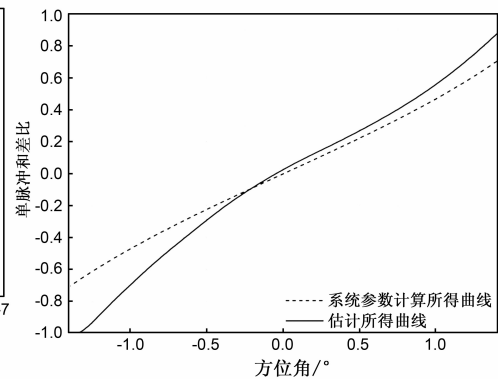


图14 单脉冲鉴角曲线(第二组实测数据)

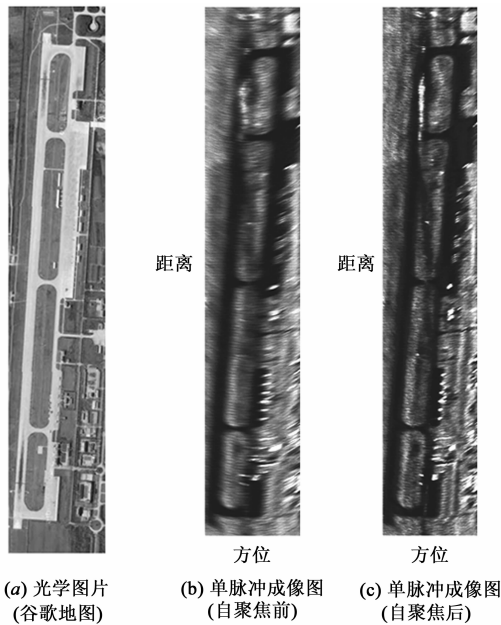


图15 单脉冲成像结果(第二组实测数据)

6 结束语

针对鉴角曲线误差对单脉冲前视成像算法性能的影响,本文提出了一种用于单脉冲成像的自聚焦算法. 对算法的详细信号处理流程进行了描述,并通过多组不同地貌场景的仿真及实测数据处理结果对算法性能进行了验证. 结果表明,该方法能够在鉴角曲线未知的

情况下,自动从回波数据中精确估计鉴角曲线,降低测角误差对成像效果的影响,实现图像方位自聚焦,且对多种地貌数据有效,鲁棒性较好,是一种实用的机载雷达前视成像自聚焦技术.

参考文献

- [1] Cumming I, Wong. F. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data – Algorithms and Implementation[M]. Artech House, Boston, USA, 2005.
- [2] Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M. et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2014, 1(1): 6–43.
- [3] 陈洪猛, 李明, 贾璐, 等. 一种高精度的 DBS 图像拼接算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(2): 37–43.
Chen H M, Li M, Jia L, et al. High precision stitching algorithm for the DBS image[J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(2): 37–43. (in Chinese)
- [4] 谢士厚. 机载雷达的地图显示技术[J]. 现代雷达, 2007, 29(2): 28–34.
Xie S H. Map display technology of airborne radar[J]. Modern Radar, 2007, 29(2): 28–34. (in Chinese)
- [5] 杨志伟, 贺顺, 廖桂生. 机载单通道雷达实波束扫描的前视探测[J]. 航空学报, 2012, 33(12): 2240–2245.
Yang ZW, He S, Liao G S. Forward-looking detection for airborne single-channel radar with beam scanning[J]. Acta

- Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(12): 2240 – 2245. (in Chinese)
- [6] 温晓杨, 匡纲要, 胡杰民, 等. 基于实波束扫描的相控阵雷达前视成像[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1977 – 1991. Wen X Y, Kuang G Y, Hu J M, et al. Forward-looking imaging based on real beam scanning phased array radars[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 1977-1991. (in Chinese)
- [7] G Krieger, J Mittermayer, S Buckreuss, et al. Sector imaging radar for enhanced vision Vorwärtssicht-Radar für erweitertes Blickfeld[J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(2): 147 – 158.
- [8] T Sutor, F Witte A Moreira. A new sector imaging radar for enhanced vision-SIREV [A]. SPIE Conference on Enhanced and Synthetic Vision [C]. Orlando, Florida, USA, International Society for Optics and Photonics, 1999. 39 – 47.
- [9] T Espeter, I Walterscheid, J Klare, et al. Bistatic forward-looking SAR: results of a spaceborne-airborne [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 765 – 768.
- [10] V T Vu, M I Pettersson. On bistatic forward-looking SAR imaging [A]. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Québec, Canada, IEEE, 2014. 3953 – 3956.
- [11] Derek Iverson. Beam sharpening via multikernel deconvolution [A]. CIE International Conference on Radar [C]. Beijing, China, 2001. 693 – 697.
- [12] 李悦丽, 梁甸农, 黄晓涛. 一种单脉冲雷达多通道解卷积前视成像方法 [J]. 信号处理, 2007, 23(5): 700 – 703. Li Y L, Liang D N, Huang X T. A Multi-Channel deconvolution based on forward-looking imaging method in monopulse radar [J]. Signal Processing, 2007, 23(5): 700 – 703. (in Chinese)
- [13] 吴迪, 朱岱寅, 朱兆达. 机载雷达单脉冲前视成像算法 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 462 – 469. Wu D, Zhu D Y, Zhu ZD. Research on monopulse forward-looking imaging algorithm for airborne radar [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 462-469. (in Chinese)
- [14] 吴迪, 朱岱寅, 田斌, 朱兆达. 单脉冲成像算法性能分析 [J]. 航空学报, 2012, 33(10): 1905 – 1914. Wu D, Zhu D Y, Tian B, et al. Performance evaluation for monopulse imaging algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(10): 1905 – 1914. (in Chinese)
- [15] 庞礴, 代大海, 邢世其, 等. 前视 SAR 成像技术的发展和展望 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2283 – 2290. Pang B, Dai D H, Xing S Q, et al. Development and perspective of forward-looking SAR imaging technique [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2283 – 2290. (in Chinese)
- [16] Skolnik, M. Radar Handbook [M]. 3rd edn. McGraw-Hill companies, 2008.

作者简介



吴迪 (通信作者) 男, 1982 年 3 月出生于河南安阳, 2011 年毕业于南京航空航天大学电子信息工程学院, 获博士学位. 现为南京航空航天大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、地面动目标指示技术等.
E-mail: wudi82@nuaa.edu.cn



杨成杰 女, 1992 年 8 月出生于江苏扬州. 2010 年本科毕业于南京航空航天大学信息工程专业. 现为南航电子信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为机载雷达前视成像.
E-mail: yangchenjie0807@126.com