

多强点信息补偿机载聚束式 SAR 中的运动误差

付文宪, 洪文, 李少洪
(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘要: 本文根据聚束式 SAR 相位误差的特性, 采用基于 Multi-PPP 算法的多强点信息进行运动补偿. 经过多强点信息补偿, 不仅能消除由平动产生的空不变相差, 而且能补偿由转动产生的空变相差. 并分析了当聚束式 SAR 采用 PFA 成像时, 为了精确补偿转动误差, 多强点处理中第二强点和第三强点不应该分离, 也研究了该方法中强点的选择和补偿效果等问题. 最后给出了典型聚束式 SAR 采用 PFA 成像时经多强点信息补偿后的仿真结果.

关键词: 聚束式 SAR; 运动补偿; 多强点处理; PFA 成像

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 03-0343-04

Motion Compensation with Multi-PPP in Airborne Spotlight SAR

FU Wen-xian, HONG Wen, LI Shao-hong

(Dept of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper applied prominent points' information based on multi-PPP to compensate specific phase errors in spotlight SAR imaging. Among these points, the first one removes the phase errors from relative translation and produces a new focusing center, the second one is used to transform the rotational motion from unevenly to evenly, and the third one estimates the corresponding azimuth scaling factor. After this compensation, not only the space-invariant phase errors but also the space-variant phase errors are removed and high-resolution SAR images can be produced. It's also analyzed that in PPP the second point can't be processed independently of the third point in order to correct precisely motion errors from spotlight SAR images with PFA. How to select the prominent points so as to improve PPP is also suggested in the paper. At last the method is proved to be feasible by the simulation results when PPP autofocus is embedded in spotlight SAR imaging with PFA.

Key words: spotlight SAR; motion errors compensation; multi-PPP; PFA

1 引言

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 作为一种有源成像方法, 具有全天候、全天时的特征. 机载 SAR 在天线相位中心 APC (Antenna Phase Center) 随载机平台的运动过程中, 不断发射和接收电磁脉冲信号而获得成像区域的目标后向反射特性. 在聚束式 SAR 或转台成像中, 如假设成像区域的范围远远小于 APC 到目标的距离, 则在小的合成时间内有如下关系^[1]:

$$r(t) = r_0 + y \quad (1)$$

$$f_d = 2xv/\lambda \quad (2)$$

式中: $r(t)$ 为 APC 到目标散射点 (x, y) 的斜距; r_0 为 APC 到目标中心的斜距; v 为 APC 和目标间的相对转速; λ 为波长. 由此可见散射点的二维分布可确定, 其中距离向的高分辨率通过大带宽信号得到, 而方位向分辨率则可通过多普勒频率分析方法来改善.

如图 1 所示, 机载聚束式 SAR 作为高分辨率成像雷达中

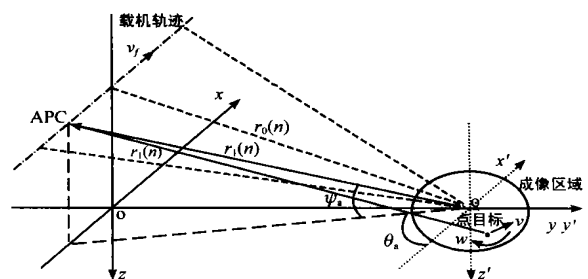


图 1 机载聚束式 SAR 几何模型

的一种重要模式, 雷达天线 LOS 方向 (Line of Sight) 始终对准被成像区域中心, 在大的合成孔径时间内获得普通条带式难以达到的高分辨率图像. 极坐标格式算法 PFA (Polar Format Algorithm) 是聚束式 SAR 一种重要的成像算法, 该算法以极坐标格式记录回波, 再通过多相位滤波器实现极坐标到直角坐标格式的转换, 最后进行二维傅立叶变换重构成像^[2,3]. 在聚焦成像范围内, PFA 能有效补偿 MTRC (Motion Through Range

Cell)所带来的散焦,也便于自聚焦算法的嵌入^[4].

高分辨率 SAR 图像的获取还依赖于 APC 和目标间精确的运动误差补偿,运动误差的补偿可以通过传感器系统来实现,也可以采用自聚焦算法校正回波数据来实现.通过分析聚束式 SAR 相位误差的性质,可以把它分为由 APC 和目标间平动引起的空不变相差和 APC 绕目标成像中心的转动引起的空变相差,其中,随空间而变化的相差是聚束式 SAR 相差的重要特点.传统的自聚焦补偿算法如 MAPDRIFT、PD (Phase Difference)、PGA(Phase Gradient Autofocus)等主要都是补偿特定的一次、二次等空不变相差,对聚束式 SAR 中空变相差的补偿效果并不理想. Multi-PPP 算法 (Multi - Prominent Points Processing) 作为一种运动目标的成像方法,利用人为选择的目标强点信息能消除平动误差,并把非均匀转动转化为均匀转动来消除转动误差^[5,6]. 根据这一思路针对聚束式 SAR 成像及其相位误差的特点,同理可以选择多个强点来补偿聚束式 SAR 的空不变和空变相位误差,在此基础上本文研究了 Multi-PPP 算法在机载聚束式 SAR 采用 PFA 成像时对运动误差的补偿.

2 聚束式 SAR 中 Multi-PPP 算法

Multi-PPP 处理的提出最早是针对运动目标成像^[5,6],当应用到 SAR 运动补偿中时,它利用雷达回波数据来加强 SAR 信号在方位向上的相干性,不仅能补偿由平动产生的空不变相差,而且能补偿由转动产生的空变相差^[2]. Multi-PPP 成像通过第一强点的处理使得回波信号在强点位置频率为零、相位值恒定而形成新的聚焦中心.然后利用第二强点补偿由于非均匀转动形成的误差,在大目标高分辨率成像时采用第三强点并结合极坐标格式,能实现对动目标的完全聚焦.

本文重点研究 PPP 处理在机载聚束式 SAR 采用 PFA 成像时的运动补偿,图 2 所示为该处理进行运动补偿时的信号处理流程图,针对聚束式 SAR 中被成像目标尺寸较大以及高分辨率的特性,在采用 PFA 成像时必须把第二强点和第三强点结合起来,才能有效地补偿运动误差而得到高质量的 SAR 图像.

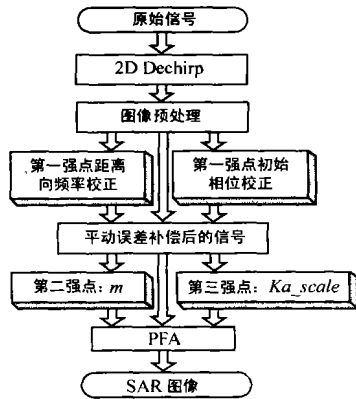


图 2 聚束式 SAR 采用 PFA

回波信号对第一强点进行距离向压缩^[5]:

$$S'_i(f_i, n) = a_1 T_p \sin c \left\{ T_p \left(f_i + \frac{2}{c} r_e(n) \right) \right\} \exp \left(-j \frac{4 f_c}{c} r_e(n) \right) + j \frac{4}{c^2} r_e^2(n) - j \frac{4 f_i}{c} r_e(n) \quad (3)$$

式中: $a_1 = k\sqrt{\sigma}$, 为点的雷达散射截面积, k 为系数; T_p 为脉冲宽; f_c 为雷达波的载频; f_i 为调频率; c 为光速; n 是方位向

采样位置,对应发射脉冲数; $r_e(n) = r_1(n) - r_0(n)$, $r_0(n)$ 是收集数据时的参考距离, $r_1(n)$ 为强点到 APC 的距离,如图 1 所示.找出强点在方位向上的峰值位置,即可利用强点信息对信号进行距离向频率和相位的校正.经过第一强点的处理,平动产生的误差被消除,同时形成新的图像聚焦中心,第一强点在某种程度上能代替传感器实现对平动的补偿.

当 APC 与目标间存在转动误差时,APC 与目标间不再是匀速转动,载机传感器系统提供的转速 \bar{w} 已不能再表示实际的转速,由公式(2)可知,这将导致多普勒频率 f_d 的误差,使得 SAR 图像在方位向上散焦及尺寸比例发生变化.而在 PFA 算法中,要求知道方位向精确的采样位置^[2].如图 1 所示,

为合成孔径中心到目标中心连线与采样位置到目标中心连线在成像平面上的投影所形成夹角,可以表示为:

$$= m \cdot K_{a_scale} \quad (4)$$

式中: m 为方位向采样点数,存在运动误差时会有偏差; K_{a_scale} 为与转速有关的方位向比例因子.分析第二强点得到其峰值位置的相位^[5]:

$$\frac{c}{4 f_c} [\phi_{pk2}(n) - \phi_{pk2}(N_a/2)] = x_2 \cdot (n) \quad (5)$$

式中: x_2 为强点的坐标; $\phi_{k2}(n)$ 为强点在不同位置的相位值,通过非线性插值即可实现非均匀转动到均匀转动的校正,并得到校正后的 m .知道了更新后的采样位置 m ,还必须精确估计方位向比例因子 K_{a_scale} ,为此选择第三强点,分析可得^[5]:

$$K_{a_scale} = \sqrt{\frac{-cK_q}{2 f_c y_3}} \quad (6)$$

式中: y_3 为强点的坐标; K_q 为强点的二次相位分量.由第三强点的二次相位项可精确估计方位向尺寸因子,此时,第二强点和第三强点联合则补偿了转动所产生空变相位误差.

最后,PFA 采用第二强点和第三强点估计的方位向采样位置,完成极坐标格式到直角坐标格式的转变,再进行二维压缩而获得高分辨率的 SAR 图像.

3 数值仿真

本文给出了聚束式 SAR 采用 PFA 成像时 Multi-PPP 算法的仿真结果. APC 始终对准成像区域中心,区域内的目标以一定的速度平动,同时围绕成像中心转动,运动目标成像的逆问题即 SAR 成像中的相位误差补偿.本仿真中被成像区域包含一系列点目标,成像区域为 400 米 \times 400 米,没有运动误差时的 PFA 所成 SAR 图像如图 3 所示(图中水平为距离向,垂直为方位向,坐标的单位都为点数,后面各图与此相同),仿真的主要参数为 x 波段、载机平台速度 100m/s.

当存在运动误差时,SAR 图像出现明显的几何失真、图像散焦、对比度下降、分辨率降低及产生虚假目标等问题,如图 4 所示的成像结果.在 Multi-PPP 算法中选择第 1 点作为第一强点补偿平动产生的空不变相差,结果如图 5 所示.仿真还表明,当平动进一步加剧时,第一强点仍能有效地补偿平动产生的相位误差,即第一强点在某种程度上能代替传感器实现对

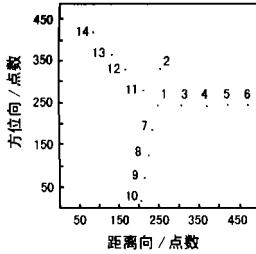


图 3 没有运动误差时的 SAR 图像

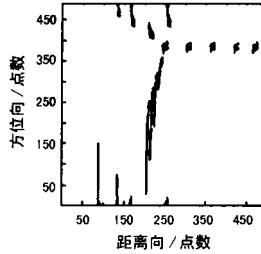


图 4 存在平动和转动误差时图像

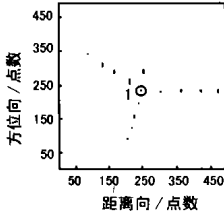


图 5 第一强点补偿平动后的图像(选第 1 点为强点)

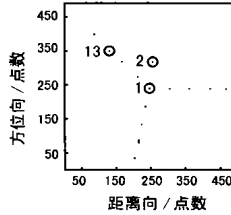


图 6 补偿转动误差后图像(第 2 点为第二强点,第 13 点为第三强点)

平动的补偿。

从图 5 可见,经过第一强点的处理后,图像质量大大改善,但和图 3 对比,发现图像方位向比例因子仍然存在误差,即图像上两点之间方位向上的距离不能与实际距离对应,并且图像的对比度降低、还存在一定的散焦,这些都是由于转动误差引起的。为此,选择第 2 点作为第二强点、第 13 点作为第三强点来补偿转动相差。图 6 是 PFA 采用估计的方位向采样位置而成的 SAR 图像,和图 3 比较基本上消除了平动和转动所产生的相位误差,得到了高分辨率的图像。

图 7 是选择第 8 点为第一强点补偿平动后的图像,图 8 是在图 7 处理的基础上选择第 1 点为第二强点、第 6 点为第三强点补偿转动后的图像,可见基本上补偿了运动误差,实现了图像聚焦。通过选择两组不同的强点进行 PPP 处理,并且都获得了很好的运动补偿效果,验证了本文所设计的 PPP 处理在机载聚束式 SAR 采用 PFA 成像时的进行运动补偿的可行性和有效性。

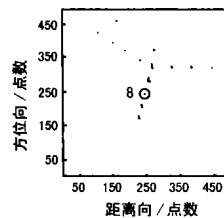


图 7 第一强点补偿平动后的图像(选第 8 点为强点)

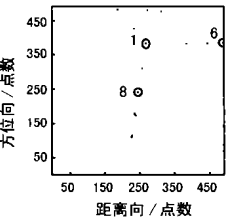


图 8 补偿转动误差后图像(第 1 点为第二强点,第 6 点为第三强点)

4 Multi-PPP 算法的其它问题研究

Multi-PPP 算法的运动补偿效果主要取决于强点的选择,特别是第一强点,它是算法补偿转动误差的基础。强点的选择

首先要求强点是点目标,即其后向散射特性的幅度和相位在方位向上是一恒定值,否则,会导致图像聚焦程度的降低^[2]。其次,要保证所选择的强点在同一距离门内在幅度上是最强的。如果同一距离门内还存在其它强点目标,会导致图像虚假目标的出现;如果所选强点相对同一距离门内其它目标的幅度和不突出时,则该强点不能提供精确的参考相位,导致低频和高频相差的出现,使得图像聚焦程度降低等。仿真表明,如果所选强点的幅度高出同一距离门内的目标 10dB 以上,则影响程度降低。

从 Multi-PPP 算法理论^[5]分析可知,对第二强点要求它在距离向上离第一强点很近,这样方位向采样点数的估计更精确。而第三强点在距离向上离第一强点相当大时,相位中的二次相位分量更明显,有利于提高估计精度。对第一强点的选择在位置上没有特别要求,但仿真表明,第一强点选择转动中心与不选择转动中心成像效果有所不同,如图 6 是转动中心(第 1 点)为第一强点的最终处理结果,图 8 是非转动中心(第 8 点)为第一强点的最终处理结果,这是由于聚束式 SAR 成像时目标尺寸相对较大而引起的。在研究中本文假设目标在水平面内转动,当斜距足够大时可以认为转动误差的转轴垂直于 LOS,如果转动存在于其它平面内,则第三强点估计并不精确,这无疑会影响最终成像质量。

虽然 Multi-PPP 算法与目标场景特性密切相关,但考虑到聚束式 SAR 成像的实际应用,该算法还是可行的。因为聚束式 SAR 一般是在条带式 SAR 成像的基础上,再对感兴趣的特定区域进行高分辨率成像,该特定区域一般具有较明显特征,如存在强后向散射特性的人造目标等;另外,在可能的情况下,还可以通过角反射器来加强场景特性,从而为 Multi-PPP 算法提供符合要求的强点。在强点选择合理的基础上,Multi-PPP 算法具有其它自聚焦算法难以达到的补偿性能,它不仅能稳定地消除有平动产生的相差,而且还可以消除由转动产生的空变相差,适合于聚束式 SAR 高分辨率成像。

5 总结

本文根据聚束式 SAR 中相位误差的特性,采用 Multi-PPP 算法实现运动补偿。PPP 算法第一强点补偿由平动产生的空不变相差,并且形成新的图像聚焦中心;第二强点通过非线性插值把非均匀转动转化为均匀转动而得到新的采样点数;第三强点则估计相位的二次分量而得到方位向比例因子,两者联合计算实际的方位向采样位置,补偿由转动产生的空变相位误差。在聚束式 SAR 采用 PFA 成像时,如果存在转动误差,为了得到高分辨率的 SAR 图像,第二强点和第三强点必须联合起来补偿空变相差。文章也研究了成像区域中对强点的要求,以及当转动误差不仅仅存在于 LOS 平面时该算法的补偿效果等问题。最后给出了聚束式 SAR 采用 PFA 成像时 PPP 自聚焦的仿真结果。

随散射点空间位置的变化而变化的相位误差补偿一直是 SAR 成像中的难点,Multi-PPP 算法不仅能补偿传统的空不变相差,而且还能补偿聚束式 SAR 中特定的空变相差,具有其它自聚焦算法所不具有的优势,对高分辨率聚束式 SAR 成像

具有实际的意义. 如何提高自聚焦算法的自动程度、补偿各平面内的运动误差、对图像进行适当的预处理提高算法效率以及降低自聚焦算法对目标特性的依赖程度是以后聚束式 SAR 运动补偿研究的重点.

参考文献:

- [1] Jack L Walker. Range-Doppler imaging of rotating objects [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1980, 16(1) :23 - 51.
- [2] Carrara W G, Goodman R S, Mafewski R M. Spotlight SAR: Signal Processing Algorithms [M]. Artech House, 1995.
- [3] Charles V Jakowatz Jr, et al. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach [M]. Kluwer Academic Publishes Group, 1996.
- [4] 洪文. 机载聚束式合成孔径雷达成像的聚焦处理研究 [D]. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 1997.
- [5] Werness S, Carrara W, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1990, 26(1) :57 - 66.
- [6] Susan A Werness, Mark A Stuff, James R Fienup. Two-dimensional imaging of moving targets in SAR data [A]. Record of the Twenty-Fourth Asilomar Conference on Circuits, Systems, and Computers [C], Monterey, CA. 1990 :16 - 22.

作者简介:



付文宪 男. 1972 年 7 月出生于湖北监利. 北京航空航天大学信号与信息处理专业博士研究生, 1995 年于中国矿业大学(北京校区)获工学硕士学位. 现主要从事机载 SAR 成像、运动补偿和图像处理等方面的研究工作.



洪文 女. 1968 年出生于陕西西安. 北京航空航天大学副教授. 1997 年获该校工学博士学位. 1998 年至 1999 年任德国宇航院客座科学家. 主要研究领域为高分辨率 SAR 成像及其应用等.

李少洪 男. 1939 年出生于天津. 教授, 博士生导师, 北京航空航天大学信号与信息处理教研室主任, 主要从事雷达、信号与信息处理、检测、估计、多目标跟踪和目标识别等方面的研究工作.