

一种用于条带式 SAR 的自聚焦算法

孟大地 丁赤彪

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 本文将相位梯度法(Phase Gradient Algorithm, PGA)用于条带式合成孔径雷达(SAR)的自聚焦。根据条带 SAR 与聚束 SAR 回波信号差异并参考经典相位梯度法提出了一种适用于条带 SAR 的自聚焦算法——SPGA。用这种新的条带 SAR 自聚焦算法聚焦所得 SAR 图像不会发生传统条带 SAR 下 PGA 常有的拼接问题;同时由于相位误差曲面的引入,对于任何场景 SPGA 均能达到良好的聚焦效果。

关键词: 合成孔径雷达, 条带式, 自聚焦, 相位梯度法

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1349-04

A New Approach to Autofocus Considering Strip Map SAR

Meng Da-di Ding Chi-biao

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Phase Gradient Algorithm (PGA) is accommodated to focus the StripMap SAR data in this article. A new approach to StripMap SAR autofocus, StripMap PGA (SPGA), is developed based on the difference between the received signal of StripMap SAR and SpotLight SAR and the classic PGA is referenced. The focused SAR images from SPGA does not have the problem of the shift between the blocks which can be found in the images from the traditional StripMap autofocus method. SPGA can get well focused SAR images from more universal scene because of the employment of phase error surface.

Key words SAR, StripMap, Autofocus, Phase Gradient Algorithm(PGA)

1 引言

在合成孔径雷达(SAR)成像过程中,自聚焦是很重要的一个环节。由于载机运动、电波传播、系统误差等因素影响,雷达回波数据的方位向相位中叠加了一个相位误差。如果对这部分相位误差不做任何校正而直接成像,所得图像将发生方位向散焦。若由自聚焦算法估计出这部分相位误差并从回波数据中滤除然后再成像,则可大大改善方位向分辨率。

条带 SAR 的自聚焦算法主要有基于模型和无模型两类。前一类较有代表性的是 MapDrift 算法,这类算法由于只对二次相位误差比较有效,不能较好地估计出高次相位误差,其实质只不过是估计出一个更为准确的方位向线性调频率,因而并不是一个完全意义上的自聚焦算法;后一类无模型的自聚焦算法大都基于相位梯度法^[1-4],将条带 SAR 数据在距离向和方位向纵横分块,对每一块用相位梯度法做聚焦处理,再将各块处理结果拼接得到最终图像。基于分块的算法或许对每一块数据都能达到较好的聚焦效果,但由于是分块进行相位误差估计,各块数据的处理相对独立,由此造成各块数据的成像结果边缘部分拼接之后出现参差,对雷达图像的后续处理和应用带来不便。虽然这些算法也采用了各种方法减

少块之间的参差,但都不能从根本上解决问题。文献[2]虽然避免了分块处理,但由于该算法不能准确地提取出每个点目标所经历的相位误差,所采用的相位误差段的拼接方法精确性及收敛性较差,所以该算法的精度和收敛性较差。本文提出的自聚焦算法——SPGA(StripMap Phase Gradient Algorithm),虽然也是基于相位梯度的思想,但由于没有对原始数据做方位向分块,而是估计出整个方位向的相位误差曲线,因而没有方位向拼接问题;SPGA 可以准确估计出各个点目标所经历的线性相位,所以图像也不会发生变形;该算法虽然也需要做距离向分块,但通过对各块数据所估计相位误差曲线的距离向拟合,可以得到一个针对整幅图像的连续二维相位误差曲面,由此再做相位校正,从而避免了拼接问题;由于可以选出可信度较高的几条相位曲线做曲面拟合,所以 SPGA 几乎适用于任何场景。SPGA 采用了一种较精确的点目标线性调频(chirp)信号提取方法和精度较高、收敛性较好的相位误差段拼接方法,保证了相位误差估计的精确性和收敛性。与传统的条带 SAR 自聚焦算法相比,SPGA 提供了一个更为理想的解决方案。另外,SPGA 的执行效率较高,一般不会低于传统的条带 SAR 自聚焦算法,保证了 SPGA 的实用性。

2 相位梯度法简介

相位梯度算法(Phase Gradient Algorithm, PGA)最初是针对聚束 SAR 提出的。对该算法的详细介绍参见文献[1,5]。为了保持本文内容的完整性和独立性,并作为后续内容的基础,以下简要列出相位梯度法的运算步骤。

第1步 圆移 先在每个距离单元内选出一个强点目标,通过圆移使该点目标位于方位向的中心位置。强点目标保证了较高的信噪比和信杂比,圆移去掉了各个点目标对应线性调频(chirp)信号频谱相位中的线性项。

第2步 加窗 对圆移之后的所有距离单元点目标统一加窗。加窗对每个强点目标提高了信杂比。

第3步 相位误差估计 对每个加窗后的点目标 $g(x)$ (x 为方位向坐标)做 IFFT, 记作

$$G(u) = |G(u)| \cdot \exp(j[\phi_e(u) + \theta(u)]) \quad (1)$$

其中 u 为时域方位向坐标, $\phi_e(u)$ 为方位向相位误差, $\theta(u)$ 为点目标应有的相位项。经过第一步中心圆移之后, $\theta(u)$ 只剩下一个固定相位项^[5]。再计算相位梯度:

$$\Delta\phi_e(u) = \Delta\phi_e(u) + \Delta\theta(u) = \angle\{G(u) \cdot G^*(u-1)\} \quad (2)$$

其中

$$\Delta\phi_e(u) = \phi_e(u) - \phi_e(u-1), \quad \Delta\theta(u) = \theta(u) - \theta(u-1) \quad (3)$$

由于 $\theta(u)$ 在中心圆移之后只剩下一个固定相位项, 所以有 $\Delta\theta(u) = 0$, 误差相位 $\phi_e(u)$ 的梯度:

$$\Delta\phi_e(u) = \angle\{G(u) \cdot G^*(u-1)\} \quad (4)$$

由于所有距离单元内的 $\phi_e(u)$ 都认为是相同的, 所以可对每个距离单元估计出的相位误差梯度 $\Delta\phi_e(u)$ 求平均, 作为一次相位误差梯度的估计结果。

第4步 计算相位误差并迭代 对相位误差梯度 $\Delta\phi_e(u)$ 求和:

$$\phi_e(u) = \sum_{m=1}^M \Delta\phi_e(m) \quad (5)$$

得到相位误差曲线 $\phi_e(u)$, 去掉其中的固定相位项和线性项, 并用于 FFT 前数据的相位误差校正。

对以上4步做迭代, 完成相位误差的估计和校正。

3 条带 SAR 下的 PGA——SPGA

SPGA(StripMap Phase Gradient Algorithm)是一种用于条带 SAR 的自聚焦算法, 相位梯度法是该算法的核心。但考虑到条带 SAR 回波数据自身的特点, SPGA 的理论及实现框架与普通的相位梯度法有较大差别。

3.1 SPGA 的基本思路

在一个距离块内, 方位压缩前的条带 SAR 原始数据是由很多平移叠加在一起的 chirp 信号组成的, 其中的相位误差是方位向位置的一维函数。每个 chirp 信号携带有其对应

的合成孔径跨度内所经历的相位误差信息, 如果选出足够多个 chirp 信号, 并估计出它们所对应合成孔径跨度内的误差相位, 然后将这些误差相位拼接在一起, 就是整个方位向的相位误差曲线。再由各个距离块内的相位误差曲线进一步拟合出一个二维的相位误差曲面, 对整个方位压缩前雷达数据进行相位误差校正, 并进行方位向匹配滤波, 得到聚焦之后的雷达图像。

3.2 SPGA 的运算步骤

3.2.1 距离向分块 对方位向匹配滤波前雷达数据在距离向分块。在一个距离块内, 认为所有距离单元所经历的相位误差都是相同的。后续步骤将对各个距离块分别进行相位误差曲线估计, 并拟合出一个二维的相位误差曲面。

3.2.2 点目标 chirp 信号提取 如上所述, 方位压缩之前一个距离单元内的雷达数据是由多个 chirp 信号平移叠加而成的, 而由 PGA 的基本原理^[1,5]可见, PGA 可行性的一个基本前提是提取出单个 chirp 信号, 所以将 PGA 用于条带 SAR 的首要问题是如何从多个叠加的 chirp 信号中提取出一个单纯的 chirp 信号。

点目标的选择需借助于雷达图像, 首先对方位压缩前数据做方位压缩, 得到一幅未聚焦的雷达图像, 并从中选择若干点目标。

由点目标提取对应 chirp 信号如下实现:

(a) 提取原始数据 对图像上每一个点目标, 先记下它所在的距离单元和方位向位置, 然后以此位置为中心, 在方位压缩前数据的对应位置截取方位向一个合成孔径长度的一段数据。这段数据是所要提取的 chirp 信号和周围其他目标对应 chirp 信号的叠加。将所选点目标对应 chirp 信号先作 dechirp, 结果记作

$$G_0(u) = |G_0(u)| \cdot \exp(j\phi_e(u)) \quad (6)$$

其中 u 为方位压缩前方位向坐标, $\phi_e(u)$ 为该点目标所经历的相位误差。

(b) IFFT 对 $G_0(u)$ 做 IFFT, 将其结果向左圆移合成孔径长度之半, 这时所选点目标对应信号:

$$g(x) = \text{IFFT}\{|G_0(u)| \cdot \exp(j\phi_e(u))\} \quad (7)$$

其中 x 为 IFFT 之后信号的方位向坐标。这时所得到波形的幅度谱就是这段数据所涵盖地面场景的对应图像, 场景中的各个点目标在此波形中也已经完全分开^[2]。波形的中心位置一般会有一个较强的点目标, 这个点目标 $g(x)$ 就是最初所选择的点目标。这种由 IFFT 成像的机理参见文献[2, 6]。

(c) 加窗 对波形中心位置的点目标 $g(x)$ 加窗, 以尽可能消除噪声和邻近目标的杂波干扰。因为 IFFT 成像将所截取数据中的多个 chirp 分量在位置上分离开来, 所以所截取的点目标 $g(x)$ 包含了所要 chirp 信号的全部信息。

(d) FFT 对加窗后的点目标 $g(x)$ 向右圆移合成孔径长度之半, 再做 FFT:

$$G(u) = |G(u)| \cdot \exp(j\phi_e(u)) \quad (8)$$

其中 u 为方位向坐标, $\phi_e(u)$ 为方位向相位误差, $G(u)$ 即为步骤(a)中的 $G_0(u)$ 的估计。

对一个点目标的 chirp 信号经过以上 4 步操作, 就得到了一个以该 chirp 信号所经历相位误差为相位, 以其幅度为模的复数波形 $G(u)$ 。理论及实践表明, 文献[2]中介绍的两种提取原始数据的方法在精度或性能上均不及 SPGA 所采用的方法。

3.2.3 相位误差估计

(a) 计算单点目标相位梯度 对每个点目标对应 $G(u)$, 按照式(4), 由相位梯度原理计算每个点目标所经历相位误差的梯度。

由于相位梯度法对每个点目标不能估计出误差相位中的线性项^[2,5], 对应相位梯度 $\Delta\phi_e(u)$, 就是其中一个固定相位 $\frac{1}{2} \sum_{m=1}^U \Delta\phi_e(m)$, 其中 U 是合成孔径长度对应坐标值。所以在进行后续操作之前, 需要先从相位梯度 $\Delta\phi_e(u)$ 中去除一个固定相位 $\frac{1}{2} \sum_{m=1}^U \Delta\phi_e(m)$:

$$\overline{\Delta\phi_e(u)} = \Delta\phi_e(u) - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^U \Delta\phi_e(m) \quad (9)$$

(b) 相位梯度求平均 对所有点目标对应的误差相位梯度 $\overline{\Delta\phi_e(u)}$ 按其所在位置求平均, 得到整个方位向的误差相位梯度 $\Delta\phi_e(v)$, 其中 v 为整个方位向坐标。文献[2]中在二次差分域做平均, 实践表明这种方法虽然收敛很快, 但是精度很低; 而 SPGA 采用的方法具有较高的精度, 但收敛速度较前者有所降低。实际中一般需要迭代 8 次左右, 就可以达到较好的聚焦效果。

(c) 计算相位误差 将整个方位向的误差相位梯度 $\Delta\phi_e(v)$ 先去掉其中的固定相位:

$$\overline{\Delta\phi_e(v)} = \Delta\phi_e(v) - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^U \Delta\phi_e(m) \quad (10)$$

再求和

$$\phi_e(v) = \sum_{m=1}^v \overline{\Delta\phi_e(m)} \quad (11)$$

得到整个方位向的相位误差曲线 $\phi_e(v)$ 。

(d) 相位误差校正 用(11)式对数据进行相位校正, 再做匹配滤波, 得到一次迭代的聚焦结果。

3.2.4 迭代 用迭代的方法逐步逼近真实相位误差。

3.2.5 相位误差的距离向拼接及二维相位误差补偿 由各个距离块内对应的相位误差曲线, 可进一步拟合出一个二维的连续相位误差曲面。用该相位误差曲面对雷达数据进行相位误差校正、匹配滤波, 得到的图像就是自聚焦之后的雷达图像。

(a) 相位误差曲线相似性分析 分析各个距离块所估计的相位误差曲线, 根据一定的判据从中选择相似性最强且不相邻的若干相位误差曲线。

(b) 相位误差曲面拟合 根据所选择的若干相位误差曲线的空间位置由一定规则拟合出整幅雷达图像所对应的相位误差曲面。可以选择线性拟合, 或多项式拟合等。

(c) 二维相位误差补偿 用拟合出的相位误差曲面对整幅雷达图像进行二维相位误差补偿, 并对补偿结果进行方位压缩, 得到自聚焦之后的雷达图像。

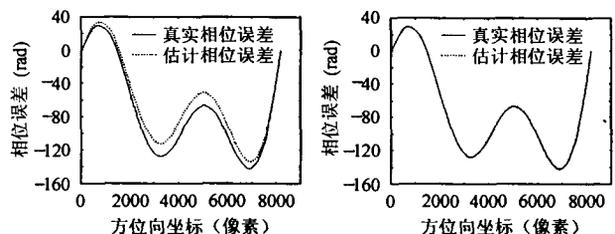
二维相位误差曲面的思想是 SPGA 优于其他自聚焦算法的一个重要方面, 不但保证了聚焦之后整幅图像的连续性, 也提高了算法的适用性。

4 SPGA 性能分析

4.1 线性相位对相位误差拼接的影响

用一般相位梯度方法, 对每个点目标是无法估计出其中的线性相位的, 而且所估计出的误差相位和真实误差相位相比不但相差一个线性相位之外, 位置上也发生了偏移(偏移量为 $a/(2k)$)。这样, 所估计出的一段相位中如果含有线性项, 这个线性项必然是因为点目标位置选取不准确造成的, 所以要解决这些线性相位引起的问题, 首先得去掉所估计各段相位中的线性项(对应相位梯度就是减去相位梯度的均值), 然后还要截去各段相位两端的一小部分, 以防止点目标位置偏移引入邻近的 chirp 信号。虽然存在线性项造成的选点位置偏差, 但总是可以选出 chirp 信号的绝大部分, 而且在做平均和迭代之后, 不会对相位误差估计产生任何影响。

图 1 的仿真用由 4 个点目标构成的仿真数据验证 SPGA 收敛性。加入的相位误差由 5 次多项式和 1 个余弦项合成, 相位估计的各次迭代结果如图 1 所示(图中对真实相位误差和估计相位误差在整个方位向都去掉了线性项)。由该仿真结果可以看出, 虽然对于各相位误差段不能直接估计出线性相位误差, 并且在方位向有些许的偏移, 但通过迭代使相邻各点目标所估计出的相位误差曲线相互作用, 总可以估计出这些线性相位, 逼近真实的相位误差。剩余线性相位误差只造成整个方位向的平移, 对图像质量没有任何影响。这些特点



(a) 4 次迭代结果 (b) 16 次迭代结果

图 1 对仿真数据做相位误差估计的迭代效果

是基于分块的及其他的自聚焦算法所无法实现的,是 SPGA 优于其他自聚焦算法很重要的一个方面。

4.2 选点策略与算法执行效率

SPGA 要求选出足够多的点目标,才能进行后续相位误差的估计。一般来说,所有点的合成孔径跨度至少要覆盖整个方位向长度。而且选点越多,相位估计就越准确,但同时也增加了运算量,算法的执行效率降低。所以所选的点数量要适中,而且要考虑实际工程要求。如果实际中对聚焦质量要求较高,则选择较宽松的选点策略,从而选择较多的点,提高相位误差估计精度;如果对算法执行速度要求较高,则选择较严格的选点策略,选取质量相对较好的少数点做相位误差估计。

5 试验结果

下面用 SPGA 对一幅 SAR 数据(方位 16384×距离 8192)做自聚焦,并与 MapDrift 结果做比较。图 2(a), 2(b), 2(c)分别为其中 256×256 大小的原始图像、MapDrift 聚焦图像和 SPGA 聚焦图像。由于受较强烈的高空气流影响,运动误差很大,因此图 2(a)的图像较为模糊,经过 MapDrift 估计方位向调频率,图像质量有明显改善,如图 2(b)所示。但图 2(b)的散焦现象仍较为严重,这主要是因为在一个合成孔径时间内存在二次以上的高次相位误差,MapDrift 对于这部分误差无能为力。另一方面,如果详细考察完整的图像可以发现,采用 MapDrift 在部分区域可以获得较好的聚焦效果,而在方位向的相邻区域聚焦质量有明显恶化,这正是高分辨率条带 SAR 存在较大空变相位误差的必然结果。

SPGA 由于可以估计出任意阶次的空变相位误差,对整个方位向均能达到很好的聚焦效果,如图 2(c)所示。图 2(d)为 SPGA 估计出的整个方位向的高次相位误差曲线,显然这部分相位误差采用 MapDrift 是无法估计的。由于 SPGA 的独特结构和相位曲面拟合的运用,使得整幅图像不但都能达到很好的聚焦效果,并且在方位向和距离向均不存在拼接问题。

6 结束语

本文提出了一种新的条带 SAR 自聚焦算法——SPGA。该算法克服了传统条带 SAR 自聚焦分块处理所带来的拼接问题,对大幅的 SAR 图像可以估计出 SAR 数据中的线性相位;SPGA 采用了较少的近似,所以具有较高的估计精度;SPGA 引入了相位误差曲面的思想,提高了算法对场景的适应性。该算法可以作为成像过程的一个环节嵌入整个成像算法,而且与成像算法的选择无关,有较强的实用性。

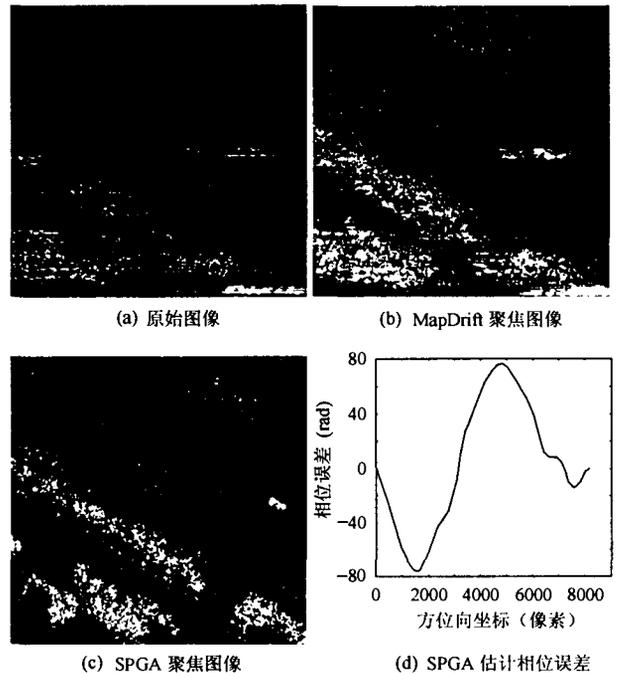


图2 SAR数据聚焦效果及相位误差曲线

参考文献

- [1] Eichel P H, Ghiglia D C, Jakowatz Jr C V. Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction. *Optics Letters*, 1989, 14 (1): 1 - 3.
- [2] WAHL D E, Jakowatz. Jr C V, Thompson P A. New approach to StripMap SAR autofocus. *Proceedings of the 1994 6th IEEE Digital Signal Processing Workshop, Yosemite California, Oct. 1994*: 53 - 56.
- [3] Thompson D G, Bates J S, Arnold D V, Long D G. Extending the phase gradient autofocus algorithm for low-altitude StripMap mode SAR. *Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference, Boston, Apr. 1999*: 36 - 40.
- [4] 郭智. 高分辨率机载 SAR 运动补偿研究与系统实现. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2003年5月.
- [5] WAHL D E, Eichel P H, Ghiglia D C. Phase gradient autofocus — a robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827 - 835.
- [6] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989年11月, 第3, 4章.

孟大地: 男, 1979年生, 硕士生, 研究方向是合成孔径雷达成像及运动补偿。

丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达。