

一种宽波束机载 SAR 运动误差的频域补偿方法

郑晓双^{①②} 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 对于方位向宽波束机载 SAR 系统的运动补偿在实际应用中具有重要意义。该文提出了一种对宽波束机载 SAR 系统运动误差进行频域补偿的方法。利用线性调频信号的时频对应关系, 将时域误差转换到频域, 基于短时傅里叶变换进行逐块的频域误差校正, 得到精确聚焦的图像。文中对算法原理、适用条件、算法流程和运算量进行了详细分析。对 P 波段机载 SAR 系统低频运动误差情况进行了点目标和图像的仿真, 验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 宽波束; 运动补偿; 频域

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1670-04

A Motion Compensation Algorithm in Frequency Domain for Wide-beam Airborne SAR

Zheng Xiao-shuang^{①②} Yu Wei-dong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Motion Compensation is essential for wide-beam airborne Synthetic Aperture Radar (SAR). This paper proposes a motion compensation algorithm for wide-beam airborne SAR based on phase correcting in frequency domain for azimuth blocks. With the relationship between time and frequency of chirp signal, residual errors in time domain are mapped into frequency domain and compensated. Short Fourier Transforms are used to gain high efficiency. This paper analyzes the principle, limitations, processing steps and efficiency of the algorithm. Simulation of point target and images of a P band airborne SAR with low-frequency motion errors validates the proposed algorithm.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Wide-beam; Motion Compensation; Frequency domain

1 引言

方位向宽波束的机载 SAR 系统的运动补偿与传统的运动补偿方法相比有其特殊性。主要表现在由于方位向波束很宽引起目标斜视角(squint angle)的变化, 从而导致运动误差随方位位置而变化(space-variant)。传统的运动补偿方法忽略了这一点, 仅仅补偿了不随方位位置变化(space-invariant)的运动误差的影响, 导致了残留误差存在, 引起目标响应的位置偏差和散焦, 得到的图像其聚焦性能随着波束宽度的增加和运动误差幅值的增大而恶化。因而对宽波束机载 SAR 的运动补偿具有重要意义。

宽波束 SAR 系统中, 由于随方位位置变化的运动误差的存在直接限制了方位向聚焦区域的长度, 所以对于图像的不同区域需作不同补偿, 实现比较困难。主要补偿方法有 3 类: (1)将方位数据划分为多个子块, 对其分别进行补偿和成像处理, 最后将各子图像组合得到完整的聚焦图像, 代表方法是重叠子孔径方法(Overlapped Subaperture Algorithm, OSA)^[1]; (2)对数据进行粗略成像后再划分为子块, 反变换

后在频域进行误差补偿后重新生成图像, 代表性的是 PTA-MoComp 方法^[2], 与此类似的还可以在方位压缩前划分子块并分别补偿误差的影响, 如文献[3,4]中所用算法, 这几种都属于频域补偿方法; (3)随方位位置变化的重聚焦方法(Space-variant Refocus), 这种方法以多视 PPP(Prominent Point Processing)方法为代表^[5], 是对图像划分为子图像再分别进行自聚焦处理。

本文主要研究了第 2 类方法中对窄波束补偿后的图像在频域进行残留误差补偿的方法, 称为宽波束频域补偿方法。这是一种对图像的后处理方法, 利用聚焦图像的方位向瞬时频率和方位位置之间的一一对应关系, 将残留误差直接转换到频域进行补偿; 同时利用短时傅里叶变换减小运算量。

文章第 2 节介绍了频域补偿的基本原理和限制条件; 第 3 节对频域补偿算法的实现进行了详细说明, 包括算法流程和运算量比较; 第 4 节对存在运动误差的 P 波段机载 SAR 利用频域补偿算法作点目标仿真和图像仿真, 验证算法性能; 第 5 节对算法的优点缺点及应用进行了分析。

2 频域补偿基本原理及限制条件

在存在运动误差的宽波束机载 SAR 系统中, 假设雷达

发射信号为线性调频信号,形式为:

$$p(\tau) = \text{rect}(\tau/T_p) \exp\{j2\pi f_0 \tau - j\pi K \tau^2\} \quad (1)$$

其中 f_0 为载频, $K = B/T_p$ 为调频斜率, T_p 为脉冲持续时间, B 为信号带宽, τ 为距离向时间。则回波信号形式为

$$ss(\tau; x, r) = \text{rect}\left\{\frac{1}{\tau_p}\left[\tau - \frac{2(R(x, r) + \delta_R(x, r))}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j4\pi \frac{2(R(x, r) + \delta_R(x, r))}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi K \left[\tau - \frac{2(R(x, r) + \delta_R(x, r))}{c}\right]^2\right\} \quad (2)$$

其中 $R(x, r) = \sqrt{r^2 + x^2}$ 为目标斜距, $\delta_R(x, r)$ 为载机运动误差引起的目标和雷达间的斜距误差, 对其完全补偿才能得到精确聚焦的图像。 $\delta_R(x, r)$ 为距离向和方位向的二维变量, 其表达式为:

$$\delta_R(x, r) = \sqrt{[r + \delta_r(x, r)]^2 + x^2} - \sqrt{r^2 + x^2} \quad (3)$$

$\delta_r(x, r)$ 为目标沿雷达视线(Line Of Sight, LOS)方向的距离误差, 可由已知载机的运动误差计算得到。在 $x \leq r$ 且 $|\delta_r| \leq r$ 的情况下, 式(3)可近似表示为

$$\begin{aligned} \delta_R(x, r) &\approx r + \delta_r(x, r) + \frac{x^2}{2[r + \delta_r(x, r)]} - r - \frac{x^2}{2r} \\ &= \delta_r(x, r) - \frac{x^2 \delta_r(x, r)}{2r[r + \delta_r(x, r)]} \\ &\approx \delta_r(x, r) - \frac{x^2 \delta_r(x, r)}{2r^2} \end{aligned} \quad (4)$$

所以对 SAR 数据完成了传统的运动补偿(包括包络校正、一次相位补偿和二次相位补偿, 补偿了 $\delta_r(x, r)$ 的影响)后, 其残留误差为

$$\delta_w(x, r) = -\frac{x^2 \delta_r(x, r)}{2r^2} \quad (5)$$

此时数据在距离-多普勒域的表达为

$$Ss(f_a, \tau; r) = C \cdot \text{sinc}_r \left\{ \pi B \left(\tau - \frac{2r}{c} \right) \right\} \cdot FT\{j\Phi(x, r)\} \quad (6)$$

其中 C 为复常数, $\text{sinc}_r(\cdot)$ 为距离向包络, 相位表达式为

$$\Phi(x, r) = -\frac{4\pi}{\lambda} \{R(x, r) + \delta_w(x, r)\} \quad (7)$$

从文献[5]中可知, 在满足条件

$$\frac{|\delta_r| \cdot Ls^2}{2r^2} \ll \frac{\lambda}{4\pi} \quad (8)$$

时, 残留误差的影响可忽略, 只需进行传统的窄波束补偿即可得到良好的效果。在式(8)不满足的情况下, 必须考虑对残留误差的补偿, 此时可以通过对式(7)求导的方法得到方位向瞬时频率 f_a 和方位位置 x 之间的关系式:

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi(x, r)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = -\frac{2v}{\lambda} \cdot \{R'(x, r) + \delta_w'(x, r)\} \\ &= -\frac{2v}{\lambda} \cdot \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \Delta f \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\Delta f = (2v/\lambda) \{[x^2 \delta_r'(x, r) + 2x \delta_r(x, r)]/(2r^2)\}$ 是由残留误差引起的频率差量。由于运动误差主要分为低频和高频两种^[6], 对其分别进行讨论:

(1) 在 $\delta_r(x, r)$ 为低频误差的情况下, 其变化周期大于一个合成孔径, 此时 $\delta_r'(x, r)$ 亦为低频信号, 则 Δf 对 f_a 的影响是低频缓变的, 若满足条件

$$\frac{2v}{\lambda} \cdot \frac{Ls^2 \cdot |\delta_r'| + 2Ls \cdot |\delta_r|}{2r^2} \ll B_d \Rightarrow Ls \cdot |\delta_r'| + 2|\delta_r| \ll 2r \quad (10)$$

则 Δf 的影响可忽略不计。此时有如下近似式成立:

$$f_a \approx -\frac{2v}{\lambda} \cdot \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \quad (11)$$

即方位向瞬时频率和方位位置间是一一对应的线性关系, 可将时域的误差直接变换到频域进行补偿。

(2) 在 $\delta_r(x, r)$ 为高频误差情况下, $\delta_r'(x, r)$ 也为高频信号。 Δf 在一个合成孔径内是快变化的, 在残留误差 $\delta_w(x, r)$ 不可忽略的情况下, 给 f_a 带来高频影响, 破坏了时频间的一一对应关系, 此时不能在频域对误差进行补偿。

图1给出了方位向瞬时频率和方位位置间的关系曲线, 比较了等幅值的低频误差和高频误差对其关系的影响。实线为不存在运动误差的理想情况, 虚线表示存在高频运动误差的情况, 点线表示存在低频误差的情况。可以看到在误差幅值相等的情况下, 低频误差情况与无误差情况十分接近, 基本不影响信号的时频对应关系, 而高频误差对其影响严重。本文研究的正是低频误差情况下的频域补偿算法, 可补偿的误差范围由式(10)确定。关于高频误差可在时域通过重叠分块方法予以补偿。

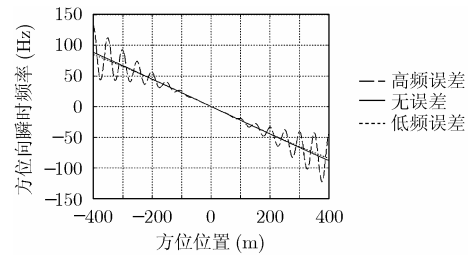


图1 瞬时方位向频率与方位位置关系图

3 宽波束频域补偿算法

3.1 算法流程

根据第2节分析的原理, 在低频误差且幅值满足式(10)情况下, 可利用时域位置和频域频率间的一一对应关系将时域误差转换到频域进行补偿。此时可利用短时傅里叶变换的方法, 减小运算量。具体实现步骤如下:

(1) 窄波束补偿并成像 首先对原始数据运用传统的窄波束运动补偿方法^[5,7]进行运动误差的补偿, 得到粗略聚焦的图像。此时图像存在残留相位误差。

(2) 方位向分块 对得到的粗略聚焦图像在方位向进行重叠分块, 考虑到运算量的问题, 一般可以16点或32点作为块长, 相邻块重叠长度可选择为块长的一半。

(3)宽波束时域误差计算 以方位分块中心点为基准点,根据式(5)计算一个合成孔径时间内的时域残留运动误差。

(4)误差的时频转换 根据式(11)所示的方位位置和方位频率的线性关系将时域误差转换到频域,频域误差表达式为

$$\Phi(f_a, r) = j \frac{4\pi}{\lambda} \delta_w(f_a, r) \quad (12)$$

此时其频域范围是 $f_a \in [-B_d/2, B_d/2]$ 。

(5)频域误差补偿 将方位分块数据进行 FFT 变换后乘以式(12)中计算得到的频域相位误差,IFFT 变换后即得到误差校正后的子图像。

(6)精确聚焦图像生成 将误差校正后的子图像保留中心部分并合并得到精确聚焦的图像。

宽波束频域补偿算法的流程如图 2 所示。对于幅值超过式(8)限制的高频误差和超过式(10)限制的低频误差情况,时频之间不再是线性对应关系,该算法失效。

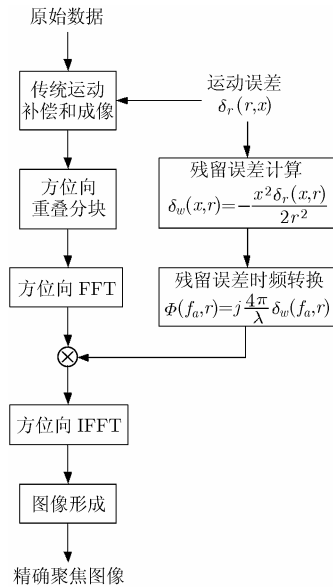


图 2 宽波束频域补偿算法流程图

3.2 运算量分析

文献[2]中提出的 PTA-Mocomp 算法也是基于频域补偿原理实现残留误差校正的。其适用条件和限制与本文提出算法相同。但是由于在干涉 SAR 系统中应用,考虑到每一像素的实际高度和参考高度之差,对每一像素都要单独计算相位误差并校正。本文提出的算法只考虑随方位位置变化的运动误差,不考虑高度差,因此可近似对每一块数据按同样的误差函数进行补偿,节省运算量。

从所需 FFT 运算的数目来比较两种方法的运算量。若图像的方位向长度为 Na ,划分子块长度为 La ,宽波束频域补偿后保留块长的一半,则在不考虑窄波束补偿运算量的情况下,宽波束频域补偿所需的运算量为 $[(2Na)/(La)]$ (1个FFT+1个IFFT),而 PTA 补偿所需运算量为 $[(2Na)/(La)]$ [1个FFT+($La/2$)个IFFT],所以宽波束频域补偿比

PTA 补偿节省了 $[(2Na)/(La)](La/2-1)$ 个FFT 的运算量。

4 仿真结果

为验证本文提出的宽波束频域补偿方法的正确性,对于存在低频运动误差的 P 波段机载 SAR 系统分别进行点目标和图像的仿真。

4.1 点目标仿真

按照表 1 所给的系统参数进行点目标仿真。误差形式为

$$\delta_r(r, x) = a(r) \left(\frac{x}{Ls} \right)^2 + a(r) \left(\frac{x}{Ls} \right) \quad (13)$$

表 1 SAR 系统仿真参数

发射信号带宽 $B = 60\text{MHz}$	距离向采样间隔 $\Delta r = 1\text{m}$
发射信号时宽 $T_p = 1.667\mu\text{s}$	方位向采样间隔 $\Delta x = 0.5\text{m}$
发射信号波长 $\lambda = 0.8\text{m}$	距离分辨率 $\rho_r = 2.5\text{m}$
方位波束角 $\beta = 22.9^\circ$	方位分辨率 $\rho_a = 1\text{m}$

其中 $a(r)$ 为误差幅值在不同斜距上的投影。由式(10)可得误差的可补偿范围为 $Ls|\delta'_r| + 2|\delta_r| = 6|a(r)| \ll 2r \Rightarrow |a(r)| \ll 666.7\text{m}$ 。取 $a(r_0) = 10\text{m}$, 分别用传统的窄波束补偿方法和本文所提出的宽波束频域补偿方法进行处理,得到的点目标响应方位向切面图如图 3 所示(4 倍插值结果)。其中,带点的实线表示不存在运动误差的点目标响应;点线表示窄波束补偿后的点目标响应;实线表示宽波束频域补偿后的点目标响应。可以看出,宽波束频域补偿后得到的点目标响应对于残留误差引起的目标位移、主瓣展宽、旁瓣升高等现象都进行了良好的校正。结果与无误差情况十分相近。

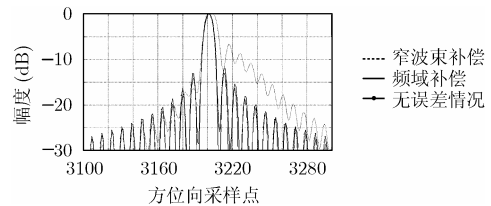


图 3 点目标响应比较图

4.2 图像仿真

用同样的参数对一幅图像加误差进行仿真,图像大小为 $516\text{m} \times 300\text{m}$ (方位向 \times 距离向)。方位向采样点数为 1032 点,方位向分块取块长 32 点,相邻块重叠 16 点,共分 64 块。比较窄波束补偿、宽波束频域补偿和 PTA 补偿得到的结果如图 4 所示。可以直观地看出宽波束频域补偿后的图像比仅进行窄波束补偿的图像在清晰度、对比度和细节信息等方面有了明显改善。

为了定量分析这几幅图像的聚焦性能,引入图像对比度和图像熵的概念,根据图像聚焦程度和图像对比度成正比^[8],和图像熵成反比^[9]的关系,分别计算 3 幅图像的对比度和熵,结果如表 2 所示。

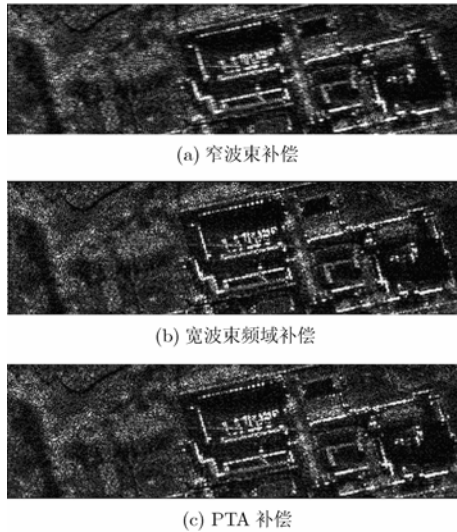


图4 运动补偿结果比较
表2 图像聚焦性能对照表

	图像对比度*	图像熵**
窄波束补偿	1.8168	7.8209×10^4
宽波束频域补偿	2.0080	7.5345×10^4
PTA 补偿	2.0360	7.3219×10^4

注: * 图像对比度函数表达式为: $C = \sqrt{A\{[I^2 - A(I^2)]^2\}} / A(I^2)$, 其中 $A(\cdot)$ 表示空间求平均值运算, $I(\cdot)$ 为图像的幅度。

** 图像熵函数表达式为: $H = -\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \bar{I}(x,y) \ln[\bar{I}(x,y)]$,

其中 $\bar{I}(x,y)$ 是图像幅度归一化后的值, M 、 N 分别为图像方位向和距离向长度, x 、 y 分别为图像方位向和距离向位置。

由表2可以看出, PTA 补偿结果的聚焦性能最好, 这是因为它对每一像素都进行了误差校正, 而宽波束频域补偿则作了一定程度的近似处理。但是两种结果差别不大。从运算量角度分析, PTA 补偿需要 $[(2Na)/(La)](La/2 + 1) = 1088$ 个 32 点 FFT 运算; 宽波束频域补偿需要 $[(2Na)/(La)] \cdot 2 = 128$ 个 32 点 FFT 运算, 其运算量仅为 PTA 补偿的 11.76%。

5 结束语

本文对一种机载宽波束 SAR 运动误差的频域补偿方法进行了详细分析和仿真。该方法对于低频误差情况能够得到良好效果, 且算法简单, 运算量小, 便于实现。对 P 波段宽波束 SAR 系统的仿真验证了该方法的有效性。

该方法利用了线性调频信号时频间的线性关系, 只适用于低频误差情况且误差幅值不能大到影响时频线性关系的程度, 存在局限性。在实际应用中需针对不同系统和不同的

误差形式分别确定可补偿的误差范围。是否可利用时频关系补偿高频误差和大幅值的低频误差成为下一步研究的问题所在。

参考文献

- [1] Burns B L and Cordaro J T. A SAR image-formation algorithm that compensates for the spatially-variant effects of antenna motion [C]. SPIE Conference Proceedings, Orlando, USA, 1994, 2230: 14–24.
- [2] De Madedo K A C and Scheiber R. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172–176.
- [3] Portsis A, Reigber A, and Mittermayer J, et al. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide-beam SAR data processing [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(23): 1405–1407.
- [4] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 206–210.
- [5] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997–1009.
- [6] Walter G C, Ron S G, and Ronald M M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms [M]. London: Artech House, 1995: 203–205.
- [7] Moreira A and Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029–1040.
- [8] Blacknell D, Blake A P, and Oliver C J, et al. A comparison of SAR multilook registration and contrast optimization autofocus algorithms applied to real SAR data [C]. Radar'92 Proceedings of the International Conference, Brighton, United Kingdom, 1992: 363–366.
- [9] Li Xi, Liu Guosui, and Ni Jinlin. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1240–1252.

郑晓双: 女, 1980 年生, 博士生, 现从事合成孔径雷达运动补偿算法研究。

禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事机载、星载合成孔径雷达系统研究工作。