

基于 PGA 的多普勒调频斜率估计

雷万明, 胡学成, 倪晋麟

(南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

摘 要: 本文详细地分析了多普勒调频斜率误差与相位梯度的关系, 提出了基于 PGA 的多普勒调频斜率估计算法, 并进行了仿真和机载 SAR 数据的成像实验. 理论和成像实验结果表明, 该算法具有运算量小、收敛速度快和估计精度高的特点.

关键词: PGA; SAR; 相位梯度; 多普勒调频斜率

中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2004) 06-1017-03

The Doppler Rate Estimation with the PGA

LEI Wan2ming, HU Xue2cheng, NI Jin2lin

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing, Jiansu 210013, China)

Abstract: This paper analyzes the relation between the Doppler rate and phase gradient, and proposes algorithm for the Doppler rate estimation with the PGA, then the performance of this algorithm is verified by the computer simulation data and airborne SAR data. The result of theoretical analysis and simulation shows that this algorithm has less operation load and faster convergence speed as well as the improved estimation accuracy.

Key words: PGA; SAR; phase gradient; Doppler rate

1 引言

在机载 SAR 中, 当分辨力较低时可直接利用惯导数据计算多普勒参数, 利用计算出的多普勒参数实现距离徙动校正和方位聚焦, 但当分辨力较高时, 飞机的扰动将使惯导数据计算出的多普勒参数存在较大的误差, 这时必需利用回波数据估计多普勒参数. 在多普勒调频斜率估计方面, 现已提出了许多算法, 如子孔径相关法, 最大对比度法、移位相关法等. 在这些估计算法中, 子孔径相关法和最大对比度法具有较大的运算量, 而移位相关法的估计精度较差, 都具有一定的局限性.

PGA 算法是基于非模型的相位误差估计^[4,5], 它是对基于运动传感器的运动补偿以后的残留相位误差以及其它原因造成的相位误差的补偿, 具有较好的鲁棒性和收敛速度快的特点, 对低阶和高阶相位误差都有非常好的补偿能力. 利用 PGA 算法中相位误差会使相位梯度与多普勒调频斜率之间存在线性关系的性质, 本文提出了基于 PGA 的多普勒调频斜率估计算法, 给出了算法的实现步骤.

2 PGA 原理

在合成孔径雷达中, 当忽略 sinc 函数的宽度且不考虑距离徙动时, 散射系数为 R 的点目标回波经距离压缩后的信号为:

$$s_r(s) = RW_a(s - s_c) \exp\left[-j \frac{4PR_c}{K}\right]$$

$$\# \exp\left\{j2P \left[f_{DC}(s - s_c) + \frac{f_{DR}(s - s_c)^2}{2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中 s_c 、 R_c 是目标处于方位波束中心时的时间和斜距, s 是平台沿轨迹时间(慢时间), $W(s - s_c)$ 是由天线方向图导致的方位向加权, f_{DC} 和 f_{DR} 分别是多普勒质心和多普勒调频斜率. 目标回波的瞬时频率 f 与慢时间 s 的关系为:

$$f = f_{DC} + f_{DR}(s - s_c), \quad |s - s_c| < T_s/2 \quad (2)$$

其中 T_s 为合成孔径时间, 即目标处于雷达波束内的时间. 目标回波的瞬时频率在时间-频率轴上是一条线段, 线段的斜率为 f_{DR} , 而线段出现的位置由 s_c 确定, 不同目标的瞬时频率线段在时间-频率轴上出现的位置不同. 当目标位于成像中心时, 回波信号和瞬时频率可表示为:

$$s_r(s, f) = RW_a \exp\left[-j \frac{4PR_c}{K}\right] \# \exp\left\{j2P \left[f_{DC} + \frac{f_{DR}s^2}{2} \right] \right\} \quad (3)$$

$$f = f_{DC} + f_{DR}s, \quad |s| < T_s/2 \quad (4)$$

为了便于分析, 假设天线方向图为矩形并忽略固定相位项, 由驻定相位原理可得式(3)的 Fourier 变换为:

$$S_r(X) = C \exp\left[-j \frac{(X - X_{DC})^2}{4Pf_{DR}}\right], \quad |X - X_{DC}| < PB_a \quad (5)$$

其中 C 是与目标散射系数、天线方位图和固定相位项有关的常数, B_a 为方位向信号带宽. 经过 0 中频处理后有:

$$S_r(X) = C \exp\left[-j \frac{X^2}{4Pf_{DR}}\right], \quad |X| < PB_a \quad (6)$$

SAR 的方位压缩是通过构造方位参考函数,然后将式(6)与方位参考函数的频域形式相乘,并作逆 Fourier 变换.当不考虑方位向加权时,方位参考函数可表示为:

$$H_a(X) = \exp\left[j \frac{X^2}{4P f_{cDR}}\right] \quad (7)$$

假设方位参考函数的调频斜率 f_{cDR} 与回波信号的 f_{DR} 存在误差,即 $\Delta f_{DR} = f_{DR} - f_{cDR}$.则 $S_r(X)$ 与 $H_a(X)$ 相乘的结果为:

$$S_a(X) = S_r(X)H_r(X) = C \exp\left[j \frac{f_{DR} - f_{cDR}}{4P f_{cDR} f_{DR}} X^2\right] \\ = C \exp\left[j \frac{X^2}{4PK_e}\right] = C \exp[jU(X)], \quad |X| < PB_a \quad (8)$$

其中 $K_e = f_{cDR} f_{DR} / \Delta f_{DR}$, $U(X) = X^2 / 4PK_e$.由式(8)可知,当方位参考函数的调频斜率与回波信号的调频斜率存在误差时,经过方位压缩后的信号仍为线性调频信号,信号的调频斜率由调频斜率误差决定.求 $S_a(X)$ 的导数可得:

$$\frac{dS_a(X)}{dX} = \frac{5S_a(X)}{5X} = jU'(X) C \exp[jU(X)] \\ = jU'(X) S_a(X), \quad |X| < PB_a \quad (9)$$

由式(9)可得:

$$jU'(X) = \frac{Sc_a(X) S_a^*(X)}{|S_a(X)|^2}, \quad |X| < PB_a \quad (10)$$

于是该距离波门中回波的相位梯度为:

$$U'(X) = \frac{\text{Im}[Sc_a(X) S_a^*(X)]}{|S_a(X)|^2} = f/K_e, \quad |X| < PB_a \quad (11)$$

由式(11)可知,如果回波信号的多普勒调频斜率与方位参考函数的调频斜率存在误差,则在频率 2 梯度平面上将存在一条以 0 频为中心,斜率为 $b = 1/K_e$ 的线段.因此,只要通过线性拟合求出频率 2 梯度平面上频率线段的斜率,则可得多普勒调频斜率的估计为:

$$\Delta f_{DR} = b f_{cDR} f_{DR} U [f_{cDR}]^2 \quad (12)$$

$$f_{DR} = f_{cDR} + \Delta f_{DR} \quad (13)$$

为了提高相位梯度的估计精度,可通过特显点法选取多个距离波门,然后将相应的 $\text{Im}[Sc_a(X) S_a^*(X)]$ 和 $|S_a(X)|^2$ 累加提高信噪比,即:

$$U'(X) = \frac{\sum_n \text{Im}[Sc_a(X) S_a^*(X)]}{\sum_n |S_a(X)|^2}, \quad |X| < PB_a \quad (14)$$

n 代表距离向的单元数.

3 调频斜率估计算法

根据前面的分析,在假设已作了距离压缩和 0 中频处理的前提下,基于PGA算法的多普勒调频斜率估计步骤如下:

(1) 方位压缩.对选取的特显点,由初始调频斜率 f_{DR}^0 构造方位参数函数作方位压缩获得复图像.

(2) 移位.对选取的距离波门沿方位向从左至右寻找第 1 个幅度最大点(假设它的位置为 s_c),将该散射点移到图像的中心,消除时移 s_c 的影响.

(3) 加窗.寻找中心点两边幅度小于中心幅度 10dB 的点,以这两个点之间的宽度为窗口宽度构造窗函数,窗函数中心为图像中心.将复图像乘以窗函数,消除未处于图像中心的点

对相位梯度估计的影响.

(4) 计算 $s_a(X)$ 和 $sc_a(X)$ (参考图1).对上述移位和加窗后的数据,直接利用方位FFT计算 $s_a(X)$,而 $sc_a(X)$ 可利用Fourier变换的导数性质 $\text{jts}(t) Z \frac{dS(X)}{dX}$ 计算.为了减小运算量,可以图像中心为中心,截取部份数据计算 $s_a(X)$ 和 $sc_a(X)$.

(5) 计算相位梯度 U' .利用 $S_a(X)$ 和 $Sc_a(X)$,分别计算 $\text{Im}[Sc_a(X) S_a^*(X)]$ 和 $|S_a(X)|^2$ 并累加,然后利用式(14)计算相位梯度.

(6) 计算 Δf_{DR} .在 $-B_a/2 \sim B_a/2$ 范围内用直线 $a + bt = 0$ 拟合相位梯度 U' , a, b 的估计可用最小二乘法.在数字信号处理中频率分量是离散量,拟合直线可表示为 $a + bt, n = 0, \dots, N$, f 是一个频域抽样间隔所对应的频率.在这种情况下,多普勒调频斜率的误差变为 $\Delta f_{DR} U [f_{cDR}]^2 / \Delta f$,其中 $bc = bS_f$.

(7) 判别.当调频斜率误差 Δf_{DR} 小于门限 E 时,退出循环,否则利用 $f_{DR}^{i+1} = f_{DR}^i + \Delta f_{DR}^i$ 构造新的调频斜率并转第(1)步.

利用上述步骤估计多普勒调频斜率的实现框图如图1所示.

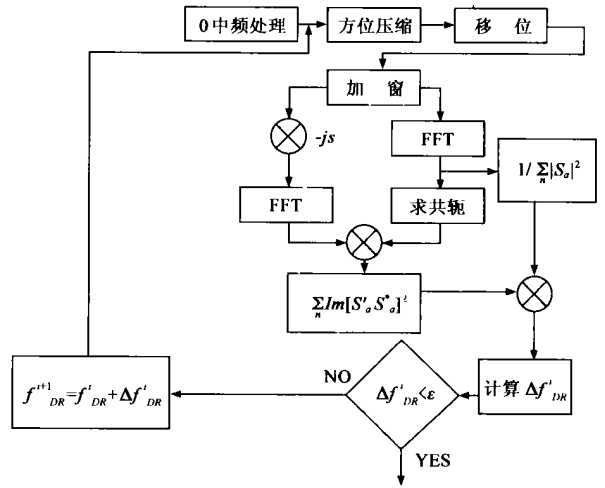


图1 基于PGA的调频斜率估计实现框图

4 仿真和成像实验

4.1 仿真

合成孔径雷达的回波信号经过距离压缩后,如果不考虑距离徙动,方位向回波就是一个简单的线性调频信号,多普勒调频斜率的估计变为线性调频信号调频斜率的估计.因此,为了验证本文所提多普勒调频斜率估计算法的有效性,我们利用线性调频信号作了算法仿真,仿真中的线性调频信号参数为: $f_{DR} = -100\text{Hz}/s$, $f_{DC} = 420\text{Hz}$, 抽样频率 $\text{PRF} = 1000\text{Hz}$, 合成孔径时间 $T_s = 21.8\text{s}$, 天线方向图为矩形.为了比较真实地反映SAR回波的特性,我们利用上述参数,首先产生 10 个幅度分别为 $1/k$ (k 为信号的编号)、调频斜率为 $f_{DR} + \epsilon_{DR}$ 的线性调频信号,然后将这些调频信号两两时移两个抽样间隔并叠加,用以仿真SAR中的方位向信号.表1是取不同的 ϵ_{DR} 时,利用本文算法估计多普勒调频斜率的迭代次数和最后估计结果,其中 $E = 0.1, f_{DR}^0 = f_{DR}$.图2是 $\epsilon_{DR} = 10$ 时第一次迭代后的相位梯度图,多普勒调频斜率误差与梯度存在线性关系.图3是

利用最小二乘法拟合出的结果, 拟合直线斜率反映了多普勒调频斜率的误差。

表 1 不同误差下的多普勒调频斜率估计结果

ef_{Dr}	迭代次数	最后的 Δf_{Dr}	最后估计结果
-15Hz/s	4	-0.0809	-115.2761
10Hz/s	4	-0.0471	-90.2014
-5Hz/s	4	-0.0272	-105.2526
2Hz/s	4	-0.0562	-98.2319

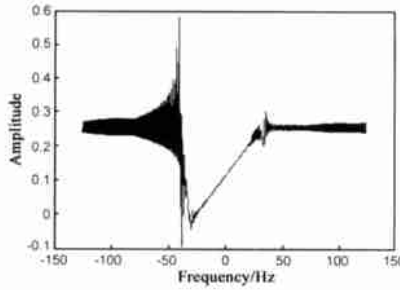


图 2 相位梯度

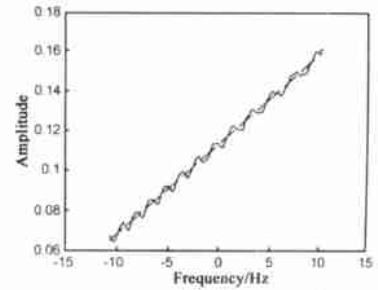


图 3 相位梯度及拟合直线

4.1.2 成像实验

在机载 SAR 成像中, 大气涡流会使飞机产生偏离理想航线的扰动飞行, 高分辨力成像时必须进行运动补偿, 才能获得比较满意的图像。运动补偿所需的相位误差既可以利用运动传感器测量, 也可利用回波数据提取的多普勒调频斜率计算, 通常后者的精度高于前者。为了进一步验证本文算法的有效性, 我们利用 1 米机载 SAR 数据作了成像实验。图 4 是利用惯导参数直接成像的结果, 图像散焦非常严重且散焦程度与方位位置有关。图 5 是将 RD 算法与子孔径方法结合起来^[6], 通过时域运动补偿并用本文算法提取多普勒调频斜率的成像结果, 运动误差所带来的相位误差已被消除。从图 5 可知, 基于 PGA 的多普勒调频斜率提取算法在小的信号带宽下也能较精确地提取多普勒调频斜率。



图 4 利用惯导参数成像结果



图 5 时域运动补偿的成像结果

5 结论

本文基于 PGA 原理, 将仅用于纠正相位误差的 PGA 算法运用到多普勒调频斜率估计中, 并通过仿真和机载 SAR 数据对这种算法进行了验证。与子孔径相关法、最大对比度法等多普勒调频斜率估计方法相比, 基于 PGA 的多普勒调频斜率估计具有收敛速度快, 估计精度高的特点。同时, 由于相位梯度的估计只需要窗口内的数据, 而窗口外的数据为 0, 因此, 当

在方位向寻找到最大幅度点并将目标移到成像中心和加窗后, 后面的相位梯度计算可在一个比方位处理孔径小得多的孔径内进行, 大大地减少了运算量。

参考文献:

- [1] J Horrell, M Inngs. Range curvature limitation of the range doppler algorithm stripmap SAR processing [A]. EUSAR . 98 [C]. Friedrichshafen, Germany: EUSAR. 98, 1998. 99- 103.
- [2] Ghiglia D C, Wahl D E, Eichel P H. Some methods for reducing propagation induced phase errors in coherent imaging systems [J]. Opt Society of America, 1988, 5(6): 942- 957.
- [3] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al. Phase gradient autofocus a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(3): 827- 835.
- [4] Eichel P H, Wahl D E. Phase gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative [J]. Opt Society of America, 1989, 14(20): 1101- 1103.
- [5] Eichel P H, Ghiglia D C. Speckle processing method for synthetic aperture radar phase correction [J]. Opt Society of America, 1989, 14(1): 1 - 3.
- [6] Alberto Moreira, Yonghong Huang. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans on GRS, 1994, 32(5): 1029- 1040.

作者简介:



雷万明 男, 1964 年生于四川省简阳, 博士, 工程师, 通信与信息系统专业, 主要从事信号处理、SAR 成像等方面的研究。



胡学成 男, 1964 年生于安徽省滁州, 博士, 高级工程师, 通信与信息系统专业, 主要从事机载雷达信号处理、SAR 成像等方面的研究。