

运动补偿与 UWB SAR 中 RD 成像算法结合的实现方法*

郭微光,刘光平,董臻,梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 分析了机载合成孔径雷达(SAR)中载机运动误差对接收信号的影响,指出在运动补偿处理中可以将距离向误差分解为空不变项和空变项,在此基础上采用一阶和二阶运动补偿的方法来对两个误差项进行补偿。为了将测量的运动误差数据应用到高分辨率成像中,提出了一种与距离多普勒(RD)成像算法相结合的运动补偿方案。通过对仿真数据的测试,本文方法得到了验证。

关键词 机载合成孔径雷达,运动补偿,距离多普勒成像算法

中图分类号:TN958 文献标识码:A

Airborne SAR Motion Compensation Based on RD Algorithm

GUO Wei-guang, LIU Guang-ping, DONG Zhen, LIANG Dian-nong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract This paper analyzes how the trajectory deviations in the airborne synthetic aperture radar(SAR) can affect the received data. It shows that the range error can be separated into space invariant and variant contributions, which can be compensated by the first-order and second-order motion compensation processing. To realize high resolution SAR image, this paper represents a motion compensation method integrated in range-doppler(RD) algorithm. Finally, the analysis and scheme are validated by the results on simulated data.

Key words airborne synthetic aperture radar, motion compensation, range-Doppler algorithm

机载 SAR 是利用载机沿航迹运动时所产生的多普勒频率来获得高角分辨率雷达图像的。在理想的成像处理方法中,总是假设飞机是进行匀速直线运动,并基于此假设进行分析和计算。但是在实际飞行中,受气流等因素的影响以及飞机性能和驾驶技术的限制,飞机的运动误差是不可避免的,这必然会对雷达图像造成不良影响,甚至无法成像。因此,在机载 SAR 中,运动补偿是一个必不可少的环节。运动补偿系统可以消除各种运动误差的影响,以实现高分辨率的 SAR 成像。

载机的运动误差将直接影响回波多普勒信号的相位和幅度,使其压缩波形产生畸变,从而导致 SAR 图像的几何畸变和区域特征的模糊。运动补偿的首要任务就是准确测量和预测载机的运动和姿态,这可以通过安装在天线相位中心的高精度运动传感器来实现,如 INS 和 GPS 等。在此基础上,根据测量出的数据来校正回波多普勒信号的各种相位和幅度误差,以消除载机运动偏差所造成的图像质量下降。

SAR 成像处理的目的是要得到目标区域电磁散射系统的二维分布,是一个二维相关处理过程,其中距离多普勒成像(RD)算法通过距离迁移校正,在满足聚焦深度要求的前提下将成像处理分解为两个一维的移不变相关处理,并采用频域相关算法来实现。RD 算法是最常用、最成熟的成像算法之一,因此本文将讨论 RD 算法中运动补偿的实现问题。

1 运动误差分析

图 1 画出了正侧视条带 SAR 的基本几何关系。以理想轨迹为参考坐标,点目标 P 在方位向和斜距方向的坐标值为 (x, r) , μ 表示载机当前位置, d 为载机理想位置与实际位置的偏差向量, θ 为目标下

* 收稿日期:2003-09-07

基金项目:雷达信号处理国防科技重点实验室基金资助项目(51431020101KG01)

作者简介:郭微光(1975—),男,博士生。

视角 α 为矢量 d 与水平面的夹角 δr 为在距离向的偏差 R_n 和 R 分别为点目标到理想位置和实际位置的空间距离 表示为:

$$\begin{cases} R_n(r, \mu - x) = \sqrt{r^2 + (\mu - x)^2} \\ R(r, \mu, x) = \sqrt{[r + \delta r(\mu, r)]^2 + (\mu - x)^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} \delta r(\mu, r) &= \sqrt{r^2 + d^2 - 2dr \sin(\theta - \alpha)} - r \\ &\approx -d \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

令雷达发射的线性调频信号为:

$$f(T) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp\left(j2\pi f_0 t - j\frac{\alpha_t}{2} t^2\right) \quad (3)$$

式中 f_0 为载频 T_a 和 α_t 分别为信号的波门时间长度和调频

斜率 t 为距离向时间 即快时间。那么雷达接收信号为测绘区域内每个点目标反射信号的积累 可以表示为:

$$sS(\mu, \nu) = \iint dx dr \chi(x, r) \times \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R - j\alpha_r(\nu - R)\right] \times \text{rect}\left(\frac{\nu - R}{D_r}\right) w^2(\mu - x) \quad (4)$$

其中 $\nu = ct/2$ 表示在每条距离线中 A/D 采样点数据的位置 α_r 和 D_r 分别为 T_a 和 α_t 的空域表达式 $\chi(x, r)$ 表征点目标的散射特性 $w(\cdot)$ 为天线的增益图 通常近似为 $\text{rect}[(\mu - x)/X]$ X 为合成孔径长度。

对式(4)在距离向做傅立叶变换得:

$$\begin{aligned} sS(\mu, \eta) &= \text{rect}\left(\frac{\eta}{2\Omega_r}\right) \exp(j\alpha_r \eta^2) \\ &\times \iint \chi(x, r) w^2(\mu - x) \exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)R] dx dr \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\Omega_r = \alpha_r D_r$ $\alpha_r = 1/(4\alpha_t)$ 上式所表示的是载机在实际轨迹情况所得到的距离向频谱 对理想轨迹而言 只需将式中的最后一个变量 R 替代为 R_n 即可。

2 运动误差的补偿

载机的实际位置可以由 GPS/INS 等系统精确测量出来 由此可以计算出测绘带内每个位置到载机之间的距离与理想距离之间的误差。

将点目标到载机位置的实际距离 R 展开为:

$$R(\mu, x, r) = R_n(\mu - x, r) + \delta r(\mu - x, \mu, r) \quad (6)$$

并对上式考虑以下近似:

$$\delta R \approx \frac{\partial R_n}{\partial r} \delta r = \frac{r}{R_n} \delta r(\mu, r) \approx \delta r - \frac{(\mu - x)^2}{2r} \frac{\delta r}{r} \approx \delta r \quad (7)$$

由于测绘区域内距离向位置不同的点与载机之间的距离误差是不同的 因此 可以将距离误差分解为两个部分:

$$\delta r(\mu, r) = \delta r_0(\mu) + \delta r_v(\mu, r) \quad (8)$$

式中 $\delta r_0(\mu) = \delta r(\mu, r_0)$ 表示载机与测绘带中心的距离误差 与回波数据在距离向的位置无关; $\delta r_v(\cdot)$ 表征与空间位置有关的距离误差。每条距离线上不同位置的数据所对应的 $\delta r_v(\mu, r)$ 是不同的。

将式(6)~(8)代入式(5)经整理可得:

$$\begin{aligned} sS(\mu, \eta) &\approx \text{rect}\left(\frac{\eta}{2\Omega_r}\right) \exp[j\alpha_r \eta^2 - j(\eta + 4\pi/\lambda)\delta r_0] \\ &\times \iint \chi(x, r) w^2(\mu - x) \exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)(R_n + \delta r_v)] dx dr \end{aligned} \quad (9)$$

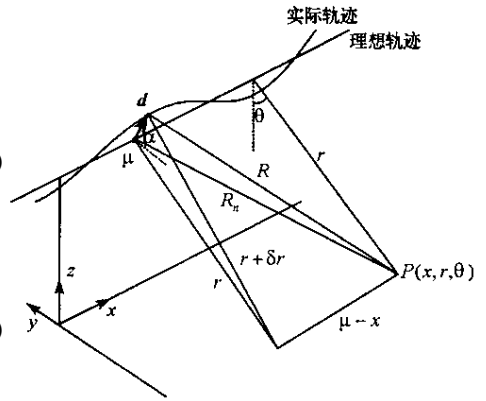


图1 SAR的几何关系图

Fig.1 SAR system geometry

2.1 一阶补偿

一阶补偿是抵消误差相位因子 $\exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)\delta r_0]$ 的影响,该误差相位因子与距离向坐标无关。一阶补偿可以在时域对每条距离向数据进行位置调整,然后在频域乘以补偿因子 $\exp[j(\eta + 4\pi/\lambda)\delta r_0]$ 来实现。

为了提高运算效率,可以考虑将一阶补偿和距离压缩在一个步骤中实现,即对每条距离线数据在频域与 $\exp[-j\alpha_r\eta^2 + j(\eta + 4\pi/\lambda)\delta r_0]$ 相乘。回波数据经过距离压缩和一阶补偿,变换回时域后表示为:

$$ss(\mu, \nu) = \iint \chi(x, r)w^2(\mu - x) \times \exp[-j(4\pi/\lambda)(R_n + \delta r_v)] \times \sin[\Omega_r(\nu - (R_n + \delta r_v))] dx dr \tag{10}$$

2.2 二阶补偿

对于大带宽的线性调频信号而言,若 Ω_r 足够大,则在 $|r - \nu| < \pi/\Omega_r$ 的范围内 $\delta r_v(\mu, r)$ 近似为常数,即可以表示为 $\delta r_v(\mu, \nu)$ 。对式(10)的最后一项考虑以下近似:

$$\sin[\Omega_r(\nu - (R_n + \delta r_v))] \approx \sin[\Omega_r(\nu - R_n)] \tag{11}$$

在距离迁移校正后有 $R_n \rightarrow r$,式(10)变为:

$$ss(\mu, \nu) \approx \exp[-j(4\pi/\lambda)\delta r_v(\mu, \nu)] \times \iint \chi(x, r)w^2(\mu - x) \exp[-j(4\pi/\lambda)R_n] \sin[\Omega_r(\nu - r)] dx dr \tag{12}$$

从上式可以看出,二阶补偿可以通过在时域乘以因子 $\exp[j(4\pi/\lambda)\delta r_v(\mu, \nu)]$ 来实现。

2.3 运动补偿的实现

SAR 的成像过程就是通过信号处理方法从回波数据中提取目标电磁反射特性的过程。SAR 回波可视为目标反射特性通过一个二维空变系统的输出。因此,最直接的成像方法是对回波进行二维匹配滤波,RD 算法就是一种常用的高效率成像算法。该算法利用多普勒观点分析方位向相位和频率的变化,将二维信号处理转化为距离和方位两个一维信号处理的级联,从而在 RD 域实现聚焦。

经典的 RD 算法忽略了高阶相位误差,直接在 RD 域进行插值以校正距离迁移,然后进行方位匹配滤波。在斜视情况下,可以利用二次距离压缩(SRC: Secondary Range Compression)补偿二次相位误差的 RD 算法。在方位高分辨率情况下,由于多普勒频率范围较大,所以不能用多普勒中心频率代替高阶相位误差表达式中的多普勒频率,而且正侧视 SAR 回波信号的多普勒中心为零,所以这时 SRC 不能发挥作用。因此,对于正侧视高分辨 UWB SAR,需要对经典的 RD 算法进行改进,以采用更有效的高阶相位补偿方法。

图2所示为带有运动补偿的 RD 成像算法。被处理的数据在方位向必须是等间隔的,这可以通过载机在飞行期间实时调整脉冲重复频率(PRF)或者事后在方位向对数据进行插值处理来实现。对预处理后的数据,首先在距离向变换到频域,进行距离压缩和一阶运动补偿,然后在方位向变换到频域,进行距离迁移校正。在接下来的逆变换中,距离向采用 Scaled 逆 FFT 以消除残余距离迁移的影响。对此时的时域数据乘以一个相位补偿因子以进行二阶运动补偿,然后做方位压缩变换回时域,得到 SAR 图像。

2.4 仿真结果

仿真系统设定载机轨迹距测绘带中心 10 000m,测绘带区域为 500m x 500m。在测绘带沿距离向均匀布置 7 个点目标。设定运动误差为距离向上峰值为 5m 的低频正弦信号。图3所示为没有进行运动补偿的成像效果。运动误差使目标能量散失,在测绘带远

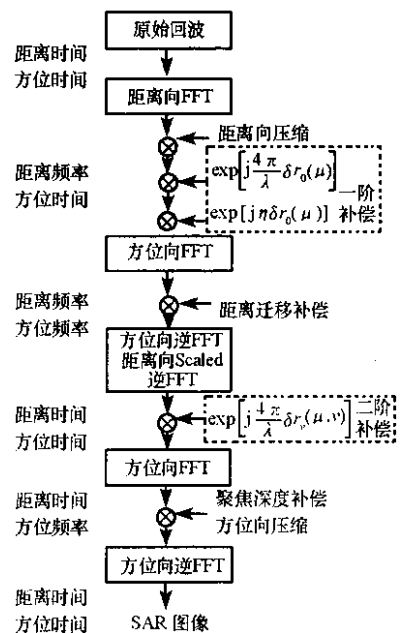


图2 带有运动补偿的 RD 成像算法
Fig.2 The motion compensation processing integrated in RD algorithm

端尤为严重。图 4 所示为经过一阶补偿后的成像效果,误差因子为测绘带中心与载机实际位置之间的距离误差。从图中可以看出,放置在中心位置的点目标已被很好地聚焦,但离中心较远的点目标仍然存在一定程度的散焦。在一阶补偿的基础之上,对进行过距离迁移校正的时域回波数据进行二阶运动补偿。距离线上每个数据在测绘带所对应的位置与载机实际位置之间的误差,减去测绘带中心位置与载机实际位置之间的误差即得出空变的距离误差 $\delta r_r(\mu, \nu)$ 。然后根据此误差进行二阶运动补偿,其结果如图 5 所示,可见测绘带远端的点目标已被很好地聚焦。

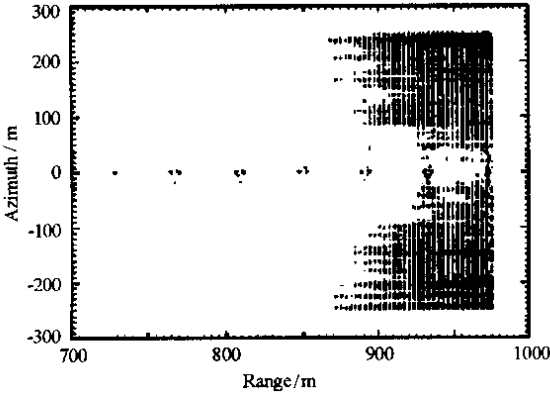


图 3 没有运动补偿的成像效果

Fig.3 Image without motion compensation

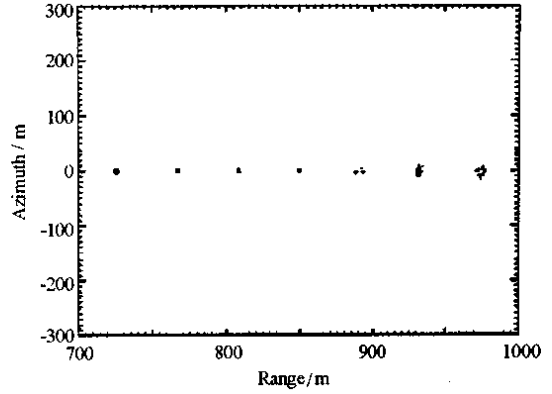


图 4 一阶补偿后的成像效果

Fig.4 Image with first-order compensation

3 结论

本文首先对机载 SAR 的几何关系进行了分析,推导了载机运动轨迹误差对雷达接收信号的影响。为了便于运动补偿处理,运动误差可以被分解为空不变和空变项。在此基础上,本文采用了一阶和二阶运动补偿的概念,并结合现有的 RD 成像算法,分别在频域和时域对两个误差项进行补偿。仿真实验的效果表明了该方法是有效的,尤其是对高分辨率 SAR 而言,二阶运动补偿有明显的改善作用。

参考文献:

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1989.
- [2] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.
- [3] Franceschetti G, Schirrinzi G. A SAR Processor Based on Two-dimensional FFT Code[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 20(2).
- [4] Fornaro G. Trajectory Deviations in Airborne SAR: Analysis and Compensation[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3).

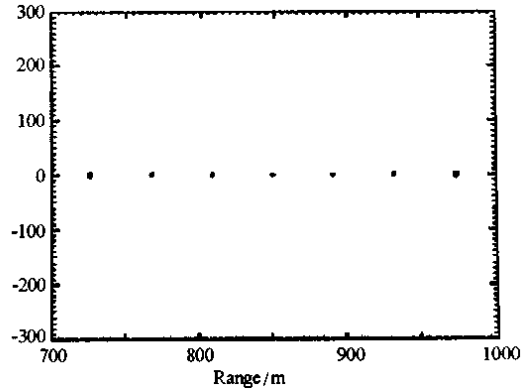


图 5 二阶补偿后的成像效果

Fig.5 Image with second-order compensation

