

一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法

黄源宝, 保 铮, 周 峰

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 提出了一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动误差的补偿方法. 它不用插值, 所以节省了运算量、避免了插值带来的图像质量下降, 因而对机载 SAR 系统的实时成像有好的应用前景. 理论分析、仿真和实测数据成像证明了该方法的正确性和有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 条带式; 运动补偿

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)03-0459-04

A Novel Method for Along Track Motion Compensation of the Airborne Strip-Map SAR

HUANG Yuan bao, BAO Zheng, ZHOU Feng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A method for along-track motion compensation of the airborne strip map SAR (Synthetic Aperture Radar) is presented. No complex interpolation is involved in this algorithm, hence the high computational efficiency and the improved image quality are achieved. Theoretical analysis, simulation results and the real data images show that it is of great value in real time imaging.

Key words: SAR; strip map; motion compensation

1 引言

条带式 SAR 成像算法是基于载机作匀速直线飞行, 但实际上载机运动由于气流和载机自身等原因会偏离理想的航线, 如图 1 所示. 图中 P 点为平面 XOY 中的一点, 载机理想航线在 XOZ 平面内且与 X 轴平行, R 为天线相位中心距目标点的瞬时距离 R_0 , 为理想航线距目标点的最近距离. 文献 [1~3] 等对运动误差的影响进行了大量的分析,

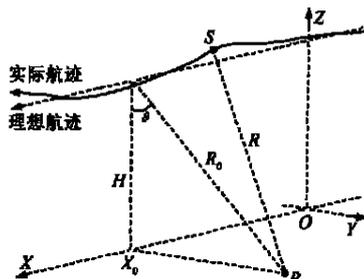


图1 存在运动误差时的 SAR 几何模型图

指出成出高质量雷达图像的关键是精确地测量实际航线并补偿它和理想航线间的差别. 运动测量主要采用惯性导航系统 (INS)、惯性测量单元 (IMU) 和全球定位系统 (GPS) 等组成的运动测量系统^[4], 但在测量精度不够高时或在没有装备测量系统的低成本 SAR 系统中也可利用雷达回波数据估计运动参数^[5~8]. 得到运动参数后, 补偿方法也非常重要, 特别是对于条带式 SAR, 它的场景较大, 仅对场景中心点进行补偿是不行的, 必须考虑运动误差对不同目标点的影响的差异. 为了

使补偿可以进行, 一定的近似是必需的. 根据图 1 中几何关系, 可得运动误差所造成的瞬时斜距误差为^[9,10]

$$\Delta R(t) \approx \Delta x(t) \frac{V_t - X_0}{R_0} - \Delta Y(t) \sin \theta + \Delta z(t) \cos \theta \quad (1)$$

式中 V 为载机在理想航线上的理想速度, t 为时间且规定当 $X=0$ 时 $t=0$, $\Delta X(t)$, $\Delta Y(t)$ 和 $\Delta Z(t)$ 为雷达相位中心在三个坐标上的瞬时位置误差. 式(1)对雷达方位向波束宽度采取了窄波束近似, 使得由 $\Delta Y(t)$ 与 $\Delta Z(t)$ 而产生的瞬时斜距误差与目标点的方位向位置无关. 对于波束很宽的情况(如低波段超宽带雷达)须另想办法^[11]. 本文仅考虑满足式(1)的情况. 从式(1)可以看出, 其第一项由沿理想航线的误差产生, 它与目标点在平面 XOY 上的二维位置有关, 不仅距离向位置不同的点不能同时补偿, 而且方位向位置不同的点也不能同时补偿; 第二、三项由偏离理想航线的误差产生, 它们只与目标点的距离向位置有关(即与 θ 有关), 可在距离压缩后按距离单元各次回波分别补偿. 因此运动误差可分为沿雷达视线方向的误差和沿载机理想航线方向的误差两个部分, 且成像质量对沿理想航线的速度误差非常敏感^[10]. 沿雷达视线方向的补偿表现为与距离有关的相位补偿和包络移动, 其中包络移动通过插值来完成, 但对条带式 SAR, 载机在合成孔径时间这一短时间内, 位置误差一般不超出一个距离分辨单元, 可以只补偿相位而不补偿包络. 沿理想航线运动误差的影响也可以分

为对包络的影响和对相位的影响两个方面,可以利用运动测量系统的测量值足够精确地实时调节雷达重复频率或事后离线对回波数据在慢时间进行插值使雷达在合成孔径上的空间采样间隔成为均匀的,这样两种误差就同时得到了补偿.实时调节雷达重复频率对硬件要求高,插值运算量大并且使图像质量下降,所以本文提出一种不用插值的沿理想航线运动误差的补偿方法.实际上沿理想航线运动误差造成的包络误差和相位误差对补偿精度的要求是不一样的,可以分别用不同方法补偿.沿理想航线运动误差短时间内可视为恒定的速度误差,所以包络误差和距离徙动可以合并在一起当成新的距离徙动分子孔径进行校正,这样在每一个子孔径内距离徙动校正除了速度取值不同外和不存在误差时没什么两样.包络误差和距离徙动结合在一起得到校正后就可以只考虑信号的相位.当飞机匀速直线飞行且雷达重复周期固定时,所得到的某一目标点回波的多普勒相位历程可看成是来自一个线性调频信号.固定的瞬时多普勒调频率对应着固定的空间采样间隔.但当飞机作非匀速直线飞行时,瞬时多普勒调频率不再为固定值.我们可在一定条件下近似地认为瞬时多普勒调频率只与瞬时速度有关,从而用瞬时速度构造一补偿函数补偿瞬时多普勒调频率的变化,这也就是等效地补偿了沿理想航向速度的波动分量.这种运动补偿方法最初是从实践中总结出来的经验方法^[12],在实际应用中取得了良好效果.本文对它的机理进行了理论解释并且确定了其适用范围,将它作为一种有理论基础的方法正式提出.理论分析和仿真试验都证明本方法对即使横向分辨要求为 1m 的情况也是适用的,并且大量的实测数据处理表明它能够满足目前国内所录取的 SAR 数据沿航线速度误差补偿处理的要求.我们将在第三节给出分辨率为 1m × 1m 实测的直升机载条带式 SAR 数据处理结果,该试验利用基于数据的多普勒中心和调频率估计方法,对运动参数的变化历程作了长时间的精确估计,并将速度补偿和成像算法有机结合在一起,在飞行状态不很理想时,仍获得了好的宽幅图像.我们认为本文方法对运动测量系统测量精度不够高或没有装备测量系统的低成本机载 SAR 系统的实时成像系统有很好的应用前景.

2 沿理想航线运动误差的补偿方法

雷达采集信号的模型如图 1 所示.假设沿雷达视线方向的运动误差已经得到了补偿,认为载机沿理想航线飞行,只是由于速度有波动而空间采样不均匀,并且速度波动引起的包络误差和距离徙动也已经分子孔径得到了补偿,所以现在只考虑点 P 回波的多普勒相位历程,可写为

$$\Phi(X) = -\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(X - X_0)^2 + R_0^2} \approx -\frac{2\pi}{\lambda R_0} (X - X_0)^2, \quad (2)$$

$$X_{0-} - \frac{L}{2} \leq X \leq X_{0+} + \frac{L}{2}$$

式中 λ 是雷达载波波长, L 是雷达合成孔径长度,并且因为不影响分析,式中略去了常数相位.式(2)是以天线位置 X 为自变量的空域信号,事实上我们得到的数据是一个时域信号,横向压缩也是在时域进行的.若定义位置坐标原点也为时间坐

标原点,位置坐标正向也为时间坐标正向,则有以下关系

$$X(t) = \int_0^t v(s) ds = Vt + \int_0^t \Delta v(s) ds \quad (3)$$

式中 $v(t)$ 为载机飞行瞬时速度(实际中需要测量或基于数据的估计), V 是飞机在整个成像处理区间的理想速度(可取为平均速度), $\Delta v(t)$ 是速度的波动量.将式(3)代入式(2),可得瞬时多普勒调频率为

$$k_d(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 \Phi[X(t)]}{dt^2} = K + \Delta k_d(t) + \delta k_d(t) \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} K = -\frac{2V^2}{\lambda R_0} \\ \Delta k_d(t) = -\frac{2}{\lambda R_0} [2V\Delta v(t) + \Delta v^2(t)] = -\frac{2}{\lambda R_0} [v^2(t) - V^2] \\ \delta k_d(t) = -\frac{2}{\lambda R_0} \left[\int_0^t \Delta v(t) dt + Vt \right] \frac{d\Delta v(t)}{dt} \\ = -\frac{2}{\lambda R_0} v'(t) [X(t) - X_0] \end{cases}$$

其中 t_0 为飞机到达点 X_0 的时刻,即有 $X_0 = X(t_0)$, K 为平均速度对应的多普勒调频率,是我们想保留的部分. $\Delta k_d(t)$ 和 $\delta k_d(t)$ 是速度波动的影响,它们随时间变化,因而破坏了时域信号的方位向平移不变性,使得我们无法对同一距离单元但方位向位置不同的多个目标在频域同时进行压缩.但这两项的性质是不同的, $\Delta k_d(t)$ 只与瞬时速度有关,是可补偿项; $\delta k_d(t)$ 与目标点的方位向位置有关,方位向位置不同的目标点不可以统一补偿,但在一定条件下它的影响可忽略,可忽略的条件为

$$L \ll (3\lambda R_0^2 V^2) / a_{\max} J^{1/3} \quad (5)$$

式中 a_{\max} 为加速度最大值.式(5)的证明见附录.式(4)忽略 $\delta k_d(t)$ 后变为

$$k_d(t) \approx K + \Delta k_d(t) \quad (6)$$

这就是说速度波动引起的瞬时调频率的波动中 $\Delta k_d(t)$ 起主要作用.利用式(6),式(3)又可在时域表示为瞬时调频率的二次积分形式

$$\begin{aligned} \Phi[X(t)] &= 2\pi \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s k_d(u) du ds \\ &= \pi K (t - t_0)^2 + 2\pi \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \Delta k_d(u) du ds \end{aligned} \quad (7)$$

式中的两个相位项分别对应着式(6)中的两个调频率项.积分下限取 t_0 是为了利用式(2)在 X_0 点函数值及一阶导数值为 0 的性质.式(7)中第一项是我们想保留的相位历程;第二项是由于速度不稳引起的扰动项,它与目标点的位置有关,因而破坏了信号的方位向平移不变性,必须补偿而且也可以被补偿.我们可选方位向坐标为 0 的点作参考点构造相位补偿函数

$$\Delta \Phi[X(t)] = 2\pi \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \Delta k_d(u) du ds \quad (8)$$

由式(4)可以看出 $\Delta k_d(t)$ 只与瞬时速度有关,由于瞬时速度已知(实际中利用测量值或利用回波数据分段估计后内插成光滑曲线),所以式(8)很容易算出.用式(8)补偿式(7),得

$$\Phi[X(t)] - \Delta \Phi[X(t)]$$

$$= \pi K(t - t_0)^2 - 2\pi t \int_0^{t_0} \Delta k_d(u) du - 2\pi \int_0^{t_0} \int_0^s \Delta k_d(u) duds$$

$$= \pi K(t - t_0 - \tau_0) + \Phi_0 \tag{9}$$

式中

$$\tau_0 = \frac{1}{K} \int_0^{t_0} \Delta k_d(u) du$$

$$\Phi_0 = -2\pi K t_0 \tau_0 - \pi K \tau_0^2 - 2\pi \int_0^{t_0} \int_0^s \Delta k_d(u) duds$$

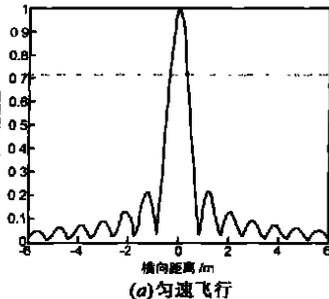
从式(9)可以看到,与信号位置有关的扰动项已被补偿掉了,补偿过程带来的常数相位 Φ_0 不影响压缩.应当强调的是,本节所讨论的补偿方法并不是对某一目标点的补偿而是对整个场景因沿理想航线速度不稳所引起的相位误差的补偿(当然不同距离单元的相位补偿函数不同,相差一个系数).至此,我们已在时域完成了沿理想航线的运动误差的补偿,也就是速度变化对慢时间域平移不变性影响的补偿,可以对同一距离单元不同方位向位置的信号在频域同时进行压缩.

3 仿真和实测数据的成像试验

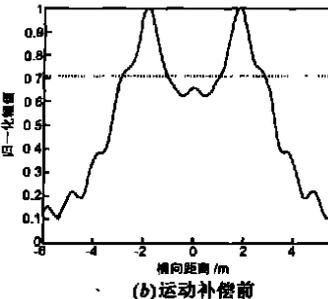
我们对点目标进行仿真试验,选择仿真参数:波长为0.03 m,雷达重复频率为 909Hz,合成孔径长度取 194m,对应的方位分辨率为 0.9m,场景中心距离为 12km,载机飞行平均速度为 116m/s,扰动速度选择了幅值为 3m/s,周期为 6s,加速度为 $2m/s^2$ 的三角波,这样选择扰动速度模型与实测速度变化比较近似 $2m/s^2$.图 2 是场景中一点的成像仿真结果.其中图 2(a)是速度为匀速时的成像结果,图 2(b)是速度为变速时,速度补偿前的成像结果,图像对称是因为扰动速度相对这个点的分布刚好是对称的,但这并不失一般性;图 2(c)是速度补偿后的成像结果.可见补偿的效果明显.

我们还用某次试飞所录取的分辨率为 $1m \times 1m$ 的直升机载条带式 SAR 数据来做实验.雷达工作在 Ku 波段,飞行高度为 2000m,场景中心最近斜距为 13.3km,距离向场景宽度(成像平面)为 2.5km,方位向场景宽度大约 2km,分 32 组(子块),每组 512 次回波.合成孔径长度取 200m,这样在考虑了波束方向图调制因素后方位向分辨率仍达 1m.合成孔径长度内最大的距离弯曲量为 0.4m,小于距离向分辨率,所以我们不校正距离弯曲而采用二维分离的距离多普勒算法.由于本试验为验证本文所提沿理想航线的运动补偿方法,所以不校正沿雷达视线方向的运动误差.本文方法要对调频率(可由速度算出)函数二次积分后才作为补偿函数进行补偿,因此是建立在精细、连续估计出航线运动状态基

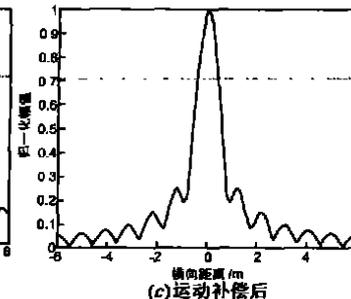
础上的,对速度估计的精度和速度估计的频率要求很高.速度估计的精度是由距离向多单元平均应达到的.速度估计的频率是由数据本身的情况决定的.对于本文数据,我们将方位向场景分为 32 组(子块),每组 512 次回



(a) 匀速飞行



(b) 运动补偿前



(c) 运动补偿后

图 2 X 波段仿真成像结果

波,数据分析表明每个子块内速度可以视为不变,其估计值如图 3 所示.实际补偿时还要将图 3 估计值进行曲线拟合,在慢时间上形成一条连续曲线以进一步提高补偿精度.图 4(a)是未补偿沿理想航线速度变化,直接用平均速度构造方位匹配函数进行压缩的成像结果.图 4(b)是使用本文方法补偿了沿理想航线速度变化所成的像.可以明显看出,补偿沿理想航向运动误差后成像质量得到了大幅度提高,这也印证了文献[10]成像质量对沿理想航线的速度误差非常敏感的说法.

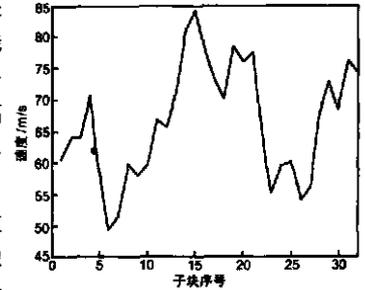


图 3 实测数据参数估计

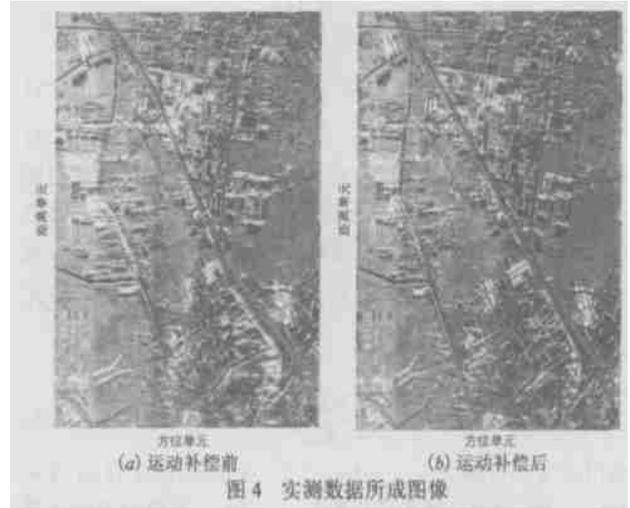


图 4 实测数据所成图像

4 结论

本文提出了一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法.它避免了插值处理,提高了运算效率和图像质量,对于开发基于回波数据的机载 SAR 实时成像系统有较高的参考价值.理论分析、仿真和实测数据成像表明,本文方法对目前国内大多数机载 SAR 系统所录取的数据沿航向的速度补偿是有效的.另外,本文方法也可在装有运动测量系统的 SAR 系统中作为自聚焦方法使用.

附录 瞬时多普勒调频率近似条件的证明

式(4)中 $\delta k_d(t)$ 可忽略的条件可用下式表示

$$2\pi \int_{t_0}^t \int_{-L/2}^{L/2} \delta k_d(u) dudt \leq \frac{\pi}{4}, t_0 - \frac{L}{2V} \leq t \leq t_0 + \frac{L}{2V} \quad (\alpha 1)$$

即在合成孔径范围内,由 $\delta k_d(t)$ 引起的相位误差不超过 $\pi/4$. 从式(4)可以看出 $\delta k_d(t)$ 与目标点的方位向位置和加速度值有关. 从惯导所测得的数据看,一般 $\dot{v}(t)$ 最大不超过 $2m/s^2$, 我们再令 $\delta k_d(t)$ 表达式中 $[X(u) - X_0]$ 取最大值 $L/2$, 式(α1)积分上限 t 取 $L/2V + t_0$, 则当 $\lambda = 0.03m, R_0 = 12km, V = 116m/s$ 时,可算出 $L \leq 85m$. 也就是说在上述情况下,合成孔径长度小于 $85m$ 时, $\delta k_d(t)$ 的影响可以忽略. 显然,以上分析在 L 较大时偏于保守. 一般 L 取几十米是没问题的,我们应当找出 L 较大时较精确的估算方法. 由于 $\delta k_d(t)$ 是由瞬时加速度 $\dot{v}(t)$ 和天线相对孔径中心点的位置 $[X(t) - X_0]$ 的乘积决定. 为研究 $\delta k_d(t)$ 对二者的敏感程度的不同,我们将 $\delta k_d(t)$ 式表示成全微分形式

$$\Delta\{\delta k_d(t)\} \approx \Delta\{\dot{v}(t)\} \cdot \frac{\partial\{\delta k_d(t)\}}{\partial\{\dot{v}(t)\}} + \Delta\{[X(t) - X_0]\} \cdot \frac{\partial\{\delta k_d(t)\}}{\partial\{[X(t) - X_0]\}} = -\frac{2}{\lambda R_0}[X(t) - X_0] \cdot \Delta\{\dot{v}(t)\} - \frac{2}{\lambda R_0}\dot{v}(t) \cdot \Delta\{[X(t) - X_0]\} \quad (\alpha 2)$$

从式(α2)可以看出, $[X(t) - X_0]$ 较大时,天线位置的变化与加速度的变化相比, $\delta k_d(t)$ 对天线位置的变化是相对远不敏感的. 于是我们令 $\dot{v}(t)$ 取加速度的最大值 a_{max} , 且忽略 $\delta k_d(t)$ 表达式中位置波动 $\int_{t_0}^t \Delta v(t) dt$ 的影响,再计算式(α1)在合成孔径端点时的值,则可解得

$$L \leq \left(\frac{3\lambda R_0 V^2}{a_{max}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\alpha 3)$$

利用式(α3)可得当 $a_{max} = 2m/s^2, \lambda = 0.03m, R_0 = 12km, V = 116m/s$ 时,最大合成孔径长度 $L_{max} = 194m$, 对应的横向分辨率为 $0.9m$; 而当 λ 取 $0.02m$ 最大合成孔径长度为 $169m$, 对应的横向分辨率分别为 $0.7m$.

致谢 感谢西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的井伟博士生给本文提出的参考意见.

参考文献:

- [1] Kirk J. Motion compensation for synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans. on AES, 1975, 11(3): 338- 348.
- [2] Haslam G, Reid B. Motion sensing requirement for synthetic aperture radar[A]. Proc IEEE Conf[C]. Toronto: IEEE, 1983. 126- 127.
- [3] Buckreuss S. Motion errors in an airborne synthetic SAR system[J]. ET-TJ, 1991, 2(6): 655- 660.

- [4] Carrar W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [5] Mancill C E, Swiger J M. A map drift autofocus technique for correcting higher order SAR phase errors[A]. Proc. Tri service Radar Symp[C]. Monterey: CA, 1981. 391- 400.
- [6] Blacknell D, Freeman A, Quegan S, Ward I, Fimley I, Oliver C, White R, Wood J. Geometric accuracy in airborne SAR images[J]. IEEE Trans on AES, 1989, 25(2): 241- 258.
- [7] Joao R, Moreira A. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation[J]. IEEE Trans on GRS, 1990, 28(4): 620- 626.
- [8] D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, C V Jr Jackowatz. Phase gradient autofocus A robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Trans on GRS, 1994, 30(3): 827- 834.
- [9] Giorgio Franceschetti, Riccardo Landari. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. London: CRC Press, 1999.
- [10] Buckreuss S. Motion compensation for airborne SAR based on inertial data, RDM and GPS[A]. IGARSS '94[C]. Pasadena (USA): IEEE, 1994. 1971- 1973.
- [11] Potsis A, Reigber A, Mitemayer J, Moreira A, Uzunoglou N. Improving the focusing properties of SAR processors for wide band and wide beam low frequency imaging[A]. IGARSS '01[C]. Sydney: IEEE, 2001. 3047- 3049.
- [12] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1824- 1828.

作者简介:



黄源宝 男, 1970年4月出生于甘肃省兰州市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士生, 主要研究方向为雷达成像. E-mail: ybhuang_2003@163.com



保铮 男, 1927年12月出生于江苏省南通市, 现为西安电子科技大学教授、中国科学院院士, 主要研究方向为雷达信号处理.