

星载双站 SAR 采用距离-多普勒算法的保相成像*

孙造宇, 梁甸农, 张永胜

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:星载双站合成孔径雷达(SAR)的成像可以采用距离-多普勒(RD)算法。算法的距离模型可使用二次模型和直线模型,针对系统双站的特点,讨论了高精度距离模型参数的求取方法。传统 RD 算法采用二次模型,在斜视情况下,二次模型可能会有较大误差,主要是会影响方位向压缩,因此讨论采用直线模型对应的方位压缩因子进行成像,从而改善方位向旁瓣。成像中为了使算法能够保相,需采用合适的方位向压缩因子,使其不破坏所成像的相位信息。

关键词:合成孔径雷达;双站;距离模型;距离-多普勒算法;保相

中图分类号:TN957 **文献标识码:**A

Phase-preserving Imaging for Spaceborne Bistatic SAR by Range-Doppler Algorithm

SUN Zao-yu, LIANG Dian-nong, ZHANG Yong-sheng

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

Abstract: Range-Doppler algorithm can be applied to imaging of spaceborne bistatic SAR. Range models used by the algorithm include quadratic model and beeline model. Considering the bistatic character of the system, method of getting precise range model parameters was studied. RD algorithm was deduced using quadratic model. In squint side-looking situation, quadratic model may have ignorable error. The error mainly can influence azimuth compression. In order to suppress azimuth sidelobe, imaging using azimuth compressing function according to beeline model was studied. For preserving image phase, right azimuth compressing function should be used to avoid destruction of the phase.

Key words: SAR; bistatic; range model; range-Doppler algorithm; phase-preserving

星载分布式合成孔径雷达(SAR)是近年来提出的一种天基雷达系统,具有高分辨率成像、干涉测高、动目标测速等功能,在军事上有重要应用价值,因此各大国都在积极研究和发 展这种系统。星载分布式 SAR 采用数颗卫星编队飞行构成,采用一发多收体制时,发射机和接收机位于不同的卫星上,此时获取的回波数据对应的几何模型为双站形式,需要采用双站成像算法进行处理。另外,星载分布式 SAR 的很多其他功能是基于成像处理的结果,一些功能还需要所成像的相位信息,如干涉测高,这就需要成像算法具有保相能力。

距离-多普勒(RD)算法^[1]是一种在单站成像时常用的成像算法,通过改进,可以应用在双站的情况下。考虑到双站情况下,往往会出现斜视的情况,所以需采用带二次距离压缩的 RD 算法。双站对成像算法的影响是改变了距离模型,进而影响到成像算法。本文分析了星载双站情况下的距离模型及其参数的求取,进而讨论了利用直线模型来改变方位向的压缩因子从而提高成像质量。对于保相能力,采用合适的方位向压缩因子即可实现,文中也有论述。

1 距离模型及其参数求取

讨论成像首先要讨论系统的几何模型,双站成像的几何模型表示如图 1。其中,XYZ 为随地球转动的地心坐标系, S_1 为发射星, S_2 为接收星, v_1 、 v_2 为 S_1 、 S_2 的速度,此速度可等效为惯性系下卫星速度

* 收稿日期:2007-03-18

作者简介:孙造宇(1978—),男,博士生。

与地球自转速度的合成, P 为目标位置。目标点回波的持续时间为目标点处于波束内的时间, 在这段时间内信号多普勒频率的变化构成其多普勒历程。

SAR 成像需要以某一频率为基准, 称为参考多普勒频率^[2], 根据目标点多普勒历程, 可知目标点在此参考频率对应的方位向慢时间, 从而还可得到此时刻目标至两颗星的斜距和。由于方位向慢时间和斜距和为所成像的两维, 所以参考多普勒频率决定了目标点所成像在图像中的位置。

系统对应的距离模型是用数学模型来描述目标点在合成孔径时间内至两颗星的斜距和的变化, 距离模型常用的有二次模型和直线模型^[3]。二次模型是将斜距和进行泰勒展开, 并只保留到二次项, 表示如下:

$$R(t) = r - \lambda(f_r t + f_r t^2/2) \quad (1)$$

其中, f_r 为参考多普勒频率, t 为方位向慢时间, 0 时刻对应多普勒频率为 f_r , f_r 为 0 时刻对应的多普勒调频率, r 为 0 时刻对应的斜距和, λ 为信号波长。

更精确的距离模型是直线模型, 由于卫星在合成孔径时间内的运动轨迹很接近直线, 因此可以采用直线模型, 表示如下:

$$R(t) = \sqrt{r_1^2 + v_{r1}^2 t^2 - 2r_1 v_{r1} t \cos\theta_{r1}} + \sqrt{r_2^2 + v_{r2}^2 t^2 - 2r_2 v_{r2} t \cos\theta_{r2}} \quad (2)$$

设 D_1 、 D_2 、 T 分别为 0 时刻地心至 S_1 、 S_2 、 P 的距离矢量; r_1 、 r_2 分别为 0 时刻 S_1 、 S_2 至 P 的距离矢量, 即 $T - D_1 = r_1$, $T - D_2 = r_2$; v_{r1} 、 v_{r2} 为两星的速度。上述直线距离模型中, r_1 、 r_2 分别表示 r_1 、 r_2 的模值, v_{r1} 、 v_{r2} 分别表示 v_{r1} 、 v_{r2} 的模值, v_{r1} 与 r_1 的夹角为 θ_{r1} , v_{r2} 与 r_2 的夹角为 θ_{r2} 。

在上述的距离模型中, 需要求取各参数。求取参数是在给定方位向时刻(距离模型中时刻 t 只在目标点的合成孔径时间内标度, 是相对时刻, 此处时刻为绝对时刻)、参考多普勒频率和其对应斜距和的情况下, 求取对应目标点的坐标, 进而得到各参数。给定方位向时刻, 则可得到卫星位置, 采用多普勒方程、斜距方程和地球椭球方程^[4]来求解目标点坐标:

$$\lambda f_r = v_{r1} \cdot (T - D_1) / |T - D_1| + v_{r2} \cdot (T - D_2) / |T - D_2| \quad (3)$$

$$|T - D_1| + |T - D_2| = r \quad (4)$$

$$(T_x^2 + T_y^2) / (a + h)^2 + T_z^2 / (b + h)^2 = 1 \quad (5)$$

其中, T_x 、 T_y 、 T_z 为 T 的三个坐标值, a 、 b 分别为地球椭球的长、短半轴, h 为目标高程, 一般不能准确得到, 取为一个大概值。上述方程可以采用牛顿迭代法进行求解。得到了目标点的坐标, 直线模型中各参数就容易得到。对于二次模型, 参考多普勒频率与几何模型的关系同样用式(3)表示, 调频率用下式求解^[5]:

$$f_r = -v_{r1}^2 \sin^2 \theta_{r1} / (\lambda r_1) + g_1 \cdot r_1 / (\lambda r_1) - v_{r2}^2 \sin^2 \theta_{r2} / (\lambda r_2) + g_2 \cdot r_2 / (\lambda r_2) \quad (6)$$

其中, g_1 、 g_2 分别为合成孔径中 0 时刻 S_1 、 S_2 的加速度。模型中速度和加速度都是在随地球转动的地心坐标系下的值, 而通过卫星轨道规律得到的是地心惯性坐标系下的值, 其中变换关系表示为:

$$v_{r(i)} = A_{eci-ecf} v_{eci(i)} - \omega \times D_{(i)} \quad (7)$$

$$g_{(i)} = -\mu D_{(i)} / D_{(i)}^3 + \omega \times [\omega \times D_{(i)}] - 2A_{eci-ecf} [\omega \times v_{eci(i)}] \quad (8)$$

其中, 下标“(i)”取为“1”、“2”, 分别表示对应 S_1 、 S_2 的量, 下标“eci”表示随地球转动的地心坐标系, “ecf”表示地心惯性坐标系, $A_{eci-ecf}$ 表示两坐标系的转换矩阵, μ 为引力常数, $\omega = (0, 0, \omega)$, ω 为地球自转角速度。

直线模型在合成孔径较长时仍然有较大误差, 需对其进一步改进, 将速度 v_{r1} 、 v_{r2} 替换为等效速度 v_1 、 v_2 , 斜视角 θ_{r1} 、 θ_{r2} 替换为等效斜视角 θ_1 、 θ_2 , 使距离模型泰勒展开后的参考频率和调频率与式(3)、(6)相同:

$$v_{(i)} \cos \theta_{(i)} / \lambda = v_{r(i)} \cos \theta_{r(i)} / \lambda \quad (9)$$

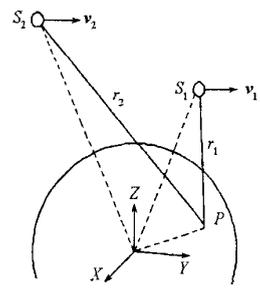


图1 系统几何模型
Fig.1 Geometric model of the system

$$-v_{r(i)}^2 \sin^2 \theta_{r(i)} / [\lambda r_{r(i)}] = -v_{r(i)}^2 \sin^2 \theta_{r(i)} / [\lambda r_{r(i)}] + \mathbf{g}_{(i)} \cdot \mathbf{r}_{r(i)} / [\lambda r_{r(i)}] \quad (10)$$

成像中对应不同目标点的距离模型由于随绝对方位向时间变化很小,一般不考虑,而随成像斜距和变化很大,需针对位于采样点上的斜距和分别求取距离模型。另外,考虑到距离模型与实际轨迹越接近,成像误差越小,因此,需要取参考多普勒频率为多普勒中心频率,此时,距离模型的误差最小。

2 RD 成像算法及其改进

星载双站 SAR 的成像可以采用 RD 算法,针对星载双站 SAR 的特点,算法中需要采用二次距离压缩^[6-7],为了提高成像质量,还需要改进,下面进行详细论述。

对于场景的回波信号,解调并进行距离向压缩后的信号可表示为:

$$ss(\tau, t) = \iint \sigma(r, t') W(t - t') \text{sinc}\{B_r[\tau - R(t - t', r)]/c\} \exp[-j2\pi R(t - t', r)/\lambda] dr dt' \quad (11)$$

其中, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$, τ 为距离向快时间, t 为方位向慢时间, t' 为某一目标点在参考多普勒频率处对应的方位向慢时间, t, t' 是绝对时间, r 为某一目标点在参考多普勒频率处对应的斜距和, σ 为散射系数, W 为方位向天线方向图, B_r 为信号带宽。

将二次模型代入式(11),并将信号先做距离向傅立叶变换,再做方位向傅立叶变换,得到信号的频谱为:

$$SS(f_r, f_t) = \iint A_1 \sigma(r, t') \exp(-j2\pi f_t t') \exp\left(-j \frac{2\pi r f_r}{c}\right) \exp\left(-j \frac{2\pi r}{\lambda}\right) \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) W\left[\frac{1}{f_r} \left(\frac{f_0}{f_r + f_0} f_t - f_r\right)\right] \Psi dr dt' \quad (12)$$

$$\Psi = \exp[j(2\pi \Delta \tau f_r + \phi_a + \phi_r)], \quad \Delta \tau = \frac{f_t^2 - f_r^2}{2f_0 f_r}, \quad \phi_a = -\frac{\pi(f_t - f_r)^2}{f_r}, \quad \phi_r = -\frac{\pi f_t^2}{f_0^2 f_r} + \frac{\pi f_r^2}{2f_0^2 f_r} \quad (13)$$

其中, A_1 为一复常数, f_r 为距离向频率, f_t 为方位向频率, f_0 为信号中心频率, Ψ 为部分相位项。一般文献中, Ψ 中相位项 ϕ_r 取到二阶,考虑到三阶项仍有较大影响,故本文取到三阶^[8]。

根据上述公式可以得到 RD 算法的处理方法为:首先在频域乘以因子 $\exp(-j\phi_r)$, 进行二次距离压缩。然后,考虑到距离迁移和方位压缩因子的空变性,将信号变换到距离-多普勒域,进行距离迁移校正,校正值为 $\Delta \tau$ 。同样在距离-多普勒域乘以方位压缩因子进行方位压缩,方位压缩因子为 $\exp(-j\phi_a)$ 。将上述处理后的信号变换回时域,即得到所成像。考虑天线方向图为矩形函数,并考虑到信号中心频率远大于信号带宽,则所成像近似为:

$$ss_i(\tau, t) = \iint \sigma(r, t') \exp(-j2\pi r/\lambda) \text{sinc}[B_r(\tau - r/c)] \text{sinc}[B_a(t - t')] \exp[-j2\pi f_{dc}(t - t')] dr dt' \quad (14)$$

其中, B_a 为多普勒带宽, f_{dc} 为多普勒中心频率,相位项 $-2\pi r/\lambda$ 为进行干涉处理所需的相位信息,可见,采用上述处理能够实现所成像的保相功能。

上述的推导采用的是二次模型,而二次模型往往精度不够高,由于距离迁移校正相对此误差不是很敏感,二次距离压缩在斜视角不太大的情况受此误差的影响也不大,而对于方位压缩,模型误差达到八分之一波长就会对成像造成相当的影响,因此考虑利用更精确的直线模型来做方位压缩。根据上述处理,只不做方位压缩的信号在时域表示为:

$$ss_a(\tau, t) = \iint \sigma(r, t') W(t - t') \text{sinc}[B_r(\tau - r/c)] \exp[-j2\pi R(t - t', r)/\lambda] dr dt' \quad (15)$$

同样需要对此信号在距离-多普勒域乘以方位压缩因子,根据驻定相位原理,距离-多普勒域的信号表示为:

$$sS(\tau, f_t) = \iint A_2 \sigma(r, t') \text{sinc}[B_r(\tau - r/c)] W\left[\frac{(f_t - f_r)}{f_r}\right] \exp(-j2\pi f_{r1} r_1 \cos\theta_1/v_1 - j2\pi f_{r2} r_2 \cos\theta_2/v_2) \cdot \exp\left[-j(2\pi r_1 \sin\theta_1/\lambda) \sqrt{1 - (\lambda f_{r1}/v_1)^2} - j(2\pi r_2 \sin\theta_2/\lambda) \sqrt{1 - (\lambda f_{r2}/v_2)^2}\right] \exp(-j2\pi f_t t') dr dt' \quad (16)$$

其中, A_2 为复常数, f_{i1} 为 f_i 的去程对应部分, f_{i2} 为 f_i 的回程对应部分。则方位压缩因子表示为:

$$H_a(f_i) = \exp\left\{-j(2\pi r_1/\lambda)\left[1 - \sin\theta_1 \sqrt{1 - (\lambda f_{i1}/v_1)^2}\right] - j(2\pi r_2/\lambda)\left[1 - \sin\theta_2 \sqrt{1 - (\lambda f_{i2}/v_2)^2}\right]\right\} \cdot \exp(j2\pi r_1 \cos\theta_1 f_{i1}/v_1 + j2\pi r_2 \cos\theta_2 f_{i2}/v_2) \quad (17)$$

在上述方位压缩因子中, 考虑到保相的要求, 需要压缩因子在参考多普勒频率处泰勒展开时不含零次项和一次项。采用上述的方位压缩因子就能实现信号的保相成像。成像结果表示同式(14)。

上述处理关键是要求出 f_{i1} 和 f_{i2} , 同样根据驻定相位原理, f_{i1} 和 f_{i2} 满足下述两个方程:

$$-s_1(r_1 \sin\theta_1/v_1)\{[v_1/(\lambda f_{i1})]^2 - 1\}^{-1/2} + r_1 \cos\theta_1/v_1 = -s_2(r_2 \sin\theta_2/v_2)\{[v_2/(\lambda f_{i2})]^2 - 1\}^{-1/2} + r_2 \cos\theta_2/v_2 \quad (18)$$

$$f_i = f_{i1} + f_{i2} \quad (19)$$

其中, $s_{(i)}$ 为正负号, $f_{(i)}$ 为正时 $s_{(i)}$ 取正, 为负时 $s_{(i)}$ 取负。上述两个方程可以采用牛顿迭代法求解得到 f_{i1} 和 f_{i2} 。考虑对式(18)进行近似, 在参考多普勒频率处泰勒展开, 并只保留到一次项, 得

$$f_{i1} = (f_{n1} f_i + f_{r1} f_{n2} - f_{i2} f_{n1})/f_{nr} \quad (20)$$

$$f_r = f_{r1} + f_{r2}, \quad f_{r1} = v_1 \cos\theta_1/\lambda, \quad f_{r2} = v_2 \cos\theta_2/\lambda \quad (21)$$

$$f_n = f_{n1} + f_{n2}, \quad f_{n1} = -v_1^2 \sin^2\theta_1/(\lambda r_1), \quad f_{n2} = -v_2^2 \sin^2\theta_2/(\lambda r_2) \quad (22)$$

通过式(19)、(20)即可计算出 f_{i1} 和 f_{i2} , 代入方位压缩因子进行方位压缩, 变换到时域即可得到所成复图像。

3 仿真结果

为了对上述的讨论进行分析, 设定参数进行仿真。首先考虑在距离模型的求解中, 目标点高程取为一个大概值, 分析此误差对距离模型的影响。设定参数如下: 卫星高度 600km, 两星轨道之间相距 10km, 在沿轨方向相距 100km, 卫星速度 7.5km/s, 中心频率 1.5GHz, 信号带宽 30MHz, 合成孔径长度 9.6km, 发射星下视角 30°, 斜视角 85°。做出距离模型最大误差随目标点高程误差的变化(如图 2)。可见, 目标点高程误差造成的距离模型误差很小, 此误差的传递系数与星间距、合成孔径长度等因素有关, 当其值接近或小于上述仿真值时, 目标点高程误差不会对成像造成太大影响。

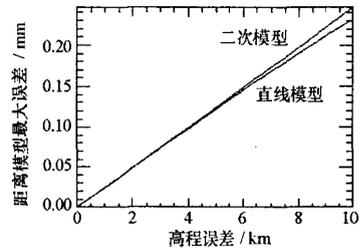


图 2 距离模型最大误差随高程误差的变化

Fig.2 Maximum error of range model relative to target elevation error

采用以上参数仿真目标的回波, 并用上述成像算法进行成像, 结果如图 3~5。图 3 是理想的成像结果, 即采用理想匹配滤波器滤波后的结果, 图 4 是在频域相位 ϕ 只取到二阶, 并且采用没有改进的方位向压缩因子成像后的结果, 图 5 是在频域相位 ϕ 取到三阶, 并且采用改进的方位向压缩因子成像后的结果。可见图 4 的结果旁瓣向一侧集中, 导致最高旁瓣提高, 通过改进, 将频域相位 ϕ 取到三阶, 距离向的旁瓣有所改善, 采用直线模型的方位向压缩因子, 则方位向旁瓣得到改善, 最高旁瓣相对于图 4 结果降低了, 和理想成像结果更接近。改进后算法的成像结果相对于理想结果仍有点差距, 这是成像算法中的一些近似引起的, 但为了保持算法的效率, 这些近似也是需要的。

进一步对成像结果进行定量分析, 仿真得到在不同斜视角、不同成像方式下的峰值旁瓣比(PSLR), 并为了分析保相性能, 求取成像后的缠绕相位, 仿真结果如表 1。对于峰值旁瓣比(PSLR), 由于本文主要是对方位向压缩进行改进, 因此只求取方位向的 PSLR 值。由表 1 可见, 采用直线模型改进方位向压缩后, 相对于采用二次模型的成像结果, PSLR 值降低, 旁瓣性能得到改善。另外可见, 斜视角越接近正侧视, PSLR 值越低, 旁瓣性能越好。对于缠绕相位, 采用二次模型的成像结果与采用直线模型改进的成像结果的相位都比较接近理论值, 但采用直线模型改进的成像结果的相位相对于理论值的误差更小, 因此其保相性能也更好。

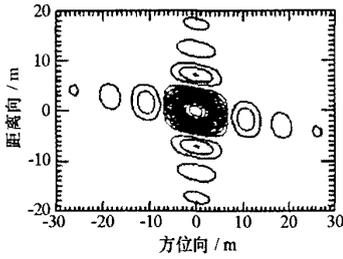


图3 理想成像结果
Fig.3 Ideal imaging result

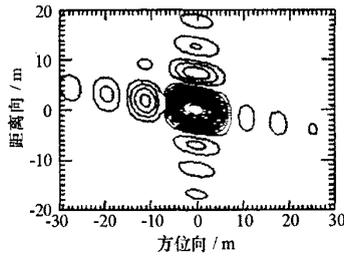


图4 一般 RD 算法成像结果
Fig.4 Imaging by ordinary RD algorithm

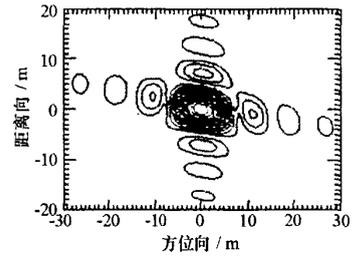


图5 改进的 RD 算法成像结果
Fig.5 Imaging by modified RD algorithm

表 1 成像定量分析

Tab.1 Quantitative analysis of imaging

成像方式	理想成像			采用二次模型成像			采用直线模型成像		
斜视角($^{\circ}$)	80	85	90	80	85	90	80	85	90
方位向 PSLR(dB)	-14.0	-14.0	-14.0	-9.0	-10.1	-11.7	-11.8	-13.0	-13.3
缠绕相位(rad)	0.719	1.945	-2.279	0.726	1.951	-2.275	0.720	1.946	-2.279

4 结论

星载双站 SAR 可以采用 RD 算法进行成像,成像使用的距离模型需要考虑系统双站的特点,距离模型可采用二次模型和直线模型,本文分析了这两种距离模型在双站情况下的形式,给出了距离模型中参数的求法,在求解参数中,目标点高程有较大误差,经过仿真可知,此误差对距离模型的影响很小,因此采用上述方法可以得到足够精确的距离模型。在成像算法中,考虑到系统会出现斜视的情况,可能会导致二次模型误差过大而影响成像质量,本文考虑采用更精确的直线模型下的方位压缩因子进行成像,可以改善方位向旁瓣,另外在算法中, ϕ 取至三阶项,可以改善距离向旁瓣。在算法中,要实现保相能力,则需要采用适当的方位向压缩因子,使相位不至于被破坏。仿真结果表明改进算法可以实现较精确的成像。

参考文献:

- [1] Bamler R. A Comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focusing Algorithms[J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1992, 30(4):706-713.
- [2] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry[C]//Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3):333-382.
- [3] 何峰,梁甸农,刘建平. 一种星载双基地 SAR 等效平飞距离模型[J]. 电子与信息学报,2004,26(suppl.):185-189.
- [4] Mora O, Agusti O, Bara M, et al. Direct Geocoding for Generation of Precise Wide-area Elevation Models with ERS SAR Data[C]//ESA Special Publication, ESA Publications Division C/O ESTEC, 2000, 478:449-455.
- [5] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 孙泓波,顾红,苏卫民,等. 机载合成孔径雷达成像算法研究[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(9):90-94.
- [7] Jin M Y, Wu C. A SAR Correlation Algorithm Which Accommodates Large Range Migration[J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1984, GE-22:592-597.
- [8] 刘光平. 超宽带合成孔径雷达高效成像算法[D]. 长沙:国防科技大学,2003.

