

机载双基地 SAR 成像算法比较

况 凌, 沈晓峰, 杨万麟

(电子科技大学电子工程系, 四川成都 610054)

摘 要: 机载双基地 SAR (synthetic aperture radar) 的成像算法与单基地类似, 需要做空间变化的二维相关处理. 不同的双基地 SAR 成像算法对空间变化的二维相关处理采取了不同的近似方法. 本文详细分析了忽略方位向和距离向耦合的算法, 双基地距离-多普勒算法, 直接应用相位驻定原理三种算法的近似程度和相互联系. 并给出了这些算法对相位近似的解析分析. 最后给出仿真结果以验证解析分析的正确性.

关键词: 双基地合成孔径雷达; 成像算法; 空间变化二维相关处理

中图分类号: TN951 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 12-2311-04

A Comparison of Airborne Bistatic SAR Imaging Algorithm

KUANG Ling, SHEN Xiao-feng, YANG Warr lin

(Department of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Imaging of Airborne bistatic SAR (synthetic aperture radar) which requires a two dimensional space variant correlation is like that of monostatic SAR. Different image algorithms use different approximation to handle the two dimensional space variant correlation. Approximation and relation of different algorithms are analyzed: algorithm with ignoring range azimuth coupling, bistatic range doppler algorithm, algorithm of straight applying stationary phase principle. The phase approximation of different algorithms is given in analytic. Finally, the simulation is given to validate analytic result.

Key words: bistatic SAR; imaging algorithm; two dimensional space variant correlation

1 引言

双基地 SAR 由于收发系统互相分开, 放置于不同的平台上, 使其与单基地 SAR 相比有以下优点: 接收机可以获得目标多方向的散射信息, 从而获得目标各个方向的像; 接收机由于是无源的, 不易被敌方发现, 因此双基地 SAR 是一种有效的抗干扰手段. 由于这些优势使得双基地 SAR 在近年来受到越来越多的关注^[1, 2].

机载双基地 SAR 的成像算法与单基地 SAR 的成像算法类似, 需要对回波信号作空间变化的二维相关处理. 但是由于机载双基地 SAR 的接收机和发射机分置于两个不同的运动平台上, 因此它的相位历史信息与单基地相比有很大的不同, 这些不同点使得双基地 SAR 的成像算法比单基地的算法更复杂.

最简单的双基地成像算法是直接套用文献[3]中的单基地算法, 忽略方位向和距离向的耦合, 将二维相关处理分为两个独立的一维相关处理. 文献[4]中的方法与单基地中的距离-多普勒算法^[5]近似, 可以看作是双基地距离-多普勒算法. 更精确的做法是直接应用相位驻定原理将二维相关处理函数做付氏变换后, 用二维付氏变换处理. 这些算法对空间变化的二维相关处理作了不同的近似, 文献[3~5]虽然讨论了这些算法,

但是算法之间的联系和近似程度并未讨论. 本文将详细讨论这些双基地 SAR 成像算法的近似程度, 相互联系.

2 几何坐标系

假设双基地 SAR 的收发载机以相同速度做匀速直线运动, 以正侧视方式工作. 发射机所在坐标为 (X_T, vt, h_T) , $t \in [-T/2, T/2]$, T 表示整个合成孔径时间, 合成孔径长度为 vT . 对任一信号发射时刻, 接收机在 (X_R, vt, h_R) 接收经点目标

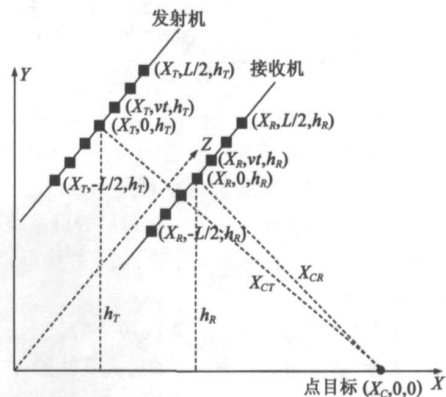


图 1 双基地 SAR 坐标示意图

反射而来的信号. 为了方便分析, 不失一般性, 设点目标坐标为 $(X_C, 0, 0)$. 坐标示意图如图 1.

由于本文将主要分析成像算法之间的联系, 因此在下面的分析中假设收发平台的运动轨迹没有任何扰动, 忽略天线方向图 and 任何窗函数的影响.

3 信号模型

设发射机以 $\frac{1}{T}$ 的脉冲重复频率发射脉冲, 发射信号为:

$$s_T(t) = s(t - nT) \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

其中, f_0 表示载波频率, $s(t)$ 表示在脉冲重复周期内发射的脉冲信号, 它的脉冲宽度为 $T_p \ll T$, $s(t)$ 可以是经过脉冲压缩变窄的信号, 比如线性调频信号. 经过点目标发射, 并通过接收机的正交解调后, 接收信号为:

$$s_R(t) = s(t - nT - \frac{R(t)}{c}) \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{R(t)}{c}\right] \quad (2)$$

其中, $R(t)$ 表示接收信号的路程和:

$$R(t) = \sqrt{(X_C - X_T)^2 + (ut)^2 + h_T^2} + \sqrt{(X_C - X_R)^2 + (ut)^2 + h_R^2} \quad (3)$$

式(2)可以写成一个二维的信号, $\tau = t - nT$ 表示脉冲重复周期内的时间, 令 $u = ut$, 则 u 表示空间上的采样位置, 因此式(2)可以写为:

$$s_R(\tau, u) = s\left[\tau - \frac{R(u)}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{R(u)}{c}\right] \quad (4)$$

$$R(u) = \sqrt{(X_C - X_T)^2 + u^2 + h_T^2} + \sqrt{(X_C - X_R)^2 + u^2 + h_R^2} \quad (5)$$

将式(4)做距离上的匹配滤波后, 得:

$$p_R(\tau, u) = p\left[\tau - \frac{R(u)}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{R(u)}{c}\right] \quad (6)$$

其中 $p(\tau)$ 表示 $s(\tau)$ 经过匹配滤波后的信号. 由式(6)可以看出, 点目标的像 $h(\tau, u)$ 可以通过 $p_R(\tau, u)$ 与一个二维的参考函数 $h_R(\tau, u)$ 做相关运算得到^[6,7]:

$$h(\tau, u) = p_R(\tau, u) * * h_R^*(-\tau, -u) \quad (7)$$

$$h_R(\tau, u) = \delta\left[\tau - \frac{\Delta R(u)}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{\Delta R(u)}{c}\right] \quad (8)$$

$$\Delta R(u) = \sqrt{X_{CT}^2 + u^2} + \sqrt{X_{CR}^2 + u^2} - X_{CT} - X_{CR} \quad (9)$$

$$X_{CT} = \sqrt{(X_C - X_T)^2 + h_T^2}, X_{CR} = \sqrt{(X_C - X_R)^2 + h_R^2} \quad (10)$$

其中, $* *$ 表示二维卷积. 由式(8)可以看出 $h_R(\tau, u)$ 根据目标的距离变化而变化, 对不同距离上的目标要用不同的参考函数, 因此双基地 SAR 的成像算法也是一个二维空变的相关处理. 由于在这里需要比较一个点目标最后的成像结果, 因此二维参考函数对一个点目标是不变的, 成像算法可以通过一个二维相关处理来完成.

为了方便分析算法, 可以先将式(8)中的 $h_R(\tau, u)$ 转为频率域 $H_R(\omega, k_u)$. 对 $h_R(\tau, u)$ 做 τ 上的付氏变换得:

$$\exp\left[-j(\omega + \omega_0) \frac{\Delta R(u)}{c}\right] \quad (11)$$

其中, $\omega_0 = 2\pi f_0$. 再对上式做 u 上的付氏变换:

$$H_R(\omega, k_u) = \int \exp[-j\phi(u)] du \quad (12)$$

$$\phi(u) = (\omega + \omega_0) \frac{\Delta R(u)}{c} + k_u u \quad (13)$$

式(12)的积分可以通过相位驻定原理求出. 相位驻定点由下式确定:

$$\frac{\partial \phi}{\partial u} = \frac{\omega + \omega_0}{c} \left[\frac{u}{\sqrt{X_{CT}^2 + u^2}} + \frac{u}{\sqrt{X_{CR}^2 + u^2}} \right] + k_u = 0 \quad (14)$$

令

$$\sin\alpha = \frac{u}{\sqrt{X_{CT}^2 + u^2}}, \sin\beta = \frac{u}{\sqrt{X_{CR}^2 + u^2}} \quad (15)$$

上式中的 α 可以看作是发射机在合成孔径中的任一位置与点目标的连线和发射机与点目标最短距离之间的夹角, 同理相对于接收机的 β 也是这样的夹角. 将(15)代入(14), 并由三角关系可得:

$$\begin{cases} \frac{\omega + \omega_0}{c} (\sin\alpha + \sin\beta) + k_u = 0 \\ X_{CT} \tan\alpha = X_{CR} \tan\beta \end{cases} \quad (16)$$

设从式(14)中得到的相位驻定点为 \hat{u} , 由式(12)可得:

$$H_R(\omega, k_u) = \exp[-j\phi(\hat{u})] \quad (17)$$

上式中略去了近似常数的幅度值, 将式(13)、(16)代入式(17)可得:

$$\begin{aligned} H_R(\omega, k_u) &= \exp\left[-j \frac{\omega + \omega_0}{c} (\sqrt{X_{CT}^2 + \hat{u}^2} + \sqrt{X_{CR}^2 + \hat{u}^2})\right. \\ &\quad \left. - X_{CT} - X_{CR} + k_u \hat{u}\right] \\ &= \exp\left[-j \frac{\omega + \omega_0}{c} (X_{CT} \cos\alpha + X_{CR} \cos\beta - X_{CT} - X_{CR})\right] \end{aligned} \quad (18)$$

当 α, β 较小时, 有 $\tan\alpha \approx \sin\alpha, \tan\beta \approx \sin\beta$, 将其带入式(16)得:

$$\begin{cases} \sin\alpha = -\frac{X_{CR} k_u c}{(X_{CT} + X_{CR})(\omega + \omega_0)} \\ \sin\beta = -\frac{X_{CT} k_u c}{(X_{CT} + X_{CR})(\omega + \omega_0)} \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)带入式(18)得:

$$\begin{aligned} H_R(\omega, k_u) &= \exp\left[-j \frac{\omega + \omega_0}{c} \left[X_{CT} \sqrt{1 - \frac{X_{CR}^2 k_u^2 c^2}{(X_{CT} + X_{CR})^2 (\omega + \omega_0)^2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + X_{CR} \sqrt{1 - \frac{X_{CT}^2 k_u^2 c^2}{(X_{CT} + X_{CR})^2 (\omega + \omega_0)^2}} - X_{CT} - X_{CR} \right] \right] \\ &\approx \exp\left[j \frac{1}{2} \frac{X_{CT} X_{CR}}{X_{CT} + X_{CR}} k_u^2 \frac{c}{\omega + \omega_0}\right] \end{aligned} \quad (20)$$

下面将以式(20)中二维参考函数的频率域表达式作为分析基础.

4 算法比较

最简单的双基地 SAR 算法类似于单基地算法中忽略距离向和方位向耦合, 将二维相关处理分为两个独立的一维相关处理. 这种算法有两步, 直接作距离压缩和方位压缩. 它的成像结果可以表示为:

$$h(\tau, u) = p_R(\tau, u) * \exp\left[j \frac{2\pi f_0}{c} \Delta R(u)\right] \quad (21)$$

由上式可以看出, 这种算法的二维参考函数 $h_R(\tau, u)$ 可以用

下式表示:

$$h_R(\tau, u) = \delta(\tau) \exp\left[-j \frac{2\pi f_0}{c} \Delta R(u)\right] \quad (22)$$

将式(22)与式(8)比较可见, 式(22)中忽略了对距离徙动的校正, 将式(22)作 τ 的付氏变换:

$$h_R(\omega, u) = \exp\left[-j \frac{2\pi f_0}{c} \Delta R(u)\right] \quad (23)$$

将上式与式(11)比较, 式(23)中忽略了相位项 $\frac{\omega}{c} \Delta R(u)$, 为了不使它显著影响方位像, 应该使它的最大值在 $\pi/2$ 以内^[3], 假设发射的脉冲信号 $s(t)$ 带宽为 B_w , 那么有:

$$\frac{2\pi B_w}{c} \Delta R\left(\frac{L}{2}\right) \leq \frac{\pi}{2} \quad (24)$$

其中 $\Delta R\left(\frac{L}{2}\right)$ 表示 $\Delta R(u)$ 在 $u = L/2$ 时的值.

忽略距离向和方位向耦合的算法也就是忽略了对距离徙动的校正, 这种算法在方位像上的聚焦会受到一定的影响. 文献[4]中双基地距离-多普勒的算法对距离徙动进行了一定的校正, 主要是在 (τ, k_u) 域中完成的. 它首先利用 $R(u) \approx X_{CT} + X_{CR} + \frac{u^2}{2X_{CT}} + \frac{u^2}{2X_{CR}}$ 的 Taylor 级数近似, 再利用相位驻定原理对式(6)做上的付氏变换:

$$p_R(\tau, k_u) = p \left[\tau - \frac{1}{c} \left[X_{CT} + X_{CR} + \frac{1}{2} \frac{k_u^2}{k_0^2} \left(\frac{1}{X_{CT}} + \frac{1}{X_{CR}} \right)^{-1} \right] \right] \cdot \exp\left[-j k_0 \left[X_{CT} + X_{CR} - \frac{1}{2} \frac{k_u^2}{k_0^2} \left(\frac{1}{X_{CT}} + \frac{1}{X_{CR}} \right)^{-1} \right]\right] \quad (25)$$

根据式(25), 文献[4]通过在 (τ, k_u) 域中做关于 τ 的移位来校正距离徙动, 移位因子为:

$$\Delta\tau(k_u) = \frac{1}{2} \frac{k_u^2}{ck_0^2} \left(\frac{1}{X_{CT}} + \frac{1}{X_{CR}} \right)^{-1} \quad (26)$$

其中 $k_0 = 2\pi f_0/c$. 式(26)相当于在 (ω, k_u) 域乘以下面的因式:

$$\exp\left[j \frac{1}{2} \frac{k_u^2}{ck_0^2} \left(\frac{1}{X_{CT}} + \frac{1}{X_{CR}} \right)^{-1} \omega\right] \quad (27)$$

完成距离徙动校正后, 再做方位上的压缩, 即在 (τ, k_u) 域上乘上下面的因子:

$$\exp\left[-j \frac{k_u^2}{k_0} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_{CT}} + \frac{1}{X_{CR}} \right)^{-1}\right] \quad (28)$$

如果合并式(27)、式(28), 整个步骤可以等价于下面的二维参考函数:

$$H_R^*(\omega, k_u) = \exp\left[-j \frac{1}{2} \frac{X_{CT}X_{CR}}{X_{CT} + X_{CR}} ck_0^2 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0^2}\right] \quad (29)$$

比较式(29)与式(20), 双基地距离-多普勒算法引入了下面的相位误差:

$$\exp\left[-j \frac{1}{2} \frac{X_{CT}X_{CR}}{X_{CT} + X_{CR}} ck_0^2 \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0^2} - \frac{1}{\omega_+ \omega_0} \right)\right] = \exp\left[j \frac{c}{2} \frac{X_{CT}X_{CR}}{X_{CT} + X_{CR}} \frac{k_u^2}{\omega_0^2} \frac{\omega^2}{\omega_+ \omega_0}\right] \quad (30)$$

由前面分析可知, 式(30)中的相位误差是因为双基地距离-多普勒算法中对 $R(u)$ 采用了近似的结果, 可见双基地距离-多

普勒算法从一定程度上校正了距离徙动, 但是直接用相位驻定原理的方法误差更小.

5 仿真结果

雷达工作频率 $f_0 = 1.34\text{GHz}$, 发射线性调频信号带宽为 60MHz 发射载机位 $(X_T, h_T) = (0, 2 \times 10^2\text{m})$, 接收载机位置 $(X_R, h_R) = (1 \times 10^3\text{m}, 1 \times 10^2\text{m})$, 二者均以 $1.5 \times 10^2\text{m/s}$ 的速度平行飞行, 点目标位置 $(3 \times 10^3\text{m}, 0, 0)$. 下面给出三种算法的点目标像比较图.

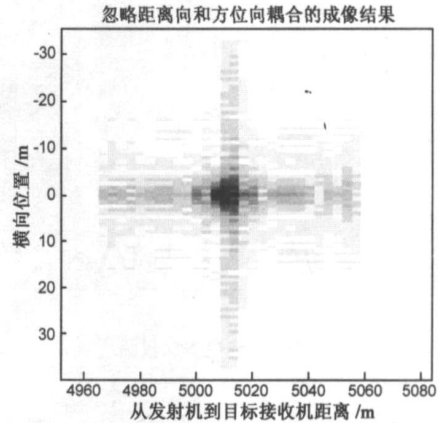


图 2 忽略距离向和方位向耦合的成像结果

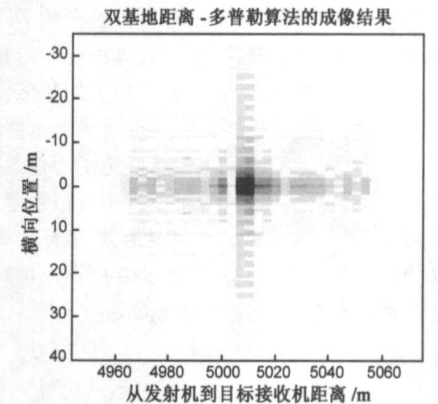


图 3 双基地距离-多普勒算法的成像结果

图 2 是忽略距离向和方位向耦合的成像结果, 图 3 是双基地距离-多普勒算法成像结果, 图 4 是直接利用相位驻定原

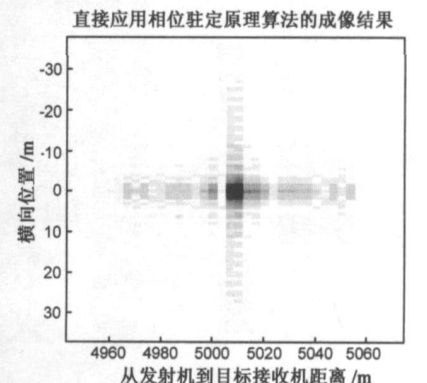


图 4 直接应用相位驻定原理算法的成像结果

理的成像结果. 图 2 由于忽略了距离徙动, 因此它的点目标像与图 3、图 4 相比有明显的散焦现象. 图 3、图 4 都对距离徙动进行了校正, 只不过近似程度不一样. 图 5 中的方位像①、②、③分别是图 2、图 3、图 4 中截取的方位像比较图, 从图中可以看出, 双基地-距离多普勒算法在方位像上的副瓣高于由相位驻定原理得到的方位像. 这是由于对 $R(u)$ 近似产生的误差. 而忽略了距离徙动的方位像①的副瓣明显高于另两种算法, 并且主瓣还有一定的展宽.

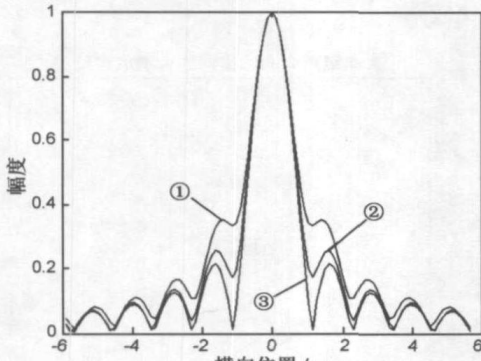


图 5 方位像比较图

6 结论

本文详细分析了双基地 SAR 中三种成像算法的不同点和联系. 三种算法都是通过不同的近似方法选择不同的二维参考函数, 忽略距离向和方位向耦合的算法选择的参考函数忽略了对距离徙动的校正, 因此它对方位上的聚焦会产生一定的影响. 双基地距离多普勒算法在选择参考函数时, 对距离和采用了二阶 Taylor 级数近似, 引入一定的相位误差. 直接用相位驻定原理计算的参考函数是三者中近似误差最小的. 对一般的机载双基地 SAR 采用双基地距离多普勒算法就可完成成像, 但对高精度的机载双基地 SAR 应该采用直接应用相位驻定原理的算法以获得高精度的成像结果.

参考文献:

[1] I Walterscheid, A R Brenner, J H G. Ender. Results on bistatic

synthetic aperture radar[J]. Electronics Letters, 2004, 40(19): 1224-1225.

- [2] Joachim H G Ender, I Walterscheid, Andreas R Brenner. New aspects of bistatic SAR: processing and experiments[A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Alaska: IEEE, Sept 2004. 1758-1762.
- [3] 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.
- [4] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] I G Cumming, J R Bennett. Digital processing of Seasat SAR data[A]. Proceedings of IEEE ICASSP 1979[C]. Washington DC: IEEE, April 1979. 710-718.
- [6] D C Munson Jr, R L Visentin. A signal processing view of strip mapping synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans Acoustic, Speech and signal processing, 1989, 37(12): 2131-2147.
- [7] R Bamler. A comparison of range Doppler and wave domain SAR focusing algorithms[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(4): 706-713.

作者简介:



况 凌 男, 汉族, 1979 年生于四川省成都, 博士研究生. 主要研究领域: 合成孔径雷达, 雷达信号处理. E-mail: ckuangling@uestc.edu.cn

沈晓峰 男, 汉族, 1965 年生于四川省成都, 电子科技大学电子工程学院副教授, 主要研究方向为微波成像、信号处理、雷达系统.

杨万麟 男, 汉族, 1945 年生于四川省成都, 电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域: 雷达系统, 雷达信号处理, 微波成像.