

文章编号 :1001-2486(2002)05-0061-04

冲激 SAR 成像的分辨率估计*

董臻,常文革,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: 后向投影(BP)算法是一种被广泛应用于冲激 SAR 的成像算法。当冲激 SAR 的发射信号是某一类冲激信号时,根据冲激 SAR 成像的特点,推导出 BP 算法的方位分辨率与成像积累角、信号中心频率的关系。仿真结果表明,在相当范围内,估计公式都是准确的。

关键词: 冲激合成孔径雷达;冲激信号;BP 算法;辛克函数;分辨率

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

The Estimation of Resolution for Impulse SAR's Imaging

DONG Zhen, Chang Wen-ge, LIANG Dian-nong

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

Abstract: Back-projection (BP) algorithm is a popular imaging algorithm for impulse SAR. The relation between BP's azimuth resolution and azimuth angle as well as signal's center frequency is discovered when the radar's transmitted signal is one kind of impulse signal based on the characteristic of the impulse SAR imaging. The simulation results prove the estimation formula's validity.

Key words: impulse SAR; impulse signal; BP algorithm; sinc function; resolution

冲激 SAR 是冲激信号与 SAR 技术的结合。冲激 SAR 的信号频段一般处于 VHF/UHF 甚至更低的频段,因此为了获得方位向的高分辨率特性,其积累角通常远远大于传统的高频窄带 SAR。由于可以解决大积累角情况下不可避免的距离迁移(range migration)问题,后向投影(Back-Projection, BP)算法成为引人注目的冲激 SAR 成像算法^[1-4]。当雷达信号为单/双周波冲激信号时,文献[4]分析了 SAR 的方位分辨率。在本文的研究中,雷达信号是具有以下表示形式的一类冲激信号:

$$q(t) = p(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}, |t| \leq \frac{T}{2} \quad (1)$$

式中 $p(t)$ 为信号的波形包络函数,如矩形包络或高斯包络, T 为包络宽度, f_0 为中心频率。可以看出,当包络是矩形包络且 $f_0 T = 1$ 或 2 时,信号就分别是文献[4]中的单、双周波情形。因此,本文的研究是文献[4]的扩展。

假设冲激信号包络 $p(t)$ 的 3dB 宽度为 T_{3dB} , 则图像的距离分辨率可表示为 $\rho_r = \frac{c}{2} T_{2dB}$, 式中的 c 表示光速。而图像的方位分辨率取决于多种因素,本文将分析 BP 算法用于冲激 SAR 成像时的方位分辨率、积累角、信号中心频率等因素之间的联系。

1 BP 算法原理^[1]

如图 1(a)所示,雷达沿 x 轴运动形成合成孔径,不失一般性,假设只有一个目标位于 $(0, Y_0)$ 处。雷达在位置 $(x, 0)$ 发射信号 $p(t)$, 则不同延迟的回波在方位-时间平面 (x, t) 上形成双曲线段状的轨迹,如图 1(b)中的累积曲线 1 所示。BP 算法通过叠加 (x_T, y_T) 的累积曲线:

* 收稿日期:2002-05-23
基金项目:国家部委基金项目资助(7.5.3.2)
作者简介:董臻(1973-),男,博士。

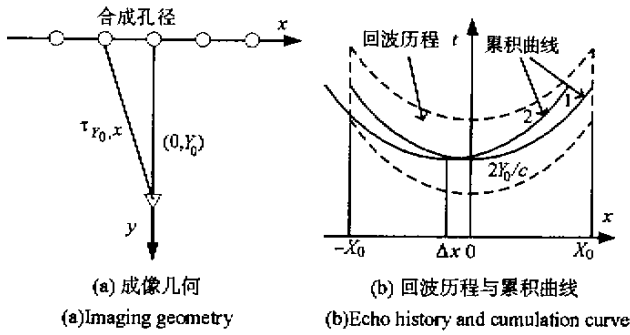


图1 BP算法的回波历程与累积曲线

Fig. 1 Echo history and cumulation curve in BP Algorithm

$$l_{x_T, y_T} : t = \frac{2\sqrt{(x - x_T)^2 + y_T^2}}{c} \quad (2)$$

上的脉冲得到图像值 $I(x_T, y_T)$:

$$I(x_T, y_T) = \int_{l_{x_T, y_T}} p\left(t - \frac{2\sqrt{x^2 + Y_0^2}}{c}\right) dx \quad (3)$$

可以看出,当 $(x_T, y_T) = (0, Y_0)$ 时, l_{x_T, y_T} 就是图 1(b) 中的累积曲线 1, 这时所有的脉冲被累积得到 $(0, Y_0)$ 处的图像值。而当 $(x_T, y_T) \neq (0, Y_0)$ 时, l_{x_T, y_T} 偏离累积曲线 1。由于实际的冲激信号总是具有一定宽度, 所以当累积曲线 l_{x_T, y_T} 偏离 l_0, Y_0 时, 图像值不会骤然衰落, 于是就产生了方位分辨率问题: $x_T = ?$ 使得图像值衰减至峰值的 -3dB ?

2 BP 算法方位分辨率

假设雷达发射信号形式如 (1) 式所示, 则回波历程在 (x, t) 平面的表达式为:

$$q(x, t) = p\left(t - \frac{2\sqrt{x^2 + Y_0^2}}{c}\right) \cdot e^{j2\pi f_0\left(t - \frac{2\sqrt{x^2 + Y_0^2}}{c}\right)} \quad (4)$$

根据 BP 算法计算的图像值 $I(\Delta x, Y_0)$ 如下所示:

$$I(\Delta x, Y_0) = \int_{l_{\Delta x, Y_0}} q(x, t) dx \quad (5)$$

$l_{\Delta x, Y_0}$ 如图 1(b) 中的累积曲线 2 所示, 不妨设 $\Delta x \leq 0$, 结合式 (2) (4) 重写 (5):

$$I(\Delta x, Y_0) = \int_{-X_0}^{X_0 + \Delta x} p\left(\frac{2\sqrt{(x - \Delta x)^2 + Y_0^2}}{c} - \frac{2\sqrt{x^2 + Y_0^2}}{c}\right) \cdot e^{j2\pi f_0\left(\frac{2\sqrt{(x - \Delta x)^2 + Y_0^2}}{c} - \frac{2\sqrt{x^2 + Y_0^2}}{c}\right)} dx \quad (6)$$

式中 $X_0 = Y_0 \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right)$, Θ 表示方位积累角。显然, 很难直接得到 (6) 式等号右边的积分式的解析表达式。如果图像的方位向主瓣宽度远远小于积累孔径长度, 即 $|\Delta x| \ll X_0$, 则可对 (6) 式作以下近似:

(1) 积分区间可近似为 $(-X_0, X_0)$;

(2) 根据导数的近似表达式, 积分式中的指数项可作简化为:

$$e^{j2\pi f_0\left(\frac{2\sqrt{(x - \Delta x)^2 + Y_0^2}}{c} - \frac{2\sqrt{x^2 + Y_0^2}}{c}\right)} \approx e^{j\frac{4\pi\Delta x}{\lambda_0} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + Y_0^2}}} \quad (7)$$

(3) 积分式中的包络项近似为常数 $p(0)$;

经过以上三点近似, 重写 (6) 式得:

$$I(\Delta x, Y_0) = P(0) \int_{-X_0}^{X_0} e^{j\frac{4\pi\Delta x}{\lambda_0} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + Y_0^2}}} dx \quad (8)$$

对此定积分式作两次变量替换：

$$\theta = Y_0 \arctan\left(\frac{x}{Y_0}\right) \quad (9)$$

$$\theta \in \left[-\frac{\Theta}{2}, \frac{\Theta}{2}\right], \Theta = 2 \arctan\left(\frac{X_0}{Y_0}\right)$$

$$g = \frac{2}{\lambda_0} \sin(\theta) \quad (10)$$

$$g \in \left[\frac{2}{\lambda_0} \cdot \sin\left(-\frac{\Theta}{2}\right), \frac{2}{\lambda_0} \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)\right]$$

Θ 实际上就是积累角。经过变量替换 (8) 式可重写为：

$$K(\Delta x, Y_0) = Y_0 p(0) \cdot \frac{\lambda_0}{2} \int_{-\frac{2}{\lambda_0} \cdot \sin(\frac{\Theta}{2})}^{\frac{2}{\lambda_0} \cdot \sin(\frac{\Theta}{2})} \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{4} g^2\right)^{-\frac{3}{2}} \cdot e^{2\pi \cdot \Delta x \cdot g} dg \quad (11)$$

显然, 上式中的积分是函数

$$\xi(g) = \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{4} g^2\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$g \in \left[-\frac{2}{\lambda_0} \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right), \frac{2}{\lambda_0} \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)\right]$$

的逆傅立叶变换。根据变量 g 、 θ 之间的关系, $\xi(g)$ 又可以写成 θ 的函数：

$$\xi(g(\theta)) = \cos(\theta)^{-3} \quad (13)$$

$$\theta \in \left[-\frac{\Theta}{2}, \frac{\Theta}{2}\right], \Theta = 2 \arctan\left(\frac{X_0}{Y_0}\right)$$

当 $\Theta = 90^\circ$ 时 绘出 $\xi(g(\theta))$ 的曲线, 如图 2 所示。

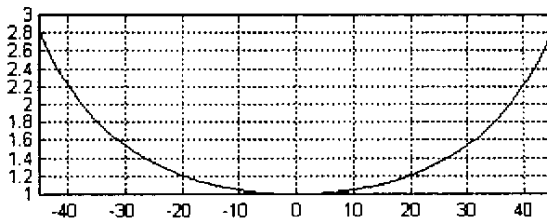


图 2 $\xi(\theta) \sim \theta$

Fig.2 $\xi(\theta) \sim \theta$

上图表明当积累角 $\Theta \leq 40^\circ$ (即 $|\theta| \leq 20^\circ$) 时存在近似 $\xi(g(\theta)) \approx 1$, 则式 (11) 可写为：

$$K(\Delta x, Y_0) \approx 2 Y_0 p(0) \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{4 \sin(\frac{\Theta}{2})}{\lambda_0} \Delta x\right) \quad (14)$$

式中辛克函数 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$, 由于 sinc 函数的 3dB 宽度等于 0.886, 故方位向分辨率为：

$$\rho_x = 0.886 \cdot \frac{\lambda_0}{4 \sin(\frac{\Theta}{2})} = \frac{\lambda_0}{4.515 \sin(\frac{\Theta}{2})} \quad (15)$$

3 仿真结果

仿真中冲激信号的包络为高斯函数, 信号的中心频率为 600MHz, -3dB 带宽分别是 300MHz、600MHz 和 900MHz 三种情形。当积累角分别为 30° 、 40° 、 50° 时, 利用 BP 算法成像, 在理想点目标图像的峰值处的方位向剖面图分别如图 3 所示。

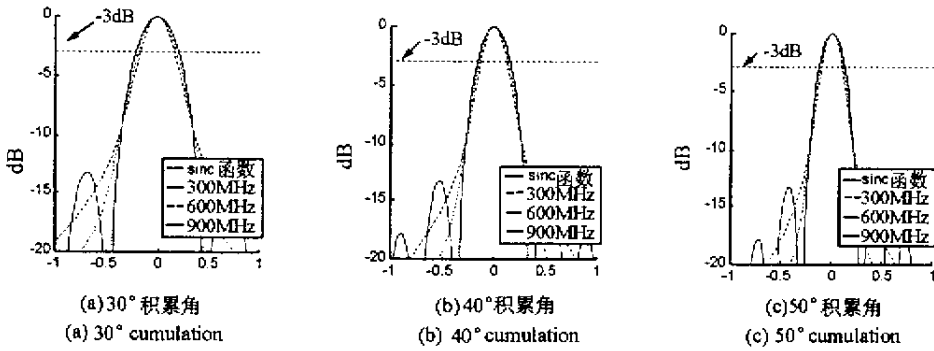


图3 图像的方位剖面

Fig.3 Azimuth slice of image

可见在主瓣的 -10dB 宽度内,估计值与实际值仍然吻合得很好,这说明(14)式中BP算法方位向剖面主瓣波形公式和(15)式中方位向分辨率估计公式是准确的。需要说明的是,由图3可以看出,随着方位向坐标偏离主瓣峰值位置,图像的剖面曲线逐渐偏离了sinc函数曲线,这是因为随着 Δx 值的增加,前文中对(6)式所作的三点近似不再成立,所以(14)式中的波形估计公式的估计误差也就越来越大。

4 结束语

本文分析了冲激SAR的BP成像算法的方位向分辨率,推导验证了分辨率估计解析式,扩展了文献[4]的研究成果,这对指导系统设计、完善BP算法理论是十分有意义的。

参考文献:

- [1] McCorkle John W. Focusing of Synthetic Aperture Ultra Wideband Data [J]. Proc. IGARSS '89, Proceedings Vancouver, 1989.
- [2] McCorkle John W, Rofheart M. An Order $n^2 \log(n)$ Back-Projection Algorithm for Focusing Wide-Angle Wide-Bandwidth Arbitrary-Motion SAR [J]. SPIE, vol. 2747, 1996.
- [3] Kaplan Lance M et al. Target Detection during Image Formation for Ultra-Wideband Radar [J]. SPIE, 1999, 38(10).
- [4] 吕彤光, 陆仲良等. 单周波和双周波信号用于冲激SAR成像的性能分析 [J]. 电子与信息学报, 2001, 23(6).

