

多级多分辨快速后向投影成像算法

李杨寰, 宋 千, 王鹏宇, 金 添, 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 子孔径划分是提高 BP 算法效率的基本途径, 如何对其孔径进行划分以及如何确定各子图像分辨率, 将直接决定算法的效率. 本文从频域带宽和距离误差两方面分析图像分辨率选取的限制条件, 并得到了一个统一的关于孔径长度和分辨率的条件. 然后基于这一条件阐述了超宽带信号条件下如何通过选取分辨率和对子孔径进行划分以达到最高的计算效率, 并依此条件提出了多级多分辨快速后向投影成像算法 (MSMRBP) 以适应非均匀孔径的成像条件. 最后给出了外场实验结果以证明本文结论的正确性.

关键词: 子孔径; 极坐标成像; 非均匀孔径; 快速后向投影算法; 运动补偿

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0518-07

Multi-Stage Multi-Resolution Fast Back-Projection Imaging Algorithm

LI Yang-huan, SONG Qian, WANG Peng-yu, JIN Tian, ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The basic method to improve efficiency of the BP (Back-Projection) algorithm is the sub-aperture's way. Choosing the length of sub-apertures and the resolution of sub-images becomes the most crucial step that decides the computation efficiency. The condition that limits the image resolution is analyzed taking the bandwidth and the range error into account. Then a same result presenting the relationship between the sub-aperture length and the resolution is received. A method for dividing the sub-aperture and choosing the image resolution in UWB signal's circumstance is presented based on the former result. Besides the Multi-Stage Multi-Resolution Back Projection (MSMRBP) algorithm is presented to suit the nonuniform aperture condition. At last the outside experiment's results are presented to support the former conclusion.

Key words: sub-aperture; imaging in polar coordinates; nonuniform aperture; FFBP; motion compensation

1 引言

McCorkle 最早将 Back-Projection (BP) 算法用于冲激信号合成孔径 (SAR) 成像^[1], 这是一种在时域进行的成像算法, 这种算法计算过程没有采用近似, 成像质量高, 且便于进行运动补偿, 能适应各种信号条件^[2,3]. 但是, 受限于当时传感器的测量精度、实时处理芯片的计算性能, BP 算法巨大的运算量限制了其在实际工程中的应用, 尤其在国内, 许多学者更专注于频域算法的研究^[4,5]. 近年来, 由于高精度定位设备的迅速发展^[6] 和实时处理芯片的广泛应用^[7], 使得采用 BP 算法在时域进行运动补偿越来越简单, 成像质量也越来越高, 在能够获得平台的实时运动参数后, 比频域算法更能适应低信噪比环境和剧烈运动干扰的情况^[8-10]. 因此, BP 算法又再次受到研究者们的关注^[11,12], 不少研究者对 BP 算法进行了改进, 提出了很多提高 BP 算法效率的方法.

这些改进的思想大多是生成多幅粗分辨率的子图像, 再通过两级或多级合并的方式生成最终图像^[13], 如将全孔径划分成多个子孔径实现实时成像^[14], 如在图像域四分法逐步提高分辨率的方法^[1], 局部 BP (LBP) 算法^[15], 如在极坐标下划分子孔径的 FBP 方法^[16], 基于因式分解快速 BP 算法 (Fast Factorized Back-Projection, FFBP)^[17], 还有基于递归的思想提出的快速 BP 算法^[18]. 其中 FFBP 算法通过因式分解, 将全孔径分解到极短的长度, 从而将运算量减小到 $o(N^2 \log N)$. 对于这类子孔径划分的算法, 从总体上来看, 子孔径划分得越短, 子图像分辨率越粗, 计算效率就越高. 在实验中我们也发现, 直角坐标系和极坐标系下子孔径算法的效率明显不同, 而且当子孔径选取过短, 图像分辨率选取得过粗的时候, 成像质量将严重下降, 甚至会无法成像. 各级图像分辨率的控制是一个影响图像质量和计算效率的关键因素, 文献^[17,19] 为图像分辨率的控制提供了一定思路,

但是仍然没有得到一个清晰的量化结论. 本文将通过时域和频域两个方向入手, 对子图像分辨率的限制进行分析, 并最终得到一个量化的子图像分辨率的限制条件. 然后, 基于这一限制条件提出了一种新的快速成像算法, 这种算法适用于非理想条件下的非均匀孔径, 能够最大可能地挖掘子孔径成像算法的潜在计算效率, 最后, 通过对外场实测数据的处理验证了该算法的有效性.

2 多级因式分解原理

FFBP 算法采用了多级因式分解的方法划分子孔径, 得到的初级子孔径长度非常小, 使得在第一级成像过程中计算量极低, 虽然在随后的计算中需要对多级图像进行合并, 但是通过分析可以知道这种方法从总体上还是极大的降低了计算量. 在常规 BP 算法中, 需要对成像区域每个像素点计算每个回波的贡献值, 然后累加得到最终的图像. 如果成像区域为 $N \times N$ 的网格, 且孔径长度为 N , 那么需要计算的插值次数为 $o(N^3)$. 很多文献中已经讲述了 FFBP 算法效率提高的原理, 本文将阐述从波束形成的角度理解 FFBP 算法的效率提高的原理. 如果在第一级将孔径划分为长度为 l_0 的子孔径, 由于天线孔径长度和波束角的关系, 每个子孔径的波束宽度 γ_0 和子孔径长度满足 $\gamma_0 = \alpha/l_0$ (α 为比例因子), 若子孔径经过一次合并后, 其孔径长度增长为 l_1 , 则波束宽度变窄为 $\gamma_1 = \alpha/l_1$, 如图 1 所示. 在宽波束的条件下可以采用较粗的分辨率来划分成像区域, 在窄波束的条件下可以采用较细的分辨率来划分成像区域 (仅方位向的分辨率改变), 假设分解因子为 2, 那么初始成像插值次数为 $o(\frac{N}{l_0} \times N \times l_0)$, 第一级合并的插值次数为 $o(\frac{N}{2l_0} \times N \times (2l_0))$, 合并的次数为 $o(\log_2 N)$, 那么最终的插值次数为 $o(N^2 \log_2 N)$, 相对于传统 BP 算法的 $o(N^3)$ 有了很大提高, 其计算效率的优越性随着雷达方位向采样点数的增加会更加明显.

FFBP 算法是在极坐标系下进行计算, 虽然极坐标计算不如直角坐标直观方便, 但文献 [16] 已经指出在极坐标 (ρ, θ) 下, 子孔径对应的子图像生成时可以采用较

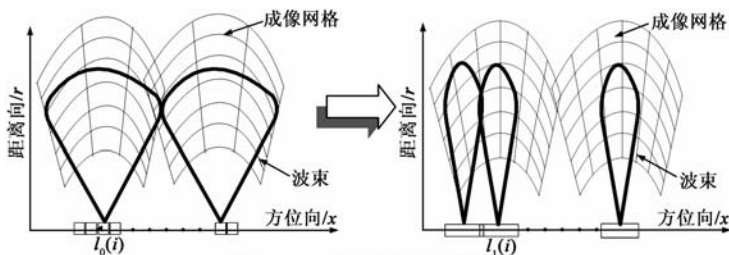


图1 FFBP算法原理示意图

粗的方位向分辨率. 通过前文分析可知, 对于后向投影算法而言, 在计算初始子图像时, 采用越粗的分辨率则计算量越低, 然而在直角坐标系下如果采用过低的分辨率将大量损失图像信息甚至无法成像. 下面从频域的角度定性地说极坐标系下可以低分辨率成像而直角坐标系则不行的原因, 后文将量化分析制约分辨率选取的条件. 图像的分辨率选定后, 相当于以分辨单元为间隔对图像进行采样. 当初始孔径长度很小的情况下, 极坐标系下的图像具有极窄的频带宽度, 而直角坐标系下的图像则不具备这一特质, 所以根据 Nyquist 采样定理, 在不损失图像原始信息的情况下, 极坐标系下可以采用更粗的分辨率网格化分成像区域, 从而极大地提高成像算法的效率. 下面使用同一组回波数据, 分别采用 256、64、4 点孔径长度分别在直角坐标系和极坐标系下进行成像, 对所成图像做 2 维 FFT 变换, 结果如图 2、图 3 所示 (图 2 中方位向不对称是由于选取的子孔径相对于成像区域不具备对称位置关系). 图 2 中可以看出在直角坐标系下, 随着孔径长度的变小, 方位向频带宽度变化并不明显, 而图 2 中极坐标系下随着孔径长度减小, 图像的频带宽度明显变窄, 使得在短孔径条件下, 采用极粗的分辨率进行成像也能保证信息的无损性, 这就是采用极坐标进行快速成像的根本原因.

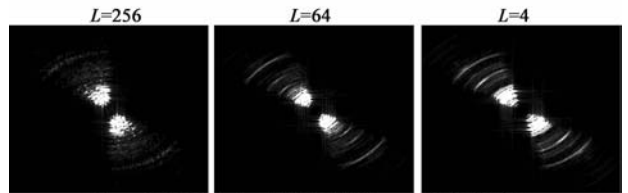


图2 直角坐标系下不同孔径长度(L)成像的频域图

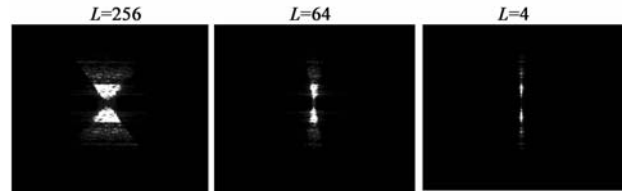


图3 极坐标系下不同孔径长度(L)成像的频域图

3 分辨率选取的制约条件

从 FFBP 原理分析我们已经可以知道图像分辨率的选取直接影响成像效率和成像质量, 尤其是由于子孔径直接生成的初级子图像的分辨率 $\Delta\theta$ 选取更为重要, 后面多级子图像的分辨率都可以根据这个分辨率来确定. 而 $\Delta\theta$ 的选取受 Nyquist 定律的限制, 故存在一定的上限, 当超过这个上限, 则图像采样太过稀疏, 原始图像信息受到损害, 成像质量将严重下降, 这一节我们通过两种不同的思路, 对短孔径下 $\Delta\theta$ 的制约关系进行分析, 并且通过分析最终得到一个统一的结论, 根据这一量化的制约条

件,可以在成像时效率和质量中做到最优的取舍.

3.1 通过角度频域 k_θ 进行分析

如图4(a)左所示,左边的矩形表示方位向合成孔径,假设只存在一个点目标 T ,那么天线相位中心处于 k 点时的回波为 $S_k(R_T) = \gamma_k e^{j2\pi f_c R_T}$ (如果存在多个目标,表达式累加即可), γ_k 为复数包含回波的幅度以及时间零点的相位值. 在进行 BP 成像时,该回波对位于极坐标网格像素点 $x(r, \theta)$ 的贡献值为 $P_k(R_T, r, \theta)$, 遍历 k 并将 P_k 累加即可得到 x 点处的图像 $I(r, \theta)$.

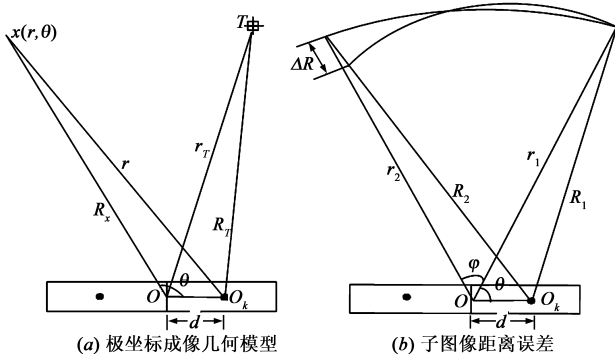


图4

$$P_k(R_T, r, \theta) = \frac{1}{R_T^2} |\gamma_k| e^{j2\pi f_c [\frac{R(r, \theta) - R_T}{c/2}]} \quad (1)$$

$$I(r, \theta) = \sum_k P_k(R_T, r, \theta) \quad (2)$$

设相位历程为 Ψ_k , 那么

$$\begin{aligned} \Psi_k(r, \theta) &= 2\pi f_c [R_x(r, \theta) - R_T] \\ &= 2\pi f_c \left[\frac{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta} - R_T}{c/2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, d 随 k 变化. 图像结果 $I(r, \theta)$ 关于 θ 的傅立叶变换 $I_f(r, k_\theta)$ 即为图像在 θ 频域 k_θ 的表达式:

$$I_f(r, k_\theta) = \int I(r, \theta) e^{-jk_\theta \theta} d\theta = \sum_k \gamma_k' \int e^{j(\psi_k(r, \theta) - k_\theta \theta)} d\theta,$$

$$\text{其中 } \gamma_k' = \frac{1}{R_T^2} |\gamma_k| \quad (4)$$

根据相位驻定原理,该积分值将由相位驻定点附近的值决定,相位驻定点满足:

$$\frac{\partial(\psi_k(r, \theta) - k_\theta \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (5)$$

从而得到

$$k_\theta = \frac{\partial(\Psi_k(r, \theta))}{\partial \theta} = \frac{4\pi f_c r d \sin\theta}{c \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta}} \quad (6)$$

$$\frac{k_\theta c}{4\pi f_c d} = \frac{r \sin\theta}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta}} \quad (7)$$

设 $u = \frac{d}{r}$, 得到

$$g(u) = \frac{\sin\theta}{\sqrt{u^2 + 1 - 2u\cos\theta}}, \theta \in (0, \pi) \quad (8)$$

将 $g(u)$ 和 θ 的关系以曲线表示后如图5所示,不同的

曲线表示 u 取不同的值,从图5中可以看出 $0 \leq g(u) \leq 1$, 那么可得 $0 \leq \frac{k_\theta c}{4\pi f_c d} \leq 1$, $I_f(r, k_\theta)$ 的有效频带 $B(k_\theta) \leq 4\pi f_c d/c$, 由此图像的分辨率 $\Delta\theta$ (等效于对图像进行离散化采样)需满足:

$$\frac{1}{\Delta\theta} = f_\theta \geq 2 \times |4\pi f_c d/c| \geq 2B(k_\theta) \quad (9)$$

$$\Delta\theta \leq \frac{c}{8\pi f_c |d|} = \frac{\lambda_c}{4|d|}, \text{ 其中 } \lambda_c \text{ 为载波波长} \quad (10)$$

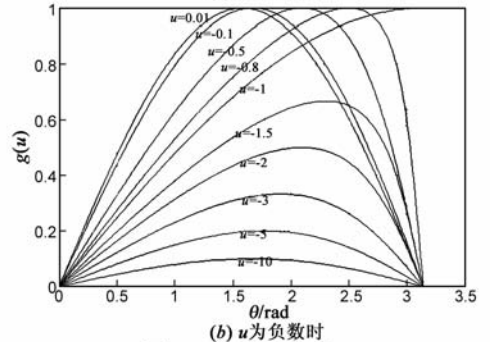
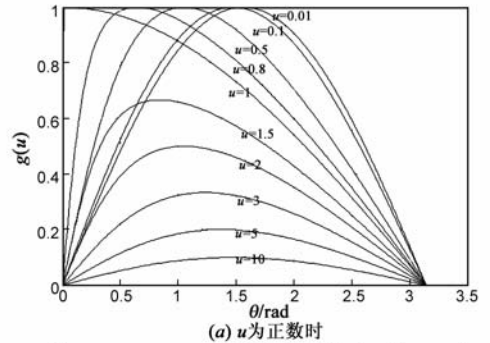


图5 $g(u)$ 和 θ 的关系

3.2 通过距离误差分析

如图4(b)所示,当在以 O 点为原点的极坐标图像网格中,当天线处于方位向第 k 个采样点的时候,角度相差 φ 的两个像素点距雷达的距离分别为 $R(\theta + \varphi)$, $R(\theta)$, 其距离误差为:

$$\begin{aligned} \Delta R &= |R(\theta + \varphi) - R(\theta)| = \left| \frac{R^2(\theta + \varphi) - R^2(\theta)}{R(\theta) + R(\theta + \varphi)} \right| \\ &\approx \left| \frac{R^2(\theta + \varphi) - R^2(\theta)}{2R(\theta)} \right| \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $R(\theta) = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta}$

$$\begin{aligned} \Delta R &\approx \left| \frac{2rd\cos\theta - 2rd\cos(\theta + \varphi)}{2\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta}} \right| \\ &= \left| \frac{rd}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta}} \right| |\cos\theta - \cos(\theta + \varphi)| \end{aligned} \quad (12)$$

设 $u = \frac{d}{r}$, 得到

$$f(u, \theta) = \left| \frac{u}{\sqrt{1 + u^2 - 2u\cos\theta}} \right| \quad (13)$$

$$\Delta R \approx |rf(u, \theta)| |\cos\theta - \cos(\theta + \varphi)| \quad (14)$$

$$\begin{aligned} f(u, \theta) &= \left| \frac{u}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta + (\cos \theta - u)^2}} \right| \leq \left| \frac{u}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} \right| \\ &= \left| \frac{u}{\sin \theta} \right| \end{aligned} \quad (15)$$

这个结果同样可以由 3.1 节中 $0 \leq g(u) \leq 1$ 得到:

$$f(u, \theta) = \left| \frac{u}{\sqrt{1 + u^2 - 2u \cos \theta}} \right| = \left| \frac{ug(u)}{\sin \theta} \right| \leq \left| \frac{u}{\sin \theta} \right| \quad (16)$$

代入式可得

$$\Delta R \leq r \left| \frac{u}{\sin \theta} \right| |\Delta(\cos \theta)| = \left| \frac{d}{\sin \theta} \right| |\Delta(\cos \theta)| \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta(\cos \theta) &= -2 \sin\left(\theta + \frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(-\frac{\varphi}{2}\right) \\ &= 2 \times \left[\sin \theta \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \theta \sin \frac{\varphi}{2} \right] \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

当 $\varphi \rightarrow 0$ 时, 有 $\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \rightarrow 1$, $\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \rightarrow \frac{\varphi}{2} \rightarrow 0$

$$\Delta(\cos \theta) \approx 2 \times \frac{\varphi}{2} \sin \theta = \varphi \sin \theta \quad (19)$$

$$\Delta R \leq \left| \frac{d}{\sin \theta} \right| |\varphi \sin \theta| = |d\varphi| \quad (20)$$

如果选取图像分辨率 $\Delta\theta = |\varphi|$, 那么这里两个像素点将处于同一分辨单元内, 为了保证各个回波对同一像素点的贡献值是相干叠加, 需要满足 $\Delta R \leq \lambda_c/4$:

$$\Delta R \leq |d \cdot \varphi| \leq \lambda_c/4 \quad (21)$$

$$\Delta\theta = |\varphi| \leq \frac{\lambda_c}{4|d|} \quad (22)$$

本文从两种角度分析子图像分辨率限制条件, 分别得到了表达式(10)和(22), 二者是统一的, 这也就是极坐标下角度分辨率的制约关系, 它直接由信号的波长(即载频)和子孔径长度确定, 在进行 FFBP 时, 为了提高计算效率, 需要选取尽可能短的孔径长度, 并根据该制约关系确定初始角度分辨率的大小, 如果分辨率选取超出了这个限制, 那么成像将出现分裂或者其他不可理解的现象. 如果是超宽带 SAR 的工作模式下, 其信号有效带宽范围是 (f_l, f_h) , 那么我们可以将其理解为多个窄带信号的组合, 如果以 f_l 作为载频计算 λ_c , 并根据式(22)计算得到角度分辨率的临界值 $\Delta\theta_l$, 如果以该值进行成像, 此时超宽带信号的所有频率分量波长都小于 λ_c , 从而其他频率分量成像要求的 $\Delta\theta < \Delta\theta_l$, 故为了使超宽带信号的有效频段都能成像, 那么必须以 f_h 作为载频计算 λ_c , 并由此根据式(22)计算得到的角度分辨率临界值 $\Delta\theta_h$, 使用该值作为初始角度分辨率, 这样才能使得带宽内信号都有效成像, 并最大可能地提升成像效率.

在多级子孔径算法中, 最重要的在于初始子孔径长度和分辨率的选取, 但在前文的推导过程中, 式(19)

的近似条件是 $\Delta\theta \rightarrow 0$, 故当子孔径长度极短时, 分辨率也不能过粗, $\Delta\theta$ 选取存在一个上限 $\Delta\theta_0$ (随实验条件有一定变化, 在我们实验条件下, $\Delta\theta_0$ 取为 0.2rad), 当 $\Delta\theta \leq \Delta\theta_0$ 时, 使得式(19)能够成立. 故当我们确定孔径长度后, 并且由式(22)得到 $\Delta\theta$, 如果 $\Delta\theta > \Delta\theta_0$, 那么这个时候就应该将 $\Delta\theta$ 取为 $\Delta\theta_0$, 如果分辨率选取超过上限 $\Delta\theta_0$, 也会极大地降低成像质量, 甚至无法成像.

4 MSMRBP 算法

以上这些情况是在平台运动区域理想匀速直线运动的情况下进行讨论, 基于的条件是各个孔径之间是等距的, 由于依据同一分解因子进行合并, 在合并后各个子孔径长度依然相等, 各子图像的分辨率仍然相同, 所以在整个成像过程中, 每一级图像都采用同一分辨率. 但是在实际过程中, 不可能要求平台匀速直线运动, 经过划分的子孔径的长度将不相等, 尤其是在合成孔径长度较长的情况下, 此时该算法将无法再达到效率和高质量的高度统一. 很多学者都提出了针对非均匀孔径下的一些运动补偿方法, 包括对回波插值的方法^[20,21]和自聚焦的方法^[13], 在引言中已经提到, BP 算法一个重要的优势在于运动补偿, 它结合定位系统的测量数据后可以对任意不规则运动进行补偿^[9], 但是 FFBP 算法在非均匀孔径情况下引入运动补偿后, 需要对分辨率的选取原则进行改进. 如果依据较长的子孔径根据式(22)选取分辨率, 虽然可以有效成像, 但是实际上损失了一定的计算效率. 如果依据较短的子孔径根据式(22)选取分辨率, 虽然可以达到较高的计算效率, 但是实际上部分较长的子孔径数据却没有被利用到成像, 将极大的影响成像质量. 根据这一分析, 下面对算法进行改进.

现在的高精度 GPS 设备已经可以得到雷达平台在运动中各个时刻的高精度方位数据^[6], 经过插值和滤波可以获得每个方位向回波序列的雷达平台所在方位, 将方位数据引入至第一级成像, 即通过雷达位置坐标和图像网格单元坐标计算回波序列的响应投影的距离 R , 这样可以补偿运动误差带来的图像失真, 本文对于 R 的计算不再赘述. 雷达平台的方位数据不仅用来进行运动补偿, 也将利用其计算子孔径的长度, 并依据式(22)来确定每一幅图像的分辨率, 这样使得在同一级图像中具备多个分辨率, 在随后将是不同分辨率图像的合并, 在合并后再依据新的子孔径长度计算新图像的分辨率, 依此进行, 直至获得最终的高分辨图像, 所以称之为多级多分辨 BP 算法 (Multi-Stage Multi-Resolution Fast Back-Projection, MSMRBP).

假设雷达获得回波的方位向坐标为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 假定选取的初始子孔径长度为 l_0 , 将全孔径划分

为 N/l_0 个子孔径,那么各个子孔径所成的图像初始的分辨率为 $\{\Delta\theta_1^0, \Delta\theta_2^0, \dots, \Delta\theta_k^0, \dots, \Delta\theta_{N/l_0}^0\}$,其中

$$\Delta\theta_k^0 = \frac{\lambda_c}{4|d_k|} = \frac{\lambda_c}{2|x_{k \cdot l_0} - x_{(k-1) \cdot l_0 + 1}|} \quad (23)$$

经过一级合并后的孔径长度变为 l_1 ,第一级图像的分辨率为 $\{\Delta\theta_1^1, \Delta\theta_2^1, \dots, \Delta\theta_k^1, \dots, \Delta\theta_{N/l_1}^1\}$,其中

$$\Delta\theta_k^1 = \frac{\lambda_c}{4|d_k|} = \frac{\lambda_c}{2|x_{k \cdot l_1} - x_{(k-1) \cdot l_1 + 1}|} \quad (24)$$

现在对算法进行整体描述:

(1) 确定初始孔径长度 l_0 以及每次合并的子图像个数 I ,并计算出全孔径成像的方位向分辨率 $\Delta\theta_m$,作为图像逐级合并后,分辨率随之逐级细化时的下限.

(2) 选取信号有效带宽的最高频率作为载频,按照式计算初始方位向分辨率 $\Delta\theta_k^0$.

(3) 如果 $\Delta\theta_k^0$ 大于分辨率选取的上限 $\Delta\theta_0$,那么就由 $l_0 = 2|d| = \frac{\lambda_c}{2\Delta\theta_0}$ 来确定初始孔径长度.

(4) 对每个子孔径分别进行成像,得到 N/l_0 幅粗分辨率图像.对子孔径成像结果进行逐级合并,第 i 级子图像分辨率 $\Delta\theta_k^i$:

$$\begin{cases} \Delta\theta_k^i = \frac{\lambda_c}{2|x_{k \cdot l_i} - x_{(k-1) \cdot l_i + 1}|}, & \Delta\theta_k^i > \Delta\theta_m \\ \Delta\theta_k^i = \Delta\theta_m, & \Delta\theta_k^i \leq \Delta\theta_m \end{cases} \quad (25)$$

(5) 当合并至最后一级,此时只剩下 I 幅图像,直接在直角坐标系中将这 I 幅图像进行合并,从而得到直角坐标系下所需的图像.

5 实验结果

我们采用有效带宽在 250MHz ~ 1.1GHz 范围的冲激信号,工作模式为正侧视条带式成像,测绘带方位向为 12 ~ 32m,距离向为 9 ~ 17m,在测绘带中布置了 5 个小三面角,成“十”字形摆放,如图 6(e) 所示.为了验证分辨率对成像的制约关系,分别以 250MHz、550MHz、1.1GHz 作为载频,按式(22)得到 $\Delta\theta_l, \Delta\theta_m, \Delta\theta_h$,并以这个初始角分辨率进行成像,成像结果如图 6(a) ~ (d) 所示.从图中可以看出,按照 250MHz 计算的时候,虽然该情况下的初始角度分辨率最粗,具有最高的成像效率,但是有效带宽内信号均无法有效成像,所以基本无法成像.而采用 550MHz 进行计算,信号部分分量被有效成像,但成像效果仍然不理想,图像右侧的背景中仍然有大量噪声.在(c)中采用 1.1GHz 进行计算,在保证有效带宽内信号均被有效成像的情况下,背景噪声已经得到很好的抑制.(d)是采用全孔径进行成像的结果,在效率上和传统 BP 等同,能产生最高的信噪比.(c)和(d)相比,不仅成像质量相差不大(图中全孔径成

像的图形背景形状发生改变是由于在极坐标下成像产生的波束形区域限制),而且极大地提高了成像速率,时间消耗由 184.6s 提高至 13.2s.

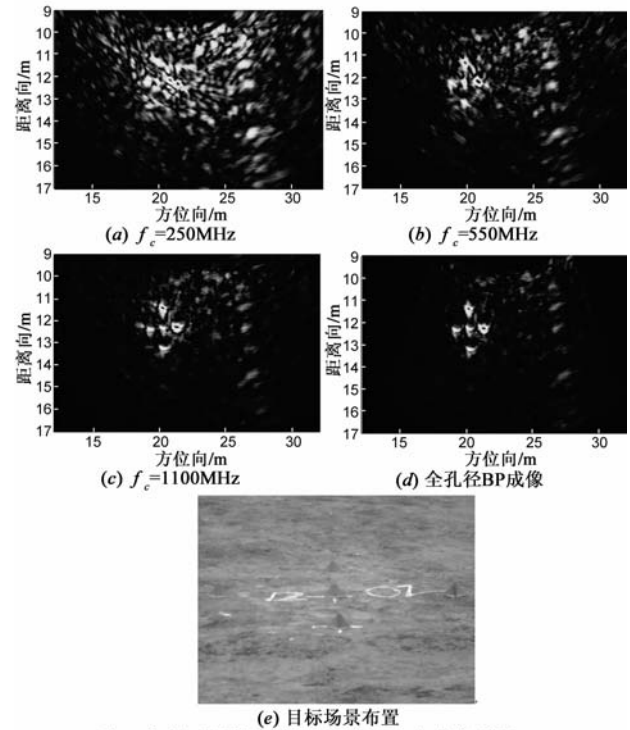


图6 依据不同载频进行分辨率选取成像结果

为了验证多级多分辨率算法的计算效率和成像质量等性能,本文对子孔径的不均匀性进行了仿真,依然采用冲激信号,合成孔径长度为 100m,共发射 512 个脉冲,一个点目标,距离平台航迹为 40m.通过给方位向加入不同的误差,使得雷达方位向采样出现不均匀,不均匀性通过各子孔径长度的方差表示,仿真结果如图 7 所示.

在图 7 中,“统一分辨率”的曲线表示同一级图像中以最长的子孔径作为选取分辨率的依据,这样可以减少图像信息的损失.图 7(a)中不难看出,多级多分辨成像算法具有极高的成像效率,耗费时间基本不随子孔径的不均匀性变化.而采用统一分辨率的算法随着子孔径的不均匀性增大,耗费时间明显增加.在图 7(b)中也可以发现如果采用积分旁瓣比 ISLR 对成像结果进行量化评估,MSMRBP 算法的 ISLR 明显要低于采用统一分辨率的算法,因而,成像质量上至少不弱于传统的统一分辨率算法.

最后再通过一次实测数据的成像结果对本文所提算法进行验证,我们在观测带只布置了一个大三面角,并使得雷达平台进行匀加速直线运动.两种算法成像结果如图 8 所示,在成像质量相差不大的情况下,MSMRBP 算法的耗时为 14.56s,相对于一般 FFBP 的 21.77s 有了很大提高.

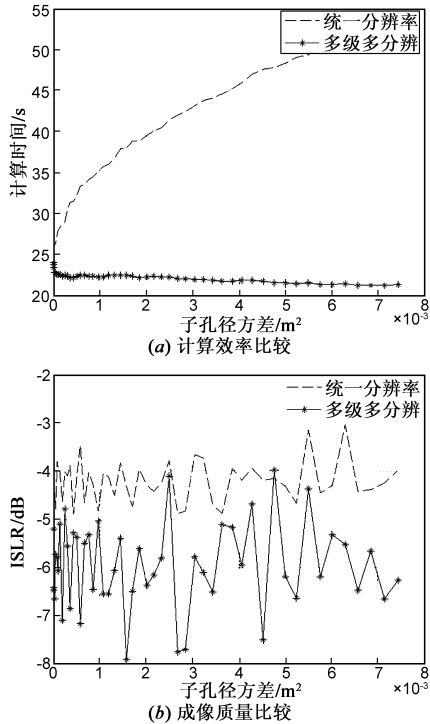


图7 FFBP和MSMRBP性能比较

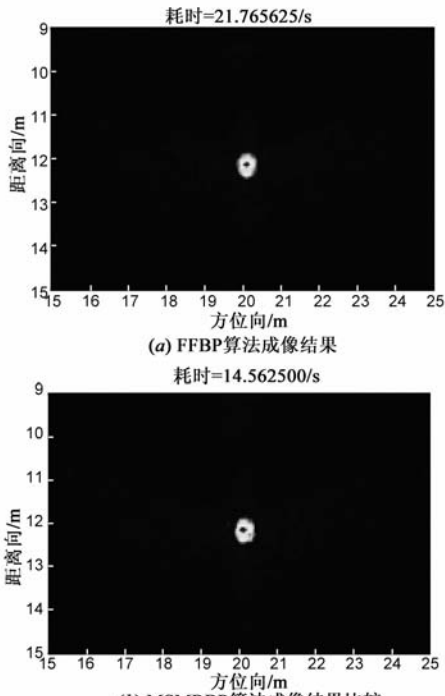


图8 点目标实测数据比较

6 结束语

将全孔径划分为多个子孔径分级成像,是提高 BP 算法计算效率的重要途径,在划分子孔径的时候应该从效率和质量两方面来考虑,所以并不是子孔径选取得越短越好,也不是初始图像分辨率选取得越低越好,在分辨率的选取上必须依据子孔径长度进行,其量化

关系为式(22),这也是所有基于子孔径划分的快速 BP 算法应该遵循的关系.基于这一关系,本文提出的 MSMRBP 算法,在非均匀孔径条件下能够最大可能的挖掘 BP 算法的计算效率,但是这种算法也只能适合于直线孔径条带式快速成像,而对于圆孔径和任意曲线下的快速 BP 算法仍尚未完全解决.

参考文献

- [1] Mccorkle J W, Rofheart M. An order $N2\log_2(N)$ backprojector algorithm for focusing wide-angle wide-bandwidth arbitrary-motion synthetic aperture radar [J]. Proceedings of SPIE on Radar Sensor Technology, 1996, 2747: 25 - 36.
- [2] 董臻. UWB-SAR 信息处理中的若干问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001.
- [3] 金添. 超宽带 SAR 浅埋目标成像与检测技术 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [4] 朱岱寅, 朱兆达, 叶少华, 等. 机载 SAR 斜视区域成像研究 [J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1387 - 1389.
Zhu Daiyan, Zhu Zhaoda, Ye Shaohua. Studies on airborne squint-looking SAR patch-mapping [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1387 - 1389. (in Chinese)
- [5] 黄岩, 李春升, 陈杰, 等. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35 - 38.
Huang Yan, Li Chunsheng, Chen Jie, et al. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 35 - 38 (in Chinese)
- [6] 龙勇, 向茂生, 尤红军, 等. 高精度动态 GPS 在机载新型 SAR 上的应用研究与分析 [J]. 遥感技术与应用. 2004, 19(6): 450 - 455.
- [7] Hartley T D R, Fasih A R, Berdanier C A, et al. Investigating the use of GPU-accelerated nodes for SAR image formation [A]. 2009 IEEE International Conference on Cluster Computing and Workshops (CLUSTER) [C]. New Orleans, LA, United States: IEEE, 2009. 1 - 8.
- [8] Ozsoy S, Ergin A A. Pencil back-projection method for SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(3): 573 - 581.
- [9] Frey O, Magnard C, Rüegg M, et al. Non-linear SAR data processing by time-domain back-projection [A]. Proceedings of the 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EuSAR) [C]. Friedrichshafen: VDE Verlag, 2008. 1 - 4
- [10] Rau R, McClellan J H. Analytic models and postprocessing techniques for UWB SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1058 - 1074.
- [11] Krishnan V, Swoboda J, Yarman C E, et al. Multistatic synthetic aperture radar image formation [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2010, 19(5): 1290 - 1306.
- [12] Varslot T, Morales J H, Cheney M. Synthetic-aperture radar

- imaging through dispersive media [J]. *Inverse Problems*, 2010, 26(2).
- [13] Calloway T M, Donohoe G W. Subaperture autofocus for synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(2): 617 – 621.
- [14] Moreira A. Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 714 – 722.
- [15] McCorkle J W. Focusing of synthetic aperture ultra wideband data [A]. *IEEE International Conference on Systems Engineering* [C]. Dayton, OH, USA: IEEE, 1991. 1 – 5
- [16] Yegulalp A F. Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar [A]. *Radar Conference*, 1999. The Record of the 1999 IEEE [C]. Waltham, MA, USA: IEEE, 1999. 60 – 65.
- [17] Ulander L M H, Hellsten H, Stenstrom G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760 – 776.
- [18] 雷文太, 粟毅, 黄春琳, 等. 表层穿透雷达递归反向投影成像算法 [J]. *电子学报*. 2005, 33(12): 2115 – 2119.
- Lei Wentai, Su Yi, Huang Chunlin. Surface penetrating radar recursive back projection imaging algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2115 – 2119.
- [19] Frolind P O, Ulander L M H. Evaluation of angular interpolation kernels in fast back-projection SAR processing [J]. *IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 243 – 249.
- [20] Nguyen L, Sichina J. SAR image formation using phase-history data from non-uniform aperture [J]. *Proceedings of SPIE on Radar Sensor Technology*, 2007, 6547: 65470F
- [21] Yuan Y, Sun J, Mao S. PFA algorithm for airborne spotlight SAR imaging with nonideal motions [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2002, 149(4): 174 – 182.

作者简介

李杨寰 男, 1982 年出生于湖南长沙, 国防科学技术大学电子科学与工程学院在读博士研究生, 研究方向为先进探测系统及信息处理技术, 合成孔径雷达成像, 三维成像.

E-mail: poptopli@163.com