

# 聚束式 SAR 的宽场景成像算法

井 伟,张 磊,邢孟道,保 铮

(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:** 提出了基于 SPECAN 处理的宽场景聚束式 SAR 成像算法. 首先对距离 Dechirp 后的信号在方位上作谱分析 (SPECAN) 处理消除方位模糊并对信号支撑区进行伸缩与平移变换,二次相位补偿后选择合适的插值方法恢复信号理想支撑区,最后二维 IFFT 成像. 讨论并给出了算法对脉冲重复频率选择的限制. 仿真实验验证了该方法的有效性.

**关键词:** 雷达成像; 聚束 SAR; 谱分析处理; 宽场景成像

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 03-0470-06

## Algorithm for Wide-swath Spotlight SAR Data Processing

JING Wei, ZHANG Lei, XING Meng-dao, BAO Zheng

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

**Abstract:** This paper presents processing algorithm for wide-swath spotlight SAR data processing based on spectrum analysis (SPECAN). The first step of the proposed algorithm implements SPECAN processing to range dechirped signal. This operation can eliminate azimuth spectrum folding effect and migrate and scale the azimuth data support. Then compensates azimuth quadratic phase and recovers the ideal data support via appropriate interpolation. Finally focuses image with a two-dimensional inverse Fourier transform. Discussed and gave the restriction on the pulse repetition frequency (PRF). Experiments confirm the validity of the presented algorithm.

**Key words:** radar imaging; spotlight SAR; spectral analysis (SPECAN) processing; wide-swath image

### 1 引言

聚束式 SAR 在对较大的场景成像时,方位带宽会很大,当 PRE 选取比较大时,数据量非常大,会增加后续成像处理的运算负担;当 PRE 选取小于方位带宽时会产生多普勒模糊,导致不能正常聚焦. 本文主要研究聚束式 SAR 成像中如何实现高分辨宽场景成像. 同时希望有较小的运算量和数据量. 当前的聚束式成像算法尚不能很好地解决这些问题.

PFA 算法的优势在于它的简单性. 它基于平面波假设,这个假设在大场景成像情况下不成立,处理后在数据中还存在空变的一次和高次相位,导致几何失真和聚焦模糊. 因此适用的成像场景范围受到严格的限制.

RMA 算法在理论上是精确的,但 RMA 算法要求方位上没有模糊,这将要求高的 PRE,导致大的数据处理量.

文献[1]首先提出了聚束式 SAR 宽场景成像算法的概念,并分别对宽场景极坐标格式算法 (WPFA, wide-field polar format algorithm)、Stolt 极坐标算法 (SPA, Stolt

polar algorithm) 和微分多普勒算法 (DDA, differential Doppler algorithm) 三种算法进行了概念上的分析和讨论,但是没有进一步的数学分析和任何公式推导. 本文考虑高分辨宽场景聚束 SAR 方位采样频率大于瞬时带宽的情况,引入 SPECAN 算法<sup>[1~4]</sup>对方位上进行处理,实现消除方位模糊,然后通过构造二次相位补偿函数和使用合适的插值实现支撑区的完整恢复,最后通过二维 IFFT 实现聚焦成像. 整个过程在插值处理前只有矩阵运算和 FFT 运算,计算量小. SPECAN 算法另一方面实现了支撑区的变形,突破了 PFA 对成像场景的限制. 在 SPECAN 操作中使用不同的参考因子和插值操作分别实现 WPFA、SPA 和 DDA 三种算法. 同时根据 SPECAN 操作是一个时频变换的本质,推导出成像不模糊的条件是方位采样频率不小于瞬时带宽.

本文首先介绍了高分辨宽场景聚束 SAR 成像算法的处理流程,其中对 SPECAN 算法支撑区变形去方位模糊作了详细的分析,推导了成像不模糊方位采样频率的限制条件,同时介绍了 WPFA, DDA, SPA 算法,最后给出

收稿日期:2007-09-13;修回日期:2008-11-06

基金项目:教育部长江学者和创新团队支持计划资助(No. IRT0645)和武器装备预研基金(No. 9140A07020408DZ0116)资助

了仿真结果并得出结论.

## 2 算法流程

为了保证较小的数据量,在 PRE 选取较小的情况下,WPFA, SPA 以及 DDA 算法先通过 SPECAN 操作消除多普勒模糊,然后通过相位补偿和插值恢复出场景范围的理想二维波数域支撑区,最后通过二维 IFFT 进行成像.它们的不同之处在于进行 SPECAN 操作时的参考函数选择不同,WPFA 和 SPA 的参考函数随距离波数变化,而 DDA 的参考函数不随距离波数变化. SPECAN 操作的不同导致后面的相位补偿和插值操作也不同.如图 1 所示<sup>[1]</sup>.在聚束模式下,图 1(a)中 A, B, C 三点的原始数据支撑区重叠,如图 1(b)所示.构造随距离波数变化和随距离波数变化的 SPECAN 参考函数进行处理就可以得到图 1(c)上下两种不同的结果.构造合适的二次相位补偿后,对下面的结果进行 Stolt 插值,就得到 DDA 算法;对上面的结果直接极坐标插值得到 WPFA 算法,先进行支撑区变化,再进行 Stolt 插值,就得到 DDA 算法.算法流程如图 2 所示.三种宽场景成像算法的算法流程相似,但在几个关键步骤具体的处理都不一样,后面将详细说明.

### 2.1 SPECAN 处理分析

图 3 所示为聚束 SAR 几何模型,场景中点目标坐标为  $(x, r)$ ,取  $t_m$  为慢时间,  $X = vt_m$  为平台方位位置,点目标斜距为  $R$ ,平台到场景中心线的最短距离为  $R_c$ .

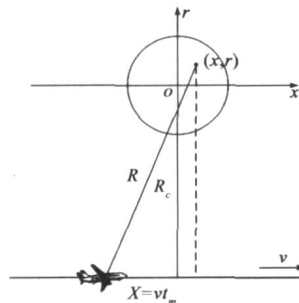


图3 聚束SAR几何模型

假设处理的数据距离上已经沿场景中心线作 Dechirp 处理,消除 RVP,包络去斜后,FFT 变换到距离波数域的点目标回波信号为:

$$s(K_r, X) = \text{rect}\left[\frac{(K_r - K_{rc}) - b \cdot R_c}{a \cdot T_p}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{X - x}{L}\right] \cdot \exp[-j K_r \cdot (R - R_c)] \quad (1)$$

其中  $T_p$  为脉冲宽度,  $L$  为合成孔径长度,  $\omega$  为调频率,  $c$  为光速,  $f_c$  为载频,  $b = \frac{8}{c^2}$ ,  $a = \frac{4}{c}$ ,  $K_{rc} = \frac{4 f_c}{c}$ .

方位 SPECAN 处理通过信号和参考相位函数的卷积实现,可以认为 SPECAN 算法实现方位上的变标,等效地提高了方位采样频率.

WPFA 和 SPA 对应的 SPECAN 操作参考函数为:

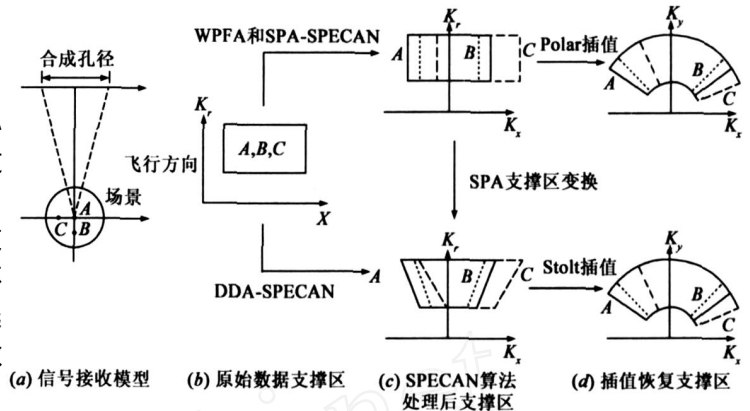


图1 恢复理想支撑区示意图



图2 算法流程

$$r_{ref} = \exp\left[j \frac{2 X^2}{r_{ref}}\right] = \exp\left[j K_r \frac{X^2}{2 r_{ref}}\right] \quad (2)$$

DDA 对应的 SPECAN 操作参考函数为:

$$r_{ref} = \exp\left[j \frac{2 X^2}{r_{ref}}\right] = \exp\left[j K_{rc} \frac{X^2}{2 r_{ref}}\right] \quad (3)$$

其中,  $r_{ref}$  为选择的参考距离.

可以看到,WPFA 和 SPA 对应的参考函数是随距离频率变化的,而 DDA 对应的参考函数不随距离频率变化,通过以下 SPECAN 算法的分析可知,WPFA 和 SPA 相当于对每个距离单元做不同的方位尺度变换,而 DDA 则是统一的方位尺度变换.

下面以 WPFA 为例进行分析. SPECAN 操作通过信号与相位参考函数的卷积实现:

$$\begin{aligned} s_1(K_r, X) &= s(K_r, z) \exp\left(j K_r \frac{(z - X)^2}{2 r_{ref}}\right) dz \\ &= \exp\left(j K_r \frac{X^2}{2 r_{ref}}\right) s(K_r, z) \exp\left(j K_r \frac{z^2}{2 r_{ref}}\right) \\ &\quad \exp\left(-j K_r \frac{2 z X}{2 r_{ref}}\right) dz \end{aligned} \quad (4)$$

SPECAN 算法实际上是信号与参考函数的卷积,可以通过信号和相位参考函数相乘(Deramp 操作)然后 FFT,再补偿一个二次相位实现<sup>[2-4]</sup>.从以上公式分析得,可以认为 SPECAN 操作将信号方位标度从  $x$  变到  $X$ ,相当于将采样频率从 PRF 变到 PRF.

进一步对 SPECAN 操作分析可知, SPECAN 后信号的变标实际上是 Deramp 操作后由一个 FFT 和 FFT 后的二次相位补偿操作完成的,这个过程可以理解为一个时频变换过程, SPECAN 前后的时频标度有如下对应关系:

$$X = \frac{K_r \tilde{r}_{ref}}{4} \quad X = \frac{K_r \tilde{r}_{ref}}{4} \quad (5)$$

通过分析可得  $X = \frac{v}{PRF} \cdot X$ ,  $PRF = \frac{1}{x} PRF$ , 且变换系数可以由  $r_{ref}$  和方位采样点数确定:

$$= \left(\frac{PRF}{v}\right)^2 \cdot \frac{r_{ref}}{2Q} = \frac{1}{x} \cdot \frac{r_{ref}}{2L_{ref}} \sim \frac{1}{x} \cdot \frac{r_{ref}}{2} = \frac{r_{ref}}{x} \quad (6)$$

其中  $x = \frac{v}{PRF}$  为 SPECAN 操作前的方位采样间隔,  $L_{ref}$  为录取数据的合成孔径长度,  $Q$  为方位采样点数,  $r_{ref}$  为参考距离处对应目标的照射转角,  $r_{ref}$  为参考距离处方位分辨率。

如图 4 所示, 在高分辨聚束模式下, 一般参考距离处对应的单点带宽  $B_p$  要比场景对应的带宽  $B_{inst}$  (即瞬时带宽) 大很多。由式(6)可知,  $B_p$  与选取的参考距离  $r_{ref}$  成正比关系, 与

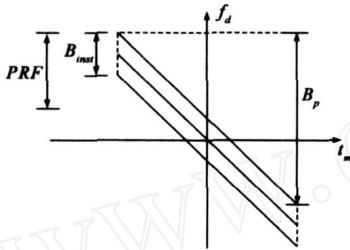


图4 聚束SAR方位时频关系

方位采样点数  $Q$  成反比关系。SPECAN 操作后方位采样频率为  $PRF = \frac{1}{x} PRF$ 。可见, 通过选取合适的参考距离  $r_{ref}$  和采样点数  $Q$ , 可以等效增大方位采样频率, FFT 变换到二维波数域, 将没有方位频谱混叠, 而在此基础上补偿一个二次相位, 就可以得到理想的信号支撑区。

下面分析选取 PRF 的限制条件。令  $L_{ref}$  为 SPECAN 操作后的成像平面的方位宽度, 可以由式(6)取  $L_{ref} = \frac{1}{x} L_{ref}$ 。进一步有

$$L_{ref} = \frac{1}{x} \cdot \frac{r_{ref}}{2} \sim \frac{PRF}{v} \cdot \frac{r_{ref}}{2} \quad (7)$$

考虑成像不模糊的条件是成像平面宽度不小于场景宽度, 令场景方位宽度为  $W_a$ , 即  $L_{ref} \geq W_a$  成立。便于分析, 忽略场景距离的空变性, 取  $r_{ref}$  作为距离, 则场景方位宽度  $W_a = \frac{B_{inst}}{v} \cdot \frac{r_{ref}}{2}$ , 聚束 SAR 中  $B_{inst}$  由波束宽度 (也即方位场景) 决定。则 SPECAN 操作不模糊的条件为  $PRF \geq \frac{2}{v} B_{inst}$ 。实际上, SPECAN 操作是一个时频变换的过程, 成像平面是在方位频率域, 换言之, SPECAN 操作后成像平面大小由 PRF 大小决定, 为保证成像不模糊, 必须满足  $PRF \geq \frac{2}{v} B_{inst}$  的条件。

注意到 WPFA 的变标系数是随距离波数变化的, 也就是说不同的距离波数方位标度  $x$  到  $X$  的变化是不一样的。而 DDA 由于在不同距离波数上采用相同的 SPECAN 参考函数, 方位标度变化是一致的, 所以 DDA 操作仅仅将信号支撑区方位尺度拉伸, 而并不改变信号支撑区形状。

### 2.2 支撑区二次相位补偿

由上一小节分析可知, 对 SPECAN 操作后的信号

作方位 FFT 变换到二维波数域, 只要满足原方位采样率 PRF 大于瞬时带宽的条件, 就可以得到不混叠的二维波数谱。

WPFA 和 SPA 在经过 SPECAN 处理后得到的信号经过 FFT 可以表示为

$$\begin{aligned} s_2(K_r, K_x) &= \int s_1(K_r, X) \exp(-j K_x X) dX \\ &= \int \left[ \exp(j K_r \frac{X^2}{2 r_{ref}}) s(K_r, z) \exp(j K_r \frac{z^2}{2 r_{ref}}) \right. \\ &\quad \left. \exp(-j K_r \frac{2zX}{2 r_{ref}}) dz \right] \exp(-j K_x X) dX \\ &= \int \left[ s(K_r, z) \exp(j K_r \frac{z^2}{2 r_{ref}}) dz \right] \exp(j K_r \frac{X^2}{2 r_{ref}}) \\ &\quad \exp(-j K_r \frac{2zX}{2 r_{ref}}) \exp(-j K_x X) dX \\ &= \int s(K_r, z) \exp(-j K_x z) dz \exp\left[-j \frac{K_x^2 r_{ref}}{2 K_r}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

方位 SPECAN 处理是通过信号和参考相位函数卷积实现的, 时域卷积就等于频域乘积, 二次相位补偿实际上是在波数域将 SPECAN 操作消除的二次相位在波数域 ( $K_x$  域) 补偿回去。二次相位补偿函数表示为:

$$s = \exp\left[j \frac{K_x^2 r_{ref}}{2 K_r}\right] \quad (9)$$

经过二次相位补偿的信号为:

$$\begin{aligned} s_3(K_r, K_x) &= s_2(K_r, K_x) \exp\left[j \frac{K_x^2 r_{ref}}{2 K_r}\right] \\ &= \int s(K_r, z) \exp(-j K_x z) dz \\ &= \text{rect}\left[\frac{(K_r - K_{rc}) - b \cdot R_c}{a \cdot T_p}\right] \text{rect}\left[\frac{K_x \cdot r}{L \sqrt{K_r^2 - K_x^2}}\right] \\ &\quad \times \exp(j K_r R_c) \exp(-j \sqrt{K_r^2 - K_x^2} \cdot r) \\ &\quad \exp(-j K_x x) \end{aligned} \quad (10)$$

DDA 对应的信号经过 SPECAN 操作后二次相位补偿函数为  $\exp\left[j \frac{K_x^2 r_{ref}}{2 K_{rc}}\right]$ , 经过补偿得到的信号形式上和式(10)所表示的信号一样。但 SPECAN 操作时 DDA 使用的方位参考函数不随距离波数变化, 可以得到尺度一致的方位标度, 即  $K_x = K_{rc} \frac{X}{r_{ref}}$ , 可见方位波数  $K_x$  尺度是均匀的。而 WPFA 和 SPA 在 SPECAN 操作时采用的方位参考函数随距离波数变化, 实现的方位尺度变化是不一致的,  $K_x = K_r \frac{X}{r_{ref}}$ , 这里的方位波数  $K_x$  尺度是不均匀的。

### 2.3 匹配滤波与插值成像

经过二次相位补偿后的信号表达式与 RMA 匹配滤波前的形式相似。借鉴 RMA, 乘以一匹配滤波函数  $\exp$

$[j(\sqrt{K_r^2 - K_x^2} - K_r) \cdot R_c]$ . 这样得到的信号经过插值就可以恢复理想信号支撑区.

DDA 经过匹配滤波函数相乘后采用 RMA 成像的步骤进行处理. 对式(10)乘以匹配滤波函数得:

$$\begin{aligned}
s_4(K_r, K_x) &= s_3(K_r, K_x) \exp(j(\sqrt{K_r^2 - K_x^2} - K_r) \cdot R_c) \\
&= \text{rect}\left(\frac{(K_r - K_{r0}) - b \cdot R_c}{a \cdot T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{K_x \cdot r}{L \sqrt{K_r^2 - K_x^2}}\right) \\
&\quad \times \exp(-j \sqrt{K_r^2 - K_x^2} \cdot (r - R_c)) \exp(-j K_x x)
\end{aligned} \tag{11}$$

插值实现  $\sqrt{K_r^2 - K_x^2} \rightarrow K_y$ , 最后二维 IFFT 成像. 这就是 DDA.

WPFA 和 SPA 对应的经过二次相位补偿的信号中

$K_x = K_r \frac{X}{r_{ref}}$ , 式(10)乘以匹配滤波相位后改写为:

$$\begin{aligned}
s_4(K_r, K_x) &= s_3(K_r, K_x) \exp\left[j\left(\sqrt{K_r^2 - K_x^2} - K_r\right) \cdot R_c\right] \\
&= \text{rect}\left(\frac{(K_r - K_{r0}) - b \cdot R_c}{a \cdot T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{K_x \cdot r}{L \sqrt{K_r^2 - K_x^2}}\right) \\
&\quad \times \exp(-j \sqrt{K_r^2 - K_x^2} \cdot (r - R_c)) \exp(-j K_x x) \\
&= \text{rect}\left(\frac{(K_r - K_{r0}) - b \cdot R_c}{a \cdot T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{K_x \cdot r}{L \sqrt{K_r^2 - K_x^2}}\right) \\
&\quad \times \exp\left[-j K_r \sqrt{1 - \left(\frac{X}{r_{ref}}\right)^2} \cdot (r - R_c)\right] \exp(-j K_r \frac{X}{r_{ref}} x) \\
&= \text{rect}\left(\frac{(K_r - K_{r0}) - b \cdot R_c}{a \cdot T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{K_x \cdot r}{L \sqrt{K_r^2 - K_x^2}}\right) \\
&\quad \times \exp(-j K_r \cos \theta \cdot (r - R_c)) \exp(-j K_r \sin \theta \cdot x)
\end{aligned} \tag{12}$$

其中,  $\sin \theta = \frac{X}{r_{ref}}$ ,  $\cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{X}{r_{ref}}\right)^2}$

对式(12)进行二维极坐标插值实现  $K_r \cos \theta \rightarrow K_y$ ,  $K_r \sin \theta \rightarrow K_x$ , 此处的插值操作和传统 PFA 的插值操作类似. 接着进行二维 IFFT 就可以成像. 这就是 WPFA.

SPA 实际上是对 WPFA 模式中式(12)通过插值先实现  $K_r \frac{X}{r_{ref}} \rightarrow K_x$  的变换, 也即对方位尺度统一化, 然后按 DDA 步骤成像.

可见, 经过 SPECAN 操作实现信号标度  $X$  到  $X'$  的

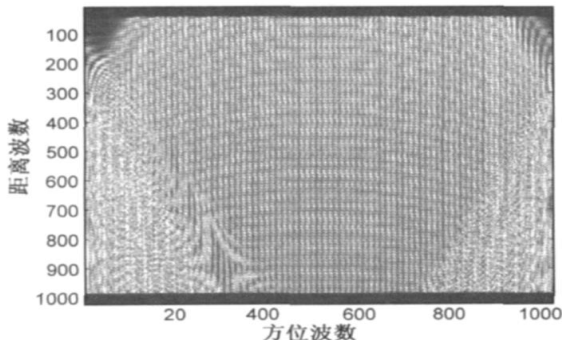
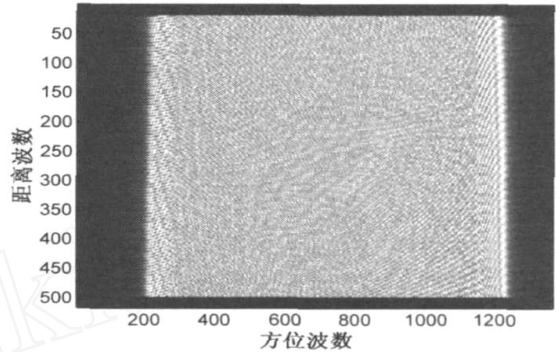
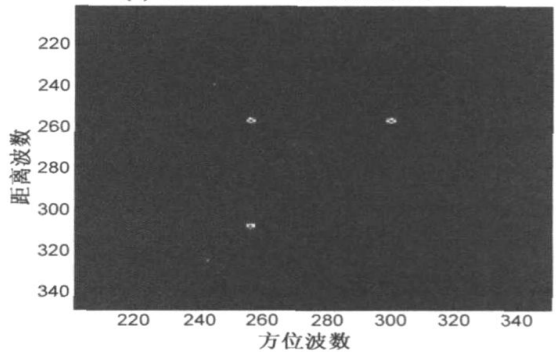


图5 原始数据方位FFT后的支撑区

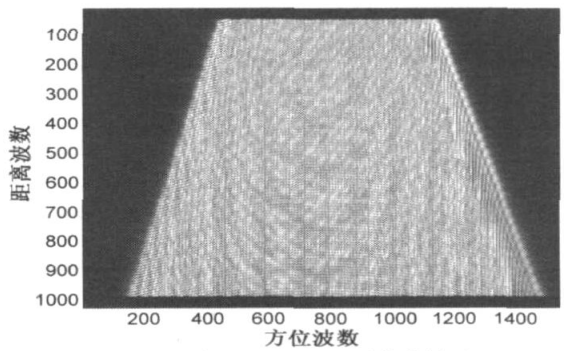
变换, 实际上是一个时频变换, 然后在变换后的波数域  $K_r - K_x$  进行相位补偿, 接着进行极坐标插值或类似 RMA 的插值. 最后, 二维 IFFT 就可实现聚焦成像. 关于极坐标插值和 RMA 插值的介绍请参见文献[5].



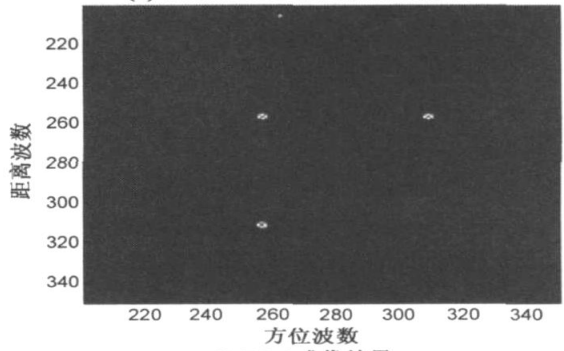
(a) 经过SPECAN处理后的支撑区



(b) WPFA成像结果  
图6 WPFA仿真结果



(a) 经过SPECAN处理后的支撑区



(b) DDA成像结果  
图7 DDA仿真结果

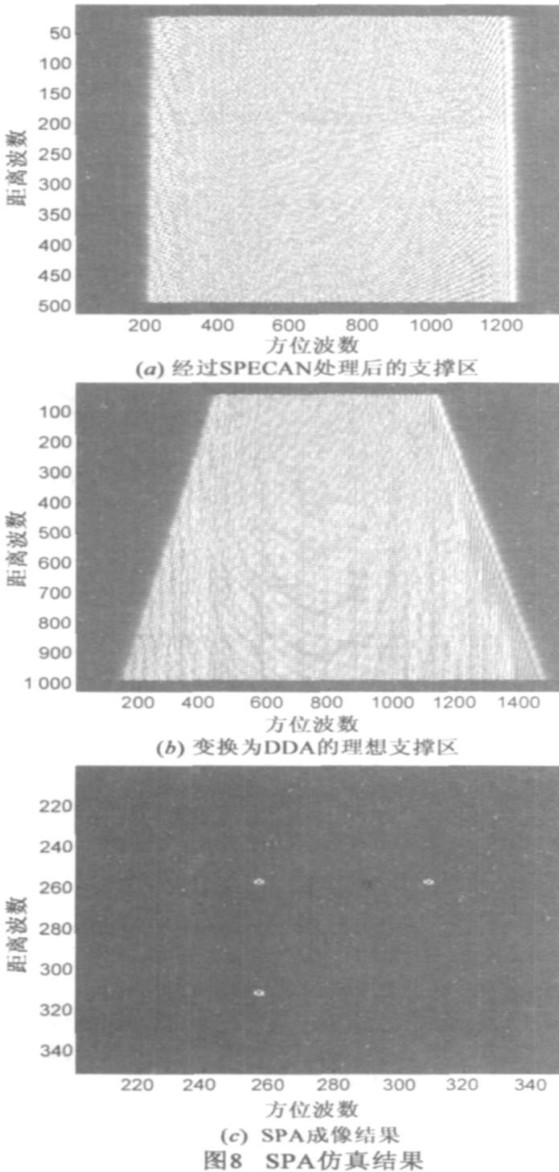
### 3 仿真结果

仿真参数:

表 1 雷达仿真参数

PRF	方位带宽	载频	脉冲宽度	信号带宽
163 Hz	208 Hz	242 MHz	24 μs	150 MHz

平台速度取为 200m/s,雷达到场景中心距离  $R_c = 1000\text{m}$ ,场景中设定三个点,场景中心一个,距离和方位上偏离场景中心 100m 各设置一个点.



在下面的仿真中,参考距离  $r_{ref}$  就选用雷达到场景中心的最短距离  $R_c$ . 另外,为了更好的显示处理算法的特点,下面的仿真中方位采样点数增加了一些. 图 5 所示为原始数据方位 FFT 后得到的信号支撑区,从图中可以看到,由于 PRF 选取较小,方位上出现混迭. 由图 6-a) 和图 8-a) 可以看到,由于采用的 SPECAN 参考函数

随距离波数变化,得到 SPECAN 处理后的支撑区不仅有尺度上的伸缩,还有形变发生. 从图 7-a) 看到,DDA 采用的 SPECAN 参考函数不随距离波数变化,每一个距离波数上信号支撑区的变化都一样,所以只是支撑区的尺度有伸缩,而支撑区形状不变. SPA 算法中,需要通过插值将图 8-a) 所示的支撑区变为图 8-b) 的支撑区. 由图 6-b),图 7-b) 和图 8-c) 可以看到,三种算法的成像质量相当.

以上算法保持了 PFA 算法简便的优点,同时突破了其成像场景的限制,得到了 RMA 精度的成像效果,下面通过仿真对以上算法(以 DDA 为代表)和 PFA 算法进行比较,仿真参数如表 1 所示,设置  $5 \times 5$  的点阵,点间距 60m. 由仿真参数可计算得到成像方位分辨率约为 1m,PFA 算法的成像场景限制为半径 40m 的区域<sup>[5]</sup>. 从图 9 可以看到,PFA 算法对于场景中心点聚焦良好,偏离中心越远的点聚焦效果越差,DDA 算法对于整个场景的点都可以良好聚焦. WPFA 和 SPA 也可以得到同样质量的图像.

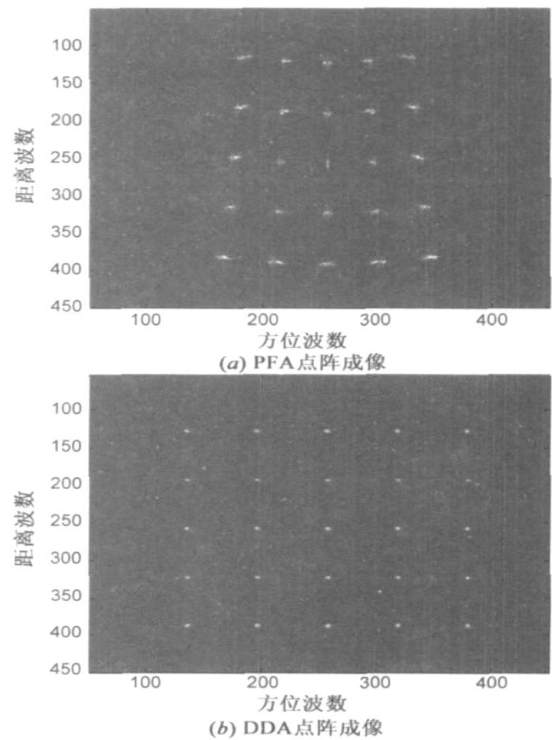


图9 PFA和DDA成像比较

### 4 总结

传统聚束式 SAR 成像算法,如 PFA,RMA 应用中都存在着限制,PFA 的平面波假设在大多数情况下是不成立的,对大场景成像尤其不适用,RMA 虽然在理论上是精确的,但要求方位上不模糊,在实现高分辨时必须要求很高的方位采样率,这就导致了数据量和计算量的增大,同时也要求信号发射机有更高的功率. 本文介绍

了一种结合两种算法各自优势的新的成像算法,通过 SPECAN 算法操作,可有效消除方位混叠,然后通过二维波数域的相位补偿恢复原信号相位,最后通过合适的插值实现理想支撑区的恢复并进行二维 IFFT 完成聚焦成像.

#### 参考文献:

- [1] W G Carrara, R S Goodman, M A Ricoy. New algorithms for widefield SAR image formation[A]. 2004 IEEE Radar Conference[C]. Philadelphia:PA, 2004. 38 - 43.
- [2] R Lanari, M Tesauro, E Sansosti, G Fornaro. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing, 2001, 39(9): 1993 - 2004.
- [3] M Sack, M Ito, and I Cumming. Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to SAR processing[J]. Proc Inst Elect Eng, 1985, 132(1): 45 - 57.
- [4] R Lanari, S Hensley, P A Rosen. Chirp  $z$ -transform based SPECAN approach for phase preserving ScanSAR image generation[J]. Proc Inst Electron Eng-Radar, Sonar Navigat. 1998, 145(5): 255 - 261.
- [5] W G Carrara, R S Goodman, R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.

#### 作者简介:



井 伟 男, 1978 年生于陕西延安, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士研究生. 主要研究方向为雷达成像及多通道信号处理.

Email: jw0911@sina.com



张 磊 男, 1984 年生于浙江金华市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室硕博连读生, 研究方向为单/双基雷达成像和逆合成孔径雷达成像.

Email: zhanglei.1999@163.com

邢孟道 男, 1975 年 11 月生于浙江嵊州, 西安电子科技大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理. Email: xmd@mail.xidian.edu.cn

保 铮 男, 1927 年 12 月生于江苏南通, 西安电子科技大学教授、博士生导师、中国科学院院士、中国电子学会会士. 主要研究方向为雷达信号处理.