

严格解析谱下同航线双基 SAR 频率变标成像算法

陈士超^{*①} 武其松^① 刘明^② 邢孟道^① 保铮^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘要: 该文提出一种基于几何关系公式(GBF)方法推导出的 TanDEM 构形下严格解析双基频谱的频率变标(FS)算法,算法中半类双基角的求解过程不再需要进行数值计算,提高了成像的处理效率;不同于已有的双基成像算法,完全精确的双基谱使其不受基线长和作用距离比值大小的影响,可以进行长基线甚至极限基线长情形下的数据处理,仿真数据验证了该文算法的有效性;数值方法和该文所提方法成像效果的对比实验表明所提算法可以取得和熟知的计算量大的数值计算方法几乎完全相同的成像效果,进一步表明了该文方法的有效性和可行性。

关键词: 双基地合成孔径雷达; 点目标精确解析谱; 频率变标算法; 基线和雷达作用距离比

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1447-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01089

Bistatic SAR Data Focusing Using a Frequency Scaling Algorithm Based on an Analytical Spectrum in Tandem Configuration

Chen Shi-chao^① Wu Qi-song^① Liu Ming^② Xing Meng-dao^① Bao Zheng^①

^①(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A bistatic Frequency Scaling (FS) algorithm is proposed based on an exact analytical bistatic Point Target (PT) spectrum obtained with a Geometry-based Bistatic Formula (GBF) method in TanDEM configuration. Since numerical calculation is no longer needed when calculating the important parameter- the Half Quasi Bistatic Angle (HQBA), fast imaging process is achieved. Unlike the existing algorithms, it avoids the influence of the baseline to range ratio because of its precise spectrum. Therefore, the method can handle the bistatic data with a large baseline (even in extreme conditions). The proposed method is proved using simulated data. By comparing the experimental results between the proposed method and the numerical calculation method which has a heavy computational burden, the images were almost the same, which further proves the advantages and correctness of the proposed method.

Key words: Bistatic SAR (BiSAR); Exact analytical Point Target (PT) spectrum; Frequency Scaling (FS) algorithm; Baseline to range ratio

1 引言

与传统的单基SAR不同,双基地合成孔径雷达的接收机和发射机放在不同的运动平台上,可以有不同的空间位置和速度。因此双基地SAR在军事应用,资源调查和地壳形变监测^[1,2]等方面具有特殊的优势。根据收发平台速度矢量的关系可以将双基地SAR的工作模式划分为移变模式和平移不变模式。在平移不变模式中,发射机和接收机以相同的

速度沿着平行或相同的航迹匀速直线飞行,这种体制的双基地SAR编队构形简单,工程上较容易实现,在地面运动目标检测和InSAR3维重建等方面有着广阔的应用前景。

双基地合成孔径雷达成像的可行性早已被实验所证实^[3],除时间、相位同步等技术问题外,成像算法也依然没有完全解决,算法设计的难点在于:不同于单基SAR,双基SAR的斜距历程是两根号之和,直接利用驻相点原理无法获得2维频谱。国内外的雷达研究机构对双基频谱问题进行了广泛深入的研究:Racco等人^[4]提出“smile”预处理操作将双基数据转化成等效的单基数据,再利用常规的单基算法处理;Loffeld等人^[5]利用二次驻相点原理推导的LBF

2010-10-11 收到, 2011-03-08 改回

教育部博士学科点专项科研基金(200807010002)和国家自然科学基金重大项目(60890072)资助课题

*通信作者: 陈士超 chenshichao725@gmail.com

谱,把双基地SAR的方位频谱表示为两个类单基项和一个双基变形项;但以上两种频谱受基线和雷达作用距离比值的影响较大,当基线和雷达作用距离比增大时,频谱精度下降。Neo等人^[6]利用级数反演方法推导出的MSR谱是当前应用最为广泛的一种双基谱,该谱的重要特点就是谱精度是可控的,精度与级数反演的阶数有关;因此这种谱仍然是一种高度近似的双基谱,不是严格解析双基谱。文献[7,8]利用瞬时频率方法给出了双基频谱的解析表达式,但是该频谱中的一个重要变量-半类双基角只能通过数值计算获得,运算量大、效率低,这个缺点限制了该频谱的应用;文献[9]基于GBF方法成功的推导出了TanDEM构形下严格解析的双基频谱,但由于采用RMA算法进行成像,需要进行类stolt插值运算,运算量大。FS算法通过相位相乘替代插值操作完成距离徙动补偿,大大提高了运算效率,又能保证聚焦精度。本文提出基于该严格解析谱的双基FS成像算法,算法中对半类双基角等参数的求解过程不再需要数值计算,大大降低了成像算法的复杂度,文中给出了严格解析谱的详细推导过程。由于双基谱是完全精确的,因而本文所提算法可以进行长基线以至极限基线作用距离比情形下的数据处理。

2 严格解析双基频谱的推导

聚束模式下,类比文献[7]由GBF方法推导出的点目标的2维频谱的解析表达式为

$$S(\Delta k_R, k_X) = \left\{ \sigma_n \cdot W_a(K_X) \cdot \text{rect} \left[\Delta K_R / (bcT_p) \right] \cdot \exp \left[-j(R_B + h_x \tan \beta) \sqrt{4k_R^2 \cos^2 \beta - k_X^2} \right] \cdot \exp \left[-jx_n k_X \right] \exp \left(jK_R R_{\text{ref}} \right) \right\} \cdot \exp \left[-j\Delta K_R^2 / 2b \right] \quad (1)$$

σ_n 表示后项散射系数, $W_a(\cdot)$ 为回波方位谱包络, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗, $k_R = k_{Rc} + \Delta k_R$ 表示距离波数, $k_{Rc} = 2\pi f_c / c$ 为径向波数中心, f_c 为载频, c 表示光速, Δk_R 表示距离波数在基频的变化, k_X 表示多普勒波数。 T_p 为脉冲宽度, γ 为发射信号的调频率, $(1/b) = (2\pi\gamma) / c^2$, R_B 表示目标点到航线的最近距离, β 表示半双基角, h_x 表示基线长度一半, x_n 表示目标点所在的方位位置, R_{ref} 表示信号解线调的参考距离。

由式(1)知求解解析双基谱的问题也就是求解解析半双基角 β 的问题。图1给出双基 TanDEM 构形几何关系示意图,发射平台 Tx 和接收平台 Rx 以

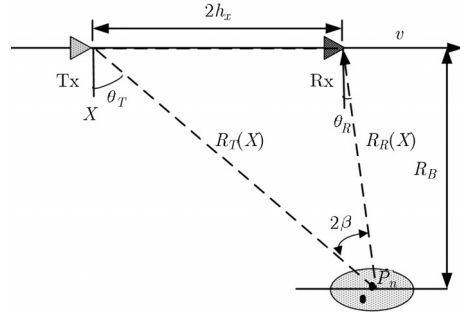


图1 双基 TanDEM 构形几何关系示意图

相同的速度 v 匀速直线飞行, θ_T 和 θ_R 分别表示收发平台到 X 位置时目标 P_n 到收发平台的瞬时斜视角, $R_T(X)$ 和 $R_R(X)$ 分别表示此时收发平台的瞬时斜距。在图1中利用三角函数的性质和数学技巧得到以 $\tan \beta$ 为自变量的一元四次方程。

$$K_X^2 \tan^4 \beta + 2K_X^2 \tan^2 \beta + (4K_R^2 R_B / h_x) \tan \beta + K_X^2 - 4K_R^2 = 0 \quad (2)$$

解此方程得

$$\left. \begin{aligned} (\tan \beta)_{1,2} &= \frac{-\sqrt{2y-2}}{2} \\ &\quad \pm \frac{1}{2} \sqrt{2y-2-4 \left[y + \frac{2K_R^2 R_B}{h_x K_X^2 \sqrt{2y-2}} \right]} \\ (\tan \beta)_{3,4} &= \frac{-\sqrt{2y-2}}{2} \\ &\quad \pm \frac{1}{2} \sqrt{2y-2-4 \left[y - \frac{2K_R^2 R_B}{h_x K_X^2 \sqrt{2y-2}} \right]} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $y = \left[-q/2 + \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3} \right]^{1/3} + \left[-q/2 - \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3} \right]^{1/3} + 1/3$, $p = -\left(\frac{4}{3} - \frac{4K_R^2}{K_X^2} \right)$,

$$q = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{4K_R^2}{K_X^2} \right) - \frac{2}{27} - \frac{2K_R^4 R_B^2}{h_x^2 K_X^4}$$

考虑到 $\beta = 0$ 时双基构形蜕化为单基构形, $\beta = \pi/2$ 时基线长为无穷大的情况,因此可以确定半双基角的取值范围为 $0 \sim \pi/2$,由正切函数的性质知 $\tan \beta$ 必定为大于零的实数值,分析式(3)中满足上述条件的解为

$$\tan \beta = \left(\frac{-\sqrt{2y-2}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{2y-2-4 \left[y - \frac{2K_R^2 R_B}{h_x K_X^2 \sqrt{2y-2}} \right]} \right) \quad (4)$$

求反正切得解析半双基角 β 的表达式为

$$\beta = \arctan\left(\frac{-\sqrt{2y-2}}{2}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{2y-2-4\left(y-\frac{2K_R^2 R_B}{h_x K_X^2 \sqrt{2y-2}}\right)} \quad (5)$$

以上所有推导步骤没有采取任何近似, 得到的半双基角是完全解析的, 因此式(1)表示的双基谱的2维频域表达式是完全精确的。

3 双基SAR的FS成像算法

将式(1)在 $K_R = K_{Rc}$ 处进行泰勒展开, 并保留到二次项, 得

$$\begin{aligned} S(\Delta K_R, K_X) &= \left\{ \sigma_n \cdot W_a(K_X) \cdot \text{rect}[\Delta K_R / (bcT_p)] \right. \\ &\quad \cdot \exp(j\phi_{azi}) \cdot \exp(-jK_X X_n) \\ &\quad \cdot \exp(-j\phi_1 \Delta K_R) \cdot \exp(j\phi_2 \Delta K_R^2) \left. \right\} \\ &\quad \otimes \exp\left(-j\frac{\Delta K_R^2}{2b}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 ϕ_{azi} 为双基的方位调制项, 形式为

$$\phi_{azi} = -(R_B + h_x \tan \beta) \sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2} \quad (7)$$

ϕ_1 表示双基距离徙动因子:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= (R_B + h_x \tan \beta_0) \frac{4k_{Rc} \cos^2 \beta_0 - 2k_{Rc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0)}{\sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2}} \\ &\quad + (h_x \beta_0' \sec^2 \beta_0) \sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2} - R_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (8)$$

ϕ_2 为二次距离压缩项:

$$\begin{aligned} \phi_2 &= -\left[(h_x \beta_0'' \sec^2 \beta_0 + 2h_x (\beta_0')^2 \tan \beta_0 \sec^2 \beta_0) \right. \\ &\quad \cdot \left. \sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2} \right] / 2 \\ &\quad - (h_x \beta_0' \sec^2 \beta_0) \frac{4k_{Rc} \cos^2 \beta_0 - 2k_{Rc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0)}{\sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2}} \\ &\quad - (R_B + h_x \tan \beta_0) \left\{ \left[2 \cos^2 \beta_0 - 4k_{Rc} \beta_0' \sin(2\beta_0) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - k_{Rc}^2 \beta_0'' \sin(2\beta_0) - 2k_{Rc}^2 (\beta_0')^2 \cos(2\beta_0) \right] \right. \\ &\quad \left. \sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2} \right\} + (R_B + h_x \tan \beta) \\ &\quad \cdot \frac{(4k_{Rc} \cos^2 \beta_0 - 2k_{Rc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0))^2}{2(\sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2})^3} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{式中 } \beta_0' = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \Delta K_R} \right|_{K_R=K_{Rc}}, \quad \beta_0'' = \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \Delta K_R^2} \right|_{K_R=K_{Rc}}.$$

将 ϕ_1 在 $R_B = R_s$ 处进行泰勒展开, 取一阶近似为

$$\phi_1 \approx A + B\Delta r \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \phi_1 |_{R_B=R_s} = h_x \beta_0' \sec^2 \beta_0 A_X + (R_s + h_x \tan \beta_0) \\ &\quad \cdot \frac{4K_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - 2K_{Rc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0)}{A_X} - R_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} B &= \left. \frac{\partial \phi_1}{\partial R_B} \right|_{R_B=R_s} = \left\{ \left[h_x \frac{\partial \beta_0'}{\partial R_B} \sec^2 \beta_0 + 2h_x \beta_0' \frac{\partial \beta_0}{\partial R_B} \right. \right. \\ &\quad \cdot \left. \sec^2 \beta_0 \tan \beta_0 \right] A_X + h_x \beta_0' \sec^2 \beta_0 \frac{\partial A_X}{\partial R_B} \\ &\quad + \left[1 + h_x \sec^2 \beta_0 \frac{\partial \beta_0}{\partial R_B} \right] \\ &\quad \cdot \frac{4K_{Rc} \cos^2 \beta_0 - 2K_{Rc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0)}{A_X} + (R_B + h_x \tan \beta_0) \\ &\quad \cdot \left\{ \left[-4K_{Rc} \sin(2\beta_0) \frac{\partial \beta_0}{\partial R_B} - 2K_{Rc}^2 \frac{\partial \beta_0'}{\partial R_B} \sin(2\beta_0) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 4K_{Rc}^2 \beta_0' \cos(2\beta_0) \frac{\partial \beta_0}{\partial R_B} \right] / A_X - \left[\frac{\partial A_X}{\partial R_B} [4K_{Rc} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot \cos^2(\beta_0) - 2K_{Rc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0)] / A_X^2 \right] \right\} \Bigg|_{R_B=R_s} \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$A_X = \sqrt{4k_{Rc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_X^2}, \quad \frac{\partial A_X}{\partial R_B} = -\frac{2K_{Rc}^2 \sin(2\beta_0)}{A_X} \frac{\partial \beta_0}{\partial R_B}$$

由式(10)近似造成的包络误差如图2所示(利用下文仿真实验中参数计算), 可见其数值大小远远小于距离分辨率, 因此式(10)近似所造成的影响完全可以忽略。

将式(19)代入式(15)得

$$\begin{aligned} S(\Delta K_R, K_X) &= \left\{ \sigma_n \cdot W_a(K_X) \cdot \text{rect}[\Delta K_R / (bcT_p)] \right. \\ &\quad \cdot \exp(j\phi_{azi}) \cdot \exp(-jK_X X_n) \\ &\quad \cdot \exp(-j(A+B\Delta r)\Delta K_R) \cdot \exp(j\phi_2 \Delta K_R^2) \left. \right\} \\ &\quad \cdot \exp\left(-j\frac{\Delta K_R^2}{2b}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

在等效斜视角不大的条件下给出基于严格解析谱的双基频率变标算法。为校正目标的距离徙动,

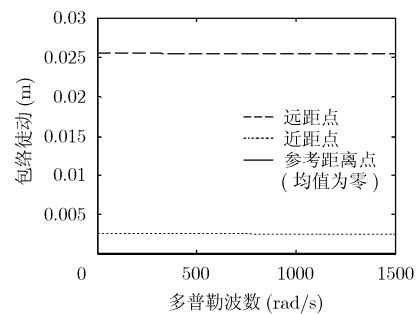


图2 式(10)近似造成的包络误差

类比单基的变标法则^[10]选择频率变标函数 H_{FS} 。为使变标后信号仍在处理的带宽范围内,避免斜视角较大时可能引发的距离频谱模糊,在变标函数中引入 $B_0 = B(K_{Xc})$,其中 $K_{Xc} = K_{Rc}(\sin\theta_{T0} + \sin\theta_{R0})$ 为全孔径中心对应的多普勒波数,等效正侧视或小斜视时可以取 $B_0 = 1$ 。

$$H_{\text{FS}}(\Delta K_R, K_X) = \exp\left[j\frac{\Delta K_R^2}{2b}\left(1 - \frac{B_0}{B}\right)\right] \quad (14)$$

将式(13)与式(14)相乘,得

$$\begin{aligned} S(\Delta K_R, K_X) = & \{\sigma_n \cdot W_a(K_X) \cdot \text{rect}[B_0\Delta K_R / B(bcT_p)] \\ & \cdot \exp(j\phi_{azi}) \cdot \exp(-jK_X X_n) \\ & \cdot \exp[-j(A/B + \Delta r)B_0\Delta K_R] \\ & \cdot \exp[j\phi_2((B_0/B)\Delta K_R)^2]\} \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{B_0}{2bB}\Delta K_R^2\right] \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可见,此时不同距离单元内的目标信号的距离徙动校正为一致。信号经逆傅里叶变换到距离位置域方位频域 (Y_s, K_X) ,构造剩余视频相位校正函数 H_{RVPC} 完成“包络去斜”处理:

$$H_{\text{RVPC}}(Y_s, K_X) = \exp\left[-j\frac{bB}{2B_0}Y_s^2\right] \quad (16)$$

至此消除了残余视频相位误差的影响,为消除频率变标操作引入的2次相位误差,对信号做距离维傅里叶变换后乘以逆频率变标函数 H_{IFS} :

$$H_{\text{IFS}}(\Delta K_R, K_X) = \exp\left[j\frac{(B_0 - B)}{2bB^2}B_0\Delta K_R^2\right] \quad (17)$$

接下来在二维波数域乘以相位函数 $H_{\text{RCMC_bulk}}$ 进行统一的距离徙动校正。

$$H_{\text{RCMC_bulk}}(\Delta K_R, K_X) = \exp\left[j\frac{AB_0}{B}\Delta K_R\right] \quad (18)$$

信号形式变为

$$\begin{aligned} S(\Delta K_R, K_X) = & \sigma_n \cdot W_a(K_X) \cdot \text{rect}[B_0\Delta K_R / B(bcT_p)] \\ & \cdot \exp(j\phi_{azi}) \cdot \exp(-jK_X X_n) \\ & \cdot \exp[-j\Delta r B_0\Delta K_R] \\ & \cdot \exp[j\phi_2((B_0/B)\Delta K_R)^2] \end{aligned} \quad (19)$$

当收发系统的斜视角较小时,可以不考虑二次距离压缩项的空变性,以场景中心处目标对应的 SRC 因子进行补偿:

$$H_{\text{SRC}}(\Delta K_R, K_X) = \exp[-j\phi_{20}(B_0/B)^2\Delta K_R^2] \quad (20)$$

其中 $\phi_{20} = \phi_2|_{R_B=R_s}$,式(19)与 H_{SRC} 相乘后将信号进行距离维的逆傅里叶变换完成距离向的操作。最后

构造方位压缩的参考函数 H_{azi_ref} :

$$H_{azi_ref}(Y_s, K_X) = \exp\left\{j\left[(R_B + h_x \tan\beta) \cdot \sqrt{4K_{Rc}^2 \cos^2\beta_0 - K_X^2}\right]\right\} \quad (21)$$

方位处理后作方位维的逆傅里叶变换完成整个的成像过程。

4 对比实验和仿真结果

表1列出了实验中的仿真参数。由于文中的双基谱是完全精确的,对基线长和作用距离比值的大小不再敏感,适用于大基线作用距离比的情况,实验中选取基线长度为8000 m,即基线长和作用距离比值为1的情况,双基特性明显。由于平行(同轨)等速双基SAR具有方位平移不变性,故实验中选取位于同一方位单元的3个目标点进行成像,选取参考点目标位于(0,0)处,近距离目标位于(0,-400)处,远距离目标位于(0,400)处。用文中所述方法进行成像,图3(a),3(b),3(c)分别为近距离目标,参考距离目标和远距离目标成像结果的等值线图,从左至右为方位向,从上至下为距离向,可见场景中心和场景边缘的目标点均聚焦良好。为进一步验证算法的优越性和正确性,对比熟知的谱精度极高但计算量大的数值计算方法下3点成像的等值线图,图3(d),3(e),3(f)为对应结果,可见两者取得的效果几乎完全相同。点目标的脉冲压缩效果一般采用峰值旁瓣比PSLR,积分旁瓣比ISLR等指标来表征,在两维都没有进行加权处理的情况下,成像效果的分析如表2,PSLR和ISLR均十分接近理论值-13.3 dB和-10 dB。为说明本文算法在运算量上的优越性,对比了波数域的RMA成像算法^[9],收发平台的瞬时斜距分别为8944.3 m和-8944.3 m,斜视角分别为26.56°和-26.56°,其余参数同表1。图4(a)为波数域RMA算法对参考点的成像结果,图4(b)为相应的本文所提算法的成像结果,两种算法在均能保证聚焦精度的前提下,波数域RMA成像算法的运算量主要为两次傅里叶变换,一次2维频域的分类stolt插值操作和两次逆傅里叶变换操作;本文方法的运算量主要为两次傅里叶变换和两次逆傅里叶变换。分类stolt插值过程运算量较大,以Sinc插值为例,一次分类stolt插值需

表1 小斜视角情形下双基 SAR 的仿真参数

PRF	600 Hz	信号带宽	250 MHz
方位带宽	220 Hz	基线长度	8000 m
载频	10 GHz	平台速度	150 m/s
参考作用距离	8000 m	斜视角 θ_{T0}	20°
采样频率	80 MHz	斜视角 θ_{R0}	-32°

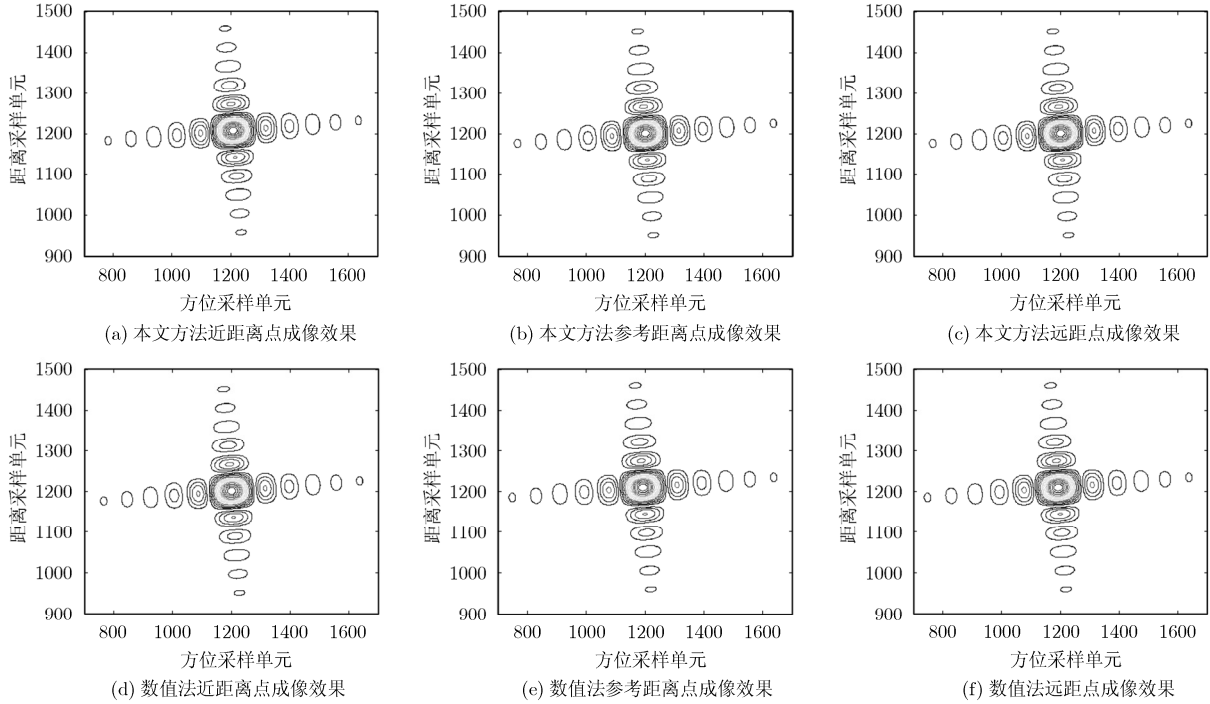


图3 目标成像效果的等值线图

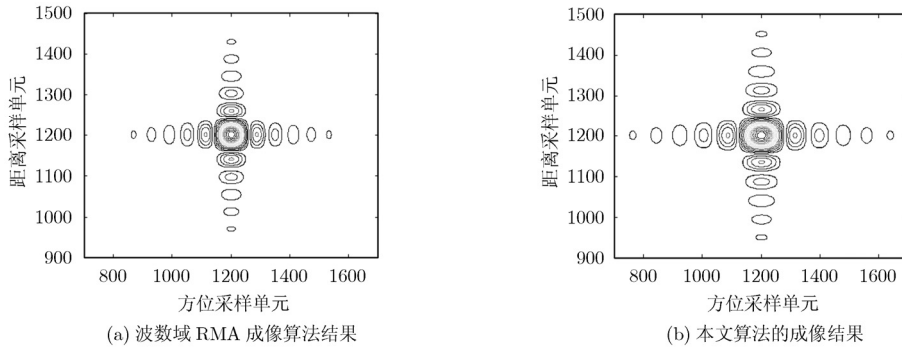


图4 波数域 RMA 成像算法和本文算法成像结果比较

表2 目标脉冲压缩效果分析

	距离向		方位向	
	PSLR(dB)	ISLR(dB)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
近距离	-13.2684	-9.7239	-13.1136	-9.7205
参考距离	-13.2593	-9.7098	-13.2622	-9.8639
远距离	-13.2773	-9.7151	-13.1517	-9.7562

要约16 MN次浮点乘法和303 MN次加法^[11]，而且插值的误差也会导致图像质量的损失。实验表明本文所提算法可以很好处理长基线情形下的同轨双基数据。

5 结束语

双根号问题是获得严格解析双基谱的最大障碍，最主要的原因就是对双根号直接用驻相点原理

会导致8次方程的出现，而目前还无法推导出8次方程的解析解，文献[9]成功地将此方程转化为以半双基角为变量的4次方程，进而获得了同航线情形下严格解析的双基谱，本文基于此严格的解析谱推导出一种适用于长基线构型的同轨双基地 SAR 的 FS 成像算法，不再受制于基线长和作用距离比值，在极大降低运算量的前提下可以取得和数值计算方法几乎完全相同的成像效果，计算机仿真实现算法流程，验证了算法的有效性。本文所提算法适用于等效斜视角较小的情况，在等效斜视角较大，2次距离压缩项的空变问题必须考虑时，可以采取类似于单基 SAR 的非线性调频变标算法。

参考文献

[1] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic

- SAR: potentials and challenges[J]. *IEE Processing, Radar Sonar Navigation*, 2006, 153(3): 184–198.
- [2] Walterscheid I, Espeter T, and Brenner A R, *et al.* Bistatic SAR experiments with PAMIR and TerraSAR-X—setup, processing, and image results. [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3268–3279.
- [3] Rodriguez-Cassola M, Baumgartner S V, and Krieger G, *et al.* Bistatic spaceborne-airborne experiment TerraSAR-X/F-SAR: description, data processing and results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 781–794.
- [4] D’Aria D, Guarnieri M, and Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1362–1376.
- [5] Wang R, Loffeld O, and Neo Y L, *et al.* Extending Loffeld’s bistatic formula for the general bistatic SAR configuration [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 74–84.
- [6] Neo Y, Wong F, and Cumming I G. A comparison of point target spectrum derived for bistatic SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2481–2492.
- [7] Zhang Zhen-hua, Xing Meng-dao, and Ding Jin-shan, *et al.* Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633–3645.
- [8] Li Yan-ping, Zhang Zhen-hua, and Xing Meng-dao, *et al.* Bistatic spotlight SAR processing using the frequency-scaling algorithm[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2008, 5(1): 48–52.
- [9] Wu Qi-song, Liang Yi, and Xing Meng-dao, *et al.* Focusing of Tandem bistatic-configuration data with range migration algorithm[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 88–92.
- [10] Mittermayer J and Moreira A. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198–2214.
- [11] 郭汉伟, 王岩, 梁甸农等. 小波插值在机载超宽带合成孔径雷达成像中的应用[J]. *航空学报*, 2003, 24(6): 551–554.
- 陈士超: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和动目标检测.
- 武其松: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为雷达成像.
- 刘明: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和图像处理.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别.