

一种双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法^{*}

李燕平^{**} 邢孟道 井伟 保铮

西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071

摘要 由于双基 SAR 的斜距历史和几何关系比单基 SAR 复杂得多, 因而其成像难度较大. 文中首先通过级数反演法计算得到了目标的二维频谱, 接着通过双基参数的数值近似得到了距离空变量的解析表达式, 在此基础上, 提出了一种适用于平行等速双基 SAR 的 SR-ECS (series reversion-extended chirp scaling) 成像算法. 理论分析和实验结果表明, 该算法的适用范围广、精度高并且运算量小.

关键词 双基合成孔径雷达 SR-ECS 算法 雷达成像 级数反演 数值计算

与传统的单基 SAR 相比, 收发分置的双基 SAR 具有很好的技术优势, 比如作用距离更远、获取信息更丰富、机动性和隐蔽性更高、抗干扰和抗截获性能更好. 这些优势使得双基 SAR 在军事应用、资源调查、InSAR 三维重建、地壳形变监测等方面有着广阔的应用前景^[1-3].

在各种形式的双基 SAR 中, 收发平台速度大小相同, 方向平行的双基 SAR 是目前研究的重点, 这种配置的双基 SAR 具有方位平移不变性, 适合大面积连续成像. 已有许多文献讨论这种双基 SAR 的成像算法, 其中理论上最优的是时域逐点匹配法^[4], 但该方法的运算量相当大(若图像像素为 $N \times M$, 其计算复杂度达 $O((N \times M)^2)$); 文献[2]中的距离-Doppler 算法和文献[5]中的 Chirp-Scaling 算法均基于 Fresnel 近似, 这两种算法适合正侧视并且分辨率不高的情况^[6]; 文献[7]最早提出了一种双基 SAR 的 RMA 算法, 但该算法只适合收发系统与目标共面的情况; 文献[8]中的 RMA 算法可用于收发系统与目标非共面的情况, 但要求收发系统的运动轨迹相同(只有沿航向基线); 文献[9-11]中的 RMA 算法可用于收发系统与目标非共面的情况, 也不要求收发系统的运动轨迹相同, 适用性更

好. 但以上 RMA 类算法的一个共同的缺点是需要二维频率域插值, 因而运算量较大. 文献[12, 13]中方法的思想均是基于将双基 SAR 补偿为单基 SAR 处理, 但缺点是补偿中用到的近似较大, 因而精度不高.

本文提出一种适合平行等速双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法, 该算法不要求收发系统与目标共面, 不要求收发系统的运动轨迹相同, 也不要求雷达正侧视工作. 理论分析和实验结果表明, 该算法的适用范围广、精度高并且运算量小(成像过程中不需要插值).

1 双基 SAR 的斜距历史分析及信号模型

图 1 所示为双基 SAR 的几何模型, 假设收发平台以速度 V 平行等速飞行(平台之间存在三维基线), 零时刻收发系统相对地面某一目标 P_n 的斜视角分别为 θ_R 和 θ_T , 斜距分别为 R_{SR} 和 R_{ST} , 则目标的斜距历史可表示为

$$R(t) = R_T(t) + R_R(t) \quad (1)$$

其中 t 为方位时间, $R_R(t)$ 和 $R_T(t)$ 为 t 时刻收发系

2007-08-10 收稿, 2007-09-20 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60502044)和教育部重点项目(批准号: 20051009)资助

^{**} E-mail: maplelyp@163.com

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

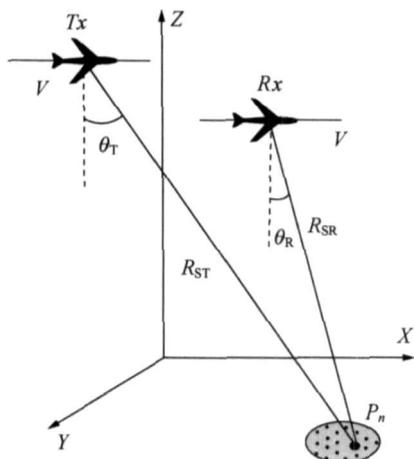


图 1 双基 SAR 的几何模型

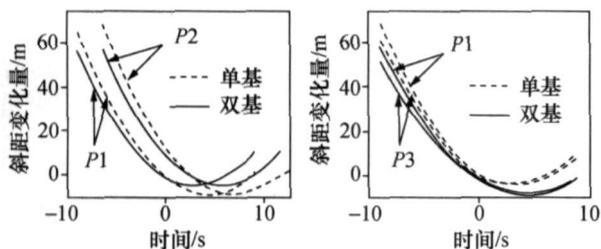


图 2 单基和双基 SAR 斜距历史比较

(a) 为 P1 和 P2 点的斜距历史; (b) 为 P1 和 P3 点的斜距历史

统到目标的斜距, 有

$$R_T(t) = (R_{ST}^2 - 2VR_{ST}\sin\theta_T t + V^2 t^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$R_R(t) = (R_{SR}^2 - 2VR_{SR}\sin\theta_R t + V^2 t^2)^{1/2} \quad (3)$$

为比较单基和双基 SAR 斜距历史的差异, 现假设地面有 3 个点目标, 其中 P1 点位于场景中心, P2 点与 P1 点沿方位向相距 300 m, P3 点与 P1 点沿距离向相距 1500 m (其余参数见第 4 节表 1)。图 2 中的虚线和实线分别表示这 3 个目标的单基和双基 SAR 斜距变化曲线 (以基线中点作为单基 SAR 的等效相位中心), 从中可得如下结论: (i) 双基 SAR 与单基 SAR 的斜距历史存在较大差异。这即是单基 SAR 成像算法不能直接用于双基 SAR 的根本原因。(ii) P1 和 P2 点具有相同的斜距历史 (有一定时延), 表明该系统具有方位平移不变性。(iii) P1 和 P3 点具有不同的斜距历史, 表明该系统具有距离空变性。

假设雷达发射线性调频脉冲, 则接收回波的基

频信号可表示为

$$s(\tau, t) = p\left[\tau - \frac{R(t)}{c}\right] w_a(t) \cdot \exp\left\{j\pi\gamma\left[\tau - \frac{R(t)}{c}\right]^2\right\} \exp\left\{-j2\pi\frac{R(t)}{\lambda}\right\} \quad (4)$$

其中 τ 为距离快时间, $p(\tau)$ 为发射脉冲包络, γ 为调频率, c 为光速, λ 为载波波长, $w_a(t)$ 由收发系统天线的方向性函数决定。对 (4) 式进行二维 Fourier 变换得

$$S(f_r, f_a) = P(f_r) \exp\left\{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right\} \cdot \int w_a(t) \exp\left\{-j2\pi(f_c + f_r) \cdot \frac{R_R(t) + R_T(t)}{c} - j2\pi f_a t\right\} dt \quad (5)$$

其中 f_c 为载波频率, $P(f_r)$ 为 $p(\tau)$ 的 Fourier 变换。(5) 式为目标的二维频谱, 要推导高效的频域成像算法, 需要得到 (5) 式的解析表达式。在单基 SAR 中, $R_R(t)$ 与 $R_T(t)$ 相等, (5) 式可采用驻相原理直接求得积分结果, 但在双基 SAR 中, $R_R(t)$ 和 $R_T(t)$ 不相等, 直接应用驻相原理很难得到解析解。文献 [10] 采用解数值方程的方法来求解 (5) 式对应的驻相点的值, 由于该方法对于不同的 f_r , f_a 和斜距均要计算一次驻相点, 因而运算量非常大; 下面将采用级数反演法来计算目标的二维频谱, 该方法的精度很高, 并且运算量很小。

2 双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法

2.1 基于级数反演的目标二维频谱计算

由于 (1) 式表现为双根号和的形式, 很难直接利用该式求解驻相点, 这里考虑对其在合成孔径中心时刻 $t=0$ 处进行高阶 Taylor 级数展开, 有

$$R(t) = R_{ST} + R_{SR} + \mu_1 t + \mu_2 t^2 + \mu_3 t^3 + \mu_4 t^4 + \dots \quad (6)$$

其中

$$\mu_1 = -V(\sin\theta_T + \sin\theta_R) \quad (7)$$

$$\mu_2 = \frac{V^2}{2} \left[\frac{\cos^2\theta_T}{R_{ST}} + \frac{\cos^2\theta_R}{R_{SR}} \right] \quad (8)$$

$$\mu_3 = \frac{V^3}{2} \left[\frac{\cos^2\theta_T \sin\theta_T}{R_{ST}^2} + \frac{\cos^2\theta_R \sin\theta_R}{R_{SR}^2} \right] \quad (9)$$

$$\mu_4 = \frac{V^4}{8} \left[\frac{\cos^2\theta_T (4\sin^2\theta_T - \cos^2\theta_T)}{R_{ST}^3} + \frac{\cos^2\theta_R (4\sin^2\theta_R - \cos^2\theta_R)}{R_{SR}^3} \right] \quad (10)$$

假设

$$s_B(\tau, t) = p \left[\tau - \frac{R_1(t)}{c} \right] w_a(t) \cdot \exp \left\{ j\pi \gamma \left[\tau - \frac{R_1(t)}{c} \right]^2 \right\} \exp \left\{ -j2\pi \frac{R_1(t)}{\lambda} \right\} \quad (11)$$

其中

$$R_1(t) = R_{ST} + R_{SR} + \mu_2 t^2 + \mu_3 t^3 + \mu_4 t^4 + \dots \quad (12)$$

对(11)式进行二维 FFT, 有

$$S_B(f_r, f_a) = P(f_r) \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] \int w_a(t) \exp \{ j\phi(t) \} dt \quad (13)$$

其中 $\phi(t)$ 为

$$\phi(t) = -2\pi(f_c + f_r)R_1(t)/c - 2\pi f_a t \quad (14)$$

驻相点可通过解驻相点方程 $\phi'(t) = 0$ 得到, 即解

$$f_a = \frac{-(f_c + f_r)}{c} (2\mu_2 t + 3\mu_3 t^2 + 4\mu_4 t^3 + \dots) \quad (15)$$

根据级数反演法^[14, 15] (见附录)可知驻相点 t^* 可表示为

$$t^* = b_1 f_a + b_2 f_a^2 + b_3 f_a^3 + \dots \quad (16)$$

其中

$$b_1 = -\frac{c}{2(f_c + f_r)\mu_2}, \quad b_2 = -\frac{3\mu_3 c^2}{8(f_c + f_r)^2 \mu_2^3},$$

$$b_3 = -\frac{c^3}{16(f_c + f_r)^3 \mu_2^5} (9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4) \quad (17)$$

将(16)式代入(14)式即可得 $S_B(f_r, f_a)$ 的解析表达式

$$S_B(f_r, f_a) = P(f_r) W_a(f_a) \exp \left\{ j\phi(t^*) - j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right\} \quad (18)$$

其中 $W_a(f_a)$ 代表方位谱形状. 由(4)式和(11)式可知

$$s(\tau, t) = s_B \left(\tau - \frac{\mu_1 t}{c}, t \right) \exp \left\{ -j2\pi \frac{\mu_1 t}{\lambda} \right\} \quad (19)$$

根据 Fourier 变换对的性质, 有

$$S(f_r, f_a) = S_B \left[f_r, f_a + (f_c + f_r) \frac{\mu_1}{c} \right] \quad (20)$$

将(18)式代入(20)式, 并保留关于 f_a 的三次及以下相位, 可得双基 SAR 中目标的二维频谱为

$$S(f_r, f_a) = P(f_r) W_a(f_a) \exp \{ j\psi(f_r, f_a) \} \quad (21)$$

其中

$$\psi(f_r, f_a) = -\pi \frac{f_r^2}{\gamma} - 2\pi \frac{f_c + f_r}{c} (R_{ST} + R_{SR}) +$$

$$2\pi \frac{c}{4\mu_2 (f_c + f_r)} \left[f_a + (f_c + f_r) \frac{\mu_1}{c} \right]^2 +$$

$$2\pi \frac{c^2 \mu_3}{8\mu_2^3 (f_c + f_r)^2} \left[f_a + (f_c + f_r) \frac{\mu_1}{c} \right]^3 \quad (22)$$

SAR 系统中一般 $f_c \gg f_r$, 利用 $\frac{1}{(f_c + f_r)} \approx \frac{1}{f_c}$

$\frac{f_r}{f_c^2} + \frac{f_r^2}{f_c^3}$ 和 $\frac{1}{(f_c + f_r)^2} \approx \frac{1}{f_c^2} - \frac{2f_r}{f_c^3} + \frac{3f_r^2}{f_c^4}$ 对(22)式进一

步展开可得

$$\begin{aligned} \psi(f_r, f_a) = & \psi_0(f_a, \Delta R) + \psi_1(f_a, \Delta R)f_r + \\ & \psi_2(f_a, \Delta R)f_r^2 \end{aligned} \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} \psi_0(f_a, \Delta R) = & -2\pi \frac{(R_{ST} + R_{SR})}{\lambda} + \pi \frac{\mu_3 \mu_1^3}{4\mu_2^3 \lambda} + \\ & \pi \frac{\mu_1^2}{2\mu_2 \lambda} + \pi \frac{\mu_1}{\mu_2} f_a + \pi \frac{3\mu_3 \mu_1^2}{4\mu_2^3} f_a + \\ & \pi \frac{c}{2\mu_2 f_c} f_a^2 + \pi \frac{3\lambda \mu_3 \mu_1}{4\mu_2^3} f_a^2 + \pi \frac{\lambda^2 \mu_3}{4\mu_2^3} f_a^3 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \psi_1(f_a, \Delta R) = & -2\pi \frac{1}{c} (R_{ST} + R_{SR}) + \pi \frac{\mu_1^2}{2\mu_2 c} + \\ & \pi \frac{\mu_3 \mu_1^3}{4\mu_2^3 c} - \pi \frac{c}{2\mu_2 f_c} f_a^2 - \\ & \pi \frac{3d\mu_3 \mu_1}{4\mu_2^3 f_c^2} f_a^2 - \pi \frac{c^2 \mu_3}{2\mu_2^3 f_c^3} f_a^3 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \psi_2(f_a, \Delta R) = & -\pi \frac{1}{\gamma} + \pi \frac{c}{2\mu_2 f_c} f_a^2 + \\ & \pi \frac{3d\mu_3 \mu_1}{4\mu_2^3 f_c^3} f_a^2 + \pi \frac{3c^2 \mu_3}{4\mu_2^3 f_c^4} f_a^3 \end{aligned} \quad (26)$$

其中 ΔR 代表目标相对场景中心的距离位置偏移。若零时刻场景中心相对收发系统的斜距分别为 R_{SR0} 和 R_{ST0} , 则有 $\Delta R = (R_{ST} + R_{SR} - R_{ST0} - R_{SR0})/2$ 。(23)式中的第一项 ψ_0 与 f_r 无关, 为双基 SAR 的方位调制项; 第二项 ψ_1 为 f_r 线性项的系数, 表征了目标的距离徙动; 第三项 ψ_2 为 f_r 平方项的系数, 为目标的距离调频率。这三项均与 ΔR 有关, 体现了双基 SAR 的距离空变性。下面将在对双基参数进行数值近似的基础上, 提出一种 SR-ECS 算法来解决双基 SAR 的距离空变问题, 实现场景成像。

2.2 双基参数的数值近似

为了便于设计成像算法, 需要得到 (23) 式中的 ψ_0 , ψ_1 和 ψ_2 相对 ΔR 的解析表达式, 也就是需要得到双基参数 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 相对 ΔR 的解析表达式 (μ_1 与距离无关), 在单基 SAR 中, $R_{ST} = R_{SR}$, $\theta_T = \theta_R$, 该表达式很容易得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu_2} = & \frac{R_{ST0}}{V^2 \cos^2 \theta_T} + \frac{1}{V^2 \cos^2 \theta_T} \Delta R, \\ \frac{\mu_3}{\mu_2^3} = & \frac{R_{ST0} \sin \theta_T}{V^3 \cos^4 \theta_T} + \frac{\sin \theta_T}{V^3 \cos^4 \theta_T} \Delta R \end{aligned} \quad (27)$$

但在双基 SAR 中, 由于几何关系的复杂性, R_{ST} 与 R_{SR} 相对 ΔR 准确的解析表达式很难得到(只能得到二者之和与 ΔR 的关系), 因而 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 相对 ΔR 准确的解析表达式很难得到。本文采用一种简便的数值近似的方法来得到该表达式, 该过程如下: 首先, 在条带宽度内沿距离向放置一定数量的点目标(一般几十个即可), 接着分别计算各点目标在零时刻相对收发系统的斜距 R_{SR} 和 R_{ST} , 然后根据 (8) 式和 (9) 式计算 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 , 最后根据计算得到的 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 相对 ΔR 的数值关系进行二次曲线拟合, 得

$$1/\mu_2 = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta R + \alpha_2 \Delta R^2 \quad (28)$$

$$\mu_3/\mu_2^3 = \beta_0 + \beta_1 \Delta R + \beta_2 \Delta R^2 \quad (29)$$

由于测绘带宽度往往远小于斜距, 因而 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 随 ΔR 的变化关系不会太复杂, 大多数情况下可用 ΔR 的二次多项式作较准确的近似。将 (28) 式和 (29) 式代入 (24) 式—(26) 式即可得 ψ_0 , ψ_1 和 ψ_2 相对 ΔR 的解析表达式。其中 ψ_0 为

$$\psi_0(f_a, \Delta R) = -\frac{4\pi}{c} (A(f_a) + B(f_a)\Delta R + C(f_a)\Delta R^2) \quad (30)$$

其中

$$\begin{aligned} A(f_a) = & \frac{R_{ST0} + R_{SR0}}{2} - \frac{\mu_1^2}{8} \alpha_0 - \frac{\mu_1^3}{16} \beta_0 + \\ & \frac{\lambda^2}{8} \alpha_0 f_a^2 + \frac{3\lambda^2 \mu_1}{16} \beta_0 f_a^2 + \frac{\lambda^3}{8} \beta_0 f_a^3 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} B(f_a) = & \frac{1}{2} - \frac{\mu_1^2}{8} \alpha_1 - \frac{\mu_1^3}{16} \beta_1 + \frac{\lambda^2}{8} \alpha_1 f_a^2 + \\ & \frac{3\lambda^2 \mu_1}{16} \beta_1 f_a^2 + \frac{\lambda^3}{8} \beta_1 f_a^3 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} C(f_a) = & -\frac{\mu_1^2}{8} \alpha_2 - \frac{\mu_1^3}{16} \beta_2 + \frac{\lambda^2}{8} \alpha_2 f_a^2 + \\ & \frac{3\lambda^2 \mu_1}{16} \beta_2 f_a^2 + \frac{\lambda^3}{8} \beta_2 f_a^3 \end{aligned} \quad (33)$$

(30)式中的 $A(f_a)+B(f_a)\Delta R+C(f_a)\Delta R^2$ 代表了双基 SAR 中目标在方位频率域的距离徙动曲线, 大多数情况下 $C(f_a)\Delta R^2$ 非常小, 其影响可以忽略, 因而有

$$\psi(f_a, \Delta R) = -\frac{4\pi}{c}(A(f_a)+B(f_a)\Delta R) \quad (34)$$

对(21)式进行距离 IFFT, 由(23)式和(34)式可得

$$s(\tau, f_a) = p(\tau - 2[A(f_a)+B(f_a)\Delta R]/c) \cdot W_a(f_a) \exp\{j\psi(f_a, \Delta R)\} \exp\left\{-j\frac{\pi^2}{\psi_2(f_a, \Delta R)}\left[\tau - \frac{2[A(f_a)+B(f_a)\Delta R]}{c}\right]^2\right\} \quad (35)$$

2.3 算法描述

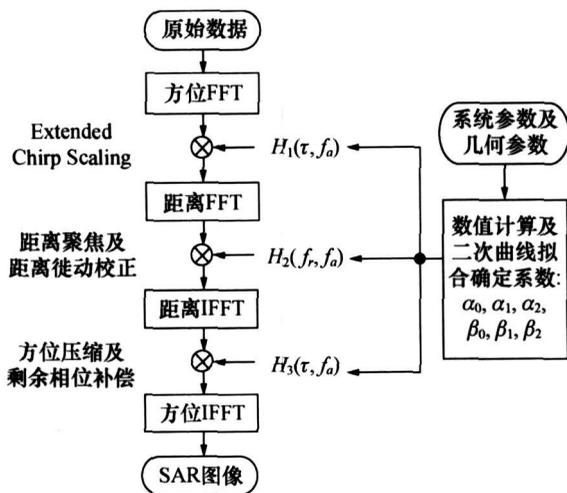


图 3 双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法流程

对原始数据进行方位 FFT 后, 得到的信号可由(35)式表示。为了将所有距离单元目标的徙动轨迹都调整到与场景中心目标的徙动轨迹一致, 在距离-Doppler 域乘以 Extended Chirp Scaling (ECS) 因子进行变标

$$H_1(\tau, f_a) = \exp\left[-j\frac{\pi^2}{\psi_2(f_a, \Delta R)}C_s(f_a)[\tau - \tau_{ref}(f_a)]^2\right] \quad (36)$$

其中弯曲因子 $C_s(f_a)$ 为

$$C_s(f_a) = B(f_a) - 1 \quad (37)$$

场景中心目标的距离徙动时间轨迹为

$$\tau_{ref}(f_a) = 2A(f_a)/c \quad (38)$$

经过 ECS 因子相乘后, 对信号进行距离 FFT 得

$$S(f_r, f_a) = P\left[-\frac{\psi_2(f_a, \Delta R)f_r}{\pi[1+C_s(f_a)]}\right] W_a(f_a) \cdot \exp\{j\psi(f_a, \Delta R)\} \exp\left\{j\frac{\psi_2(f_a, \Delta R)}{B(f_a)}f_r^2\right\} \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi A(f_a)}{c}f_r\right] \exp\left[-j\frac{4\pi\Delta R}{c}f_r\right] \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi^2 B(f_a)[1-B(f_a)]\Delta R^2}{c^2\psi_2(f_a, \Delta R)}\right\} \quad (39)$$

(39)式中的第一个相位项为方位调制项; 第二个相位项为距离调频信号经过距离 Fourier 变换的结果(二次距离压缩项); 第三个相位项包含了目标的距离徙动信息(可以看出, 经过 ECS 变标后, 不同距离的所有目标的距离徙动曲线已调整到与场景中心目标的距离徙动曲线一致); 第四个相位项代表了目标实际的距离位置; 第五个相位项为 ECS 变标引起的剩余相位。

因而, 二维频率域的距离聚焦和距离徙动校正函数 $H_2(f_r, f_a)$ 为

$$H_2(f_r, f_a) = \exp\left[-j\frac{\psi_2(f_a, \Delta R)}{B(f_a)}f_r^2\right] \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi A(f_a)}{c}f_r\right\} \quad (40)$$

实际上, 在斜视角度不是特别大的情况下, (40)式中 $\psi_2(f_a, \Delta R)$ 随 ΔR 的变化较小, 可用 $\psi_2(f_a, 0)$ 来代替, 有

$$\psi_2(f_a, 0) = -\pi\frac{1}{\gamma} + \pi\frac{\alpha_0}{2f_c^3}f_a^2 + \pi\frac{3d^4_1\beta_0}{4f_c^3}f_a^2 + \pi\frac{3c^2\beta_0}{4f_c^4}f_a^3 \quad (41)$$

对完成补偿的信号进行距离 IFFT 后, 即可进

行方位压缩和方位剩余相位校正, 其补偿函数 $H_3(\tau, f_a)$ 为

$$H_3(\tau, f_a) = \exp\left\{-j\psi_0(f_a, \Delta R)\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi^2 B(f_a)[1-B(f_a)]}{c^2 \psi_0(f_a, \Delta R)} \Delta R^2\right\} \quad (42)$$

其中 $\Delta R = c\tau/2$, ψ_0 相对 ΔR 的解析表达式可由 (24), (28) 和 (29) 式计算得到.

该算法的整个流程与经典的单基 SAR 的 ECS 算法^[16] 基本一致 (见图 3), 区别在于该算法中的补偿因子不同, 并且这些补偿因子需要通过双基参数进行数值近似来得到.

3 算法误差分析

表 1 双基 SAR 参数

	发射雷达	接收雷达
零时刻雷达到场景中心的斜距/km	15.65	12.54
载机速度/(m·s ⁻¹)	110	110
飞行高度/m	4000	3500
零时刻收发系统的斜视角/(°)	7.3	-4.5
收发系统之间的基线长度/km	4.27	
波长/m	0.03	发射带宽/MHz 120
回波 Doppler 中心/Hz	176	回波 Doppler 带宽/Hz 250

3.1 目标二维频谱的近似误差

采用级数反演法计算得到的目标二维频谱的精度受两方面影响: 一是在时域对斜距进行 Taylor 展开时的精度; 二是在二维频率域保留的相位阶次的高低. 本文在推导中对斜距进行了四阶 Taylor 展开 (见 (6) 式), 以表 1 的参数为例, 对于场景中心目标, 图 4 给出了采用四阶 Taylor 展开造成的斜距误差, 可见其精度是相当高的. 在二维频率域中, 本文保留了 f_a 的三次及以下相位 (见 (22) 式), 关于 f_a 的四次相位可写为

$$\Delta\phi_h(f_r, f_a) = 2\pi \frac{c^3(9\mu_3^2 - 4\mu_2\mu_4)}{64\mu_2^5(f_c + f_r)^3} \cdot \left[f_a + (f_c + f_r) \frac{\mu_1}{c}\right]^4 \quad (43)$$

在表 1 参数条件下, $\Delta\phi_h$ 引起的相位误差如图 5 所示, 可见该误差小于 $\pi/8$, 可以忽略. 实际中可以根据具体的系统参数来决定是否需要在 (22) 式中保留 $\Delta\phi_h$ (斜视角度特别大时有可能需要保留), 如果需要保留, 则在 2.2 节中需要增加对 $(9\mu_3^2 - 4\mu_2\mu_4)/\mu_2^5$ 的数值近似, 并在 2.3 节中对补偿因子作相应修改.

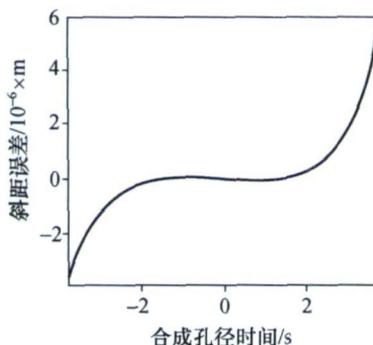


图 4 四阶 Taylor 展开的斜距误差

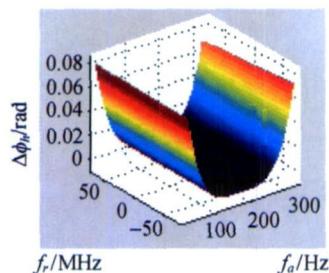


图 5 $\Delta\phi_h$ 引起的相位误差

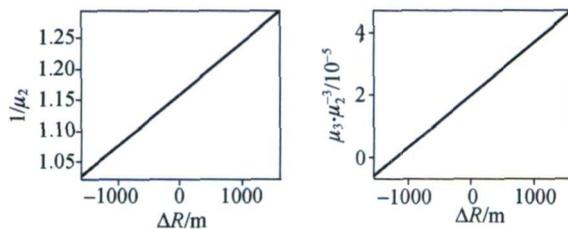


图 6 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 随 ΔR 的变化曲线

(a) 为 $1/\mu_2$ 随 ΔR 的变化曲线; (b) 为 μ_3/μ_2^3 随 ΔR 的变化曲线

3.2 双基参数的数值近似引起的相位误差

图 6 给出了表 1 参数条件下经数值计算得到的 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 随 ΔR 的变化曲线, 可见其变化关系主要为线性关系. 对图 6(a) 和图 6(b) 的结果沿 ΔR 进行二次曲线拟合近似, 可得近似误差的最大值分

别为 $\xi_1 = 4.7 \times 10^{-6}$ 和 $\xi_2 = 1.8 \times 10^{-8}$, 由 (22) 式可得该近似引起的相位误差为

$$\Delta\phi_c(f_r, f_a) = 2\pi \frac{\xi_1}{4(f_c + f_r)} \left(f_a + (f_c + f_r) \frac{\mu_1}{c} \right)^2 + 2\pi \frac{c^2 \xi_2}{8(f_c + f_r)^2} \left(f_a + (f_c + f_r) \frac{\mu_1}{c} \right)^3 \quad (44)$$

图 7 给出了 $\Delta\phi_c$ 的值, 可见该相位误差远小于 $\pi/8$, 可以忽略. 当然, 对于测绘带宽度与斜距很接近的情况(测绘带宽度一般远小于斜距), 双基参数随距离变化的关系会更复杂, 这时则需要对条带进行分块处理或者对双基参数进行更高阶的近似.

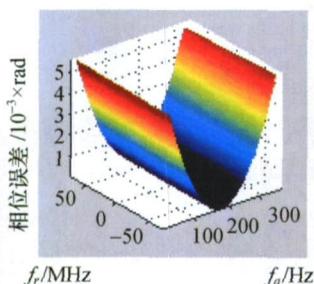


图 7 数值近似引起的相位误差

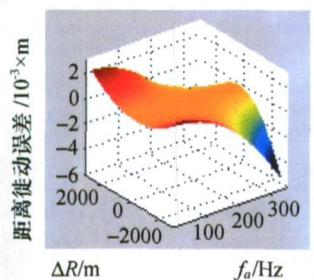


图 8 距离徙动表达式的误差

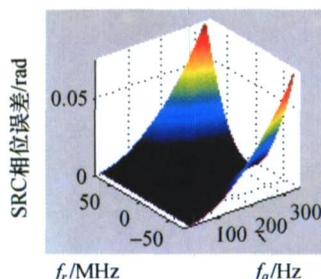


图 9 二次距离压缩相位误差

3.3 双基 SAR 距离徙动表达式的近似误差

在单基 SAR 中, 目标在方位频率域的距离徙动表达式可写为^[17]

$$R(f_a) = R_{s0} / \sqrt{1 - \lambda^2 f_a^2 / 4V^2} + 1 / \sqrt{1 - \lambda^2 f_a^2 / 4V^2} \Delta R \quad (45)$$

其中 R_{s0} 为场景中心距离. 由于 (45) 式中只包含 ΔR 的一次项, 因而单基 SAR 中, 目标的距离徙动可通过 ECS 操作实现非常精确的变标调整和校正; 对于双基 SAR, 由 (30) 式可得目标在方位频率域的距离徙动表达式为 $A(f_a) + B(f_a)\Delta R + C(f_a)\Delta R^2$, 由于该表达式还包含 ΔR 的二次项, 如果该项较大, 要实现准确的变标调整非常困难, 不过一般情况下 ΔR 的二次项可以忽略. 在 3.2 节中, 对 $1/\mu_2$ 及 μ_3/μ_2^3 的数值计算结果进行二次曲线拟合可得 $\alpha_2 = -6.3626 \times 10^{-11}$, $\beta_2 = -1.9599 \times 10^{-13}$. 对于不同的 ΔR 和 f_a , 图 8 给出了忽略 $c(f_a)\Delta R^2$ 带来的误差, 可见该误差远小于距离分辨单元大小, 可以忽略. 对于一些极端情况(测绘带宽度与斜距很接近, 并且非常大) $C(f_a)\Delta R^2$ 较大时, 可通过对条带分块处理来解决.

3.4 二次距离压缩相位误差

本文算法中忽略了二次距离压缩 (SRC) 项的距离空变性, 由此带来的相位误差为

$$\Delta\phi_{\text{SRC}}(f_r, f_a) = \frac{\psi_2(f_a, \Delta R)}{B(f_a)} f_r^2 - \frac{\psi_2(f_a, 0)}{B(f_a)} f_r^2 \quad (46)$$

易知目标偏离场景中心越远, 该相位误差越大. 现假设条带宽度为 6 km, 图 9 给出了表 1 参数条件下处于条带边缘目标的二次距离压缩相位误差, 可见该相位误差远小于 $\pi/8$, 可以忽略. 对于斜视角度特别大的情况, 忽略 SRC 项的距离空变性可能带来较大误差(这一点和单基 SAR 情况类似), 这时可以采用非线性变标的方法^[18]来解决.

4 算法对比分析及仿真实验

4.1 算法对比分析

前面已经指出, 文献[2, 5, 7, 8]中的算法均

对双基 SAR 的工作模式有特殊要求(如要求收发系统正侧视工作、要求收发系统与目标共面或者要求收发系统的运动轨迹相同),而本文算法无此要求,因而适用范围更广。

文献[9—11]中的 RMA 类算法对双基 SAR 的工作模式也没有要求,但缺点是运算量较大,其运算量主要为两次 FFT、一次二维频率域的非均匀插值(类似单基 SAR 中的 Stolt 插值)以及两次 IFFT,本文算法的运算量主要为两次 FFT 以及两次 IFFT(对双基参数进行数值近似时主要的运算量为长度为几十点的二次曲线拟合,该步骤计算量很小)。假设回波数据的距离和方位点数分别为 M 和 N ,以 SINC 插值方法为例,一次二维频率域的非均匀插值需要约 $16MN$ 次浮点乘法 and $303MN$ 次加法^[19],因而该插值过程要占用较多的计算时间,另外,插值误差也会导致图像质量损失。

文献[12]中的等效单基 SAR 方法不需要插值,运算量不大,但要求基线远小于斜距,并且在处理中忽略了许多参数的距离空变性,通常只适合一些基线很短,场景较小的双基 SAR。本文算法不要求基线远小于斜距,处理中也考虑了距离空变的问题。

文献[20]中的驻相点展开法不需要插值,但该方法在处理中需要对所谓的双基变形项进行分块补偿,由于双基变形项的距离空变性比较严重,分块处理将造成整个算法的效率不高。本文算法在对双基参数进行数值近似的基础上,采用 SR-ECS 算法来解决距离空变问题(不需要插值,在通常参数条件下一般不需要分块处理,在极端情况下可能需要分块处理,但分块的数目只需要几块即可),因而

效率较高。

为了便于下一节说明双基变形项的距离空变性,这里给出其表达式^[20]

$$\phi_{bi}(f_r, f_a) = \frac{2\pi}{c} \frac{V^2}{(f_r + f_c)^2} \frac{F^{3/2}}{R_{BT} + R_{BR}} \cdot \left[\frac{R_{BT} \tan \theta_T}{V} - \frac{R_{BR} \tan \theta_R}{V} - \frac{cf_a}{2V^2} \frac{R_{BT} - R_{BR}}{F^{1/2}} \right]^2 \quad (47)$$

其中 $F^{1/2}(f_r, f_a) = \sqrt{(f_r + f_c)^2 - f_a^2 c^2 / 4V^2}$, R_{BR} 和 R_{BT} 分别为目标到收发雷达的最近距离,有 $R_{BR} = R_{SR} \cos \theta_R$, $R_{BT} = R_{ST} \cos \theta_T$ 。

4.2 仿真实验

先在不同基线长度下比较等效单基 SAR 方法和本文方法的成像结果。设置一组基线较短的双基 SAR 参数,其中零时刻收发系统到场景中心的斜距分别为 15.49 km 和 15.56 km,收发系统的飞行高度分别为 3950 m 和 4000 m,收发系统的斜视角分别为 3.6° 和 3.7° ,收发系统的基线长度为 81.24 m(基线与接收系统的斜距之比为 0.005),而载机速度、波长和发射带宽与表 1 参数一致。假设场景中只存在场景中心单个点目标,采用等效单基 SAR 方法的成像结果如图 10(a)所示,可见该方法在基线较短时成像效果较好。接着采用表 1 参数进行仿真(该参数下基线与接收系统的斜距之比为 0.341),采用等效单基 SAR 方法的成像结果如图 10(b)所示,可见该方法在基线较长时精度较差。图 10(c)为本文方法的成像结果,可见本文方法在基线较长时仍然精度很高。

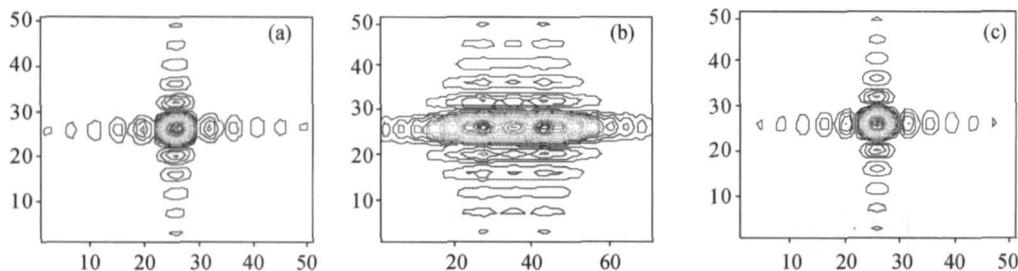


图 10 等效单基 SAR 方法和本文方法的成像结果比较(横向为方位,纵向为距离)

(a) 为等效单基 SAR 方法成像结果(短基线); (b) 为等效单基 SAR 方法成像结果(长基线); (c) 为本文方法成像结果(长基线)

接着分析驻相点展开法中双基变形项的距离空变性. 仍以表 1 参数为例, 假设场景中存在两个点目标, 一个位于场景中心 (P_1 点), 另一个与之在距离向相距 50 m (P_2 点). 如果两个点的双基变形项均采用 P_1 点参数进行补偿, 则补偿后 P_2 点的残余误差如图 11 所示, 可见该误差非常大. 以上的实验结果表明, 双基变形项的距离空变性比较严重, 因而采用驻相点展开法时, 必须将数据划分为很多很小的距离块分别处理(为提高精度, 块与块之间还需要重叠), 这将使得运算效率大大降低.

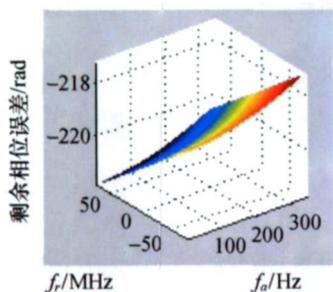


图 11 P_2 点的双基变形项残余误差

现在给出本文方法在两组参数下的场景成像结果. 假设场景中存在三个点目标, 坐标分别为 $P_1(0, -1500, 0)\text{m}$, $P_2(0, 0, 0)\text{m}$, $P_3(0, 1500, 0)\text{m}$. 先以小斜视情况的表 1 参数为例, 采用图 3 流程处理, 结果如图 12 所示. 再设置一组较大斜视角的双基 SAR 参数, 其中零时刻收发系统到场景中心的斜距分别为 17.46 km 和 13.46 km, 收发系统的斜视角分别为 27.3° 和 21.8° , 而载机速度、飞行高度、基线长度、波长和发射带宽与表 1 参数一致, 成像结果如图 13 所示(两次成像过程中均不需要分块处理). 可见本文方法在两组参数下的成像效果均较好. 作为比较, 这里给出驻相点展开法和文献[10]中的 RMA 算法对 P_3 点的成像结果, 如图 14 所示. 表 2 给出了 3 种方法对 P_3 点成像结果的性能分析, 其中 PSLR 为峰值旁瓣比, ISLR 为积分旁瓣比, 成像中距离和方位均未加权. 可见双基 RMA 算法的性能指标和本文方法相当, 二者略优于驻相点展开法, 而本文方法的运算量更小, 更利于工程实现.

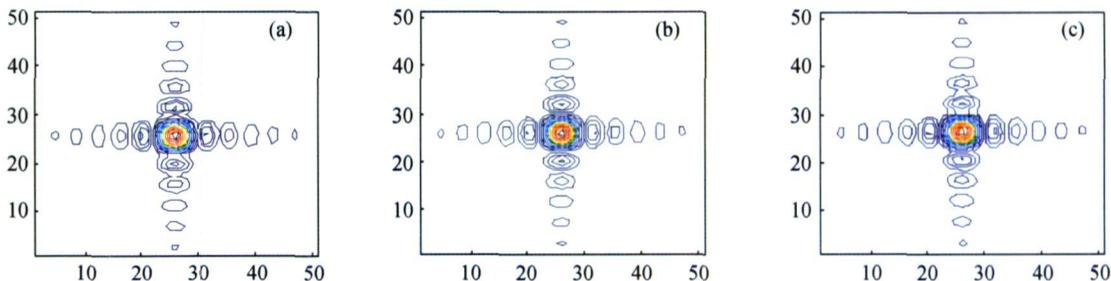


图 12 小斜视时本文方法成像结果(横向为方位, 纵向为距离)

(a) 为 P_1 点的成像结果; (b) 为 P_2 点的成像结果; (c) 为 P_3 点的成像结果

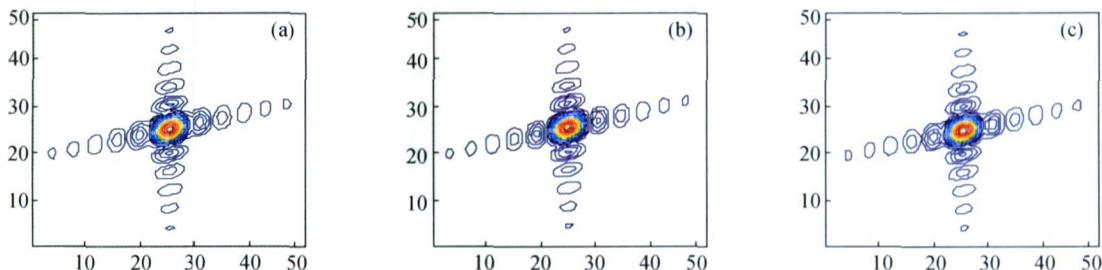


图 13 较大斜视时本文方法成像结果(横向为方位, 纵向为距离)

(a) 为 P_1 点的成像结果; (b) 为 P_2 点的成像结果; (c) 为 P_3 点的成像结果

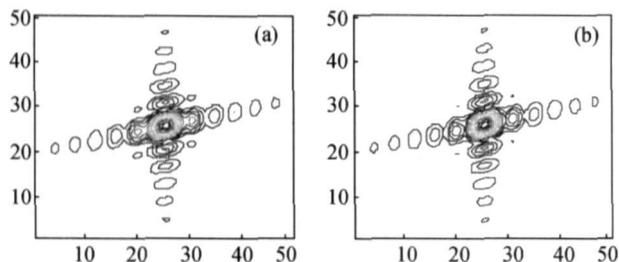


图 14 驻相点展开法和双基 RMA 算法对 P_3 点的成像结果
(横向为方位, 纵向为距离)

(a) 为驻相点展开法对 P_3 点的成像结果;
(b) 为双基 RMA 算法对 P_3 点的成像结果

表 2 P_3 点成像结果的性能分析

	图 13(c) 成像结果的性能分析	图 14(a) 成像结果的性能分析	图 14(b) 成像结果的性能分析
方位 PSLR/dB	-13.34	-12.02	-13.31
方位 ISLR/dB	-10.23	-9.83	-10.19
距离 PSLR/dB	-13.26	-12.95	-13.24
距离 ISLR/dB	-9.95	-9.77	-9.91

5 结论

本文首先通过级数反演法计算得到了目标的二维频谱, 接着通过对双基参数的数值近似得到了距离空变量的解析表达式, 在此基础上, 提出了一种适用于平行等速双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法. 该算法可看做是单基 SAR 中的 ECS 算法在双基 SAR 中的推广.

与现有的双基 SAR 成像算法相比, 本文算法的适用范围广、精度高, 并且运算量小. (1) 该算法不要求收发系统与目标共面, 不要求收发系统的运动轨迹相同, 也不要雷达正侧视工作; (2) 该算法较好地解决了双基 SAR 的距离空变问题, 并且精度很高; (3) 该算法在执行中只需要 FFT, IFFT 和复数相乘, 因而效率较高; (4) 整个算法不需要插值, 运算量较小.

附录 级数反演法

级数反演法是一种求解幂级数反函数的方法, 若

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots \quad (\text{A-1})$$

则其反函数可表示为

$$x = A_1 y + A_2 y^2 + A_3 y^3 + \dots \quad (\text{A-2})$$

将式(A-2)代入(A-1), 并令等式两边的系数相等, 可得

$$A_1 = a_1^{-1}, \quad A_2 = -a_1^{-3} a_2, \quad A_3 = a_1^{-5} (2a_2^2 - a_1 a_3), \quad \dots \quad (\text{A-3})$$

参考文献

- Krieger G, Moreira A. Spaceborne bi and multistatic SAR: Potentials and challenges. IEE Proc, Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 184-198
- 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003, 1-8
- Moccia A, Salzillo G, D'Errico M, et al. Performance of spaceborne bistatic synthetic aperture radar. IEEE Trans Aerosp and Electro Syst, 2005, 41(4): 1383-1395
- Barber B. Theory of digital imaging from orbital synthetic aperture radar. Int J Remote Sens., 1985, 6(6): 1009-1057
- 朱振波, 汤子跃, 蒋兴舟. 机载双站合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 977-981
- 况凌, 沈晓峰, 杨万麟. 机载双基地 SAR 成像算法比较. 电子学报, 2006, 34(12): 2311-2314
- Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging. IEEE Trans Signal Process, 1991, 39(9): 2044-2055
- 张振华, 保铮, 邢孟道, 等. 同航线双基合成孔径雷达成像的频域分析. 自然科学进展, 2007, 17(6): 809-816
- 何峰, 梁甸农, 董臻. 适于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法. 电子学报, 2005, 33(6): 1011-1014
- Walterscheid I, Ender J, Brenner A, et al. Bistatic SAR processing and experiments. IEEE Trans Geosc and Remote Sens, 2006, 44(10): 2710-2717
- Ender J, Walterscheid I, Brenner A. Bistatic SAR-translational invariant processing and experimental results. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 177-183
- 闫鸿慧, 王岩飞, 于海锋, 等. 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基 SAR 成像方法. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 771-774
- Aria DA, Guamieri AM, Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out. IEEE Trans Geosc and Remote Sens, 2004, 42(7): 1362-1376
- Lam Neo Y, Wong FG, Cumming I. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion. IEEE Trans Geosc and Remote Sens, 2007, 4(1): 93-96
- Morse PM, Feshbach H. Methods of Theoretical Physics. New York: McGraw-Hill, 1953, 23-25

- 16 Moreira A, Mittermayer J, Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes. *IEEE Trans Geosc and Remote Sens*, 1996, 34(5): 1123—1135
- 17 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005. 123—181
- 18 Moreira A, Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling algorithm with integrated motion compensation. *IEEE Trans Geosc and Remote Sens*, 1994, 32(1): 1029—1040
- 19 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. *航空学报*, 2003, 24(6): 551—554
- 20 Loffeld O, Nies H, Peters V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR processing. *IEEE Trans Geosc and Remote Sens*, 2004, 42(10): 2031—2038

《自然科学进展》投稿须知

《自然科学进展》是国家自然科学基金委员会和中国科学院共同主办的综合性学术月刊, 刊登自然科学各学科领域的基础研究和应用基础研究方面的高水平、有创造性和重要意义的最新研究成果论文, 以促进国内外学术交流. 中文版由各地邮局公开发行, 英文版由英国 Taylor & Francis Ltd 总代理, 在世界各地发行.

本刊中文版为《中国科技期刊引证报告》的源期刊, 并被《中文核心期刊要目总览》、“生物学文摘”等数据库和检索系统收录; 英文版(*Progress in Natural Science*)被 SCI Expanded, Chemical Abstracts (CA), Engineering Index (EI), 俄罗斯《文摘杂志》, 美国《数学评论》和日本《科技文献速报》等多种国际检索系统收录.

请直接登录本刊网站(<http://pub.nsf.gov.cn>)投稿. 请使用国标(GB3100~3102-93)规定的法定计量单位. 所含曲线图、示意图和照片要尽量精选, 原则上总数不超过6幅; 图题、图注和纵横坐标参数以及图内说明文字均用中文, 参数采用国标规定符号; 彩版需额外支付制作印刷费. 表格均采用三线表, 易引起含混时, 可加辅线, 对表中所列诸项需特殊说明时, 可在表下用 a), b) 等注示. 插图和表格排在正文提及后的适当处. 资助项目需在首页脚注中说明.

投稿时请提供如下材料和信息: (i) 申明稿件无泄密之处, 未曾正式发表过, 也未同时投往他刊; 所有作者都了解文章的内容, 并同意署名; 简要介绍研究工作的背景及成果的意义; 明确所投栏目及学科分类. (ii) 作者的所有联系方式. 通讯地址, 邮政编码, 电话, 传真及 E-mail 地址. (iii) 推荐 5—7 名非本单位的具有正高级职称同行评审专家及其单位、通讯地址, 也可提出要求回避的专家, 供稿件送审时参考.

稿件经同行专家评议后由编辑部做出取舍决定. 不拟刊登的来稿, 编辑部将及时通知作者; 对于录用的稿件需酌收版面费, 论文刊出的当月同时上网, 并赠送 1 本样刊.

论文撰写格式请严格遵循本刊的相关要求. 所列文献按正文中引用的先后排序. 文献的作者不多于 3 位时, 需全部列出, 文献的作者多于 3 位时, 只列前 3 位作者, 其余用“等”或“et al.”代替.

联系地址: 100085 北京海淀区双清路 83 号 基金委《自然科学进展》编辑部

联系电话: (010)62326952, 62327202; 传真: (010)62326921;

本刊网址: <http://pub.nsf.gov.cn>; E-mail: progress@mail.nsf.gov.cn