

基于 ωk 算法的宽测绘带星载 SAR 成像处理

胡玉新¹, 丁赤飏², 吴一戎²

(1 中科院研究生院, 北京 100080; 2 中科院电子所, 北京 100080)

摘 要: 本文提出了一种适用于宽测绘带星载 SAR 成像处理的改进 ωk 算法. 在用经典 ωk 算法来处理星载 SAR 数据时, 离参考距离越远图像形变和方位聚焦质量下降就越严重, 这严重地限制了测绘带宽度. 本文在 ωk 算法的基础上提出了用等效视角补偿和等效速度补偿来校正图像形变和提高方位聚焦质量的改进算法. 实验表明这种算法能够高效地对宽测绘带星载 SAR 数据进行精确成像处理.

关键词: 宽测绘带星载 SAR 成像处理; 改进 ωk 算法; 等效视角和等效速度补偿

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 06-1044-04

The Wide Swath Spaceborne SAR Imaging Based on ωk Algorithm

HU Yu-xin¹, DING Chi-biao², WU Yi-rong²

(1. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract: The paper presents an improved ωk algorithm for wide swath spaceborne SAR imagery. When classic ωk algorithm is used to process space borne SAR data, the farther distance from reference range, the larger image deformation and worse azimuth focusing quality will limit the width of swath greatly. Based on the ωk algorithm the equivalent view angle and equivalent velocity compensation are presented to rectify image deformation and improve the azimuth focusing quality. The experiment demonstrates that the algorithm can process wide swath space borne SAR data precisely and efficiently.

Key words: wide swath spaceborne SAR data processing; improved ωk algorithm; equivalent view angle and equivalent velocity compensation

1 引言

高分辨率合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar) 成像算法主要有三类, 即 RD (Range Doppler) 算法、 ωk 算法和近年来新发展的 CS (Chirp Scaling) 算法. 距离徙动现象使得 SAR 成像处理本质上成为一个二维问题. 不同成像算法的差别主要在于如何处理距离徙动. 经典的 RD 算法及其改进算法^[1]的思路是利用此二维问题在一定条件下的可解耦性将其分解成两个一维脉冲压缩的过程. RD 算法的优点是物理意义明确且运算效率高, 但这种解耦性是近似的, 所以 RD 算法不适合于大斜视角的成像处理. 另一个缺点是这种算法在实现时需要时域插值运算. CS (Chirp Scaling) 算法^[2,3]及其改进算法^[4]的基本思路是在信号变换到二维频域之前校正所有的距离单元的距离徙动曲线, 使之与参考距离处的距离徙动曲线相同, 这样就可以在二维频域通过简单的相位相乘来完成距离徙动校正从而避免了插值, 但 CS 算法仍有残余相位误差. ωk 算法^[5]是一种二维频域算法. 它首先在二维频域对参考距离处的相位进行补偿, 然后通过 stolt 变换对非参考距离处的残余相位进行完全补偿. 由于 ωk 算法只作了很少的假设因而是一种精确的算法.

与机载 SAR 相比, 星载 SAR 系统的几何关系有很大的不同, 主要表现为地球弯曲、地球自转、轨道弯曲和轨道进动等.

ωk 算法是在机载正侧视的几何关系下推导出来的, 因而若用 ωk 算法来进行精确星载 SAR 成像处理就必须考虑这些因素的影响. 星载几何关系对星载 SAR 信号的影响主要是多普勒参数 (多普勒中心频率和调频率) 沿距离向变化很大, 并且其变化规律与机载情况下是不同的. 这使得在用经典 ωk 算法来处理星载 SAR 数据时会产生图像形变和方位聚焦质量下降, 并且离参考距离越远方位聚焦质量下降越严重, 这严重地限制了测绘宽度.

首先, 本文提出了用等效斜视处理的方法将沿距离变化的多普勒参数转化为沿距离变化的等效斜视角和等效速度. 其次, 本文的分析表明等效斜视角的变化使得图像产生形变, 而等效速度的变化使得图像的方位聚焦质量下降. 最后, 本文提出了用等效视角补偿来校正图像的形变, 用等效速度补偿来提高方位聚焦质量的改进 ωk 算法. 实验表明这种算法能够高效地对宽测绘带星载 SAR 数据进行精确成像处理.

2 ωk 算法原理

ωk 算法是首先由 C

Cafforio 在文献 [5] 提出的. 文献 [6] 的作者从数据相关的角度推导了 ωk 算法, 这种推导比较符合

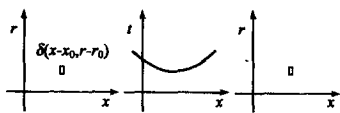


图1 目标空间, 信号空间和图像空间

信号处理的惯例, 又有明确的物理意义, 因此本文对 ω_k 算法的描述将与文献[6]保持一致。 ω_k 算法的坐标系统如图 1 示。

目标空间表示点目标集合。其中, x 表示沿航向的目标位置坐标, r 表示垂直航向方向的目标位置坐标。信号空间表示经雷达接收后在存储器中的信号的集合, x 表示平行航向的信号位置坐标, t 表示快时间域的时间坐标。图像空间表示聚焦后的像素的集合, x 表示方位向位置坐标, r 表示距离向位置坐标。虽然信号空间与图像空间的纵坐标只是相差一个系数但它们的物理意义不同的。 ω_k 算法是针对距离压缩后的数据来实施的。因此, 本文中所提到的时域信号都是指经过距离压缩后的信号。我们用 $u(x, r)$ 表示图像空间中处于 (x, r) 处的点目标的反射系数, 亦即复图像值, 用 $d(x, t)$ 表示信号空间中处于 (x, t) 处的信号的值。现在用机载正侧视的情况来说明 ω_k 算法的实质。

$x = 0$ 时, 飞行器与目标的距离为 r , 则 $\Delta R(x, r) = \sqrt{x^2 + r^2} - r$ 表示处于 $(0, r)$ 处的点目标的距离徙动量, 则距离压缩后的此点目标的冲击响应为^[9]

$$h(x, t; r) = \delta\left[t - \frac{2}{c} \Delta R(x; r)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{2\omega_0}{c} \Delta R(x; r)\right] \quad (1)$$

应用驻定相位原理对式(1)做二维傅立叶变换为

$$H(k_r, \omega; r) = A_1 \cdot \exp\left\{-j \cdot r \cdot \left[\sqrt{\frac{\omega + \omega_0}{c/2}}^2 - k_x^2 - \frac{\omega + \omega_0}{c/2}\right]\right\} \\ \approx A_1 \cdot \exp\left\{j \cdot r \cdot \frac{c}{4} \cdot \frac{k_x^2}{\omega + \omega_0}\right\} \quad (2)$$

式中 ω 为距离频域坐标, k_x 为方位波数域坐标, c 为光速, A_1 近似为常数。

ω_k 算法推导的出发点是认为成像过程是原始数据与一个空变的核函数的二维相关的过程, 即

$$u(x, r) = \int d(x, t) \odot h(x, t - 2r/c; r) dt \quad (3)$$

对上式应用相关定理, 得

$$u(x, r) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint D(k_x, \omega) \cdot H^*(k_x, \omega; r) \\ \times \exp(j \cdot 2r/c \cdot \omega) d\omega \exp(j \cdot k_x \cdot x) dk_x \quad (4)$$

上式中 $D(k_x, \omega)$ 为 $d(x, t)$ 的二维傅立叶变换。式(4)的物理意义是成像的过程在频域可以看作是先将对每一点的信号的二维频谱进行完全补偿然后再做二维逆傅立叶变换的过程。

在 ω_k 算法中式(4)的操作是靠参考函数相乘和 stolt 变换实现的。参考函数相乘的因子恰好是式(2)的共轭, 这意味着对于 r_0 处的信号的相位进行了完全的补偿, 但对于处于 $r \neq r_0$ 的相位并没有完全补偿而是有相位误差

$$\exp\left\{-j \cdot (r - r_0) \cdot \left[\sqrt{\frac{\omega + \omega_0}{c/2}}^2 - k_x^2 - \frac{\omega_0}{c/2}\right]\right\} \quad (5)$$

stolt 变量替换完成的操作是通过关系式 $\omega =$

$$\frac{c}{2} \sqrt{k_r^2 + \frac{2\omega_0}{c}}^2 + k_x^2 - \omega_0$$

将 ω 变换为距离波束域坐标 k_r 。stolt 变换实现了从距离频域到距离波束域的变换, 从物理意义看, stolt 变换实现了一次性的对所有距离处的相位误差进

行了完全补偿, 因此 stolt 变量替换后的数据做二维逆变换就可以得到图像。

机载斜视 SAR

的几何关系如图 2

示。图 2 中, θ 为航向与雷达波束中心线的夹角, r' 为飞机与处于波束中心点的目标的距离, r 为飞机与地面的垂直斜距, 若令飞机的方位坐标为 0, 则波束中心点的方位坐标

dx 。斜侧视的雷达波束角为 α , 飞机的速度为 v 。目标的多普勒参数为

$$f_d = 2v \cdot \cos(\theta) / \lambda \quad (6)$$

$$f_r = -2v^2 \sin^2(\theta) / (\lambda \cdot r') \quad (7)$$

由等效斜视原理, 给定 f_r, f_d , 我们可以从中得出 θ, v, dx 的表

$$v = \sqrt{\left(\frac{\lambda \cdot f_d}{2}\right)^2 - \frac{\lambda \cdot r' \cdot f_r}{2}} \quad (8)$$

$$\theta = \arccos\left\{-\frac{\lambda \cdot f_d}{2v}\right\} \quad (9)$$

$$dx = r' \cdot \cos(\theta) \quad (10)$$

机载斜侧视的

情况下, 雷达的波束中心偏离垂直航迹的方向, 但我们可以将斜侧视的雷达波束看作假想的正侧视雷达波束一部分, 如图 2 所示。斜侧视

的雷达波束角为 α , 而假想的正侧视雷达的波束角为 β , α 是 β 的一部分。相应地, 我们将斜侧视的雷达的回波的距离徙动曲线看作是正侧视雷达回波距离徙动曲线的一部分, 如图 3 示。图 3 中的整个距离徙动曲线为图 2 中处于假想正侧视波束中心的点目标的距离徙动曲线, 而左侧的实线部分为此点目标在实际情况下的距离徙动曲线。

我们可以等效的认为斜侧视条件下的信号就是正侧视条件下的信号, 只不过一部分信号幅度为零(图 3 中的虚线部分)。因此, 我们可以直接用 ω_k 算法来处理机载斜侧视的数据, 不同之处在于图像在方位向和距离向相对于信号中心有平移。图 3 说明了只存在一个点目标时图像的位置变化。实线为点目标信号的距离徙动曲线。信号空间中此点目标信号的中心处于图中 $p1$ 的位置。用 ω_k 算法处理后点目标的图像将出现在虚线的顶点位置 $p1'$ 。

为方便计, 我们用图像空间坐标来讨论图像相对信号中心的平移。假想的正侧视信号的顶点的坐标为 $(0, r)$, 而实际信号的方位中心 $p1(-dx, r')$, 因此点目标的图像相对于信号中心的方位移动量为 dx , 由图 3 的几何关系可以得到

$$dx = r' \cdot \tan(\theta) \quad (11)$$

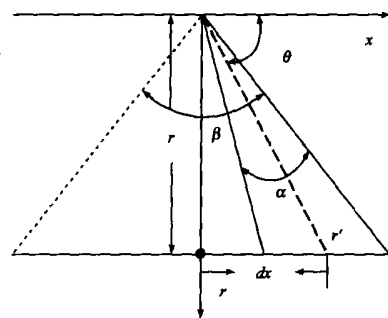


图 2 机载斜侧视的几何关系

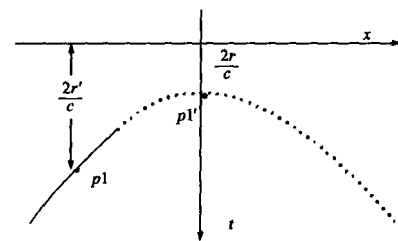


图 3 机载斜侧视的点目标信号

在距离向点目标的图像相对于信号中心的移动量为

$$dr = r - r' = r \cdot (1 - 1/\sin(\theta)) \quad (12)$$

图像的距离向的位置移动是沿距离向变化的, 因此距离向的位置移动不能在波数域完全补偿, 这一工作可以由图像后处理的几何校正来完成. 同一距离门的点沿方位向的位置移动是一样的, 因此可以在距离逆傅立叶变换后乘以一个等效视角补偿因子来完成位置校正. 由式(11), 此等效视角补偿因子为

$$\exp\{j \cdot k_x \cdot r \cdot \tan(\theta)\} \quad (13)$$

3 改进算法原理

由于地球自转与地球弯曲, 轨道弯曲的影响, 星载 SAR 回波数据的多普勒参数(多普勒中心频率, 多普勒调频率)沿着距离向有很大的变化^[7], 短时间内沿方位向可以认为近似不变.

为了避免处理复杂的几何关系, 我们可以将星载 SAR 的回波数据等效成机载斜侧视 SAR 的回波数据. 由于星载 SAR 信号的多普勒参数是随着距离向变化的, 我们将星载信号等效成机载斜侧视的回波信号后, 目标空间中点的回波对应的等效视角 θ , 等效速度 v 和等效方位坐标 dx 将随着距离门的变化而变化. 在具体操作时, 我们可以用各种方法来估计不同距离门的多普勒参数^[8] 然后根据式(8)、(9) 计算出 $\theta(r)$, $v(r)$. $\theta(r)$ 表示距离 r 处的等效视角, $v(r)$ 表示距离 r 处的等效速度.

先假定不同距离门的等效速度是相同的. 这样做的理由是在星载的情况下通常等效速度都很大, 在不涉及相位信息时它们的差别是可以忽略的.

由于在等效模型

中与每一距离门对应的等效视角 θ 和等效方位坐标 dx 不同, 在用 ωk 算法处理后处于不同距离的点的图像位置移动也将不同, 如图4 示. 在数据空间

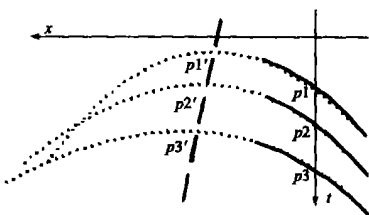


图4 成像前后点的位置变化

处于同一方位中心的点 p_1, p_2, p_3 在用 ωk 算法处理之后将出现在 p_1', p_2', p_3' 的位置. 本来处于同一方位向的点在处理之后将出现在不同的方位上, 这正是地球自转的结果.

为了校正方位形变, 我们需要对距离向逆傅立叶变换后的数据乘以一个等效视角补偿因子. 考虑到 θ 沿距离向的变化和图像沿距离向的位移, 此等效视角补偿因子为

$$\exp\{j \cdot k_x \cdot r \cdot \tan[\theta(r')]\} \quad (14)$$

$\theta(r')$ 表示距离 r' 处的等效视角, r 与 r' 的关系为 $r = r' \sin[\theta(r')]$, 其物理意义是信号空间中本来距离向坐标为 r' 的点经 ωk 算法处理后在图像空间的距离坐标将变为 r .

现在考虑等效速度随着距离的变化.

在 ωk 算法中, 方位波数与多普勒频率 f_D 的关系是 $k_x = 2\pi f_D / v$, v 为等效速度, 这意味着 k_x 是随着距离门变化的. 但在算法实现时, k_x 是方位坐标, 是不能随着距离门变化的, 通常选择某一距离门的速度来作为参考速度, 则

$$k_x = \frac{2\pi \cdot f_D}{V_{\text{ref}}} \quad (15)$$

式中, f_D 为多普勒频率, v_{ref} 为参考速度. 通常选择中间距离门的等效速度为参考速度, 这样, 对其在他距离门的信号进行处理时将产生失配, 这会导致方位旁瓣变大, 方位分辨率下降, 严重时导致方位散焦, 因此在宽测绘带和分辨率较高的情况下必须采取措施补偿 v 的变化.

我们假设在目标空间中只在 $(0, r)$ 处有一个点目标, 此点目标的等效速度为 v , 则信号的实际方位波数为 $k_x = \frac{2\pi f_D}{v}$

$$\text{由式(15), } k_x = \frac{V_{\text{ref}}}{v} k_x \quad (16)$$

由式(2)点的回波信号的二维频谱为

$$D(k_x, \omega) = C \cdot A_1 \cdot \exp\left\{j \cdot r \cdot \frac{c}{4} \left[\left(\frac{V_{\text{ref}}}{v}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{k_x^2}{\omega + \omega_0}\right\} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot 2r/c) \quad (17)$$

式中 C 为常数, 将式(17) 带入式(4) 中, 并利用 $\frac{1}{\omega + \omega_0} \approx \frac{1}{\omega_0} - \frac{\omega}{\omega_0^2}$, 得

$$u(x, r) \approx \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 C \cdot |A_1|^2 \times \iint \exp\left\{j \cdot r \cdot \frac{c}{4} \left[\left(\frac{V_{\text{ref}}}{v}\right)^2 - 1\right] \cdot k_x^2 \cdot \left(\frac{1}{\omega_0} - \frac{\omega}{\omega_0^2}\right)\right\} \cdot \exp(j \cdot k_x \cdot x) dk_x d\omega \quad (18)$$

上式中, 由于 $r \cdot c/4 \cdot \omega_0^2$ 很小可以看作 0, 则上式对 ω 的积分为一常数, 令此常数为 B , 上式变为

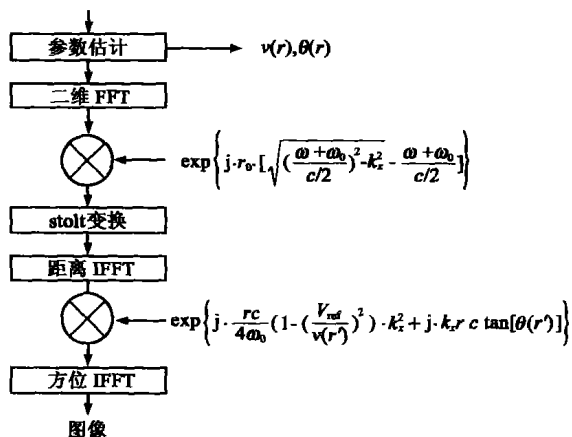


图5 改进 $\omega-k$ 算法流程

$$u(x, r) \approx \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 C \cdot |A_1|^2 \cdot B \times \int \exp\left\{j \cdot \frac{rc}{4 \omega_0} \cdot \left[\left(\frac{V_{\text{ref}}}{v}\right)^2 - 1\right] \cdot k_x^2\right\} \cdot \exp(j \cdot k_x \cdot x) dk_x \quad (19)$$

令 $f(k_x) = \exp\left\{j \cdot \frac{rc}{4 \omega_0} \cdot \left[\left(\frac{V_{\text{ref}}}{v}\right)^2 - 1\right] \cdot k_x^2\right\}$ 则当 V_{ref} 与 v 相等时, $f(k_x)$ 为常数则此点目标的图像是完全聚焦的, 否则此点目标的图像将产生方位散焦. 解决的方法是在 ωk 算法中做完距离逆傅立叶变换后乘以等效速度补偿因子

$$\exp\left\{j \cdot \frac{rc}{4 \omega_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_{\text{ref}}}{v}\right)^2\right] \cdot k_x^2\right\} \quad (20)$$

当处理的是一幅图像而非点目标时, 由叠加原理知以上操作依然正确, 只是每一距离门都要乘以相应的补偿因子. 由于

图像会产生形变, 距离 r 处的等效速度补偿因子为

$$\exp\left\{j\frac{rc}{4\omega_0}\left[1-\frac{V_{\text{ref}}^2}{v^2(r')}\right]\cdot k_x^2\right\}\quad(21)$$

$v(r')$ 表示距离 r' 处的等效速度, r' 与 r 的关系仍为 $r=r'\cdot\sin[\theta(r')]$. 这样, 考虑到等效速度补偿和等效视角补偿, 可以得到改进 ω_k 算法的流程如图 5 所示.

4 实验结果

为了验证本文的推导结果, 用星载参数仿真了一幅包含 3 个点的回波数据, 他们分别处于不同的距离门. 对此数据首先用经典 ω_k 算法进行成像, 而后再用改进算法进行处理. 表 1 为仿真参数, 表 2、3 为两种处理结果的方位向指标的比较, ΔR 表示离参考点的距离. 图 6 为两种处理结果的方位向波形, 图 7 为两种处理结果的二维等高图. 可以看出, 没有等效速度补偿时, 非参考距离处的点的方位冲击响应会出现旁瓣变高, 积分旁瓣比下降, 并且离参考距离越远越严重. 进行等效速度补偿后, 方位聚焦质量达到了近乎理想的水平, 从而证明了本算法的有效性.

表 1 仿真参数

信号带宽	采样率	信号时宽	波长	视角	方位带宽	脉冲重复频率	卫星高度
120MHz	144MHz	17 μ s	0.03m	33.47deg	5912.6Hz	7095.22Hz	515km

表 2 等效速度补偿前点目标的方位向指标

	点 1	点 2	点 3
$\Delta R(\text{m})$	3200	8500	13400
$\text{ISLR}_a(\text{dB})$	- 10.6624	- 9.7869	- 9.2177
$\text{PSLR}_a(\text{dB})$	- 12.8070	- 11.9551	- 11.3290
$\rho_a(\text{m})$	1.1068	1.1068	1.1718

表 3 等效速度补偿后点目标的方位向指标

	点 1	点 2	点 3
$\Delta R(\text{m})$	3200	8500	13400
$\text{ISLR}_a(\text{dB})$	- 10.6626	- 10.6722	- 10.684
$\text{PSLR}_a(\text{dB})$	- 13.2070	- 13.1689	- 13.1992
$\rho_a(\text{m})$	1.1067	1.1068	1.1067

5 结论

星载 SAR 数据的特点是多普勒参数(多普勒中心频率和调频率)沿着距离向有很大的变化, 且二者是耦合在一起的. 本文利用等效斜视原理将多普勒参数的变化转化为等效视角和等效速度的变化, 且二者近似解耦的, 即等效视角的变化会导致图像形变而等效速度的变化将会导致方聚焦质量下降. 利用这种解耦性本文提出了用等效视角补偿来校正图像形变, 利用等效速度补偿来提高方位聚焦质量的改进算法. 从实验结果可以看出, 通过进行等效速度补偿, 改善了图像的方位聚焦质量, 使得不同距离处的图像能够取得以一致的指标, 尤其适合宽测绘带星载 SAR 的精确成像处理.

参考文献:

[1] M Y Jin, C Wu. A SAR correlation algorithm which accommodates large migration[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1984, GE22: 592- 597.

[2] Raney R K, Runge H, Bamler cR, Cumming I G, Wong F H. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 786- 799.

[3] 李春升, 黄岩, 王璇, 周荫清. 基于 Chirp Scaling 算法的星载 SAR 成像处理实现方法[J]. 电子学报, 1996, 24(6): 20- 24.

[4] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35- 38.

[5] C Cafforio, C Prati, F Rocca. SAR Data focusing using seismic migration techniques[J]. IEEE Trans On AES, 1991, AES- 27(2): 194- 207.

[6] Richard Bamler. A comparison of range doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. IEEE Trans on GRS, 1992, 30(4): 706- 713.

[7] C Y Chang, M Jin, C Curlander. Squint mode SAR processing algorithm [A]. Proc IGASS' 89[C]. Vancouver: Springer Press, 1989. 1702- 1706.

[8] 黄永红, 毛士艺. 星载合成孔径雷达多普勒参数估计[J]. 电子学报, 1994, 22(6): 10- 16.

作者简介:



胡玉新 男, 1981 年 2 月生于内蒙古赤峰市, 2002 年获内蒙古大学通信工程学士学位, 现为中科院电子所博士生, 主要从事星载 SAR 信号处理的研究工作. Email: yxhu@mails.gscas.ac.cn

丁赤飏 男, 1966 年出生于陕西西安, 1997 年获北京航空航天大学博士学位, 博导, 研究员, 主要从事信号与信息处理和系统仿真等方面的研究工作.

吴一戎 男, 1963 年 7 月出生于北京市, 1998 年获中科院电子所信息与信号处理博士学位, 博导, 研究员, 中科院电子所副所长, 主要从事卫星地面处理, SAR 信号处理, SAR 图像解译与目标识别等方面的研究工作.