

基于稀疏表示和时频变换的 ISAR 成像算法

王保平 孙 超 郭俊杰

(西北工业大学无人机特种技术重点实验室 西安 710065)

摘 要 逆合成孔径雷达对空中机动飞行目标进行成像,在成像积累时间内,成像投影平面和横向尺度随时间变化,许多参数很难准确提取,人们无法获得更多的先验知识。一般采用鲁棒性强的距离-多普勒(RD)算法进行成像,但传统的 RD 成像算法基于目标匀速转动和方位均匀采样的假设,若用其对机动目标进行成像,则图像模糊,尤其对于随机缺损的雷达回波数据,其成像质量显著下降,甚至无法辨识。通过引入稀疏表示和时频变换,提出了一种基于稀疏表示和时频变换的距离-瞬时多普勒成像算法,其可对一般机动飞行目标进行有效成像。实验结果验证了所提算法的有效性和可行性。

关键词 逆合成孔径雷达,稀疏表示,时频变换,时频基

中图分类号 TN957 文献标识码 A

ISAR Imaging Algorithm Based on Sparse Representation and Time-frequency Transform

WANG Bao-ping SUN Chao GUO Jun-jie

(Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract Inverse synthetic aperture radar images maneuvering targets, and during the coherent processing interval time, imaging projection plane and the scale of cross-range change with time, so many parameters are difficult to accurately extract and more prior knowledge can't be acquired. In general, the robust range-doppler (RD) imaging algorithm is used. But the conventional RD imaging algorithm is based on the hypothesis of the target rotating uniformly and sampling uniformity in azimuth. For maneuvering target imaging, RD algorithm will make the image fuzzy. Especially for radar gapped data, the performance of imaging descends greatly and even can't be identified. This paper introduced a range-instantaneous Doppler imaging algorithm based on sparse representation and time-frequency transform which can effectively image the maneuvering target. The experimental results validate the effectiveness and feasibility of this approach.

Keywords Inverse synthetic aperture radar, Sparse representation, Time-frequency transform, Time-frequency basis

1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)是一种全天时、全天候、远距离的微波探测工具,在空中目标识别、空间探测等领域发挥着越来越重要的作用。但是 ISAR 观测对象为非合作模式,且目标(飞机、舰船、导弹、卫星等)运动往往比较复杂,这给参数的提取和那些需要知道先验知识的谱估计算法的实际应用带来了困难,因此一般采用鲁棒性强的 RD 成像算法。该算法隐含两个假设:(1)目标尺寸和转角较小;(2)目标在成像平面内均匀转动。但是这两个假设往往不容易满足,尤其是歼击机、无人机等一些运动具有高机动性、不确定性的目标,在观测期间(一般为秒级),转速会变化,转轴方向也会有变化,从而导致多普勒时变,直接使用传统 RD 成像算法对其成像,生成的图像模糊甚至有时不能成像。为此文献[1]提出了一种距离-瞬时多普勒成像算法,取得了不错的成像效果,但时频分析时分辨率受窗长度限

制,不能满足高分辨成像的要求。另外,在实际工作中,由于雷达前端一般宽窄带交替使用,在窄带跟踪时,宽带成像模式停止,特别在多目标搜索、监视、跟踪和成像的各模式交替使用过程中,有可能导致宽带信号方位采样不均匀,产生方位向数据随机缺失现象。直接利用基于傅立叶变换的谱估计成像方法对缺损数据进行成像,其成像效果显著下降,甚至有时无法辨识。

研究表明^[2-6],基于稀疏表示的成像方法利用目标场景的稀疏性和非线性优化算法完成对信号的稀疏表示和重构,突破传统 Nyquist 采样定律的限制,达到了高分辨的目的。为此,本文联合稀疏表示和时频变换,构造时频基字典,利用优化算法重构出具有高分辨、聚焦效果好的雷达图像。另外,由于新算法采用了非线性优化的信号重构方法,与以往的基于 FFT 的谱估计重构方法有着本质的区别,对于随机缺损的雷达回波数据可以有效成像。最后,通过实验验证了本文所提方法的有效性和可行性。

到稿日期:2012-05-17 返修日期:2012-09-18 本文受国家自然科学基金(61073106),航空科学基金(2011ZC53042),西北工业大学研究生创业种子基金(Z2012094)资助。

王保平(1964-),男,博士后,副教授,主要研究方向为雷达成像、图像处理,E-mail:wbpluo@sina.com;孙超(1987-),男,硕士生,主要研究方向为 SAR/ISAR 成像;郭俊杰(1986-),女,硕士生,主要研究方向为 ISAR 成像。

2 基于稀疏表示的 ISAR 成像算法

2.1 稀疏表示原理

对一离散数字信号 $s \in R^N$, 它可以表示为:

$$s = \sum_{r \in \Gamma} a_r \phi_r \quad (1)$$

式中, $\phi_r \in R^N$, $r \in \Gamma$, Γ 表示指标集, a_r 表示系数。若 $\|\phi_r\|_2 = 1$, ϕ_r 称为原子, $D = \{\phi_r, r \in \Gamma\}$ 称为字典。根据式(1), 一个信号可以由一些原子线性组合表示, 将式(1)表示为矩阵形式:

$$s = Da \quad (2)$$

式中, $a = [a_{r_1}, a_{r_2}, \dots, a_{r_M}]$, $D = [\phi_{r_1}, \phi_{r_2}, \dots, \phi_{r_M}]$ 。

在现实情况中, 人们往往希望利用少量的数据来获取更好的输出结果, 即超分辨(super resolution), 这种情况下, N 往往远小于 M 。这是一个病态问题, 要想得到稳定准确的解, 就需要利用某种先验约束信息。考虑到稀疏表示就是用最少的原子来表示已知信号, 大部分的表示系数是零, 从而我们可以利用这一稀疏性作为先验信息, 把解决此类问题归结为如下 l_0 范数优化问题:

$$(l_0) \min \|a\|_0 \quad \text{s. t. } s = Da \quad (3)$$

虽然 l_0 范数的意义很明显, 即向量中非零元素的数目。但是 l_0 范数是非凸的, 最小化 l_0 范数会引起优化的混定问题, 且对噪声比较敏感。为了便于工程实现, Donoho $D^{[7]}$ 、Cetin $M^{[8]}$ 等人提出采用较稳健的 l_p ($0 < p \leq 1$) 范数代替 l_0 范数, 从而上面的优化问题转化为如下两种优化问题:

$$(l_1) \min \|a\|_1 \quad \text{s. t. } s = Da \quad (4)$$

或者

$$(l_p) \alpha = \arg \min_a \|s - Da\|_2^2 + \lambda \|a\|_p^p \quad (5)$$

考虑噪声, 式(4)变为:

$$(l_1) \min \|a\|_1 \quad \text{s. t. } \|s - Da\|_2 \leq \epsilon \quad (6)$$

式中, ϵ 为噪声水平。在低信噪比的情况下, 为了抑制噪声的影响, 应将 ϵ 选取大一点, 以得到更好的输出结果。

l_1 范数优化问题既可以用计算效率较高的贪婪算法求解, 如 MP (Matching Pursuit)、OMP (Orthogonal Matching Pursuit)^[9], SP (Subspace Pursuit)^[10] 等, 也可用重构精度高但计算效率较慢的凸优化算法来求解。 l_p 范数优化问题可以用牛顿法、柯西-牛顿法、共轭梯度法等优化方法进行求解。合理选择参数 p 和 λ , 可以使输出结果满足人们的需求, 但同时也带来了参数选取的问题^[11]。

2.2 基于稀疏表示的 ISAR 成像算法

在 ISAR 成像过程中, 相对于雷达视线方向, 目标运动可分解为平动分量和转动分量。目标平动分量对成像无贡献, 应予以补偿, 而转动分量提供了方位向高分辨所需的多普勒信息。目标平稳运动下, 经过标准运动补偿后, 可以把目标模型转化为转台模型来处理, 如图 1 所示。

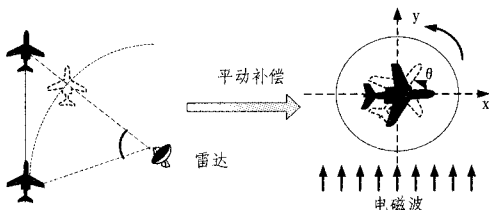


图 1 ISAR 转台模型

根据电磁绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD), 在高频区, 目标的电磁散射可以由目标上几个较强散射点的叠加构成。经过标准运动补偿后, 目标回波可以写成下式:

$$s(f, \theta) = \sum_{i=1}^K \sigma_i \exp[-j \frac{4\pi}{c} f(x_i \cos\theta + y_i \sin\theta)] \quad (7)$$

式中, f 为发射频率, θ 为观测角度, x_i, y_i 和 σ_i 分别代表散射点的 x 轴坐标、 y 轴坐标和后向散射强度, K 为强散射点的数目。对回波进行距离压缩, 得到目标的距离像。由于单点目标的方位谱具有缓变特性, 因此设在各个观察角度处目标信号是单频信号。在某一距离单元 r_b 处, 方位向信号模型为:

$$s(t, r_b; t_m) = A_{r_b} \delta(t - \frac{2r_b}{c}) \sum_{k=1}^{K'} A_k \exp(-j2\pi f_k t_m) + n_m \quad (8)$$

式中, A_{r_b} 为距离单元脉压幅度, t 为距离向快时间, t_m 为方位向慢时间, A_k 为某一距离单元内的沿方位向第 k 个目标点的幅度, f_k 为其对应频率, n_m 为加性噪声, K' 为距离单元内沿方位向目标点个数。

ISAR 方位向为多普勒频域像, 目标点在频域内仅有少数点为有效信号, 其他频点的系数为零, 这同稀疏表示模型非常相似。傅立叶基空间是 ISAR 成像时最直观、最有效的基空间, 被广泛地应用于各种稀疏表示算法中。利用傅立叶基来构造字典 Ψ :

$$\Psi = \begin{bmatrix} e^{-j\omega_0 t_0} & e^{-j\omega_1 t_0} & \dots & e^{-j\omega_{M-1} t_0} \\ e^{-j\omega_0 t_1} & e^{-j\omega_1 t_1} & \dots & e^{-j\omega_{M-1} t_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_0 t_{N-1}} & e^{-j\omega_1 t_{N-1}} & \dots & e^{-j\omega_{M-1} t_{N-1}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $\omega_m = 2\pi f_m$ 代表频率, t_n 代表方位采样时间。

将式(8)写为矩阵形式:

$$s(t) = \Psi\theta + n \quad (10)$$

式中, θ 为待估计的目标后向散射系数。实际情况下, 式(10)中方程个数小于未知量的个数, 要克服此欠定方程的非确定性而得到准确的 θ 是相当困难的。所以通过解决下面这个优化问题来获得可靠的 θ 。

$$\min (\|\theta'\|_1), \text{ s. t. } \|s(t) - \Psi\theta'\|_2 \leq \epsilon \quad (11)$$

式中, θ' 是复幅值在 $\epsilon = \|n\|_2$ 噪声水平对应的估计值。

对于此优化问题, 可以通过设定阈值的贪婪算法求解, 也可用较精确但计算效率较低的凸优化方法求解。基于稀疏表示的成像方法的性能与 ϵ 参数的设置密切相关, 参数设置过小, 所成像不能很好地抑制噪声, 而参数设置过大, 则可能将部分目标散射点认作噪声来抑制。因此, 较准确地计算出噪声水平 ϵ 对最后成像效果的性能好坏起到关键的作用。利用能量门限进行噪声距离单元选择, 当某一距离单元的能量小于这一门限时, 则认定这个距离单元只含噪声。这个门限可表示如下^[4]:

$$\text{thres} = E_m + \left[\frac{\sum_{i=1}^I (E_i - E_m)^2}{I - 1} \right]^{1/2} \quad (12)$$

式中, E_i 代表第 i 个距离单元的能量, E_m 是整个距离单元的平均能量, I 为总的距离单元数目。

从图 2 中看出, 目标区能够与只含噪声的距离单元区分开, 然后估计噪声水平 ϵ 。

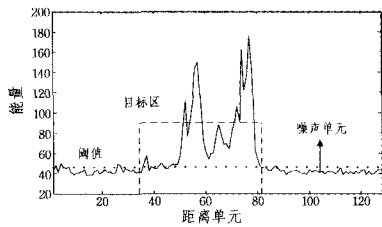


图2 区分噪声距离单元效果图

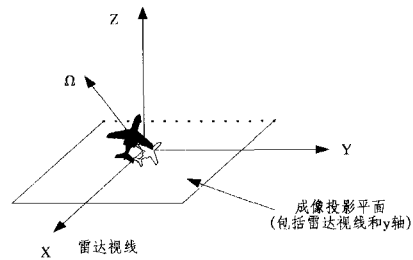


图3 成像平面示意图

3 基于稀疏表示和时频变换的 ISAR 成像算法

前面一节介绍的基于稀疏表示的 ISAR 成像算法是在目标做平稳运动的前提下,利用优化重构算法代替傅立叶变换进行成像,可以生成高分辨、聚焦效果好的图像。然而,由于 ISAR 成像目标多为机动性强的飞机这类目标,在相关处理时间(一般为秒级)内,转速会变化,而且转轴也会有变化,导致投影在成像平面上的目标形状和尺寸随观测时间改变。对于机动目标,通过运动补偿,仍可等效为围绕聚焦点转动的转台目标,如图 3 所示。由于成像目标同时存在偏转、侧摆和俯仰,因此用合成向量 Ω 作为目标旋转轴。如果飞机一类目标机动飞行,在观测期间, Ω 的指向和数值都是时变的,从而导致成像投影平面和横向尺度也随时间变化。直接利用基于稀疏表示 ISAR 成像算法对这种多普勒时变的回波进行成像,所生成的图像存在模糊。

对应任一瞬间的 Ω ,有相应的投影平面,只要能计算出这一瞬间各散射点的多普勒,就可以生瞬间目标的 ISAR 图像。文献[1]中提出的距离-瞬时多普勒(Range-Instantaneous Doppler, RID)成像算法,通过利用时频变换代替傅立叶变换,得到不同时间帧下的距离瞬时多普勒图像。

$$\begin{bmatrix} w(t_1 - n_p a) e^{j2\pi f_1 t_1} & w(t_1 - n_p a) e^{j2\pi f_2 t_1} & \cdots & w(t_1 - n_p a) e^{j2\pi f_M t_1} \\ w(t_2 - n_p a) e^{j2\pi f_1 t_2} & w(t_2 - n_p a) e^{j2\pi f_2 t_2} & \cdots & w(t_2 - n_p a) e^{j2\pi f_M t_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w(t_N - n_p a) e^{j2\pi f_1 t_N} & w(t_N - n_p a) e^{j2\pi f_2 t_N} & \cdots & w(t_N - n_p a) e^{j2\pi f_M t_N} \end{bmatrix}$$

式中, $[t_1, t_2, \dots, t_N]$ 为方位采样时刻, $[f_1, f_2, \dots, f_M]$ 为成像频率间隔, w 为窗函数。

通过替换,式(11)变为如下优化问题:

$$\min(\|\theta_p'\|_1), \text{ s.t. } \|s(t) - \Psi_p^{TF} \theta_p'\|_2 \leq \epsilon, \quad (14)$$

$$p=1, 2, 3, \dots, P-1, P$$

式中, θ_p' 为在某个时间帧 p 处的多普勒估计。通过解式(14)这个优化问题,得到高分辨、聚焦的 ISAR 图像序列。

原则上说,任何时频基都可以用在此处,但是,一个符合要求的时频基应该满足下述要求:(1)在时域和频域都有高分辨率;(2)能够精确反映信号的瞬时频率。本文只为了介绍成像算法,时频基的选择不是本文的研究问题,故选取较为常用的基于 Gabor 变换的时频基用于后面的实验。

4 实验结果与分析

飞机模型图 4(a)所示。具体仿真参数为:步进雷达工作在 3GHz,带宽为 512MHz,共发射 512 个脉冲串,每个脉冲串由 128 个子脉冲组成,频率步进为 4Mhz,脉冲重复频率为

RID 成像算法虽然能够较好地解决多普勒时变带来的图像模糊问题,但此类算法分辨率受时频窗长度限制,无法满足高分辨的要求。另外,当数据存在缺损时,成像效果受其影响严重。为了克服 RID 算法的局限性,以及常规的基于稀疏表示的 ISAR 成像算法不能有效处理多普勒时变数据的缺点,提出一种结合两类算法优点的成像算法。结合时频分析的思想,构造合适的时频基字典,通过优化算法重构出目标图像,从而很好地解决因多普勒时变导致的成像模糊问题。

新的成像方法中使用的不再是傅立叶基,而是构建不同时间帧下的时频基。本文构建的是基于 Gabor 变换的时频基字典:

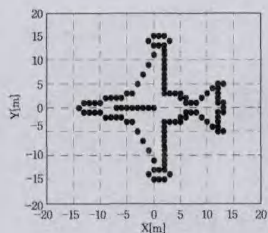
$$\Psi_p^{TF}(:, m) = \frac{1}{\pi^{1/4} \sqrt{\sigma}} \exp\left\{-\frac{(t-t_p)^2}{2\sigma^2}\right\} \exp(-j\omega_m(t-t_p)), \quad (13)$$

$$m=1, 2, \dots, M-1, M$$

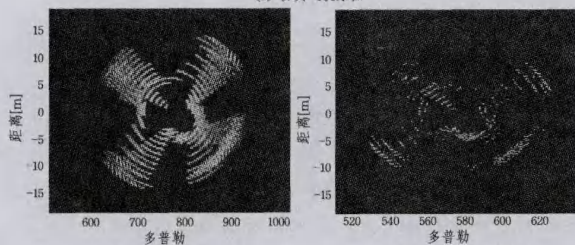
式中, p 为所取时间帧位置。由于从一个采样到下一个采样的多普勒变换不明显, p 值可以取得小一点,以降低计算复杂度; ω_m 为频率, M 为所取频率点数。时刻 p 处的具体 Gabor 基字典如下:

20kHz。为了获得多普勒时变的回波数据,在构造仿真回波数据时,旋转角速度加入扰动。图 4(b)是利用 RD 算法对仿真数据进行成像而生成的图像模糊。而只利用基于稀疏表示的 ISAR 成像方法,虽然分辨率效果得到提高,但图像仍然模糊,如图 4(c)所示。由于旋转角速度存在波动,虽经运动补偿,但剩余的相位误差仍然很大,因此利用前面两种算法直接成像,所得结果都存在模糊。图 4(d)和图 4(e)分别为采用 RID 成像算法和本文提出的联合成像算法的成像结果,这两种算法都解决了前面两种算法的生成图像模糊问题,且该文提出算法的分辨率相比 RID 算法有一定的提高。

另外,当数据缺损情况下, RID 算法的成像性能迅速下降,而本文所提方法在方位回波缺损程度很大的情况下仍然得到了不错的成像效果。图 5 为在数据缺损 50%的情况下这两种成像算法的成像效果对比,可以看出, RID 所成像中存在很多的虚假点,这将给后续目标识别带来困难,而本文所提方法的成像效果与全数据下的成像效果变化不大,因而更具有实用性。

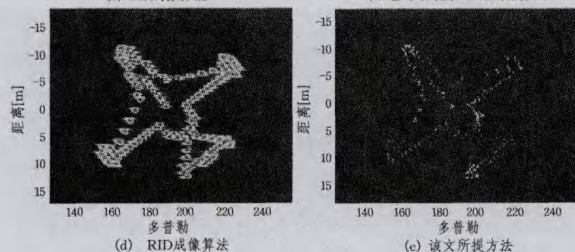


(a) 仿真飞机原图



(b) RD成像算法

(c) 基于稀疏表示的成像算法



(d) RID成像算法

(e) 该文中所提方法

图4 仿真数据下的4种成像算法的成像效果图

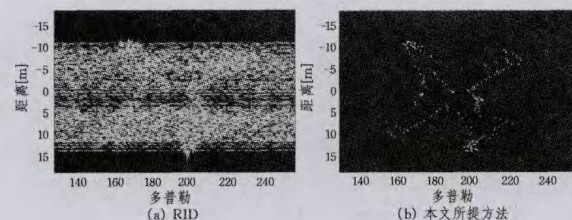


图5 数据缺损50%的情况下两种算法的成像对比图

为说明数据缺损程度对成像方法的影响,利用图像峰值信噪比(PSNR)准则对不同缺损程度进行评判。其准则为:

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{255^2}{E_{MSE}} \right) \quad (15)$$

式中, E_{MSE} 为缺损数据下生成图像与完整数据下生成图像的最小均方误差。

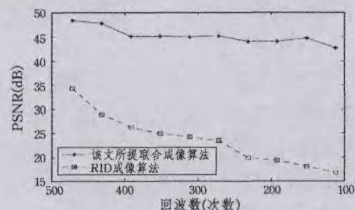


图6 方位回波不同缺损程度下对成像效果的影响

图6中,实线为方位回波不同缺损程度对本文所提算法成像结果的影响,虚线为距离-瞬时多普勒成像算法成像结果的影响。实验结果表明,本文所提方法生成图像的PSNR大于RID算法成像结果;并且随着成像所用回波次数的减少,RID的成像性能显著下降,进一步验证了本文所提方法的有效性和可行性。

结束语 利用传统成像方法和基于稀疏表示的雷达成像算法直接对机动目标回波数据进行成像,所成像效果模糊。本文提出了一种基于稀疏表示和时频变换的ISAR成像算法,此算法通过构造合适的时频基字典,利用非线性优化重构算法进行成像。实验结果证明,本文所提算法能够有效地处理多普勒时变的回波数据,并能生成高分辨、聚焦效果好的瞬时ISAR图像序列。相比基于FFT变换的谱估计成像算法,其成像效果有一定的提高,且能够有效处理缺损数据。

参考文献

- [1] 保铮,王根原,罗琳. 逆合成孔径雷达的距离-瞬时多普勒成像方法[J]. 电子学报,1998,26(12):79-83
- [2] Samadi S, Cetin M, Masnadi-Shirazi M A. Sparse representation-based synthetic aperture radar imaging[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2011, 5(2):182-193
- [3] Varshney K R, Cetin M, Fisher J W, et al. Sparse Representation in Structured Dictionaries with Application to Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2008, 56(8): 3548-3561
- [4] Zhang L, Xing M D, Qui C W, et al. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letter, 2009, 6(3):567-571
- [5] Austin C D, Ertin E, Moses R L. Sparse Signal Methods for 3-D Radar Imaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(3):408-423
- [6] 王伟伟, 廖桂生, 吴孙勇, 等. 基于小波稀疏表示的压缩感知SAR成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1140-1146
- [7] Donoho D. Compressed sensing [J]. IEEE Trans. Information Theory, 2006, 52(4): 5406-5425
- [8] Cetin M, Karl W C. Feature-Enhanced Synthetic Aperture Radar Image Formation Based on Non-quadratic Regularization [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2001, 10(4): 623-631
- [9] Tropp J, Gilbert A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2007, 53(12): 4655-4666
- [10] Dai W, Milenkovic O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 26: 301-321
- [11] Batu O, Cetin M. Parameter Selection in Sparsity-Driven SAR Imaging [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 3040-3050

(上接第281页)

- [9] Asker M B, Sabih H G. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 905-919
- [10] Marquez J P. Fourier analysis and automated measurement of cell and fiber angular orientation distributions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(21): 6413-6423

- [11] Nishimura T, Ansell M P. Fast Fourier Transform and Filtered Image Analyses of Fiber Orientation in OSB[J]. Wood Science and Technology, 2002, 36(4): 287-307
- [12] Roger T S. Texture orientation and period estimator for discriminating between forests, orchards, vineyards, and tilled fields [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2755-2760