

文章编号:1001-9014(2010)03-0236-05

缺失部分方位信息的辐射计阵列有源校正

张靖, 胡飞, 李青侠, 郭伟, 朱耀庭
(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要:传统的辐射计阵列校正算法需要测量阵列各方位的空间响应矩阵,缺失部分方位信息会导致反演图像模糊.针对这个问题,提出了一种在缺失部分方位信息情况下的改进的校正算法.对实际场景的实验结果表明,改进的校正算法能够有效地抑制因缺失方位信息导致的图像模糊.

关键词:微波遥感;校正算法;空间响应矩阵;图像模糊

中图分类号:TP75 **文献标识码:**A

RADIOMETER ARRAY CALIBRATION WITH PARTIAL SPATIAL INFORMATION MISSING

ZHANG Jing, HU Fei, LI Qing-Xia, GUO Wei, ZHU Yao-Ting
(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The spatial response matrix in all directions needs to be measured for the traditional radiometer array calibration algorithm, and the reversed image can be blurred by missing partial spatial information. To solve this problem, an improved calibration algorithm with partial spatial information missing was proposed. Experimental results for the real scene show that the image blur can be restrained effectively by the improved calibration algorithm

Key words: microwave remote sensing; calibration algorithm; spatial response matrix; image blur

引言

为了解决传统的实孔径辐射计高空间分辨率和大天线口径之间的矛盾,从 20 世纪 80 年代初开始,辐射计阵列技术被引入到遥感领域并取得了成功^[1].由于辐射图像的质量受各阵列通道的非一致性的影响很大,辐射计阵列校正技术一直是近年来微波辐射计系统研究的一个热点.

1993 年, Tanner 提出预先测量一维合成孔径辐射计阵列 ESTAR 在全方位的阵列冲激响应,得到阵列的空间响应矩阵后,再利用最小二乘算法估计被测场景的亮温分布^[2].这种方法在实际应用中取得了较好的效果,此后,不断有人针对这种算法提出各种改进算法,并取得了一些结果^[3,4].

为了校正每个方位的系统误差,所有的改进算法都要求在测量时得到全方位的阵列空间响应.但是在某些采用数字波束形成技术的辐射计系统中,如 THEa 项目中的 SKA 系统^[5,6],就只对系统视场

范围内的辐射信号进行数字波束形成扫描,这样就会缺失视场外的系统误差信息,直接采用传统的校正算法会导致图像模糊.本文针对这个问题,利用矩阵分析的方法分析了缺失部分方位信息的辐射计阵列校正模型,对传统的校正算法进行了改进,并利用实际的测量数据进行了验证.实验证明,改进后的算法能够有效地抑制因缺失方位信息导致的图像模糊,实用价值高.

1 辐射计阵列有源校正算法模型

假设辐射计阵列采用一维天线阵列结构,对辐射计阵列进行空间响应矩阵测量时,需要将强噪声源对准阵列并以 θ_i 角入射,辐射计阵列通过第 j 组权值加权测量得到的系统输出 $P_{M_j}(\theta_i)$ 为:

$$P_{M_j}(\theta_i) = \frac{\alpha^2 kB}{\lambda^2} \int_{2\pi} T_{Ap-j}(\theta) \cdot |F_{n-j}(\theta)|^2 d\theta \quad (1)$$

其中, α 是接收机增益, B 是接收机带宽, k 是波尔兹曼常数, λ 是接收机的工作频率对应的波长,

$T_{AP,j}(\theta)$ 是包括以 θ_i 角入射时的噪声源的场景视在亮温分布, $F_{n,j}(\theta)$ 是阵列经过第 j 组权值加权得到的方向图。

噪声源在 $0 \sim 2\pi$ 范围内调整 m 个人射角度, 对每个角度入射的噪声源利用 n 组权值形成的阵列方向图进行测量, 就可以得到 $n \times m$ 的矩阵 B , 即辐射计阵列的空间响应矩阵. 对于实际场景亮温同样利用 n 组权值形成的天线方向图进行测量, 根据文献 [2], 场景亮温的估计值和测量结果之间满足关系式:

$$M = B \cdot \hat{T} \quad (2)$$

其中, \hat{T} 是 $m \times 1$ 的矩阵, 表示 $0 \sim 2\pi$ 范围内场景亮温的估计值, M 是 $n \times 1$ 的矩阵, 表示 $0 \sim 2\pi$ 范围内利用 n 组权值形成的阵列方向图的测量结果. 利用最小二乘法, 就可以得到实际场景亮温的估计值 \hat{T} :

$$\hat{T} = B^* \cdot (B \cdot B^*)^{-1} \cdot M \quad (3)$$

2 改进的辐射计阵列有源校正算法

2.1 缺失部分方位信息对校正算法的影响

如果进行 B 矩阵测量时的噪声源入射的角度不在 $0 \sim 2\pi$ 范围内, 而只在 $0 \sim \theta$ 范围内进行, 这时由于缺少某些方位的系统误差信息, 直接按照式 (3) 进行亮温估计就会带来图像模糊问题, 因此有必要重新分析在这种情况下系统校正模型.

假设噪声源在 $0 \sim \theta$ 范围内变换了 p 个人射角度, 同样对每个角度入射的噪声源利用 n 组权值产生的阵列方向图进行测量, 这时式 (2) 就应该写成分块矩阵的形式:

$$M' = (B_1 \vdots B_2) \cdot \begin{pmatrix} \hat{T}_1 \\ \hat{T}_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, B_1 是 $0 \sim \theta$ 范围内已测量得到的辐射计阵列校正矩阵, B_2 是 $\theta \sim 2\pi$ 范围内缺失的辐射计阵列校正矩阵, \hat{T}_1 、 \hat{T}_2 是 $0 \sim \theta$ 和 $\theta \sim 2\pi$ 范围内的实际场景亮温分布的估计值, M' 是 $0 \sim \theta$ 范围内系统测量得到的输出结果. 将式 (4) 带入式 (3) 中, 并利用文献 [7] 中对于分块矩阵的求逆公式, 可以得到:

$$\hat{T}_1 = B_1^* \cdot ((B_1 \cdot B_1^*)^{-1} + \Delta) \cdot M' \quad (5)$$

其中, Δ 是由缺失的校正矩阵 B_2 而引入的误差, 它可以表示为关于 B_1 和 B_2 的表达式:

$$\Delta = (B_1 B_1^*)^{-1} B_1 B_2^* (B_2 B_2^* - B_2 B_1^* (B_1 B_1^*)^{-1} B_1 B_2^*)^{-1} B_2 B_1^* (B_1 B_1^*)^{-1} - (B_1 B_1^* - B_1 B_2^* (B_2 B_2^*)^{-1} B_2 B_1^*)^{-1}$$

从式 (5) 可以知道, 如果只测量 $0 \sim \theta$ 范围的校正矩阵 B_1 , 而缺失 $\theta \sim 2\pi$ 范围的校正矩阵 B_2 , 就只能反演出 $0 \sim \theta$ 范围的场景亮温. 同时受缺少 B_2 矩阵的影响, 直接采用式 (3) 进行反演会导致图像模糊.

2.2 改进的有源校正算法

由于式 (5) 缺少 B_2 矩阵的测量值, 而且形式复杂, 因此下面考虑利用辐射测量的基本原理对式 (5) 进行简化, 推导出改进的校正算法.

由于噪声源在 $0 \sim 2\pi$ 范围内变换 m 个不同入射角度, 因此可以将 B 矩阵表示成行向量的形式 $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$, 其中向量 b_i 是矩阵 B 的第 i 行. 同时, 令 $T = B \cdot B^*$, 根据矩阵乘法的定义, 矩阵 T 中的元素 t_{ij} 是矩阵 B 中行向量 b_i 和 b_j 的内积, 即 $t_{ij} =$

$$\langle b_i, b_j \rangle = \sum_{k=1}^n B_{ik} \cdot B_{kj}^*$$

由于噪声源以 θ_i 入射时的场景亮温分布 $T_{Ap,i}(\theta)$ 可以写为以 θ_i 入射的噪声源输出亮温 $T_{Ap,n}(\theta_i)$ 和背景亮温 $T_{Ap,bg}(\theta)$ 的和, $T_{Ap,i}(\theta) = T_{Ap,n}(\theta_i) + T_{Ap,bg}(\theta)$. 噪声源输出功率的等效亮温 $T_{Ap,n}(\theta_i)$ 只在 θ_i 方向入射, 将它带入到式 (1) 中, 可以得到阵列辐射计系统测量的输出值 $P_{M_j}(\theta_i)$:

$$P_{M_j}(\theta_i) = \frac{\alpha^2 k B}{\lambda^2} \left(\int_{2\pi} T_{Ap,bg}(\theta) \cdot |F_{n,j}(\theta)|^2 d\theta + T_{Ap,n}(\theta_i) \cdot |F_{n,j}(\theta_i)|^2 \right) \quad (6)$$

将式 (6) 带入到矩阵 T 的元素 t_{ij} 的表达式中, 并考虑到不同角度入射的噪声源之间、噪声源和背景之间没有相关性, 就可以得到:

$$t_{ij} = \begin{cases} T_{bg}^2 + \sum_{k=1}^n T_{n,i}^2 & i = j \\ T_{bg}^2 & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

其中, $T_{bg} = \sum_{k=1}^n \frac{\alpha^2 k B}{\lambda^2} \int_{2\pi} T_{Ap,bg}(\theta) \cdot |F_{n,k}(\theta)|^2 d\theta$ 是各组权值形成的阵列方向图测量背景输出的亮温和,

$T_{n,i} = \frac{\alpha^2 k B}{\lambda^2} T_{Ap,n}(\theta_i) \cdot |F_{n,k}(\theta_i)|^2$ 是噪声源在第 i 个角度入射时第 k 组权值形成的方向图的测量结果. 矩阵 $B \cdot B^*$ 是一个在对角线上占优, 其余位置元素近似为常数的矩阵.

将矩阵 B 表示成分块矩阵的形式 $B = (B_1 \vdots B_2)$, 其中 B_1 、 B_2 分别是 $0 \sim \theta$ 范围内已测得的校正矩阵和 $\theta \sim 2\pi$ 范围内缺失的校正矩阵, 它们分别是 $p \times n$ 和 $q \times n$ 的矩阵, 且 $p + q = m$. 根据 $B \cdot B^*$ 的性质, 可以得到矩阵 $B_1 \cdot B_1^*$ 和 $B_2 \cdot B_1^*$ 均近似为

常数矩阵,而 $B_1 \cdot B_1^*$ 和 $B_2 \cdot B_2^*$ 可以表示为对角加矩阵的形式,即:

$$\begin{aligned} B_1 \cdot B_2^* &= J_{p \times q} = T_{bg}^2 \mathbf{1}_p \cdot \mathbf{1}_q^T, \\ B_2 \cdot B_1^* &= J_{q \times p} = T_{bg}^2 \mathbf{1}_q \cdot \mathbf{1}_p^T, \\ B_1 \cdot B_1^* &= D_p + J_{p \times p} \\ &= \text{diag}\left(\sum_{k=1}^n T_{n-1}^2, L, \sum_{k=1}^n T_{n-p}^2\right) + T_{bg}^2 \mathbf{1}_p \cdot \mathbf{1}_p^T, \\ B_2 \cdot B_2^* &= D_q + J_{q \times q} \\ &= \text{diag}\left(\sum_{k=1}^n T_{n-p+1}^2, L, \sum_{k=1}^n T_{n-m}^2\right) + T_{bg}^2 \mathbf{1}_q \cdot \mathbf{1}_q^T, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{1} = (1, 1, 1, L, 1)^T$ 为求和向量.

将式(8)带入到式(5),利用对角加矩阵的求逆

公式,并令 $\sigma_k = \frac{1}{\sum_{k=1}^n T_{n-k}^2}$, $u = 1 + \frac{T_{bg}^2}{\sum_{i=1}^p \sigma_i}$, $v = 1 +$

$\frac{T_{bg}^2}{\sum_{i=p+1}^m \sigma_i}$,可以得到校正算法的表达式:

$$\hat{T}_1 = B_1^* \cdot ((B_1 \cdot B_1^*)^{-1} + D_p^{-1} + \lambda \alpha \cdot \alpha^T) \cdot M' \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} D_p^{-1} &= \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, L, \sigma_p) \quad , \\ \alpha &= (\sigma_1, \sigma_2, L, \sigma_p)^T \quad , \\ \lambda &= \frac{(v-1)(uv + (u-1)(v-1)) + (2v-1)u(u+v-1)}{u(u+v-1)(uv + (u-1)(v-1))} \quad . \end{aligned}$$

对于实际的阵列辐射计系统,缺失的校正矩阵 B_2 只影响 λ ,而对 D_p^{-1} 和 α 没有影响,因此可以通过人为地调整系数 λ 来得到较好的反演估计值.

对于同样测量得到的 $n \times m$ 阶空间响应矩阵,表 1 比较了改进算法和传统算法的复杂度.由表 1 可以看到,由于改进的校正算法增加了 D_p^{-1} 、 α 等的计算,算法复杂度增加了.但是算法中起主要作用的是 n^3 项,在 n 比较大的时候,可以认为两种算法的计算量在一个数量级.

3 实验结果与分析

3.1 校正算法验证实验

为了验证式(9)对实际视场亮温反演的有效

表 1 两种算法的复杂度分析

Table 1 Complexity analysis for two algorithms

	传统算法	改进算法
乘法计算	$n^3 + 2n + m$	$n^3 + n^2 + 3n + m$
加法计算	$n^3 + 2n + m$	$n^3 + n^2 + 3n + m$



图 1 场景的光学图片

Fig. 1 Optical image of the scene

性,利用自己研制的阵列辐射计系统对实际自然场景进行了一系列实验.该系统工作在 8mm 频段,通过二次变频变换到所中频,系统带宽为 100MHz,等效积分时间为 32ms.辐射计阵列在水平方向上采用 16 单元稀疏阵列结构,阵列合成后的 -3dB 波束宽度为 0.3° ,在垂直方向上采用抛物柱面结构, -3dB 波束宽度为 0.7° .

为了对比建筑物和天空之间的亮温差,实际场景的测量地点选择在比较开阔的华中科技大学西操场上,实际场景如图 1 所示.

辐射计系统观测场景时在水平方向采用数字波束形成技术来电扫描实验场景,水平方向的扫描角度 θ 范围是 $75 \sim 105^\circ$,扫描间隔为 0.25° .在垂直方向采用机械扫描,垂直方向的扫描角度 ϕ 范围是 $15 \sim 65^\circ$,扫描间隔为 0.5° .实验结果如图 2 所示.

图 2(a)和(b)分别是采用式(5)和式(9)反演出的场景亮温,从实验结果来看,直接采用原始的校正算法反演出的图像不能很好地分辨建筑物和天空,主要的建筑物如烟囱、住宅楼等能够反演出基本形状,但是由于受到缺失的校正矩阵的影响,边缘和细节部分不明显,图像比较模糊;而利用改进的校正算法反演出的图像能够将天空和建筑区分的比较明显,既能比较清晰地反演出主要的建筑物,同时也能反映边缘和细节的变化.

实验结果表明,改进的校正算法能够有效抑制原始校正算法因部分方位信息缺失导致的图像模糊,保护了图像细节,对辐射计阵列成像有显著的效果.

3.2 缺失方位角比较实验

为了研究缺失的方位角对于式(9)中改进校正算法的各参数的影响,进行了在不同缺失方位角情况下的场景反演实验.

对于同样的实验场景和实验数据,对水平方向采用数字波束形成技术来电扫描实验场景,水平方向的扫描角度 θ 范围是 $80 \sim 100^\circ$,扫描间隔为

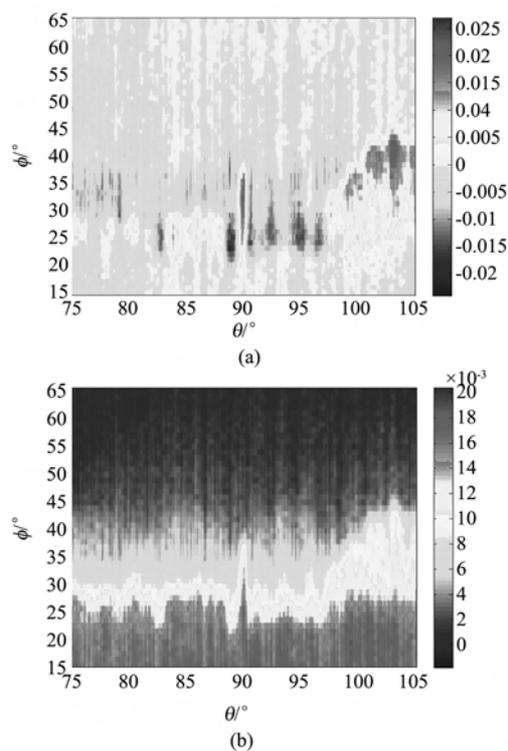


图2 75 ~ 105°场景亮温校正算法的实验结果 (a) 最小二乘算法 (b) 改进算法

Fig. 2 Experimental results of the calibration algorithm for 75 ~ 105° scene temperature (a) least square algorithm (b) improved algorithm

0.25°。在垂直方向采用机械扫描,每0.5°采样一次,垂直方向的扫描角度 ϕ 范围是15 ~ 65°。实验结果如图3所示。

图3(a)和(b)分别是采用式(5)和式(9)反演出的场景亮温。从实验结果来看,由于扫描范围变小,缺失了更多的信息量,图3(a)中的图像已经出现条纹,和图2(a)相比建筑物的轮廓更加不清晰。由于式(9)中 λ 是 u 和 v 的函数,而 u 、 v 和扫描范围相关,实验中将扫描范围从30°减少到20°,必须增加式(9)中 λ 的值才能反演出较好的图像。图3(b)是利用改进的校正算法反演出的图像,它和图2(b)效果相当,也能比较清晰地反演出主要的建筑物。

实验结果表明,对于不同的扫描角度,通过调整式(9)中 λ 的值,可以弥补由于扫描角度不足而缺失的信息量,正确反演出扫描角度内的场景亮温。

4 结论

针对缺失部分方位校正信息的图像反演问题,分析了包含全方位信息的空间响应矩阵,将全方位的空间响应矩阵分为已测量和未测量两部分。并利用测量时噪声源和背景不相关的特点,得到了缺失

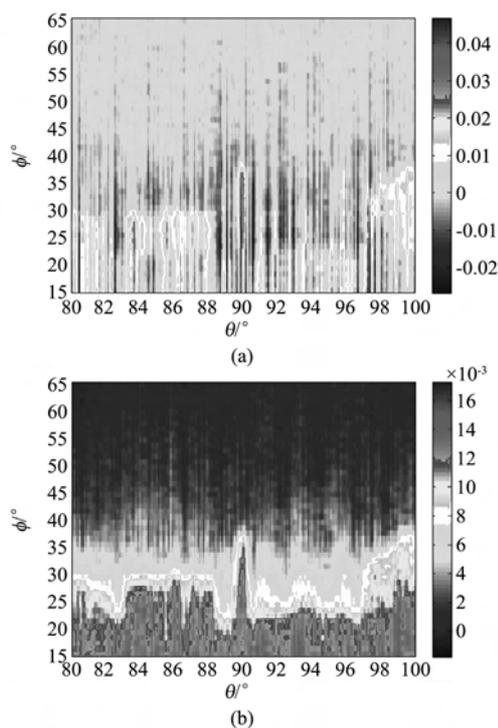


图3 80 ~ 100°场景亮温校正算法的实验结果 (a) 最小二乘算法 (b) 改进算法

Fig. 3 Experimental results of the calibration algorithm for scene at 80 ~ 100° temperature (a) least square algorithm (b) improved algorithm

部分方位信息情况下的辐射计阵列校正算法。对于缺失不同方位信息的空间响应矩阵,利用改进后的校正算法,通过调整算法的参数,通过实验场景亮温较准确地反演了成像。这种改进的校正算法的效果已经在实验结果中体现出来。

修正的反演算法的公式是在比较理想的情况下推导出来的。在实际情况下,不同角度的背景亮温之间存在差异,同时温度、湿度的变化也将导致阵列系统的误差发生变化。这就要求对算法做进一步的优化,使得对场景亮温的反演尽可能地接近原始信号。这也是今后工作努力要解决的问题。

REFERENCES

- [1] Ruf C S, Swift C T, Tanner A B, *et al.* Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1988, **26**(5):597—611.
- [2] Tanner A B, Swift C T. Calibration of a synthetic aperture radiometer[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, **31**(1):257—267.
- [3] Goodberlet M A. Improved image reconstruction techniques for synthetic aperture radiometers[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **38**(3):1362—1366.
- [4] Anterrieu E. A resolving matrix approach for synthetic aper-

- ture imaging radiometers[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, **42**(8): 1649—1656.
- [5] Schilizzi R T. The square kilometer array[C]. *Proceeding. SPIE*, Ground-based Telescopes, J. M. Oschmann, ed, Ireland, 2004, **5489**: 62—71.
- [6] Cornwell T J, Golap K, Bhatnagar S. Wide field imaging problems in radio astronomy[C]. *International conference on acoustics, speech and signal processing*, Philadelphia, PA, USA, 2005, **5**: 18—23.
- [7] ZHANG Xianda. *Matrix analysis and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press(张贤达, 矩阵分析与应用, 北京: 清华大学出版社), 2004: 153—158.

(上接第 189 页)

生态研究中得到广泛应用,借用遥感手段提取植被理化参数研究取得了较大的发展. 植被是生态系统中最重要的重要组成部分之一,正确估算植被的水分含量参数,可以为不同尺度的生态系统模型提供了有用的输入参数,同时可以实现基于遥感方法的干旱监测.

耦合辐射传输模型分析结果显示,NDVI 不能估算出植被含水量,CSI 估算能力也不理想,而 WI, NDWI, NDII, MSI 估算植被含水量较佳;根据植被含水量的敏感因子分析结果,提出整合两种窄波段植被指数(NDWI 与 MCARI1)从而得到一个改进的估算植被含水量的植被指数. 对比结果显示,改进的含水量估算指数可以较好地去除 LAI 的影响,其估算精度有了明显的提高.

REFERENCES

- [1] SUN De-Yong, LI Yun-Mei, WANG Qiao, *et al.* Study on remote sensing estimation of suspended matter concentrations based on in situ hyperspectral data in lake taiwaters [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2): 124—128.
- [2] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, WANG Zong-Ming, *et al.* soil saline-alkalization evaluation basing on spectral reflectance characteristics[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘焕军, 张柏, 王宗明, 等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(2): 138—142.
- [3] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**(2): 75—91.
- [4] VERHOEF W. Light scattering by leaf layers with applications to canopy reflectance modelling: the SAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**: 125—141.
- [5] DANSON F M, STEVEN M D, MALTHUS T J. High-spectral resolution data for determining leaf water content[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 461—470.
- [6] GAO B C. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 257—266.
- [7] PÉÑUELAS J, PÍNOL J, OGAYA R, *et al.* Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900 / R970) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(13): 2689—2875.
- [8] PÉÑUELAS J, FILELLA I, BIEL C, *et al.* The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(10): 1887—1905.
- [9] HARDISKY M A, LEMAS V, SMART R M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, **49**: 77—83.
- [10] GOETZ A F H, VANE G, SOLOMON J E, *et al.* Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**(7): 1147—1153.
- [11] SERRANO L, USTIN S L, ROBERTS D A, *et al.* Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**: 570—581.
- [12] SIMS D A, GAMON J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **84**: 526—537.
- [13] JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on forest floor [J]. *Ecology*, 1969, **50**(4): 663—670.
- [14] KUUSK A. The hop spot effect of a uniform vegetative cover [J]. *Sov Journal of Remote Sensing*, 1985, **3**: 645—658.
- [15] HABOUDANE D, MILLER J R, PATTEY E, *et al.* Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 337—352.
- [16] ZHAO X, LIANG S, LIU S, *et al.* Improvement of dark object method in atmospheric correction of hyperspectral remotely sensed data [J]. *Sci China Ser D*, 2008, **51**(3): 349—356.

更正声明

我刊于 2010 年 4 月份 29 卷 2 期刊发了《用于 SAR 图像分割的第二代 Bandelet 域 HMT-3S 模型》一文,其页脚处的第一个国家自然科学基金号“6097112”改为“60971128”,特此声明。