

文章编号: 1001-9014(2010)03-0225-05

用 IGS 发布的 TEC 数据提高法拉第旋转校正精度

严卫, 施健康, 陆文

(解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 电磁波穿过电离层时引入的法拉第旋转是导致全极化微波辐射计观测亮温产生交叉极化的重要原因. 分析得知 IRI (international reference ionosphere) 模型产生的 TEC (total electron content) 数据在部分低纬地区无法满足全极化辐射计对法拉第旋转的校正精度要求. 为提高校正精度, 分析了沿观测路径积分法和应用 IGS (International GPS Service) 发布的 TEC 数据校正两种方法对校正精度的影响. 结果表明, 沿观测路径积分法不能有效改善校正精度, 而应用 IGS 数据校正可大幅提高低纬地区法拉第旋转校正精度, 满足全极化微波辐射计对极化旋转角的校正精度要求.

关键词: 法拉第旋转; 全极化微波辐射计; 薄层近似; 国际 GPS 服务网; 国际参考电离层模型
中图分类号: P407.7 **文献标识码:** A

IMPROVING THE CORRECTION ACCURACY OF FARADAY ROTATION BY USING TEC DATA RELEASED BY IGS

YAN Wei, SHI Jian-Kang, LU Wen

(Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Faraday rotation induced when electromagnetic wave penetrates through ionosphere is the major source for the cross polarization in observed Stokes brightness temperature with a polarimetric microwave radiometer. Faraday rotation correction employing TEC (total electron content) data generated by IRI (international reference ionosphere) model can not meet polarization rotation correction accuracy in some low latitude regions. To improve the correction accuracy, the following two methods were used: 1. integrating Faraday rotation angle along observation path and 2. correcting Faraday rotation by using TEC data released by IGS. Analysis results show that the first method is hardly helpful to improve the correction accuracy, while the second one can improve Faraday rotation correction accuracy considerably. By using TEC data, the correction method can satisfy the correction accuracy of polarization rotation angles which a polarimetric microwave radiometer demands.

Key words: Faraday rotation; polarimetric microwave radiometer; thin layer approximation; international GPS service (IGS); international reference ionosphere (IRI) model

引言

全极化微波辐射计是近十多年来兴起的可获取海面风场的被动微波遥感仪器. 它在传统辐射计探测垂直极化和水平极化辐射的基础上, 进一步提取观测目标的第三和第四个 Stokes 参数分量的极化信息, 实现海面风向的反演^[1]. 全极化微波辐射计海面风向反演算法所需的第三个 Stokes 参数对天线极化基准与海洋场景极化基准之间的极化旋转角非常敏感. 引入极化旋转角的其中一个原因是法拉第旋转^[2], 它来自电离层对电磁波极化平面的旋转^[3],

是微波遥感、尤其是低频波段一个不可忽视的潜在误差源^[4]. 文章就全极化微波辐射计法拉第旋转校正的方法及提高校正精度的方法展开研究.

1 法拉第旋转与校正

法拉第旋转是处于非零磁场中的等离子体对圆极化辐射产生的色散效应而引起的. 即同一频率的左旋圆极化和右旋圆极化辐射在该环境中传播时, 波长并不相同, 导致两者在传播相同距离后产生相位差. 由于线性极化可以分解为左旋圆极化和右旋圆极化的组合, 因此线性极化辐射在穿过电离层后,

收稿日期: 2009-07-06, 修回日期: 2009-11-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411805)

作者简介: 严卫(1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士, 主要研究领域为大气、海洋环境遥感, E-mail: weiyannet@yahoo.com.

Received date: 2009-07-06, revised date: 2009-11-02

其左右旋圆极化分量之间的相位差导致重新组合后的线性极化矢量发生旋转,即法拉第旋转^[5].法拉第旋转角的计算公式为:

$$\varphi = \frac{135}{v^2} \int n_e B_{geo} ds, \quad (1)$$

式中, n_e 为电离层自由电子密度(m^{-3}), B_{geo} 为地磁场矢量(gauss), v 为电磁波频率(Hz), s 为电磁波传播路径矢量(m). 积分范围是从电离层底到卫星平台.

由于法拉第旋转角与电磁波频率的平方成反比,因此低频电磁波受法拉第旋转影响较大.对于用于土壤湿度和海洋盐度测量的 1.4GHz 的电磁波,其通过电离层时的法拉第旋转角最大可达 $20 \sim 30^\circ$ ^[6]; Seasat 卫星搭载的 SMMR 辐射计天线方向图校正中指出, 6.6GHz 通道电磁波在极端情况下的法拉第旋转角可达 1.7° , 给海面温度反演带来不可忽视的误差^[7]. 根据 Meissner^[2] 对星载全极化微波辐射计 WindSat 实际测量数据的分析, 10.7GHz 通道电磁波对应的法拉第旋转角绝大部分分布在 0.1° 以下, 但最大甚至可超过 0.25° . 由于全极化微波辐射计 10.7GHz 通道观测亮温的第三个 Stokes 分量对法拉第旋转非常敏感, 若不校正, 将给风向反演带来极大误差.

作者分析了已提出的三种法拉第旋转校正方法应用于全极化微波辐射计 10.7GHz 极化通道的可行性^[8], 结果表明可行的途径仍是目前被动微波遥感法拉第旋转校正最常用的方法: 使用电离层和地磁场模型产生电离层和地磁场数据计算法拉第旋转角^[2,4,7,9]. 计算方法有薄层近似计算和沿观测路径积分计算两种. 使用后者的缺点是计算公式中每一项都是高度的函数, 因此对每一积分间隔都要重新运行 IRI (International reference ionosphere) 和 IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 模型以及计算其它相关数据, 导致计算量和耗时量大, 效率较低, 不适用于对大量观测数据进行实时校正. Meissner 在对 WindSat 观测值进行法拉第旋转校正时使用的是薄层近似计算, 具体校正方法如下^[2].

假设地球为一正球体, 半径为 $R_E = 6371.2\text{km}$, 使用薄层近似法^[4]将整个电离层看成是所有电子都集中在海拔为 $h_l = 400\text{km}$ 处的一个薄层, 则有:

$$\begin{cases} n_e(h, \text{LAT}, \text{LON}) = \delta(h - h_l) \text{TEC} \\ \text{TEC}(\text{LAT}, \text{LON}) = \int_0^{hs/c} dh n_e(h, \text{LAT}, \text{LON}) \end{cases} \quad (2)$$

代入式(1)可得:

$$\varphi_F = \frac{135}{v^2} \cdot \text{TEC} \cdot (B_{geo, h_l} \cdot \hat{k}) \cdot \left. \frac{\partial R(h)}{\partial h} \right|_{h=h_l}, \quad (3)$$

式中 $R(h) = \sqrt{(R_E + h)^2 - R_E^2 \sin^2(\theta)} - R_E \cos(\theta)$, 表示从卫星平台至观测场景的距离; θ 为天底角; B_{geo, h_l} 为观测路径与假设的电离层薄层相交处的地磁场矢量. 使用 IRI 和 IGRF 模型计算对应经纬度的 TEC 和 B_{geo, h_l} 值, 就可获得法拉第旋转校正值.

使用 IRI 模型计算得到的 TEC 值与实测值的出入导致计算的旋转角 φ_F 可能存在 $10\% \sim 20\%$ 的误差^[2]. 根据误差传递理论和典型海洋场景辐射亮温计算可得校正残余误差为 0.03K 左右, 这并不算一个大的误差, 可以满足后续反演算法的精度控制要求. 但在低纬度 TEC 含量较大的区域, IRI 产生的 TEC 数据误差较大, 法拉第旋转角的校正残余误差接近于全极化辐射计极化旋转角的精度要求, 导致总的极化旋转角校正残余误差将超出这一精度, 具体数据在第 5 节中给出. 鉴于此, 文章尝试从以下两个方面提高 10.7GHz 极化通道法拉第旋转校正的精度, 使用沿观测路径积分法和使用 IGS 发布的 TEC 数据进行校正.

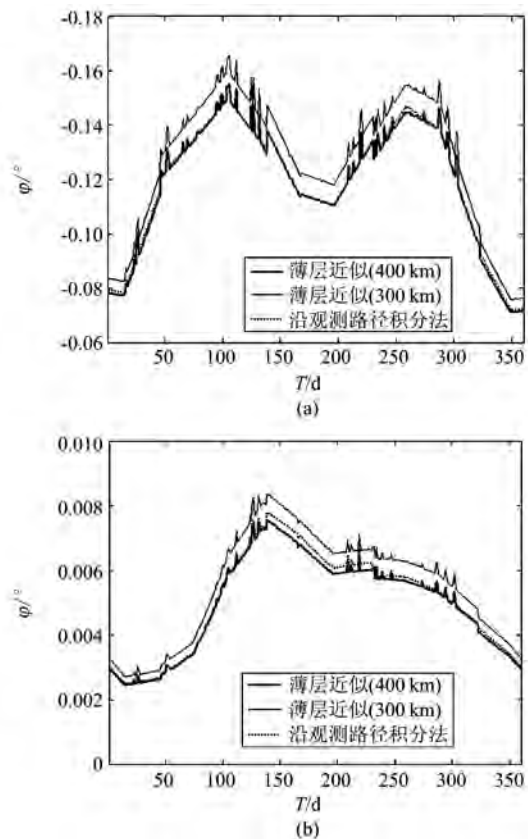


图1 沿观测路径积分法与薄层近似法校正结果比较 (a) 上行轨道 (b) 下行轨道

Fig. 1 Comparison of correction results between integrating along observation path and thin layer approximation (a) ascending orbit (b) descending orbit

表 1 卫星轨道部分配置参数

Table 1 Configuration of satellite orbit

轨道类型	卫星高度	10.7GHz 入射角	扫描角	升交点	降交点
太阳同步轨道	830km	49.9°	5°	18:00LT	6:00LT

2 沿观测路径积分法与薄层近似法校正结果比较

文献[8]给出了沿观测路径积分的详细流程,沿用与之相同的卫星轨道参数,如表 1 所示.使用沿观测路径积分法和薄层近似法分别考察 2006 年全年某站点处(109°E, 19.4°N)法拉第旋转角随全年天数的变化,结果如图 1(a)和(b)所示.

图 1(a)和(b)显示了采用沿观测路径积分和薄层近似两种方法的法拉第旋转校正结果比较,分别对应于上行轨道和下行轨道.电子密度廓线和 TEC 数据均来自 IRI 模型.虚线表示沿观测路径积分法的校正结果;粗实线表示使用薄层近似法的校正结果,薄层高度设定为 400km;细实线表示薄层高度为 300km 的近似计算校正结果.可以看出,将薄层高度设定为 400km 的近似计算结果与沿观测路径积分计算结果非常吻合,相对误差在 5% 以内.给出薄层高度为 300km 的校正结果的原因,是电子密度廓线的峰值一般在 300km 左右.有的文献直接将薄层高度设定为 300km,但结果表明薄层高度的选取还应参照卫星高度.

图 1(a)和(b)表明,采用沿观测路径积分法计算法拉第旋转角对于提高薄层近似法(选择了合适的薄层高度)的校正精度相当有限,小于 5% 的相对误差可忽略不计.沿观测路径积分法更重要的作用是为不同高度辐射计法拉第旋转校正薄层高度的选择提供比对依据.

3 应用 IGS 数据校正法拉第旋转角

虽然目前没有全球范围内实时的 TEC 观测数据,但对于非实时数据应用,可以使用 IGS 发布的 TEC 数据进行法拉第旋转校正.IGS 可以提供 2 h 一次的全球范围内 TEC 数据的快速解和最终解,产品最大延时分别为 24h 和 11d.在不同太阳活动周期和全球范围内的不同地区,TEC 数据的精度范围为 2~10 个 TECU,但大部分数据的精度都小于 2~4TECU.IGS 最终解数据的精度优于快速解,可根据实际需要选择两者之一作为法拉第旋转校正的 TEC

数据源.

IGS 提供的 TEC 数据是时间间隔为 2h 的固定网格点上的全球 TEC 分布图,空间分辨率为 2.5°×5°(纬度×经度),因此需要将网格点上 TEC 数据插值到卫星观测数据对应的时空点上.由于 TEC 值在较小的时间和空间变化范围内具有较好的线性,可采用线性插值方法.为了补偿电离层状态与太阳位置存在的高度相关的依赖关系,IGS 官方推荐^[10]将要求取 TEC 值的点的经度以时间为参数进行“旋转”后再插值,即在不同时间的 TEC 图上求取不同经度点(纬度相同)的 TEC 值再对时间进行插值.具体方法如下.

时间和纬度的插值系数可表示为:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{T_2 - T}{2} \\ t_2 = \frac{T - T_1}{2} \\ \text{lat}_1 = \frac{\text{LAT}_2 - \text{LAT}}{2.5} \\ \text{lat}_2 = \frac{\text{LAT} - \text{LAT}_1}{2.5} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, T 和 LAT 分别表示需校正的观测亮温对应的的时间和纬度; T_1, T_2 分别表示 TEC 数据中离 T 最近的两个时间点,且有 $T_1 < T < T_2$; $\text{LAT}_1, \text{LAT}_2$ 分别表示 TEC 图中离最近两个纬度,且有 $\text{LAT}_1 < \text{LAT} < \text{LAT}_2$.

在时间为 T_i 的 TEC 图上,将要求取 TEC 值的点的经度“旋转”为:

$$\text{LON}^i = \text{LON} + (T - T_i) \times 15, \quad (5)$$

式中, LON 为需校正的观测亮温对应的经度.IGS 技术文档中并没有“×15”,考虑到时区与经度的换算关系,且根据实际计算可知应包含该项.显然,在不同时间 TEC 图上,插值点的经度发生了不同变化.时间为 T_i 的 TEC 图上的经度插值系数为:

$$\begin{cases} \text{lon}_1^i = \frac{\text{LON}_2^i - \text{LON}^i}{5} \\ \text{lon}_2^i = \frac{\text{LON}^i - \text{LON}_1^i}{5} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, LON_1^i 和 LON_2^i 分别表示时间为 T_i 的 TEC 图中离 LON^i 最近两个经度,且有 $\text{LON}_1^i < \text{LON}^i < \text{LON}_2^i$.经“旋转”后的插值结果可表示为:

$$\text{TEC} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 t_i \text{lat}_j \text{lon}_k^i \text{TEC}_{ijk}, \quad (7)$$

式中, TEC_{ijk} 对应于 IGS 提供的 TEC 数据中时间为

T_i , 纬度为 LAT_j , 经度为 LON_k^i 的 TEC 值。

由于 IGS 提供的 TEC 数据是整个电离层高度范围内的垂直电子总含量, 而星载全极化微波辐射计的飞行高度 (WindSat 高度为 $830\text{km}^{[11]}$) 并不处于电离层顶, 因此需对 TEC 值进行调整. 使用 IRI2007 模型计算不同地区不同时间的从电离层底到 830km 高度的大量 TEC 数据表明, 其占整个电离层 TEC 的百分比随着时空的变化上下波动, 但绝大部分分布在 $64\% \sim 75\%$ 之间. 使用 2006 年某观测站点 ($109^\circ\text{E}, 19.4^\circ\text{N}$) 全年的实测电子密度廓线数据的计算结果也与上述结果极为接近. 为方便计, 本文对 IGS 提供的 TEC 数据的调整方法为统一乘以 0.7.

4 使用 IGS 数据与 IRI 模型数据校正结果比较

目前可获取的 WindSat 亮温数据已经过法拉第旋转校正, 因此无法通过卫星实测数据来检验 IGS 数据和 IRI 模型数据的校正结果. 可行的替代方法是使用实测电离层电子密度廓线数据, 采用沿观测路径积分法计算法拉第旋转角作为检验标准, 对使用不同 TEC 数据源的校正结果进行比对. 卫星轨道参数与第 2 节相同, 考察 2006 年全年某站点处 ($109^\circ\text{E}, 19.4^\circ\text{N}$) 法拉第旋转角随全年天数的变化.

图 2 比较了使用 IGS 数据和 IRI2007 模型数据进行校正的结果, (a) 和 (b) 分别对应上行轨道和下行轨道, 具体数值如表 2 所示. 虚线表示使用该观测站点实测的电子密度廓线数据沿观测路径积分计算的结果, 以其作为比较的标准; 粗实线表示使用 IGS 提供的 TEC 数据的校正结果, 细实线表示使用 IRI 模型 TEC 数据的校正结果. 从图 2(a) 可以清楚地看到, 粗实线与虚线的吻合程度无论是总体趋势还是短期变化, 较细实线都要好得多. 因为实际电离层状态随着时间的变化非常大, 而 IRI 模型产生的 TEC 数据则是平均模拟结果, 电离层的短期变化趋势被平滑掉了. 虽然 IGS 数据是反演结果, 并经过插值平滑, 但仍相对较好地保留了电离层短期变化趋势. 由于选择的区域是 TEC 含量较大的低纬地区 (19.4°N), 正处于上行轨道法拉第旋转影响最大的峰值区域, 法拉第旋转角的平均值达到 0.12° . 2006 年太阳活动并不算活跃, 但从图中可以看出, IRI 数据的校正结果与实测电子密度的校正结果已有较大偏离, 平均误差达到 0.04° , U' 值残余误差为 0.1K . WindSat 对极化旋转

角的误差要求是 $0.05^\circ^{[12]}$, 显然再加上由于天线极化基准与地球场景极化基准失配引入的极化旋转角则必然会超出这一要求. 在太阳活动活跃的年份, 此误差还将不可避免地增大. 而采用 IGS 数据校正后的平均误差为 0.02° , U' 值的残余误差为 0.05K , 仍可满足校正精度控制要求. 图 2(B) 中 IGS 数据的校正结果则并没有显露出优势, 其校正结果的平均误差为 0.0016° , 而使用 IRI 数据校正的平均误差为 0.0012° . 由于对应的法拉第旋转角的平均值仅为 0.0051° , 此时可以不对其进行校正. 同时要看到, IGS 数据的校正结果在法拉第旋转角较大时仍然与实测电子密度廓线的校正结果更加吻合, 而这正是我们希望看到的结果.

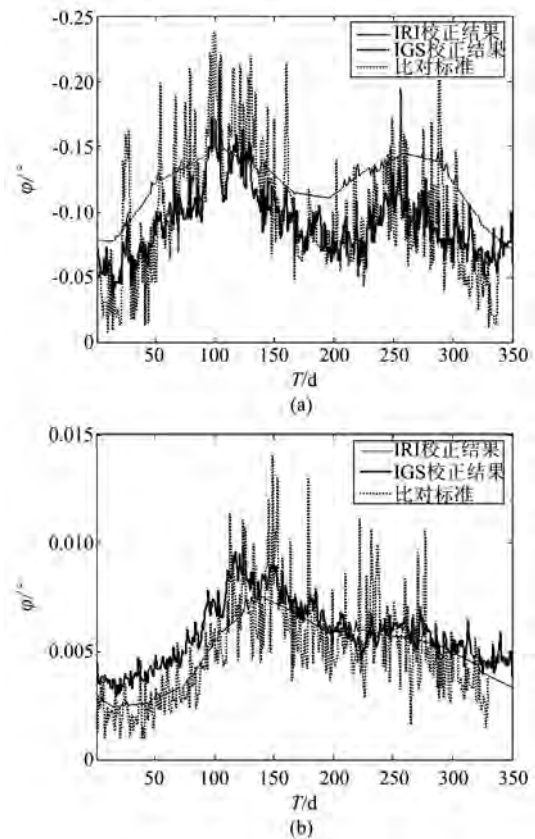


图 2 使用 IGS 数据和 IRI 数据校正结果比较 (a) 上行轨道 (b) 下行轨道

Fig. 2 Comparison of correction results between using IGS data and IRI data (a) descending orbit (b) ascending orbit

表 2 校正后残余误差比较

Table 2 Comparison of residual error after correction

轨道类型	法拉第旋转角 平均值	IRI 校正 残余误差	IGS 校正 残余误差
上行轨道	0.12°	0.04°	0.02°
下行轨道	0.0051°	0.0012°	0.0016°

5 结论

法拉第旋转校正是全极化微波辐射计数据预处理中非常重要的一部分. 校正结果对比分析发现, 校正精度主要取决于所使用的 TEC 数据的精度, 沿观测路径积分法并不能有效提高校正精度. IRI 模型产生的 TEC 数据在部分低纬地区无法满足全极化辐射计对极化旋转角的校正精度要求, 对于非实时和近实时数据校正, 使用 IGS 发布的全球 TEC 数据可大幅提高法拉第旋转校正精度, 从而提高海面风向反演的准确度.

考虑到 IRI 模型数据校正结果在低纬地区存在的问题, 建议数据分发机构在发布的亮温数据产品中加入其法拉第校正的校正值, 使用户在使用亮温数据产品时可根据实际需要对其进行更精确的修正, 保证全极化微波辐射计海面风场反演算法输入参数的精确性.

REFERENCES

- [1] WANG Zhen-zhan. Sea surface wind vector measured by polarimetric microwave radiometer—Principle, system design, and simulation study[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, CAS(王振占. 海面风场全极化微波辐射测量—原理、系统设计与模拟研究. 北京: 中科院空间中心), 2005.
- [2] Meissner Thomas, Wentz Frank. Polarization rotation and the 3rd Stokes parameter; The effects of spacecraft attitude and faraday rotation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, (44): 506—515.
- [3] Le Vine David M, Jacob S Daniel, Dinnat Emmanuel P, et al. The influence of antenna pattern on faraday rotation in remote sensing at L-Band[J]. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(9): 2737—2746.
- [4] Le Vine D, Abraham S. Faraday rotation and passive microwave remote sensing of soil moisture from space[C]. *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere*, IEEE Geosciences and Remote Sensing Society, Electromagnetics Academy. 2000.
- [5] Rybicki G, Lightman A. *Radiative processes in astrophysics* [M]. New York: Wiley InterScience, 1979.
- [6] Yueh Simon H. Estimates of faraday rotation with passive microwave polarimetry for microwave remote sensing of earth surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(5): 2434—2438.
- [7] Njoku Eni G, J Christensen Edward J, Cofield Richard E. The seasat scanning multichannel microwave radiometer (SMMR); antenna pattern corrections-development and implementation[J]. *IEEE Journal of Oceanic engineering*, 1980, **5**(2): 125—137.
- [8] SHI Jian-kang, YAN Wei, GONG Hong-yun, et al. Studies on faraday rotation correction for fully polarimetric microwave radiometer at 10.7GHz[J]. *Journal of Microwave*(施健康, 严卫, 龚洪运, 等. 全极化微波辐射计 10.7GHz 极化通道法拉第旋转校正分析. *微波学报*), 2009, **25**(6): 79—83.
- [9] Abraham Saji, Le Vine David M. Use of IRI to model the effect of ionosphere emission on earth remote sensing at L-band[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **34**: 2059—2066.
- [10] Schaer Stefan, Gurtner Werner. IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1[C]. Darmstadt, Germany: Proceedings of the IGS AC Workshop, 1998.
- [11] Gaiser Peter W, Twarog Elizabeth M, Li Li, et al. The windSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and mission overview[R]. Washington DC, USA: Naval Research Laboratory, 2004, 371—374.
- [12] Gaiser Peter W, Germain Karen M St, Twarog Elizabeth M, et al. The windSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance[J]. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(11): 2347—2361.
- (上接第 215 页)
- tion in hyperspectral imagery[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001, **39**(3): 529—545.
- [5] Settle J J. On the relationship between spectral unmixing and subspace projection[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1996, **34**(4): 1045—1046.
- [6] Nascimento J M P, Dias J M B. Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2005, **43**(4): 898—910.
- [7] Nascimento J M P, Dias J M B. Does independent component analysis play a role in unmixing hyperspectral data[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004, **43**(1): 175—184.
- [8] Wang Jing, Chang C I. Applications of independent component analysis in endmember extraction and abundance quantification for hyperspectral imagery[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006, **44**(9): 2601—2616.
- [9] Miao Lidan, Qi Hairong, Szu H. A maximum entropy approach to unsupervised mixed-pixel decomposition[J]. *IEEE Trans. Image Processing.*, 2007, **16**(4): 1008—1021.
- [10] Vapnik V N. *The Nature of Statistical Learning*[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [11] Tax D, Duin R. Support vector data description[J]. *Machine Learning*, 2004, **54**: 45—46.
- [12] ZHOU Hao, Wang bin, Zhang Liming. New scheme for decomposition of mixed pixels of remote sensing images[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(周昊, 王斌, 张立明. 一种新的遥感图像混合像元分解方法, *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5): 463—466.