

文章编号:1001-9014(2006)01-0071-06

温度与发射率分离模型的改进及其敏感性分析

祝善友, 朱 迅, 尹 球, 匡定波

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:针对温度与发射率分离模型的缺陷,提出了一种模型改进方法,利用模拟数据对比研究了模型改进前后温度与发射率的反演精度;并从理论分析和模拟计算两个角度探讨了修正前后模型对初始发射率设定的变化、大气下行与上行辐射和大气透过率等校正误差的敏感程度.研究表明,修正后模型的反演精度明显高于修正前的模型,除大气下行辐射校正误差外,其它误差都影响着两种模型的反演精度,但修正后的模型对这些误差的敏感性小.

关键词:温度与发射率分离;改进;反演精度;校正误差;敏感性分析

中图分类号:TP751.1;P407.6 **文献标识码:**A

MODIFICATION OF TEMPERATURE AND EMISSIVITY SEPARATION MODEL AND ITS SENSITIVITY ANALYSIS

ZHU Shan-You, ZHU Xun, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo

(Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: According to the deficiency of temperature and emissivity separation (TES) model, a modified method of TES was presented. Simulated data were used to compare the precision of temperature and emissivity retrieved separately from before and after model modification. The sensitivity of TES and MTES model to the variety of initial setted emissivity, calibration error of atmospheric upwelling, downwelling radiation and transmission was then analyzed by way of theoretically analysis and simulated computation. Results show that the retrieval precision of MTES model is higher than that of TES model. Except for the calibration error of atmospheric downwelling radiation, other errors affect the precision of the two models, but MTES model is less sensitive to these errors.

Key words: temperature and emissivity separation (TES); modification; retrieval precision; calibration error; sensitivity analysis

引言

陆面温度遥感反演是一个公认的难题,其难点在于陆面地物类型复杂,地表比辐射率随波长变化较大,并且精确的大气校正难以实现.若假设地面为朗伯体反射面并且大气下行辐射在半球空间内取常数,则热辐射传输方程可简化为^[1,2]:

$$L_j^{sensor} = [\varepsilon_j \cdot L_{BB} + (1 - \varepsilon_j) \cdot L_j^{atm \downarrow}] \cdot \tau_j + L_j^{atm \uparrow} \quad (1)$$

其中, L_j^{sensor} 为传感器所接收到的辐射亮度,由热红外图像经辐射校正得出; L_{BB} 为黑体辐射亮度,可由普朗克定律计算得出; ε_j 为 j 波段上的地表比辐射率; τ_j 、 $L_j^{atm \uparrow}$ 、 $L_j^{atm \downarrow}$ 分别为 j 波段上的大气透过率和

大气上行、下行辐射,在大气状况已知的情况下,利用大气校正软件计算得出.

从热辐射传输方程出发,国内外有关陆面温度反演的方法主要有单通道温度反演、双通道(分裂窗)温度反演、多通道温度与比辐射率分离、多角度地表温度反演等^[3]. Gillespie 等(1998)提出了一种多通道温度与比辐射率反演模型(Temperature and Emissivity Separation, TES)^[4],该模型利用比辐射率与多通道相对比辐射率之间的经验关系来计算地物的绝对比辐射率,从而得到地表温度,其核心计算过程可简单归纳如下:

j 波段上像元的绝对比辐射率 ε_j 可利用式(2)计算得出:

收稿日期:2005-04-21,修回日期:2005-10-15

Received date: 2005-04-21, revised date: 2005-10-15

基金项目:上海市科技发展基金光科技专项(04dz05117)、国家自然科学基金项目(40271084)、上海市科技攻关项目(035115006).

作者简介:祝善友(1977-),男,山东日照人,上海技术物理研究所博士研究生,研究方向为遥感信息处理.

$$\varepsilon_j = \beta_j \cdot \frac{\varepsilon_{\min}}{\min(\beta_j)} \quad (2)$$

$$\text{其中: } \beta_j = \frac{L_j^{\text{sensor}} / L_{\text{BB}}(\lambda_j, T_{\text{grd}})}{\sum_{j=1}^N L_j^{\text{sensor}} / \sum_{j=1}^N L_{\text{BB}}(\lambda_j, T_{\text{grd}})} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \cdot [\max(\beta_j) - \min(\beta_j)]^{0.737} \quad (4)$$

从 TES 模型的计算公式(2)和(3)可以看出,在不考虑大气影响的情况下,给定热红外图像的温度与比辐射率的反演精度由 ε_{\min} 唯一确定,这表明 ε_{\min} 的计算是 TES 模型的核心;其中 ε_{\min} 由统计模型式(4)计算得出,但在实际图像中,地物类型差异、地物本身性质如表面温度、粗糙度、含水量等不确定性因素的变化,都影响着地物比辐射率的大小^[5],从而对模型的表达形式和模型的系数产生影响. TES 模型在具有多个热红外通道的遥感图像温度反演方面得到了广泛应用,但许多学者在应用 TES 模型时,都简单的应用式(4)进行计算,然后将反演结果与实测数据进行对比,认为反演误差只是因数据的预处理误差所造成^[2,6,7]. 而根据以上分析,要想利用 TES 模型对热红外图像进行较高精度的地表温度反演和比辐射率分离,除了对图像做必要的预处理之外,还必须对模型本身进行改进以提高 ε_{\min} 的计算精度. 对此,本文提出了一种模型改进方法 MTES (Modified temperature and emissivity separation),针对不同的热红外图像重新构建相应的计算模型,并利用模拟数据证明了模型改进后温度与比辐射率反演精度的提高;最后根据热辐射传输方程和 TES 模型,从理论分析和模拟计算两个角度探讨了初始比辐射率设定的变化、大气下行与上行辐射和大气透过率等大气参数校正误差对 TES 和 MTES 模型反演精度的影响.

1 数据与方法

1.1 模拟数据构建

根据 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) UCSB (University of California, Santa Barbara) 比辐射率实验室收集的比辐射率曲线^[8],选取包括水体、土壤、植被、沥青、石材和瓷砖在内的 6 大类 58 种地物样本,各类别在总样本数目中所占比例从 1.72% 到 27.59% 不等,按照中科院上海技术物理研究所研制的 128 通道实用型模块化成像光谱仪 OMIS1 的 8 个热红外通道的中心波长(分别为 8.0829、8.7271、9.2367、9.7917、10.4398、10.9260、11.4836、11.9811 μm),利用线性插值,生成 58 种地

物在 8 个波段上的比辐射率数据^[9]. 对每种地物类型,在 270 ~ 315K 的温度分布范围内每隔 0.25K 的间距取点,生成温度图像;再利用普朗克定律计算表面辐射亮度,生成未经大气影响的 8 个波段的地物表面辐射亮度数据;最后分别对图像加入大气透过率、大气上行与下行辐射的大气影响数据,生成经大气影响的辐射亮度图像数据.

1.2 TES 模型的改进

根据以上分析,直接应用 TES 模型公式(4)进行温度反演,势必造成较大误差,对此,我们提出了根据图像本身地物类型的特点进行模型修正的方法,即利用热红外图像提取出的地物相对比辐射率与 TES 模型公式(3)计算出的 β_j 之间的关系对公式(4)进行修正.

比辐射率归一化方法首先假定所有通道上的像元比辐射率为一定值,利用普朗克定律的变形解出所有通道上的像元温度,然后利用通道间的温度最大值作为像元点的温度值重新计算不同通道像元的比辐射率. 从计算过程可以发现,该方法类似于 TES 模型计算步骤中像元初始温度的确定,计算结果表达了地物间比辐射率的相对差异,而且模拟数据分析表明,波段间地物的最小归一化比辐射率与最小真实比辐射率之间的相关性高达 0.9922,这说明利用归一化比辐射率代替真实比辐射率建立统计模型是可行的. 基于以上分析,研究中选择了比辐射率归一化方法用于计算地物的相对比辐射率,并根据计算结果与 TES 模型计算出的 β_j 之间的相关关系,修正 TES 模型公式(4)的系数,修正后的公式为:

$$\varepsilon_{\min} = 0.9845 - 0.7974 \cdot [\max(\beta_j) - \min(\beta_j)]^{0.8759} \quad (5)$$

从 TES 模型改进过程来看,利用归一化比辐射率建立修正模型,与原 TES 模型相比较有两点优势. 首先,修正方法考虑了不同图像中地物的类型差异,充分利用了每种地物两个比辐射率之间的对应关系;而与地物的分布位置无关;其次,修正方法考虑了图像上地物分布面积大小的差异,若某种地物的面积较大,则用于建立统计模型的像元点就越多,根据回归分析理论可知,所建模型用于该种地物类型所得精度就越高. 值得说明的是,不同图像所应用的模型从系数或形式上都应有所不同,应根据图像本身建立相应的模型.

1.3 不同因子对模型改进前后反演精度的影响分析方法

从辐射传输方程和 TES 模型的计算步骤可以

发现,初始比辐射率的设定、大气透过率、大气上行和下行辐射的校正误差可能影响地物表面的有效辐射,进而将误差传递到模型下面的计算步骤中,最终会对温度与比辐射率的反演结果精度产生影响.因此论文首先根据热辐射传输方程从理论上研究了在其它因子不变的情况下,每个单一影响因子的变化可能对反演精度带来的影响,然后利用模拟数据验证了理论分析得出的结论.

2 结果与分析

2.1 模型改进前后的反演精度对比分析

利用公式(5)代替公式(4)重新进行温度与比辐射率分离反演计算.以海水和土壤为例,图1给出了模型改进前后计算出的比辐射率与真实比辐射率的曲线对比,从图中可以看出,MTES模型所反演出的比辐射率更接近于真实值,误差减小.

以反演值与真实值之间的吻合程度,统计模型改进前后58种地物样本的比辐射率反演误差,发现其中44种地物利用MTES模型得到的反演精度好

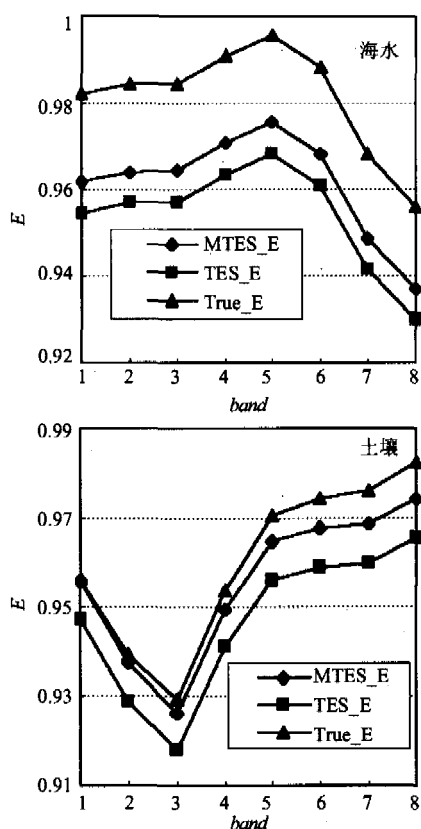


图1 模型改进前后计算出的比辐射率与真实比辐射率的曲线对比

Fig. 1 Actual emissivity plots compared with calculated ones retrieved from TES and MTES model

于TES模型.为检验对不同地物使用相同的模拟温度是否会对反演结果产生影响,研究中又对每种地物类型,根据某一时刻其表面温度的可能分布范围重新生成了模拟数据,并比较了模型改进前后的反演精度.结果表明,温度变化前后,样本反演精度提高与否都有同样的趋势,略有差异的只是修正模型系数发生的变化和反演精度提高幅度的不同,这一点说明利用模拟数据足以证明MTES模型的反演精度要高于TES模型.

与TES模型反演精度相比较,图2左图给出了MTES模型计算出的58种地物温度反演精度的提高(其中正值表示反演精度提高,负值表示反演精度下降,X轴表示样本编号),由图可见,利用MTES模型反演出的其中44种地物的精度都有较大提高,部分地物提高幅度达0.5K以上.对反演精度下降较大的地物样本17、26和57进行分析发现,造成误差的主要原因是这三种样本的比辐射率曲线在形态和数值大小上与同类地物相比差异较大.以部分波段为例,模型改进前后反演出的比辐射率的误差均值与方差分布见图2右图(其中带上标的为改进模型所对应的波段).由图2可知,修正后模型MTES计算出的温度与比辐射率的误差均小于TES模型的反演误差,这说明MTES的反演精度要明显高于TES.因此在应用TES模型进行热红外波段温度与比辐射率分离反演研究时,应根据图像本身的地物分布信息,对模型做必要的改进.

2.2 初始比辐射率设定的影响

初始比辐射率对于TES模型的计算而言,只是一个初值的设定,不存在校正误差,因此研究中只是根据初值的大小与图像中地物最大比辐射率之间的关系利用模拟数据研究了初值的设定对反演精度的影响.研究中分别设置初始比辐射率为0.94、0.98和0.995,并利用修正前后的TES模型分离反演了温度与比辐射率.图3左图表达了初始比辐射率的变化对温度反演误差的影响,其中x轴表示温度误差阈值,y轴对应于某一温度误差阈值范围内的像元所占比例;右图表达了初始比辐射率的变化对比辐射率反演误差的影响,其中y轴对应于各波段比辐射率误差在0.01范围内的像元所占比例.由图3以及误差图像统计分析发现,初始比辐射率由小变大后,反演精度逐渐增高,当初始比辐射率变化由0.98变化到0.995时,TES模型反演的温度均值误差由0.56K变化到0.53K,MTES模型反演的温度均值误差由0.32K变化到0.30K.

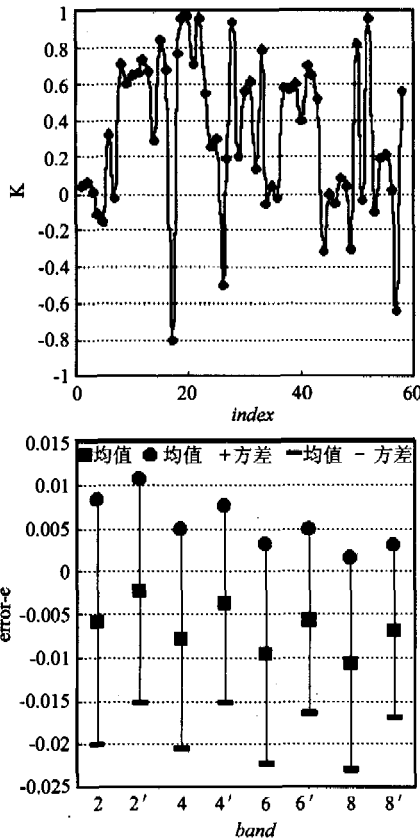


图2 模型改进前后分别反演出的温度与比辐射率的精度对比
Fig.2 Precision comparison of temperature and emissivity retrieved from TES and MTES model

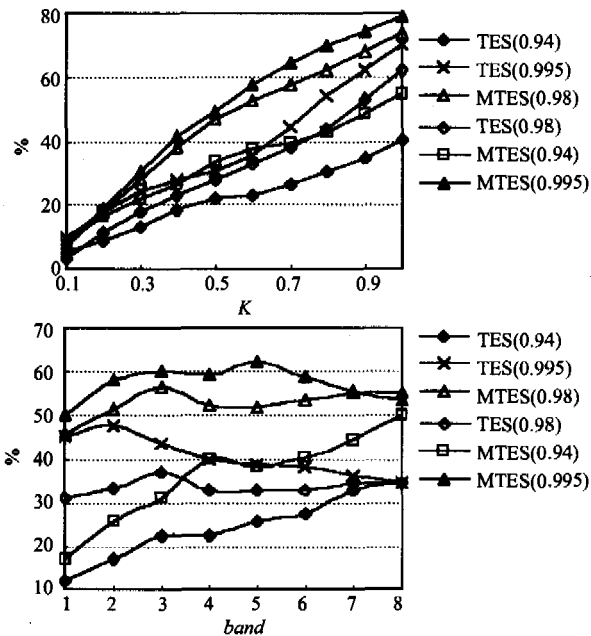


图3 初始比辐射率对反演精度的影响
Fig.3 Influence of initial emissivity to retrieval precision

根据以上分析得出如下结论:

(1) 初始比辐射率的设定影响温度与比辐射率的反演精度. 初始比辐射率的值越接近于图像中地物的最大比辐射率值(图像中水体的最大比辐射率各个波段上都超过 0.995), 反演精度越高. 在下面的研究中, 为了避免初始比辐射率设定对研究结果的干扰, 以初始比辐射率 0.995 计算出的温度和比辐射率作为精度评价标准.

(2) 修正前后的模型对比辐射率的设定都较为敏感, 但 TES 模型对初始比辐射率的依赖性更大. 这一点可由图 3 中比辐射率变化所产生的误差曲线之间的距离看出.

(3) 不管初始比辐射率的值大小如何, MTES 模型反演的温度与比辐射率精度都大于 TES 模型.

2.3 大气下行辐射校正误差的影响

(1) 理论分析

根据式(1), 对某一特定通道, 假定大气透过率、大气上行辐射不存在校正误差, 则大气下行辐射校正误差及其引起的温度反演误差可表示为(以下书写方便, 省略下标):

$$\Delta L_{atm \downarrow} = \frac{\varepsilon \cdot f(\Delta T)}{1 - \varepsilon} \quad (6)$$

式中, 以 $f(\Delta T)$ 表示真实温度与反演温度下对应的黑体辐射差值.

由式(6)可知, 假定初始比辐射率设定为 0.98, 则由 20% 的大气下行辐射校正误差所引起的黑体辐射误差为 0.0041, 这说明大气下行辐射校正误差对模型反演精度的影响不大.

(2) 模拟数据分析

陈良富等人的研究表明^[10], 在 5 种标准大气模式下, NOAA-11 的第 4 和第 5 通道的大气下行辐射效应最多不超过遥感器总辐射值的 10%. 根据此研究结果, 对图像的每个波段分别加上该波段辐射均值的 5%, 构成经大气下行辐射影响过的图像. 分别以校正误差为 5%、10% 和 20% 对大气影响的图像进行大气下行辐射校正, 然后利用修正前后的 TES 模型研究大气下行辐射校正误差对反演精度的影响. 研究表明, 大气下行校正误差由 5% 到 10% 再增加到 20% 后, TES 模型修正前后的反演误差变化都不大, 温度反演误差变化在 0.01K 以内, 比辐射率的反演误差变化在 10^{-4} 数量级左右, 这说明两种模型对大气下行辐射的校正误差都不敏感, 但是当大气下行辐射值达到该波段总辐射值的 30% 左右时, 10% 的校正误差就会带来 0.1K 左右的温度反演误差.

2.4 大气上行辐射校正误差的影响

(1) 理论分析

对某一特定通道,假定大气透过率、大气下行辐射不存在校正误差,则由式(1)可得到大气上行辐射及其校正误差之间的关系式:

$$\frac{L_{atm \uparrow}}{\Delta L_{atm \uparrow}} = \frac{L_{sensor} - \tau \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L_{atm \downarrow} - \tau \cdot \varepsilon \cdot LBB(T)}{\tau \cdot \varepsilon \cdot (\Delta T)}, \quad (7)$$

式中, $\Delta L_{atm \uparrow}$ 表示大气上行辐射校正误差。

由式(7)可知,大气上行辐射校正误差越大,则温度反演误差越大;对特定的地物类型,假定大气上行辐射校正误差为一定值,则地表温度与温度反演误差 ΔT 之间存在着反比关系,即地物表面温度越高,则因大气上行辐射校正误差引起的温度反演误差越小。

(2) 模拟数据分析

类似大气下行辐射影响的模拟图像构建过程,构建经大气上行辐射影响的模拟图像.分别以校正误差为 $\pm 10\%$ 进行大气上行辐射校正,然后利用修正前后的 TES 模型研究大气上行辐射校正误差对反演精度的影响.图 4 左图以 TES 模型为例,给出了 13 个像元点的真实温度(X 轴)与利用大气上行辐射校正误差图像反演温度(Y 轴)之间的散点图分布;图 4 右图以土壤类型为例,按照相同的像元间隔提取了大气上行辐射校正误差给 MTES 模型反演温度带来的误差,其中沿 x 轴方向,像元的真实温度逐渐增高.根据图 4,不管模型修正与否,10% 的大气上行校正误差都会带来 0.4K 左右的温度反演误差,但地物表面温度越高,大气上行辐射校正误差的影响就越小,这与前文的理论分析结果一致,而且校正误差对 MTES 模型的反演结果影响较小.另外对大气上行辐射校正误差对比辐射率反演的影响进行统计分析发现,10% 的校正误差最多造成了 0.005 的比辐射率反演误差。

2.5 大气透过率校正误差的影响

(1) 理论分析

对某一特定通道,假定大气上行与下行辐射不存在校正误差,则由式(1)可得到大气透过率校正误差与反演温度误差之间的关系式:

$$\Delta \tau = (L_{sensor} - L_{atm \uparrow}) \cdot \frac{\varepsilon \cdot f(\Delta T)}{[\varepsilon \cdot LBB(T) + (1 - \varepsilon) \cdot L_{atm \downarrow}] \cdot [\varepsilon \cdot LBB(T) + (1 - \varepsilon) \cdot L_{atm \downarrow}]} \quad (8)$$

式中, T 表示真实温度, T' 为由透过率校正误差图像

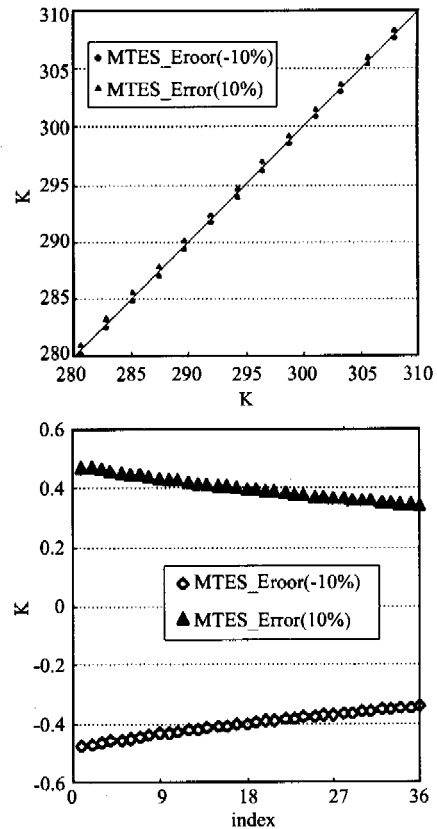


图 4 大气上行辐射校正误差对反演精度的影响
Fig. 4 Retrieval precision affected by calibration error of upwelling radiation

反演出的温度。

由式(8)可知,大气透过率校正误差越大,则温度反演误差越大;对特定的地物类型,假定大气透过率校正误差为一定值,则地表温度与温度反演误差 ΔT 之间存在着正比关系,即地物表面温度越高,则因大气透过率校正误差引起的温度反演误差越大。

(2) 模拟数据分析

论文以校正误差为 $\pm 5\%$ 进行大气透过率校正,然后利用修正前后的 TES 模型研究透过率校正误差对反演精度的影响.图 5 左图以土壤类型为例,按照相同的像元间隔提取了大气透过率校正误差给 MTES 模型反演温度带来的误差,其中沿 x 轴方向,像元的真实温度逐渐增高;图 5 右图给出了因 5% 的大气透过率校正误差造成的 TES 和 MTES 模型反演温度误差的直方图分布曲线。

根据图 5,5% 的大气透过率校正误差给 TES 和 MTES 模型分别带来 3.5K 和 3.2K 左右的温度反演误差,但地物表面温度越高,大气透过率校正误差的影响就越大,与前文的理论分析结果相吻合.另外统计分析大气透过率校正误差对比辐射率反演精度的

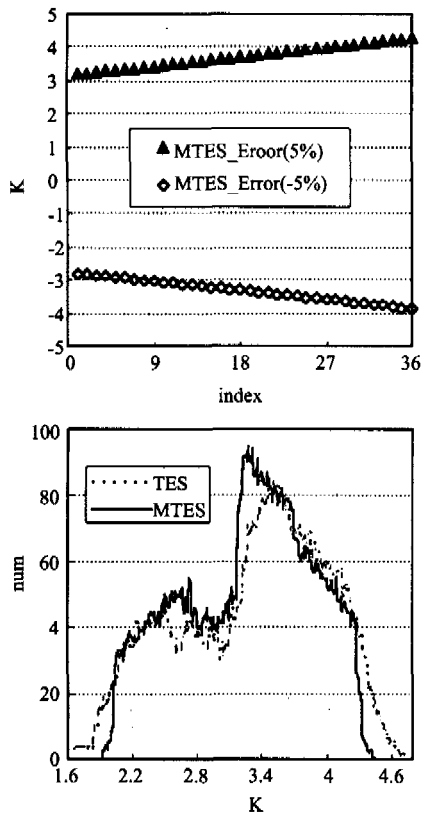


图5 大气透过率校正误差对反演精度的影响
Fig. 5 Retrieval precision affected by calibration error of atmospheric transmission

影响发现,5%的校正误差最大造成了0.03的比辐射率反演误差。

3 结论

针对温度与比辐射率分离模型的缺陷,论文提出了一种模型改进方法,并从理论分析和模拟计算两个角度探讨了不同因子对修正前后模型的影响程度。根据论文的分析研究结果,得出如下结论:

(1) 修正后的 MTES 模型的反演精度明显高于未修正的 TES 模型。

(2) TES 和 MTES 模型对大气下行辐射的校正误差不敏感。

(3) 初始比辐射率的设定、大气上行辐射校正误差和大气透过率校正误差都对 TES 和 MTES 模型

的反演精度产生较大影响,但相对而言,MTES 模型对 3 种因子的敏感性要小于 TES 模型。

REFERENCES

- [1] LI Xiao-Wen, WANG Jun-Fa, WANG Jin-Di, et al. *Ground Remote Sensing of Multi-angle and Thermal Infrared* [M]. Beijing: Science Press (李小文,汪骏发,王锦地,等.多角度与热红外对地遥感.北京:科学出版社), 2001:49—51.
- [2] Thomas Schmuggea, Andrew Frencha, Jerry C Ritchiea, et al. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **79**: 189—198.
- [3] ZHAO Ying-Shi. *Analysis Theory and Method of Remote Sensing Application* [M]. Beijing: Science Press (赵英时.遥感应用分析原理与方法.北京:科学出版社), 2003: 115—119.
- [4] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**, 1113—1126.
- [5] Xiao Qing, Liu Qin-Huo, Li Xiao-Wen, et al. A field measurement method of special emissivity and research on he feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (肖青,柳钦火,李小文,等.热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究.红外与毫米波学报), 2003, **22**(5): 373—378.
- [6] César Coll, Vicente Caselles, Enric Valor, et al. Validation of temperature-emissivity separation and split-window methods from TIMS data and ground measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **85**: 232—242.
- [7] Frédéric Jacob, Francois Petitcolin. Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 137—152.
- [8] <http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>.
- [9] ZHOU Ning, ZHU Xun, YIN Qiu. Analysis on influencing factors of land surface temperature retrieved by using split window algorithm with linear combination of two channels' radiance [J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (周宁,朱迅,尹球.分裂窗辐射量线性组合反演陆地温度的影响因子分析.红外与毫米波学报), 2005, **24**(5): 381—385.
- [10] CHEN Liang-Fu, XU Xi-Ru. An Approximate Numeration and Error Estimation on Atmospheric Downward Radiance Effect in Thermal Infrared Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing* (陈良富,徐希孺.热红外遥感中大气下行辐射效应的一种近似计算与误差估计.遥感学报), 1999, **3**(3): 165—170.