

МЕТОДИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ ОТ ТОПЛИННИ ИНФРАЧЕРВЕНИ СПЪТНИКОВИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Иван Янев

e-mail: ivan.yanevmail@gmail.com

Ключови думи: температура на земната повърхност, градски топлинни острови, топлинни дистанционни изследвания, методи, алгоритми, LST, UHI, SUHI, TIR

Резюме: Извличането на температурата на земната повърхност е основен проблем при работа с топлинни спътникови изображения. В това изследване е направен опит за обзор относно разработените методи за изпълнението на тази задача. Разгледани са различни видове методи и алгоритми за определяне на температурата на повърхността по спътникови данни. Подробно са разгледани най-често използваните, тествани и доказани алгоритми в научната литература. Освен това са разгледани и различни възможности за корекция на излъчвателната способност на повърхността, която може да повлияе в значителна степен на точността на получените резултати. Изследването съдържа описание на целия процес за обработка на топлинни спътникови изображения, предоставяйки обобщен модел за преобразуване на първичните пикселни стойности в стойности за температурата на земната повърхност.

METHODS FOR LAND SURFACE TEMPERATURE ESTIMATION USING THERMAL INFRARED SATELLITE IMAGES

Ivan Yanev

e-mail: ivan.yanevmail@gmail.com

Keywords: Land Surface Temperature, Urban Heat Island, Thermal Infrared Remote Sensing, methods, algorithms, LST, UHI, SUHI, TIR RS

Abstract: Estimating surface temperature is the main issue in thermal image processing. In this paper, we tried to present a comprehensive overview on the methods developed for solving this task. A review of the different types of methods and algorithms for extraction of surface temperature from satellite data is performed. It has been extensively dealt with the most commonly used, tested and proven algorithms in the scientific literature. In addition, different options for emissivity corrections that may affect significantly the results are examined. The study describes the whole process of processing of thermal images, providing a generalized model for transformation of primary pixel values in values of surface temperature.

Въведение

Топлинните спътникови изображения имат предимството да предоставят гъста мрежа от времево-синхронизирани температурни данни на земната повърхност и градовете в частност (Steininger 1996). Наземните данни (данните от метеорологични станции) предлагат дълги времеви серии и висока времева разделителна способност, но ограничен пространствен обхват, което ги прави неефективни за анализиране на пространствения обхват на градските топлинни острови. Подвижните метеорологични наблюдателни станции в известна степен преодоляват това ограничение, но се губи синхронността на измерванията в обхвата на града, а изграждането на гъста мрежа от наблюдателни станции е финансово неефективно (Klok et al. 2012). Данните от топлинните дистанционни изследвания (ДИ) предоставят продължителност и непрекъснатост на наблюденията над целия град, поради което се явяват

уникален източник на информация за детайлно изследване на градски топлинни острови на повърхността и градският микроклимат. Ако се вземе предвид и предимството на времевите серии от наблюденията на спътниковите сензори, то спътниковите данни имат огромен потенциал за изследване на пространствения модел и динамиката на топлинната среда (Weng 2009).

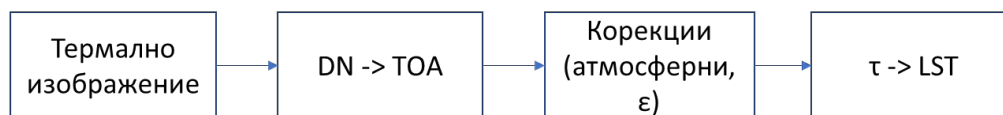
Сензорите на борда на спътника регистрират температурата на повърхността непосредствено изложена на моментното зрително поле (Instantaneous Field of View, IFOV) (Soux et al. 2004). Температурата на земната повърхност (Land Surface Temperature, LST) се дефинира като температура на „обвивката“ на повърхността (покриви, пътища, дървета, трева, вода и др.) (Qin & Karnieli 1999; Klok et al. 2012). Следователно основните продукти от работата на топлинните спътникови сензори са температура на земната повърхност (LST) и температура на морската повърхност (Sea Surface Temperature, SST). Те са основа за последващи анализи в множество различни области на човешкото познание и практика.

LST е широко използван параметър за анализиране на градския топлинен остров на повърхността (SUHI), което се отнася до топлината на повърхностния земен слой, тъй като променливата, която се анализира е температурата на повърхността, а не температурата на въздуха над нея (Voogt & Oke 2003). LST е важен параметър използван в множество дисциплини като: климатология (включително градска климатология), разкриване на топлинни и поглъщащи топлината острови (heat sink); хидрология, моделиране на температурата на водата; селско стопанство, мониторинг на растителността, мониторинг на вулкани, геотермален анализ, локализиране на пожари и изгорени площи, мониторинг на тръбопроводи, данни за влажността на почвата, наблюдение на индустриални площи (Zhan et al. 2013; Kuenzer et al. 2013).

1. Методи за определяне на температура на земната повърхност по спътникови данни

За разлика от директните наземни измервания на атмосферните топлинни острови, дистанционно регистрираните повърхностни топлинни острови представляват безконтактно измерване, което изисква да се отчете влиянието на атмосферата и енергийните свойства на повърхността, които влияят на излъчването и отразяването на електромагнитна радиация в работния спектрален участък на сензора (Voogt & Oke 2003). Всеки сензор регистриращ данни в топлинния диапазон записва информацията под формата на цифрови стойности (Digital numbers, DN). Обхвата на цифровите стойности зависи от възможността на сензора да разграничава определен брой яркостни нива (т.е. радиометричната му разделителна способност). Така например топлинният канал на Landsat ETM+ е 8 бита, което означава, че регистрира 256 (2^8) нива на яркост, а цифровата стойност на пикселите е от 0 до 255. При 12 битови изображения, каквито са тези от топлинните канали на ASTER и TIRS (Landsat 8), има 4096 цифрови стойности, а динамичният обхват на топлинните канали на MODIS (канали 31 и 32) е 16 бита = 65536 DN.

Извличането на LST от различни спътникови сензори изисква различни техники за обработка на изображенията. Въпреки това съществуват няколко основни стъпки образувачи модел валиден за всяко изображение заснето в топлинния диапазон:



Фиг. 1. Обобщен модел за извличане на температура на земната повърхност от топлинни изображения, където DN – цифрова стойност на пиксела, TOA – температурата регистрирана от сензора, ϵ – излъчвателна способност, τ – яркостна температура на повърхността, LST – кинетична температура на повърхността

Ако си представим, че атмосферата не оказва влияние върху лъчистата енергия достигаща до сензора то яркостната температура на повърхността може да бъде директно получена по смисъла на закона на Планк за радиацията от абсолютно черно тяло:

$$(1) \quad B_{\lambda}(T_s) = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_s}\right) - 1},$$

а кинетичната температура на повърхността ще получим според закона на Кирхов:

$$(2) \quad T_{rad} = \varepsilon^{1/4} * T_{kin}$$

Сигналът идващ от обекта към сензора, обаче бива модифициран при преминаването си през атмосферата, която едновременно абсорбира и излъчва топлинна енергия. Влиянието на атмосферата е породено предимно от съдържанието на водна пара и абсорбираната от нея топлинна енергия (Vlassova et al. 2014). Това налага прилагането на атмосферни корекции, което е и основната трудност при съставянето на алгоритми за извличане на LST от топлинни изображения, тъй като тези алгоритми изискват данни за някои атмосферни параметри, които в повечето случаи не се измерват директно от спътника (напр. Landsat). Същността на атмосферните корекции се изразява в изваждане на излъчената и отразена от атмосферата енергия движеща се с посока към сензора от общата регистрирана от сензора енергия, така че яркостната температура на земната повърхност може лесно да се изчисли (Qin et al. 2001).

В научната литература съществуват множество методи за обработка на топлинни изображения и извличане на стойности за температура на земната повърхност от тях. Можем да отличим три основни метода за преобразуване на регистрираните цифрови стойности в температура на земната повърхност – уравнение на радиационен пренос (Radiative Transfer Equation, RTE), едноканален алгоритъм (Mono-Window, MW) и многоканален алгоритъм (Split-Window, SW).

1.1. Уравнение на радиационен пренос

Най-подходящият метод за извличане на LST е, чрез прилагане на RTE (Radiation Transfer equation) към топлинния канал на сензора (Jimenez-Munoz et al. 2009):

$$(3) \quad L_{sensor,\lambda} = [\varepsilon_{\lambda} * B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) * L_{\lambda}^{\downarrow}] * \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{\uparrow}$$

където $L_{sensor,\lambda}$ е лъчистата енергия достигнала (измерена) от сензора (at sensor radiance или top of atmosphere (TOA) radiance), ε_{λ} е излъчвателната способност на повърхността (emissivity), $B_{\lambda}(T_s)$ е лъчистата енергия на черно тяло според закона на Планк, а T_s е LST, τ_{λ} е пропускливостта на атмосферата, L_{λ}^{\downarrow} е лъчистата енергия от атмосферата в посока към земята и L_{λ}^{\uparrow} е лъчистата енергия от атмосферата в посока към сензора. Трябва да се отбележи, че Уравнение (1) зависи не само от дължината на вълната, но и от ъгъла на заснемане (Sobrino et al. 2004).

Следователно преобразувайки уравнение (1) $B(T_s)$ за даден спектрален канал ще бъде:

$$(4) \quad B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{sen,\lambda} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau_{\lambda}(1 - \varepsilon_{\lambda})L_{\lambda}^{\downarrow}}{\tau_{\lambda}\varepsilon_{\lambda}}$$

където B по закона на Планк е

$$(5) \quad B_{\lambda}(T_s) = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_s}\right) - 1}$$

c_1 и c_2 са първа и втора радиационни константи със стойности съответно $1.19104 * 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ и $104 \text{ } \mu\text{m K}$.

Основният недостатък на този метод е необходимостта от наземно измерване на τ , L_d и L_u за спътниковите платформи, като например Landsat, които нямат инструменти за непосредствено измерване на тези атмосферни параметри. Измерването на терен, обаче рядко може да бъде приложимо, тъй като изисква това да се извърши в деня и часа на преминаване на спътника. Съществуват и други методи за получаването на тези атмосферни параметри, като например използването на глобални модели за атмосферното състояние като MODTRAN (Berk et al. 2011). Друга възможност са базите данни от AERONET (AErosol RObotic NETwork), NCEP/NCAR Reanalysis 1, ATMCOR (Atmospheric Correction Parameter Calculator).

1.2. Едноканален алгоритъм

Методите от този тип също използват алгоритми за изчисляване на LST само от един спектрален канал и извършват атмосферни корекции, базирайки се на RTE. Основният принцип

на този метод е да симулира спътникови измервания на няколко параметъра (температура, надморска височина, зенитен ъгъл на сензора, излъчвателна способност) за даден вертикален атмосферен профил използвайки RTM, като MODTRAN (Dash et al. 2001). Съществуват множество подобни алгоритми, на някои от които ще се спрем по-подробно.

а) Алгоритъм на Qin

Методите от този тип също използват алгоритми за изчисляване на LST само от един спектрален канал и извършват атмосферни корекции основани на RTE. Основният принцип на този метод е да симулира спътникови измервания на няколко параметъра (температура, надморска височина, зенитен ъгъл на сензора, излъчвателна способност) за даден вертикален атмосферен профил използвайки RTM, като MODTRAN (Dash et al. 2001). Съществуват множество подобни алгоритми, на някои от които ще се спрем по-подробно.

Според изследване на (Qin et al. 2001) до началото на 21 век изображенията от Landsat Thematic Mapper (TM) са били широко използвани за различни цели. Въпреки това използването на топлинния канал на сензора за извличане на LST и свързаните с него приложения е слабо застъпено поради сложността за получаване на качествени резултати при наличието само на един термален канал. До тогава изследванията са концентрирани в директно прилагане на цифровите стойности към реалните ситуации. Hurtado et al. (1996) разработват алгоритъм за извличане на LST от Landsat TM канал 6, който обаче включва няколко трудни за придобиване и в повечето случаи недостъпни параметъра.

С оглед минимизиране на изискуемите атмосферни параметри (Qin et al. 2001) разработват едноканален алгоритъм (Qin's Mono-Window algorithm, MW) за извличане на LST от TM6, който изисква само два атмосферни параметъра – пропускливост и средна температура:

$$(6) \quad T_s = \frac{1}{c} \{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D] * T_{sensor} - DT_a\}$$

където $a = -67.355351$ и $b = 0.458606$ са константи, T_{sensor} е яркостната температура измерено от сензора, T_a е средната температура на атмосферата, а C и D се калкулират съответно с уравненията:

$$(7) \quad C = \varepsilon\tau$$

$$(8) \quad D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau]$$

Където ε е излъчвателната способност на повърхността, а τ е общата пропускливост на атмосферата.

С цел да се определи средната температура T_a са симулирани данни за съдържанието на водна пара и атмосферната температура, чрез LOWTRAN 7. Изследването показва, че докато съдържанието на водна пара се влияе значително от състоянието на атмосферата, то отношението между съдържанието на водна пара на определена височина към общото съдържание на водна пара е почти еднакво за всички атмосферни профили. Следователно T_a може да се изчисли от общото съдържание на водна пара и температурата на въздуха близо до повърхността (T_o), съгласно състоянието на атмосферата (Qin et al. 2001):

$$(9) \quad T_a = 19.2704 + 0.91118 T_o \text{ (mid-latitude winter)}$$

$$(10) \quad T_a = 19.2704 + 0.91118 T_o \text{ (mid-latitude summer)}$$

$$(11) \quad T_a = 17.9769 + 0.91715 T_o \text{ (tropical atmosphere)}$$

Освен това Qin et al. (2001) изчисляват атмосферната пропускливост (τ) от съдържанието на водна пара (w) за два температурни профила:

Табл. 1. Изчисляване на атмосферната пропускливост (τ) за канал 6 на Landsat TM (по Qin et al. 2001)

Температурен профил	Водна пара (w) ($g\ cm^{-2}$)	Уравнение за пресмятане на пропускливостта	R ²	Стандартна грешка
Висока темп. (35C°)	0.4 – 1.6	$\tau = 0.974290 - 0.08007 w$	0.99611	0.002368
	1.6 – 3.0	$\tau = 1.031412 - 0.11536 w$	0.99827	0.002539
Ниска темп. (18C°)	0.4 – 1.6	$\tau = 0.982007 - 0.09611 w$	0.99463	0.003340
	1.6 – 3.0	$\tau = 1.053710 - 0.14142 w$	0.99899	0.002375

б) Алгоритъм на Jimenez-Munoz и Sobrino

Този генерализиран SC метод е също апроксимация на RTE с цел извличане на LST от един топлинен канал, но за атмосферни корекции се изискват единствено данни за съдържанието на водна пара в атмосферата. Алгоритъма е разработен през 2003 г. (Jiménez-Muñoz & Sobrino 2003) и обновен през 2009 г. (Jimenez-Munoz et al. 2009):

$$(12) \quad T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta$$

където ε е излъчвателната способност на повърхността, γ и δ са параметри зависими от функцията на Планк, а ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 са т. нар. атмосферни функции (AFs). Всички параметри от уравнението са спектрално зависими, което е пропуснато с цел опростяване. Тези параметри са дадени в следните уравнения:

$$(13) \quad \gamma \approx \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma L_{sen}}$$

$$(14) \quad \delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma}$$

където L_{sen} е лъчистата енергия измерена от сензора, T_{sen} е яркостната температура при сензора, $b_\gamma = c_2/\lambda$ (1277 K за L7B6; 1324 за B10 и 1199 K за B11; Aster B10 -),

ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 са т. нар. атмосферни функции (AFs), които отнасят τ , L_λ^\uparrow и L_λ^\downarrow към дадена стойност за съдържание на водни пари (w) и са изразени съответно за:

Landsat 7 ETM+:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0.09172w^2 - 0.09894w + 1.09659 \\ \psi_2 &= -0.71656w^2 - 0.64218w - 0.17183 \\ \psi_3 &= -0.03503w^2 + 1.54063w - 0.46434 \end{aligned}$$

Landsat 8 канал 10:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0.04019w^2 + 0.02916w + 1.01523 \\ \psi_2 &= -0.38333w^2 - 1.50294w + 0.20324 \\ \psi_3 &= 0.00918w^2 + 1.36072w - 0.27514 \end{aligned}$$

ASTER канал 13:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0.06524w^2 - 0.05878w + 1.06576 \\ \psi_2 &= -0.55835w^2 - 0.75881w + 0.00327 \\ \psi_3 &= -0.00284w^2 + 1.35633w - 0.43020 \end{aligned}$$

ASTER канал 14:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0.10062w^2 - 0.13563w + 1.10559 \\ \psi_2 &= -0.79740w^2 - 0.39414w - 0.17664 \\ \psi_3 &= -0.03091w^2 + 1.60094w - 0.56515 \end{aligned}$$

Повече информация относно атмосферните функции и получаване на описаните коефициенти е дадена в (Jimenez-Munoz et al. 2009; Jiménez-Muñoz et al. 2014; Jiménez-Muñoz & Sobrino 2010).

1.3. Многоканален алгоритъм

Многоканалният алгоритъм (Split Window, SW) използва два топлинни канала, обикновено в диапазона 10–12 μm . В основата му стои факта, че намаляването на лъчистата енергия, поради поглъщането от атмосферата, е пропорционално на разликата в лъчистата енергия от едновременното измерване в два спектрални канала, всеки от които е обект на различно количество поглъщане от атмосферата (McMillin 1975). В научната литература съществуват множество алгоритми базирани на този метод (Sobrino & Raissouni 2000; Becker & Li 1990; Price 1984; Coll et al. 1994; Caselles et al. 1997; Sobrino et al. 1993), а според изследвания базирани на сравнителни анализи (Zhao et al. 2009; Vera & Parra 2002) алгоритъма на Sobrino & Raissouni (2000) и по-късно обновен Sobrino et al. (2003) показва най-точни резултати:

$$(15) \quad T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\varepsilon$$

където T_i и T_j са яркостната температура при сензора за канали i и j (в Келвини), ε е средната излъчвателна способност на повърхността ($\varepsilon = 0.5(\varepsilon_i + \varepsilon_j)$), $\Delta\varepsilon$ е разликата в излъчвателната способност ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j$), w е общото съдържание на водна пара в атмосферата (в $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) и c_0 - c_6 са коефициенти, които се определят от симулирани данни за състоянието на атмосферата ($\tau, L_\lambda^\uparrow, L_\lambda^\downarrow$).

Табл. 2. Split-window коефициенти за извличане на LST от топлинни спътникови изображения (Jiménez-Muñoz et al. 2014; Jiménez-Muñoz & Sobrino 2007; Jimenez-Munoz & Sobrino 2008)

Канали	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	γ
L8B10-11	-0.2680	1.3780	0.1830	54.30	-2.238	-129.20	16.40	0.984
AST10-11	0.7495	-3.3293	0.8600	48.43	-1.02	101.48	-10.09	0.980
AST10-12	0.4502	-2.0028	0.0399	52.56	-1.61	58.04	-4.47	0.980
AST10-13	-0.3041	-1.5831	0.0212	44.86	12.26	48.94	2.41	0.930
AST10-14	0.0221	-1.6373	0.0044	32.15	26.14	41.08	8.37	0.890
AST11-12	0.2263	-3.7480	0.0386	55.67	-1.76	147.27	-13.97	0.960
AST11-13	0.2492	-1.6496	-0.0004	27.64	24.69	39.15	10.11	0.860
AST11-14	1.9207	-0.6246	0.0537	3.14	41.51	5.29	19.41	0.800
AST12-13	2.2479	0.0390	0.0496	13.59	30.61	-19.47	18.62	0.860
AST12-14	2.7340	0.6678	0.0593	10.83	27.45	-42.96	16.46	0.880
AST13-14	0.2665	4.8257	0.5816	35.01	1.33	-282.25	33.77	0.960
TMOD11-12	-0.0040	2.6250	0.4240	41.40	0.04	-201.00	26.60	0.981
AMOD11-12	0.0120	2.6010	0.4240	41.30	0.14	-199.00	26.30	0.980

2. Корекции на излъчвателната способност на повърхността

От гореописаните алгоритми ясно личи, че за всички методи за калкулиране на LST и атмосферни корекции е необходима информацията относно излъчвателната способност на повърхността (ε , emissivity). Законът на Планк определя енергията излъчена от абсолютно черно тяло, но в действителност подобни обекти в природата са изключително малко, а повечето обекти излъчват по-малко от предвиденото от тяхната кинетична температура. Този факт се взема предвид от ε . Излъчвателната способност представлява отношението между лъчистата енергия на даден обект при определена температура и лъчистата енергия на абсолютно черно тяло при същата температура (Kuenzer & Dech 2013)

$$(16) \quad \varepsilon = \frac{M_r}{M_b}$$

където M_r е енергията излъчена от обекта, а M_b е енергията излъчена от черно тяло.

Излъчвателната способност се влияе от множество фактори (цвят, грапавост на обекта, съдържание на влага, плътност, дължина на вълната, зрителен ъгъл на сензора), но не е температурно зависима (Hall 2007; Flynn et al. 2001). Влиянието на излъчвателната способност върху спътниковите измервания може да бъде обобщено в три категории (Prata 1993):

- ε води до редуциране на излъчената от повърхността енергия;
- „нечерните“ тела отразяват енергия;
- анизотропията присъща на отразяването и излъчването може да намали или увеличи общото количество енергия от повърхността.

Като правило грешка от 0.01 ε води до температурна грешка от порядъка на 0.5-1 K. Всъщност грешката в ε зависи от температурата на обекта и ε на обекта. С по-малък ε може да се достигне до температурна грешка в порядъка на 10 K. За типични типове земно покритие промяна с 0.01 ε води до температурна грешка от 0.7-1 °C, но абсолютната температурна грешка може да достигне до 25 °C, а за метална повърхност дори до °100 (Kuenzer & Dech 2013).

Съгласно (Dash 2005) съществуват множество методи за оценка на излъчвателната способност, като: reference channel method (Kahle, Madura, and Soha, 1980); метод на нормализирана излъчвателна способност (normalized emissivity method, NEM) (Gillespie, 1985); метод на отношение между спектрални канали (spectral-ratio method) (Watson, 1992); алфа остатъци (alpha residuals) (Kealy and Gabell, 1990, Kealy and Hook, 1993); спектрални индекси в термалния инфрачервен диапазон (thermal infrared spectral indices) (Becker and Li, 1990); отделяне на температура-излъчвателна способност (temperature emissivity separation) (TES) максимална-минимална разлика на излъчвателната способност (maximum-minimum difference of

emissivity) (Gillespie, Rokugawa, Hook, Matsunaga, and Kahle, 1996, Gillespie, Rokugawa, Matsunaga, Cothorn, Hook, and Kahle, 1998); чрез използване на NDVI (van de Griend and Owe, 1993, Valor and Caselles, 1996); метод базиран на класификация (classification-based emissivity method) (Snyder, Wan, Zhang, and Feng, 1998a, Snyder and Wan, 1998b).

2.1. Изчисляване на излъчвателната способност по дефиниция

Излъчвателната способност може да се получи, чрез директно прилагане на дефиницията за ε ($\varepsilon = M_r/M_b$) или, чрез прилагане на закона на Кирхов ($\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$, където ρ_λ е отразената от обекта радиация).

2.2. Метод с прагови стойности на NDVI

Този метод се базира на зависимостта между количеството растителност в един пиксел от изображението и излъчвателната способност на пиксела, допускайки че дадено изображение е съставено от два компонента – почва и растителност (Brunsell & Gillies 2002). NDVI се дефинира, като функция на повърхностното отражение в червения и инфрачервения спектрални участъци (Rouse et al. 1974). Van de Griend & Owe (1993) първи описват логаритмична взаимовръзка между NDVI и ε , след което се изследва взаимовръзката между NDVI и процентното растително съдържание (Caselles et al. 1997; Gillies et al. 1997):

$$(17) \quad NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

където ρ_2 и ρ_1 са измереното отражение съответно в инфрачервения и червения диапазон на спектъра.

$$(18) \quad P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2$$

където P_v е пропорцията на растителна повърхност (vegetation proportion), а $NDVI_{max}$ и $NDVI_{min}$ са прагови стойности (NDVI thresholds).

Sobrino et al. (2004) предлагат следните прагови стойности и формула за изчисление на ε в диапазона $0.2 < NDVI < 0.5$:

Табл. 3. Стойности на излъчвателната способност според праговите стойности на NDVI, където ε_v и ε_s са излъчвателната способност съответно на растителност и почва

NDVI прагова стойност	Тип повърхност	Излъчвателна способност (ε)
< 0.2	Гола почва	0.97
0.2 – 0.5	Смес от гола почва и растителна повърхност	$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d_\varepsilon$
> 0.5	Растителна повърхност	0.99

Терминът d_ε от уравнение (3) включва ефекта от геометричното разпределение на повърхностите.

$$(19) \quad d_\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_v)F\varepsilon_v$$

където F е геометричен фактор, чиято средна стойност е 0.55 (Sobrino et al. 1990). Следователно LSE може да бъде изчислена, като:

$$(20) \quad \varepsilon = mP_v + n$$

където

$$(21) \quad m = \varepsilon_v - \varepsilon_s - (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v$$

$$(22) \quad n = \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v$$

Както се вижда от горните уравнения са необходими данни за стойностите на излъчвателната способност на почвата и растителността. Тези стойности могат да бъдат измерени на терен, да се използват данни от научната литература за измерени стойности или да се използва спектралната библиотека от ASTER (Baldrige et al. 2009).

Връщайки се към Уравнение (1) е важно да се отбележи, че за получаването на коректни стойности за ε е необходимо да се използват стойности за отражението от повърхността, вместо директната стойност регистрирана от сензора (at-sensor или TOA reflectance), т.е. трябва да се премахне влиянието на атмосферата.

2.3. Метод базиран на класификация

Този метод се състои в класифициране на изображението и предаване на стойност ε за всеки клас. Стойността за излъчвателна способност може да се измери на терен, да се използват известни (вече измерени) стойности от научната литература или да се използват спектрални библиотеки, като тези от ASTER (URL: <http://speclib.jpl.nasa.gov/>) и MODIS (URL: <http://www.icesb.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>). Имайки предвид, че ε се влияе от множество фактори (цвят, влагосъдържание, ъгъл на измерване и т.н.), коментирани по-горе, използването на този метод изисква измерване на ε при същото състояние на обекта, в което се е намирал в момента на заснемане (Flynn et al. 2001).

2.4. Отделяне на температура – излъчвателна способност

Алгоритъмът (Temperature – Emissivity Separation, TES) е разработен от Gillespie et al. (1998) за данните събрани от ASTER с цел създаване на стандартен продукт за LST и ε , след което е модифициран със същата цел за MODIS (Hulley 2013). TES алгоритъма комбинира предимствата на няколко метода съставлящи го като отделни модули – NEM (Normalized Emissivity Method) модул, Ratio модул, MMD (Maximum–Minimum Difference) модул и модул за оценка на качеството (Wang 2012). Въпреки, че TES метода показва задоволителни резултати, според официалната документация на алгоритъма Gillespie et al. (1999), грешката в ε е приблизително ± 0.015 , а получената чрез него LST $\approx \pm 1.5$ K) той може да бъде приложен само при наличието на достатъчен брой канали в топлинния диапазон (4-5).

2.5. Спектрални индекси на топлинния инфрачервен канал

Този метод (Thermal infrared spectral indices, TISI) изчислява математическото отношение между стойностите на лъчистата енергия от различни канали (radiance ratios), което е независимо от LST и зависимо от относителната излъчвателна способност (ε ratios) (Dash 2005). Използването на този метод обаче може да бъде ограничено от няколко изисквания (Yu et al. 2014): 1) необходими са атмосферни корекции и съчетание между данни в средния (MIR) и топлинния (TIR) инфрачервен диапазон; 2) повърхността трябва да бъде заснета при еднакви условия (например зрителен ъгъл) през деня и през нощта; 3) трябва да бъде извършено точно привързване (co-registration) на изображенията. Въпреки това, допускайки, че относителната ε за деня и нощта не се различава, метода е приложим при наличието на два или повече канала (Dash 2005).

За да се оцени точността на различните методи са необходими експериментални наземни данни за големи хомогенни площи (Dash et al. 2001). Понеже ние не разполагаме с измервания на излъчвателната способност, ще използваме готови продукти или спектрални библиотеки.

Заклучение

Разработените до момента методи за извличане на температура на земната повърхност от топлинни спътникови изображения до голяма степен са продиктувани от появата и развитието на платформите за дистанционно заснемане на земната повърхност и на носената от тях апаратура. Пространствената, времева и радиометрична разделителна способност на заснемащата апаратура, броя на спектралните канали в топлинния диапазон, многоканалното заснемане са основни фактори, влияещи върху алгоритмите за извличане на температурата на земната повърхност.

Днес съществуват множество различни топлинни сензори, и въпреки че имат по-добра пространствена разделителна способност (ПРС) спрямо най-ранните топлинни спътникови данни (7-8 km ПРС), те все още не покриват изискванията на потребителите. Понастоящем най-високата ПРС в термалния диапазон е 60 m получена от сензора Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) на борда на Landsat 7. Тя е приложима за множество изследвания на най-различна тематика, и въпреки че това са най-често използваните дистанционни топлинни данни все още има необходимост от подобряване на ПРС. Това налага необходимостта и от непрекъснато подобряване на методите за извличане на температура на повърхността от топлинни спътникови изображения.

Литература:

1. Baldridge, A.M. et al., 2009. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), pp. 711–715. DOI: 10.1016/j.rse.2008.11.007.
2. Becker, F. & Li, Z.-L., 1990. Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 11(3), pp. 369–393. DOI: 10.1080/01431169008955028.
3. Berk, A. et al., 2011. MODTRAN 5.2.1 user's manual., pp. 1–69.
4. Brunsell, N. & Gillies, R.R., 2002. Incorporating surface emissivity into a thermal atmospheric correction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(12), pp. 1263–1269.
5. Caselles, V., Coll, C. & Valor, E., 1997. Land surface emissivity and temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 18(5), pp. 1009–1027. DOI: 10.1080/014311697218548.
6. Coll, C. et al., 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 15(1), pp. 105–122. DOI: 10.1080/01431169408954054.
7. Dash, P., 2005. Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval from Satellite Measurements. *Meteorologie*, p. 99.
8. Dash, P. et al., 2001. Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: Physics, theoretical limitations and current methods. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 29(1–2), pp. 23–30.
9. Flynn, L.P., Harris, A.J.L. & Wright, R., 2001. Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 78(1–2), pp. 180–193.
10. Gillespie, A. et al., 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36(4), pp. 1113–1126.
11. Gillespie, A.R. et al., 1999. Temperature / emissivity separation algorithm theoretical basis document , Version 2 . 4 . , pp. 1–64.
12. Gillies, R.R., Kustas, W.P. & Humes, K.S., 1997. A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface e. *International Journal of Remote Sensing*, 18(15), pp. 3145–3166. DOI: 10.1080/014311697217026.
13. Van de Griend, A.A. & Owe, M., 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), pp.1119–1131. DOI: 10.1080/01431169308904400.
14. Hall, P.P., 2007. Thermal Infrared Remote Sensing. , pp.1–39.
15. Hulley, G., 2013. A Water Vapor Scaling (WVS) Method for Improving Atmospheric Correction of Thermal Infrared (TIR) Data. In C. Kuenzer & S. Dech, eds. *Thermal Infrared Remote Sensing SE - 13*. Remote Sensing and Digital Image Processing. Springer Netherlands, pp. 253–265. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6_13.
16. Hurtado, E., Vidal, A. & Castelles, V., 1996. Comparison of two atmospheric correction methods for Landsat TM thermal band. *International Journal of Remote Sensing*, 17(2), pp. 237–247. DOI: 10.1080/01431169608949002.
17. Jimenez-Munoz, J.-C. & Sobrino, J.A., 2008. Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval From Low-Resolution Thermal Infrared Sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4), pp. 806–809. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4656465>
18. Jimenez-Munoz, J.C. et al., 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), pp. 339–349.
19. Jiménez-Muñoz, J.C. et al., 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11(10), pp. 1840–1843. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6784508>.
20. Jiménez-Muñoz, J.C. & Sobrino, J.A., 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 109, p. 8112.
21. Jiménez-Muñoz, J.C. & Sobrino, J. a., 2010. A single-channel algorithm for land-surface temperature retrieval from ASTER data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(1), pp. 176–179.
22. Jiménez-Muñoz, J.C. & Sobrino, J. a., 2007. Feasibility of retrieving land-surface temperature from ASTER TIR bands using two-channel algorithms: A case study of agricultural areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(1), pp. 60–64.
23. Klokk, L. et al., 2012. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, pp. 23–29. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.01.009.

24. Kuenzer, C. et al., 2013. Spaceborne Thermal Infrared Observation – An Overview of Most Frequently Used Sensors for Applied Research. In C. Kuenzer & S. Dech, eds. *Thermal Infrared Remote Sensing SE - 7. Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer Netherlands, pp. 131–148. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6_7.
25. Kuenzer, C. & Dech, S., 2013. Theoretical Background of Thermal Infrared Remote Sensing. In C. Kuenzer & S. Dech, eds. *Thermal Infrared Remote Sensing SE - 1. Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer Netherlands, pp. 1–26. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6_1.
26. McMillin, L.M., 1975. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, 80(36), pp.5113–5117. DOI: 10.1029/JC080i036p05113.
27. Prata, A.J., 1993. Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D9), pp. 16689–16702. DOI: 10.1029/93JD01206.
28. Price, J.C., 1984. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D5), pp. 7231–7237. DOI: 10.1029/JD089iD05p07231.
29. Qin, Z. & Karnieli, A., 1999. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(12), pp. 2367–2393.
30. Qin, Z., Karnieli, A. & Berliner, P., 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), pp. 3719–3746.
31. Rouse, J.W., Haas, R.H. & Schell, J.A., 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*, College Station: Texas A and M University.
32. Sobrino, J.A., Caselles, V. & Becker, F., 1990. Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 44(6), pp.343–354. DOI: 10.1016/0924-2716(90)90077-O.
33. Sobrino, J.A., Caselles, V. & Coll, C., 1993. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature. *Il Nuovo Cimento C*, 16(3), pp.219–236. DOI: 10.1007/BF02524225.
34. Sobrino, J.A., El Kharraz, J. & Li, Z.-L., 2003. Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(24), pp. 5161–5182. DOI: 10.1080/0143116031000102502.
35. Sobrino, J.A. & Raissouni, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), pp. 353–366. DOI: 10.1080/014311600210876.
36. Sobrino, J. a., Jiménez-Muñoz, J.C. & Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), pp. 434–440.
37. Soux, A., Voogt, J. & Oke, T.R., 2004. A model to calculate what a remote sensor “sees” of an urban surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 111(1), pp. 109–132.
38. Steininger, M.K., 1996. Tropical secondary forest regrowth in the Amazon: age, area and change estimation with Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(1), pp. 9–27. DOI: 10.1080/01431169608948984.
39. Vera, L. & Parra, J.C., 2002. Comparative Analysis of Split-Window Algorithms for Estimating Soil Temperature. *System*, pp. 35–39.
40. Vlassova, L. et al., 2014. Assessment of methods for land surface temperature retrieval from landsat-5 TM images applicable to multiscale tree-grass ecosystem modeling. *Remote Sensing*, 6(5), pp.4345–4368.
41. Voogt, J.A. & Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), pp. 370–384. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
42. Wang, S.L.L.B.T.-A.R.S. ed., 2012. Chapter 8 - Land-Surface Temperature and Thermal Infrared Emissivity. pp. 235–271. DOI: 10.1016/B978-0-12-385954-9.00008-3.
43. Weng, Q., 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp. 335–344. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007 [Accessed November 5, 2014].
44. Yu, X., Guo, X. & Wu, Z., 2014. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 6(10), pp. 9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829.
45. Zhan, W. et al., 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats. *Remote Sensing of Environment*, 131, pp. 119–139. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.014
46. Zhao, S. et al., 2009. Comparison of two split-window methods for retrieving land surface temperature from MODIS data. *Journal of Earth System Science*, 118(4), pp. 345–353.