

РАДИОМЕТРИЧНА ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НА ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРИ

Валентин Атанасов, Деница Борисова, Георги Желев, Христо Лукарски

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: vatanassov@space.bas.bg*

Ключови думи: *видеоспектрометри, радиометрична характеристика, алгоритми*

Резюме: *В работата са описани основни характеристики на видеоспектрометрични прибори влияещи върху радиометричната точност на инструментите, посочени са методите за тяхното определяне и са представени са част от резултатите, получавани в процеса на лабораторна характеристика на видеоспектрометри с висока спектрална и пространствена разделителна способност. Резултатите са обобщени в предложен примерен алгоритъм за радиометрична характеристика на видеоспектрометрични прибори.*

RADIOMETRIC CHARACTERIZATION OF IMAGING SPECTROMETERS

Valentin Atanassov, Denitsa Borisova, Georgi Jeleu, Hristo Lukarski

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: vatanassov@space.bas.bg*

Keywords: *imaging spectrometers, radiometric characteristics, procedures for radiometric characterization*

Abstract: *In this work are described basic radiometric characteristics of imaging spectrometers defining radiometric accuracy of the instruments and are referred the methods for their determination. A part of the results obtained in the process of laboratory imaging spectrometers characterization are presented. The results are summarized in a proposed algorithm for radiometric characterization of imaging spectrometer devices.*

1. Въведение

Видеоспектрометрите се установиха като основен инструмент за изследване на повърхността на Земята. Високата спектрална и пространствена дименсионалност на тези прибори прави възможно отделяне на тесни спектрални линии или част от области от електромагнитния спектър, присъстващи в повечето обекти от изследваната повърхност. Такава мощна възможност, която позволява един задълбочен анализ на физическите, биологични и биофизични процеси, а също така и на динамиката на тези процеси, е особено важна за приложенията на дистанционните изследвания [1,2].

Едни от най-важните характеристики с които се описват подобни прибори са характеристиките, свързани с определяне на радиометричните му показатели. Без подходящи приети методи за отнасяне на измерените фотони към стойностите на радиацията на входа на прибора снетите данни не биха могли да бъдат използвани от научната и управленчестата общности. Методите, отнасящи се до тези количествени съотношения включват калибрационния процес като връзка между тези величини. Терминът калибриране е използван често като един по общ термин за означаване на комплексните процеси за характеристика, калибриране и потвърждаване (validation) на основните технически характеристики на прибора. Характеризационният процес предполага установяване на отклика на инструмента по отношение на пристигащата на входа на сензора радиация [1,2,3]. Необходимо е да се отбележи, че този процес не може да бъде използван за отстраняване или компенсирание на евентуални не добри технически характеристики на системата, детерминирани от етапите на конструиране. Крайният резултат от този процес е получаване на един относително независим от сензора сигнал, който може да бъде използван за бъдещи анализи в спектроскопията.

2. Основни характеристики и параметри, определящи радиометричната точност на видеоспектрометри

Процедурите за радиометрична характеристика, извършвани в лабораторни условия по време на подготовката на приборите за привеждането им в работен режим позволяват детерминирането на основни характеристики на видеоспектрометрите като чувствителност и линейност (нелинейност) на характеристиката на преобразуване светлина-сигнал, неравномерност на отговорите на пикселите, и др.

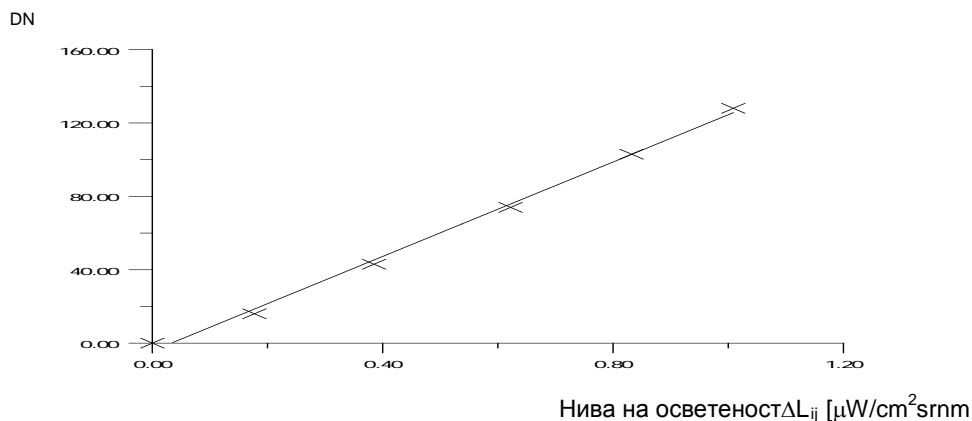
2.1 Линейност на характеристиката на преобразуване светлина-сигнал

Характеристиката на преобразуване светлина-сигнал:

$$(1) \quad S_{ij}(\Delta\lambda) = \Delta U_{ij} / \Delta L_{ij}(\Delta\lambda) \quad \text{при } \Delta\lambda = \text{const},$$

определя зависимостта на отговора на прибора като функция от интензитета на попадащото на входа на прибора лъчение $\Delta L_{ij}(\Delta\lambda)$, при $\Delta\lambda = \text{const}$. Съществуват няколко метода за определяне на линейността на характеристиката на преобразуване светлина-сигнал на видеоспектрометри. Един от тях е този, при който се използва т. нар. инверсен квадратичен закон, тъй като пристигащото лъчение се изменя обратно пропорционално на корен квадратен от разстоянието.

Друг по-мощен метод предполага тази радиометрична характеристика да се осъществи чрез въвеждане в зрителния ъгъл на инструмента на сигнал от калибриран радиометричен източник. При определяне на линейността на отговора на прибора в лабораторни условия като калибриран входен източник се използва фотометрична сфера. Чувствителността $S_{ij} = U_{ij} / L_{ij}$, като отношение на изходния сигнал от сензора за определено входно въздействие се определя чрез измерване на тъмнинния ток и корекция отместване



Фиг. 1. Характеристика на преобразуване светлина-сигнал на видеоспектрометър за различни нива на осветяване и време на интегриране $\tau_i = 80\text{ms} = \text{const}$, грешка при линеаризацията 0.31%

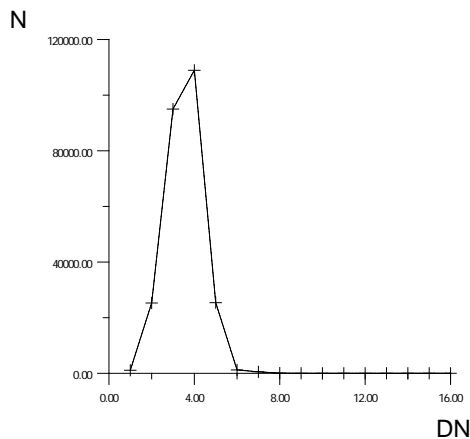
на изходните данни U_{ij} . Резултантното отношение между L и U включва неравномерността на отклика на пикселите на CCD сензора. Процесът на измерване се извършва за няколко периода, включващи измерване на тъмнинния ток на CCD детектора, пет нива на осветеност на фотометричната сфера (фиг. 1), осигуряващи контролни данни $U_{c_{ij}}$, и се снемат данните за отклика на сензора. По този начин шестте контролни стойности (една за тъмнинно ниво и 5 светлинни нива) дават възможност за проверка на чувствителността в целия динамичен диапазон (проверка на линейността посредством метода на суперпозиция чрез различни нива на осветеност).

2.2. Характеризация на тъмнинния ток

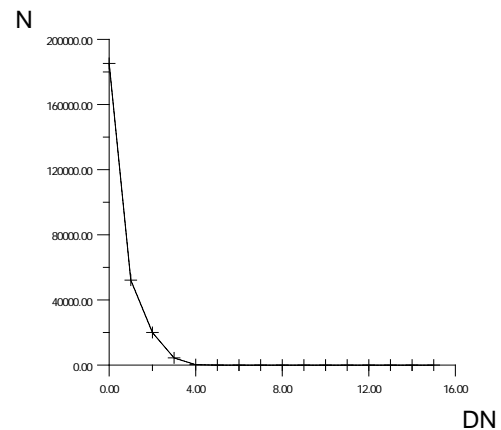
Процедурите по характеристика на тъмнинния ток започват по време на конструиране, като включват набелязване и изпълнение на методи за лабораторна характеристика, а също и предвиждане на методи за характеристика в експлоатационния период на инструмента.

Тъмнинният ток за всеки пиксел U_{ij}^c е относително постоянен при определена температура и режим на работа на прибора, където се проявява като отместване на нивото на

сигнала (офсет) за този пиксел. От друга страна, тъмният ток варира пространствено по площта на сензора. Посредством снемане на поредица от изображения



Фиг. 2. Хистограма на разпределение на нива на тъмнинния ток за режим на работа на видео-спектрометър с време на интегриране $t_i = 80\text{ms}$



Фиг. 3. Хистограма на разпределение на нива на тъмнинния ток на компонентата със случаен характер, получена след корекция на тъмнинния ток

при липса на осветление (на тъмно) се получава средна стойност на тъмнинния ток за всеки пиксел за дадена температура (фиг.2). Изваждайки това опорно изображение на тъмнинния ток от последващо снето изображение на реални обекти се елиминира до голяма степен влиянието на този ток. Това е т. нар. корекция на тъмнинния ток.

За съжаление това негово влияние не може да бъде изцяло отстранено.

Освен относително постоянната компонента U_{ij}^{cc} тъмнинният ток U_{ij}^c има и една втора, случайно варираща компонента ΔU_{ij}^c ,

$$(2) \quad U_{ij}^c = U_{ij}^{cc} + \Delta U_{ij}^c,$$

която може да се апроксимира като квадратен корен от колекционирания в пиксела заряд [7], определящ тъмнинния ток (фиг. 3).

2.3. Динамичен диапазон

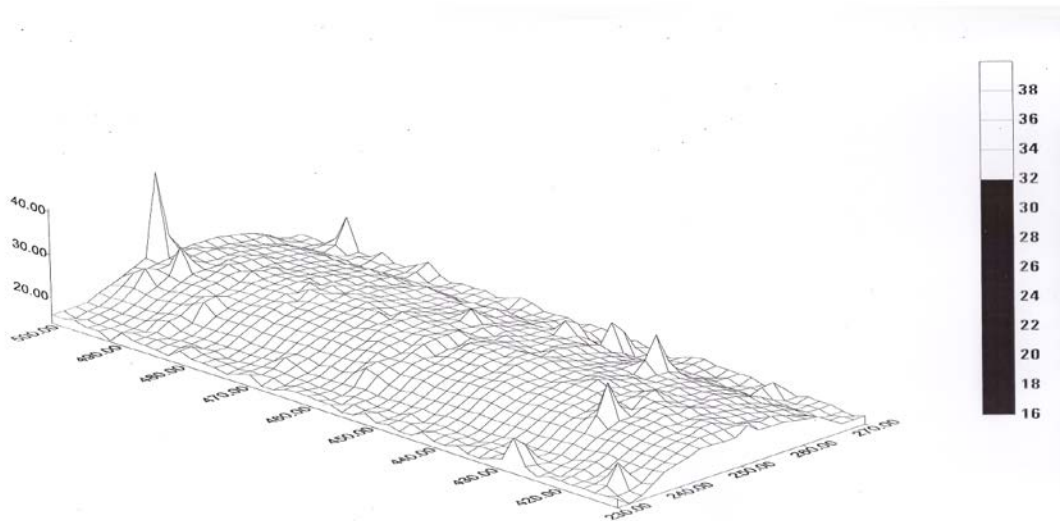
Съществуват много определения за динамичния диапазон в Дистанционните изследвания. Според едно от тях [5] динамичният диапазон на прибора може да се дефинира като отношение на стойността сигнала на насищане U^s и стойността на шума U^n и отговаря на отношението сигнал/шум (SNR). Обикновено нивото на шума U^n се детерминира от тъмнинния ток на сензора U^c . Следователно:

$$(3) \quad \text{SNR} = U^s U^n$$

На практика динамичният диапазон се определя не само от стойностите на горните две величини, но се ограничава и от броя на нивата на квантоване на изходния сигнал на прибора [6].

2.4 Неравномерност на отговорите на пикселите

Резултантното отношение между U_{ij} и L_{ij} от $S_{ij}(\Delta\lambda) = \Delta U_{ij} / \Delta L_{ij}(\Delta\lambda)$, при $\Delta\lambda = \text{const}$, $\Delta L_{ij}(\Delta\lambda) = \text{const}(1)$ за всички пиксели изразява т. нар. неравномерност на отговорите на пикселите PRNU (photo response nonuniformity) на CCD матрицата (фиг.4). Следователно, след извършване на корекция на тъмнинния ток и офсет корекция, сигналът трябва да бъде коригиран от неравномерности на отговорите на пикселите, особено от тези, придизвикани от измененията за времето на функциониране на конкретната реализация на прибора.



Фиг. 4. 3-D диаграмана разпределение по нива на пикселна нееднородност

3. Уравнение на калибриране

Измерените стойности на лъчението, попадащо на входа на прибора, могат да бъдат описани като функция **f1**:

$$(4) \quad DN = f1[L_1, L_2, G_1, G_2, ET, DF],$$

където: DN – измерена стойност от сензора (в цифрови единици);

L_1 – полезна стойност на лъчението;

L_2 – паразитна стойност на лъчение;

G_1 – коефициент на предаване на системата (отговор на системата, отнасящ се до полезния сигнал);

G_2 – коефициент на предаване на системата (отговор на системата, отнасящ се до паразитния сигнал);

ET – време за експозиция на CCD сензора;

DF – измерена стойност на тъмнинния ток (въведен затвор на сензора).

Това уравнение е валидно за всеки в пространствено/спектрално направление пиксел.

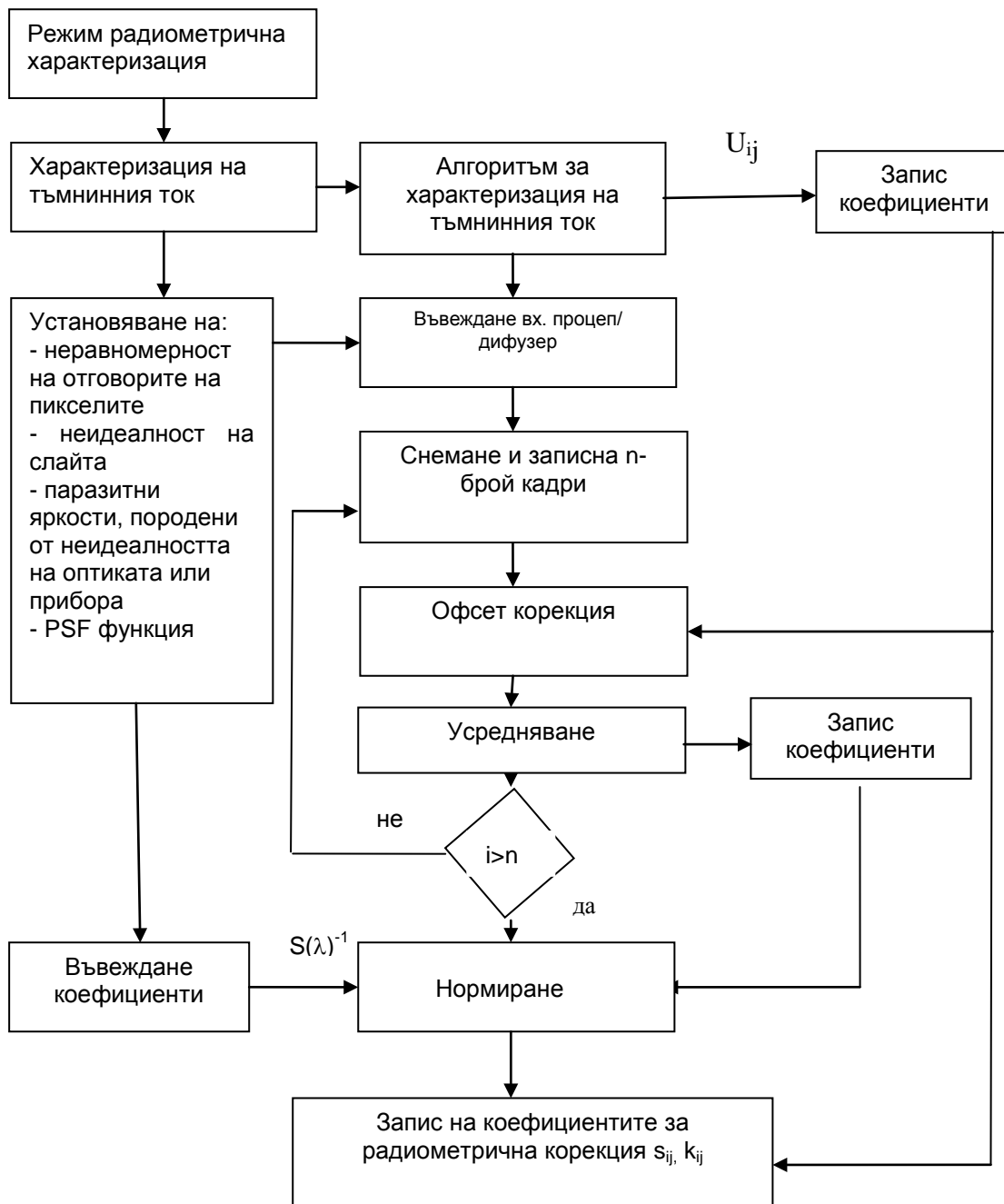
Също така калибрационният процес поддържа корекции на неравномерностите по отношение на:

- пикселна неравномерност на отговорите
- неидеалност на слайта
- паразитни яркости, породени от неидеалността на оптиката или прибора

С помощта на калибрационните константи суровите измерени данни могат да бъдат преобразувани в радиометрични единици посредством преобразуване на уравнение (4) във вида:

$$(5) \quad L_1 = f2 [DN, DF, ET, G_1, G_2]$$

Горното уравнение е валидно за всеки член на реалната матрица от $m \times n$ елемента [4].



Фиг. 5. Алгоритъм за радиометрична характеристика на видеоспектрометри в лабораторни условия

4. Алгоритъм за радиометрична характеристика

Основните процедури за радиометрична характеристика на видеоспектрометрични прибори, разгледани по горе, могат да бъдат описани чрез показания на фиг. 5 алгоритъм. Последователността на извършването им, съгласно него, може да бъде систематизирана по следния начин:

- въвеждане на затвора;
- извършване на характеристика на тъмнинния ток, получаване на усреднени коефициенти за корекция на тъмнинния ток за всеки индивидуален пиксел;
- въвеждане на дифузер;
- извършване на радиометрични характеристични измервания, като n брой кадри се снимат и усредняват със съответните корекции с коефициентите за тъмнинния ток за всеки индивидуален пиксел;
- определяне на коефициентите на неравномерност на отговорите на пикселите s_{ij} ;

- изчисляване на коефициентите за нормализиране на отговорите на пикселите a_{ij} ;
- запис и съхранение на получените коефициенти.

5. Изводи

1. Валидирането на радиометричните характеристики на видеоспектрометрични прибори може да бъде осъществено пълноценно в лабораторни условия чрез изпълнение на подходящи процедури за характеризация, описани с предложения в работата алгоритъм.

2. Радиометричната характеризация на видеоспектрометрични прибори, проведена в лабораторни условия, предоставя възможности за планиране на методи и процедури за изпълнение в работен режим на приборите. Прилагането на тези процедури предполага снемане на допълнителен обем данни, които да бъдат използвани в предварителната обработка и по този начин да бъде повишена точността и достоверността на получаваните данни.

Литература:

1. Slater, Ph., N. Remote Sensing. Optics and Optical Systems. Addison-Wesley Publishing Company. 1980.
2. Atanassov, V.I., B. B. Peev, N.N. Vassilev, V.K.Vassilev Hyperspectral Imaging Spectrometer as a Power Tool for Ecological Monitoring. Journal of Balkan Ecology, vol.4, № 2, 2001. pp.168-170.
3. Атанасов, В., Б Пеев, Н. Василев, В. Василев. Спектрална и пространствена разделителна способност на модел на видеоспектрометър. Седма национална конференция "Съвременни проблеми на слънчево-земните въздействия", София, ноември 2000, Сб. доклади, стр. 151-154.
4. Hyperspec VNIR. Calibratio Summary. Headwall Photonics. May 2013.