

## КОРИГИРАНЕ НА ГРЕШКИТЕ В СПЕКТРОМЕТРИЧНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

**Валентин Атанасов<sup>1</sup>, Деница Борисова<sup>1</sup>, Георги Желев<sup>1</sup>,  
Кирил Алексиев<sup>2</sup>, Петя Копринкова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

<sup>2</sup>Институт по информационни и комуникационни технологии – Българска академия на науките  
e-mail: vatanassov@space.bas.bg

**Ключови думи:** дистанционни изследвания, видеоспектрометрични системи, неопределености, грешки, корекции на грешките.

**Резюме:** В работата се разглежда проявлението на грешките в спектрометричните измервания като функция от различните източници на генериране. Направено е разделяне на грешките в зависимост от източниците, което позволява декомпозиране и набелязване на отделни методи за намаляване и елиминиране на отделните съставни. Предложени са алгоритми за корекция на грешките, позволяващи оптимизация на характеристиките на прибора в етапите на разработване и производство и планиране на методи и процедури за намаляване или елиминиране на отделните съставлящи.

## ERROR CORRECTIONS IN THE SPECTROMETRIC MEASUREMENTS

**Valentin Atanasov<sup>1</sup>, Denitza Borisova<sup>1</sup>, Georgi Jelelev<sup>1</sup>,  
Kiril Alexiev<sup>2</sup>, Petya Koprinkova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Institute of Information and Communication Technologies – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: vatanassov@space.bas.bg

**Keywords:** remote sensing, videospektrometrichni systems uncertainties, errors, corrections of errors.

**Abstract:** In the paper are examined the appearance of errors in the spectrometric measurements as a function of the various sources of generation. A error partitioning is made depending on the sources, allowing decomposition and identification of separate methods for the reduction and elimination of the component. Error correction algorithms are proposed, allowing optimization of the device characteristics in the stages of development and production and are planning methods and procedures to reduce or eliminate the separate components.

### **Въведение**

Корекцията на грешките при спектрометричните измервания е изключително сложна задача. Самият процес на оценка и коригиране на грешките започва още с конструирането и изработването на спектрометричен прибор. Включва последователно етапите на калибриране, верификация и валидиране на характеристики и данни. Тези етапи продължават и след изработването на прибора през така наречения експлоатационен период. През този период корекцията на грешките се осъществява на нови два етапа – в лабораторни условия и на терен (или на борда на носителя) по време на работа на прибора. От казаното може да се направи заключение, че процесите на корекция или по общо казано, предварителна обработка, съпътстват целият период на съществуване на прибора.

## Проявление на грешките

Грешките при спектрометричните измервания имат разнороден произход и проявление и методите за корекция зависят от източника и характера на грешките. Тези важни обстоятелства определят изискване за детайлно познаване на физичните условия при извършване на измерването и точно определяне на характеристиките на измервателния прибор. Важността на познаването на произхода и проявлението на грешките се обуславя от факта, че тези обстоятелства са свързани помежду си с определени закономерности. Най-общо казано източниците на грешки предопределят и характера на проявление на грешките.

Така например, обикновено **адитивните грешки** се формират предимно на входа на измервателния прибор, така че към тази група могат да бъдат причислени грешките, предизвикани от външни за прибора източници. Това са, според класификацията от [1], фигура 2:

- вариации в характеристиките на източника на излъчване  $\Delta I_0$ ;
- промени в оптичната проводимост на атмосферата, предизвикани от вариации в температура, налягане, количество водни пари и разпределение на молекули на газове, влияещи на ефектите на поглъщане, отражение, разсейване  $T_{d,i}$   $T_{d,dif}$   $\rho_{g,adj} W_a$ ;
- вариации в оптичното отражение на изследвания обект  $\Delta L_0$  предизвикани от ефектите на поглъщане  $I_a$ , отражение  $I_r$ , разсейване  $I_s$ , пропускане  $I_t$ , излъчване  $I_e$ ;
- влияние на геометрията на наблюдение на изследвания обект върху формиране на пълната мощност на лъчението, регистрирано от сензора  $S_1$ ;
- влияние на фона и релефа върху формиране на пълната мощност на лъчението, регистрирано от сензора  $I_a^b$ ,  $I_r^b$ ,  $I_s^b$ ,  $I_e^b$ ,  $I_t^b$ ,  $S_1^b$ ;

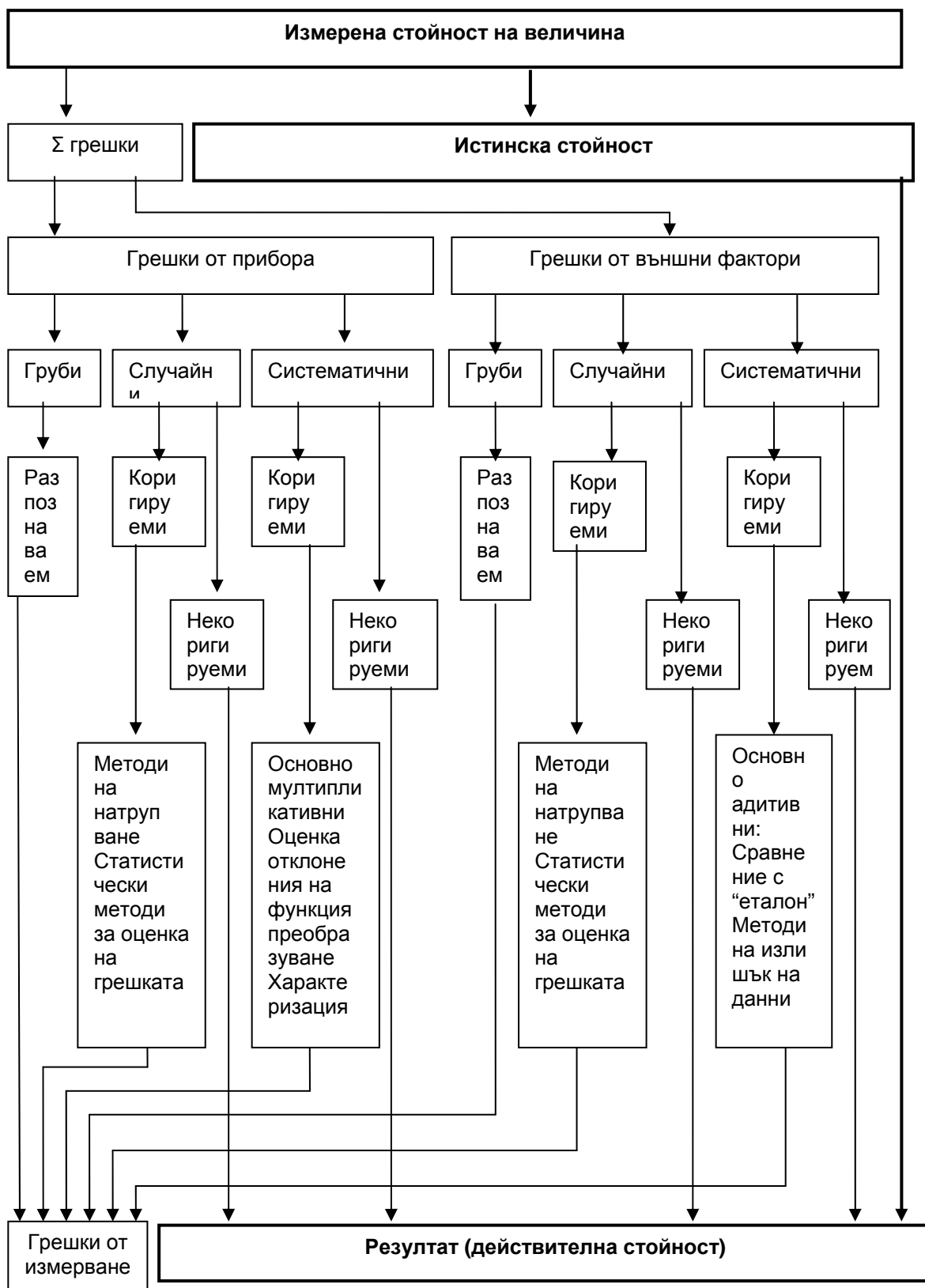
**Мультипликативните грешки** най-често възникват поради неточността (или нестабилността) на характеристиките и параметрите на основните блокове на прибора – входна оптика, дисперсионен блок, оптико-електронен преобразувател, електронно-цифров преобразувател. Към тази група могат да бъдат причислени грешките, генерирани от прибора. Това са, според класификацията от [1], фигура 2:

- неидеалност на оптичната система  $c_0$ ;
- нестабилност на характеристиките на основните блокове, предизвикани от смущаващи фактори, като изменение на температура, налягане, влажност, скорост, ускорение, вибрации др.
- неидеалност на апаратурата, участваща в процеси на формиране на изображение;
- неидеалност на блоковете, участващи в процеси на дискретизация и квантоване  $\Delta u_s$ ,  $\Delta u_q$  на изображението;

Тези блокове са основен източник и на **нелинейните грешки**, които основно се генерират от нестабилност на характеристиките им на преобразуване.

**Случайните грешки** се генерират от случайни факти и обстоятелства, проявяващи се в процеса на измерването и не взети в предвид при планиране на измерванията и в процеса на предварителна обработка.

Детайлното познаване и разделяне на източниците на грешки позволява декомпозиране на грешките и планиране на методи и процедури за намаляване или елиминиране на отделните съставляващи, което от своя страна води до оптимизация на характеристиките на прибора в етапите на разработване и производство. Този процес продължава и през етапите на експлоатация на прибора. Важно е да се отбележи, че процесите на предварителна обработка на видеоспектрометрични данни обхващат един много по-дълъг период от време, от началото на пректиране до края на съществуване на такъв прибор, отколкото е времето на осъществяване на измерването и обработка на данните.



Фиг. 1. Алгоритъм за оценка и коригиране на грешките

### Декомпозиране на грешките в спектрометричните измервания

Следващият етап от анализа и коригиране на грешките включва процесите на декомпозиране на грешките.

В резултат от проявлението на грешките в измерената величина се получава стойност на измерената величина, която съдържа в себе си и сумарната стойност на грешките (фиг. 1).

Разпознаването и разбиването на тези грешки на отделни видове (фиг. 1) е от особена важност за измервателното средство, в случая видеоспектрометър, тъй като те включват и представляват основните компоненти, определящи точността на самия измервателен прибор и точността на конкретното измерване. Както е показано на фигура 1 диференцирането на източниците на грешки ще позволи прилагането на подходящи методи за намаляване на отделните съставлящи и постигане на оптимални резултати както при проектирането и изграждането на измервателния прибор, видеоспектрометър, така и в процеса на измерванията.

В стадия на **проектирането** на измервателното средство теоретичния анализ на адитивната, мултипликативната и нелинейната грешки дават възможност да се предприемат задължителни мерки, включващи калибрационни и характеристични процедури, за тяхното намаляване с цел обезпечаване на зададена сумарна грешка.

В стадия на **експлоатационния период** на прибора, след определяне на сумарната грешка от измерването е целесъобразно тя да бъде декомпозирана на отделните и съставлящи: основно - генерирани от прибора и генерирани от външни фактори адитивна, мултипликативна и нелинейна грешки, определяне на доминиращите съставни и планиране и осъществяване на процедури по определени алгоритми (комплексни мерки) за намаляването ѝ.

Основните методи за намаляване на грешките от спектрометричните измервания могат да бъдат систематизирани така:

Методи за калибриране и характеристика на прибора, които от своя страна могат да бъдат разделени на лабораторни и в работни условия.

Методи за получаване на допълнителна информация за прибора и условията за снемане на данните: прилагане на методи за препроцесинг – набелязване и планиране на процедури за предварителна обработка – разработване на алгоритми за предварителна обработка– изпълнение на алгоритми за предварителна обработка.

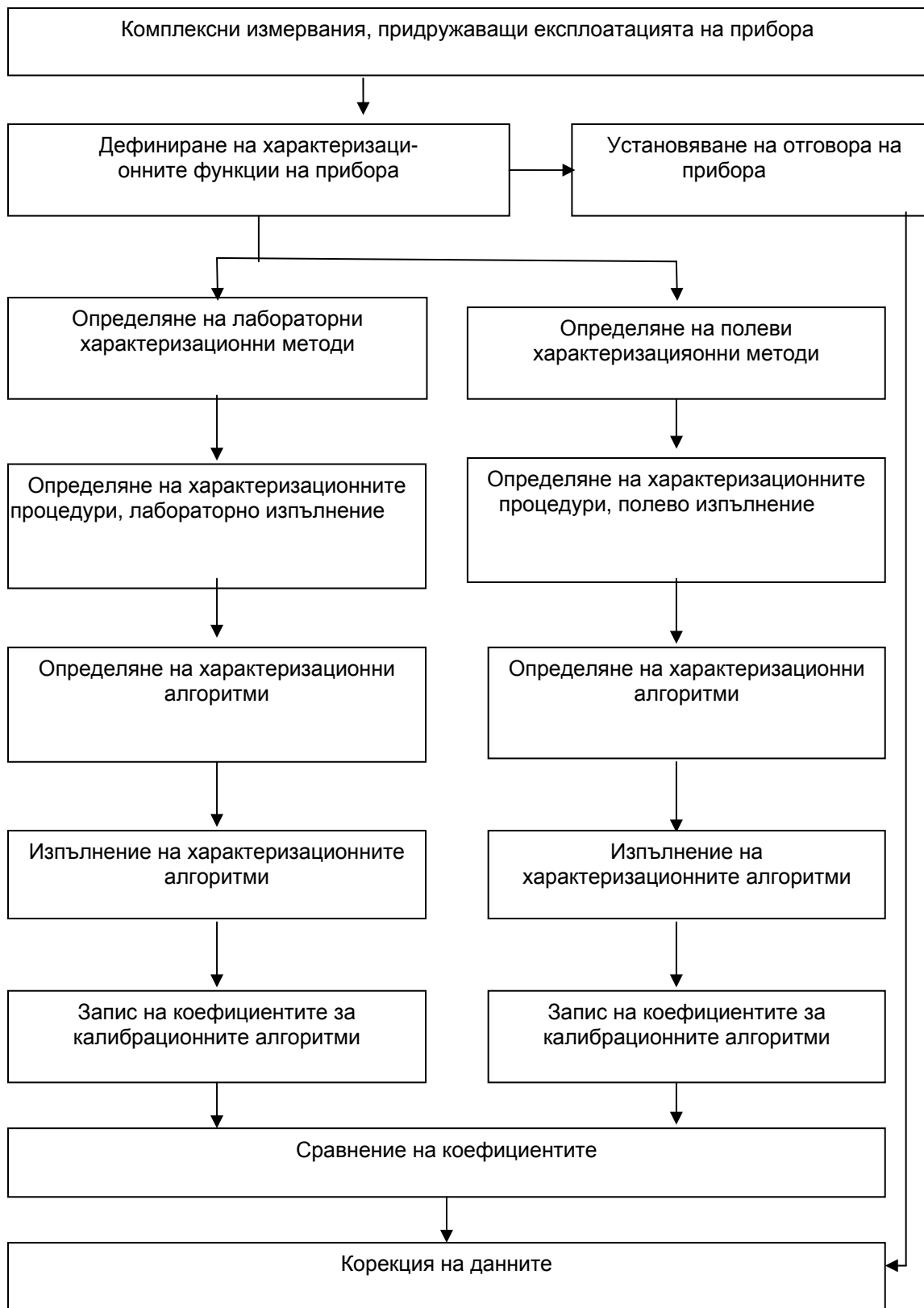
Действителната стойност на резултата се различава от истинската стойност на измерваната величина със стойността на неразпознатата или некоригирана систематична и случайна грешка.

### **Коригиране на грешките в спектрометричните измервания: характеристични процедури**

Както вече посочихме по-горе, една съществена част на грешките в спектрометричните измервания са породени от източници, генерирани от самия прибор. Следователно е необходимо предварителната обработка на спектрометричните данни и изображения да започне с определяне на основните характеристики на видеоспектрометъра чрез една детайлна характеристика.

Някои от характеристиките на прибора се очаква да остават непроменени по време на експлоатационния период на прибора и следователно не се налага тяхното измерване и определяне по време на този период, което налага адекватното им дефиниране по време на лабораторната характеристика. Друга част от тях обаче са особено критични и те трябва да бъдат определени и периодично характеризирани през време на експлоатационния период на прибора, като честотата на процедурите по характеристика се определя от честотата на изменение на грешките.

Лабораторните характеристични процедури могат да бъдат детайлно определени на базата на анализ на грешките. Следните наземни измервания (процедури) могат да бъдат определени и предложени като критични за калибриране на данните, макар че една част от тях да не е възможно да бъдат повторени по време на експлоатацията на прибора:



Фиг. 2. Алгоритъм за характеристика на видеоспектрометър през експлоатационния период на прибора

- ◆ Нелинейност на отговора на инструмента.
- ◆ Определяне на коефициентите на тъмнинния ток.

- ◆ Определяне на позицията на спектралните канали.
- ◆ Определяне на спектралния отговор на инструмента (PSF функция).

Стратегията за характеризация на видеоспектрометричен модул е илюстрирана с показания на диаграмата от фиг. 2. алгоритъм за експлоатационна характеризация. Необходимо е предвиждане на методи и апаратни средства за характеризирание в т. нар. работен режим (по време на работа на прибора при снемане на спектрални изображения на реални обекти), независимо от характеризацията на прибора по време на лабораторните изследвания.

Целта на характеризационния процес е елиминиране на грешките от прибора. Резултат от извършване на характеризационните процедури е получаване на коефициенти за калибрационния алгоритъм на прибора.

### **Комплексен характер на данните при видеоспектрометричните измервания**

Данните, получавани при видеоспектрометричните измервания имат мултидименсионален характер, тъй като регистрираните стойности са не само функция на една променлива ( в радиометричната област), но и на други променливи - например позиция на пристигащото лъчение във входната апертура ( в пространствената област), неговото спектрално разпределение ( в спектралната област), време на измерване (във времевата област).

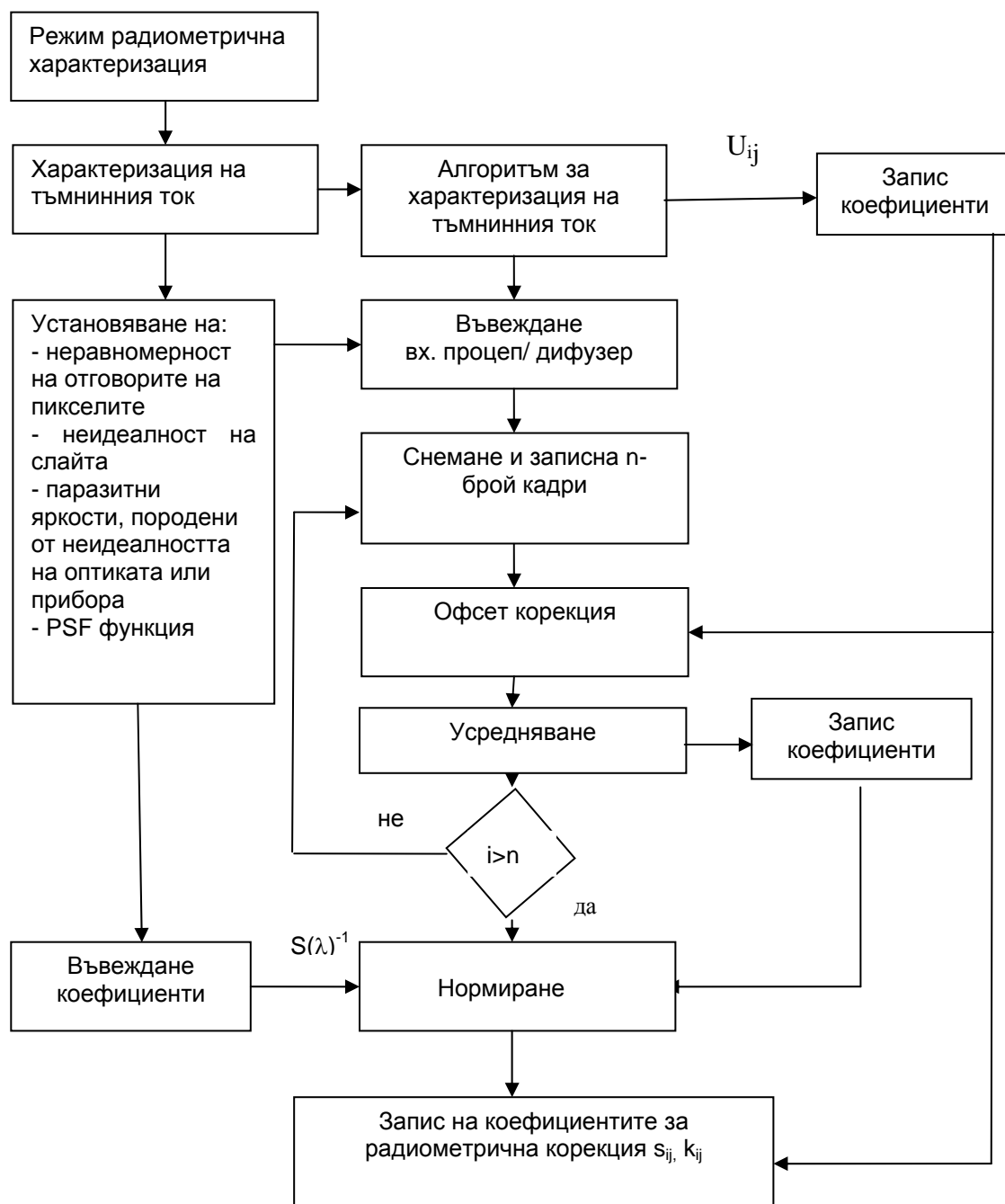
Необходимо е въвеждане на допълнително разделение на грешките и корекции в основните области:

- ◆ радиометрична корекция на видеоспектрометрични данни и изображения
- ◆ спектрална корекция на видеоспектрометрични данни и изображения
- ◆ пространствена корекция на видеоспектрометрични данни и изображения

Като пример е приведен режим на радиометрична характеризация (фиг. 3): - включва характеризация на тъмнинния ток - в работен режим на прибора е необходимо да бъде изпълнена офсет корекция чрез снемане на сигнала, компонента на тъмнинния ток, и корекция на спектралното размазване. Коефициентите за корекция на тъмнинния ток ще бъдат получени чрез закриване на апертурата на оптичния модул, след което стойностите на отместване (нива на тъмнинния ток) се снемат директно от отговора на детектора и се съхраняват (записват) за по-следваща обработка, съгласно подходящо съставен алгоритъм за характеризация на функцията на тъмнинния ток;

Следващи стъпки на радиометричната характеризация - след като офсет корекцията е извършена, 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. Тази радиометрична характеризация се осъществява чрез въвеждане в зрителния ъгъл на инструмента (FOV - field of view) ) на сигнал от радиометричен източник, точно калибриран в лабораторни условия и извършване на запис и последваща обработка по подходящ алгоритъм на съхранените данни. Основните характеризационни процедури при радиометрична характеризация са показани на фиг. 3, представяваща алгоритъм за радиометрична характеризация. Последователността на извършването на процедурите, съгласно предложения алгоритъм, може да бъде описана по следния начин:

- ◆ корекция на тъмнинния ток
- ◆ корекция на неравномерности на отговорите на пикселите
- ◆ корекция на паразитни яркости, породени от неидеалността на оптиката или прибора
- ◆ корекция на неидеалност на слайта
- ◆ корекция на PSF функция



Фиг. 3. Алгоритъм за радиометрична характеристикация на видеоспектрометър

### Изводи

1. Идентификацията на източниците на грешки в спектрометричните измервания дава възможност за декомпозиране на грешките по проявление в получаваните данни, което позволява оптимизиране на методите и техники за корекции.

2. Идентификацията и декомпозирането на грешките позволява дефиниране на оптимални изисквания към параметрите и характеристиките на разработваните спектрометрични системи, като по този начин се оказва значително влияние върху усложняването и цената на бъдещите сензорни системи.

3. Идентификацията и декомпозирането на грешките позволява дефиниране на оптимални изисквания по отношение на експеримента - за прилагане на процедури и алгоритми за получаване и предварителна обработка на данни по време на измерванията, които позволяват редуциране на грешките от измерванията при една бъдеща предварителна обработка на тези данни.

### **Благодарности**

Изследването в настоящата работа е проведено в рамките на договор ДФНИ – И01/8, 2012, между ИКИТ – БАН и Фонд “Научни изследвания”.

### **Литература:**

1. Atanassov, V., G. Jelev, D. Borisova. 2013. Анализ на грешките в спектрометричните измервания. Ninth Scientific Conference with International Participation "Space Ecology Safety" SES 2013. November 20 - 22, 2013, Sofia, Bulgaria.
2. Schaepman, M. E. 1998. Calibration of a Field Spectroradiometer. Remote Sensing Series, University of Zurich.
3. Atanassov, V., L. Krалева, G. Jelev, 2008, Noise and uncertainties in remote sensing spectrometric measurements. Proceedings of the Third Scientific Conference with International Participation “Space, Ecology, Nanotechnology Safety – SENS’2007”, 27-29 June 2007, Varna, Bulgaria, SRI-BAS. ISSN: 1313-3888, p.170-173.