

ПРОСТРАНСТВЕНА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ НА СПЕКТРОМЕТРИЧНИ СИСТЕМИ

Валентин Атанасов, Георги Желев, Любомира Кралева

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

Ключови думи: *спектрометри, видеоспектрометри, пространствена разделителна способност, методи.*

Резюме: *В работата са разгледани основните методи за определяне на пространствената разделителна способност на спектрометрични и видеоспектрометрични системи. Направен е сравнителен анализ на методите и техниките и са посочени техните предимства и недостатъци. Приведени са конкретни резултати от прилагане на отделните методи при разработване на видеоспектрометрична система и е определена пригодността на разглежданите методи за различните етапи на изграждане и използване на спектрометрични и видеоспектрометрични системи.*

SPATIAL RESOLUTION OF SPECTROMETRIC SYSTEMS

Valentin Atanassov, Georgi Jeleu, Liubomira Kraleva

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

Keywords: *spectrometers, imaging spectrometers, spatial resolution methods.*

Abstract: *In the work are presented the basic methods for revealing and determining spatial resolution of spectrometric and imaging spectrometric systems. A comparative analysis of methods and techniques is made and their advantages and disadvantages are discussed. Concrete results from the application of different methods in developing of imaging spectrometric system are specified. The adaptability of the proposed methods for the various stages of putting into practice of spectrometric systems are discussed.*

1. Въведение

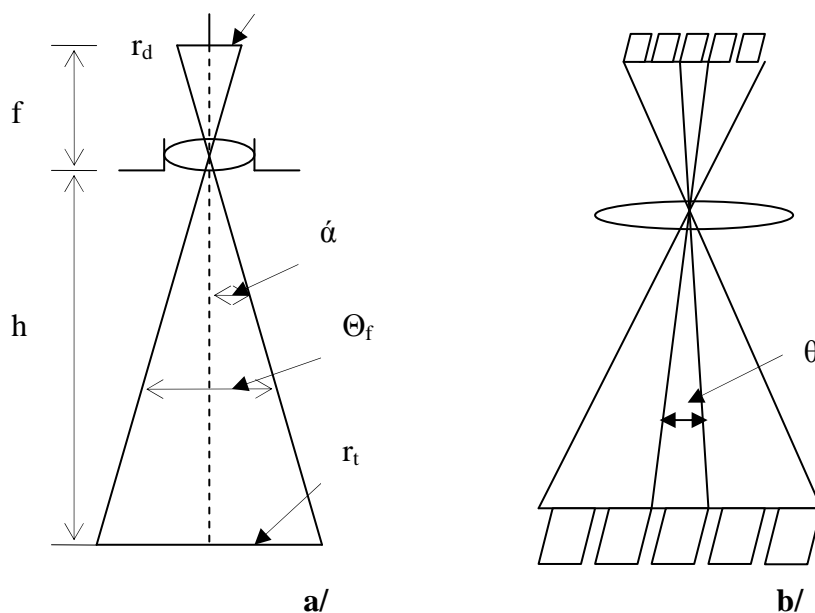
Пространствената разделителна способност е една от най-важните характеристики на спектрометричните системи. Съществуващата необходимост от добро представяне на спектралните съставни на изследваните обекти е свързана с изисквания за изобразяване с висока разделителна способност на пространствените елементи от изображението. Пространствената разделителна способност е функция от геометрията между сензора и изследвания обект в момента на измерването, оптичната схема, размерите на детектора, фокусното разстояние на оптичната система и др. Изменението на фронтите на оптичния сигнал, преминаващ през една оптична система, в сравнение с фронтите на входния сигнал също е показател за качеството на системата и влияе на пространствената разделителна способност. Така че тази характеристика е свързана и с друга – контраст- и двете участват в определяне на качеството на изобразяване на обектите от една оптична система.

Обикновено пространствената разделителна способност се дефинира чрез моментния ъгъл на наблюдение IFOV (instantaneous field of view) с който се изобразява най-малкия разделим пространствен елемент в изследваното изображение [1]. Най-често IFOV се изразява в mrad като функция на геометрията на входната оптика. Съществуват още различни методи за определяне на пространствената разделителна способност като методите използващи: функция на отговор на прибора на точков източник на лъчение PSF (Point Spread Function), трансформацията на Фурие и др. Един комплексен подход за дефиниране на

пространствената разделителна способност, същевременно отчитащ влиянието на всички допълнителни ефекти върху деградацията на изображението е чрез използване на MTF функция (Modulation Transfer Function).

2. Методи за определяне на пространствената разделителна способност

- **Моментен ъгъл на наблюдение.** Един от основните методи за дефиниране на пространствената разделителна способност е този, при който се използва определяне на моментния ъгъл на наблюдение IFOV (instantaneous field-of-view). За целта първоначално се определя т. нар. ъгъл на наблюдение FOV (field-of-view) като пространствен ъгъл при който радиацията попада върху сензора и той зависи от оптичната конфигурация на системата [1,2]. Той е дефиниран от характеристиките на входната оптика, позицията и широчината на входния процеп спрямо повърхността на детектора, размерите на детектора (фиг. 1а).



Фиг. 1. **a/**. Схема на представяне на ъгъла на наблюдение Θ_f
b/. Схема на представяне на моментния ъгъл на наблюдение θ .

Обикновено радиусът на детектора е много по малък от фокусното разстояние на системата, така че:

$$(1) \quad \Theta_f = 2 \tan(r_d/f) = 2 \tan(r_t/h),$$

където: Θ_f – ъгъл на наблюдение, r_d – радиус на детектора, f - фокусно разстояние ($r_d \ll f$), r_t - радиус на наблюдаваната повърхност, h - височина.

Моментният ъгъл на наблюдение IFOV показва пространствената апертура, в която сензора е чувствителен към електромагнитната радиация. Ъгълът IFOV в действителност представя пространствената разделителна способност на системата и може да бъде определен като:

$$(2) \quad \theta = \Theta_f/n,$$

където: n – брой елементи на детектора.

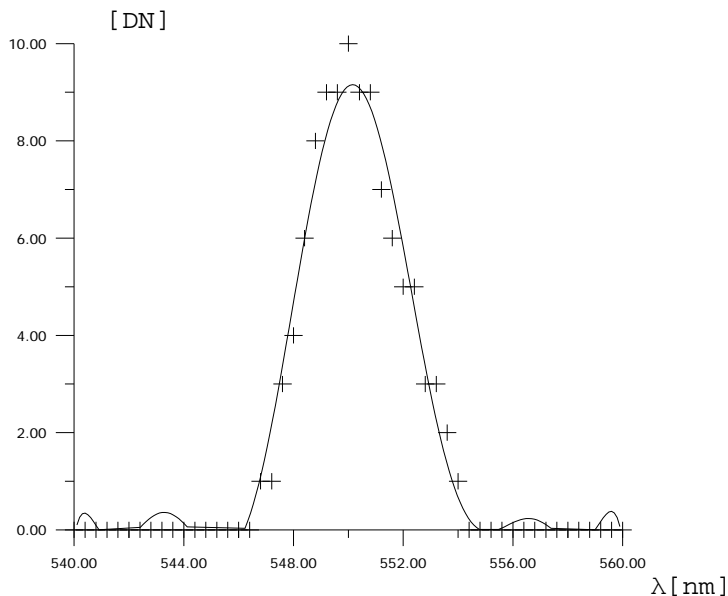
Най често IFOV - в mradians - функция на: геометрията на входната оптика. Този параметър не отчита някои важни фактори, оказващи влияние върху формирането на изображението в една оптична система, като оптичните ефекти: аберация, дифракция, размазване на изображението вследствие на относителното придвижване на обекта спрямо детектора.

От гледна точка на детектора влияние върху тази характеристика оказват основно три фактора: геометрия на активната част на детектора (размери и стъпка на фоточувствителните елементи), ефективност на преноса и дифузията на носителите.

Резултати от измерванията на конкретен модел спектрометрична система показват, че пространствената и разделителна способност в направление, перпендикулярно на

направлението на движение на носителя, може да бъде определена чрез определяне на моментния зрителен ъгъл IFOV (стойност 0.9mrad, за сензор с 582 елемента (V)) и съответната оптика.

- Метод включващ определяне на **функция на отговор на прибора на точков източник на лъчение**. Функцията на отговор PSF (Point Spread Function) е използвана за описание на реакцията на инструмента при входно въздействие точков източник монохроматична светлина. В повечето случаи тази функция може да бъде апроксимирана с Гаусов модел или полиномиална апроксимация.



Фиг. 2. Функция на отговор PSF на видеоспектрометър за канал 550nm (апроксимация с полином) ($\Delta\lambda_{in}1.65nm, \lambda_{01}=550nm, \lambda_{02}=552nm$)

Функция на отговор на спектрометричен прибор е измерена, като е използван източник на входно въздействие с тясна честотна лента, чиито светлинен поток има широчина на спектралната лента $\Delta\lambda_{in}$ ($\Delta\lambda_{in} < \Delta\lambda_{ch}$, където $\Delta\lambda_{ch}$ е широчината на спектрален канал). Реакцията на прибора по направление на спектралната ос е показана в 2D вариант на фиг.2, представяща функцията на отговор за канал с централна дължина на вълната $\lambda_0 = 550nm$. Моделът използван за апроксимация на функцията е полиномна апроксимация (степен на полинома 10). В този случай експериментално получените данни (+) са представени в нива на сивото [DN]. Спектралната разделителна способност се определя от широчината на спектралния канал на прибора, която по критерия FWHM (full width at half maximum) $\Delta\lambda_{FWHM} = 4nm$, (фиг. 2). Пространствената разделителна способност в направление перпендикулярно на спектралната ос (перпендикулярно на направлението на движение на носителя) е определена допълнително, като стойност е приблизително 0.9mrad, което показва че пространствената разделителна способност на видеоспектрометъра се определя от пространственото разделение на сензора [4].

- Друг метод за определяне на пространствената разделителна способност е чрез използване на **преобразуване на Фурие** (Fourier transform). Методът предполага висока точност и прецизност при определяне на пространствената разделителна способност, но за изпълнението му е необходим значителен изчислителен ресурс.

- Друг метод за определяне на пространствената разделителна способност включва използване на т. нар. **MTF** функция (Modulation Transfer Function). Тази функция описва структурата на изображението като функция от пространствените честоти на представяния обект. Чрез MTF функцията се измерва колко ефективно контраста на обекта може да бъде предаден в изображението, позволявайки по този начин чрез количествени измервания да се съди за качеството на изображението.

Контрастът на обекта може да бъде представен като отношение [3]:

$$(3) \quad M_o = (I_{o_{max}} - I_{o_{min}}) / (I_{o_{max}} + I_{o_{min}}),$$

където: $I_{o_{max}}$ - максималният интензитет в обекта, $I_{o_{min}}$ - минималният интензитет в обекта.

Следователно, контрастът на изображението може да бъде изразен по същия начин:

$$(4) \quad M_i = (I_{i_{\max}} - I_{i_{\min}}) / (I_{i_{\max}} + I_{i_{\min}}),$$

където: $I_{i_{\max}}$ - максималният интензитет в изображението, $I_{i_{\min}}$ - минималният интензитет в изображението.

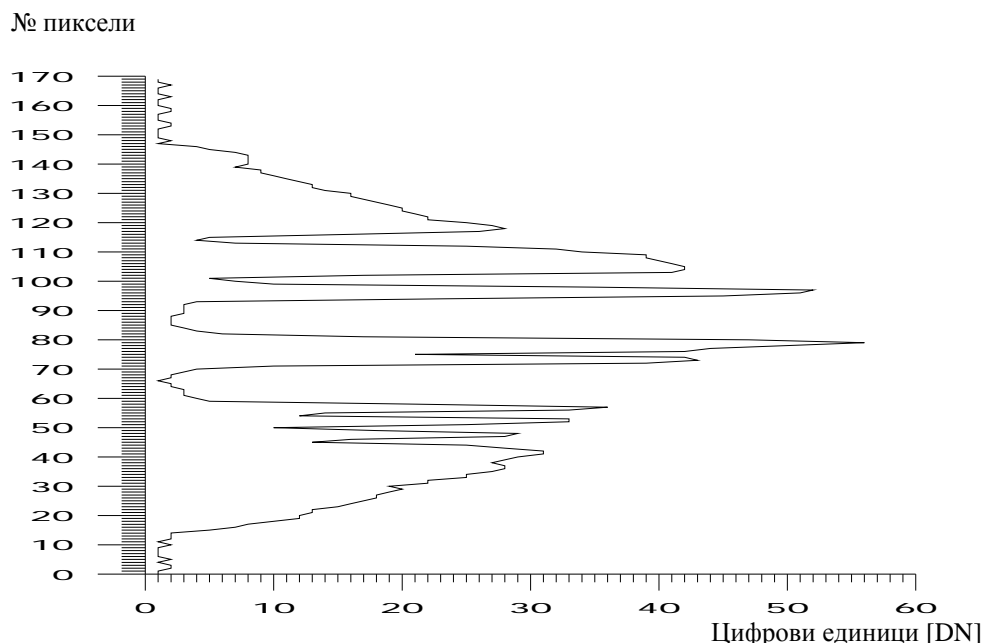
Отношението на размаха на изходния сигнал при предаване на щрихова мрежа със зададена пространствена честота към размаха на сигнала от едри детайли от изображението определя коефициента на предаване по модулация $K_{Mo/Mi}$. Следователно MTF функцията може да бъде изразена чрез коефициента на предаване по модулация:

$$(5) \quad K_{Mo/Mi} = Mo / Mi(f/f_{\max})$$

Функцията MTF по един точен начин дава връзката между тях и определя доколко прецизно една система за получаване на изображения преобразува контраста като функция на детайлите на обекта. Тя се представя като двумерна графика контраст-модулация спрямо детайли на обекта – пространствена честота. При това е удобно да се използва отношението f/f_{\max} , при която стъпката на пространствената честота е равна на стъпката на светлочувствителните елементи на сензора.

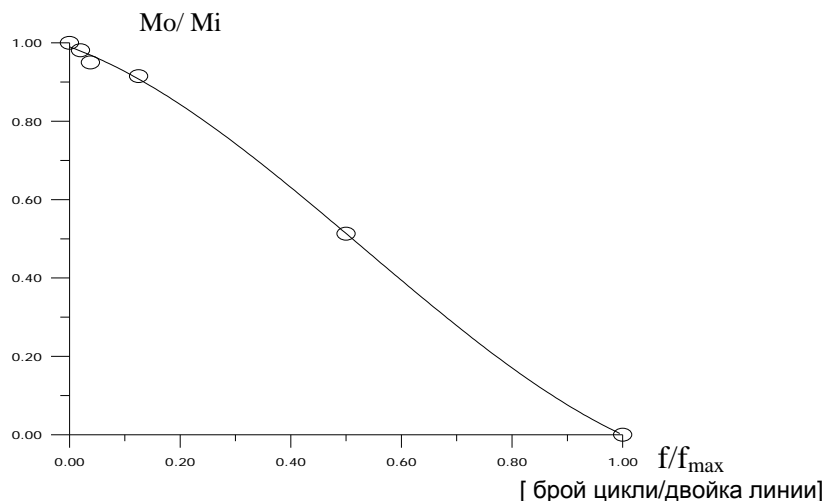
Предимството на MTF за оценка на детайлността е че измерването е обективно на първо място и че при измерването се отчита влиянието на всичките компоненти, включени в оптичната система на прибора.

Определянето на MTF функцията и оттам на пространствената разделителна способност на видеоспектрометрична система в лабораторни условия е показано по долу. Използван е екран с подходящо подбрана пространствена честота, ориентирана перпендикулярно на входния процеп на видеоспектрометъра. Входен източник с сравнително широк спектрален диапазон на излъчване е използван за осветяване на екрана. Измерванията са направени чрез снемане на изображения на спектри на изследвания тестов екран за които е определена честотата на Найкуист (0.5 период/пиксел) (фиг. 3, пиксели 76 - 77).



Фиг. 3. Видеоспектрометрични данни, представящи разпределението на интензитета на регистрираната радиация по пиксели за един спектрален канал

MTF функцията (фиг.4) е изчислена като функция на отношението на контраста изразен чрез амплитудите на синусоидалните вълни към тяхната средна стойност спрямо пространствената честота брой цикли/двойка линии. На фиг.4 е представена MTF функцията на прибора. От фигурата се вижда, че за конкретната разработка пространствената разделителна способност за ниво на пространствената честота $f/f_{\max}=0.5$ (честота на Найкуист), съставлява 50% от определената чрез моментния зрителен ъгъл IFOV $f/f_{\max}=0.5$ и изчислена стойност 0.9mrad. Получената стойност за IFOV при отразява т. нар. ефективен моментен ъгъл EIFOV(effective instantaneous field-of-view) [4].



Фиг. 4. MTF функция на видеоспектрометрична система

Функцията MTF елиминира субективните оценки на разделителна способност, контраст и качество на изображението, получавани чрез използване на тестови таблици.

- Друг метод за определяне на пространствената разделителна способност е базиран на използване на MTF функции на отделните елементи на системата. Повечето елементи, съставляващи една оптична система имат асоциирани криви на MTF функции и по тези криви, чрез умножение, може да се определи резултантна MTF функция, която при известни условия ще бъде много близко до реалната [5].

4. Изводи

1. Съществуващите методи позволяват с различна степен на точност определяне на пространствената разделителна способност и за всеки етап от разработка може да бъде използван подходящ метод.

2. При извършване на финалните измервания и калибриране на подобни системи е необходимо да бъдат използвани комплексните методи за определяне на пространствената разделителна способност, като методи на преобразуване на Фурие и MTF функция.

Литература:

1. Slater, Ph., N. Remote Sensing. Optics and Optical Systems. Addison-Wesley Publishing Company. 1980.
2. Schepman, M. E. Calibration of a Field Spectroradiometer. University of Zurich, Zurich, Switzerland, 1998.
3. Page, D. Wavefront Distortion Measurements: MTF vs. Interferometry. Europhotonics. April/May 2006.
4. Атанасов, В., Б. Пеев, Н. Василев, В. Василев. Спектрална и пространствена разделителна способност на модел на видеоспектрометър. Седма национална конференция с международно участие "Съвременни проблеми на слънчево-земните въздействия", София, ноември 2000, Сборник доклади, стр. 151-154.
5. Atanasov, V., A. Krumov, V. Vasilev, N. Vasilev. Prototype of a Vis-NIR Imaging Spectrometer. 1998 ASPRS-RTI Annual Conference, Tampa, Florida, March 30 - April 4, 1998 Conference Proceedings, pp.1402-1407.