

АНОТАЦІЯ

Колобродов М.С. Підвищення ефективності когерентних оптичних спектроаналізаторів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової задачі підвищення ефективності когерентних оптичних спектроаналізаторів (КОС), які входять до складу оптичних систем обробки інформації, шляхом узгодження параметрів їх компонентів.

Практично в усіх високорозвинених країнах досліджуються когерентні оптичні системи обробки інформації. Значних успіхів досягнуто у наукових лабораторіях під керівництвом відомих вчених: Дж. Гудмена, К.Е. Окан, Д. Кейсесента, Г. Старка, Ф. Т.С. Юу, А.В. Лохманн (USA); Yoshiki Ichioka, Tsuyoshi Konishi, Toshiaki Iwai (Japan); M. Schmid (Germany); А.А. Акаєва, С.А. Майорова, О.Н. Литвиненка, С.Б. Гуревича (СРСР); Тимчика Г.С. (Україна); Богатирьової В.В. (Росія). У цих лабораторіях, в основному, досліджуються фізичні основи і математичне моделювання принципів побудови оптичних систем обробки сигналів, і практично відсутні дослідження приладів, побудованих на основі таких систем.

Основним елементом оптичних систем обробки інформації є когерентний оптичний спектроаналізатор. Теоретичні основи роботи спектроаналізаторів базуються на скалярній теорії дифракції Френеля, яка наближено описує розповсюдження світла в параксіальній області. Відомо ряд монографій і статей, присвячених фізичним основам роботи когерентних (лазерних) спектроаналізаторів. У той же час практично відсутня науково-технічна література, що присвячена методам проектування оптичних систем, покладених в основу таких спектроаналізаторів [8].

У даній дисертації досліджуються шляхи підвищення ефективності КОС, що базуються на створенні нових спектроаналізаторів, які здатні обробляти, формувати і вимірювати просторові спектри двовимірних сигналів (зображень), що змінюються в часі і просторі. Підвищення ефективності досягається за рахунок використання в КОС вхідного транспаранта у вигляді просторово-часового дискретного модулятора світла і реєстратора просторового спектра за допомогою матричного приймача випромінювання (МПВ). Узгодження параметрів модулятора, фур'є-об'єктива і МПВ дозволила покращити технічні характеристики КОС. Під узгодженням розуміється вибір параметрів компонентів КОС, які дозволяють отримати підвищені характеристики КОС. Критерієм ефективності є запропоновані автором параметри (технічні характеристики) КОС: частота зміни вхідних сигналів; робочий діапазон просторових частот; просторова смуга пропускання; просторове спектральне розділення.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності когерентних оптичних спектроаналізаторів, які дозволяють вимірювати просторові спектри вхідних сигналів (зображень), що змінюються в реальному масштабі часу, за рахунок використання матричних модуляторів світла і приймачів випромінювання, і отримання підвищених технічних характеристик спектроаналізаторів шляхом узгодження параметрів їх компонентів.

У дисертації вперше отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено фізико-математичну модель цифрового когерентного оптичного спектроаналізатора, який використовує для вводу оптичного сигналу матричний модулятор світла, а для реєстрації просторового спектра – матричний приймач випромінювання, що дозволило розробити метод розрахунку сигналу на виході приймача випромінювання, який являє собою набір дифракційних максимумів, залежних від просторового спектра досліджуваного сигналу.
2. Вперше отримано аналітичний вираз для розрахунку методичної похибки вимірювання просторової частоти оптичного сигналу за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора, яка обумовлена параксіальним

наближенням при дифракції Френеля, що дозволило встановити залежність похибки вимірювання просторової частоти від кута дифракції.

3. Вперше розроблено методи розрахунку технічних характеристик когерентного оптичного спектроаналізатора, а саме: робочого спектрального діапазону, просторової смуги пропускання, просторового спектрального розділення, що дозволило узгодити параметри модулятора, фур'є-об'єктива і приймача випромінювання з метою підвищення ефективності використання когерентного оптичного спектроаналізатора.
4. Запропоновано нову характеристику когерентного оптичного спектроаналізатора – просторову смугу пропускання, що одночасно враховує параметри модулятора, фур'є-об'єктива і приймача випромінювання, оптимальна ширина якої дозволила підвищити спектральне розділення на 20-30%.

Практичне значення одержаних результатів для галузі оптичного приладобудування полягає в тому, що розроблені теоретичні і практичні засади побудови спектроаналізаторів дозволили створити новий клас ефективних цифрових КОС.

Практичні результати, які отримані в дисертації, дозволили:

1. Отримати аналітичні формули для розрахунку основних характеристик КОС, а саме: робочого спектрального діапазону, просторової смуги пропускання, просторового спектрального розділення.
2. Розробити когерентний оптико-електронний цифровий процесор обробки зображень, отриманих за допомогою телевізійних або тепловізійних камер.
3. Отримати практичні рекомендації по вибору компонентів КОС: освітлювальної системи, просторово-часового модулятора світла, ПЗЗ-матриці (ПЗЗ – пристрій з зарядовим зв'язком) для створення діючого експериментального стенду оптичної системи обробки зображень.
4. Розробити методи вимірювання характеристик КОС та провести експериментальні дослідження стенду спектроаналізатора.

Отримані у дисертації нові результати використані у державних науково-дослідних роботах: «Розробка теоретичних засад проектування елементів дифракційної оптики та систем на їх основі» (ДР №0109U001507); «Оптико-цифровий процесор для обробки зображень в тепловізійних системах спостереження» (ДР №0118U002070); «Розробка нових критеріїв якості зображення тепловізійних систем спостереження різного призначення і апаратури для їх визначення» (ДР №0117U002300); «Оптико-цифровий процесор для обробки зображень в тепловізійних системах спостереження» (ДР №0118U002070); в НДР «Аванпроект зі створення сканера надвисокої роздільної здатності. Складова частина: розробка матеріалів у частині когерентного цифрового оптико-електронного процесора для обробки космічних знімків» (Замовник КП СІБ «Арсенал»).

Таким чином, дослідження процесів, що відбуваються у КОС та взаємне узгодження параметрів компонентів спектроаналізатора з метою підвищення його ефективності, є актуальною науковою задачею, що стоїть перед оптико-електронними системами обробки інформації.

У дисертації на основі скалярної теорії дифракції Френеля проведено аналіз поширення когерентного світла через узагальнену оптичну систему КОС, яка складається із лазера, вхідного транспаранта, фур'є-об'єктива і матричного приймача випромінювання (МПВ). Якщо транспарант розташований в передній фокальній площині об'єктива, то в задній фокальній площині об'єктива формується розподіл амплітуди поля, який пропорційний просторовому спектру вхідного сигналу (коефіцієнту пропускання транспаранта). Проведені дослідження методичної похибки вимірювання просторової частоти спектра сигналу за допомогою КОС показали, що відомі формули, які застосовуються для визначення просторової частоти спектра сигналу, справедливі тільки для параксіальної області. Розроблено новий метод розрахунку відносної похибки, застосування якого на прикладі заданого спектроаналізатора показало, що наближення Френеля в межах кута дифракції від 0° до 10° забезпечує відносну похибку меншу за 1,5% [8].

Обґрунтовано, що використання у цифрових КОС (ЦКОС) матричних пристроїв вводу і виводу оптичних сигналів дозволяє досліджувати і обробляти двовимірні

оптичні сигнали, які змінюються в просторі і часі. Однак це вимагає перетворення вхідного і вихідного сигналу в дискретну цифрову форму, що спотворює просторовий спектр сигналу на виході ЦКОС. Для дослідження таких спотворень необхідно розробити фізико-математичну модель ЦКОС, який використовує матричні модулятори світла і МПВ.

Розглянуто математичну модель цифрового КОС, узагальнена схема якого складається з послідовно розташованих елементів: лазера, освітлювальної оптичної системи, просторового модулятора світла (ПМС), фур'є-об'єктива та матричного приймача випромінювання. Фізико-математична модель ЦКОС, враховує дискретний характер ПМС та МПВ. Запропоновано моделі окремих компонентів ЦКОС. Обґрунтовано вибір основних характеристик КОС та розроблено на основі запропонованої моделі КОС методи розрахунку цих характеристик. Запропоновано для визначення ефективності КОС використовувати такі характеристики: робочий діапазон просторових частот; просторову смугу пропускання (ПСП) (SBP – Spatial Bandwidth Product); просторове спектральне розділення; похибку вимірювання просторової частоти. Найбільш важливою характеристикою є ПСП, яка визначається числом роздільних точок, які здатний формувати спектроаналізатор.

При проектуванні КОС важливо забезпечити необхідні наведені вище характеристики. Було розглянуто методи розрахунку характеристик КОС, коли у якості вхідного тест-об'єкта обрано непрозорий екран з прямокутним отвором. Отримано функцію для розрахунку ПСП, дослідження якої показало, що КОС має максимальну смугу пропускання, коли розмір вхідного транспаранта дорівнює радіусу вхідної зіниці фур'є-об'єктива. Дослідження характеристик КОС показало, що:

1. Робочий діапазон просторових частот обмежується параметрами оптичної системи КОС. Гранична максимальна просторова частота чим більша, тим більший діаметр апертурної діафрагми об'єктива та менша його фокусна відстань. Одночасно необхідно враховувати розміри МПВ [8].

2. Підвищити спектральне розділення можливо вибором МПВ з меншими розмірами пікселя та збільшенням фокусної відстані об'єктива. Компроміс вирішується заданими вимогами до характеристик КОС [8].

Розглянуто застосування запропонованого методу для розрахунку ПСП КОС, який має такі параметри: розмір вхідного транспаранта 25 мм; фокусна відстань і діаметр вхідної зіниці об'єктива 100 мм і 50 мм відповідно; довжина хвилі лазера 0,6328 мкм; ПЗЗ-матриця має $24 \cdot 10^6$ пікселів і розмір чутливої площадки 36×24 мм². Для такого КОС ПСП (SBP) = 4900.

Розглянута можливість покращення характеристик КОС шляхом використання у якості фур'є-об'єктива дифракційних лінз [8]. На відміну від сферичних лінз, дифракційні лінзи формують якісніше зображення за рахунок виправлення аберацій.

Особливо важливою умовою використання дифракційної лінзи у КОС є забезпечення лінійної залежності між координатами у фокальній площині об'єктива та просторовими частотами у спектрі вхідного транспаранта [8].

Розглянуто приклад розрахунку граничних характеристик КОС, що використовує гелій-неоновий лазер з довжиною хвилі випромінювання 632,8 нм і дифракційно обмежений фур'є-об'єктив з фокусною відстанню 100 мм. У задній фокальній площині об'єктива встановлена камера з ПЗЗ-матрицею формату 4000×2624 , яка має пікселі з розміром $5,9 \times 5,9$ мкм. Розмір чутливої площадки матриці $23,6 \times 15,5$ мм². Вхідний транспарант діаметром 25 мм розташований в передній фокальній площині об'єктива. Встановлено, що обмеження у спектральному розділенні КОС обумовлені: вхідним транспарантом становлять $0,04$ мм⁻¹; об'єктивом – $0,049$ мм⁻¹; МПВ – $0,15$ мм⁻¹. Для узгодження ПЗЗ-матриці з оптичною системою КОС розмір пікселя повинен складати 1,5 мкм. Реальні ПЗЗ-матриці мають більші розміри пікселів, які і обмежують просторове спектральне розділення КОС [8].

На основі розробленої фізико-математичної моделі ЦКОС обґрунтовані особливості використання матричних модуляторів світла, а саме [8]:

1. Розподіл амплітуди поля у площині спектрального аналізу КОС являє собою результат суми дифракційних максимумів, які залежать від просторового спектра

зображення, що спотворений імпульсним відгуком спектроаналізатора. Положення максимумів визначається періодом матричної структури ПМС, їх ширина – розміром модулятора.

2. Мінімальні спотворення при вимірюванні спектра зображення будуть у тому випадку, коли у формуванні розподілу амплітуди поля в площині аналізу приймає участь тільки максимуми нульового порядку [8].

3. Максимальна смуга пропускання процесора буде у випадку, коли радіус вхідної зіниці об'єктива дорівнює розміру (діагоналі) матриці модулятора. При цьому розмір матриці приймача повинен дорівнювати розміру модулятора.

4. Дифракційна ефективність кожного максимуму визначається, перш за все, відношенням площі прозорої частини пікселя до його повної площини.

Таким чином, використання дискретного модулятора світла і МПВ дозволяє створити новий клас ЦКОС, який у поєднанні з комп'ютерною технікою значно розширює їх спільні функціональні можливості. Головною особливістю такого ЦКОС є перехід від неперервного вхідного оптичного сигналу (зображення) і його спектра до їх дискретних значень, що призводить до спотворення вимірюваного спектра. Ці спотворення визначаються імпульсним відгуком і когерентною передавальною функцією оптичної системи [8].

Для підтвердження результатів проведених теоретичних досліджень КОС було розроблено і створено лабораторний стенд оптичного спектроаналізатора, який дозволив провести такі дослідження [8]: вимірювання розподілу інтенсивності світла в дифракційній картині, яка сформована тест-об'єктом; визначення відповідності положення дифракційних максимумів в площині спектрального аналізу їх просторовій частоті; вимірювання спектрів тест-об'єктів, отриманих з використання двох лазерів з різними довжинами хвиль; вимірювання узагальнених характеристик КОС. Розроблено нові методи вимірювання узагальнених характеристик КОС, а саме: робочого просторового спектрального діапазону, просторової смуги пропускання, просторового спектрального розділення, похибки вимірювання просторової частоти. Запропоновано новий метод вимірювання робочого діапазону просторових частот, в якому тест-об'єктом обрано дифракційну ґратку. Для вимірювання просторового

спектрального розділення запропоновано використовувати дифракційну ґратку з постійним періодом, а зменшення періоду (збільшення просторової частоти) досягається за рахунок зміни кута падіння лазерного пучка на ґратку.

Наведені експериментально отримані дифракційні картини від тест-об'єктів у вигляді щілини, круглої діафрагми, дифракційної ґратки, вимірювання інтенсивності яких підтвердили результати теоретичного моделювання. Отримано просторові спектри прозорої двовимірної структури, дослідження яких дозволяє визначити середні розміри і дисперсію розмірів комірок тканини. Такий метод може знайти широке використання у текстильній промисловості. Отримані у дисертації результати досліджень були використані на КП СПБ «Арсенал», що підтверджується актом впровадження.

Ключові слова: когерентний оптичний спектроаналізатор, матричний приймач випромінювання, просторовий модулятор світла, просторова смуга пропускання, просторовий спектр, фур'є-об'єктив.

SUMMARY

Kolobrodov M.S. Increasing the efficiency of coherent optical spectrum analyzers. Qualification scientific work manuscript copyright.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy on speciality 152 "Metrology and information-measuring equipment". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2020.

The questions of increasing the efficiency of coherent optical spectrum analyzers (COSA) as a part of optical processing systems by coordinating the parameters of their components are considered in dissertation work.

The first section discusses methods and systems of optical information processing that use optical radiation as a signal information carrier for its processing. The advantage of this usage is that the light field is more informative than electric current. COSA is the main component of such systems.

Based on the scalar theory of Fresnel diffraction, the analysis of the propagation of coherent light through the generalized optical system of the COSA was fulfilled. The optical system consists of a laser, an input transparent, a Fourier lens and a matrix detector (MD). If the transparent is located in the front focal plane of the lens, then in the back focal plane of the lens an amplitude distribution is formed which is proportional to the spatial spectrum of the input signal (the transmittance of the transparent). Conducted researches of the methodical error of measuring the spatial frequency of the signal spectrum using COSA have shown that the known formulas, which are used to determine the spatial frequency of the signal spectrum, are valid only for the paraxial region. A new method for the calculation of the relative error is developed. Usage of the method on the example of a given spectrum analyzer showed that the Fresnel approximation within the diffraction angle from 0° to 10° provides relative error of less than 1.5%.

It is substantiated, that using of matrix input and output devices of optical signals in digital COSA (DCOSA) allows one to research and process two-dimensional optical signals that change in space and time. However, this requires converting the input and output signal into a discrete digital form, which distorts the spatial spectrum of the signal at the output of the DCOSA. To research such distortions, it is necessary to develop a physical and mathematical model of a DCOSA that uses matrix modulators of light and MD.

The second section discusses the mathematical model of the modern DCOSA. It's generalized scheme consists of sequentially located elements: laser, an illuminated optical system, spatial light modulator (SLM), Fourier lens, and matrix detector (MD). The physical and mathematical model of the DCOSA takes into account the discrete nature of the SLM and the MD. Models of individual components of the COSA are proposed.

In the third section, the choice of the basic characteristics of the COSA is substantiated and methods for calculating these characteristics are developed on the basis of the proposed model of COSA. It is proposed to use the following characteristics to determine the efficiency of the COSA: operating range of spatial frequencies; spatial bandwidth product (SBP); spatial spectral resolution; energy resolution; spatial frequency measurement errors. The SBP is the most important characteristic, which is determined by the number of

separation points that the spectrum analyzer is capable to generate. This band is analogous to the operating spectral range.

When designing a COSA, it is important to provide the necessary specifications mentioned above. The methods for calculating the characteristics of the COSA were considered when an opaque screen with a rectangular hole was selected as the input test object. The function was obtained for calculating the SBP. The research of the function showed that the COSA has a maximum bandwidth when the size of the input transparent is equal to the radius of the entrance pupil of the Fourier lens.

The research of the characteristics of the COSA showed that:

1. The operating range of spatial frequencies is limited by the parameters of the optical system of the COSA. The maximum spatial frequency is greater, the larger is the diameter of the aperture diaphragm of the lens and the smaller is its focal length. At the same time, the dimensions of the MD must be taken into account.
2. One can increase the spectral resolution by choosing a MD with smaller pixels and increasing the focal length of the lens.
3. The energy resolution depends on the parameters of the MD and the relative aperture of the Fourier lens, i.e. the higher is the relative aperture of the Fourier lens, the higher the energy resolution will have the COSA.

The application of the proposed method for calculating the SBP of the COSA has been considered. The COSA has the following parameters: input transparent size 25 mm; focal length and diameter of the entrance pupil of the lens 100 mm and 50 mm, respectively; laser wavelength 0.6328 microns, CCD has $24 \cdot 10^6$ pixels and the size of the sensitive surface is 36×24 mm. For such a COSA, $SBP = 4900$.

The possibility of improving the performance of COSA by using diffraction lenses as a Fourier lens is considered. Unlike spherical lenses, diffraction lenses form a high-quality image by correcting aberrations.

A particularly important condition for using a diffraction lens in the COSA is to provide it with a linear relationship between the focal plane coordinates of the lens and the spatial frequencies in the input spectrum.

An example of the calculation of the limit characteristics of the COSA using a helium-neon laser with a wavelength of 632.8 nm and a diffraction-limited Fourier lens with a focal length of 100 mm is considered. In the back focal plane of the lens installed a CCD camera with format 4000×2624 with pixel size 5.9×5.9 microns. The size of sensitive area is $23,6 \times 15,5$ mm². Input transparent with diameter 25 mm is located in the front focal plane of the lens. It is established that the limitation in the spectral resolution of the COSA is due to: the input transparent is $0,04$ mm⁻¹; the lens is $0,049$ mm⁻¹; the MD is $0,15$ mm⁻¹. The pixel size should be 1.5 microns in order to align the CCD with the optical system of COSA.

In order to obtain formulas for calculating the main characteristics of the DCOSA, a method for determining the video signal at the output of the MD of the spectrum analyzer was developed. This method takes into account the discrete structures of the modulator and the MD and allows to optimize the parameters of the components of the DCOSA. The characteristics of the DCOSA are investigated, which are limited by the diffraction effects and the matrix structure of the input and output devices (optical signal) in order to optimize the parameters of the spectrum analyzer.

On the basis of the developed physic and mathematical model of DCOSA, the features of using matrix light modulators are justified. Namely:

1. The field amplitude distribution in the COSA spectral analysis plane is the sum of diffraction maximums that depend on the spatial image spectrum, which is distorted by the impulse response of the spectrum analyzer. The position of the maximum is determined by the period of the matrix structure of the SLM, their width is determined by the size of the modulator.
2. Minimal distortions in the measurement of the image spectrum will be when only zero order maximum are involved in the formation of the field amplitude distribution in the analysis plane.
3. The maximum bandwidth of the processor will be when the radius of the input pupil of the lens is equal to the size (diagonal) of the modulator matrix. The size of the matrix detector should be the size of the modulator.
4. The diffraction efficiency of each maximum is determined primarily by the ratio of the area of the transparent part of the pixel to its full plane.

Thus, the use of a discrete light modulator and an MD allows to create a new class of DCOSA, which in combination with computer technology greatly enhances their functionality. The main feature of DCOSA is the transition from continuous optical input signal (image) and its spectrum to their discrete values, which leads to distortion of the measured spectrum. These distortions are determined by the impulse response and the coherent transfer function of the optical system.

In the fourth section the results of an experimental research of COSA are presented. To confirm the results of the theoretical researches of COSA, which were presented in section 3, a laboratory model of an optical spectrum analyzer was developed and created. It allowed the following researches: measurement of the light intensity distribution in the diffraction image generated by the test object; determining the position of the diffraction maximum in the plane of the spectral analysis of their spatial frequency; measuring the spectrum of test objects obtained from the use of two lasers with different wavelengths; measurement of generalized characteristics of COSA. New methods for measuring the general characteristics of COSA have been developed, namely: operating spatial spectral range, spatial bandwidth product, spatial spectral resolution, and spatial frequency measurement error. A new method for measuring the operating frequency range was proposed in which a test object is selected is a diffraction grating. It is proposed to use a constant-period diffraction grating to measure spatial spectral resolution, and a reduction in the period (increase in spatial frequency) is achieved by changing the angle of incidence of the laser beam on the grating.

The experimentally obtained diffraction images are given from the test objects in the form of a slit, a circular aperture, a diffraction grating, whose intensity measurements were confirmed by the results of theoretical modeling. Spatial spectrum of a transparent two-dimensional structure are obtained. The research of the spectrum allows to obtain the average sizes and dispersion of the sizes of unit fabrics. This method can be widely used in the textile industry. The results of the research obtained in the dissertation were used at the ARSENAL Special Device Production State Enterprise, which is confirmed by the act of implementation.

Key words: coherent optical spectrum analyzer, matrix detector, spatial light modulator, spatial bandwidth product, spatial spectrum, Fourier lens.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Колобродов М.С. Проектування цифрових когерентних оптичних спектроаналізаторів: монографія / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик, В.І. Микитенко, М.С. Колобродов // К: Вид-во «Політехніка». – 2019. – 224 с. *Здобувачем написано п'ятий розділ монографії – Рекомендації по вибору параметрів компонентів макета ЦКОС.*
2. Kolobrodov M.S. Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchik, V.I. Mykytenko, M.S. Kolobrodov // Optica Applicata. – 2017 (vol.47). – no.2. – pp. 273–282. (Закордонне видання (Польща), індексується в наукометричних базах Scopus, SciFinder, Compendex, Web of Science). *Здобувачем отримано формули для розрахунку імпульсного відгуку і передавальної функції, які дозволяють аналізувати і оптимізувати основні характеристики цифрового КОС.*
3. Колобродов М.С. Граничні характеристики когерентного оптичного спектроаналізатора / Г.С. Тимчик, К.А. Нгуєн, М.С. Колобродов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – №5. – С. 119 – 123. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus). *Здобувачем досліджено розмір матриці приймача випромінювання, який не впливає на спектральне розділення когерентного оптичного спектроаналізатора.*
4. Колобродов М.С. Методична похибка оптичного спектроаналізатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик, М.С. Колобродов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015. – №5. – С. 97 – 102. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus). *Здобувачем розроблена фізико-математична модель оптичного спектроаналізатора.*

5. Колобродов М.С. Просторова смуга пропускання оптичного спектроаналізатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик, М.С. Колобродов // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2015. - №5. – С. 50 – 55. (Видання індексується в Ulrich’s Web Global Serials Directory, eLIBRARY, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor» і Scientific Indexing Services).

Здобувачем отримано рівняння для розрахунку параметра просторової смуги пропускання як для параксіальної області, так і для довільної області спектрального аналізу в оптичній системі оптичного спектроаналізатора.

6. Колобродов М.С. Геометрична смуга пропускання оптичного спектроаналізатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик, М.С. Колобродов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – №1. – С. 108– 116. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

Здобувачем проаналізовано способи розширення геометричної смуги пропускання когерентного оптичного спектроаналізатора.

7. Колобродов Н.С. Математическая модель цифрового оптико-электронного спектроанализатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик, Н.С. Колобродов // Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. – 2016. – Iss. 67. – pp. 71-76. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

Здобувачем досліджено розподіл амплітуди світлового поля в площині спектрального аналізу цифрового КОС.

8. Kolobrodov M.S. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchik, M.S. Kolobrodov, M.M. Lutsiuk // Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2018, Iss. 72, pp. 78–85. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

Здобувачем досліджено сигнал на виході матричного приймача випромінювання та проведено аналіз спектра гармонічного сигналу.

9. Колобродов М.С. Оптичний метод контролю якості прозорих тканин // KPI Science News – 2019. – № 5-6. – С. 71-79. (Видання індексується в DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Google Scholar, OpenAIRE, Ulrich's periods Directory, BASE, Miar, WCOSJ).

Здобувачем розроблено оптичний метод контролю якості прозорих тканин.

10. Колобродов М.С. Патент на корисну модель №110919 Україна, МПК (2016.01) G03B 17/00, Насадка для об'єктива цифрового фотоапарата / Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Колобродов М.С. – Київ. Власник: НТУУ «КПІ». – u 2016 04018. – Опубл. 25.10.2016. Бюл. № 20.

Здобувачем розроблено насадку для об'єктива цифрового фотоапарата для дослідження спектрів просторових сигналів.

11. Колобродов М.С. Патент на корисну модель №116586 Україна, МПК (2017.01) G03B 17/00, Насадка для об'єктива цифрового фотоапарата / Колобродов М.С. – Київ. Власник: НТУУ «КПІ». – u 2016 12871. – опубл. 25.05.2017. Бюл. № 10.

Здобувачем розроблено вдосконалену насадку для об'єктива цифрового фотоапарата для дослідження спектрів просторових сигналів з більшою підвищеною точністю за рахунок зміни конструктивних параметрів насадки.

12. Колобродов М.С. Патент на корисну модель №118780 Україна, МПК (2017.01) G06E 1/00, Оптико-електронний процесор / Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Колобродов М.С. – Київ. Власник: НТУУ «КПІ» – u 2017 02269. – опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16.

Здобувачем розроблено оптико-електронний процесор для здійснення спектральної фільтрації оптичних сигналів (зображень) в реальному масштабі часу.

13. Kolobrodov M.S. The diffraction limit of an optical spectrum analyzer / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchik, M.S. Kolobrodov // Proc. SPIE 9809, Twelfth International Conference of Correlation Optics. – 98090F (30 November, 2015); doi: 10.1117/12.2228534. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus, Ei Compendex, Inspec, Google Scholar, Astrophysical 22 Data System (ADS), CrossRef).

Здобувачем розроблено рівняння, що використовуються для визначення просторової частоти спектра сигналу, а також рівняння для наближення Френеля в залежності від кута дифракції світла оптичного спектроаналізатора.

14. Kolobrodov M.S. Limit characteristics of digital optoelectronic processor / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchik, M.S. Kolobrodov // Proc. SPIE 10612, Thirteenth International Conference of Correlation Optics. – 106120L (18 January, 2018); doi: 10.1117/12.2291984. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus, Ei Compendex, Inspec, Google Scholar, Astrophysical 22 Data System (ADS), CrossRef).

Здобувачем представлено фізико-математичну модель цифрового оптико-електронного процесора та досліджено його граничні характеристики.

15. Колобродов М.С. Граничні характеристики когерентного оптичного спектроаналізатора / К.А. Нгуєн, М.С. Колобродов // Збірник тез доповідей VII науково-практичної конференції студентів та аспірантів “Погляд у майбутнє приладобудування”. – Київ, ПБФ.– НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 31.

Здобувачем представлено граничні характеристики когерентного оптичного спектроаналізатора, які описують ефективність його роботи.

16. Колобродов М.С. Фізико-математична модель оптичного спектроаналізатора / М.С. Колобродов // Збірник тез доповідей VIII науково-практичної конференції студентів та аспірантів “Погляд у майбутнє приладобудування”. – Київ, ПБФ.– НТУУ «КПІ». – 2015. – С. 34.

Здобувачем представлено фізико-математичну модель оптичного спектроаналізатора.

17. Колобродов Н.С. Погрешность когерентного оптического спектроанализатора / Н.С. Колобродов, Тимчик Г.С. // Материалы 8-й Международной студенческой научн.-техн. конференции «Новые направления развития приборостроения». – Минск: БНТУ. – 2015. – С. 205.

Здобувачем представлено дослідження методичної похибки когерентного оптичного спектроаналізатора.

18. Kolobrodov M.S. Diffractive limit in the optical spectrum analyzer / M.S. Kolobrodov, G.S. Tymchik // 15-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science: Scientific Works. – 2015. – Kyiv. – P. 173.
Здобувачем досліджено систематичну похибку при визначенні просторової частоти спектроаналізатора. Представлено рівняння для розрахунку абсолютних та відносних похибок вимірювань залежно від кута дифракції світла.
19. Колобродов Н.С. Пространственная полоса пропускания / Н.С. Колобродов, Г.С. Тымчик // Материалы 9-й Международной студенческой научн.-техн. конференции «Новые направления развития приборостроения». – Минск: БНТУ. – 2016. – С. 31.
Здобувачем представлено рівняння параметра просторової смуги пропускання оптичного спектроаналізатора.
20. Колобродов М.С. Модель цифрового оптичного спектроаналізатора / М.С. Колобродов // Збірник тез доповідей ІХ науково-практичної конференції студентів та аспірантів “Погляд у майбутнє приладобудування”. – Київ, ПБФ. – НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 37.
Здобувачем представлено модель цифрового-оптичного спектроаналізатора.
21. Колобродов Н.С. Когерентный оптико-электронный процессор / Н.С. Колобродов, Г.С. Тымчик // Материалы 10-й Международной студенческой научн.-техн. конференции «Новые направления развития приборостроения». – Минск: БНТУ. – 2017. – С. 43.
Здобувачем представлено фізико-математичну модель когерентного оптико-електронного процесора.
22. Kolobrodov M.S. Model of the signal at the output of the coherent optical spectrum analyzer / M.S. Kolobrodov // Збірник тез доповідей ІХ наук.-техн. конференції студентів та аспірантів «Приладобудування: стан та перспективи». – Київ, НТУУ “КПІ”. – 2017. – С. 43.
Здобувачем досліджено модель сигналу на виході когерентного оптичного спектроаналізатора.

23. Колобродов М.С. Вплив аберацій фур'є-об'єктива на просторову спектральну роздільну здатність когерентного оптичного спектроаналізатора / М.С. Колобродов // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конференції студентів та аспірантів «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ». – Київ, НТУУ “КПІ”.– 2018. – С. 122.

Здобувачем досліджено вплив аберацій фур'є-об'єктива на просторову спектральну роздільну здатність когерентного оптичного спектроаналізатора.

24. Колобродов М.С. Цифровий оптико-електронний процесор для обробки цифрових зображень / М.С. Колобродов // Збірник наукових праць III Української наук.-техн. конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – Київ, КП СПБ «Арсенал». –2018. – С. 59-62.

Здобувачем досліджено цифровий оптико-електронний процесор для обробки цифрових зображень.