



**В. Г. КОЛОБРОДОВ, Г. С. ТИМЧИК,  
М. С. КОЛОБРОДОВ**

**КОГЕРЕНТНІ ОПТИЧНІ  
СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРИ**

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

**В. Г. Колобродов**  
**Г. С. Тимчик**  
**М. С. Колобродов**

# **Когерентні оптичні спектроаналізатори**

**Монографія**

*Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»*

Київ  
Видавництво «Політехніка»  
2015

УДК 681.7.063+535.42

ББК 22.34+34.6

К61

*Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»  
(Протокол № 8 від 05.10.2015 р.)*

**Рецензенти:**

*Л. В. Поперенко* д-р фіз.-мат. наук, проф.,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

*В. П. Маслов*, д-р техн. наук, проф.,  
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

**Колобродов В. Г.**

К61 Когерентні оптичні спектроаналізатори : монографія / В. Г. Колобродов,  
Г. С. Тимчик, М. С. Колобродов. – К. : Вид-во «Політехніка», 2015. – 180 с. –  
300 пр.

ISBN 978-966-622-721-1

Розглянуто фізичні основи та методи проєктування когерентних спектроаналізаторів, на яких ґрунтуються оптичні системи обробки інформації. На основі скалярної теорії дифракції Френеля досліджено процеси перетворення амплітуди світла від джерела випромінювання до площини спектрального аналізу. Визначено головні характеристики спектроаналізаторів та розроблено методи їх розрахунку.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів напряму підготовки 6.051004 «Опtotехніка».

УДК 681.7.063+535.42  
ББК 22.34+34.96

ISBN 978-966-622-721-1

© В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик,  
М. С. Колобродов, 2015  
© Видавництво «Політехніка»  
НТУУ «КПІ» (ПВФ), 2015

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	5
<b>1 Фізичні основи роботи когерентних спектроаналізаторів</b> ...	8
1.1 Оптичні методи та системи обробки інформації.....	8
1.2 Класифікація оптичних систем обробки інформації.....	10
1.2.1 Узагальнена схема когерентних оптичних систем обробки інформації .....	12
1.2.2 Огляд деяких когерентних систем обробки інформації....	14
1.3 Узагальнені оптичні схеми спектроаналізаторів.....	17
1.4 Методична похибка КОС.....	27
1.4.1 Обмеження при дифракції Френеля.....	30
1.4.2 Методична похибка оптичного спектроаналізатора.....	32
1.4.3 Приклад розрахунку методичної похибки вимірювання просторової частоти КОС.....	34
1.5 Фізико-математична модель КОС.....	36
1.5.1 Освітлювальна система.....	36
1.5.1.1 Лазери для когерентного спектроаналізатора.....	36
1.5.1.2 Проектування оптичної системи розширювача лазерного пучка.....	40
1.5.2 Вхідний транспарант.....	46
1.5.3 Фур'є-об'єктив.....	56
1.5.4 Реєстратор спектру сигналу.....	60
<b>2 Проектування когерентних оптичних спектроаналізаторів</b> ..	71
2.1 Проблеми проектування оптичних систем КОС .....	71
2.2 Основні характеристики КОС.....	72
2.3 Методи розрахунку характеристик КОС.....	74
2.4 Енергетичний розрахунок КОС.....	80
2.5 Імпульсний відгук КОС під час освітлення вхідного транспаранта квазімонохроматичним випромінюванням.....	88
2.6 Шляхи збільшення ширини просторової смуги пропускання <i>SBP</i> .....	96
2.7 Вплив аберацій фур'є-об'єктива та геометричних розмірів	

приймача випромінювання на граничні характеристики приладу	111
2.8 Використання дифракційної лінзи в якості фур'є-об'єктива ....	117
2.9 Приклади проектування КОС.....	124
2.9.1 Розрахунок узагальнених характеристик .....	124
2.9.2 Розрахунок граничних характеристик .....	126
2.9.3 Розрахунок смуги пропускання КОС з дифракційною лінзою	127
2.10 Похибки складання та юстирування КОС.....	128
2.10.1 Первинні похибки складання оптичних систем.....	128
2.10.2 Похибки інтенсивності та просторової частоти .....	131
<b>3 Застосування спектроаналізаторів.....</b>	<b>137</b>
3.1. Дослідження мікроефектів дзеркальних поверхонь і прозорих плівок за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора.....	137
3.2. Визначення пористості тонких волоконних матеріалів за оптичним коефіцієнтом прозорості.....	142
3.3. Диференціювання спектра сигналів за допомогою КОС.....	148
3.4. Дослідження геометричних параметрів просторових квазіперіодичних структур за допомогою КОС.....	154
3.5. Спектральні методи контролю статистичних характеристик штрихових квазіперіодичних структур.....	160
3.6. Лазерний дифракційний аналізатор розміру частинок.....	169
<b>Перелік посилань.....</b>	<b>174</b>

## ВСТУП

Інтенсивний розвиток науки і техніки постійно ускладнює задачі, які стоять перед оптикою та оптичним приладобудування. З одного боку, висуваються більш високі вимоги до традиційних характеристик оптичних приладів, а з другого боку, з'явилися нові сфери застосування оптики: оптична обробка інформації, оптоелектроніка, волоконна та інтегральна оптика тощо. Оптичний діапазон частот є перспективним для обчислювальної техніки перш за все завдяки малої довжини хвилі світла і можливістью проводити паралельну обробку великих масивів інформації.

Сучасний розвиток дифракційної оптики фактично виходить на рівень, коли вона стає таким же невід'ємним компонентом оптичних систем, як лазери та ПЗЗ-матриці. Інтегрованість напівпровідникових джерел і приймачів випромінювання, дифракційної оптики і мікропроцесорної техніки відкриває можливість створення мікрооптоелектронних систем для вирішення широкого спектру задач оптотехніки та оптоінформатики.

На сьогодні значне місце серед досліджуваних проблем займають задачі в області оптичних методів та систем обробки інформації. Інтерес до оптичних методів та систем обробки інформації обумовлений високою інформаційною ємкістю світлового поля як носія інформації, високою швидкістю розповсюдження оптичних сигналів та порівняно легким здійсненням цілого ряду інтегральних операцій над двовимірними масивами. В останні роки бурхливо розвиваються гібридні оптико-цифрові системи, в яких поєднано переваги оптичних і цифрових електронних методів обробки одновимірних і двовимірних сигналів.

Когерентні оптичні системи для спектрального аналізу просторових

сигналів давно вже відомі в класичній оптиці, а широке їх застосування в радіолокації, метрології, мікробіології тощо стало можливим у зв'язку з бурхливим розвитком лазерної техніки [1,2]. Теоретичні основи роботи спектроаналізаторів базуються на рівнянні дифракції Френеля, яке наближено описує розповсюдження світла в параксіальній області [3]. Відомо ряд монографій і статей, присвячених фізичним основам роботи когерентних (лазерних) спектроаналізаторів [4–9]. В той же час практично відсутня науково-технічна література, що присвячена методам проектування оптичних систем, покладених в основу таких спектроаналізаторів [10].

Нині однією з актуальних проблем є проектування когерентних спектроаналізаторів, принцип роботи яких оснований на виконанні лінзюю такої математичної операції, як перетворення Фур'є [3,8]. При виборі компонентів для конструювання оптичної системи когерентного спектроаналізатора важливо враховувати вплив кожного елемента на якість та правильність отриманих результатів вимірювання [11]. Ефективність роботи спектроаналізатора визначається його граничними характеристиками, які обумовлені обмеженими розмірами та параметрами фур'є-об'єктива і приймача випромінювання (ПВ) [12].

Ця монографія написана на основі багаторічних досліджень авторів в області проектування та впровадження когерентних систем обробки інформації різного призначення, що знайшли своє відображення в багатьох наукових статтях [6,11–13] та підручнику В.Г. Колобродова і Г.С. Тимчика «Прикладна дифракційна оптика» (2014) [10].

Монографія складається із трьох розділів.

В першому розділі розглядаються фізичні основи роботи когерентних оптичних спектроаналізаторів (КОС) на основі скалярної теорії дифракції Френеля. Використовуючи узагальнену модель КОС

досліджується процес перетворення когерентного світла від джерела випромінювання до площини спектрального аналізу. Досліджується методична похибка, що обумовлена обмеженнями при дифракції Френеля. Розглянуто окремі складові КОС: освітлювальна система, вхідний транспарант, фур'є-об'єктив, реєстратор спектра сигналу.

Другий розділ присвячено дослідженню та розробці методів проектування КОС з метою аналізу та оптимізації його основних характеристик. Визначено основні характеристики КОС і представлено методи їх розрахунку. Вказано шляхи розширення ширини смуги пропускання спектроаналізатора. Встановлено вплив аберацій фур'є-об'єктива та геометричних розмірів приймача випромінювання на граничні характеристики приладу. Проаналізовано можливість використання дифракційної лінзи в якості фур'є-об'єктива. Розроблено методи визначення первинних похибок складання оптичної системи КОС і похибки вимірювання амплітуди і просторової частоти вхідного сигналу. Наведено приклади розрахунку характеристик КОС.

В третьому розділі розглянуто деякі практичні аспекти застосування КОС в конкретних вимірювальних приладах і системах. Представлені методи і засоби вимірювання мікродефектів прозорих плівок і дзеркальних поверхонь, пористості тонких волоконних матеріалів за оптичним коефіцієнтом прозорості, геометричних параметрів просторових квазіперіодичних структур та розміру малих частинок в прозорих середовищах.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Применение методов фурье-оптики / Под ред. Г. Старка; пер. с англ. под ред. И. Н. Компанца. – М.: Радио и связь, 1988. – 536 с.
2. Кейсесент Д. Оптическая обработка информации / Д. Кейсесент; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 350 с.
3. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / Дж. Гудмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
4. Юу Ф.Т.С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию / Ф.Т.С. Юу; под ред. В. К. Соколова; пер. с англ. – М.: Сов.радио, 1979. – 304 с.
5. Акаев А.А. Оптические методы обработки информации / А.А. Акаев, С.А. Майоров. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 260 с.
6. O'Shea D.C. Diffractive Optics Design, Fabrication and Test / D.C. O'Shea, T.J. S uleski, A.D. Kathman, D.W. P rather.– SPIE PRESS, Washington USA, 2005. – 238 p.
7. Saleh Bahaa E.A. Fundamentals of photonics / E.A. Saleh Bahaa and C.T. Malvin. – New York: Wiley, 1991. – 948 p.
8. Колобродов В.Г. Дифракційна теорія оптичних систем / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик – К.: НТУУ «КП», 2011. – 148 с.
9. Колобродов В.Г. Проектування дифракційних оптичних елементів і систем/В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик.– К.: НТУУ «КП», 2012.– 200с.
10. Колобродов В.Г. Прикладна дифракційна оптика / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик. – К.: НТУУ «КП», 2014.– 312 с.
11. Колобродов В.Г. Визначення узагальнених характеристик когерентних спектроаналізаторів /В.Г. Колобродов В.Г., Г.С. Тимчик, К.А. Нгуєн // Наукові вісті НТУУ «КП». – 2012. № 5. – С. 102-108.

12. Колобродов В.Г. Граничні характеристики когерентного оптичного спектроаналізатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик, К.А. Нгуєн // Наукові вісті НТУУ «КП». – 2014. – №5. – С. 119–123.
13. Колобродов В.Г. Исследование геометрических параметров квазипериодических структур с помощью когерентного оптического спектроанализатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик // Опτικο-механическая промышленность. – 1982. – №2. – С. 9–11.
14. Баррекетт Е. О перспективах оптических методов в обработке информации / Е. Баррекетт // Автометрия. – 1978. – №1. – С. 54–60.
15. Николов И.Д. Оптические системы для записи и обработки информации / И.Д. Николов // Автометрия. – 1979. – №4. – С. 84–88.
16. Богатырева В.В. Оптические методы обработки информации / В.В. Богатырева, А.Л. Дмитриев. – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 74с.
17. Кондратенков Г.С. Обработка информации когерентными оптическими системами / Г.С. Кондратенков. – М.: Советское радио, 1972. – 208 с.
18. Шанин В.И. Исследование возможности оптической согласованной фильтрации для контроля геометрии деталей в точном приборостроении / В.И. Шанин // Опτικο-механическая промышленность. – 1982. – № 7. – с.15–17.
19. Парыгин В.Н. Оптическая обработка информации / В.Н. Парыгин, В.И. Балакший. – М.: изд. Московского ун-та, 1987. – 142 с.
20. Федоров И.Ю. Исследование когерентного динамического вейвлет коррелятора изображений: дис. канд. техн. наук: 01.04.21/ И.Ю. Федоров. – Санкт-Петербург, 2009. – 104с.
21. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет опτικο-электронных приборов. - 4 изд. / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
22. Свет В.Д. Оптические методы обработки сигналов / В.Д. Свет. – М.: Энергия, 1971. – 104 с.

23. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 798с.
24. Zhang Lei, Zhong Xing, Jin Guang. Design of high resolution Fourier transform lens // Proc. of SPIE. – 2007. – Vol. 6722. – P. 672211-1 – 672211-6.
25. Айрапетян В.С. Физика лазеров / В.С. Айрапетян. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 134 с.
26. Климов Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами / Ю.М. Климов. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.
27. Miks A. Four-element optical system for Fourier transform / A. Miks, J. Novak // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5457. – P. 284–291.
28. Pijitrojana W. Symmetrical Fourier transform lens design for signal processing optics / W. Pijitrojana. // Thammasat Int. J. Sc. Tech. – 2005. – Vol. 10, No.3. – P. 73–93.
29. Вычислительная оптика: Справочник // М. М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др. / Под. общ. ред. М. М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 424 с.
30. Бобров С. Т. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсук, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение. – 1986. – 223 с.
31. Неуймін О.С. ПЗЗ-матриці / О.С. Неуймін, С.М. Дяченко // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010.-№41. – С. 182–189.
32. Kodak Achieves New Breakthrough in Imaging Technology World's First 50 Megapixel CCD Sensor Sets New Standard for Professional Photographers // M2 Press WIRE. – July 2008.

33. Колобродов В.Г. Анализ оптических схем когерентных спектроанализаторов / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик // Опτικο-механическая промышленность. – 1982. – № 10. – С. 4–7.
34. Колобродов В.Г. Погрешность сборки и юстировки оптической системы когерентного спектроанализатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик, С.П. Сахно // Опτικο-механическая промышленность. – 1983. – № 9. – С. 6–9.
35. Buralli D.A. Design of a wide field diffractive landscape lens / D.A. Buralli, G.M. Morris // Applied Optics. – 1989. – Vol.28, No.18. – P. 3950–3959.
36. Колобродов В.Г. Можливість використання дифракційних лінз в когерентних спектроаналізаторах / В.Г. Колобродов, К.А. Нгуен, Г.С. Тимчик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 36–44.
37. Ozaktas H.M. Space-bandwidth products of conventional Fourier transforming systems / H.M. Ozaktas, H. Urey // Optical Communications. – 1993. – Vol. 104, No 1,2,3. – P. 29–31.
38. Kolobrodov V.G. Geometrical noise bandwidth of thermal imager with matrix detector / V.G. Kolobrodov // Proc. of SPIE. – Vol. 9066. – 2013. – P. 90660M-1–9066M-6.
39. Kolobrodov V.G. The problems of designing coherent spectrum analyzers / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchyk, Q.A. Nguen // Proc. of SPIE. – Vol. 9066. – 2013. – P. 90660N-1–9066N-7.
40. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В.Г. Колобродов В.Г., М.І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
41. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев – М.: Наука, 1983. – 752 с.
42. Митрофанов С.А. Применение лазеров в машиностроении и

- приборостроении / С.А. Митрофанов, К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко. – Л.: Машиностроение, 1978. – 342 с.
43. Франсон М. Когерентность в оптике / М. Франсон, С. Сланский. – М.: Наука, 1967. – 220 с.
44. Lohman A.W. Space-bandwidth product of optical signals and systems / A.W. Lohman, R.G. Dosch, D. Mendovic et al. // J. Opt. Soc. Am. A. – 1996. – Vol. 13, No 3. – P. 470–473.
45. Pijitrojana W. Symmetrical Fourier transform lens design for signal processing optics / W. Pijitrojana // Thammasat Int. J. Sc. Tech. – 2005. – Vol. 10, No. 3. – P.73 – 93.
46. Проектирование оптических систем / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта; пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 432 с.
47. Buralli Dale A. Design of a wide field diffractive landscape lens / Dale A. Buralli, G. Michael Morris // Applied optics. – 1988. – Vol. 28, No.18. – P. 3950-3959.
48. Welford W. T. Aberrations of optical systems / W. T. Welford. – Hilger, Bristol, 1986. – 284 p.
49. Акаев А. А. Когерентные оптические вычислительные машины / А.А. Акаев, С.А. Майоров. – Л.: Машиностроение, 1977. – 440 с.
50. Москалев В.А. Теоретические основы оптико-физических исследований / В.А. Москалев. – Л.: Машиностроение, 1987. – 316 с.
51. Таланчук П.М. Лазеры в контрольно-измерительной технике / П.М. Таланчук, С.П. Голубков, В.П. Маслов. – К.: Техника, 1992. – 363 с.
52. Колобродов В. Г. Возможность исследования микродефектов отражающих поверхностей и прозрачных плёнок с помощью когерентного спектроанализатора / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик // Оптико-механическая промышленность. – 1980. – №11. – С. 11–13.
53. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации / Х. Фризер. – М.: Мир, 1978. – 323 с.

54. Коваль С.Т. Статистические характеристики коэффициента отражения некоторых зеркальных поверхностей / С.Т. Коваль, В.Г. Колобродов // Оптико-механическая промышленность. – 1976. – №6. – С. 6–10.
55. Косторнов А.Г. Проницаемые металлические волоконные материалы / А.Г. Косторнов. – К.: Техника, 1983. – 318 с.
56. Косторнов А.Г. Термообработка металонаполненных целлюлозных войлоков и их прочностные свойства / А.Г. Косторнов, О.В. Кириченко, Н.С. Гужва // Порошковая металлургия. – 1981. – № 12. – С. 26–30.
57. Сороко Л.М. Основы когерентной оптики и голографии / Л. М. Сороко. – М.: Наука, 1971. – 615 с.
58. Карлин С. Основы теории случайных процессов / С. Карлин. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
59. Большаков И.А. Прикладная теория случайных потоков / И.А. Большаков. – М.: Сов. радио, 1978. – 247 с.
60. Абакшин Ю.Е. Описание пространственного импульсного поля помех вероятностной моделью составного процесса / Ю.Е. Абакшин, Л.Г. Коваленко, Р.П. Филимонов // Автометрия. – 1975. – №6. – С. 3–8.
61. Иваницкий Г.В. Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики / Г.В. Иваницкий, А.С. Куниский. – М.: Энергия, 1981. – 166 с.
62. Колобродов В.Г. Искажения Фурье-образа сигналов при гауссовом освещении входного транспаранта в когерентных оптических спектроанализаторах / В.Г. Колобродов, С.П. Сахно, Г.С. Тымчик // Оптико-механическая промышленность. – 1984. – №11. – С. 1–4.
63. Фесенко Н.И. Влияние положения детали в лазерном пучке на точность определения ее размера по дифракционной картине / Н.И. Фесенко, Ю.Н. Солодкин // Изв. вузов СССР. Сер. «Приборостроение». – 1983. – №11. – Т. 26. – С. 56–62.

64. Горянинов В.Т. Статистическая радиотехника / В.Т. Горянинов, А.В. Журавлев, В.И. Тихонов. – М.: Сов. радио, 1980. – 543 с.
65. Васильев Л.А. Интерферометр с дифракционной решеткой / Л.А. Васильев, И.В. Еригов. – М.: Машиностроение, 1976. – 232 с.
66. Голант М.Б. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов / М.Б. Голант, А.А. Маклакова, М.Б. Шур. – М.: Сов. радио, 1969. – 408 с.
67. FRITSCH, "High-Tech Particle Sizing by FRITSCH," [Online]. Available: <http://www.fritsch-sizing.com/products/>. [Accessed 1102 2014].

Наукове видання

**Колобродов Валентин Георгійович  
Тимчик Григорій Семенович  
Колобродов Микита Сергійович**

**Когерентні оптичні  
спектроаналізатори**

**Монографія**

*В авторській редакції  
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Темплан 2015 р., поз. 3-1-015

Підп. до друку 16.11.2015. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 10,46. Обл.-вид. арк. 17,40. Зам. № 15-219.  
Наклад 300 пр.

---

Видавництво «Політехніка» НТУУ «КПІ»  
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.  
03056, м. Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
тел. (44) 406-81-78