

УДК 681.785.574

В. Г. Колобродов¹, М. І. Лихоліт², Д. В. Поздняков², В. М. Тягур²

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

² Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Проаналізовано варіанти побудови зображувальних фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі. Значну увагу приділено аналізу можливих оптичних схем, які можуть бути застосовані при розробці зображувальних фур'є-спектрометрів. Розглянуті схеми можуть бути використані у спектрометрах космічного і авіаційного базування.

ВСТУП

Розвиток сучасної держави не можна уявити без використання космічного простору для вирішення як загальнодержавних, так і комерційних задач. Аналіз напрямків розвитку передових держав світу засвідчує, що впровадження сучасних космічних технологій дозволяє вирішувати комплекс задач зв'язку, навігації, картографування, моніторингу Землі та ін. [6]. Особливого значення набуває створення систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з навколосезного простору. Знімки, отримані з космічних апаратів ДЗЗ, використовуються спеціалістами багатьох галузей для пошуку корисних копалин, оцінювання ґрунтів для сільського господарства, вивчення та оцінювання океанічних ресурсів, виявлення забруднень, аналіз та прогнозування кліматичних змін, картографування рельєфу та інше [3, 4, 14].

Найбільш перспективними є зображувальні фур'є-спектрометри, що створюють так званий «куб даних», який по двох осях має дві просторові координати підстильної поверхні, а по третій — спектральну координату, причому реєстрація по цій координаті провадиться у сотнях спектральних каналів. Такі системи не тільки дають набагато більше інформації, ніж мульти-спектральні системи, але ще й мають переваги

над класичними (дисперсійними або фільтровими) гіперспектральними системами [2].

ТИПИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ

Зображувальний фур'є-спектрометр (fourier transform imaging spectrometer) (ЗФС) — пасивна спектральна сканувальна оптико-електронна система. Особливістю є те, що ЗФС реєструє не спектр підстильної поверхні, а інтерференційну картину. Відновлення спектру здійснюється шляхом використання зворотного перетворення Фур'є до сигналу, зареєстрованого матричним приймачем випромінювання. Перевагою ЗФС у порівнянні з іншими системами (дисперсійними та фільтровими) є те, що реєстрація всіх спектральних каналів (а їх може бути декілька сотень) здійснюється одночасно.

Відомі схеми ЗФС можна розділити на основні два типи, які розрізняються способом одержання різниці ходу між променями [1]:

1) статичні (spatially modulated imaging spectrometer), у яких інтерферограма створюється та реєструється у вигляді нерухомої картини, а формування «куба даних» (з другою просторовою координатою) здійснюється при русі платформи зі спектрометром по орбіті, тобто при скануванні поверхні Землі;

2) динамічні (temporally modulated imaging spectrometer) — у таких приладах різниця ходу променів змінюється механічним способом, наприклад шляхом переміщення одного з дзеркал

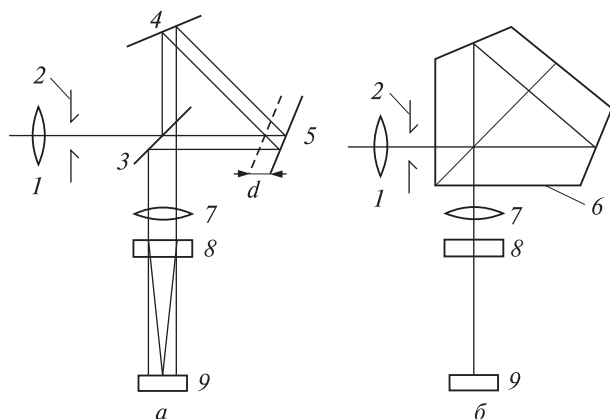


Рис. 1. Оптична схема дзеркального (а) та монолітного (б) трикутного інтерферометра Саньяка: 1 — вхідна оптика, 2 — вхідна щілина, 3 — світлоділильна пластинка; 4, 5 — дзеркало, 6 — монолітний інтерферометр Саньяка (склейка з двох пентапризм, на гіпотенузній грані — світлоділильне покриття), 7 — вихідна оптика, 8 — циліндрична оптика, 9 — матричний приймач випромінювання

інтерферометра, а інтерферограма, що реєструється фотоелектричним способом, є електричним сигналом, залежним від часу.

Окремо можна виділити поляризаційні та комбіновані фур'є-спектрометри.

Розглянемо детальніше оптичні схеми таких систем.

Статичні фур'є-спектрометри. Статичні фур'є-спектрометри зазвичай будують на базі інтерферометра Саньяка. Класичний трикутний інтерферометр Саньяка може бути або дзеркальним, або монолітним (рис. 1). Принцип роботи таких приладів наведено у роботах [5, 10, 11, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/MighteSat II.1>].

Вхідна оптика будує зображення підстильної поверхні у площині вхідної вузької прямокутної щілини 2. Ширина вхідної щілини дорівнює ширині пікселів на матричному приймачі 9, довжина щілини — висоті стовпців матриці. Розмір вхідної щілини можна змінювати, збільшення ширини щілини призведе до збільшення відношення сигнал/шум, але водночас до зменшення просторового розділення приладу. При великій ширині щілини зображувальний фур'є-спектрометр перетворюється у звичайний фур'є-спектрометр.

Далі світлоділильна пластинка у інтерферометрі розділяє вхідне випромінювання на два пучки, один з яких відбивається, а інший проходить через нього. Ці два пучки дають два зображення підстильної поверхні. Якщо інтерферометр симетричний, два зображення збігаються, і інтерференційних ефектів нема. Але якщо одне з дзеркал (одна з граней призми) зміщено, тоді пучки будуть проходити різними шляхами, і два зображення підстильної поверхні будуть зміщені перпендикулярно до оптичної осі у різних напрямках. Таким чином, інтерферометр Саньяка вносить поперечний зсув між когерентними пучками, що пройшли крізь нього. Ці два пучки будуть інтерферувати у задній фокальній площині вихідної оптики 7. При цьому передня фокальна площина вихідної оптики 7 збігається із зображенням підстильної поверхні на вхідній щілині 2, тому після вихідної оптики 7 пучки поширюються паралельно оптичній осі. Для того щоб побудувати зображення вхідної щілини 2 у площині матричного приймача випромінювання 9, між вихідною оптикою 7 та матрицею 9 розміщують циліндричну оптику 8, причому матриця 9 знаходиться у її задній фокальній площині.

Вздовж стовпців матриці будується зображення щілини 2, тобто вузької полоси підстильної поверхні, розміщеної перпендикулярно до напрямку зміщення носія. Просторове розділення по цій координаті визначається розміром пікселів у стовпцях матриці. Одночасно з цим вздовж рядків матриці реєструється інтерферограма (функція автокореляції) від кожної ділянки підстильної поверхні, розмір зображення якої відповідає одному пікселю матриці. Наступне відновлення інтерферограми перетворенням Фур'є дає спектральну інформацію для кожної ділянки підстильної поверхні. Друга просторова координата реєструється послідовно у результаті зміщення зображення сцени відносно вхідної щілини при зміщенні носія. Такий прилад схожий на щілинний спектрометр: кожен рядок матриці буде містити спектр однієї ділянки підстильної поверхні у формі інтерферограми.

Перевагою дзеркальної схеми є те, що відстань між максимумами смуг можна довільно змінювати, зміщуючи одне із дзеркал. Підкреслюємо,

що для отримання інтерферограми дзеркало не рухається, дзеркало зміщується до досягнення потрібної відстані між смугами, а потім закріплюється. Недоліком є чутливість до вібрацій.

Перевагою монолітної схеми є те, що вона не чутлива до роз'юстувань від вібрацій у процесі роботи, однак вона дорожча за дзеркальну схему та вимагає великої точності при виготовленні призми інтерферометра.

Інтерферометр Саньяка може бути чотирикутним (рис. 2) [7, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/HawaiiSat-1>].

Інтерферометр має чотирикутну форму, містить три дзеркала, розташованих під кутом 90° один до одного, та світлоділильну пластину. На відміну від класичного інтерферометра Саньяка, чотирикутна схема має меншу довжину ходу променів, що зменшує віньєтування. Випромінювання, що потрапляє у інтерферометр, розділяється на два пучки світлоділильною пластинною. Пучки проходять різні за довжиною шляхи та фокусуються на приймачі випромінювання. Світлоділильну пластину та одне з дзеркал можна зміщувати за допомогою п'єзодвигунів. Світлоділильна пластину після розвороту на дуже малий кут закріплюється, що створює постійний градієнт різниці ходу вздовж рядків на матричному приймачі випромінювання. Завдяки цьому виникає інтерференційна картина.

У кожному кадрі кожна точка підстильної поверхні зображена на приймачі випромінювання з однією різницею ходу, тому один кадр не несе у собі спектральної інформації. Для отримання інтерферограми з усіма можливими різницями ходу однієї точки на поверхні Землі необхідно сканувати поверхню Землі так, щоб у кожному наступному кадрі точка на приймачі зміщувалася приблизно на один піксель. Ця серія кадрів і буде містити у собі інтерферограму з усіма можливими різницями ходу, а після перетворення фур'є-спектр даної точки.

Динамічні фур'є-спектрометри. Динамічні фур'є-спектрометри звичайно будують на базі модифікацій інтерферометра Майкельсона. Даний інтерферометр у класичному вигляді показано на рис. 3.

Інтерферометр Майкельсона складається зі світлоділильної пластини та двох дзеркал, одне

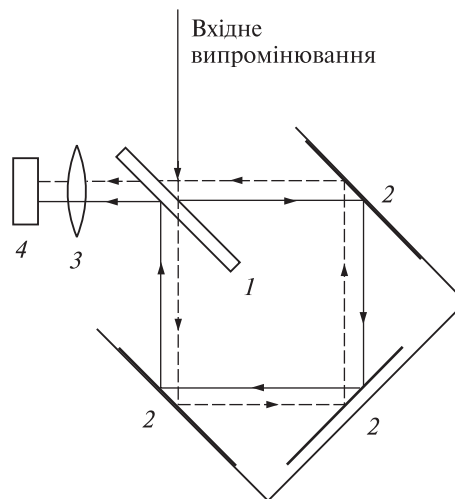


Рис. 2. Оптична схема чотирикутного інтерферометра Саньяка: 1 — світлоділильна пластину, 2 — дзеркало, 3 — вихідна оптика, 4 — матричний приймач випромінювання

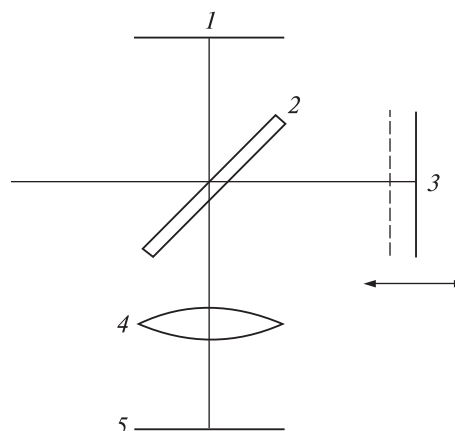


Рис. 3. Інтерферометр Майкельсона: 1 — нерухоме дзеркало, 2 — світлоділильна пластину, 3 — рухоме дзеркало, 4 — вихідна оптика, 5 — матричний приймач випромінювання

з яких закріплене, а інше рухається перпендикулярно до оптичної осі інтерферометра та змінює різницю ходу променів. Для створення інтерференційної картини при всіх можливих різницях ходу потрібно спостерігати сцену деякий час, впродовж якого дзеркало пройде з одного крайнього положення в інше. Для нормального функціонування дзеркала повинні бути перпендикулярні до оптичних осей інтерферометра.

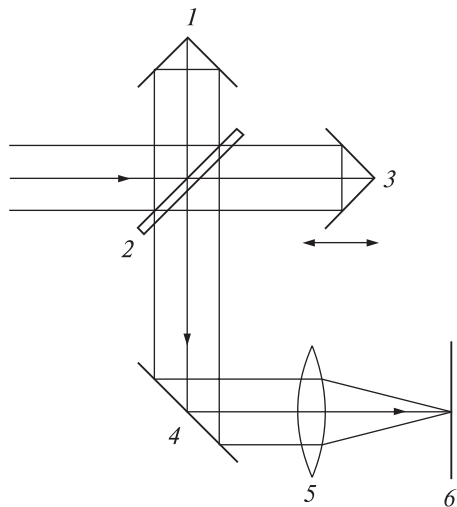


Рис. 4. Інтерферометр Майкельсона з кутовими відбивачами: 1 — нерухомий кутовий відбивач, 2 — світлоділильна пластина, 3 — рухомий кутовий відбивач, 4 — дзеркало, 5 — вихідна оптика, 6 — матричний приймач

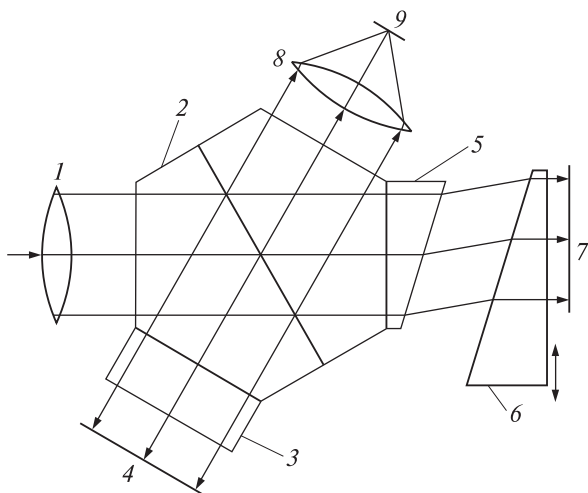


Рис. 5. Модифікований інтерферометр Майкельсона: 1 — вхідна оптика, 2 — шестикутна світлоділильна призма, 3 — компенсаторна пластинка; 4, 7 — нерухоме дзеркало; 5 — нерухома клиновидна призма, 6 — рухома клиновидна призма, 8 — вихідна оптика, 9 — матричний приймач випромінювання

Якщо це не так, виникають похибки у вимірюванні. У цій схемі додатково може застосовуватися лазер, встановлений перед світлоділильною пластиною для точного вимірювання величини зміщення рухомого дзеркала.

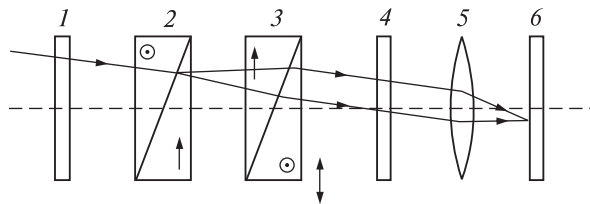


Рис. 6. Інтерферометр з подвійним променезаломленням: 1 — поляризатор-1; 2, 3 — призма Волластон, 4 — поляризатор-2, 5 — вихідна оптика, 6 — матричний приймач

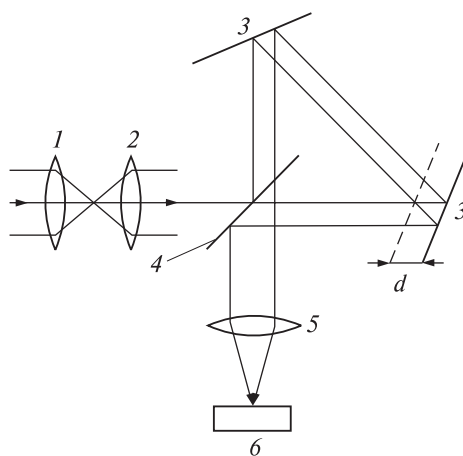


Рис. 7. Комбінація зображувальних фур'є-спектрометрів статичного та динамічного типів: 1 — вхідна оптика, 2 — коліматор, 3 — нерухомі дзеркала, 4 — світлоділильна пластина, 5 — вихідна оптика, 6 — матричний приймач випромінювання

Для покращення роботи приладу замість плоских дзеркал використовуються кутові відбивачі (рис. 4). Кут падіння променів на кутові відбивачі дорівнює куту відбивання від них незалежно від кута розміщення відбивачів, тому при їхньому використанні значно знижуються вимоги до точності встановлення.

Можливо також замінити кутові відбивачі на дифракційні решітки, встановлені під деякими кутами до оптичних осей інтерферометра для підвищення роздільної здатності приладу [8].

У роботі [12] описаний варіант модифікованого інтерферометра Майкельсона з клиновидними призмами. Цей варіант наведено на рис. 5.

Інтерферометр складається з вхідної оптики, світлоділильної призми, двох нерухомих дзеркал та двох клиновидних призм, одна з яких рухається

ся для зміни оптичної різниці ходу. Для компенсації дисперсії, що вноситься призмами у одному каналі, у інший вводиться компенсаторна пластинка. У фокальній площині вихідної оптики створюється інтерференційна картина. Інтерференційну картину та зображення одночасно реєструє матричний приймач випромінювання.

Перевагою такої схеми є менша чутливість до вібрацій та менша точність переміщення клину, ніж у схемах з рухомими дзеркалами.

Поляризаційні фур'є-спектрометри. Поляризаційні фур'є-спектрометри звичайно будують на базі поляризаційних інтерферометрів. Один з варіантів схем такого інтерферометра представлений на рис. 6 [9].

Інтерферометр з подвійним променезаломленням складається з двох призм Волластона, встановлених так, як показано на рис. 6. Випромінювання зі сцени потрапляє на поляризатор *I*, що поляризує випромінювання під кутом 45° до оптичних осей призм Волластона. Далі випромінювання, після проходження першої призми Волластона, ділиться на два пучки з однаковою інтенсивністю. Ці два пучки ортогонально поляризовані та розходяться. Після проходження другої призми Волластона два пучки колімуються та

фокусується вихідною оптикою *5* на матричний приймач *6*, де спостерігається інтерференційна картина. Для зміни різниці ходу променів друга призма Волластона рухається перпендикулярно до оптичної осі спектрометра.

Такий інтерферометр має всі переваги зображувальних фур'є-спектрометрів, а також він нечутливий до вібрації. Точність встановлення оптичних компонентів у приладі, побудованому за цією схемою, на два порядки нижча, ніж вимагається у приладах, побудованих за традиційними схемами. Спектральний діапазон роботи приладу обмежений лише спектральним пропусканням оптики та спектральною чутливістю матричного приймача.

Комбіновані фур'є-спектрометри. Схему даного фур'є-спектрометра, що є комбінацією спектрометрів статичного та динамічного типів, представлено на рис. 7 [13].

Вхідна оптика будує зображення підстильної поверхні у першу площину зображень. Далі коліматор колімує випромінювання, і воно потрапляє у інтерферометр Саньяка. Вихідна оптика фокусує отриману інтерферограму на матричний приймач випромінювання. За способом отримання різниці ходу ця схема схожа на ЗФС

Характеристики схем зображувальних фур'є-спектрометрів

Тип спектрометра	Переваги	Недоліки
Статичний дзеркальний	Відсутність рухомих частин; відносно дешева та проста у виготовленні конструкція інтерферометра; можливість зміни відстані між максимумами у інтерференційній картині	Чутливість до роз'юстувань, вібрацій; використання циліндричної оптики; наявність щілини, що зменшує світлосилу у порівнянні з динамічними ЗФС
Статичний монолітний	Відсутність рухомих частин, нечутливість до вібрацій	Відносно дорога та складна у виготовленні конструкція інтерферометра; використання циліндричної оптики; наявність щілини, що зменшує світлосилу у порівнянні з динамічними ЗФС
Динамічний	Відсутність щілини, що збільшує світлосилу у порівнянні зі статичними ЗФС	Наявність рухомих частин; складний алгоритм обробки отриманих зображень
Поляризаційний	Відсутність щілини, що збільшує світлосилу у порівнянні зі статичними ЗФС	Наявність рухомих частин, хоча точність їхнього переміщення менша за точність, що потрібна у динамічних ЗФС
Комбінований	Відсутність щілини, що збільшує світлосилу у порівнянні зі статичними ЗФС; відсутність рухомих частин та циліндричної оптики	Складний алгоритм обробки отриманих зображень

статичного типу, однак за способом реєстрації інтерферограми — на ЗФС динамічного типу.

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел засвідчує, що на даний час значна увага приділяється ЗФС статичного типу через їхні переваги у порівнянні з ЗФС динамічного типу (відсутність рухомих частин, нечутливість до вібрацій, відносна дешевизна). Основна доля ЗФС, що зараз використовується, побудована на основі інтерферометра Саньяка. Зображувальні фур'є-спектрометри поляризаційного типу використовуються зараз тільки у лабораторних умовах, де досліджуються різні модифікації.

Переваги та недоліки розглянутих схем показані у таблиці.

Подальша робота буде спрямована на дослідження і розробку ЗФС комбінованого типу, як найбільш перспективного [13].

1. *Артюхина Н. К., Климович Т. В., Котов М. Н.* Математическая модель функционирования фурье-видео-спектрометра // Вісник НТУУ «КПІ». — 2012. — Вип. 43. — С. 35—46.
2. *Горбунов Г. Г.* Фурье-спектрометры // Гиперспектральные приборы и технологии: Тез. докл. научно-технической конф. — Красногорск, 2013. — С. 73—74.
3. *Гриб Д. А., Худов Г. В., Маковейчук О. М., Карлов Д. В. та ін.* Використання супутникових даних в інтересах оцінки пожежної обстановки при бойовому застосуванні повітряних сил збройних сил України // Системи озброєння і військова техніка. — 2010. — № 3 (23). — С. 176—179.
4. *Жолобак Г. М.* Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України // Космічна наука і технологія. — 2010. — 6, № 3. — С. 46—54.
5. *Пат. 2313070* Российская Федерация, МПК G01J3/45, G01B9/02. Интерференционный спектрометр [Электронный ресурс] / Грязнов Г. М., Егорова Л. В., Стариченкова В. Д. и др. — Заявл. 26.12.2005; опубл. 20.12.2007. — Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2313070>
6. *Пашков Д. П.* Анализ развития оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2008 — Вип. 4 (8). — С. 15—18.
7. *Crites S. T., Lucey P. G., Wright R., et al.* A low cost thermal infrared hyperspectral imager for small satellites // Proc. SPIE. — 2011. — **8044**, Sensors and Systems for Space Applications.
8. *Ferrec Y.* Spectro-imagerie aéroportée par transformation de Fourier avec un interféromètre statique à décalage latéral : réalisation et mise en oeuvre: these pour obtenir le grade de Docteur en Sciences. — Université Paris-Sud XI, 2008. — Mode d'accès: http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/35/71/22/PDF/these_Ferrec.pdf.
9. *Harvey A. R., Fletcher-Holmes D. W.* Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer // Opt. Express. — 2004. — **12**, N 22. — Mode of access: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-12-22-5368>.
10. *Lucey P. G.* SMIFTS: A cryogenically-cooled spatially-modulated imaging infrared interferometer spectrometer // Proc. SPIE — 1993. — **1937**, Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment.
11. *Otten III L. J., Butler E. W., Rafert B., Sellar R. G.* Design of an airborne Fourier transform visible hyperspectral imaging system for light aircraft environmental remote sensing // Proc. SPIE. — 1995. — **2480**, Imaging Spectrometry.
12. *Tingkui Mu, Chunmin Zhang, Daochang Zhao.* Analysis of a moderate resolution Fourier transform imaging spectrometer // Opt. Commun. — 2009. — **282**. — P. 1699—1705.
13. *Yan Yuan, Xiubao Zhang, Chengming Sun, Zhiliang Zhou.* Modeling of the temporally and spatially modulates Fourier transform imaging spectrometer working in orbit // Optik. — 2011. — **122**. — P. 1576—1583.
14. *Yuen P., Richardson M.* An introduction to hyperspectral imaging and its application for security, surveillance and target acquisition // Image Sci. J. — 2010. — P. 1—13.

Стаття надійшла до редакції 06.10.14

В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт,
Д. В. Поздняков, В. М. Тягур

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Проаналізовано варіанти побудови зображувальних фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі. Значну увагу приділено аналізу можливих оптичних схем, які можуть бути застосовані при розробці зображувальних фур'є-спектрометрів. Розглянуті схеми можуть бути використані у спектрометрах космічного і авіаційного базування

V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit,
D. V. Pozdnyakov, V. M. Tiagur

OPTICAL SYSTEMS OF FOURIER TRANSFORM IMAGING SPECTROMETER FOR REMOTE SENSING

We analyzed some variants of Fourier transform imaging spectrometer (FTIS) for remote sensing. Much attention is given to the analysis of possible optical schemes which can be applied in the FTIS design. The considered schemes can be used in devices of space and aviation basing.