

Харківський національний університет радіоелектроніки
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри МЕЕПП

_____ І.М. Бондаренко

“ _____ ” _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові

Мясоєд Анатолій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Застосування адаптивних алгоритмів спектрального аналізу для підвищення роздільної здатності низькочастотного радіотелескопу» затверджена наказом по університету № 171 Стз від “23” 10 2020 року
2. Термін подання студентом роботи 08.12.2020 р.
3. Вихідні дані до роботи Адаптивна система обробки сигналів для ФАР
Робочий діапазон частот від 10 МГц до 70 МГц
Система має підвищити кутову роздільну здатність антени радіотелескопу.
Додаткові вимоги: максимальна довжина кутової вибірки 8192 елементи;
– час обробки однієї вибірки не більше 5 с;
– точність оцінки частоти окремих спектральних компонент не гірше 0,1 % в робочій смузі частот.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Огляд конструкцій телескопів для спостереження сигналів з космосу.

2. Огляд радіотелескопів.

3. Розробка 25-елементних антен-решіток з активних диполів радіотелескопу ГУРТ

4. Розробка програми авторегресійного спектрального аналізу

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Презентація (слайди)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
1	Огляд телескопів для спостереження сигналів з космосу	30.10.20	
2	Огляд радіотелескопів	10.11.20	
3	Розробка 25-елементних антен-решіток з активних диполів	15.11.20	
4	Розробка програми авторегресійного спектрального аналізу	25.11.20	
5	Написання пояснювальної записки	30.11.20	
6	Підготовка презентації	02.12.20	
7	Рецензування, нормоконтроль, здача роботи на кафедрі	08.12.20	

Дата видачі завдання 23.10.2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Грицунов О.В.
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 74 с., 24 рис., 17 джерел, 3 додатки.

АВТОРЕГРЕСІЙНИЙ МЕТОД, ОПРОМІНЮВАЧ, РАДІОТЕЛЕСКОП, РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ, ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА

Об'єктом роботи є фазована антенна решітка радіотелескопу ГУРТ.

Метою роботи є аналіз тенденцій вдосконалення засобів вимірювання характеристик космічних об'єктів та розробка програмних методів підвищення роздільної здатності фазованої решітки радіотелескопу.

Метод дослідження – чисельний аналіз за допомогою ЕОМ.

У роботі розглянуто сучасні методи отримання космічних сигналів за допомогою таких приладів як телескопи і радіотелескопи. Описано принципи побудови конструкції, параметри, характеристики телескопів різних діапазонів, а саме, оптичних, інфрачервоних, рентгенівських та гамма телескопів і радіотелескопів з діапазоном довжин хвиль метрового, дециметрового, сантиметрового та міліметрового.

Внаслідок виконання роботи розроблено програмний модуль, який дозволить підвищити роздільну здатність фазованої решітки нового низькочастотного радіотелескопу ГУРТ.

ABSTRACT

Master's explanatory note contains: 74 p., 24 fig., 17 sources, 3 annexes.

AUTOREGRESSION METHOD, RADIATOR, RADIOTELESCOPE, RESOLUTION, PHASED ANTENNA ARRAY

The object of work is the phased array antenna of the GURT radio telescope.

The aim of the work is to analyze the trends of improvement of means of measuring the characteristics of space objects and the development of software methods to increase the resolution of the phased array of the radio telescope.

Research method is numerical analysis using a computer.

The paper considers modern methods of obtaining space signals using devices such as telescopes and radio telescopes. The principles of construction, parameters, and characteristics of telescopes of different ranges, namely, optical, infrared, X-ray and gamma telescopes and radio telescopes with a wavelength range of meter, decimeter, centimeter and millimeter are described.

As a result of the work, a software module was developed that will increase the resolution of the phased array of the new low-frequency radio telescope GURT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТОК ТЕЛЕСКОПІВ	11
1.1 Оптичні наземні телескопи	21
1.2 Оптичні космічні телескопи	23
2 ТЕЛЕСКОПИ ОКРЕМИХ ДІАПАЗОНІВ ДОВЖИН ХВИЛЬ	28
2.1 Інфрачервоні телескопи.....	28
2.2 Телескопи рентгенівського діапазону	32
2.3 Телескопи ультрафіолетового діапазону.....	33
2.4 Телескопи гамма-діапазону	36
3 ОГЛЯД РАДІОТЕЛЕСКОПІВ	39
3.1 Радіотелескопи міліметрових хвиль	41
3.2 Радіотелескопи сантиметрових хвиль	44
3.3 Радіотелескопи метрових хвиль	47
3.4 Радіотелескопи декаметрових хвиль.....	49
3.4.1. Антенні системи НЧ-радіотелескопів.....	50
3.4.2 Цифрові приймачі основної смуги частот для УТР-2 і УРАН....	54
4 ЦИФРОВІ АНТЕННІ РЕШІТКИ В РАДІОАСТРОНОМІЇ.....	58
4.1 Принцип дії цифрової антенної решітки	58
4.2 Недоліки класичних алгоритмів обробки сигналу ЦАР	60
4.3 Параметричні алгоритми обробки сигналів	62
5 ПРИКЛАДИ АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ СИГНАЛІВ	67
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АЧХ-амплітудно-частотна характеристика

ГУРТ- Гігантський український радіотелескоп

ДМ- діаграмо-модуль

ДН- діаграма направленості

ДСП- цифровий процесор сигналів

РТ- радіотелескоп

УРАН- Український радіоінтерферометр академії наук

УТР-2- Український "Т"-подібний радіотелескоп, друга модифікація

ФАР- фазована антенна решітка

ФО- фазообертач

ФЧХ- фазо-частотна характеристика

ЦАР- цифрова антенна решітка

ADR- розширений цифровий приймач

f - частота

U - направляючий косинус по координаті схід-захід

V - направляючий косинус по координаті північ-південь

λ - довжина хвилі

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку областей науки присвячених вивченню космічних об'єктів викликає необхідність постійної модернізації технічних засобів, які будуть забезпечувати точність аналізу. У зв'язку з далеким розташуванням космічних об'єктів, важливими стають не тільки можливості просторового дозвіл оптичного зображення, а й пошук методів, що сприяють більш детальному вивченню об'єктів космосу. Переважна частина досліджуваних об'єктів мають малі кутові розміри, менш сотих і тисячних часток кутових секунд, так що визначення форми далеких об'єктів не представляється можливим – не можна відрізнити зірку від галактики або туманності. Головним методом аналізу такого роду об'єктів став спектральний аналіз. Аналізом спектральних ліній випромінювання і поглинання зірок і інших небесних тіл можна встановити хімічний склад, температуру, наявність магнітного поля та інші важливі параметри. Для різних небесних тіл характерно особливе розподіл енергії по спектру, яке прийнято називати спектром зірки. Сучасні досягнення спектроскопії дозволяють вести дослідження по всьому електромагнітного спектру, однак в умовах спостереження з поверхні Землі накладаються обмеження у вигляді непрозорості земної атмосфери для різних ділянок спектра. Таким чином, земні спостереження обмежені діапазоном спектру в 300-1000 нм і деякими областями після 1000 нм для яких атмосфера прозора. З урахуванням цього в даний час практикується використання деяких областей спектра для отримання повної і точної інформації про стан досліджуваних об'єктів. При детальному вивченні безперервних спектрів зірок помітні численні темні лінії поглинання.

Сучасні методики аналізу перш за все сконцентровані на фільтрації шумів одержуваних сигналів. Вивченням об'єктів ближнього і далекого космосу займаються всі великі дослідницькі станції під керівництвом космічних агентств: NASA, ESA. Використовуються різні технічні засоби фіксації випромінювання включаючи наземні установки і виведені на орбіту апарати.

Дослідження за допомогою космічної техніки займають особливе місце серед методів вивчення небесних тіл і космічного середовища. Багато в чому чистота і якість обробленого сигналу залежить від програмної фільтрації шумів. Однак у зв'язку з окремою вторинної обробкою сигналів виключається можливість високоточної співвідношення їх між собою.

Космічні апарати дали змогу здійснювати дослідження в усіх діапазонах довжин хвиль електромагнітного випромінювання. Позаатмосферні спостереження дають змогу приймати в космосі випромінювання, які поглинає або дуже змінює земна атмосфера: далекі ультрафіолетові, рентгенівські й інфрачервоні промені, радіовипромінювання деяких довжин хвиль, що не доходять до Землі, а також корпускулярні випромінювання Сонця та інших тіл.

Також для аналізу міжзоряного простору і атмосфери землі використовується терагерцове випромінювання, яке являє собою ділянку спектра між інфрачервоним і надвисокочастотним діапазонами. Терагерцове випромінювання можна використовувати для дослідження і детектування об'єктів з коливальними і обертальними переходами в молекулах, вільних носіях в напівпровідниках.

Дослідження раніше недоступних видів випромінювання зір і туманностей, міжпланетного та міжзоряного середовища дуже збагатили наші знання про фізичні процеси у Всесвіті.

Багато інформації про природу найвіддаленіших від нас тіл та їх систем також здобуто завдяки дослідженням, виконаним за допомогою встановлених на різних космічних апаратах приладів.

Метою атестаційної роботи є огляд стану та тенденцій вдосконалення засобів вимірювання характеристик космічних об'єктів та розробка засад системи адаптивного підвищення роздільної здатності сучасних декаметрових радіотелескопів з фазованими субрешітками.

1 СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТОК ТЕЛЕСКОПІВ

Прагнення проникнути якомога далі вглиб Всесвіту та побачити якомога більше нових об'єктів, послужило стимулом для створення більш потужних спостережних приладів. Але реальна оптична система здатна створювати зображення точки тільки у вигляді розмитої плями неправильної форми, іноді пофарбованого по краях, відбувається це через помилки оптичної системи – аберацій. Для однолінзових телескопів найбільш характерна хроматична аберація, яка пов'язана з тим, що показник заломлення скла залежить від довжини хвилі. Хроматичну аберацію можна зменшити, використовуючи об'єктиви з дуже великою фокусною відстанню. Так на світ з'явилися досить громіздкі і вкрай незручні в експлуатації телескопи. Йшов час, і на зміну їм прийшли «повітряні». У них об'єктив і окуляр кріпилися майже незалежно один від одного на власних штативах. Такі телескопи використовувалися аж до середини XVIII століття, хоча при спостереженнях на відкритому повітрі, особливо при вітрі, подібна конструкція вела себе не кращим чином.

Після того, як Йоганн Кеплер застосував в окулярі не негативну – двояко вгнуту-лінзу, а позитивну-двоопуклу, стало можливим використовувати окуляри з хрестом ниток і мікрометрів. Тепер телескопи стали застосовувати не тільки для огляду неба, але і в якості вимірювальних приладів. І все ж недоліки одне лінзових телескопів-рефракторів змушували науковців шукати нові шляхи. Ісаак Ньютон одним з перших виготовив дзеркало, отримавши «дзеркальний» сплав з міді, олова і миш'яку. Новий телескоп з дзеркалом діаметром 30 мм, вміщеному в трубу довжиною 160 мм, давав дуже чітке зображення. Це був перший рефлектор. І хоча у нього

не спостерігалось хроматичної аберації, але і він не був позбавлений недоліків. Головний же полягав в тому, що всіх інших типів аберацій було більше, ніж в рефракторі.

Оригінальну конструкцію двох дзеркальної системи, що складається з первинного і вторинного параболічного дзеркала, запропонував французький скульптор і художник Кассегрен. Ця конфігурація дуже зручна і широко застосовується в даний час, але в ті далекі часи ідея не була реалізована через неможливість отримати дзеркала потрібної форми. Успіху у виготовленні металевих дзеркал досяг Я.В. Брюс, а М.В. Ломоносов розробив нову конструкцію телескопа з нахиленим головним дзеркалом без вторинного, що істотно зменшувало втрати світла. Таку ж схему, незалежно від нього, використовував У. Гершель. У своєму будинку, перетвореному в майстерню, він разом з братами отримували особливий сплав з міді та олова, а потім виготовляли дзеркала і сам їх шліфували. Вершиною його праці став гігантський на той час телескоп з діаметром головного дзеркала в 122 см. До середини XVIII століття компактні, зручні в зверненні високоякісні рефлектори з металевими дзеркалами практично витіснили громіздкі Рефрактори. Однак і вони були далекі від досконалості. По-перше, металеві дзеркала мали низький коефіцієнт відбиття, а їх поверхня з часом тьмяніли. По-друге, їх виготовлення було трудомістким і дорогим. По-третє, великі металеві дзеркала деформувалися під власною вагою. І тут дуже допомогли успіхи в справі скловаріння. У 1758 році були отримані два сорти скла: легкий – крон і важчий – флінт, а отже, з'явилася можливість створення двох лінзових об'єктивів. Англієць Дж. Доллонд, виготовив об'єктив з позитивною кронового і негативною флінтовою лінзою і отримав патент на винахід об'єктива-ахромату, тобто вільного від хроматичної аберації. Такі об'єктиви, названі доллондовими трубами, швидко набули поширення.

Німецький оптик Й. Фраунгофер увів в широку практику науковий метод виготовлення лінзових об'єктивів і контроль за їх якістю. Він

конструював і виготовляв першокласні ахроматичні об'єктиви. Вінцем його оптичного мистецтва став 25-сантиметровий рефрактор, куплений у нього Росією і встановлений в Тартуський обсерваторії. До середини ХІХ століття ці рефрактори стали основними інструментами дослідження об'єктів. Здавалося, що у них безхмарне майбутнє. Але в міру розширення спектрального діапазону спостережень знову став проявлятися головний недолік лінзових об'єктивів – хроматизм. Великі проблеми викликало і подальше збільшення діаметра об'єктива рефрактора. Було неможливо отримати однорідні великі блоки скла для лінз, а товсті лінзові об'єктиви поглинали надто багато світла.

І тут творці телескопів знову згадали про рефлектори. В середині ХІХ століття здобув популярність хімічний метод сріблення скляних поверхонь. Це дозволило виготовляти дзеркала зі скла. Срібна плівка – фільм наносилася на скляне дзеркало шляхом впливу виноградного цукру на солі азотнокислого срібла. Такі дзеркала зі свіжим срібним фільтром відображали вже не 60% світла, що впало, як бронзові, а від 90 до 95%, а значить, були більш світлосильні при тому ж розмірі дзеркала. Незабаром Л. Фуко розробив метод визначення форми і якості поверхні дзеркал. Завдяки його дослідженням з'явилися рефлектори з параболічними дзеркалами.

Новим поштовхом у подальшому розвитку телескопобудування стало використання дзеркал з алюмінію. Вони, на відміну від срібних, повільніше старілися і краще відображали ультрафіолетові промені. В кінці ХІХ століття початок першого покоління нових рефлекторів поклав любитель астрономії Кросслей, який придбав увігнуте скляне параболічне дзеркало діаметром 91 см і виготовив телескоп. Наступний телескоп такого ж типу з діаметром дзеркала 1,5 м був встановлений на обсерваторії Маунт Вілсон. У 1918 році тут же був побудований 2,5-метровий рефрактор, а в 1947-му в Паломарской обсерваторії був введений в дію телескоп з 5-метровим дзеркалом. Робота на великих телескопах показала, що 3-метровий діаметр із

застосуванням високоякісної оптики в пункті зі спокійною атмосферою може виявитися набагато ефективніше 5-метрового. А тому в 50-80-ті роки в основному будувалися 3-4 метрові телескопи.

Паралельно з розвитком оптичної частини удосконалюються і механічні конструкції, управління телескопом довіряється комп'ютерів. Зараз вже все готово до створення великих телескопів, але через відсутність достатніх коштів обсерваторії, інститути і навіть країни об'єднуються для спільного будівництва. Весь наявний арсенал телескопів вчені використовують для вирішення важливих астрономічних питань, таких як походження планет, зірок, Сонячної системи, квазарів і активних галактик. Судячи з усього, майбутні розробки в телескопобудування обіцяють бути воістину грандіозними. Уже зараз пропонуються проекти 50- і 100-метрових телескопів, оснащених найсучаснішою приймально-апаратурою, здатної забезпечити якість спостережень, про який зараз можна тільки мріяти.

Спочатку ми розглянемо основні оптичні функції телескопа, не звертаючи уваги на конкретні реалізації (рис. 1.1). У відповідності з початковим використання в поєднанні з людським оком, телескоп приймає світло приблизно з простими хвильовими фронтами, а також виходить світла з гладкими хвильовими фронтами, тільки із зменшеним діаметром. В описі, заснованому на геометричній оптиці, паралельні вхідні промені виробляють до паралельним вихідним променю.

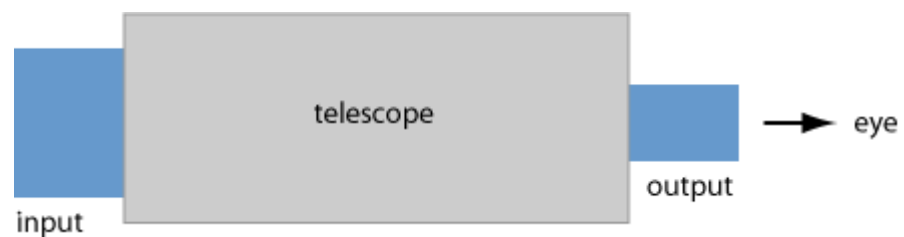


Рисунок 1.1 – Телескоп у вигляді чорного ящика.

У разі, якщо телескоп використовується, наприклад, з датчиком зображення, Він також повинен бути оснащений додатковою фокус лінзою або більш складним типом об'єктивів для формування зображення. В якості альтернативи, оптична конструкція телескопа вже може мати функцію побудови зображення.[1]

Зменшення діаметра променя пов'язано зі збільшенням кутів променя, що є основою збільшення зображення.

На перший погляд може здатися, що телескоп повинен призводити до зменшення зображення, оскільки колімірований промінь перетвориться в інший колімірований промінь з меншим радіусом променя. Однак телескопи насправді збільшуються. Це пов'язано з тим, що положення точки зображення на сітківці не залежить від діаметра променя, а скоріше від напрямку променя, і подальший аналіз показує, що будь-яка зміна напрямку вхідного променя перетворюється в більшу зміну напрямку вихідного променя – так само, як розбіжність променя збільшується при зменшенні діаметра променя. По суті, важливо кутове збільшення телескопа.

Хоча телескоп можна трохи модифікувати або відрегулювати для фокусування на об'єктах, що знаходяться на кінцевому відстані, його основна функція описана вище: створення паралельних вихідних променів для паралельних вхідних променів за умови, що формування зображення завершується, наприклад, оптичною системою ока.

На рис. 1.2 показані базові установки двох поширених типів рефракційних телескопів, кожен з яких заснований на двох лінзах. У телескопі Кеплера використовуються дві фокусує лінзи, відстань між

якими є сумою фокусних відстаней. Він виробляє перевернуті зображення. Між лінзами знаходиться площину реального зображення.

Велика лінза на вході називається об'єктивом, а інша називається окулярною лінзою. Проблема телескопа Кеплера полягає в тому, що з точки серйозно обмежена розміром окулярної лінзи. Можна збільшити поле зору, вставивши додаткову польову лінзу.

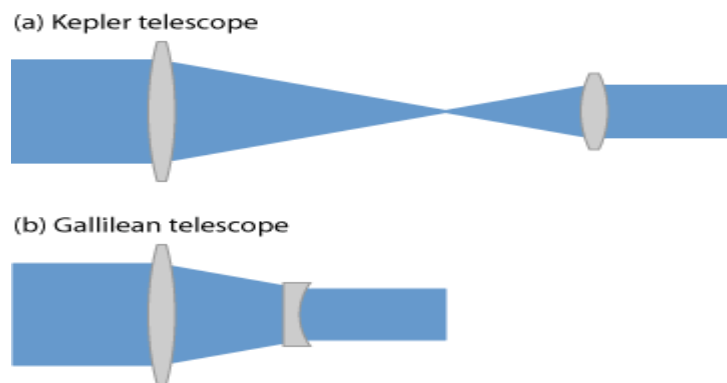


Рисунок 1.2 – Базові установки рефракційних телескопів кеплеровського (а) і галілеївського (б) типів

Галілеївський телескоп, показаний на рисунку для того ж збільшення, містить фокусує та роз фокусує лінзи і дає не інвертовані зображення. У нього немає реальній площині зображення.

Лінзи викликають хроматичні аберації, пов'язані із залежністю фокусної відстані лінзи від довжини оптичної хвилі. Ця проблема часто значно зменшується при використанні дублета ахроматичної лінзи або навіть апохромат з потрійною лінзою, по принаймні, для об'єктива, а іноді і для окуляра. В іншому конструкція об'єктивів для телескопів часто буває досить простий, По принаймні, якщо для додатка досить відносно невеликого поля

зору. Більш складні конструкції потрібні для щодо широкопольні об'єктивів, наприклад, для астрокамер.

Для типів інвертуючих телескопів можна або прийняти цю інверсію, або скасувати її за допомогою додаткової оптики. Для телескопів з доставкою світла на фотоплівки або датчики зображення інверсія, звичайно, не актуальна. Заломлюючі телескопи часто використовуються у вигляді біноклів.

Телескопи можуть бути реалізовані і на основі чисто відбиваючої оптики, тобто з дзеркалами. Хоча функції розпізнавання і роз фокусування легко досягаються за допомогою вигнутих дзеркальних поверхонь, потрібно адаптація конструкції, щоб впоратися з неминучим зміною напрямку променя при відображенні. Два поширених рішення – телескоп Касегрена і телескоп Ньютона – показані на рисунку. Обидва мають вторинне дзеркало, яке підвішене за допомогою павука і викликає круговий центральне затемнення головного дзеркала. Це призводить до деякої втрати дозволу, чого можна уникнути за допомогою деяких інших конструкцій телескопів, де, однак, внутрішня асиметрія викликає інші типи проблем.

Обидві системи не є афокальними системами, а скоріше створюють точку фокусування в доступній області, де, наприклад, можна розмістити датчики зображення. Однак перетворити такий телескоп в афокальними систему для прямого спостереження людським оком.

Відображення відбувається спочатку від головного дзеркала, а потім від вторинного дзеркала меншого розміру.

Відображають телескопи зазвичай працюють з сферичними дзеркалами. Наприклад, відбивачі Касегрена засновані на параболічному головному дзеркалі і гіперболічному вторинному дзеркалі, яке відбиває світло через отвір в головному дзеркалі.

Основні переваги рефракційних телескопів полягають в наступному:

Уникають будь-яких хроматичних дисперсії. Ця перевага вже було реалізовано Ісаком Ньютоном, який тому в 1668 році розробив перший телескоп-рефлектор, названий ньютонівським телескопом.

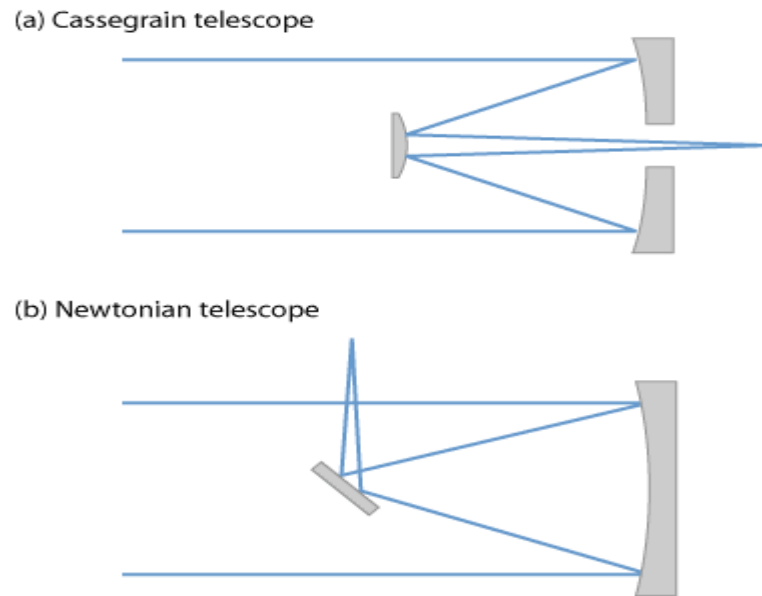


Рисунок 1.3 – Основні настройки телескопів

Можна проводити відносно великі дзеркала телескопів, які все ще мають розумний вага, тоді як великі лінзи стануть дуже важкими і дорогими. З цих причин рефлективні телескопи стали звичайним рішенням в астрономії.

Ранні телескопи страждали від проблеми швидкого потемніння відбивають при використанні металевих дзеркал з дзеркалами. Ця проблема була в значній мірі вирішена за рахунок використання дзеркал першої поверхні з металевим покриттям на основі скляних або керамічних дзеркальних підкладок. Вони також більш тверді, тому більш точно

зберігають форму, а деякі з них мають дуже малі коефіцієнти теплового розширення.

Надзвичайно точні дзеркала великих телескопів в даний час зазвичай виготовляються з склокерамічною підкладки, оптимізованої для дуже низького коефіцієнта теплового розширення. Зверніть увагу, що відхилення від ідеальної форми в ідеалі повинні бути набагато менше однієї оптичної довжини хвилі. Точність хвильового фронту можна додатково поліпшити за допомогою адаптивної оптики, яка зазвичай коригує спотворення від головного дзеркала не в їх джерелі, а в більш зручному місці, де шлях променю більш компактний.

Телескопи, що поєднують в собі здатність заломлення і відображає оптику, називаються катадіоптричні. Ця комбінація надає додаткові можливості для корекції аберацій зображення. І для розробки компактних і легких конструкцій.

Використовувані лінзи чи викликають різні типи оптичних аберацій, які більш менш знижують якість одержуваного зображення.

Лінзи та призми викликають хроматичні аберації, пов'язані із залежністю фокусної відстані лінзи від довжини оптичної хвилі. Можна використовувати ахроматичні лінзи для мінімізації таких проблем або взагалі відмовитися від лінз.

Крім того, існують інші аберації у вигляді астигматизму, коми і геометричної деформації зображення; зазвичай обмежують поле зору таким чином, щоб уникнути надмірних аберацій цих типів. Зокрема, при великому збільшенні може знадобитися менше поле зору. Для досягнення більшого поля зору з гарною якістю можна замінити об'єктив і окуляр комбінацією з декількох лінз, призначених для максимально можливої компенсації аберацій.

Ще одна проблема – кривизна поля. Для деяких конструкцій телескопів «площину» зображення значно викривлена, так що різкі зображення не можуть бути отримані на ділянці навкруги при використанні плоского датчика зображення. Тому в деяких телескопах використовуються вигнуті датчики зображення, де кривизна поля не може бути зменшена.

Збільшення є фактором, за допомогою якого кутовий дозвіл для спостерігача, збільшується, в порівнянні з прямим перегляду (без телескопа).

Цей параметр, звичайно, актуальний тільки для телескопів, які використовуються, наприклад, разом з людським оком замість датчика зображення.

Дизайн з великим збільшенням не обов'язково має високу роздільну здатність зображення. Однак збільшення повинно бути достатньо великим, щоб повністю використовувати дозвіл зображення, як в мікроскопі.

Можна реалізувати різні значення збільшення телескопа, використовуючи різні окуляри в залежності від умов спостереження. Загальна кутове збільшення це твір параметрів об'єктива і окуляра.

Досяжний дозвіл зображення телескопа, яке визначається як кутовий дозвіл на стороні об'єкта, в кінцевому підсумку обмежується дифракцією, якщо оптичне якість чудове; Найважливішим конструктивним параметром є діаметр вхідного отвору. Хоча вихідна апертура набагато менше, дифракція там менш значима через збільшення зображення. Кутовий дозвіл можна оцінити як $1,22$ довжини оптичної хвилі поділений на діаметр апертури. Для зеленого світла в телескопі з 1-метровим дзеркалом це дає дозвіл приблизно $0,67$ мкрад, тобто $0,14$ кутової секунди.

Велика апертура зазвичай також забезпечує високу світлосилу, що важливо для спостереження слабких об'єктів, таких як далекі зірки.

Найважливішими конструктивними параметрами телескопа є відкривається апертура і збільшення. Вони часто вказуються в компактній формі, наприклад, як 8 на 30 для біноклярного телескопа, якщо збільшення становить 8, а вхідний діаметр становить 30 мм. Для астрономічного телескопа така специфікація може не бути дана, тому що інструмент може використовуватися з різними окулярами, що призводить до різних значень збільшення.

1.1 Оптичні наземні телескопи

Невеликі наземні телескопи часто роблять у вигляді ручних біноклів, по суті складаються з двох незалежних телескопів – по одному на кожне око. Просторове розділення двох об'єктивів може бути збільшено за межі відстані між людськими очима, щоб домогтися кращого тривимірного зору.[2] Необхідна модифікація шляхів променю може бути проведена за допомогою призм, які можуть в той же час скасувати інверсію зображення, якщо це викликано іншою оптикою. Біноклі зазвичай використовуються для таких цілей, як орнітологія, полювання, спостереження за спортом і військова розвідка.

Існують також компактні монокуляри для перегляду одним оком, які можуть бути виготовлені з меншими витратами і вагою.

Більш великі телескопи, наприклад, для застосування в геодезії, часто виконуються у вигляді монокулярів і встановлюються на гнучкій системі, яка може бути моторизована для точного огляду в певних напрямках.

VLT – це найбільш просунутий оптичний інструмент в світі, що складається з чотирьох одиничних телескопів з основними дзеркалами діаметром 8,2 м і чотирьох рухливих АТ (допоміжних телескопів) діаметром

1,8 м. Телескопи можуть працювати разом, утворюючи гігантський «інтерферометр». VLTІ працює як телескоп з діаметром дзеркала 200 м. Світлові промені об'єднуються в VLTІ за допомогою складної системи дзеркал в підземних тунелях, де світлові шляхи повинні бути рівні відстаням менш 0,0001 мм на 100 метрів.

Телескопи Unit діаметром 8,2 м також можна використовувати окремо. За допомогою одного з таких телескопів зображення небесних об'єктів величиною до 30 можуть бути отримані при годинної експозиції. Це відповідає баченню об'єктів, які в чотири мільярди разів слабкіше, ніж те, що можна побачити неозброєним оком.

VLT (рис. 1.4) може працювати в трьох режимах:

- як чотири самостійних телескопа. Кожен телескоп може вести зйомку з годинною витримкою, завдяки чому він в 4 мільярди разів чутливий, ніж неозброєний очей (основний режим);
- як єдиний когерентний інтерферометр для збільшення кутового дозволу до декількох мілісекунд дуги (для λ приблизно 1 мкм);
- як єдиний некогерентний телескоп для збільшення світності об'єктів.

VLT оснащений широким спектром приладів для спостереження хвиль різного діапазону – від ближнього ультрафіолетового до середнього інфрачервоного. Системи адаптивної оптики дозволяють майже повністю виключити вплив турбулентності атмосфери в інфрачервоному діапазоні. Завдяки чому VLT отримує в цьому діапазоні зображення, в 4 рази більше чіткі, ніж телескоп Хаббла. При цьому для створення штучних зірок із збуджених атомів натрію на висоті 90 км телескоп UT4 направляє туди цілих 4 лазерних променю.

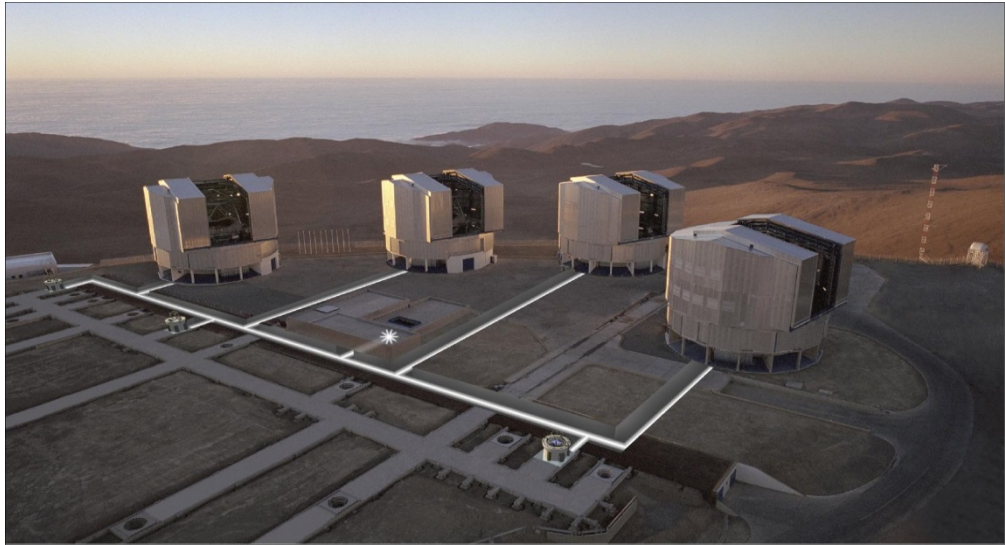


Рисунок 1.4 – Оптичний наземний телескоп VLT

Оглядовий телескоп VLT є найбільшим телескопом, призначеним виключно для огляду неба у видимому світлі штучних зірок.

1.2 Оптичні космічні телескопи

Чималі телескопи – найчастіше з архітектурою Касегрена – були розроблені для астрономічних спостережень. Найбільші з реалізованих мають відкриті отвори діаметром близько 10 м. У цьому випадку дифракційну межу для кутового дозволу зазвичай стає недосяжним через перекручування зображення в атмосфері – навіть коли телескопи розміщені на високих горах. Тому для виправлення таких спотворень все частіше використовується адаптивна оптика. Вимірювання спотворень, які необхідно

виправити, можна виконати на тому самому телескопі, використовуючи світло від зірок або від штучних лазерних опорних зірок.

В даний час планується створення кількох телескопів ще більшого розміру з апертурою понад 20 м і частково навіть більш 30 м.

Астрономічні спостереження часто вимагають значного часу, щоб отримати достатньо енергії світла для правильної експозиції фотоплівки або датчики зображення. Потім необхідно точно перемістити телескоп, щоб компенсувати вплив обертання Землі.

Висока продуктивність потрібно також від використовуваних датчики зображення, які в основному відносяться до типу ПЗС. У різних телескопах використовуються досить великі конструкції датчиків, можливо, що включають кілька чіпів ПЗС. Для досягнення максимальної чутливості їх часто використовують при низьких температурах. Крім того, можна провести додаткові виміри в темряві і застосувати алгоритми вирахування шуму.

Космічний телескоп Хаббла був першою астрономічною обсерваторією, виведеною на орбіту навколо Землі з можливістю запису зображень в діапазоні довжин хвиль світла від ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного. Запущений 24 квітня 1990 року борту космічного корабля "Діскавері", "Хаббл" в даний час знаходиться на висоті близько 547 км над поверхнею Землі, де він здійснює 15 обертів на день – приблизно по одному витку кожні 95 хвилин. Супутник рухається зі швидкістю близько 8 км в секунду.



Рисунок 1.5 – Космічний телескопа Хаббл

Хаббл класифікується як рефлектор Касегрена, названий на честь французького священнослужителя 15 століття, який був одним з перших, хто запропонував цю базову оптичну конструкцію. Світло, що потрапляє в головне дзеркало телескопа, відбивається в меншу вторинне дзеркало, підвішене над основним. Вторинний, в свою чергу, відображає світло назад через отвір в первинному, де він потрапляє в інструменти Хаббла для остаточної фокусування, перш ніж потрапить в їх детектори. Головне дзеркало Хаббла не тільки ідеально відполіроване, але і має діаметр 2,4 м, збираючи величезну кількість світла. Хаббл може виявляти об'єкти, які в 10 мільярдів разів слабкіше, ніж може побачити незбресний очей. Високо над розмиваючими ефектами атмосфери Землі, Хаббл також отримує набагато більш чітке зображення космосу, ніж телескопи, розташовані на землі. Космічний телескоп може розрізнити астрономічні об'єкти з кутовим діаметром всього 0,05 кутовий секунди. Це дозвіл приблизно в 10 разів краще, ніж краще, звичайно досягається навіть більшими наземними телескопами. Висока роздільна здатність дозволяє Хабблу виявляти такі

об'єкти, як пилові диски навколо зірок або світяться ядра дуже далеких галактик.

Крім того, оскільки він обертається над атмосферою, Хаббл може бачити космічні об'єкти в ширшому діапазоні електромагнітного спектра, ніж наземні телескопи, які обмежені атмосферним поглинанням різних довжин хвиль. Це дає, що використовують Хаббл, більш повне уявлення про енергетичні процеси, які створюють видиме і вимірюється випромінювання.

Хаббл має довжину 13,2 м і ширину 4,2 м в задній частині, де розміщені наукові інструменти. При вазі близько 12 246 кг. Обсерваторія харчується від двох сонячних акумуляторів, що перетворюють сонячне світло в електричну енергію, яка зберігається в шести великих акумуляторах. Батареї дозволяють обсерваторії працювати під час затінених ділянок орбіти Хаббла, коли Земля блокує огляд Сонця зі супутника.

У центрі космічного корабля, недалеко від його центру ваги, знаходяться чотири реактивних колеса вагою 45 кг, які використовуються для зміни орієнтації обсерваторії. Супутник знає, де і коли він повинен повернутися, на основі цільового графіка, завантаженого з центру управління. Потім головний комп'ютер Хаббла обчислює, які колеса повинні сповільнюватися, а які – швидше, щоб найбільш ефективно спрямувати космічний корабель до нової мети.[1]

В обсерваторії використовуються високоточні гіроскопи (гіроскопи) для визначення швидкості і напрямку руху. Типовий режим роботи Хаббла використовує три гіроскопа, але у нього є шість на вибір. Решта служать в якості резервних копій, оскільки гіроскопи з часом зношуються і виходять з ладу. Також існують резервні робочі режими, які дозволяють Хабблу при необхідності продовжувати збір наукових даних за допомогою тільки одного гіроскопа, але з дещо меншою ефективністю.

На додаток до гіроскопа, Хаббл має три датчика точного наведення (FGS), які діють в загальній системі наведення і управління космічного корабля, щоб утримувати телескоп практично нерухомим під час спостереження. Хаббл тремтить менш ніж на 7 мілісекунд за 24 години, коли він наведений на свою мету. Це рівносильно включенню лазера на десять центів на відстані 200 миль в цей період.

Команди і дані передаються між космічним кораблем і центром управління через дві антени з високим коефіцієнтом посилення, які обмінюються даними через супутникову систему стеження і ретрансляції даних НАСА, яка знаходиться на геосинхронній орбіті. Потім наукові дані пересилаються з центру управління в Науковий інститут космічного телескопа через глобальну мережу для обробки, поширення і архівування.

НАСА провело п'ять місій з обслуговування космонавтів по ремонту і модернізації Хаббла. Ці переобладнання, а також резервування найважливіших підсистем обсерваторії повинні забезпечити роботу Хаббла на довгі роки. Завдання НАСА – використовувати Хаббл одночасно з космічним телескопом Джеймса Вебба, нової і найпотужнішою інфрачервоної обсерваторією, запуск якої запланований на 2021 рік.

Існують також сонячні телескопи, які створені спеціально для зображення деталей Сонця. Тут безумовно не вистачає яскравості; навпаки, система повинна бути здатна обробляти значну оптичну потужність. Через порівняно невеликої відстані спостереження кутовий дозвіл зазвичай не повинно бути таким високим, як при спостереженні далеких зірок. Відповідно, конструкції телескопів сильно відрізняються від конструкцій інших астрономічних телескопів.

2 ТЕЛЕСКОПИ ОКРЕМИХ ДІАПАЗОНІВ ДОВЖИН ХВИЛЬ

2.1 Інфрачервоні телескопи

Інфрачервоні телескопи не володіють здатністю оптичних сприймати відразу всі довжини хвиль діапазону. Пристрій, звичайно, робиться чутливим до деяких вузьким ділянкам спектра. У цьому інфрачервоні телескопи схожі на радіотелескопи, які беруть сигнал тільки на одній довжині хвилі. Схоже і побудова зображення об'єкта в невидимих оку променях в умовних кольорах. Часто на інфрачервоних фотографіях використовують відтінки червоного кольору для характеристики інтенсивності випромінювання тієї чи іншої частини зображення. Тому, якщо Ви бачите фотографію, на якій відбуваються багато присутній червоний колір, знайте: швидше за все, це фотографія зроблена в теплових променях. Один і той же телескоп цілком може бути як оптичним, так і інфрачервоним в різний час. Прикладом є телескоп імені Хаббла.

Багато в чому, конструкція самих інфрачервоних телескопів схожа з конструкцією оптичних дзеркальних телескопів. Велика частина теплових променів піддається відображенню звичайним телескопічним об'єктивом і фокусування в одній точці, де і розміщується прилад, що вимірює тепло. Також існують інфрачервоні фільтри, пропускають тільки теплові промені. З такими фільтрами відбувається фотографування. Розглянемо деякі з них.

Одним із відомих телескопів інфрачервоному діапазоні є супутник Гершель створений ЄКА (рис. 2.1). Запуск якого відбувся 14 травня 2009 року. Місія названа на честь сера Вільяма Гершеля, першого дослідника

інфрачервоного спектра. Супутник розміщений на геліоцентричній орбіті поблизу другої точки Лагранжа (L_2) системи Земля – Сонце.

Телескоп «Гершель» це перша космічна обсерваторія для повномасштабного вивчення інфрачервоного випромінювання в космосі. Телескоп найбільший космічний телескоп, який працює в інфрачервоному спектрі, з коли-небудь запускених. Матеріалом для дзеркала послужив карбід кремнію. Фізичні властивості карбїду кремнію дозволяють контролювати форму дзеркала з точністю до 10 мкм. Дзеркало складається з 12 елементів. Випромінювання фокусується на три приладу з датчиками, що мають температуру нижче 2К. Датчики охолоджуються рідким гелієм при низькому тиску, що дозволяє знизити його температуру кипіння до 1,4 К.

Основними параметрами телескопу є:

- маса складає 330кг;
- рефлектор системи Річі-Кретьєна;
- діаметр дзеркала 3500мм;
- фокусна відстань 28,5м;
- робочий діапазон складає від 60 до 670 мкм;
- площа збиральної поверхні 9,6 м².

Фотокамера зі спектрометром низького дозволу. Діапазон спектрометра по довжині хвилі – від 55 до 210 мікрометрів; спектральний дозвіл R – від 1000 до 5000; чутливість – на рівні -63 дБ. Фотокамера здатна давати одночасно зображення в двох діапазонах: 60-85 / 85-130 мкм і 130-210 мкм при спектральній щільності потоку випромінювання в кілька міліянських.

Приймач спектральних і фотометричних зображень. Спектрометр низького дозволу на діапазон довжин хвиль від 194 до 672 мкм. Спектральний дозвіл R від 40 до 1000.



Рисунок 2.1 – Космічний інфрачервоний телескоп Herschel

Спектрометр здатний фіксувати об'єкти зі спектральною щільністю потоку 100 мЯн для точкових джерел і 500 мЯн – для протяжних. Фотокамера має три елементи на довжини хвиль 250, 350 і 500 мкм, з числом точок 139, 88 і 43, відповідно. Вона здатна фіксувати точкові об'єкти з щільністю потоку 2 мЯн і протяжні об'єкти з щільністю потоку від 4 до 9 мЯн.

Гетеродинний датчик для випромінювання в далекому інфрачервоному діапазоні. Цей спектрограф має дуже високу спектральний дозвіл на рівні $R = 107$. Має два робочих діапазону: від 157 до 212 мкм і від 240 до 625 мкм.

Зображення галактики Андромеди, отримане космічною обсерваторією «Гершель». Телескоп призначений для вивчення інфрачервоної частині випромінювання від об'єктів в Сонячній системі, в Чумацькому шляху, а також від позагалактичних об'єктів, що знаходяться в мільярди світлових років від Землі. Також передбачалися дослідження за наступними темами:

- формування і розвиток галактик у ранньому Всесвіті;
- утворення зірок і їх взаємодія з міжзоряним середовищем;
- хімічний склад атмосфер і поверхні тіл Сонячної системи, включаючи планети, комети і супутники планет.

Під час сеансу зв'язку з «Гершелем» 29 квітня 2013 року, за допомогою станції далекого космічного зв'язку в західній Австралії, вчені отримали дані про те, що запас рідкого гелію, необхідного для охолодження інфрачервоної ПЗС-матриці, який чотири роки повільно випаровувався, утримуючи температуру камер на рівні 271 градус Цельсія нижче нуля, закінчився.

Космічна обсерваторія «Джеймс Уебб» повинна стати наступником космічних телескопів "Хаббл" і "Спітцер". Її головне складене дзеркало розміром 6,5 метра в п'ять разів більше за площею, ніж основне дзеркало «Хаббла», а мінімізувати теплові перешкоди в ході спостережень допоможе п'ятишаровий захисний екран. Телескоп буде працювати на гало-орбіті навколо другої точки Лагранжа в системі Сонце – Земля. На нього покладаються великі надії астрономів всього світу, телескоп буде шукати галактики, досліджувати процеси зоре утворення і формування планетних систем і вивчати скупчення зірок і галактик, далекі квазари і атмосфери екзопланет.

13 липня 2020 року фахівці оголосили про завершення першого із заключних комплексних випробувань телескопа, яке тривало 15 днів. Через кілька місяців, після того, як обсерваторія завершить другий подібний випробування, інженери ще раз перевірять всі її системи для виявлення аномалій. Якщо все пройде успішно, то телескоп знову переведуть в польотну конфігурацію і відправлять на космодром Куру.

Складність і унікальність конструкції телескопа призвели до того, що його дата запуску в космос, спочатку намічена на 2007 рік, неодноразово переносилася, а загальна вартість проекту досягла вже 9,66 мільярда доларів без урахування вкладів Європейського та Канадського космічних агентств. До недавнього часу датою старту вважалося 30 березня 2021 року, проте 16 липня 2020 року NASA оголосило, що з-за затримок і труднощів в роботі у зв'язку з пандемією коронавірусу SARS-CoV-2, старт перенесено на 31 жовтня 2021 року. При цьому, в агентстві сподіваються завершити всі залишилися роботи по телескопу в рамках нового графіка без залучення додаткових коштів.

2.2 Телескопи рентгенівського діапазону

Однією з найважливіших характеристик рентгенівського телескопа є його кутовий дозвіл – здатність розділити дві близькі зірки. При цьому, оскільки рентгенівські телескопи завжди працюють у важких радіаційних умовах, з великим фоном заряджених частинок, гарний кутовий дозвіл дозволяє бачити більш темні об'єкти. Дзеркала, що працюють в стандартному рентгенівському діапазоні (від 0,5 до 10 кеВ).[4]

В 1978 році була запущена Обсерваторія ім. Ейнштейна з першим дзеркальним рентгенівським телескопом. Однак виготовлення дзеркал для більш жорсткого рентгенівського діапазону довго залишалося недосяжною мрією астрофізиків. Чим вище енергія фотона, тим під меншим кутом він повинен впасти на поверхню дзеркала, щоб відбитися точно так само, як кинутий камінь відбивається від поверхні води. Через це такі телескопи виходять довше і важче. До того ж з'являються додаткові проблеми, пов'язані з підбором оптимального покриття дзеркал і їх тонкої поліровки.

В 1989 року була запущена астрофізична обсерваторія ГРАНАТ, на борту якої працював рентгенівський телескоп АРТ-П, розроблений в ІКД РАН. Замість дзеркал в ньому використовувалася кодує апертура – спеціальний метод, що дозволяє отримувати непогані зображення неба, покладаючись замість складної оптики на не менше складну математику. Тоді вдалося досягти кутового дозволу в 5 хвилин дуги в діапазоні 3-20 кеВ. Щоб порівняти АРТ-П з АРТ-ХС, ми побудували зображення ділянки неба поблизу центру Галактики, де розташовані дві яскраві і близькі маломасивні рентгенівські подвійні системи – SLX 1744-299 і SLX 1744-300. Кутова відстань між ними – всього 2,6 хвилини, так що АРТ-П не міг їх дозволити: замість двох «зірочок», він показував одну, але витягнуту в правильному напрямку. АРТ-ХС ж, за рахунок набагато більш досконалої оптичної системи, легко розділяє обидва джерела.

Телескоп NuSTAR володіє найдосконалішими дзеркалами, призначеними для жорсткого рентгенівського діапазону – аж до 78 кеВ! Його кутовий дозвіл – 18 кутових секунд, в той час як у АРТ-ХС – близько 30 секунд. Втім, у цих телескопів абсолютно різні завдання – головним завданням АРТ-ХС є проведення огляду всього неба – саме тому у нього велике поле зору – 36 кутових хвилин в діаметрі, тоді як у NuSTAR, який створювався для вивчення окремих, найцікавіших джерел, поле зору в сім разів менше.

2.3 Телескопи ультрафіолетового діапазону

Починаючи з кінця 60-х стали застосовувати спеціалізовані штучні супутники Землі. У 1972 році США запустили космічну обсерваторію «Коперник» (ВАТ-3), а в 1983 році полетів вітчизняний «Астрон» з 80-сантиметровим ультрафіолетовим телескопом на борту. Прилади для зйомки

й дослідження об'єктів в ультрафіолетовому діапазоні встановлені і на телескопі "Хаббл". Завдяки останньому вдалося вперше спостерігати ультрафіолетові полярні сйва на Сатурні, Юпітері і його супутнику Ганімеді. Невеликий телескоп далекого ультрафіолетового діапазону брали з собою на Місяць і астронавти NASA.

Космічний апарат Swift (рис. 2.2) – одна з сучасних обсерваторій, на якій встановлений ультрафіолетовий телескоп UVOT, призначений для спостережень в діапазоні довжин хвиль від 170 до 650 нм і має діаметр дзеркала 0,3 м. Це стандартний для космічних обсерваторій такого типу телескоп системи Річі-Кретьєна.[5]

Космічні гамма-сплески – масштабні короткострокові викиди енергії, які спостерігаються у віддалених галактиках. За початковим сплеском в гамма-діапазоні, як правило, слід довгоживучі «післясвітіння», що випромінюється на більш довгих хвилях, в тому числі і в УФ-діапазоні. Більшість спостережуваних гамма-сплесків випускається під час спалахів наднових. Завдяки інструментам Swift вдалося вперше спостерігати такий спалах з самого початку. Спалахнула 9 лютого 2008 року наднова зірка SN 2008D знаходиться на відстані близько 88 мільйонів світлових років від нас у галактиці NGC 2770.

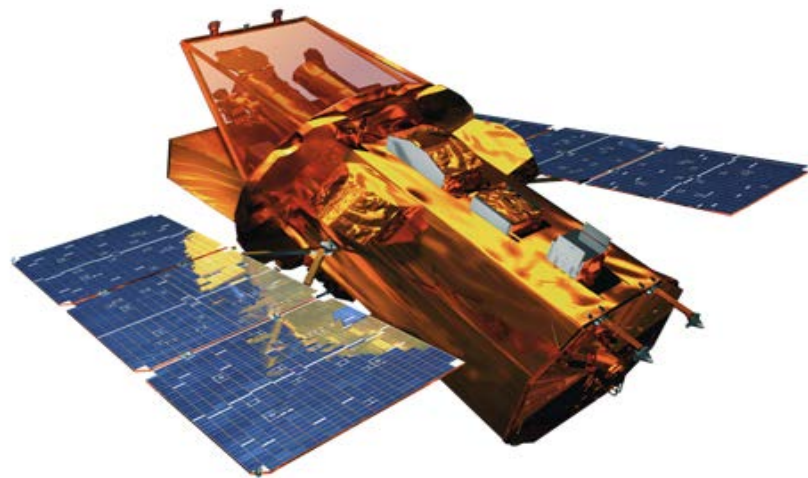


Рисунок 2.2 – Космічний апарат Swift

Одним з найуспішніших проєктів в області ультрафіолетової астрономії став орбітальний ультрафіолетовий космічний телескопом GALEX (рис. 2.3), запущений на орбіту в 2003 році з борту «літака-космодрому» L-1011 Stargazer за допомогою ракети-носія Pegasus-XL.

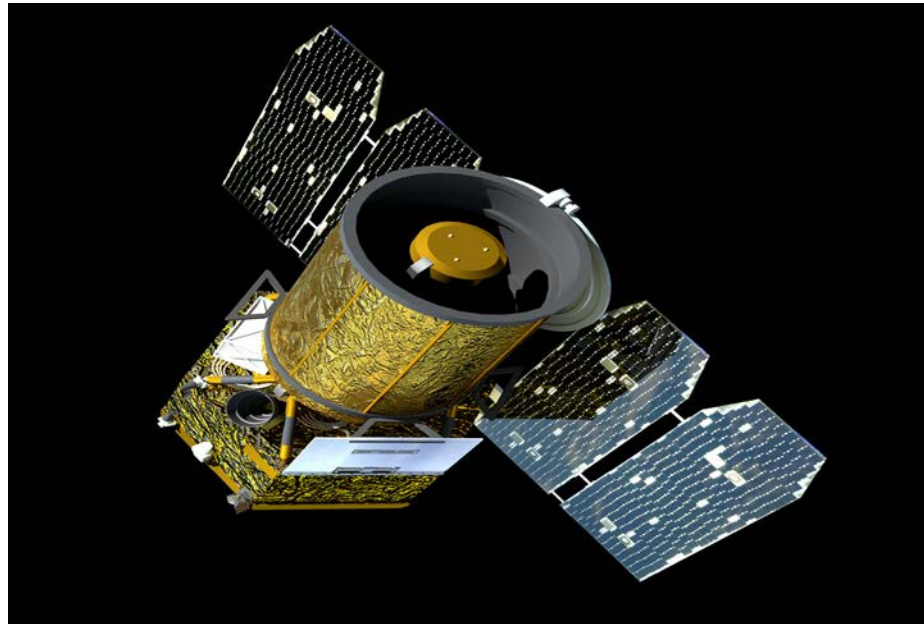


Рисунок 2.3 – Космічний апарат GaleX

Спочатку передбачалося, що на орбіті обсерваторія пропрацює два з половиною роки, але насправді місія розтяглася на дев'ять років. Космічний апарат знаходився на навколоземній орбіті на висоті 697 км. На його борту було встановлено телескоп системи Річі-Кретьєна з діаметром дзеркала 0,5 метра і фокусною відстанню 3 метри. Поле зору телескопа – 1,2 градуса.

Одне з найдивовижніших відкриттів телескопа GALEX – велетенський хвіст з пилу і газу, виявлений у зірки Миру в сузір'ї Кита.

2.4 Телескопи гамма-діапазону

Гамма-випромінювання є сусідами з рентгенівським, але гамма-кванти мають ще більшу енергію. Це сама енергійна форма електромагнітного випромінювання з енергіями фотонів вище 100 кеВ. Випромінювання нижче 100 кеВ вважається рентгенівським і є предметом рентгенівської астрономії. Для випускання гамма-променів потрібно колосальна енергія.

Більшість гамма-променів, що виходять з космосу, поглинаються земною атмосферою, тому гамма-астрономія не могла розвиватися, поки не було можливості підняти гамма-детектори над усією або хоча б здебільшого атмосфери за допомогою повітряних куль і космічних апаратів.

Космічна обсерваторія «Комптон» була запущена на орбіту шатлом «Атлантіс» 5 квітня 1991 року і пропрацювала до 4 червня 2000 року. Після чого супутник звели з орбіти в контрольованому режимі, і його не згорілі в атмосфері залишки впали в Тихий океан.

На відміну від обсерваторії «Чандра», «Комптон», щоб уникнути впливу радіаційних поясів, розмістили на навколоземній орбіті на висоті 450 км. Тобто під поясами. Комптонівська обсерваторія також була частиною серії Великих обсерваторій, друга після космічного телескопа «Хаббл». Названа на честь Артура Холлі Комптона, американського вченого, лауреата Нобелівської премії з фізики за роботи, пов'язані з фізикою гамма-випромінювання.

Чотири основні інструменти обсерваторії покривали разом енергетичний діапазон від 20 кеВ до 30 ГеВ.

Серед найбільш значущих результатів, які дала місія «Комптона», – складання високоякісної карти неба в гамма-променях з енергією вище 100 МеВ. За період роботи телескоп зареєстрував більше 3000 гамма-сплесків.

Космічний гамма-телескоп "Фермі" (рис. 2.4) вважається одним з наступників «Комптона». Обсерваторію вивели на орбіту 11 червня 2008 року на борту ракети Delta II 7920-Н. Це спільний проект США, Франції, Німеччини, Італії, Японії та Швеції. Висота орбіти супутника 550 км. До 26 серпня 2008 року апарат називався GLAST потім був перейменований на честь італійського фізика Енріко Фермі.

Його основним інструментом є Large Area Telescope (LAT) гамма-телескоп, призначений для спостережень в діапазоні енергій від декількох десятків МеВ до сотень ГеВ.



Рисунок 2.4 – Телескоп "Фермі"

В його поле зору знаходиться близько однієї п'ятої частини неба. Інший інструмент – Fermi GBM – це прилад для реєстрації гамма-сплесків,

які він може виявляти по всьому небу, за винятком частини, закритої від нього нашою планетою.

Одним з найцікавіших відкриттів, зроблених телескопом, стало виявлення в 2010 році бульбашок Фермі – гігантських утворень, що тягнуться в обидві сторони від площини диска Чумацького Шляху на відстань близько 25 тисяч світлових років в кожную сторону. Обидва міхура є джерелом високоенергетичного випромінювання.

3 ОГЛЯД РАДІОТЕЛЕСКОПІВ

Радіотелескоп це прилад для прийому радіовипромінювання космічних об'єктів та дослідження його характеристик (координат джерел, просторової структури, інтенсивності випромінювання, спектру і поляризації) [9].

Радіотелескоп займає початкове місце, за діапазоном частот, положення серед інструментів, які досліджують електромагнітне випромінювання, більш високочастотними є телескопи теплового, видимого, ультрафіолетового, рентгенівського і гамма випромінювання [6].

Радіотелескопи переважно розташовують далеко від населених пунктів, щоб максимально зменшити електромагнітні перешкоди від радіостанцій, телебачення, радарів та інших випромінювальних пристроїв. Розміщення радіо-обсерваторії в долині або низині ще краще захищає її від впливу техногенних електромагнітних шумів. До радіотелескопів відносять також деякі гравітаційні телескопи, які за спостереженнями за квазарами обчислюють великомасштабні спотворення простору часу.

Радіотелескоп складається з антеною системи і дуже чутливого радіоприймального пристрою – радіометра.

Конструкції антен радіотелескопів відрізняються великою різноманітністю, що обумовлено дуже широким діапазоном довжин хвиль, використовуваних в радіоастрономії (від 0,1 мм до 1000 м). Антени радіотелескопів, які приймають мм, см, дм і метрові хвилі, найчастіше представляють собою параболічні відбивачі, подібні дзеркалам звичайних оптичних рефлекторів. У фокусі параболоїда встановлюється опромінювач пристрій, що збирає радіовипромінювання, яке направляється на нього

дзеркалом. Опромінювач отримує та передає прийнятій інформації на вхід радіометра. Після посилення і детектування, сигнал реєструється та паралельно записується на жорсткий диск у вигляді файлів.

Існують також антени, що допускають лише обмежені повороти, і навіть повністю нерухомі. Напрямок прийому в антенах останнього типу (зазвичай дуже великого розміру) досягається шляхом переміщення опромінювачів, які сприймають відбите від антени радіовипромінювання.

Для спостереження на коротких хвилях поширені дзеркальні параболічні антени, встановлені на поворотних пристроях, службовців для наведення радіотелескопу на джерело радіовипромінювання; за принципом дії такі радіотелескопи аналогічні оптичним телескопом-рефрактор. Часто використовуються комбінації ряду дзеркальних антен, які з'єднані кабельними лініями в єдину систему – «решітка». Для спостереження на довгих хвилях використовується решітка з великого числа елементарних випромінювачів – диполів.

Радіотелескоп повинен володіти високою чутливістю, що забезпечує надійну реєстрацію можливо більш слабкою щільності потоку радіовипромінювання, і хорошою роздільною здатністю, що дозволяє спостерігати менші просторові деталі досліджуваних об'єктів.

Для підвищення чутливості радіотелескопу збільшують їх збиральну поверхню і застосовують малошумні приймальні пристрої на основі мазерів, параметричних підсилювачів.

Найбільші дзеркальні антени (діаметром до 100 м на сантиметровий хвилях) мають дозвіл близько 1 кутовий секунди, що порівняно з можливостями неозброєного ока. Труднощі створення радіотелескопа великих розмірів з суцільним дзеркалом змушують широко використовувати решітки, а для отримання двовимірної «картинки» – хрестоподібні, кільцеві

та інші антени з незаповненою апертурою. Більше детально будову і характеристику деяких відомих сучасних радіотелескопів розглянемо нижче.

3.1 Радіотелескопи міліметрових хвиль

В даний час активно освоюється діапазон міліметрових хвиль, розробляються нові системи і пристрої, розширюються області застосування. У цьому діапазоні дуже малий ефект розсіювання випромінювання через флуктуацій міжзоряного плазми, що сприяє отриманню зображень надкомпактних об'єктів, високоточного виміру їх координат і параметрів руху. Радіотелескопи дозволяють отримувати цінну інформацію галактичних об'єктів і Сонячної системи.

У міліметровому діапазоні довжин хвиль присутня чутливість до найхолоднішим об'єктів у Всесвіті. А ті, як правило, знаходяться в самих щільних і неясних областях Всесвіту, зокрема в областях зоре-утворення. Ми насправді бачимо початкові етапи формування структур у Всесвіті – повертаємося назад, до Великого вибуху.

Основним інструментом є радіотелескопи з повно-поворотним параболічних рефлектором – аналогом оптичних телескопів-рефлекторів. Повно-поворотні антени мають великі переваги перед нерухомими: їх можна направляти в будь-яку точку неба, а також здійснювати з їх допомогою стеження за радіоджерелом – «збирати» сигнал, як кажуть радіоастрономи, що дозволяє підвищити чутливість телескопа і виділяти на тлі всіляких шумів набагато слабші космічні радіосигнали.

Ідеальна антена забезпечує нескінченно жорсткий, ідеальний параболоїдальними рефлектор, закріплений на досконалому підставі нескінченної жорсткості з перпендикулярно орієнтованими осями.

Одним з таких є радіотелескоп NRAO 45 (рис. 3.1), розташований в японських Альпах на висоті 1350 метрів над рівнем моря [10]. Діаметр головного дзеркала радіотелескопу NRAO 45 м, вага антени 700 тонн.

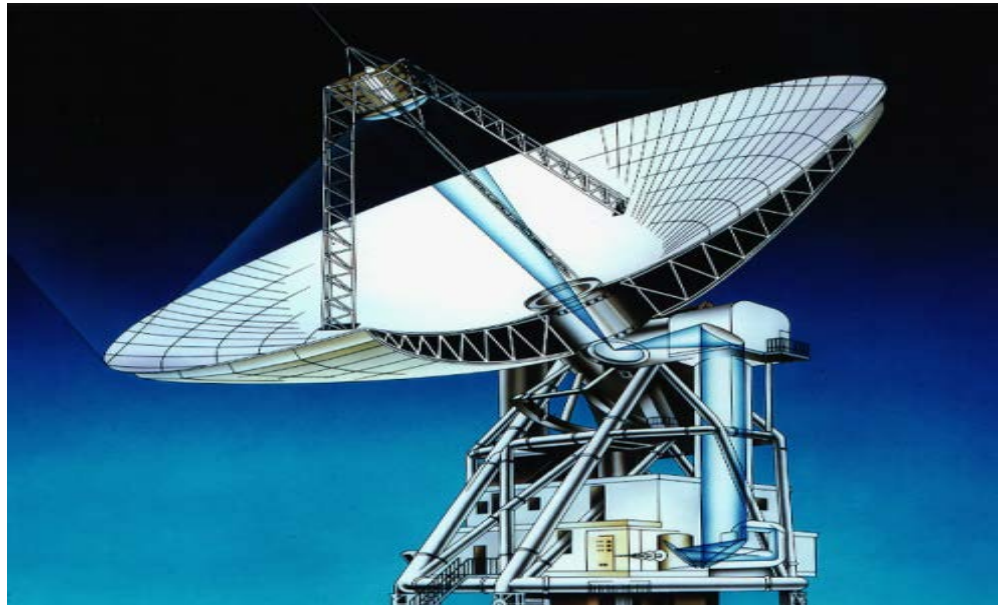


Рисунок 3.1 – Структура радіотелескопу NRAO 45 (Японія)

Діапазон робочих довжин хвиль радіотелескопу 1 мм-1 см. При цьому антена є поворотною : кут місця – 10-90 град; азимут – 360 град.

Головне дзеркало радіотелескопа параболоїд, що складається з 600 панелей. Кожна панель повинна бути встановлена з точністю поверхні 60 мкм і відхиленням всього дзеркала від ідеального параболоїда близько 90 мкм. Система настройки панелі дозволяє управляти на відстані становищем кожної з 600 панелей головного дзеркала радіотелескопу в її чотирьох кутах. Вимірювання положення панелей здійснюється методом радіоголографії. Після вимірювань панелі регулюються, утворюючи ідеальний параболоїд.

Контр-рефлектора відбиває радіохвилі, зібрані головним дзеркалом до приймача. Діаметр контр рефлектора у вигляді опуклого гіперболоїда діаметром 4 м. При зміні кута місця головного дзеркала радіотелескопу спостерігається переміщення фокусної точки, з якої пов'язане положення контр-рефлектора. У зв'язку з вище сказаним виникає потреба контролю положення контр-рефлектора, а значить і пов'язаного з ним положення фокусної точки головного дзеркала РТ. Контроль положення здійснюється засобами промислового комп'ютера [10].

Інший елемент РТ приймач включає 10 гетеродинних приймачів, охолоджуваних до температури 4 або 20 К, що дозволяють зменшити тепловий шум. Середні значення похибки виготовлення окремих панелей РТ становить 60 мкм, тому під час налаштування панелей головного дзеркала РТ необхідно прагне до такої ж точності. Тоді телескоп може бути використаний в 1мм діапазоні, який є радіо вікном найкоротшою довжиною хвилі, доступною наземним приладів. Для досягнення необхідних параметрів відображають елементів радіотелескопу необхідно використовувати системи корекції форми поверхні основного дзеркала.

Спочатку точність настройки панелей поверхні 45м телескопа становила 200 мкм, яка була досягнута за допомогою лазерного теодоліта і це дозволило виробляти спостереження на частотах до 115 ГГц.

Для отримання кращої точності поверхні були застосований метод радіоголографії з використанням сигналу геостаціонарного супутника частотою в 19,45 ГГц. Вимірювання були отримані з просторовим дозволом 86 см (64 на 64 точки), яке можна порівняти з розміром окремих панелей 1,2 на 2,2 м. Це дозволило поліпшити точність настройки поверхні до 125 мкм.

В ході експлуатації РТ було встановлено, що панелі головного дзеркала схильні до впливу чинників навколишнього середовища в результаті чого відбуваються не тільки деформації, але і порушення

цілісності поверхні 23 основного дзеркала. Були проведені голографічні вимірювання з більш високим просторовим дозволом в 44 см (128 на 128 точки), щоб точно визначити, як окремих панелей. Вимірювання дозволили досягти середнє відхилення між чотирма прилеглими панелями величини до 90 мкм.

3.2 Радіотелескопи сантиметрових хвиль

Робота в сантиметровому діапазоні хвиль вимагає дзеркального телескопа; розміри дзеркала визначаються виходячи з необхідної роздільної здатності. При використанні традиційного параболічного дзеркала для отримання високої роздільної здатності потрібно телескоп діаметром близько сотень метрів і більше. Вартість такого дзеркала виявляється дуже високою через велику кількість підтримуючих конструкцій.

Для зниження вартості необхідно розташувати дзеркало поруч з землею і, по-можливості, зробити конструкцію не дуже високою. Це призводить до ідеї дзеркала, набраного з вертикальних смужок, збудованих уздовж деякої кривої на поверхні землі. Так як приймальний рупор також краще розташувати на поверхні землі, то форма кривої повинна бути утворена перетином уявного параболоїда, спрямованого на спостережуваний джерело горизонтальною площиною, що проходить через фокус. Складність полягає в тому, що перетину виявляються різними в залежності від висоти джерела над горизонтом. Якщо параболоїд спрямований в зеніт, то перетин виходить круговим, якщо на горизонт, то параболічних. Проміжні положення призводять до еліптичних перетинах.

Розрахунки показали, що необхідне зміщення елементів дзеркала при перебудові на різні джерела виявляється не дуже великим, що і дозволило обійтися відносно невеликими недорогими механізмами.

Одним із перших радіотелескопів, що мав таку конструкцію, був Великий Пулковський радіотелескоп. У ньому управління відбивачем здійснювалося в ручному режимі. РАТАН-600 – радіотелескоп з кільцевої антеною змінного профілю діаметром 600 м, призначений для масових і багато частотних вимірів спектральної щільності потоку космічних об'єктів. Особливості його геометрії дозволяють за рахунок поперечних аберацій при малих втратах сигналу отримувати широкодіапазонний (від 1,38 до 25 см) радіо спектр джерела за кілька хвилин.



Рисунок 3.2 – Радіотелескоп РАТАН-600

Головні переваги РАТАН-600: багато частотність, за допомогою якої за 1 або 2 хвилини вимірюються миттєві радіо спектри космічних об'єктів в діапазоні частот 1,28-21,7 ГГц, велике без абераційні поле, висока роздільна

здатність і висока чутливість. Основні характеристики РАТАН-600 Діаметр головного дзеркала 576 м, число елементів антени 895, розмір елемента 11,4 на 2 м, геометрична площа антени 15000 м². Ефективна площа всього кільця (допускається паралельна робота в 4-х незалежних секторах) 3500 м² Робочий діапазон хвиль від 1,38 до 25 см. Робочий діапазон частот від 1,28 до 21,7 ГГц Максимальна кутовий дозвіл (всього кільця) 2 кут. сек. Точність визначення координат від 1 до 10 кут. сек.

Межа по щільності потоку (на частоті 4,8 ГГц) 3 мЯн, межа по колірної температурі 0,050 мк. Багато частотний комплекс радіометрів 40 частотних каналів, час стеження від 1 до 3 години. Напрями досліджень: – дослідження зірок і їх планетних і протопланетних систем: еволюція і хімічний склад, магнітні поля, кратні зоряні системи, пульсари; – дослідження галактик і інших позагалактичних об'єктів [11].

В даний час базова організація РАТАН-600 САО РАН є лідером у впровадженні в практику спостережень на рефлекторних радіотелескопах нових методів спостережень і використання сучасних технологій в області радіоастрономічного приладобудування. Накопичений десятиліттями досвід створення радіометрів граничної чутливості підвищив потенціал РАТАН-600 на порядки вище початкового проекту. Впровадження сучасної елементної бази та нових схем побудови радіометричної апаратури дозволили зберегти чутливість приймальної апаратури на світовому рівні при тих же часах експозиції. Можливості РАТАН-600 ілюструє той факт, що телескоп може реєструвати радіовипромінювання від самих далеких об'єктів, що народилися від 12 до 14 млрд. років. Кілька комплексів радіометрів суцільного спектра (континууму) РАТАН-600 розміщені в трьох СВЧ кабінах опромінювачів № 1, 2, 3. Радіометри знаходяться в постійній готовності для цілодобового використання в наглядних програмах. До використання на радіотелескопі РАТАН-600 з початку 2018 р оголошуються наступні радіометричні комплекси: 1. Радіометри континууму діапазону 1,3-21,7 ГГц (1,28; 2,25; 4,7;

8,2; 11,2 і 21,7 ГГц) з ширинами смуг приблизно від 4% до 12% щодо центральної частоти на вторинному дзеркалі №1,2. три частотний комплекс "ЕРІДАН" на 4,7; 11,2 і 21,7 ГГц з ширинами смуг приблизно від 10-12% відносно центральної частоти на вторинному дзеркалі №2,3. Сонячний спектрально-поляризаційний комплекс на частотах від 3 до 18 ГГц с високим динамічним діапазоном на вторинному дзеркалі №3. 4. Сонячний спектрально-поляризаційний комплекс високого частотного (до 1%) дозволу діапазону від 0,75 до 18 ГГц на вторинному дзеркалі №3. Обсяг заявок на користування РАТАН-600, як правило, в кілька разів перевищує поточні можливості.

3.3 Радіотелескопи метрових хвиль

Радіотелескоп FAST найбільший і самий чутливий радіотелескоп в світі, який офіційно побачив світ в 2016 році, але з тих пір він проходить випробування і введення в експлуатацію.

Телескоп FAST (рис. 3.3) використовує фіксований основний рефлектор, розміщений в природному карстовому поглибленні, який відбиває радіохвилі на приймач, підвішений на висоті 140 метрів над ним. Рефлектор виготовлений з перфорованих алюмінієвих панелей, підтримуваних сіткою із сталевих тросів, які звисають із ободу.

Назва FAST не зовсім точне. Хоча його діаметр становить 500 метрів, одночасно використовується тільки 300 метрів. Телескоп активний і може змінюватися таким чином, що один 300-метровий сегмент фокусується на приймачі.

Поверхня рефлектора FAST утворена з 4450 трикутних панелей, кожна розміром 11 метрів, розміщених у формі геодезичного купола [12].

Над рефлектором на тросах встановлена легка кабіна, переміщувана кабельними роботами, розташованими на шести опорних щоглах. Приймальні антени встановлені під нею на платформі Г'ю – Стюарта, яка дозволяє більш точно їх позиціонувати і компенсувати різні впливи, наприклад від вітру. Точність позиціонування антен запланована на рівні 8 кутових секунд.

FAST може фокусуватися на напрямках, що становлять кут до $\pm 40^\circ$ від зеніту. Через він'єтування ефективна апертура зберігається лише при кутах не більше $\pm 30^\circ$. Частоти роботи – від 70 МГц до 3 ГГц, що забезпечуються 9 приймачами. Смуга від 1,23 до 1,53 ГГц поблизу лінії нейтрального водню (21 см) забезпечується 19-променевим приймачем



Рисунок 3.3 – Радіотелескоп FAST

За даними Xinhua, всі технічні індикатори FAST відповідають або перевищують заплановані рівні. FAST це потужний радіотелескоп, і вчені думають, що він зробить кілька важливих відкриттів.

FAST проведе два огляди неба, які займуть близько п'яти років. Щоб проаналізувати всі ці дані, потрібно ще десять років. Проте, в графіку роботи телескопа є місце для гнучкості, щоб виключити будь-які несподіванки.

Огляди займуть близько половини часу спостережень телескопа, залишаючи місце для таких цілей, як пошук екзопланет з магнітними полями, які, ймовірно, мають вирішальне значення для життя.

Чутливість FAST дозволяє вимірювати час пульсарів приблизно в 50 разів точніше, ніж раніше. За допомогою FAST дослідники вперше зможуть вимірювати надзвичайно низькочастотні гравітаційні хвилі.

З точки зору покриття неба FAST зробить величезний крок вперед в спостереженні космосу. Він збільшив учетверо обсяг космічного діапазону, який можуть ефективно досліджувати радіотелескопи.

FAST замінив попередній найбільший радіотелескоп – обсерваторію Аресібо в Пуерто-Ріко. Обидва телескопа є великі параболічні тарілки, і обидва можуть одночасно використовувати лише частину своєї площі.

3.4 Радіотелескопи декаметрових хвиль

Низькочастотне радіоспостереження (нижче 100 МГц) становлять особливий астрофізичний інтерес через механізмів нетеплового випромінювання і пов'язаних з ними фізичних процесів, які відбуваються на цих частотах. У цьому діапазоні, незважаючи на відносно вузьку абсолютну смугу частот, відношення верхньої і нижньої частот часто перевищує кілька октав. Це допомагає вимірювати частото-залежні параметри випромінювання. З високою точністю, що може привести до важливих астрофізичним висновків.

В сучасних низькочастотних (НЧ) радіотелескопах оцифровка і подальша цифрова обробка можуть починатися практично на виході кожного диполя. Нові радіотелескопи, такі як LOFAR, Нідерланди, в діапазоні від 30 до 80 і від 110 до 240 МГц, довгохвильова решітка LWA США, від 10 до 88 МГц, MWA Австралія, від 80 до 300 МГц, та модернізація NenufAR, Франція, від 10 до 85 МГц і майбутній проект SKA використовують цифрові системи.

Сучасні цифрові приймачі мають таку широку смугу одночасного прийому, що вони можуть записувати відразу весь НЧ-діапазон. Це вимагає тільки фільтрації і усуває необхідність в попередньому перетворенні частоти, тим самим спрощуючи структуру приймальної системи.

Число розрядів сучасних АЦП збільшився до 12 та 16, що призвело до набагато більшого динамічному діапазону. Це особливо важливо для частот нижче 30 МГц, де радіочастотні перешкоди (RFI) від радіомовних станцій на багато порядків сильніше, ніж слабкі космічні сигнали.

Оскільки кожен телескоп має унікальну конструкцію, адаптовану до його конкретним завданням спостереження, часто недоцільно запозичувати компоненти цифрового приймача, розроблені для інших цілей. Таким чином, часто буває необхідно розробити спеціальне обладнання для конкретних астрофізичних завдань або для конкретного телескопа. І навпаки, задачі, витягнуті з розробки та експлуатації цифрового приймача на даному телескопі, можуть бути корисні в іншому місці.

3.4.1. Антенні системи НЧ-радіотелескопів

Антенні системи для НЧ-радіотелескопів зазвичай являють собою великі фазовані антенні решітки. Для фазування і підсумовування сигналів досі використовувалися лінії передачі по коаксіальному кабелю, які в деяких

випадках використовуються досі. Електричні втрати в цих кабелях сильно залежать від частоти. Вони компенсуються спеціальними системами попереднього посилення (PAS)[9].

Першим українським прототипом НЧ-радіотелескопу був УТР-1, який служив випробувальним стендом для технічних розробок і схемотехніки. За ним пізніше УТР-2, радіоінтерферометр УРАН-1-4, а недавно і перші секції нового покоління ГУРТ.

Високий коефіцієнт заповнення УТР-2 забезпечує низькі рівні бічних і дифракційних пелюсток. Система фазування здатна формувати п'ять одночасних променів в площині місцевого меридіана, зміщених на 0,5 відносно один одного в напрямку Північ – Південь. Ці одночасні промені забезпечують обмежену можливість відображення. Для компенсації втрат в системі фазування (до 70 дБ при 33 МГц) і забезпечити максимальне відношення сигнал / шум (SNR) і лінійність. Розділивши сигнал на три піддіапазони з падінням посилення на 12 дБ між послідовними піддіапазонами, PAS забезпечує майже плоский спектр (\pm бДБ) в діапазоні від 10 до 30 МГц [13].

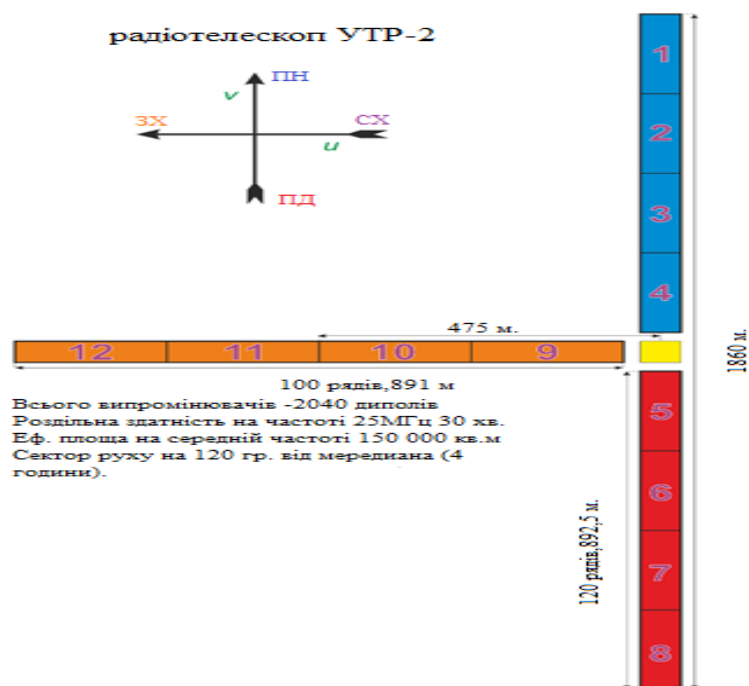


Рисунок 3.4 – Зображення антен південного рукава УТР-2

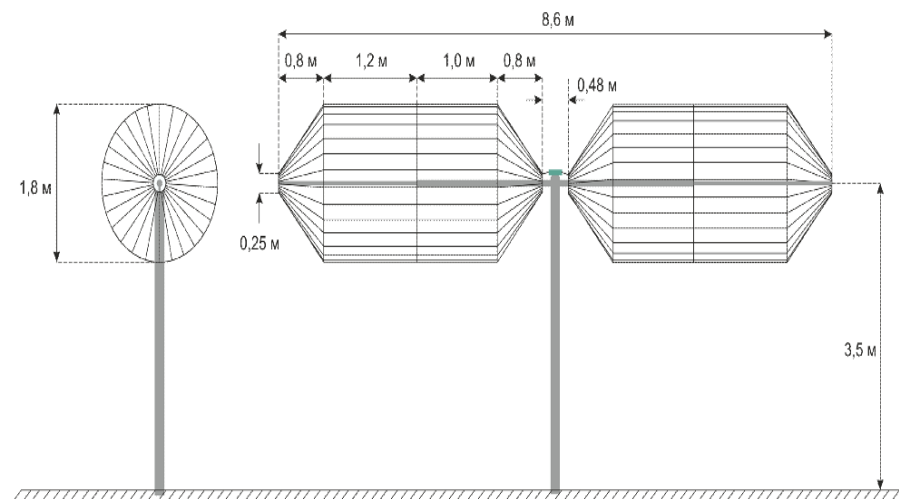


Рисунок 3.5 – Розміри шунтового вібратора УТР-2

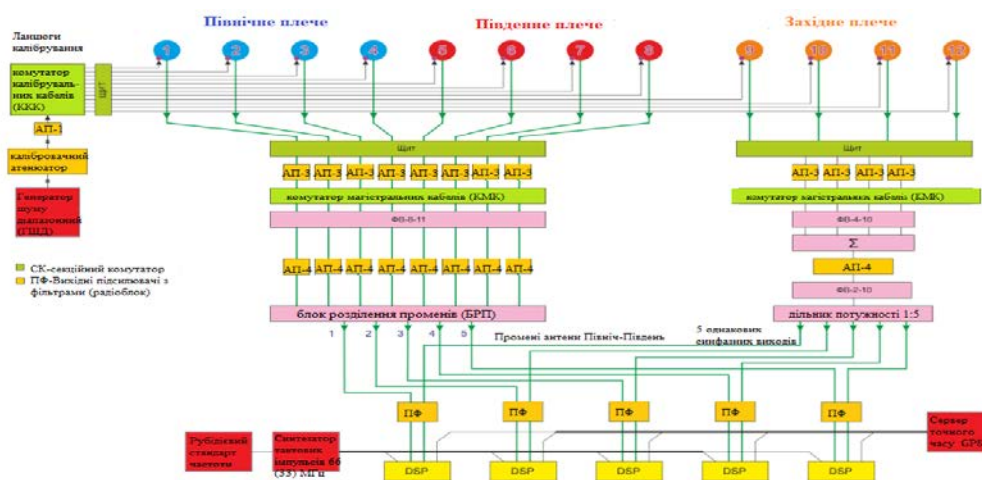


Рисунок 3.6 – Загальна схема радіотелескопа УТР-2

Як видно з назви, UTR-2 має Т-образний з трьома руками: північ, захід і південь. Ця конфігурація поєднує в собі велику ефективну площу з хорошим кутовим дозволом. Її аналогова система фазування забезпечує 2048 положень променю в напрямку північ-південь и 1024 положення променів в напрямку схід-захід.

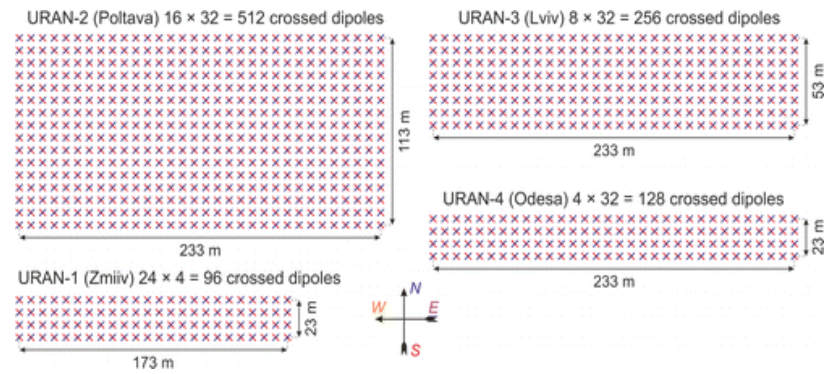


Рисунок 3.7 – Геометричні конфігурації чотирьох радіотелескопів УРАН

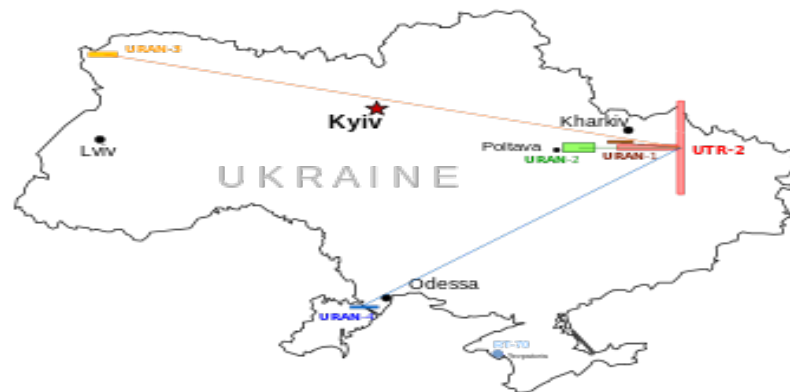


Рисунок 3.8 – Схематичне зображення радіотелескопів УТР-2, ГУРТ, УРАН-1, УРАН-2, УРАН-3, УРАН-4

У той час як УТР-2 забезпечує вимірювання в одинарній лінійній (EW) поляризації, телескопи УРАН мають антени з подвійною поляризацією. Їх прямокутна форма, витягнута в напрямку схід-захід, і високий коефіцієнт заповнення призводять до великих ефективним площам. Їх компактність передбачає менші втрати в системі фазування (в порівнянні з UTR-2), так що більш простий PAS (з двома під-діапазонами і двома каскадами) забезпечує плоский спектр з високою лінійністю. Разом телескопи УТР-2 і УРАН мають ефективну площу приблизно 200000 м^2 .

GURT – це телескоп нового покоління, розроблений для спостережень в більш широкому діапазоні частот, ніж UTR-2 і URAN, і, отже, здатний координувати одночасні спостереження з американськими LWA і європейськими НЧ антенними ґратами LOFAR, NDA і NenufAR. Будується ГУРТ буде складатися з багатьох однакових під масивом. Він буде мати гібридну систему фазування з аналогового фазування всередині кожного під масивом (як в UTR-2) і цифрове фазування під масивом. Сигнали від кожного виходу під матриці будуть оцифровані, а потім в цифровому вигляді фазованого, додані і далі оброблені. Цей підхід має кілька переваг: кожна під матриця фактично являє собою невеликий радіотелескоп, здатний вирішувати різні астрофізичні питання. Фазування цифрових субматриць захищено від радіоперешкод і не вносить в сигнал частотно-залежного загасання, на відміну від коаксіальних кабелів. Вони також забезпечують гнучке формування променя при менших витратах на будівництво і обслуговування, ніж лінії затримки [10]. Схожий підхід використовується, наприклад, в широкосмугової антенної решітці LOFAR і NenufAR.



Рисунок 3.9 – АФАР радіотелескопу GURT

3.4.2 Цифрові приймачі основної смуги частот для UTR-2 і URAN

Приймачі з частотою опитування не менше ніж удвічі перевищують максимальну частоту роботи телескопа (32МГц для UTR-2) може записувати

всю робочу смугу без перетворення частоти і тому називаються приймачами основної смуги частот. Їх перевагою є широка смуга пропускання та відсутність нелінійного змішувача, що дозволяє домогтися більш високого динамічного діапазону всій приймальної системи.

Перший приймач основної смуги частот, який почав працювати на УТР-2 в 2006 році, був розроблений спеціально для декаметрових спостережень. Його структура і принципи роботи детально описані в роботі [11]. Це дозволило провести подальші дослідження Юпітера, блискавки Сатурна, ліній рекомбінації радіовипромінювання, пульсарів, пошуки радіосигналів від спалахують зірок і екзопланет.

УТР-2 може синтезувати п'ять одночасних променів в напрямку Північ – Південь. Вони можуть збільшити швидкість зйомки або забезпечити одночасний режим включення / вимикання, що дозволяє відрізнити слабкі космічні сигнали від радіоперешкод. Оптимальне використання цього п'яти променевого режиму досягається за рахунок синхронізації цифрових сигналів від кожного променя з точністю до однієї вибірки АЦП. Ця можливість була реалізована в DSPZ в 2010 році шляхом додавання чотирьох додаткових лічильників до потоку даних: кількість блоків спектра або сигналів (відповідає 8190 вибірок з кожного з двох вхідних каналів, до яких додаються лічильники, так що розмір блоків даних кратний 8192 байт) мікросекунди з початку спостереження.

Ці лічильники використовуються для перевірки цілісності і синхронізації даних від різних приймачів DSPZ, що працюють паралельно. Перші два лічильника розміщені всередині блоку FPGA навколо АЦП, який працює незалежно від системи обробки даних. Абсолютна час і надійність шкали часу під час тривалої записи досягаються за допомогою зовнішніх годин, синхронізованих за стандартними рубідієвого годинах [15].

Ранні версії DSPZ повертали тільки два паралельні потоки даних, обчислених з двох вхідних каналів: авто кореляція кожного з двох входів або авто кореляція одного вибраного входу і амплітуда спектра взаємної кореляції двох входів. З нагоди поновлення 2010 до програмного забезпечення була додана можливість надавати повний комплексний спектр взаємної кореляції на додаток до спектрами авто кореляції двох вхідних каналів, тобто, чотири паралельні потоки даних (рис. 3.10). Це дозволяє нам виконувати вимірювання повної поляризації на телескопах УРАН (де доступні антени з подвійною поляризацією), обчислюючи чотири параметра Стокса з чотирьох перерахованих вище вихідних даних. На УТР-2 це діаметр, який виходить з твору променів двох плечей.



Рисунок 3.10 – Комплект з п'яти ДСПЗ (по одному на промінь телескопа), встановлених в приймальні УТР-2

DSPZ вже мав великий вхідний динамічний діапазон і динамічний діапазон АЦП, добре адаптований до змін фону в широкому спектральному діапазоні і здатний працювати в жорстких умовах радіоперешкод. Завдяки своїм новим можливостям модернізований DSPZ відповідає більшості

технічних вимог до ідеальних НЧ-радіоастрономічних приймачів. Це основний тип приймача, що встановлюється на УТР-2 і на радіотелескопах УРАН-2 і -3. Можливість оперативного розрахунку повних авто – і крос-спектрів і синхронного запису даних з усіма приймачами DSPZ надала нові багатопроменеві і інтерферометричні можливості. Чим більше розміри радіотелескопу, тим сильніше повне затухання в тракті сигналу на верхній робочій частоті (70 дБ для УТР-2 і 35 дБ для УРАН-2). Якби аналогову систему фазування замінили цифровий, частотний діапазон розширився б і загальна ефективна площа збільшилася б на діапазон 30-50 МГц. Крім того, стане можливим формування великої кількості антенних променів. Ці поліпшення можуть збагатити безліч розв'язуваних астрофізичних проблем.

4 ЦИФРОВІ АНТЕННІ РЕШІТКИ В РАДІОАСТРОНОМІЇ

4.1 Принцип дії цифрової антенної решітки

Цифрова антенна решітка (ЦАР), або антенна решітка з цифровою обробкою сигналу – це антенна решітка з поелементною обробкою сигналів, в якій сигнали від випромінюючих елементів піддаються аналого-цифровому перетворенню з подальшою обробкою за певними алгоритмами [16]. Вона включає в себе набір антенних елементів, певним чином розміщених в просторі. Спрощено структуру адаптивної антенної решітки, яку ми будемо розглядати, можна представити у вигляді, як на рис. 4.1.

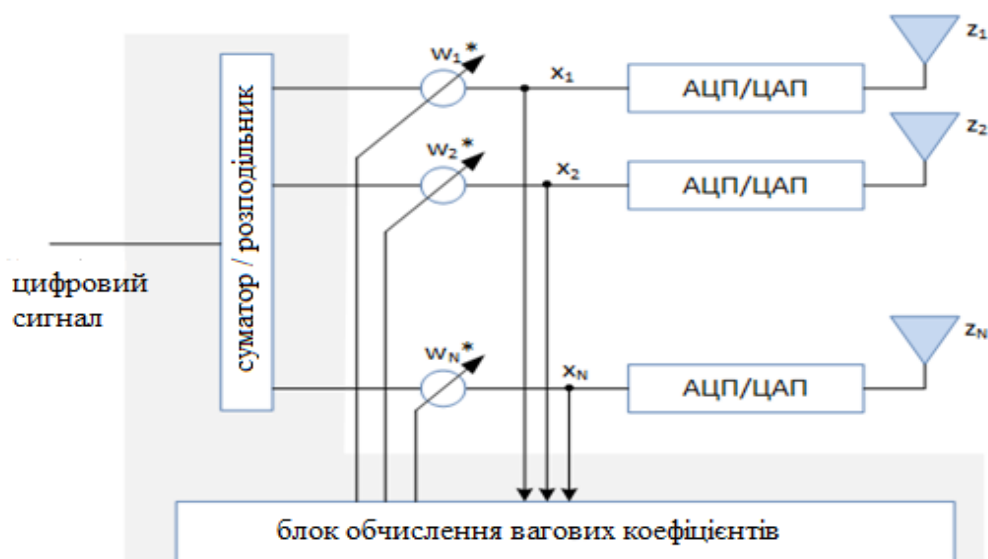


Рисунок 4.1 – Спрощена структура адаптивної антенної решітки

Адаптивні антенні решітки нерідко називають «розумними» антенами (Smart antenna). «Розумною» антенну решітку робить блок просторової обробки сигналу і алгоритми, реалізовані в ньому. Ці алгоритми аналізують

прийнятий сигнал і формують набір вагових коефіцієнтів $w_1 \dots w_N$, які визначають амплітуду і початкову фазу сигналу для кожного з елементів. Заданий амплітудно-фазовий розподіл визначає діаграму спрямованості всієї решітки в цілому. Можливість синтезувати діаграму спрямованості необхідної форми і змінювати її в процесі обробки сигналу - одна з головних особливостей адаптивних антенних решіток, що дозволяє вирішувати широкий спектр завдань.

Нові підходи до формування діаграм антенних систем радіотелескопів в поєднанні з повномірної цифровою обробкою сигналів забезпечує цілий ряд переваг.

- радіотелескопи на базі ЦАР це – високоінформативні прийомні системи, здатні сприйняти всю інформацію, що міститься в структурі просторово-часових електромагнітних полів в розкритті решітки, і практично без втрат трансформувати її в дані про наявність і параметри космічних об'єктів;

- цифрове формування високоідентичних частотних фільтрів на виході приймальних пристроїв забезпечує глибоку компенсацію широкосмугових завадових сигналів. В поєднанні з розширенням динамічного діапазону при накопиченні в процесі просторово-часової обробки це забезпечує недосягну раніше перешкодозахищеність системи;

- при виконанні приймально-передавальних модулів ЦАР з програмно конфігурованою архітектурою в повній мірі може бути реалізований принцип інтегрованої апертури [16]. У цей поняття входить об'єднання антенних систем і ВЧ блоків всіх типів радіотехнічних засобів в єдину структуру з мінімізацією одиниць апаратури, а також побічних витрат. Йдеться про інтеграцію та уніфікацію систем радіоастрономії, супутникової навігації, далекого космічного радіозв'язку та планетної радіолокації. При цьому досягається оперативна функціонально ресурсна адаптація архітектури

радіоелектронного обладнання та значно зростає ефективність всього радіоастрономічного комплексу. Зокрема, перехід до використання ЦАР;

– здатність радіоастрономічної системи з ЦАР до багатосигнального прийому в широкому тілесному куті при організації багатопроменевих радіоастрономічних комплексів дозволяє подолати більшість недоліків, властивих аналогічним традиційним системам з електронною або механічною перебудовою вузького приймаючого променя. Технологія ЦАР створює умови для істотного підвищення живучості радіолокаційних засобів завдяки рознесенню прийомних і зондуючих підсистем.

4.2 Недоліки класичних алгоритмів обробки сигналу ЦАР

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) в його сучасному варіанті (швидке перетворення Фур'є, ШПФ) зайняло майже монопольне становище не тільки серед алгоритмів спектрального оцінювання радіоастрономічних сигналів, а й в інших областях обробки інформації [17]. Його перевагами є швидкість обчислень, статистична стійкість оцінок, слабка залежність від помилок округлення, можливість зворотного перетворення (синтезу функції) і ін. Зазначені переваги призвели до того, що на сьогоднішній день розроблено безліч алгоритмів ШПФ, серед яких є досить складні. Альтернативні методи спектрального аналізу на зразок перетворення Хартлі або половинного перетворення Фур'є використовуються значно рідше.

Однак властиві їм недоліки класичних методів, стають істотними при спробі їх використання для аналізу спектрів сигналів від близько розташованих об'єктів. Головними серед них є обмеженість частотного дозволу і точності оцінки частоти окремих гармонійних компонент.

Нагадаємо відмінність між цими двома поняттями. Перше передбачає можливість поділу двох спектральних складових з близькими частотами, друге – правильність визначення частоти відокремленої гармонійної компоненти. Те й інше обмежується невизначеністю частоти $\Delta\omega$, пов'язаної з довжиною тимчасової вибірки $\Delta T = L\Delta t$, на якій відомо значення сигналу, співвідношенням Габора [17]:

$$\Delta T \Delta \omega \geq 1/2. \quad (4.1)$$

Це співвідношення є фундаментальним, тобто не залежить від конкретного способу спектрального аналізу. У той же час будь-який чисельний метод працює з вибіркою кінцевої довжини і при цьому видає певну спектральну оцінку. Отже, в його основі лежить додаткове припущення про поведінку вихідної функції в довільний момент за межами інтервалу ΔT . Зокрема, ДПФ передбачає періодичність функції з періодом, рівним довжині інтервалу. Якщо функція дійсно є такою, то оцінка частоти гармонійних складових ідеальна, тобто перетворення дає точний спектр. Це властивість ДПФ поряд з перерахованими раніше достоїнствами зумовило його широке використання в різноманітних областях.

Частотне дозвіл при ДПФ не може бути вище, ніж відстань $\Delta\omega$ між сусідніми гармоніками ряду Фур'є, залежне від довжини інтервалу ΔT (передбачуваного періоду аналізованої функції) і не залежить від конкретного виду останньої:

$$\Delta\omega = 2\pi / \Delta T. \quad (4.2)$$

При аналізі просторових вибірок сигналів в радіоастрономії припущення про періодичність функції з періодом, рівним довжині вибірки, майже завжди некоректно. Справді, практично будь-який неідеалізований

сигнал складається з безлічі складових з непомірними частотами, тобто спочатку є неперіодичних (навіть якщо вважати його періодичним, то період є вимірюваною, а не апріорі заданою величиною). Якщо ж довжина просторової вибірки не дорівнює періоду аналізованої функції, екстраполяція відомих значень останньої з періодичністю ΔT більш не буде вже відповідати реальному вхідному сигналу. В результаті порушення безперервності функції на кордонах просторового інтервалу виникає явище «витоку», описане, наприклад, в книзі [16]. Потужність гармоніки мов би розтікається по сусідніх частотах, тому не можна точно оцінити амплітуду і фазу окремої складової сигналу.

При наявності витоку точність оцінки частоти методом ДПФ погіршується до величини порядку $\Delta\omega$, яка визначається формулою (4.2), оскільки справжня частота гармонійної складової може перебувати де-небудь між L частотами, відповідними спектру часовій послідовності розміром L . Витік також побічно впливає на частотний дозвіл, оскільки слабкий сигнал, розташований по сусідству з сильним, може бути замаскований бічними пелюстками останнього.

4.3 Параметричні алгоритми обробки сигналів

Причиною вищеописаних труднощів, що виникають при спробі використовувати для гармонійного і спектрального аналізу процесів в системі класичні методи оцінювання, є неоптимальний характер екстраполяції заданих на інтервалі ΔT значень аналізованої функції (або її автокореляційної послідовності) за межі цього інтервалу. ДПФ, як уже зазначалося, засноване на періодичній екстраполяції, корелограмний метод – на нульовій. В тому і іншому випадку екстрапольовані значення функції, як правило, істотно відрізняються від справжніх.

З кінця 1960-х років інтенсивно розробляються методи спектрального оцінювання сигналу на основі параметричних моделей [17]. Сутність їх полягає в тому, що на базі відомих значень функції в інтервалі ΔT будується деяка модель аналізованого процесу. Ця модель використовується для більш реалістичною екстраполяції сигналу за межі даного інтервалу, ніж та, яка проводиться класичними методами. В результаті усуваються спотворення, пов'язані з ефектами кінцівки довжини вибірки. Частотний дозвіл згідно з формулою (4.1) також поліпшується. Однак на відміну від класичних методів, роздільна здатність і точність спектрального оцінювання тепер істотно залежать від ступеня відповідності обраної моделі аналізованого процесу.

Відомі три типові моделі часовій послідовності, засновані на раціональних функціях. Це модель авторегресійного процесу (AR), модель процесу змінного середнього (MA), а також комбінована, яка об'єднує обидва ці процеси (ARMA). Всі вони можуть бути описані загальним рівнянням цифрового каузального фільтра, вихідний послідовністю якого є аналізована функція $f(t)$:

$$f_l = - \sum_{m=1}^{M_a} a_m f_{l-m} + \sum_{m=0}^{M_b} b_m x_{l-m} = \sum_{m=0}^{\infty} h_m x_{l-m},$$

де x – вхідна функція;

a і b – вектори коефіцієнтів рекурсивного і трансверсального фільтрів порядку M_a і M_b відповідно;

h – імпульсна характеристика об'єданого фільтра.

Якщо в якості вхідної функції об'єданого фільтра для вищевказаних трьох моделей використовувати білий шум з нульовим математичним очікуванням і дисперсією ρ_w , То спектральна щільність потужності $G(\omega)$ аналізованої функції $f(t)$ визначається в них відповідно як:

$$G_{AR}(\omega) = \frac{1}{\left| 1 + \sum_{m=1}^{M_a} a_m e^{-im\omega\Delta t} \right|^2} \rho_w \Delta t ;$$

$$G_{MA}(\omega) = \left| 1 + \sum_{m=1}^{M_b} b_m e^{-im\omega\Delta t} \right|^2 \rho_w \Delta t$$

i

$$G_{ARMA}(\omega) = \frac{\left| 1 + \sum_{m=1}^{M_b} b_m e^{-im\omega\Delta t} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{m=1}^{M_a} a_m e^{-im\omega\Delta t} \right|^2} \rho_w \Delta t .$$

Найбільш поширена на практиці авторегресійна модель. Це пов'язано, по-перше, з її здатністю виділяти в спектрі сигналу окремі гармонійні складові на тлі шуму, по-друге – з лінійністю рівнянь, що дають оцінки авторегресійних параметрів. Інші дві моделі не забезпечують зазначених переваг або недостатньо досліджені.

До теперішнього часу розроблено кілька методів авторегресійної спектральної оцінки сигналів. Вони діляться на блокові і послідовні. Перші призначені для аналізу вже сформованих тимчасових вибірок фіксованого розміру, другі - для поступової обробки даних у міру їх надходження. Послідовні алгоритми більш відповідають процесу формування спектра сигналу з плином часу. Однак, по-перше, збіжність цих методів досить повільна, що робить їх неефективними при використанні на практиці. По-друге, вони погано пристосовані для адекватного моделювання спектральних характеристик деяких сигналів. Тому далі будемо розглядати тільки блокові алгоритми,

У книзі [17] детально описані кілька алгоритмів блокової обробки: Юла-Уолкера, Бурга, коваріаційний і модифікований коваріаційний. Метод

Юла-Уолкера володіє найгіршим дозволом в порівнянні з іншими і тут не розглядається. Решта методи мають порівнянні якісні показники, тому необхідно з'ясувати, який з них найбільше підходить для спектрального аналізу радіоастрономічних сигналів.

В результаті випробувань встановлено, що метод Бурга є найбільш стійким серед всіх перерахованих. Під стійкістю тут мається на увазі можливість роботи з вихідними функціями довільного виду і слабка чутливість до помилок округлення ЕОМ. Це єдиний алгоритм, який задовільно працює з даними звичайної точності стандарту IEEE 854 (32 розрядними). Швидкодія його при досить великому відносному порядку моделі (щодо порядку M до довжини вибірки L) найвище.

Однак метод Бурга володіє серйозним недоліком, описаним в роботі [17] і що спостерігався в тестових розрахунках. Він полягає в розщепленні при деяких умовах спектрального піка, відповідного однієї гармонійної складової. Умови, при яких це розщеплення виникає (велике відношення сигнал/шум, великий відносний порядок моделі і т.п.), є типовими при аналізі радіофізичних систем. Марпл відзначає і інші недоліки даного методу, в тому числі поява помилкових спектральних піків і зміщення частотних оцінок. З огляду на вищесказане, а також те, що частотне дозвіл методу Бурга не є найвищим, можна зробити висновок про недоцільність застосування його в спектральних моделях.

Коваріаційний і модифікований коваріаційний методи засновані на одному і тому ж алгоритмі мінімізації методом найменших квадратів одночасно всіх коефіцієнтів лінійного передбачення. Цим вони відрізняються від методу Бурга, який мінімізує тільки єдиний параметр – коефіцієнт відображення. Очевидно, що від коваріаційних методів можна очікувати більш високих якісних показників в сенсі точності оцінки частоти і частотного дозволу. Це дійсно має місце, але одночасно значно погіршується стійкість алгоритму. Зокрема, реалізація даних методів за допомогою арифметики звичайної точності стандарту IEEE 854 призводить до великих

відносним погрішностей результатів, що доходить до одиниць і десятків відсотків.

Крім того, ці методи надзвичайно чутливі до конкретної форми аналізованої функції. Якщо остання має шумоподібний характер з досить широким спектром, дані алгоритми задовільно працюють при будь-якому допустимому порядку методу. Однак стосовно вузькосмуговим сигналам з великим відношенням сигнал/шум коваріаційні методи вимагають ретельного підбору порядку. Якщо заданий порядок моделі набагато перевищує фактичну кількість гармонійних складових в спектрі функції, алгоритм аварійно закінчується в результаті перевірки на погану чисельну обумовленість.

У той же час при правильному виборі порядку коваріаційні алгоритми забезпечують найкращі якісні показники серед відомих. Модифікований коваріаційний метод відрізняється від звичайного тим, що об'єднує лінійне передбачення вперед і назад. Наслідком цього є кілька краще частотне дозвіл. Крім того, даний метод вільний від всіх перерахованих вище недоліків алгоритму Бурга. Таким чином, найкращим вибором для спектрального аналізу сигналів радіотелескопів є, очевидно, використання модифікованого ковариационного методу за умови, що вжиті заходи для підвищення його стійкості.

5 ПРИКЛАДИ АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ СИГНАЛІВ

У атестаційній роботі моделювалися найпростіші випадки, у яких можна підвищити роздільну здатність антени радіотелескопу за допомогою адаптивної обробки сигналу, що надходить з різних просторових напрямів. Для цього було використано алгоритм модифікованого коваріаційного методу [17].

Результати моделювання одновимірного просторового розподілу фази вхідного сигналу відносно кута приймання в межах апертури прийомної антени показані на рис. 5.1 та 5.4. Верхні рисунки відображають розподіли фаз вхідних сигналів, нижні – їх спектральні залежності у одиницях частоти дискретизації просторової вибірки. Моделюючи послідовності було спеціально «розведено» білим шумом з рівнем приблизно з 40 до 60 дБ для стійкої роботи модифікованого коваріаційного алгоритму. Для реальних сигналів це, звичайно, необов'язково, оскільки вони самі завжди зашумлені космічним випромінюванням та тепловими флуктуаціями вхідних кіл.

З наведених прикладів видно, що алгоритм модифікованого коваріаційного методу надійно визначає частоту сигналу (тобто, напрям, звідки приходить цей сигнал) навіть при довжині хвилі, що суттєво перевищує апертуру приймальної антени. Це, звичайно, було б неможливо при використанні класичних методів обробки радіоастрономічних сигналів.

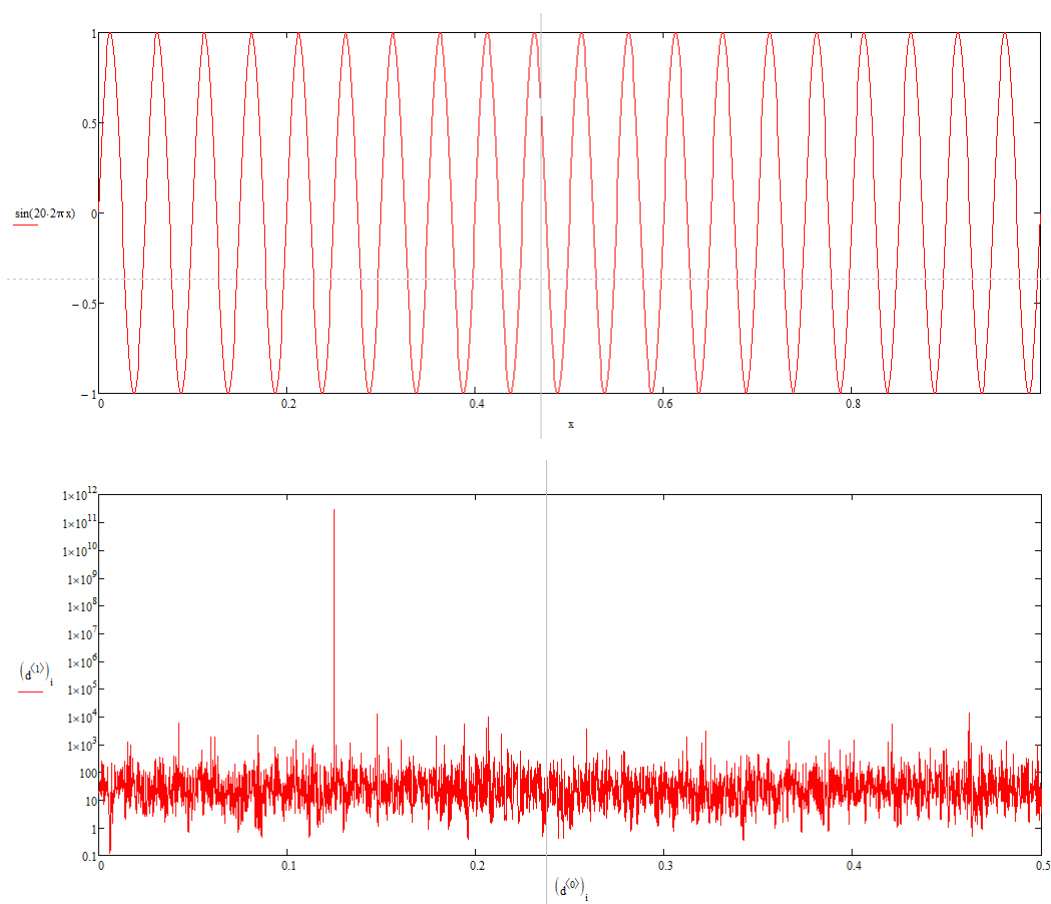


Рисунок 5.1 – Вхідний сигнал при відношенні апертури антени до довжини хвилі 20 та його спектр, отриманий за допомогою модифікованого коваріаційного методу високого порядку

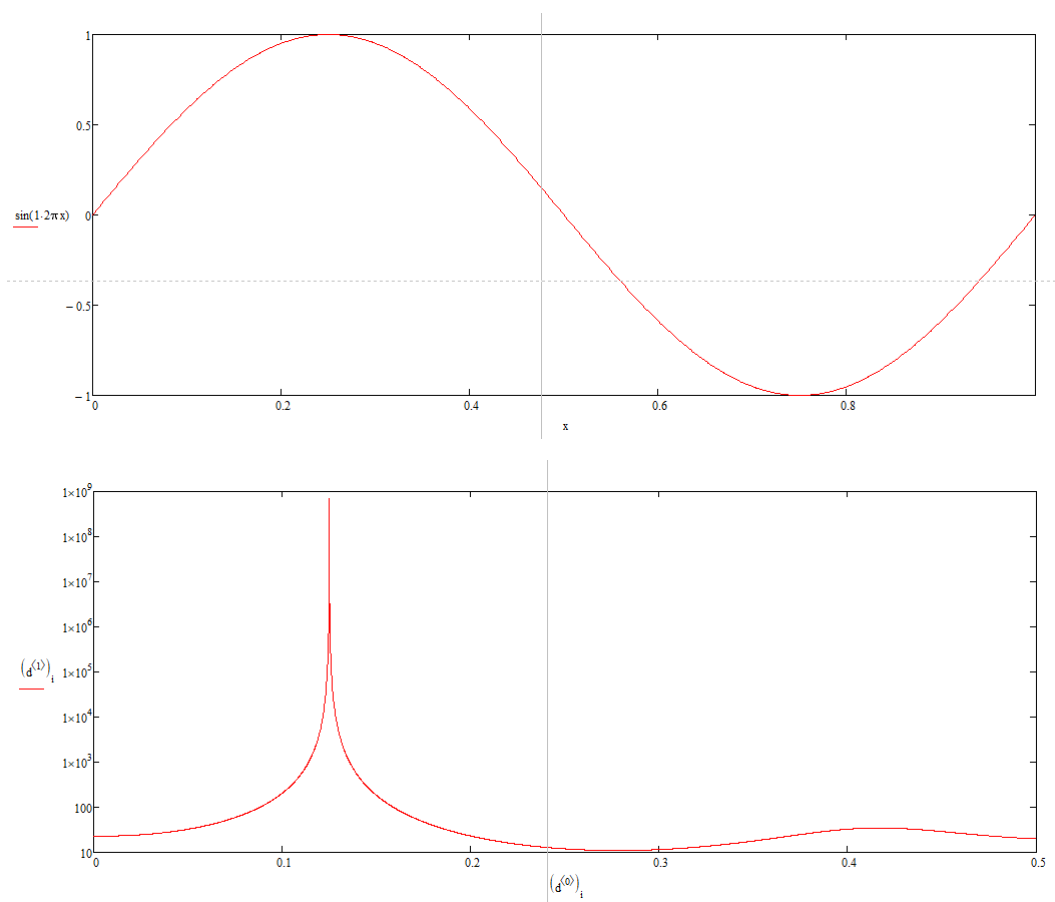


Рисунок 5.2 – Вхідний сигнал при відношенні апертури антени до довжини хвилі 1 та його спектр, отриманий за допомогою модифікованого коваріаційного методу низького порядку

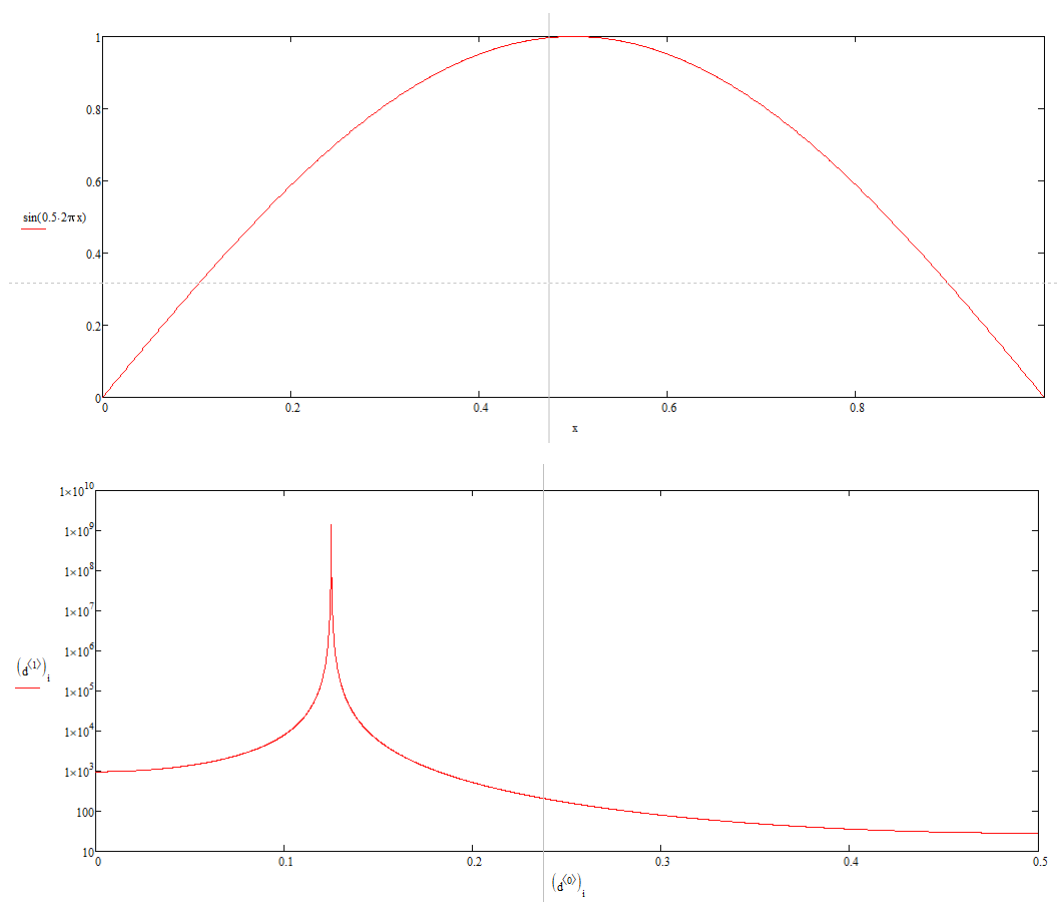


Рисунок 5.3 – Вхідний сигнал при відношенні апертури антени до довжини хвилі 0,5 та його спектр, отриманий за допомогою модифікованого коваріаційного методу низького порядку

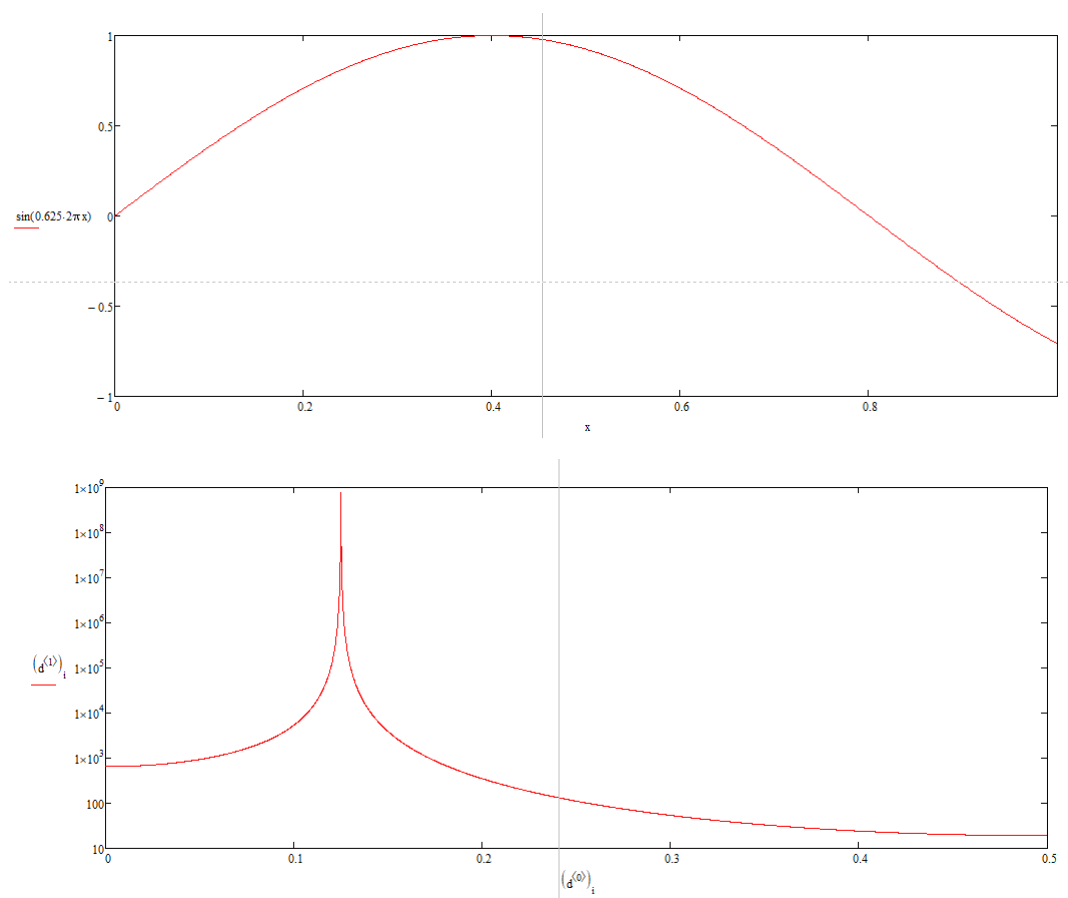


Рисунок 5.4 – Вхідний сигнал при відношенні апертури антени до довжини хвилі 0,625 та його спектр, отриманий за допомогою модифікованого коваріаційного методу низького порядку

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи проаналізовано сучасні засоби вимірювання характеристик космічних об'єктів, зокрема телескопів та радіотелескопів. Зроблено опис і аналіз характеристик телескопів оптичного, інфрачервоного, рентгенівського та гамма-діапазону.

Розглянуто побудову та принцип роботи українських радіотелескопів декаметрового діапазону УТР-2 и ГУРТ, які вони мають переваги перед зарубіжними аналогами.

Розроблено алгоритм модифікованого коваріаційного методу для програмного розширення апертури приймальної антени та підвищення роздільної здатності діаграми спрямованості радіотелескопа. Проведено випробування алгоритму з різними порядками моделі. Результати показали суттєву ефективність авторегресійних методів для поліпшення параметрів та характеристик існуючих та перспективних радіотелескопів.

Результати роботи можуть бути корисні для інженерів, що займаються проектуванням широкосмугових фазованих антенних решіток ВЧ/НВЧ діапазонів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Способи вивчення космічного простору 15 джерело URL:<https://galspace.sp.ru> (дата звернення: 25.11.2020).
2. Радіотелескопіі радіолокатори, джерело URL:<https://collectedpapers.com.ua>(дата звернення: 23.11.2020).
3. Костановській В.В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, Які враховують раптові та поступові відмови модулів надвисоких частот Київ - 2014. – 150 с.
4. Стеблін В. І., Классен В. І. Метод аналізу статистичних характеристик КСД фазованої антеної решітки при випадкових амплітудах, фазах і розташуванні випромінювачів . Радіотехніка та електроніка. 1981.– 248 с.
5. Шифрін Я. С., Корнієнко Л. Г. Статистика поля антенних решіток . Львів, 2000. – 141 с.
6. Пристрої НВЧ і антени. Проектування фазованих антенних решіток / Д. І. Воскресенський, В. І. та ін. / За ред. Д. І. Віскресенського. – М .: Радіотехніка, 2003. – 632 с.
7. Скануючі антенні системи СВЧ. Хансен / Пер з англ. Під ред. Г.Т.Маркова і А.Ф.Чапліна, з-во "Радянське радіо", 1976, 496стр
8. Пристрої НВЧ і антени. Воскресенський Д.І., Гостюхін В.Л., Максимов В.М., Пономарьов Л.І. / Под ред. Д.І. Воскресенського. Вид. 2-е. - М.: Радіотехніка, 2006.-376с

9. Шумова температура активної фазованої антенної решітки радіотелескопу ГУРТ / П.Л. Токарський та ін. Київ, - 2016. – 141с.
10. Меркулов В. В. До оцінки КСД системи випромінювачів при наявності фазових і амплітудних викривлень . Радіотехніка та електроніка. - 1966. - Т. 11, № 11. -С. 2066-2069.
11. Коноваленко О. О. Перспективи низькочастотної радіоастрономії. Радіофізика і радіоастрономія. – 2005. – 176с.
12. Брауде С.Я., Мень А.В., Содіні Л.Г. Радіотелескоп декаметрового діапазону хвиль УТР-2. – Вид. 26. - М .: Связь, 1978. – 45с.
13. Еволюція спектра радіовипромінювання залишку спалаху наднової Кассіопея-А на частотах 35-65 МГц / І.М. Бубнов та ін; за заг. ред. – І.М. Бубнов. – Харків, 2014. – 119с.
14. Токарський П. Л. Матрична модель дисипативної антенної решітки . Радіотехніка. – 2006. 170с.
15. Космічна наука і технологія / О.О Коноваленко та ін.;за заг.ред. О.О. Коноваленко – Харків, 2018. –108с.
16. Макс Ж. Методи і техніка обробки сигналів при фізичних вимірюваннях: У 2 т. - М .: Мир, 1983.
17. Марпл-мл. С.Л. Цифровий спектральний аналіз та його додатки. – М.: Мир, 1990. - 584 с.