

Радіоастрономічний інститут,
Національна академія наук України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Скорик Анастасія Олександрівна

УДК 523.4-77

**ТОНКА СТРУКТУРА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ
У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

А. О. Скорик

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:
Ульянов Олег Михайлович,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Скорик А. О. Тонка структура радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – «астрофізика, радіоастрономія». – Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

З моменту відкриття пульсарів пройшло вже більше 50 років, тим не менш ще й досі не існує завершеної моделі магнітосфери та когерентного радіовипромінювання пульсарів. Головні відкриті питання – це які лінійні розміри мають зони випромінювання імпульсних компонент в магнітосфері та на якій висоті від поверхні нейтронної зорі вони знаходяться.

Пульсар є точковим джерелом радіовипромінювання, оскільки радіус нейтронної зорі дорівнює лише 10 км, а магнітосфера пульсара простягає на 300 000 км. Саме цьому радіоінтерферометричні методи наземних спостережень не дозволяють отримати кутове розділення магнітосфери пульсара. Тільки за допомогою широкосмугового аналізу імпульсного випромінювання є можливим створювати модель магнітосфери та когерентного випромінювання пульсарів.

Параметр радіовипромінювання пульсарів, який дозволяє отримати просторове розділення магнітосфери, є характерний час когерентності тонкої структури $\Delta\tau$. Він характеризує ширину тонких компонент імпульсів, з яких може складатись індивідуальний імпульс пульсара. У декаметровому діапазоні ширина тонких компонент складає приблизно десятки мілісекунд. Варіації параметрів випромінювання на таких коротких проміжках часу можуть бути викликані тільки швидкими процесами, що відбуваються в середині магнітосфери чи у просторі біля нейтронної зорі. Час когерентності тонкої структури дає можливість оцінити лінійний розмір променя випромінювання

$\Delta s \leq \Delta \tau \cdot c$, де c — це швидкість світла у вакуумі. Індивідуальні імпульси пульсара, які складаються з тонких компонент, використовуються як зонди магнітосфери, які «фотографують» її з короткою експозицією.

Середовище поширення сильно впливає на випромінювання пульсарів. Повний шлях, який проходить сигнал від поверхні пульсара й до земних приладів реєстрації, можна розділити на декілька ділянок. Це магнітосфера пульсара, яка заповнена дуже щільною електрон-позитронною плазмою та сильними магнітними полями; міжзоряне середовище, що простягається на довгі відстані; міжпланетне середовище, яке формується під впливом сонячного вітру та турбулентна іоносфера Землі. До кінця не зрозуміло, як саме трансформується випромінювання в електрон-позитронній плазмі магнітосфери після того, як воно було народжене на деякій висоті від поверхні зорі. Скоріш за все, зареєстроване на Землі випромінювання вийшло з радіуса критичної поляризації. Але навіть вище цієї точки магнітосфера продовжує трансформувати це випромінювання.

Імпульсні параметри пов'язані з ефектами поширення дуже тісно. До цих ефектів належать плазмова дисперсійна затримка низьких частот сигналу, розсіяння на просторових флуктуаціях електронної щільності та ефект Фарадея. Параметр міра дисперсії входить у вираз дисперсійної затримки та описує сумарну кількість вільних електронів на промені зору на відстані L : $\int n_e(l) dl$. За цим параметром є можливим розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору та оцінити висоту ділянки випромінювання, базуючись на конкретній моделі щільності магнітосфери.

Декаметровий діапазон має великі переваги для дослідження тонких ефектів поширення. Вплив цих ефектів на сигнал збільшується на низьких частотах. Це, з одного боку, ускладнює обробку сигналу, яка потребує значних ресурсів обчислювальної техніки. Але з іншого боку, ефекти поширення стають максимально контрастними саме у декаметровому діапазоні. Явище аномально

інтенсивних імпульсів, які виникають у деяких пульсарів на декаметрових хвилях, дозволяють реєструвати та аналізувати тонку структуру індивідуальних імпульсів. Більш того, чимала ефективна площа декаметрового радіотелескопа УТР-2, на якому проведені всі спостереження в даній роботі, дозволяє реєструвати сигнали з рекордною для низькочастотного діапазона часовою роздільною здатністю.

Тож, *дисертація присвячена* дослідженню параметрів радіовипромінювання найближчих до Землі пульсарів у декаметровому діапазоні. У дисертації запропоновано оригінальний підхід, в якому випромінювання коротких імпульсів пульсарів використовується в якості зондів магнітосфери пульсарів для просторового розділення ділянки випромінювання. Хоча вже досить довгий час імпульсне випромінювання пульсарів використовувалось в якості зондів, але, переважно, у дослідженнях міжзоряного середовища. В даній дисертаційній роботі вперше показано, що для зондування швидкої магнітосферної плазми прийнятні короткі імпульси пульсарів. Вони дозволяють відокремити ефекти поширення, які виникають в різних ділянках середовища. До параметрів радіовипромінювання, що досліджуються у дисертації, та за допомогою яких оцінюються лінійні розміри ділянки випромінювання, відносяться час когерентності тонкої структури, точне значення міри дисперсії та стала часу розсіяння імпульсів.

У дисертації наведені результати обробки даних, які були отримані при спостереженнях пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755 на декаметровому радіотелескопі УТР-2 у хвильовому режимі з рекордно високою часовою роздільною здатністю. Проаналізовано аномально інтенсивні імпульси пульсарів, які були зафіксовані під час спостережень. Розроблено оригінальні методи усунення впливу середовища поширення, а саме прискорений метод постдетекторної та когерентної компенсації дисперсійної затримки, а також покращені методи пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсарів, які полягають у підвищенні контрасту кореляційних функцій. Ці методи можуть бути застосовані до широкого спектру задач, пов'язаних із імпульсними джерелами випромінювання. Їх можливо

використовувати у широкому діапазоні частот, але у декаметровому діапазоні вони дають принципову перевагу.

У дисертації отримано оригінальні результати, які розширюють частотний діапазон вивчення тонкої структури та параметрів розсіяння імпульсів. Показано, яким чином розташування пульсара у Галактиці впливає на розсіяння сигналу та обмежує мінімальний часовий масштаб когерентності тонкої структури, який можливо спостерігати. Знайдено унікальний ефект швидкої зміни міри дисперсії на ультракоротких проміжках часу, який можливо спостерігати у найближчих до Землі пульсарів завдяки особливостям декаметрового діапазону спостережень. Завдяки цьому ефекту можливо розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору. Також, з урахуванням конкретних моделей розподілення електрон-позитронної плазми, можливо дати кількісні оцінки різниці висоти зон випромінювання у магнітосфері на різних частотах спостережень. Також у дисертації отримано характерні масштаби когерентності тонкої структури, за допомогою яких дано оцінки лінійного розміру ділянок випромінювання та, таким чином, розділено магнітосфери пульсарів за довготою (перпендикулярно до променя зору).

Головні результати, що були отримані у роботі, є наступними:

1. Вперше у пульсара J0953+0755 зареєстровано швидку зміну параметру міра дисперсії на ультракоротких інтервалах часу порядку десятка мілісекунд в межах індивідуального імпульсу. Цей ефект, скоріш за все, виникає всередині магнітосфери пульсара. Він дозволяє досягти просторового розділення магнітосфери вздовж променя зору.

2. У пульсара J0953+0755 вперше у декаметровому діапазоні виявлено тонку структуру радіовипромінювання. Дано оцінку лінійного розміру ділянки випромінювання тонких компонент імпульсу в його магнітосфері. Оцінено Лоренц-фактор зарядів, які є джерелом генерації тонкої структури.

3. У пульсара J0243+6257 вперше проведено аналіз індивідуальних аномально інтенсивних імпульсів. Вперше отримано оцінку характерної сталої часу розсіяння цього пульсара у декаметровому діапазоні, яка наразі є єдиною в

широкому діапазоні частот. Вперше у цього пульсара відкрито два масштаби когерентності радіовипромінювання.

4. У пульсара J0814+7429 вперше у декаметровому діапазоні зафіксовано два масштаби когерентності радіовипромінювання. Проведено деконволюцію імпульсів з функцією середовища поширення, в наслідок чого виявлено, що широкі компоненти аномально інтенсивних імпульсів складаються з серії коротких компонент. Зареєстровано тонку структуру радіовипромінювання цього пульсара та дано оцінку ширини ділянки випромінювання в його магнітосфері.

5. Запропоновано та втілено нові прискорені методи постдетекторного та когерентного алгоритмів усунення дисперсійної затримки. Вони дозволяють проводити обробку радіоастрономічних сигналів майже вдвічі швидше. Запропоновано та втілено метод підвищення контрасту кореляційних функцій, який покращує пошук тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у низькочастотному спектрі.

Отримані результати усувають, певною мірою, брак інформації про тонку структуру радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні. Прискорені методи компенсації дисперсійної затримки є універсальними, та можуть застосовуватись до широкого спектру задач обробки пульсарних та транзйентних сигналів. Отримані оцінки сталих часу розсіяння сигналів пульсарів не тільки корисні для аналізу у низькочастотному спектрі, але й можуть бути використані для побудови більш точних моделей середовища розсіяння у напрямках на пульсари, що досліджуються, у широкому діапазоні частот. Завдяки оцінкам лінійних розмірів ділянок випромінювання у магнітосферах, які отримані в роботі, є можливим покращити теоретичні моделі когерентного випромінювання пульсарів.

Ключові слова: пульсари, аномально інтенсивні імпульси, магнітосфера, ділянка випромінювання, декаметровий діапазон, тонка структура, час когерентності, середовище поширення, міра дисперсії, стала часу розсіяння.

ABSTRACT

Skoryk A. O. Fine structure of pulsar radiation in the decameter wave range. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for the Candidate of Science degree in Physics and Mathematics, specialization 01.03.02 «Astrophysics, radio astronomy». – Institute of Radio astronomy of NAS of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

Pulsars have been discovered more than 50 years ago, but still there is no unified complete model of pulsar magnetosphere and pulsar coherent radiation. The main questions are what linear dimensions of a radiation region of pulse components are and what distance from the neutron star surface they are situated on.

Pulsars are point sources of radio emission. The radius of a neutron star is 10 km only and the radius of a pulsar magnetosphere does not exceed 300 000 km. That is why ground-based radio interferometric observation methods are not applicable for resolving angle resolution of a pulsar magnetosphere. Analysis of pulsed radiation in a broad frequency range is necessary for building of the unified model of pulsar magnetosphere and coherent radiation.

One of the parameters of the pulsar pulsed radiation that gives possibility to resolve the magnetosphere is a characteristic coherence time of fine structure $\Delta\tau$. It defines width of short components which may compose a pulsar single pulse. At decameter waves the duration of the fine components is about tens of milliseconds. Variation of parameters of radioemission in such short time intervals can be caused only by fast processes inside the magnetosphere or in the space nearest to the neutron star. The coherence time gives an estimate of the linear size of the radiation beam $\Delta s \leq \Delta\tau \cdot c$, where c is the speed of light in vacuum. In this way the pulsar single pulses which contain fine structure work as magnetosphere probes which shine through a magnetosphere with short exposition.

A propagation medium has much influence on the pulsar radiation. The whole signal path from a pulsar surface to an Earth ground detector can be divided into several parts.

They are the pulsar magnetosphere filled with dense electron-positron plasma and strong magnetic field, extended interstellar medium, interplanetary medium filled with solar wind and turbulent Earth ionosphere. It is not clear how the radiation transforms while propagating through the electron-positron magnetosphere plasma after being emitted at some unknown height. The radiation detected on the Earth is one that was emitted at height of radius of critical polarization. But even higher than this point the magnetosphere continues to influence the radiation.

The pulse parameters are closely connected with propagation effects, which include low frequency signal delay in plasma due to dispersion, scattering on spatial fluctuation of electron concentration and the Faraday effect. A dispersion measure parameter, which is included into the dispersion delay equation, shows total free electron number in the line of sight on the whole distance L : $\int n_e(l)dl$. Dispersion measure allows to resolve a pulsar magnetosphere in depth and estimate a height of radiation region based on a model of magnetosphere density.

The decameter wave range has many advantages for studies of fine effects of the propagation. The influence of these effects increases with frequency lowering. On the one hand it complicates signal processing which takes much computational resources. On the other hand the propagation effects are most distinct in decameter wave range. Anomalously intense pulses, which are observed at decameter waves, allow to observe and analyze individual pulse fine structure. Moreover, huge effective area of decameter UTR-2 radio telescope, that is used for all observations in this work, allows to obtain extremely high as for low frequencies time resolution of signals.

Thus, the thesis is dedicated to the study of radio emission parameters of the closest to Earth pulsars in the decameter wave range. In the thesis a novel approach is given which uses short pulsar pulses as magnetosphere probes to spatially resolve the radiation region. Though the pulse radiation is broadly used as probes, but more frequently for interstellar medium. In this work it is shown that to probe fast fluctuations of pulsar plasma only short pulses are required. They allow to separate propagation effects that

appear in different parts of the propagation medium. The parameters of pulsar radiation under consideration in the thesis that are used for pulsar magnetosphere resolving include the coherence time of fine structure, the precise dispersion measure parameter and the precise scattering time constant.

In the thesis results of processing of observational pulsar data obtained with UTR-2 decameter radio telescope in wave form registration mode with extremely high time resolution are given. The anomalously intense pulses of pulsars J0243+6257, J0814+7429 and J0953+0755 are analyzed. The novel methods of propagation effects removal are given, namely accelerated method of dispersion delay compensation for both coherent and postdetection algorithms and advanced methods of fine structure search that are based on increasing of contrast of intensity correlation functions. These methods can be applied to a broad variety of radio astronomy problems related to pulsed radiation sources. They can be used in a wide frequency range and in decameter wave range they give significant advantages.

Results obtained in the thesis are novel and expand frequency bounds of research of the fine structure and the scattering parameters of pulsar radiation. It is shown how pulsar location in the Milky Way affects the pulse scattering and limits minimal possible scale of observable fine structure. The unique effect of fast dispersion measure change in ultra short times inside individual pulse is discovered. This effect can be observed for closest to Earth pulsars in decameter wave range due to its distinctive features. The fast dispersion measure variation gives opportunity to resolve a pulsar magnetosphere in depth and estimate height of emission region from the neutron star surface. Also characteristic scales of pulsars radiation fine structure are obtained, which are used for estimation of linear sizes of the radiation zones, in this way pulsar magnetospheres are resolved in longitude.

Scientific novelty of the thesis results are the following.

1. The fast change of dispersion measure at ultrashort times within an individual pulse of PSR J0953+0755 is observed for the first time. Apparently, this effect originates inside pulsar magnetosphere. Using this observational effect it is possible to resolve the pulsar magnetosphere in depth.

2. The fine structure of PSR J0953+0755 decametric radiation is found for the first time. The linear scales of radiation region of the fine structure in its magnetosphere are estimated using the characteristic time scale. The Lorenz-factor of fast electrons that emit fine pulse components is estimated.

3. The anomalously intense pulses of pulsar J0243+6257 are analyzed for the first time. The scattering time constant for this pulsar is estimated. Moreover, this estimate is the first and single one of this parameter in wide frequency range. Two scales of coherence of PSR J0243+6257 are discovered.

4. Two scales of coherence of PSR J0814+7429 decametric radiation are discovered. Using deconvolution methods it is shown that each broad component of anomalously intense pulses consists of a sequence of short components. Also, the fine structure of its radiation is found and it is estimated by the characteristic time scale of the fine structure the linear sizes of radiation region.

5. The novel methods of acceleration of both postdetection and coherent algorithms of dispersion removal are suggested. They make processing of signals almost two times faster. Also the method of contrasting intensity of correlation functions for optimal search of fine structure of decametric pulsar radiation is given.

The obtained results expand frequency range of fine structure research up to ultra low frequencies and compensate for lack of information about the fine structure of pulsar radiation. The accelerated methods of dispersion delay removal are universal and can be applied to a broad variety of problems of pulsar and transient data processing. The estimates of characteristic scattering time are useful not only for low frequency analysis, but also can be used for building of more precise model of scattering medium towards the pulsars under consideration in broad frequency range. The estimates of scales of radiation region of pulse short components can be used for improving of theoretical models of pulsar radiation mechanism.

Key words: pulsars, anomalously intense pulses, magnetosphere, radiation region, decameter wave range, fine structure, coherence scale, propagation medium, dispersion measure, scattering time constant.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ulyanov O. M., Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // *Baltic Astronomy*. – 2013. – Vol. 22. – P. 53 – 65.

Автор розробляла математичну модель імпульсного радіовипромінювання пульсарів та модель середовища для побудови методів зондування іоносфери Землі.

2. Vasylieva I. Y., Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, P. Zarka, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. A. Seredkina // *Odessa Astronomical Publications*. – 2013. – Vol. 26. – P. 159.

Автор проводила спостереження пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 у спектральному, кореляційному та хвильовому режимах. Також брала участь в обговоренні отриманих результатів та підготовці тексту до публікації.

3. Ульянов О.М., Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров / О. М. Ульянов, А. И. Шевцова, А. А. Скорик // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2013. – Т. 109, – No. 4. – С. 159 – 168.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсарів В0809+74 та В0950+08 на радіотелескопі УТР-2, та проводила обробку спостережень. Також автор разом із колегами обговорювала фізичну інтерпретацію результатів.

4. Ульянов О. М., Алгоритмы определения поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. И. Шевцова, А. А. Скорик // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, – No. 2. – С. 101 – 110.

Автор брала участь в обговоренні моделі магнітосфери пульсарів та параметрів середовища поширення, а також проводила модельні розрахунки. Автор спільно із колегами готувала статтю до публікації.

5. Vasylieva I. Y., Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko, P. Zarka, O. M. Ulyanov, A. I.

Shevtsova, A. O. Skoryk // Radio physics and Radio astronomy.– 2014.– Vol. 19,– No. 3.– P. 197.

Автор проводила частину оглядового спостереження пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2, а також брала участь в обговоренні результатів.

6. Ulyanov O. M., Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range / O. M. Ulyanov, A. O. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, O. O. Ulyanova // MNRAS.– Jan. 2016.– Vol. 455.– Pp. 150 – 157.

Автор проводила спостереження пульсара B0950+08 у хвильовому режимі на радіотелескопі УТР-2, була одним із розробників методів пошуку тонкої структури декаметрового радіовипромінювання пульсарів та проводила обробку даних спостережень та аналіз зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів. Автор проводила аналіз стрибка міри дисперсії та разом із колегами обговорювала його фізичну інтерпретацію. Також автор готувала текст статті до публікації.

7. Konovalenko A., The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT / Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovsky V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. // Experimental Astronomy.– Aug. 2016.– Vol. 42.– Pp. 11 – 48.

Автор проводила аналіз аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0243+6257 та J0953+0755 та робила оцінку точної міри дисперсії для цих імпульсів у декаметровому діапазоні.

8. Kravtsov I. P., Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / I. P. Kravtsov, V.V. Zakharenko, I.Y. Vasylieva, S. Mykhailova, O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Skoryk // Odessa Astronomical Publications. - 2016. - Vol. 29. - P. 179.

Автор проводила частину оглядових спостережень пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2 та брала участь в обговоренні та підготовці остаточної редакції статті.

9. Коноваленко А. А., Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения / Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А.И., Милостная К. Ю. // Радиофизика и радиоастрономия.– 2016.– Т. 21.– №. 2.– С. 83 – 131.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання антенної решітки ГУРТ для спостереження імпульсів пульсарів й оцінки міри дисперсії у довготривалих відрізках часу.

10. Zakharenko V., Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT / Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylkivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko

G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L. Coffre A., Griebmeier J.-M. // Journal of Astronomical Instrumentation.– Mar. 2016.– Vol. 5.– Pp. 1641010 – 738.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання фазованих решіток УТР-2 та ГУРТ для одночасного спостереження пульсарів у ширококутовому режимі, спираючись на результати попередніх спостережень та обробці даних пульсарів, які були отримані на радіотелескопі УТР-2.

11. Скорик А. А., Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 у декаметровом диапазоне / А. А. Скорик, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. И. Шевцова, Я. Ю. Васильева, М. С. Плахов, И. П. Кравцов // Радиофизика и радиоастрономия.– 2017.– Т. 22,– No. 2.– С. 93 — С. 111.

Автор проводила спостереження та аналіз даних пульсара J0814+7429 спрямовані на пошук тонкої структури його радіовипромінювання. Автор розробляла методи оцінки ширини імпульсів, оцінки точного значення міри дисперсії та методів підвищення контрасту для пошуку тонкої структури. Також автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та готувала текст публікації.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ

12. Ульянов О. М. Моделирование эффектов распространения импульсного излучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. А. Середкина, А. И. Шевцова // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства : материалы 11 укр. конф., Харьков, 25 — 27 сентября 2012 г. / Харьков. ХНУ им. В.Н. Каразина. — Харьков : ХНУ им. В.Н. Каразина. 2012. – С. 3.

Автор проводила моделювання імпульсного радіовипромінювання пульсарів, на яке впливає середовище поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для стендової доповіді.

13. Ulyanov O. M. Origin of the pulsar pulse fine structure / O. M. Ulyanov, A. A. Seredkina, A. I. Shevtsova // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. — Vol. 8, No. S291. — P. 527–529.

Автор проводила моделювання імпульсного радіовипромінювання пульсарів та вплив на них середовища поширення. Автор брала участь у постановці задачі та обговоренню результатів, а також готувала матеріали для виступу та публікації тексту тез конференції.

14. Ulyanov O. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Seredkina // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. — Vol. 8, No. S291. — P. 530 – 532.

Автор брала участь в обговоренні отриманих результатів, та разом із співавторами готувала матеріали для публікації тез конференції.

15. Ulyanov O. M. Investigation of the earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // Advances in Radio Astronomy in Near-Earth Environment : proceedings of the Ventspils International Radio Astronomy Conference, 13 – 15 August 2012. — Ventspils, Latvia, 2012. — P. 53 – 65.

Автор розробляла модель імпульсного випромінювання пульсарів під впливом ефектів поширення, брала участь в обговоренні результатів, готувала матеріали для виступу та публікації тез доповіді на конференції.

16. Seredkina A. O. The modeling of propagation effects of pulsar pulse radiation / A. O. Seredkina, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YSF «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics» : proceedings of the XII Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 4 — 7 December, 2012. — Kharkiv, Ukraine, 2012. — CD-ROM.

Автор проводила моделювання впливу ефектів поширення на імпульсне радіовипромінювання пульсарів, разом із співавторами обговорювала отримані результати, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез доповіді.

17. Ulyanov O. M. The methods of polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. M. Ulyanov, A. A. Shevtsova, A. A. Seredkina // Cosmic magnetic fields : Legacy of A.B. Severny : proceedings of the COSPAR Symposium, Nauchny, 1 — 6 September 2013 : abstract. — Nauchny, Ukraine, 2012. - P. 159 – 168.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання імпульсного радіовипромінювання пульсарів для зондування магнітосфер пульсарів, готувала матеріали для доповіді на конференції.

18. Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 decametric radio emission / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YERAC : proceedings of the 44th Young European Radio Astronomers Conference, Torun, Poland, 8 — 12 September 2014. — Torun, Poland, 2014. — P. 6.

Автор проводила спостереження та обробку даних пульсара J0953+0755, аналізувала точне значення міри дисперсії та оцінювала характерний час когерентності тонкої структури у цього пульсара. Брала участь в інтерпретації отриманих результатів, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез конференції.

19. Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 radiation in the low frequency range radio astronomy / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova [et al.] // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : proceedings of the 14th Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 14 — 17 October 2014. — Kharkiv, 2014. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження та обробку даних пульсара J0953+0755, аналізувала точне значення міри дисперсії та оцінювала характерний час когерентності тонкої структури у цього пульсара. Брала участь в інтерпретації отриманих результатів, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез конференції.

20. Ulyanov O. M. New technique of testing and calibration of the UTR-2 radio telescope / O. M. Ulyanov, M. A. Sidorchuk, V. V. Zakharenko, S. N. Yerin, I. N. Bubnov, A. A. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, D. V. Mukha, E. R. Rudavin // Antenna

Theory and Techniques : proceedings of the 10th International Conference, Kharkiv, 21 — 24 April 2015 — Kharkiv, 2015. – P. 6.

Автор брала участь у роботі з вимірювання передатних характеристик у тракці сигналу радіотелескопу УТР-2, обробляла дані вимірювання. Також брала активну участь в обговоренні моделі калібрування фазованих антенних решіток та отриманих результатів вимірювання.

21. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // YERAC : proceedings of the 45th Young European Radio Astronomers Conference, Ventspils, 19 — 21 August 2015. — Ventspils, Latvia, 2015. – P. 86.

Автор проводила спостереження пульсарів та обробку даних спостережень. Разом із співавторами брала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді.

22. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // YSF : proceedings of the International Young Scientists Forum on Applied Physics, Dnipropetrovsk, 29 September – 2 October 2015. – Dnipropetrovsk, 2015. – CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсарів та обробку даних спостережень. Разом із співавторами брала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді та текст тез конференції.

23. Skoryk A. O. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. I. Shevtsova // YSF : proceedings of the 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics, Kharkiv, 14 — 20 August, 2016. – Kharkiv, 2016. – CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсару B0809+74, попередню обробку даних спостережень, пошук тонкої структури радіовипромінювання та аналіз характерних масштабів когерентності в радіовипромінюванні цього пульсара. Автор готувала матеріали доповіді та текст для публікації тез конференції.

24. Skoryk A. O. Anomalously intense pulses as a pulsar magnetosphere probes / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova. — YSF : proceedings of the 2017 International Young Scientists Forum on Applied Physics, Lviv, 17 — 20 October, 2017. — Lviv, 2017. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсару B0809+74, проводила попередню обробку даних спостережень та деконволюцію аномально інтенсивних імпульсів. Також автор готувала матеріали доповіді та текст для публікації тез конференції.

25. Ulyanov O. M. Rotation measure estimation for anomalously intense pulses of PSR J0243+6257 / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, V. V. Zakharenko, A. O. Skoryk, Ia. Y. Vasylieva // *Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology* : proceedings of the 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-school, Odessa, 13 — 20 August 2017. — Odessa, 2017. — P. 31.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсара J0243+6257 та робила попередню обробку даних спостережень, а також брала участь в обговоренні отриманих результатів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. ТОНКА СТРУКТУРА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З ЕФЕКТАМИ ПОШИРЕННЯ (ОГЛЯД)	32
1.1 Модель магнітосфери та природа когерентного радіовипромінювання пульсарів.....	32
1.2 Тонка структура радіовипромінювання пульсарів	37
1.2.1 Загальні властивості тонкої структури.....	37
1.2.2 Моделі виникнення тонкої структури радіовипромінювання пульсарів	41
1.3 Середовище поширення радіосигналів пульсарів	47
1.4 Ефекти поширення радіосигналів пульсарів	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	59
РОЗДІЛ 2. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ОБРОБКА ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ	60
2.1 Особливості декаметрового діапазону спостережень пульсарів.....	61
2.2 Спостереження пульсарів, що досліджуються, на декаметровому радіотелескопі УТР-2	63
2.3 Обробка даних спостережень декаметрового випромінювання пульсарів	67
2.3.1 Побудова динамічних спектрів	67
2.3.2 Метод постдетекторної компенсації дисперсійної затримки часу поширення радіоімпульсів.....	69
2.3.3 Метод когерентної компенсації дисперсійної затримки часу поширення радіоімпульсів	74
2.4 Аналіз даних спостережень.....	82
2.4.1 Спектральний та кореляційний аналіз	82
2.4.2 Деконволюція сигналу з урахуванням моделі тонкого фазового екрану ...	85
2.5 Оцінка характерного часу розсіяння радіовипромінювання пульсарів та похибки у вимірюванні точного значення МД	87
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	92

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ J0243+6257, J0814+7429 ТА J0953+0755	94
3.1 Аналіз декаметрового радіовипромінювання пульсара J0243+6257	94
3.1.1 Спостереження пульсара J0243+6257 та оцінка сталої часу розсіяння у декаметровому діапазоні.....	94
3.1.2 Пошук тонкої структури радіовипромінювання пульсара J0243+6257	98
3.1.3 Підсумки аналізу спостережень пульсара J0243+6256	101
3.2 Аналіз декаметрового радіовипромінювання пульсара J0814+7429	102
3.2.1 Спостереження пульсара J0814+7429 та пошук тонкої структури його випромінювання	102
3.2.2 Підсумки аналізу спостережень пульсара J0814+7429	113
3.3 Аналіз декаметрового радіовипромінювання пульсара J0953+0755	113
3.3.1 Огляд основних параметрів радіовипромінювання пульсара J0953+0755	114
3.3.2 Спостереження пульсара J0953+0755	117
3.3.3 Варіації параметру МД в межах індивідуального імпульсу пульсара J0953+0755	119
3.3.4 Тонка структура радіовипромінювання пульсара J0953+0755	122
3.3.5 Підсумки аналізу спостережень пульсара J0953+0755	127
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	129
ВИСНОВКИ.....	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	132
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	149

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НЗ	Нейтронна зоря
С/Ш	Співвідношення сигнал/шум
АІІ	Аномально інтенсивні імпульси
МЗС	Міжзоряне середовище
МПС	Міжпланетне середовище
МД	Міра дисперсії
DM	Dispersion measure
ТФЕ	Тонкий фазовий екран
СКВ	Середні квадратичні відхилення
DSPZ	Digital Signal Processing
WF	Wave Form
(I)FFT	(Invert) Fast Fourier Transform
АКФ	Автокореляційна функція
ВКФ	Взаємнокореляційна функція

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Пульсари були відкриті понад 50 років тому, але й досі не існує єдиної завершеної моделі магнітосфери пульсарів та когерентного механізму генерації їхнього радіовипромінювання. Основні питання полягають у тому, які лінійні розміри мають ділянки випромінювання компонент імпульсів в магнітосфері пульсара та на якій відстані від поверхні нейтронної зірки вони розташовані.

Пульсари — це точкові джерела радіовипромінювання. Радіус нейтронної зірки складає 10 км, а радіус магнітосфери не перевищує 300 000 км. Тож методами наземних радіоінтерферометричних спостережень неможливо отримати кутове розділення магнітосфер пульсарів. Для побудови єдиної моделі магнітосфери пульсарів необхідно проводити аналіз імпульсного радіовипромінювання в широкому діапазоні частот.

Одним із параметрів імпульсного випромінювання, за допомогою якого можливо просторово розділити магнітосферу, є характерний час когерентності тонкої структури $\Delta\tau$. Тонка структура — це флуктуації інтенсивності, які відбуваються в межах індивідуального імпульсу на інтервалах часу порядку десятків мілісекунд. На таких коротких інтервалах варіацію параметрів радіовипромінювання можуть зумовлювати тільки швидкі процеси всередині самої магнітосфери або у щонайближчому просторі навколо нейтронної зірки. Час когерентності дозволяє оцінити максимальні лінійні розміри променя випромінювання $\Delta s \leq \Delta\tau \cdot c$, де c — це швидкість світла у вакуумі. Таким чином, індивідуальні імпульси із наявною тонкою структурою виступають в ролі зондів, які «просвічують» магнітосферу пульсара із короткою експозицією.

На радіовипромінювання сильно впливає середовище поширення, яке можливо розділити на характерні ділянки від джерела випромінювання до реєстрації сигналу земними приладами. До них відносяться магнітосфера пульсара із щільною та сильно намагніченою електрон-позитронною плазмою, протяжне міжзоряне

середовище, міжпланетне середовище, заповнене сонячним вітром, та турбулентна іоносфера Землі. Точно не відомо, на якій висоті у магнітосфері пульсара відбувається випромінювання, та яким чином воно трансформується, проходячи крізь електрон-позитронну плазму. На Землі реєструється те випромінювання, яке вийшло з висоти, що відповідає радіусу критичної поляризації. Але навіть вище цього радіусу, й до самої границі з міжзоряним середовищем, магнітосферна плазма продовжує впливати на когерентне випромінювання.

Параметри імпульсів тісно пов'язані із ефектами поширення, до яких відносяться затримка сигналу на низьких частотах в наслідок дисперсії у плазмовому середовищі, розсіяння сигналу на просторових неоднорідностях електронної концентрації та обертання площини поляризації сигналу. Параметр міра дисперсії (МД) DM , який характеризує інтегральну кількість вільних електронів на промені зору $n_e(l)$ та входить у вираз дисперсійної затримки, дозволяє розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору та дати оцінки висоти області випромінювання спираючись на конкретну модель просторового розподілення зарядів в магнітосфері.

Декаметровий діапазон спостережень є перспективним для вивчення тонких проявів ефектів поширення в імпульсному випромінюванні пульсарів. Вплив ефектів поширення на космічні сигнали збільшується з пониженням частоти. З одного боку, це ускладнює обробку сигналу, яка потребує значних ресурсів обчислювальної техніки. З іншого боку, ефекти поширення у декаметровому діапазоні проявляються максимально контрастно. Аномально інтенсивні імпульси, які спостерігаються у декаметровому діапазоні, дозволяють вивчати тонку структуру індивідуальних імпульсів. Крім того, дуже велика ефективна площа радіотелескопу УТР-2, на якому проводяться всі спостереження в даній роботі, дозволяє отримувати рекордну, як для декаметрового діапазону, часову роздільну здатність сигналів.

Таким чином, дослідження тонкої структури загалом, а також конкретно у декаметровому діапазоні є актуальною задачею у розрізі вивчення механізму

когерентного радіовипромінювання пульсарів та побудові єдиної моделі магнітосфери.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі Низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України та є складовою частиною наступних проектів:

- «Дослідження об'єктів Всесвіту методами низькочастотної радіоастрономії» (№ держреєстрації 0112U000034);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (№ держреєстрації 0113U002048);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (№ держреєстрації 0116U00);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (№ держреєстрації 0116U002159);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (№ держреєстрації 0115U004084).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є досягнення максимально можливої просторової роздільної здатності ділянки випромінювання у магнітосферах пульсарів у декаметровому діапазоні. Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні ключові завдання:

- розробити методи пошуку аномально інтенсивних імпульсів пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 та методи обробки даних з максимальною часовою роздільною здатністю;
- дослідити існування тонкої структури та оцінити її параметри у декаметровому діапазоні у найближчих до Землі пульсарів;
- вивчити вплив середовища поширення на параметри тонкої структури вулдекаметровому діапазоні, що включає оцінку характерної сталої часу

розсіяння та точного значення міри дисперсії для кожного імпульсу та його окремих компонент.

Об'єктом дослідження є радіовипромінювання аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755.

Предметом дослідження є параметри тонкої структури, міра дисперсії та стала характерного часу розсіяння радіовипромінювання пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755 у декаметровому діапазоні.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у дисертації задач на радіотелескопі УТР-2 проводились радіоастрономічні спостереження з високою часовою роздільною здатністю. Були використані методи спектрального та кореляційного аналізу даних спостережень. Для компенсації дисперсійної затримки сигналу використовувались постдетекторний та когерентний методи. За допомогою деконволюції імпульсів з модельною імпульсною характеристикою середовища поширення в рамках моделі тонкого фазового екрану усувався вплив розсіяння на сигнал.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше зареєстровано швидку зміну параметру міра дисперсії на коротких інтервалах часу в межах індивідуального імпульсу пульсара J0953+0755. За допомогою ефекту, що спостерігається, є можливим розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору.

2. У пульсара J0953+0755 вперше у декаметровому діапазоні виявлено тонку структуру радіовипромінювання з часом когерентності 1 мс. Дано оцінку ширини ділянки випромінювання в його магнітосфері тонких компонент імпульсу.

3. У пульсара J0243+6257 вперше проведено аналіз аномально інтенсивних імпульсів. Дано оцінку сталої часу розсіяння пульсара J0243+6257 у декаметровому діапазоні, яка наразі є першою та єдиною в широкому діапазоні радіочастот. Також виявлено, що в радіовипромінюванні присутні два масштаби когерентності (на частотах 25.5 та 28.5 МГц короткий масштаб дорівнює 15 та 12 мс, а довгий масштаб — 21 та 17 мс).

4. У пульсара J0814+7429 вперше зафіксовано два масштаби когерентності радіовипромінювання (на частотах 22.5 та 25.5 МГц короткий масштаб дорівнює 10 та 7 мс, а довгий масштаб — 13 та 13.5 мс). За допомогою методів деконволюції показано, що широкі компоненти аномально інтенсивних імпульсів складаються з серії коротких компонент. Також знайдена тонка структура радіовипромінювання цього пульсара, за допомогою якої дано оцінку лінійного розміру ділянки випромінювання в його магнітосфері.

5. Запропоновано новий метод прискорення постдетекторного та когерентного усунення дисперсійної затримки, який полягає у складанні послідовних кадрів обробки сигналу, що вирішує проблему «поганих відліків» на межах кадру та дозволяє проводити обробку сигналу майже вдвічі швидше. Також запропоновано метод підвищення контрасту кореляційних функцій для ефективного пошуку тонкої структури радіовипромінювання у декаметровому діапазоні.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень розширюють діапазон вивчення тонкої структури радіовипромінювання пульсарів до декаметрових хвиль. Прискорені методи постдетекторного та когерентного усунення дисперсійної затримки можуть бути успішно застосовані в широкому спектрі задач для обробки пульсарів та інших імпульсних радіоджерел. Отримані оцінки характерного часу розсіяння на низьких частотах можуть бути використані для побудови більш точної моделі середовища поширення у напрямках на пульсари, що досліджуються в даній роботі. Отримані оцінки лінійних розмірів ділянки випромінювання тонких компонент імпульсів можуть бути використані для побудови та уточнювання моделі когерентного радіовипромінювання пульсарів загалом.

Особистий внесок автора є вагомим на всіх етапах і полягає в активній участі у зборі, аналізі та систематизації літературних даних за темою дисертації, у проведенні радіоастрономічних спостережень, в обробці даних цих спостережень та аналізі отриманих результатів, а також у підготовці публікацій за темою досліджень.

Ulyanov O. M., Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars / Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Mukha D. V. and Seredkina A. A. // *Baltic Astronomy*. - 2013. - Vol. 22. - P. 53–65.

Автор брала участь в постановці задачі, яка розглядається в статті. Автор розробляла математичну модель імпульсного радіовипромінювання пульсарів та модель параметрів середовища поширення (дисперсійна затримка та розсіяння) для побудови методів зондування іоносфери Землі.

Vasylieva I. Y., Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey / Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I. and Seredkina A. A. // *Odessa Astronomical Publications*, 2013. - Vol. 26. - P. 159.

Автор проводила спостереження пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 у спектральному, кореляційному та хвильовому режимах. Також брала участь в обговоренні отриманих результатів та підготовці тексту до публікації.

Ульянов О.М., Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров / Ульянов О. М., Шевцова А. И. и Скорик А. А. // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. - 2013. - Т. 109, - No. 4. - С. - 159–168.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсарів В0809+74 та В0950+08 на радіотелескопі УТР-2, та проводила обробку спостережень. Також автор разом із колегами обговорювала фізичну інтерпретацію результатів.

Ульянов О. М., Алгоритмы определения поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров / Ульянов О. М., Шевцова А. И. и Скорик А. А. // *Радиофизика и радиоастрономия*. - 2014. - Т. 19, - No. 2. - С. - 101–110.

Автор брала участь в обговоренні моделі магнітосфери пульсарів та параметрів середовища поширення, а також проводила модельні розрахунки. Автор також спільно із колегами готувала статтю до публікації.

Vasylieva I. Y., Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results / Vasylieva I. Y., V. V. Zakharenko, Konovalenko A.A. [et al], ... Skoryk A. O. // *Radio physics and Radio astronomy*. – 2014. – Vol. 19, – No. 3. - P. 197.

Автор проводила частину оглядового спостереження пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2, а також брала участь в обговоренні результатів.

Ulyanov O. M., Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range / Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Shevtsova A. I. [et al.] // MNRAS. - Jan. 2016. - Vol. 455. - Pp. 150–157.

Автор проводила спостереження пульсара B0950+08 у хвильовому режимі на радіотелескопі УТР-2, була одним із розробників методів пошуку тонкої структури декаметрового радіовипромінювання пульсарів та проводила обробку даних спостережень та аналіз зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів. Автор проводила аналіз стрибка міри дисперсії та разом із колегами обговорювала його фізичну інтерпретацію. Також автор готувала текст статті до публікації.

Konovalenko A., The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT / Konovalenko A., Sodin V., Zakharenko V., ... Skoryk A. [et al.] // Experimental Astronomy. - Aug. 2016. - Vol. 42. - Pp. 11–48.

Автор проводила аналіз аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0243+6257 та J0953+0755 та робила оцінку точної міри дисперсії для цих імпульсів у декаметровому діапазоні.

Kravtsov I. P., Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / Kravtsov I. P., Zakharenko V.V., Vasylieva I.Y., ... Skoryk A. O. [et al.] // Odessa Astronomical Publications. - 2016. - Vol. 29. - P. 179.

Автор проводила частину оглядових спостережень пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2 та брала участь у обговоренні й підготовці остаточної редакції статті.

Коноваленко А. А., Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения / Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. ... Скорик А. О. [et al.] // Радиофизика и радиоастрономия. - 2016. - Т. 21, - No. 2. - С. 83–131.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання антенної решітки ГУРТ для спостереження імпульсів пульсарів та оцінки міри дисперсії у довготривалих відрізках часу.

Zakharenko V., Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT / Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., ... Skoryk A. [et al.] // Journal of Astronomical Instrumentation. - Mar. 2016. - Vol. 5. - Pp. 1641010 – 738.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання решіток УТР-2 та ГУРТ для одночасного спостереження пульсарів в широкосмуговому режимі, спираючись на результати попередніх спостережень та обробці даних пульсарів, які були отримані на радіотелескопі УТР-2.

Скорик А. А., Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 у декаметровом диапазоне / Скорик А. А., Ульянов О. М., Захаренко В. В. [et al.] // Радиофизика и радиоастрономия .- 2017. - Т. 22, - No. 2. - С. 93 — 111.

Автор проводила спостереження та аналіз даних пульсара J0814+7429 спрямовані на пошук тонкої структури його радіовипромінювання. Автор розробляла методи оцінки ширини імпульсів, оцінки точного значення міри дисперсії та методів підвищення контрасту для пошуку тонкої структури. Також автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та готувала текст публікації.

Автор вдячна науковому керівнику к. ф.-м. н. Ульянову О.М. за допомогу у постановці задач та обговоренні отриманих результатів, колективну РІ НАНУ за можливість проводити дослідження на унікальному радіотелескопі УТР-2, колективу НДІ Астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за допомогу в обговоренні результатів дисертації, а також своїй родині за терпіння та підтримку на всіх етапах навчання та захисту дисертації.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені у 14 доповідях на таких вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- Ventspils International Radio Astronomy Conference (Ventspils, Latvia, 13 — 15 August, 2012);
- International Astronomical Union Symposium No. 291 “Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities After 80 Years” (Beijing, China, 20 — 31 August, 2012) — 2 доповіді;
- 1th Ukrainian conference «Electromagnetic Methods of Environmental Studies» (Kharkiv, Ukraine, 26 — 27 September, 2012);
- XII Kharkiv Young Scientist Conference on «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics» (Kharkiv, Ukraine, 4 — 7 December, 2012);
- 13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology» (Odessa, Ukraine, 19 — 25 August, 2013);
- The COSPAR Symposium: «Cosmic Magnetic Fields: Legacy of A.B. Severny» (Nauchny, Ukraine, 2 — 6 September, 2013);
- 44th Young European Radio Astronomers Conference (Torun, Poland, 8 — 12 September, 2014);
- 14th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Kharkiv, Ukraine, 14 — 17 October, 2014);
- 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kharkiv, Ukraine, 21 — 24 April, 2015);
- 45th Young European Radio Astronomers Conference (Ventspils, Latvia, 19 — 21 August, 2015);
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 September – 2 October, 2015);
- II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Kharkiv, Ukraine, 10 — 14 October, 2016);

- 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, Ukraine, 17 — 20 October, 2017);

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 25 наукових працях: 10 статей у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях [1–10] та 14 тез доповідей наукових конференцій [11–24], додатково результати дисертаційної роботи висвітлені у публікації [25].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний об'єм роботи складає 156 сторінок. Вона містить 35 рисунків та список використаних джерел з 172 найменувань на 18 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ТОНКА СТРУКТУРА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З ЕФЕКТАМИ ПОШИРЕННЯ (ОГЛЯД)

1.1 Модель магнітосфери та природа когерентного радіовипромінювання пульсарів

В 1967 відбулося одне з визначних відкриттів астрофізики ХХ століття, за яке у 1974 була присуджена Нобелівська премія. Група Ентоні Хьюіша, в яку входила його аспірантка Джоселін Белл, вперше зафіксувала імпульсне випромінювання зі стабільним періодом 1.34 секунди на частоті 81.5 МГц [26]. Через деякий час Голд та Пачіні [27] ототожили цей періодичний сигнал із відомими на той час нейтронними зірками (НЗ), які були теоретично описані Бааде та Цвікі у [28]. НЗ є результатом спалаху наднової зорі. Маса НЗ складає 1.2 — 1.4 сонячної маси, а радіус — біля 10 км. Вона має сильне магнітне поле до 10^{12} Гс [29] та швидко обертається. Щільність внутрішніх шарів НЗ досягає 10^{15} г·см⁻³, вони складаються переважно з щільно упакованих надтекучих нейтронів.

Наразі відомо більш ніж 2 500 радіопульсарів [30]. Вони спостерігаються в широкому діапазоні частот [31, 32] Виділяють звичайні пульсари з періодами обертання біля 1 секунди та мілісекундні пульсари з періодами обертання від одиниць до десятків мілісекунд [33]. Також на високих частотах спостерігають рентгенівські та гамма пульсари [34].

Головна особливість сигналу від пульсарів — це дуже висока стабільність періоду обертання та, відповідно, інтервалів приходу імпульсів в широкій частотній смузі. Від декаметрового до міліметрового діапазону період обертання пульсара має стійку залежність від часу у довготривалому відрізку. На основі цього ефекту спостереження побудована більшість теорій, які пов'язані з фізикою НЗ, її магнітосфери та радіовипромінювання. Завдяки своєму імпульсному випромінюванню пульсари використовуються в якості зондів міжзоряного та

міжпланетного середовища. На основі спостережень пульсарів є можливим вимірювати час з точністю, що перевищує атомні стандарти часу.

Період приходу імпульсів називається головним періодом пульсара P_0 , він відповідає періоду обертання НЗ. Як правило, випромінювання пульсара займає біля 20 — 30 % від довжини всього періоду на низьких радіочастотах (вважаємо, що низькі частоти займають спектр < 100 МГц) та < 10 % на високих, що пояснюється геометрією магнітного поля: низькі частоти випромінюються на більших висотах від поверхні НЗ, де конус випромінювання має більше розкриття. Енергія імпульсів, на відміну від періоду, не є сталою та може варіюватись у десятки та сотні разів від одного імпульсу до іншого.

Індивідуальні імпульси пульсарів — це достатньо слабкі сигнали з низьким співвідношенням сигнал/шум (С/Ш). У декаметровому діапазоні в середньому співвідношенні С/Ш < 0.1 . Для того, щоб збільшити співвідношення С/Ш, потрібно накопичувати індивідуальні імпульси впродовж деякого часу. Таким чином отримується середній профіль імпульсу. Форма середнього профілю є унікальною для кожного пульсара та стабільною протягом часу. Середній профіль імпульсу характеризує макропараметри магнітосфери як, наприклад, взаємне розташування магнітної осі та осі обертання НЗ.

Дослідження пульсарів тривають вже 50 років, проте єдиної теорії, яка пояснювала б процеси когерентної генерації радіовипромінювання й досі не існує. Побудована загальна модель магнітосфери пульсара, відомо, що в магнітосфері генерується когерентне електромагнітне випромінювання. Але одне з головних питань, на яке науковцям ще треба дати відповідь, полягає в тому, на якій відстані від поверхні НЗ народжується радіовипромінювання.

Вперше модель магнітосфери пульсара була описана в класичній роботі Голдрайха та Джуліана [35]. Автори показали, що магнітосфера заповнена дуже щільною плазмою та обертається разом з НЗ як тверде тіло в об'ємі так званого світлового циліндру. Сильне магнітне поле зорі, що швидко обертається, генерує електричне поле, яке вириває заряджені частинки (електрони) з поверхні НЗ та

прискорює їх. Заряджені частинки рухаються вздовж відкритих силових ліній магнітного поля до відстані, на якій лінійна швидкість частинок досягає швидкості світла. Ця відстань називається радіусом світлового циліндра та описується рівнянням: $R_{LC} = c / \Omega \approx 5 \cdot 10^9 P_0$ см, де c – швидкість світла, Ω – циклічна частота обертання НЗ, P_0 – період обертання пульсара. Всередині світлового циліндру всі лінії магнітного поля замкнені та заряди, які рухаються вздовж них, перетікають з одного полюса зорі в інший. Плазма поводить себе як тверде тіло в межах світлового циліндру.

Магнітосфера пульсара заповнена електрон-позитронною плазмою з просторовою щільністю зарядів Голдрайха-Джуліана:

$$\rho = - \frac{\Omega \mathbf{B}}{2\pi c \left(\frac{\Omega r \sin\theta}{c} \right)^2}, \quad (1.1)$$

де Ω — вектор циклічної частоти обертання НЗ, \mathbf{B} — вектор індукції магнітного поля в магнітосфері пульсара, θ — кут між радіус-вектором r даної точки та віссю обертання НЗ. При магнітних полях близько 10^{12} Гс, біля поверхні НЗ ця щільність досягає значення $7 \cdot 10^{10} / P_0$ см⁻³ [36].

Магнітне поле НЗ в першому наближенні є дипольним. Області навколо поверхні НЗ, з яких виходять відкриті лінії магнітного поля, називаються полярними шапками. Якщо вісь обертання НЗ є паралельною до вісі магнітного поля, то

кутовий розмір полярних шапок дорівнює: $\theta_0 = \sqrt{\frac{2\pi r}{c P_0}}$. Схематичну модель

магнітосфери показано на рисунку 1.1. На схемі є області закритих та відкритих силових ліній. В полярних областях біля поверхні НЗ знаходяться полярні зазори. Світловий циліндр (light cylinder) з радіусом R_{LC} обмежує закриті силові лінії. Радіопромінь (або конус випромінювання), в якому народжується випромінювання, утворюється в області відкритих силових ліній.

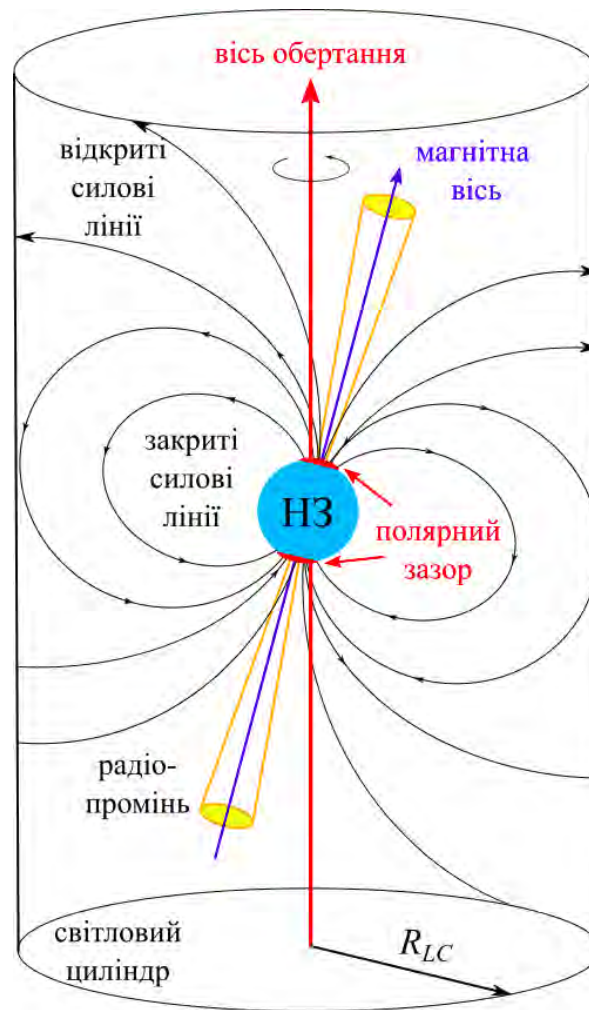


Рис. 1.1. Схема моделі магнітосфери Голдрайха-Джуліана. Магнітосфера пульсара обертається разом із НЗ як тверде тіло в межах світлового циліндру з радіусом R_{LC} .

Біля полярних шапок за наявності сильного магнітного поля з високою напруженістю в магнітосфері народжуються електрон-позитронні пари. Ці елементарні частинки прискорюються поздовжнім електричним полем у протилежних напрямках [37]. Частинки розганяються на відстанях, які не перевищують радіус полярної шапки. Ця область називається вакуумним зазором [38]. Всередині полярного зазору складова електричного поля не дорівнює нулю, та різниця потенціалу $\Delta\Phi = \Omega B h^2 / c$ вириває електрони з поверхні НЗ, утворюючи

пробій у вигляді окремих іскор, та спонукає каскадне народження електрон-позитронних пар.

Заряджені елементарні частинки, які рухаються за викривленими траєкторіями в магнітному полі, випромінюють когерентне електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні. Воно називається випромінювання кривини. Таким чином дуже невелика частка енергії обертання НЗ переноситься електромагнітним полем та переходить в енергію випромінювання [39, 40].

Максимум випромінювання кривини припадає на частоту: $f \approx 0.3f_{cr}$, де $f_{cr} = \frac{3\gamma^3 c}{4\pi\rho_c}$,

$\gamma = 1 / \sqrt{(1 - v^2 / c^2)}$ — Лоренц-фактор, v — швидкість руху зарядів, ρ_c — радіус кривини магнітних ліній.

Паралельно моделі полярного зазору розвиваються моделі, в яких випромінювання народжується не всередині області закритих магнітних ліній $r \ll R_{LC}$, а поблизу радіусу світлового циліндру $r \sim R_{LC}$. Тут швидкість обертання магнітосфери як твердого тіла близька до швидкості світла, тому варто враховувати релятивістські ефекти [41].

Назовні з магнітосфери пульсара виходить випромінювання на частотах, які вище за локальну плазмову частоту. Остання залежить від відстані до поверхні НЗ та періоду обертання пульсара. Тому, спостерігач детектує випромінювання на різних частотах, яке було народжене на різних висотах в магнітосфері. Широкосмугові спостереження пульсарів, таким чином, дозволяють розділити магнітосферу вздовж променя зору.

Радіовипромінювання пульсарів зазвичай сильно поляризоване лінійно, що підтверджують спостереження [42–44]. Для більшості пульсарів ступінь лінійної поляризації зростає зі зменшенням частоти. В рамках даної дисертаційної роботи тема поляризації майже не розглядається. Єдине зауважуємо, що випромінювання пульсара, яке реєструється спостерігачем, виходить із магнітосфери на відстані

радіусу критичної поляризації, який значно перевищує висоту вакуумного зазору [45–47].

1.2 Тонка структура радіовипромінювання пульсарів

1.2.1 Загальні властивості тонкої структури

Як було сказано раніше, індивідуальні імпульси одного й того ж пульсара можуть сильно відрізнятись за морфологією та інтенсивністю. Модуляція інтенсивності, яка виникає всередині головного вікна імпульсу, називається тонкою структурою радіовипромінювання. Головними характеристиками тонкої структури є характерний час когерентності (час життя) та смуга когерентності (частотна смуга, в якій параметри тонкої структури корелюють). Далі розглянемо різні масштаби тонкої структури всередині одного імпульсу та на різних частотах.

Субімпульсна структура є найдовшою за шкалою часу когерентності. Вона була відкрита Дрейком та Крафтом [48]. Субімпульси вважаються основними структурними одиницями імпульсу. Головна особливість субімпульсної структури, що спостерігається, — це дрейф субімпульсів вздовж вікна профілю впродовж послідовності імпульсів. Дрейф субімпульсів характеризується двома періодами P_2 (в межах довготи імпульсу) та P_3 (в межах імпульсної послідовності) [49]. Вважається, що явище субімпульсів пояснюється переважно макропараметрами магнітного поля пульсара [50, 51]. Вже в межах субімпульсів можуть виникати більш тонкі варіації інтенсивності.

Найбільш дослідженою наразі є **мікроімпульсна структура**. Вперше її спостерігав Хенкінс у пульсара B0950+08 на частоті 318 МГц з часовою роздільною здатністю 8 мкс [52]. Мікроімпульсна структура переважно спостерігається в дециметровому та метровому діапазонах. Наприклад, структура з мікросекундним масштабом була зареєстрована у пульсарів B0809+74 та B1133+16 на частоті 100 МГц в роботі [53]. Таку структуру пов'язують з процесами генерації випромінювання у дуже обмеженому об'ємі магнітосфери пульсара [54].

В деякому сенсі можливо виділити **міліімпульсну структуру**, яка спостерігається у декаметровому діапазоні хвиль. В роботі [55] викладені результати спостережень на радіотелескопі УТР-2 пульсара В0809+74 на частоті 25 МГц. У цього пульсара була знайдена тонка структура з характерними масштабами 2 — 4 мс. Також, автори виявили дрейф субімпульсів з так званими періодами другого роду $P_3 = 11 \cdot P_0$ та $P_2 = 60$ мс.

В сантиметровому діапазоні довжин хвиль була відкрита **наноімпульсна структура** радіовипромінювання [56]. В Крабоподібній туманності наноімпульси існують всередині мікроімпульсів [57]. Інтенсивність наноімпульсів може значно перевищувати інтенсивність головного імпульсу пульсара.

Ми будемо використовувати більш загальний термін: тонка структура радіовипромінювання пульсарів, яка включає в себе модуляцію інтенсивності широкого спектру характерних часових масштабів. Характерний час життя тонкої структури залежить від частоти спостереження та складає наносекунди в сантиметровому діапазоні, мікросекунди в метровому та дециметровому діапазоні та мілісекунди у декаметровому діапазоні довжин хвиль. Вважається, що мікроімпульси (та інші схожі структури) є структурними одиницями субімпульсів [58], тож в нашому означенні коротка часова шкала тонкої структури обмежується згори масштабом субімпульсної структури, яка належить даному пульсару. Найкоротший масштаб тонкої структури визначається розсіянням імпульсу в середовищі поширення та відповідає сталій розсіянню на частоті спостережень в напрямку на обраний пульсар.

Деякі пульсари можуть демонструвати **декілька характерних масштабів тонкої структури**, які існують одночасно всередині одного імпульсу. Так були виявлені два масштаби структури у пульсара В1133+16 на частоті 102.5 МГц. Короткі (характерний час 35 мкс) та довгі (характерний час 1430 мкс) мікроімпульси виникали всередині головного імпульсу незалежно один від одного (інколи одночасно) [59]. В іншій роботі [60] були проаналізовані крос-кореляційні функції випромінювання пульсарів В0809+74, В0950+08 та В1133+16 на частотах 67, 79 та

102 МГц. Аналіз виявив наявність двох масштабів тонкої структури порядку сотень мілісекунд та одиниць мілісекунд. Вони виявились частотно незалежними в межах діапазону спостережень.

Мікроімпульси можуть виникати **квазіперіодично** всередині головного імпульсу пульсара [59, 61]. Наприклад, біля 100 періодичних мікроімпульсів спостерігались у пульсара В0809+74 в роботі [60]. Квазіперіод дорівнював приблизно $2\Delta\tau_\mu$ (де $\Delta\tau_\mu$ – характерний час існування мікроструктури) та не залежав від частоти. З іншого боку, мікроструктура слабо корелює поміж імпульсів та її період зберігається всього на декількох обертах НЗ [58].

Мікроімпульси можуть бути **структурними одиницями** субімпульсів. У пульсарів (В0809+74, В0950+08, В1133+16, В1944+17 та В2016+28), які демонструють дрейф субімпульсів, була знайдена квазіперіодична мікроструктура з періодами від 0.5 до 5 мс в діапазоні метрових хвиль [62]. Відносна фаза квазіперіодичної тонкої структури може бути пов'язана з періодом дрейфу субімпульсів [58]. Але, в цілому, мікроструктура з'являється **спорадично** в межах головного вікна імпульсу.

Однак, Д. Фергюсон оскаржує зв'язок субімпульсів та мікроімпульсів [63, 64]. Автор вказує на декілька причин. По-перше, ці дві структури мають різний характер поляризації. По-друге, субімпульси мають більш широкосмуговий спектр та не завжди наслідують дисперсійний закон залежності групового часу поширення від частоти (особливо в разі подвійної компоненти імпульсу). Мікроімпульси, натомість, цей закон наслідують завжди. Принаймні для пульсара В1133+16 частотна смуга мікроімпульсів значно менша, ніж у субімпульсів [64].

Аналіз імпульсів пульсарів В0950+08 та В1133+74 в працях [43, 65, 66] виявив, що час когерентності мікроструктури є **пропорційним періоду пульсара**. Це означає, що мікроструктура виникає всередині світлового циліндру, а ширина мікроімпульсів має бути пропорційна тілесному куту конуса випромінювання. Дж. Кордес вказав співвідношення періоду мікроструктури та головного періоду

пульсара: $\Delta\tau_\mu \approx 10^{-3} P_0$ [43]. У працях [66] Т. Хенкінс вперше оцінив лінійні розміри області випромінювання, які для пульсара B0950+08 складають до 50 км, а для B1133+74 – 170 км на частоті 111.5 МГц.

Тонка структура має **лінійну поляризацію** в широкому діапазоні частот [42, 58, 67]. Зв'язок субімпульсної структури та поляризації у пульсара B0809+74 вперше знайшли у працях [68, 69] Варіації поляризаційних характеристик імпульсів у цього пульсара чітко пов'язані з періодом дрейфу субімпульсів. Ця тема розвивалась й іншими авторами [60]. В рамках даної дисертаційної роботи поляризація тонкої структури не розглядається.

Таким чином, можливо виділити головні властивості тонкої структури, яка:

- спостерігається у більшості близьких до Землі пульсарів;
- існує в широкому діапазоні частот;
- може мати декілька характерних масштабів кореляції в межах одного імпульсу;
- у деяких пульсарів виникає квазіперіодично;
- має сильну лінійну поляризацію (ступінь близький до 100% на низьких частотах), вищу за поляризацію головного імпульсу;
- має спорадичний характер та слабо корелює поміж імпульсів.

Деякі властивості тонкої структури досі є слабо вивченими, або ж результати спостережень є суперечливими. Тільки широкосмугові спостереження включно із декаметровим діапазоном дозволять дати відповідь на наступні питання:

- як тонка структура корелює в широкому діапазоні частот;
- чи існує зв'язок часу когерентності з періодом обертання пульсара;

- чи є насправді мікроімпульси структурними одиницями субімпульсів (принаймні у пульсарів, які демонструють явище дрейфу субімпульсів).

1.2.2 Моделі виникнення тонкої структури радіовипромінювання пульсарів

Наразі не існує єдиної моделі, яка могла б дати вичерпний опис механізму генерації тонкої структури радіовипромінювання пульсарів з різними характерними масштабами в широкому діапазоні частот. Ряд моделей, в яких автори інтерпретують ті чи інші властивості тонкої структури, що спостерігаються, представлений у наступних працях. Основні дослідження були проведені на сантиметрових, дециметрових та метрових хвилях. У декаметровому діапазоні відчувається значний брак інформації про тонку структуру. Ряд моделей, в яких автори інтерпретують ті чи інші властивості тонкої структури, що спостерігаються, представлений у даному підрозділі.

Мікроструктура радіовипромінювання пульсарів була відкрита в 1971 [52]. У 1975 році Б. Рікет [70] вперше описав мікроструктуру статистично. В рамках запропонованої їм моделі мікроструктура — це модульований за часом білий шум, який має гаусове розподілення амплітуд. Модель Б. Рікета називається «**Amplitude modulated noise model**» або «модель амплітудно модульованого шуму».

Дж. Кордес в своїх працях [43, 58, 71] взяв за основу модель Б. Рікета та запропонував нову модель під назвою «**Angular beaming model**» або «модель кутового пучка», в якій виклав фізичну інтерпретацію шумового сигналу пульсара. Шумовий сигнал — це випромінювання кривини пучків релятивістських часток, які рухаються вздовж відкритих ліній магнітного поля в магнітосфері пульсара. Кожний пучок випромінює елементарний імпульс в широкій смузі частот (більше за 1 ГГц), яка збігається з повною смугою випромінювання пульсара. Час існування елементарного імпульсу складає менш ніж 1 нс. Відповідно моделі, розмір області генерації елементарних імпульсів не перевищує $c \cdot \tau = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} = 0.3$ м. Множина

елементарних імпульсів складаються некогерентно в один мікроімпульс, який вже приймається на землі за допомогою радіотелескопу.

В рамках цієї моделі, субімпульси та мікроімпульси — це некогерентні ансамблі когерентного випромінювання. Вони випромінюються різними пучками релятивістських часток — когерентними емітерами. Субімпульси дозволяють розділити кутові параметри магнітосфери пульсара, а мікроімпульси — це швидкі часові флуктуації параметрів магнітосфери.

Когерентне випромінювання елементарних імпульсів формується у вузьких пучках щільної релятивістської плазми з розміром когерентності s_0 , який значно перевищує довжину хвилі [72–75].

Розмір когерентності області випромінювання можливо визначити за формулою:

$$s_0 \approx \frac{2\pi c}{\delta\omega} = \frac{cd}{\Omega r} = d \frac{R_{LC}}{r}, \quad (1.2)$$

де $\delta\omega$ – частотна смуга кореляції, c – швидкість світла у вакуумі, d – діаметр згустку у плазмі, Ω – кутова частота обертання НЗ, r – висота над поверхнею НЗ, R_{LC} – радіус світлового циліндру. Чим більший розмір s_0 з формули (1.2), тим більш гострими та інтенсивними є піки мікроімпульсів [75].

У магнітосфері пульсара можуть бути присутні два механізми генерації випромінювання: вузькосмуговий та широкосмуговий. Поки не відомо, який механізм переважає.

- Якщо розмір області випромінювання значно переважає довжину хвилі $s_0 \gg \lambda$, то випромінювання вузькосмугове. Це аналог решітки. Хвилі, що спостерігається, випромінюється з вузької ділянки магнітосфери.
- Якщо розміри приблизно збігаються $s_0 \sim \lambda$, то випромінювання широкосмугове. Це аналог одиничного випромінювача. Пучки випромінюються в широкому діапазоні довжин хвиль. Ця модель добре пояснює профіль імпульсу з одним піком.

Властивості імпульсів, що спостерігаються (максимум спектральної енергії, двогорба форма імпульсу, плаский спектр), показують, що випромінюванню пульсарів притаманні обидва механізми.

В той же час розвивався й інший напрямок, в рамках якого мікроструктура є проявом радіальних модуляцій параметрів НЗ або параметрів її магнітосфери. Він заснований на тому, що спостерігають саме широкосмугову тонку структуру. Цей напрямок називається плазмовою моделлю.

Мікроструктура може виникати в результаті власної модуляційної нестійкості (self-modulation instability), або часових флуктуацій параметрів плазми в магнітосфері пульсара [76]. Такі флуктуації описуються теорією нелінійної плазми. Нелінійність виникає як наслідок флуктуацій мас релятивістських частинок, що призводить до власної модуляції нестійкості сильних електромагнітних хвиль в електрон-позитронній плазмі. Модель схожа на статистичне уявлення тонкої структури Рікета [70].

В рамках цієї моделі ширину імпульсу можливо представити формулою:

$$\Delta\tau_{\mu} = \frac{1}{\sqrt{2}\gamma\omega_{pe}v_0}, \quad (1.3)$$

де γ – Лоренц-фактор потоку вторинних електронів та позитронів, ω_{pe} – електрон-позитронна плазмова частота, v_0 – безрозмірна інтенсивність радіовипромінювання елементарного джерела в магнітосфері пульсара.

Безрозмірну інтенсивність радіовипромінювання елементарного джерела можливо оцінити за формулою:

$$v = \frac{eE}{m_e\omega c} \approx 5.585 \left(\frac{S\Delta f}{n} \right)^{1/2} \frac{L}{\delta \cdot f}, \quad (1.4)$$

де e – заряд електрона, E – напруженість електричного поля, m_e – маса спокою електрона, δ – розміри випромінювальної ділянки в 10^8 см, S – спектральна густина потоку випромінювання пульсара в Ян (Ян = 10^{-26} Вт/(м²·Гц)), f – частота

спостереження в МГц, Δf – частотна смуга кореляції в МГц, L – відстань до пульсара в кпк, n – коефіцієнт заломлення.

Модель часової (радіальної) модуляції параметрів НЗ та магнітосфери розвиває в своїх працях В. Боряков [77–79]. Оскільки мікроструктура часто виникає всередині субімпульсів, можливо припустити, що вони випромінюються приблизно з однакових ділянок магнітосфери (на однаковій відстані від поверхні НЗ). Тобто механізм випромінювання цих двох структур однаковий, але ділянки випромінювання в магнітосфері мають різні просторові розміри когерентності.

З іншого боку, Д. Фергюсон припускає, що субімпульси та мікроімпульси генеруються на різних висотах від поверхні пульсара: субімпульсне випромінювання народжується значно ближче до поверхні, ніж мікроімпульсне [80].

Фізичним явищем, яке створює часову модуляцію випромінювання, може бути зоретрус. НЗ має кору — це жорстка металева оболонка, що складається з ядер заліза [81, 82]. Ця кора може руйнуватись та тріскатися під впливом припливних сил, які виникають через обертання НЗ. Зоретрус може бути причиною квазіперіодичної тонкої структури випромінювання пульсара. Іншим механізмом можуть бути спалахи в полярному зазорі або стоячі хвилі у плазмі світового циліндру.

В працях [83–85] розглядаються ефекти поширення радіохвиль через плазму магнітосфери пульсара з різними конфігураціями магнітного поля (відсутнє магнітне поле, різні положення вісі магнітного поля відносно до вісі обертання НЗ). Виникнення квазіперіодичної мікроструктури можливо пояснити проходженням хвиль через плазму, що “тремтить” (shearing plasma), тобто сильно анізотропну плазму із швидкими флуктуаціями щільності. Турбулентна плазма та магнітне поле створюють широкосмугову мікроструктуру випромінювання.

Також квазіперіодична мікроструктура може випромінюватись пучками релятивістських частинок, які періодично виникають у плазмі, наприклад, у вигляді довгої стоячої хвилі густини [80].

Ще одним варіантом часової модуляції може слугувати деформація магнітного поля поперечними хвилями в плазмі [86]. Дрейф квазіпоперечних плазмових хвиль

може привести до локальної зміни кривини ліній магнітного поля та деформувати область генерації випромінювання, що й призводить до виникнення мікроструктури.

Інший підхід до пояснення тонкої структури запропонувала С. А. Петрова [87–89]. В її інтерпретації мікроструктура — це результат індукованого розсіяння Комптона на частинках ультрарелятивістської сильно намагніченої плазми в магнітосфері пульсара. Ця модель добре пояснює поляризаційні властивості тонкої структури.

Загалом, всі моделі виникнення тонкої структури радіовипромінювання пульсарів в широкому частотному діапазоні можливо розділити на дві основні групи. Вони ґрунтуються на довготній (поперечній) та часовій (поздовжній) модуляції параметрів випромінювання.

Довготна модуляція випромінювання пульсара в поперечному перетині випромінювальної області в магнітосфері пульсара (beaming model).

- Модель пов'язана зі стаціонарною геометрією випромінювального пучка електронів, який обертається разом з НЗ.
- Мікроструктура — це прояв геометричних особливостей випромінювального пучка в магнітосфері, який проходить крізь промінь зору з одним оборотом НЗ.
- Модель пояснює квазіперіодичність тонкої структури геометрією випромінювального пучка.
- Модель добре інтерпретує різні форми (морфології) профілю імпульсу, як наслідок проходження променя радіовипромінювання через промінь зору.
- Існує ціле сімейство таких моделей (тонкий, конічний та плямистий промені), які відрізняються, загалом, геометрією променів.

Часова модуляція параметрів НЗ та магнітосфери (temporal modulation model) чи радіальна модуляція параметрів випромінювальної області вздовж відкритої силової лінії магнітного поля.

- Мікроструктура може виникати в результаті неоднорідностей плазми в області випромінювання в магнітосфері пульсара. Інший можливий механізм генерації — це вібрації поверхні нейтронної зорі.
- Модель обґрунтована тим, що тонка структура спостерігається у широкій смузі частот.
- Спектр радіовипромінювання описується функцією висоти над поверхнею НЗ. Ширина пучка випромінювання залежить від частоти. Високочастотне випромінювання виходить з нижніх шарів магнітосфери, де ширина променя звужується. Низькі частоти випромінюються з вищих від поверхні ділянок, де ширина променя збільшується.

Існує ряд відкритих питань, які пов'язані з природою генерації тонкої структури:

- Чи є різні масштаби тонкої структури всередині одного імпульсу проявом одного і того ж механізму випромінювання?
- Чи відрізняється механізм генерації тонкої структури на різних частотах спостережень?
- Чому тонка структура спостерігається далеко не у всіх пульсарів?
- Який внесок в генерацію тонкої структури робить середовище поширення випромінювання пульсарів?

Дослідження тонкої структури в широкому діапазоні частот дозволить з'ясувати, яка модель відповідає дійсності і на якій висоті народжується випромінювання пульсара з тонкою структурою. Ймовірно, можуть реалізовуватися комбінації розглянутих моделей на різних частотах випромінювання або для різних масштабів тонкої структури.

Адекватна модель тонкої структури дозволить побудувати геометрію магнітосфери пульсара (магнітного поля і області випромінювання) і визначити головний механізм когерентного радіовипромінювання пульсарів. Таким чином, тонка структура буде відігравати роль зонда магнітосфери пульсара.

Щоб відповісти на поставлені питання, необхідно розуміти, як впливає середовище поширення на параметри тонкої структури радіоімпульсів пульсарів, що спостерігаються.

1.3 Середовище поширення радіосигналів пульсарів

Радіопульсари є ідеальними об'єктами для дослідження іонізованого космічного середовища. Як точкові об'єкти (їх кутовий розмір добігає до нуля), вони мерехтять на неоднорідностях електронної концентрації в середовищі поширення у широкому діапазоні частот та часових масштабів. Імпульси дозволяють спостерігати частотно-часову дисперсійну затримку та оцінювати концентрацію вільних зарядів в середовищі поширення на промені зору. Неоднорідності електронної концентрації в космічному середовищі призводять до багатопроменевого поширення сигналу і розсіюють його.

Космічний простір заповнений газом, пилом, зарядженими частинками, в ньому присутнє космічне магнітне поле. Сигнал, який випромінюється будь-яким джерелом, взаємодіє з плазмовим середовищем, в якому він поширюється, та викривляється. Однією з головних задач радіоастрономічних спостережень є відновлення оригінального сигналу (перехід до системи відліку, яка пов'язана з джерелом випромінювання). Для цього необхідно компенсувати ефекти поширення, які впливають на зареєстрований сигнал. По відновленому сигналу можливо оцінювати параметри джерела випромінювання. З іншого боку, дослідження викривлень, які вносить середовище поширення, — це також самостійна задача. В цьому випадку вивчаються параметри самого середовища.

Середовище поширення можливо розділити на характерні частини (шари) за такими параметрами як концентрація вільних зарядів, ступінь турбулентності середовища, характерні швидкості поперечного та повздовжнього руху неоднорідностей [3, 15]. Радіосигнал, що був випромінений пульсаром, послідовно проходить крізь магнітосферу пульсара та область пульсарного вітру. Після цього він потрапляє в міжзоряне середовище (МЗС), яке є значно більш розрядженим, але й

більш об'ємним, ніж магнітосфера. В межах Сонячної системи існує міжпланетне середовище (МПС). Після МПС сигнал, нарешті, проходить крізь іоносферу Землі та потрапляє на приймальну апаратуру. Далі ми розглянемо параметри всіх шарів середовища поширення окремо.

МЗС має складну структуру та включає кілька компонент [90]. Параметри МЗС сильно змінюються в залежності від напрямку променя зору. Можна виділити п'ять основних складових МЗС. Молекулярна компонента складається з різних молекул (H_2 , CH , CO , CN та ін.). Вона має температуру $10 — 20$ К та щільність $10^2 — 10^6$ $см^{-3}$. Холодна атомарна компонента складається, переважно, з нейтрального водню HI , має температуру $50 — 100$ К та щільність $1 — 10^3$ $см^{-3}$. Тепла атомарна компонента також складається з HI , має температуру $600 — 10000$ К та щільність $0.1 — 10$ $см^{-3}$. Тепла іонізована компонента складається з іонізованого водню HII , її температура складає ~ 8000 К, а щільність — $10^2 — 10^4$ $см^{-3}$. Нарешті, є гаряча іонізована компонента (це також $HIII$) з температурою $\sim 10^6$ К та щільністю $10^{-4} — 10^{-2}$ $см^{-3}$.

Сонячна система знаходиться в межах локальної міжзоряної порожнини (local interstellar bubble), діаметр якої складає приблизно 300 пк [91, 92]. Всі відомі пульсари знаходяться в межах ~ 30 кпк. На низьких частотах спостерігають пульсари, які знаходяться на відстані до 2 кпк (з мірою дисперсії < 30 пк \cdot см $^{-3}$) [30, 31]. Середня електронна концентрація $\langle n_e \rangle$ в цих межах, з різних джерел, складає ~ 0.025 $см^{-3}$ [93], ~ 0.005 $см^{-3}$ [94], ~ 0.019 $см^{-3}$ [95].

МЗС не є однорідним, існують флуктуації електронної щільності, які призводять до викривлення сигналів. Виділяють два характерні масштаби неоднорідностей МЗС в межах 1 кпк. Внутрішній (коротка шкала) $l_1 \sim 10^5 — 10^6$ м [96], та зовнішній — $l_2 \geq 10^{18}$ м [97].

МПС — це речовина та поля, які заповнюють простір всередині Сонячної системи. Сонце є джерелом заряджених частинок, які рухаються крізь МПС у вигляді сонячного вітру. В разі спокійного Сонця на відстані 1 а. о. концентрація частинок в МПС складає $1 — 10$ $см^{-3}$, вона падає зворотно пропорційно квадрату

відстані від Сонця. Під час сонячної активності концентрація частинок на відстані земної орбіти може збільшуватись до 100 частинок на кубічний см [98].

Іоносфера Землі — це іонізований шар атмосфери, який виникає внаслідок опромінення ультрафіолетовими променями Сонця. Вона простягає десь на 50 — 400 км від поверхні Земля та складається з декількох шарів, які мають назву D, E та F, різну концентрацію заряджених частинок. Середня концентрація електронів в найщільнішому шарі F змінюється від $4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ (ніч) до $9.5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (день) в залежності від доби та сонячної активності [99].

1.4 Ефекти поширення радіосигналів пульсарів

Розглянемо основні явища, які виникають внаслідок поширення радіовипромінювання через різні шари середовища. При взаємодії радіовипромінювання з плазмовою речовиною та полями виникають ефекти поширення. До них відносяться: частотно-часова дисперсія сигналу, розсіяння на неоднорідностях електронної концентрації та ефект Фарадея. Тонка структура радіовипромінювання пульсарів тісно пов'язана з ефектами поширення. Вірогідно, деякі властивості тонкої структури можуть бути пояснені поширенням випромінювання пульсарів крізь середовище [100].

Частотно-часова дисперсія сигналів впливає із закону дисперсії хвиль у середовищі, де циклічна частота ω та хвильовий вектор \mathbf{k} пов'язані дисперсійним рівнянням $\omega = \omega(\mathbf{k})$. При поширенні випромінювання у середовищі групова $v_g(\omega)$ та фазова $v_{ph}(\omega)$ швидкості відрізняються одна від одної та обидві залежать від частоти. Ефект спостереження явища нормальної дисперсії проявляється в тому, що низькі частоти радіовипромінювання поширюються повільніше ніж високі.

Групова швидкість залежить від коефіцієнту заломлення $n(\omega)$, який в холодній слабо анізотропній плазмі має вигляд [45]:

$$n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}, \quad (1.5)$$

де $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}$ — це плазмова частота, e — заряд електрона, n_e — концентрація електронів. Тоді групову швидкість можливо записати наступним чином:

$$v_{gr}(\omega) = cn(\omega) = c\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}. \quad (1.6)$$

Аналогічно, фазова швидкість має вигляд:

$$v_{ph}(\omega) = c \cdot n(\omega)^{-1} = c \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{-1/2}. \quad (1.7)$$

З групової швидкості можливо розрахувати час, який витрачає сигнал на поширення у плазмовому середовищі:

$$\tau(\omega) = \int_0^L \frac{1}{v_{gr}}(\omega) dl = \int_0^L \frac{1}{cn(\omega)} dl, \quad (1.8)$$

де L – відстань до пульсара.

Середня електронна концентрація в МЗС дорівнює 0.03 електрон на см³. Тоді, плазмова частота буде складати $\omega_p \approx 2$ кГц. На частотах спостережень в десятки МГц параметр $\frac{\omega_p}{\omega} \ll 1$, що дозволяє розкласти рівняння коефіцієнта заломлення $n(\omega)$ з рівняння (1.5) у ряд Тейлора (враховуючи тільки перші два члени розкладання) та спростити вираз (1.8):

$$n(\omega) = \left[1 - \frac{\omega_p^2 / \omega^2}{2\sqrt{1 - \omega_p^2 / \omega^2}}\right] \approx \left[1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2}\right], \quad (1.9)$$

$$\tau(\omega) = \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{2} \frac{4\pi e^2}{m_e c} \frac{1}{\omega^2} \right) \int_0^L n_e dl. \quad (1.10)$$

З виразу (1.10) можливо розрахувати затримку $\Delta\tau$, яка виникає між двома частотами ω_1 та ω_2 сигналу пульсару на приймальному кінці:

$$\Delta\tau(\omega_1, \omega_2) = \tau(\omega_1) - \tau(\omega_2) = \frac{2\pi e^2}{m_e c} \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \int_0^L n_e dl. \quad (1.11)$$

Параметр міра дисперсії (МД, чи «dispersion measure» – DM) визначає загальну кількість вільних електронів у стовпі з одиничним перерізом 1 см^2 на промені зору між спостерігачем та пульсаром. Він описується інтегралом

$$DM = \int_0^L n_e dl. \text{ МД має одиницю вимірювання } [\text{пк} \cdot \text{см}^{-3}].$$

Зручно розраховувати часову затримку сигналу відносно нескінченно великої частоти. Тоді вираз (1.11) має простий вигляд:

$$\Delta\tau(\omega) = \frac{DM \cdot C}{\omega^2}, \quad (1.12)$$

де $C = \frac{2\pi e^2}{m_e c}$ — константа.

Імпульс пульсара випромінюється в широкому діапазоні частот одночасно. Внаслідок явища нормальної дисперсії на приймальній стороні імпульс «розтягується» у часі та набуває викривлену форму на динамічному спектрі. Для того, щоб перейти в систему відліку, що пов'язана з пульсаром, необхідно усунути вплив дисперсії. Існують два методи компенсації дисперсії: некогерентний (постдетекторний) та когерентний (додетекторний) [101, 102]. Обидва методи будуть розглянуті детальніше у другому розділі цієї дисертаційної роботи.

Оцінка точного значення МД є потужним інструментом у дослідженнях пульсарів та транзієнтних джерел радіовипромінювання. Вона дозволяє

ототожнювати прийнятий сигнал з тим чи іншим джерелом [31, 103]. Параметр МД дозволяє оцінювати відстань до пульсарів, середнє значення електронної концентрації (враховуючи ту чи іншу модель середовища поширення) та складати модель їхнього розподілення у Галактиці [104]. Оцінка МД та її довготривалих флуктуацій вкрай важлива для точного розрахунку періоду пульсара (pulsar timing) [105, 106].

Розсіяння. Подібно мерехтінням зорь в оптичному діапазоні через турбулентності у земній атмосфері, точкові радіоджерела мерехтять через наявність неоднорідностей електронної концентрації в плазмовому середовищі поширення. В МЗС, МПС та іоносфері Землі існують флуктуації електронної концентрації δn_e . При розсіюванні хвиль на цих неоднорідностях виникають ефекти рефракції та дифракції хвиль. Це може приводити до зсуву видимого положення та збільшенню кутових розмірів джерела, появи декількох псевдо джерел тощо. Через це амплітуда та фаза хвилі на приймальному кінці флуктують. Це явище називається **мерехтінням радіоджерела** [107–112].

Середовище поширення є турбулентним [113–115] це дозволяє застосувати теорію Колмогорова [116]. В рамках цієї теорії флуктуації електронної концентрації δn_e можуть бути описані ступеневим спектром $P_{\delta n_e}(k) = C_n^2 k^{-\gamma}$ [97, 109, 113, 117], де $k \sim 1/a$ — це просторове хвильове число, зворотнє до лінійних розмірів неоднорідностей a . Якщо розглядати логарифмічний спектр розподілення хвильових чисел по частоті, який лінійно спадає, то хвильові числа розподілені в межах внутрішнього та зовнішнього масштабів флуктуацій $k_{out} \ll k \ll k_{inn}$. C_n^2 — це спектральний коефіцієнт. Для колмогоровського спектру показник ступеня складає $\gamma = 11/3$. У випадку МЗС турбулентність може бути описана колмогоровським спектром лише в першому наближенні та тільки для найближчих відстаней $L < 1$ кпк [113]. На більших відстанях неоднорідності не можуть вважатись статистично однорідними та їхній спектр має більш складну структуру. Подібно МД можливо ввести параметр міри розсіяння (MP, «scattering measure» — SM), який

характеризує інтегральну інтенсивність турбулентності C_n^2 на промені зору:

$$SM = \int C_n^2(l) dl.$$

Характерні лінійні розміри флуктуацій електронної концентрації α та, відповідно, спектри мерехтінь відрізняються для кожної ділянки середовища поширення. Для МЗС характерна ширина спектра мерехтінь складає менш за 0.001 Гц, а лінійні розміри неоднорідностей знаходяться в проміжку 10^6 — 10^{12} м [113, 118]. Для МПС спектр мерехтінь відповідає 1 — 10 Гц [119], а для іоносфери Землі 0.1 — 1 Гц [120].

Швидкість руху неоднорідностей [121] в МПС $4 \cdot 10^3$ м·с⁻¹, що переважає над такою в Іоносфері Землі — 200 м·с⁻¹. Можна розрахувати, що в МПС переважають неоднорідності з лінійними розмірами біля 400 м, а в земній іоносфері — з розмірами 0.2 м.

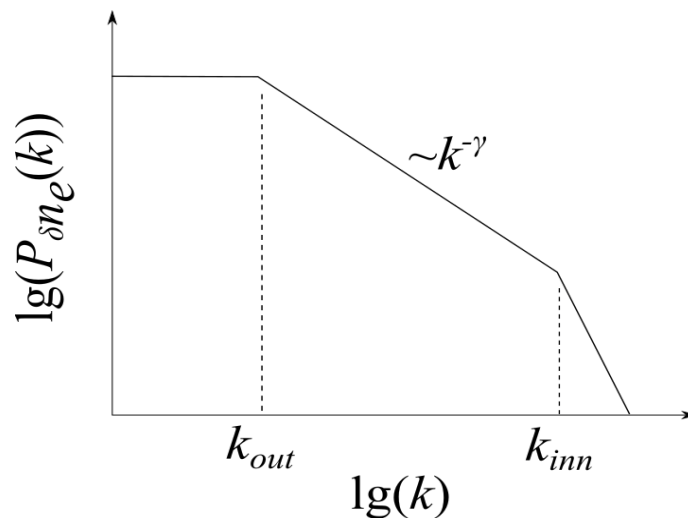


Рис. 1.2. Характерний спектр турбулентностей електронної концентрації в середовище поширення. В межах зовнішнього k_{out} та внутрішнього k_{inn} масштабів просторових хвильових чисел цей спектр має ступеневу залежність $\sim k^{-\gamma}$ у логарифмічному масштабі.

В першому наближенні, розсіяння зручно описувати в рамках теорії **тонкого фазового екрану** (ТФЕ). В цій моделі всі неоднорідності розміщені на екрані,

ширина якого є суттєво меншою за довжину хвилі, який розміщується на деякій далекій відстані між спостерігачем та джерелом випромінювання [122, 123]. Ця модель адекватно імітує процеси розсіяння радіовипромінювання близьких до Землі пульсарів, а саме такі й демонструють тонку структуру у своєму випромінюванні.

Внаслідок розсіяння на неоднорідностях ТФЕ, одиничний промінь розділяється на кілька променів, і точкове джерело випромінювання набуває кутових розмірів θ_d . Це називається багатопроменеве поширення сигналу. У наближенні геометричної оптики кут розсіяння можливо представити функцією, яка зворотно пропорційна до квадрату частоти:

$$\theta_d \approx \frac{1}{2\pi} \frac{e^2 \delta n_e}{m_e} \frac{1}{f^2} \sqrt{\frac{L}{a}}. \quad (1.13)$$

За рахунок багатопроменевого поширення різні промені проходять різні відстані від ТФЕ до спостерігача (див. рис. 1.3). Часова затримка розсіяного променя відносно того, який поширюється не зазнаючи розсіяння, буде залежати від кута:

$\Delta t(\theta) \approx \theta^2 \frac{L}{c}$. За рахунок цього в імпульсі пульсара, який первісно походив на

дельта-функцію з'являється експонентний хвіст запізнювання. Враховуючи, що кути розсіяння розподіляються за нормальним законом, інтенсивність хвоста розсіяння можливо описати функцією часу:

$$I(t) \sim \exp\left(\frac{-c\Delta t}{\theta_{RMS}^2 L}\right) = e^{-\Delta t/\tau_{sc}}, \quad (1.14)$$

де $\tau_{sc} = \frac{e^4}{4\pi^2 m_e^2} \frac{\delta n_e^2}{a} L^2 f^{-\alpha}$ – стала часу розсіяння на частоті f .

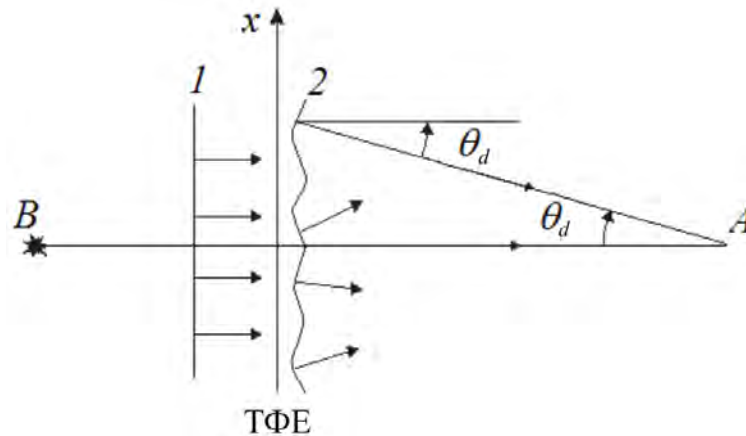


Рис. 1.3. Ілюстрація моделі ТФЕ. Плaskий фронт хвилі (1), який поширюється від точкового джерела випромінювання (B) до спостерігача (A), викривляється (2) при проходженні через ТФЕ. Через це точкове джерело випромінювання набуває кутових розмірів θ_d .

Ширина хвоста розсіяння (розраховується на рівні інтенсивності 0.5) сильно залежить від частоти спостереження. Стала часу розсіяння також залежить від частоти: $\tau_{sc}(f) = \tau_{sc}(f_0) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha}$. Тут $\tau_{sc}(f_0)$ – стала часу розсіяння, виміряна на опорній частоті f_0 . Її значення можна знайти в радіоастрономічних каталогах (напр. [30]), зазвичай вона приведена на частоті 1 ГГц. Показник ступеня α характеризує середовище розсіяння. Він лежить у межах $3.5 \leq \alpha \leq 4.5$ в залежності від виду спектру розподілення просторових неоднорідностей електронної концентрації [100, 118].

Розсіяння пов'язано з флуктуаціями електронної концентрації на промені зору, а інтегральна кількість вільних електронів описує параметр МД. Існує емпірична залежність між сталою часу розсіяння τ_{sc} та МД [104, 124]:

$$\log(\tau_{sc}) = a + b \log(DM) + c \log(DM)^2 - \alpha \log(f). \quad (1.15)$$

Частота f дана в ГГц, стала часу розсіяння τ_{sc} — в мс. Коефіцієнти a , b та c , а також показник ступеня спектру турбулентності α , варіюються в залежності від моделі середовища поширення.

Вивчення мерехтінь та розсіяння радіовипромінювання пульсарів на неоднорідностях середовища поширення є вкрай актуальною задачею. Оцінка МР дозволяє побудувати карту розподілу неоднорідностей електронної щільності в космічному просторі [95, 104, 113]. Це, в свою чергу, дозволяє побудувати більш детальну великомасштабну модель Галактики. За спектрами мерехтінь на просторових неоднорідностях в МЗС можна визначити власні швидкості руху пульсарів [125]. Мерехтіння радіовипромінювання пульсарів на неоднорідностях електронного розподілу в МПС та іоносфері Землі використовуються при вивченні сонячної активності, оскільки стан плазми в цих шарах середовища сильно залежить від сонячних спалахів, магнітних бур та інших проявів активності Сонця [126].

Розсіяння на неоднорідностях електронної щільності обмежує короткий часовий масштаб тонкої структури. Всі тонкі деталі в імпульсі, ширина яких менше сталої розсіяння, будуть розмиті. Однак, в праці [59] автори стверджують, що можливо спостерігати мікроімпульси з характерними часом значно меншим, ніж характерний час розсіяння на неоднорідностях МЗС. Автори дослідили 7 пульсарів на частоті 102.5 МГц та для всіх них виявили мікроструктуру з часовими масштабами порядку декількох мкс. Оскільки розсіяння є результатом багатопроменевого поширення, то головний імпульс пульсара складається з більш коротких мікроімпульсів, які можуть спостерігатися окремо один від одного. Дотична до мікроімпульсів й буде експонентним хвостом розсіяння в імпульсі пульсара. Аналітично, даний ефект «паротягу» мікроімпульсів був описаний в роботі [127].

Ефект Фарадея. Радіовипромінювання пульсарів є сильно поляризованим [42]. В ньому переважає лінійна поляризація, однак в невеликій кількості присутня і кругова компонента [128, 129]. Під час поширення лінійно поляризованої хвилі

квасіпоздовжньо до ліній магнітного поля крізь намагнічену плазму виникає обертання площини поляризації — так званий ефект Фарадея.

В присутності магнітного поля коефіцієнт заломлення приймає вигляд [45, 46]:

$$n_{o,x}(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \omega_H)}}, \text{ де } \omega_H = \frac{eB_p}{m_e c} - \text{циклотрона частота, } B_p = B \cos(\angle \mathbf{kB}) -$$

компонента магнітного поля, яка є паралельною до хвильового вектору \mathbf{k} . Різні знаки в знаменнику описують різницю в коефіцієнті заломлення для звичайної (ordinary) n_o та незвичайної (extraordinary) n_x хвилі. Цей ефект має назву двопроменезаломлення.

Лінійну поляризацію можна представити як суперпозицію двох кругових — правої та лівої поляризації. Кут між їхніми фазами змінюється з поширенням хвилі, оскільки хвилі мають різні групову та фазову швидкості (аналогічно тому, як це показано для явища нормальної дисперсії). Таким чином, двопроменезаломлення призводить до обертання площини поляризації хвилі вздовж променя зору. Різницю фаз звичайної і незвичайної хвиль можна представити у вигляді:

$$\Delta\varphi_F = \frac{1}{\omega^2} \frac{2\pi e^3}{m_e^2 c^2} \int n_e B_p dl = RM\lambda^2, \quad (1.16)$$

де λ — довжина хвилі. За аналогією з мірою дисперсії, вводиться параметр міри обертання («rotation measure», RM), який також залежить від електронної

концентрації на промені зору: $RM = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int n_e B_p dl = C \cdot DM \int B_p dl$. Міра

обертання вимірюється в [рад·м⁻²].

Тонка структура, як і саме радіовипромінювання, є поляризованою. Однак, Дж. Кордес та Т. Хенкінс [42] показали, що поляризація індивідуального імпульсу лише частково пов'язана з поляризацією середнього профілю (остання знайдена методом усереднення параметрів Стокса). Відхилення поляризації від середньої значно корелює з інтенсивністю мікроімпульсів та субімпульсів, при цьому мікроімпульси більш поляризовані, ніж субімпульси. Загалом, поляризація та

інтенсивність мікроімпульсів сильно залежать від довготи імпульсу. У цій роботі також показано, що ступінь поляризації зазвичай є сталою в межах мікроімпульсів, однак може різко змінюватися (стрибок позиційного кута на 90 градусів, зміна кругової поляризації) у одного чи двох мікроімпульсів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Пульсари були відкриті понад 50 років тому, але й досі залишається безліч невирішених задач, пов'язаних із ними. Головна проблема полягає в побудові єдиної моделі магнітосфери та моделі когерентного випромінювання пульсарів. Для її вирішення необхідно зрозуміти, на якій висоті від поверхні НЗ генерується випромінювання, які лінійні розміри мають ділянки випромінювання та яким чином воно поширюється крізь магнітосферу пульсара.

Відомо, що магнітосфера пульсара заповнена дуже щільною електрон-позитронною плазмою із сильним магнітним полем, яке, у першому наближенні, має дипольний характер. Сигнал, що народжується на певній висоті у магнітосфері, трансформується під час поширення у самій магнітосфері. На Землі спостерігається сигнал, який був випромінений з радіусу критичної поляризації.

На радіовипромінювання пульсарів загалом, та на параметри тонкої структури зокрема сильно впливає середовище поширення. До нього відносяться такі характерні ділянки, як магнітосфера пульсара та пульсарний вітер, МЗС, МПС та іоносфера Землі. Під час поширення сигналу через середовище виникають ефекти дисперсійної затримки, розсіяння на неоднорідностях електронної щільності та обертання площини поляризації.

Тонка структура радіовипромінювання пульсарів може слугувати інструментом зондування середовища поширення, зокрема магнітосфери пульсара, та визначення параметрів області випромінювання. Але для цього необхідно відповісти на ряд питань, які стосуються природи генерації тонкої структури.

Тонка структура активно вивчається на більш високих частотах радіодіапазону, де й були отримані основні результати спостережень, на які спираються моделі виникнення мікроструктури. Однак на низьких частотах такі дослідження майже не проводились, тож існує значний брак наявної інформації.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1, 3, 4, 6, 10 — 18, 20 — 25].

РОЗДІЛ 2

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ОБРОБКА ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ

У даному розділі викладена методика спостережень та алгоритми обробки сигналів пульсарів, які є необхідними для пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні хвиль. В цьому розділі також описані пульсари, які є кращими кандидатами для таких досліджень.

Мета досліджень полягає у пошуку різних масштабів тонкої структури індивідуальних імпульсів пульсарів та розробці відповідних методів і алгоритмів для цього пошуку. На низьких частотах спостережень інтенсивність типових імпульсів пульсарів не є достатньою для того, щоб вони виділялись на фоні середнього шуму (співвідношення С/Ш < 0.1). Тому тонкі варіації інтенсивності радіовипромінювання є можливим досліджувати тільки у АП, в яких співвідношення С/Ш значно вище (С/Ш > 10). Задача спостережень зводиться до пошуку АП у загальному масиві даних, за якими далі оцінюють необхідні параметри (МД, стала часу розсіяння, характерний час тонкої структури).

Усунення частотно-часової дисперсії є необхідним кроком в аналізі даних, які отримані при спостереженні пульсарів. Як було показано у першому розділі, у декаметровому діапазоні часова дисперсійна затримка досягає максимальних значень, порівняно з більш короткими хвилями. Тож у декаметровому діапазоні розробка оптимальних швидких алгоритмів компенсації дисперсії є вкрай важливим завданням.

Для пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні необхідно максимально збільшувати контрастність сигналу та підвищувати співвідношення С/Ш. Для цього краще застосовувати методи спектрального та кореляційного аналізу.

При аналізі тонкої структури радіовипромінювання пульсарів важливо знати такий параметр, як стала часу розсіяння сигналу в середовищі. Він дозволяє оцінити

нижню межу часу тонкої структури на певній частоті, а також використовується у деяких алгоритмах пошуку тонкої структури.

2.1 Особливості декаметрового діапазону спостережень пульсарів

Дана дисертаційна робота присвячена вивченню тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні довжин хвиль. Спостереження пульсарів в низькочастотній частини спектра (10 — 100 МГц) мають багато особливостей порівняно зі спостереженнями на більш високих частотах. Тут існують свої недоліки та переваги.

У декаметровому діапазоні використовуючи один телескоп досягається максимально широка відносна частотна смуга $\frac{\Delta f}{f_c}$ (Δf — частотна смуга спостережень, f_c — центральна частота реєстрації). Це дозволяє проводити широкосмугові дослідження, зберігаючи однакові параметри радіотелескопу та умови спостережень.

З іншого боку, на низьких частотах велику проблему становлять радіозавади земного та космічного походження. Це призводить до низького рівня С/Ш, що ускладнює спостереження слабких джерел радіовипромінювання. Важливим завданням декаметрового діапазону є боротьба із завадами та підвищення рівня С/Ш.

При спостереженнях у декаметровому діапазоні переважає випромінювання фону Галактики (за виключенням найпотужніших радіо джерел, до яких відносяться Кассіопея-А, Лебідь-А, Крабоподібна туманність, Сонце та Юпітер). Яскравісна температура галактичного фону підвищується з падінням частоти [130], досягаючи 20 — 40 кК на частоті 20 МГц в радіо тихих ділянках неба [131].

Вплив середовища поширення зростає на низьких частотах. З одного боку, це додає складнощів в обробці сигналів. З іншого боку, всі ефекти поширення в цьому діапазоні проявляються найбільш контрастно, що відіграє позитивну роль у вивченні їхнього впливу на параметри тонкої структури радіовипромінювання.

Внесок дисперсійної затримки у час поширення сигналу є зворотно пропорційним до квадрату частоти спостереження $\sim f^{-2}$. Це ускладнює її компенсацію та вимагає значних обчислювальних ресурсів. З іншого боку, в низькочастотному діапазоні можливо оцінювати параметр МД з максимальною точністю.

Стала часу розсіяння також зростає з падінням частоти. Для нормального просторового розподілу неоднорідностей електронної концентрації розсіяння збільшується з пониженням частоти, як $\sim f^{-4}$. Сильне розсіяння, загалом, не дозволяє спостерігати тонку структуру з характерними часом нижче, ніж стала часу розсіяння на даній частоті. Тому пошук тонкої структури у декаметровом діапазоні значно ускладнюється та є можливим тільки для близьких до Землі пульсарів.

Спектр звичайних пульсарів має завал на низьких частотах (метрова та декаметрова ділянки спектру) [132]. Тому інтенсивність випромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні зменшується, а з нею падає співвідношення С/Ш, що також ускладнює пошук та спостереження пульсарів.

Сильні радіозавади, висока яскравість фону Галактики, низький рівень С/Ш при спостереженнях, сильно виражені ефекти поширення, низькочастотний завал спектру пульсарів — всі ці факти ускладнюють дослідження пульсарів в області низьких частот. Вперше у декаметровом діапазоні хвиль пульсари були зареєстровані при спостереженні на радіотелескопі УТР-2 в 1968 — 1969 році [133]. Завдяки великому часу накопичення сигналу вдалося зареєструвати середні імпульси пульсарів В0809+74, В1133+16 та В1919+21. Зазвичай індивідуальні імпульси пульсарів не виділяються на тлі шуму.

В праці [31] представлено огляд пульсарів північної півкулі на частотах 10 — 30 МГц. В огляді були зафіксовані найближчі пульсари з МД не більшою за $30 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. Всі джерела знаходяться в межах < 1 кпк від Землі. Періоди обертання всіх пульсарів є більшими за 0.1 секунди.

Реєстрація індивідуальних імпульсів пульсарів на низьких частотах практично неможлива. Однак, деякі пульсари випромінюють **аномально інтенсивні імпульси** (АІ) [55, 100, 134, 135]. АІ — це індивідуальні імпульси, чия інтенсивність в десятки або сотні разів перевищує інтенсивність середньостатистичних імпульсів. Ймовірність їх реєстрації у декаметровому діапазоні складає всього 1 — 2 % та зменшується з падінням частоти. АІ також виникають в метровому діапазоні довжин хвиль [136, 137]. АІ багато в чому схожі з іншим видом потужних імпульсів, які виникають на сантиметрових та міліметрових хвилях, — гігантськими імпульсами (ГІ) [138]. Наразі вважається, що АІ займають проміжне місце між звичайними та гігантськими імпульсами. За рахунок високої інтенсивності сигналу АІ, співвідношення С/Ш достатньо, щоб вивчати тонку структуру радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні довжин хвиль.

З падінням частоти розширюється конус випромінювання у більшості відомих пульсарів [31]. Це дає можливість спостерігати в низькочастотному спектрі ті деталі імпульсу, які не були проявлені на більш високих частотах. Крім того, існує ймовірність зафіксувати пульсари, яких не видно на більш високих частотах через те, що конус випромінювання не перетинається з променем зору.

В цілому, декаметровий діапазон є перспективним для вивчення тонкої структури імпульсів та зондування магнітосфери пульсара. Він дозволяє проводити широкосмугові спостереження та досліджувати ефекти поширення. Багато явищ, які спостерігаються на низьких частотах неможливо зареєструвати на більш високих частотах.

2.2 Спостереження пульсарів, що досліджуються, на декаметровому радіотелескопі УТР-2

В дисертаційній роботі були проаналізовані дані спостережень трьох пульсарів: J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755. Ці пульсари є одними з найближчих до Землі, що дозволяє успішно спостерігати їх АІ у декаметровому діапазоні. Пульсари J0814+7429 та J0953+0755 відомі вже тривалий час. Вони є добре

дослідженими, та основні характеристики їхнього випромінювання встановлені з високою точністю. Тому, ці два пульсари є гарними кандидатами для побудови та вдосконалення методів досліджень тонкої структури. Натомість пульсар J0243+6257 був відкритий не так давно та майже не досліджувався у декаметровому діапазоні. Основні параметри трьох пульсарів зібрані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755

Назва пульсара	Період обертання P_0 , с	МД, пк·см ⁻³	Відстань L , кпк
J0243+6257	0.59**	4**	0.22*
J0814+7429	$1.292 \pm 3 \cdot 10^{-13}$ *	$5.751 \pm 4.8 \cdot 10^{-4}$ *	0.43*
J0953+0755	$0.253 \pm 9 \cdot 10^{-13}$ *	$2.969 \pm 0.8 \cdot 10^{-4}$ *	0.26*

*з каталогу пульсарів ATNF [30]

** з роботи [139]

Всі спостереження проводились на декаметровому радіотелескопі УТР-2 [7, 140–142]. Антена система цього радіотелескопу являє собою фазовану антену решітку «Т»-подібної форми та складається з 2040 широкосмугових диполів Надененко з однією лінійною поляризацією [140]. Плечі решітки розташовані літерою «Т». Вони простягаються вздовж напрямків північ-південь (ПП) та схід-захід (СЗ). Довжина антени ПП дорівнює 1854 м, а антени СЗ – 927 м. На частоті 18 МГц ефективна площа телескопу складає $A_{eff} = 150 \cdot 10^3 \cdot \cos z$, де z – це зенітний кут діаграми спрямованості. УТР-2 обладнаний двоканальними цифровими приймачами DSPZ (Digital Signal Processing) [143].

УТР-2 оперує у відносно широкій частотній смузі: $\frac{\Delta f_c}{f} = 1.22$, де частота $f_c = 20.5$ МГц, $\Delta f = f_H - f_L$, $f_H = 33$ МГц та $f_L = 8$ МГц — нижня та верхня частоти смуги УТР-2. Це дозволяє проводити спектральний та кореляційний аналіз

сигналу з високою ефективністю та виявляти спектральні залежності параметрів радіовипромінювання пульсарів та їхньої тонкої структури.

Дослідження тонкої структури індивідуальних імпульсів вимагає реєстрації сигналу у хвильовому режимі (waveform, WF). На УТР-2 прямиий запис оцифрованих даних ведеться за допомогою 16 бітного аналого-цифрового перетворювача. У хвильовій формі електромагнітне випромінювання зчитується в дискретні моменти часу з частотою дискретизації f_d . В такий спосіб зберігається максимальна інформація про сигнал. Апаратна часова роздільна здатність складає $\delta t_a = 1 / f_d$.

Хвильова форма запису є найточнішою з точки зору збереження інформації про сигнал, але не завжди оптимальною у радіоастрономічних спостереженнях, оскільки вимагає значних ресурсів електронно-обчислювальної техніки для зберігання та обробки даних. При частоті дискретизації $f_d = 66$ МГц один потік реєстрації сигналу на DSPZ довжиною 16 с займає 2 Гб пам'яті жорсткого диску. Відповідно, одна година спостережень пульсара займає біля 500 Гб. Обробка таких об'ємів даних вимагає значних ресурсів.

Радіоастрономічні спостереження пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755 були проведені в одноканальному режимі. В такому режимі решітка телескопу фокусується в одну точку на небесній сфері, а кутові розміри головного променя складають $0.5 \times 15^\circ$ (при положенні «в зеніт» на частоті 25 МГц). Частота дискретизації складає $f_d = 66$ МГц, а апаратна часова роздільна здатність $\delta t_a = 15$ нс. Діапазон реєстрації сигналу в одноканальному режимі дорівнює 0 — 33 МГц.

Розрахуємо необхідну чутливість радіотелескопу для реєстрації сигналу пульсара зі співвідношенням $S/\text{Ш} = 1$. Зробимо оцінки для пульсара J0814+7429. Для співвідношення $S/\text{Ш} = 1$ спектральна густина потоку радіовипромінювання $S(f, l, m)$, яка зареєстрована у проміжок часу Δt в частотній смузі Δf та наведена для однієї поляризації, в залежності від частоти f складає:

$$S(f) = kT \frac{1}{A_{eff}(f) \sqrt{\Delta t \Delta f}}, \quad (2.1)$$

де k — це стала Больцмана, T — це яскравісна температура випромінювання галактичного фону на частоті f , $A_{eff}(f)$ — це ефективна площа радіотелескопу на частоті f , яка залежить від координат діаграми спрямованості телескопу (l, m) , $(\Delta t, \Delta f)$ — це часова та частотна розділені здатності. За даними карти розподілення яскравісної температури на частоті 20 МГц, у напрямку на пульсар J0814+7429 вона дорівнює $T = 25$ кК [7]. Якщо взяти часову роздільну здатність $\delta t = 0.5$ мс, частотну смугу інтеграції $\delta f = 3$ МГц та ефективну площу телескопу на частоті 20 МГц в напрямку на пульсар $A_{eff} = 10^5$ м², то отримаємо оцінку спектральної густини потоку $S = 8.912$ Ян (1 Ян = 10^{-26} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). В той же час, характерні спектральні густини потоків АП цього пульсара перевищують 100 Ян [100, 134, 135, 144]. Таким чином чутливість найбільшого декаметрового радіотелескопу УТР-2 є достатньою та дозволяє реєструвати одиничні АП пульсарів.

Саме завдяки дуже великій ефективній площі УТР-2 є можливим не тільки реєструвати АП пульсарів, але й досліджувати їх з рекордно високою часовою роздільною здатністю. З формули (2.1) видно, що часова роздільна здатність Δt залежить від спектральної чутливості S наступним чином:

$$\Delta t = \left(\frac{SNR \cdot kT}{SA_{eff} \sqrt{\Delta f}} \right)^2, \quad (2.2)$$

де SNR — це співвідношення С/Ш. Наприклад, при падінні спектрального потоку S в два рази, для того, щоб зберегти співвідношення С/Ш, необхідно погіршувати часову роздільну здатність в чотири рази. Тож аналіз сигналу з високою часовою роздільною здатністю є можливим проводити тільки спостерігаючи сигнали на дуже великих антенних решітках, якою й є радіотелескоп УТР-2.

Крім того, апаратурна складова УТР-2 безперервно проходить модернізацію. Проводиться робота з вимірювання передатних коефіцієнтів у сигнальних трактах

телескопу та удосконалення моделі фазованої решітки УТР-2 [20]. Калібрувальні матриці, які отримуються в результаті такої роботи необхідні для глобальних задач спостереження, пов'язаних із оцінюванням спектральних потоків радіоджерел.

Дослідження індивідуальних імпульсів у декаметровому діапазоні є складною задачею. Окрім великого впливу ефектів поширення та високого рівню радіозавад, також існує проблема недостатньої кількості АП для отримання стійких статистичних розподілів. Ймовірність реєстрації АП складає 1 — 2 % від загальної кількості імпульсів [100, 134, 135, 144]. Якщо період пульсара J0953+0755 дорівнює 253 мс, то за 1 годину спостережень існує ймовірність виявити 150 АП. Аналогічне число АП для пульсара J0814+7429 буде в шість разів меншим (~ 25). Із зареєстрованих АП для аналізу підходять лише найінтенсивніші, з мінімальним співвідношенням $S/N > 10$. Для того, щоб зареєструвати достатню для аналізу кількість АП необхідно проводити довгі сесії спостережень пульсарів. В даній роботі ми проводили 1 та 2 годинні сесії у проміжки часу близькі до кульмінації пульсара на небесній сфері.

2.3 Обробка даних спостережень декаметрового випромінювання пульсарів

2.3.1 Побудова динамічних спектрів

Перший етап обробки даних спостережень — це калібрування сигналів за допомогою еталонного генератора шуму [20]. Наступний етап полягає у візуальному пошуку АП. У хвильовому вигляді зареєстрованого випромінювання пульсарів неможливо візуально розрізнити АП, оскільки вони є «розмазаними» внаслідок явища нормальної дисперсії у міжзоряному просторі. Такий пошук проводиться на динамічних спектрах (спектрограмах) після компенсації дисперсійної затримки. Первинна компенсація відбувається постдетекторним методом, який буде описаний нижче.

Динамічний спектр — це двовимірна модель сигналу. Він представляє спектральну густину потужності сигналу в залежності від частоти та часу. Будують

динамічний спектр за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT — Fast Fourier Transform, IFFT — Inverse Fast Fourier Transform), яке застосовують до рівних частин довжиною T WF даних — кадрів .

На на верхній панелі рисунку 2.1 показаний приклад динамічного спектру АП з наявною дисперсійною затримкою. Поточний час реєстрації імпульсу збільшується від верхніх частот до нижніх. На часовому профілі, який отриманий при інтегруванні даних у повній частотній смузі, АП не проявляється на тлі шуму (см. рис. 2.1, нижня панель). Тож до усунення дисперсії візуально ми можемо побачити АП тільки на динамічних спектрах.

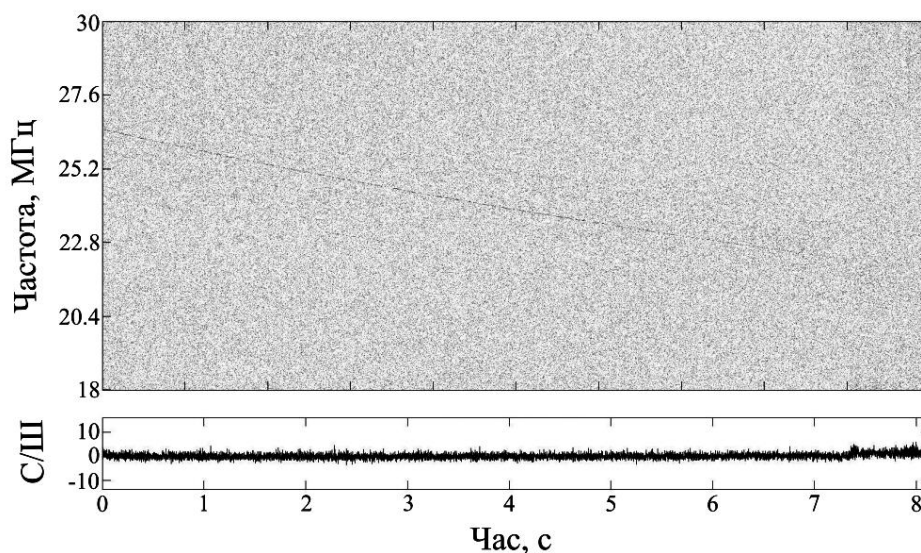


Рис. 2.1. АП пульсара J0953+0755 з наявною частотною дисперсією. Верхня панель: динамічний спектр. Нижня панель: часовий профіль проінтегрованого динамічного спектру у повній частотній смузі.

Динамічний спектр характеризується часовою та частотною роздільною здатністю, які відповідають співвідношенню $\delta t \sim 1 / \delta f$. Вони залежать від довжини одного кадру обробки FFT. Часова роздільна здатність динамічного спектру дорівнює $\delta t = N / f_d$, де N — це кількість точок у кадрі, f_d — частота дискретизації у WF даних. Частотна роздільна здатність динамічного спектра дорівнює $\delta f = f_d / N$

. Крім того, можливо інтегрувати динамічний, тобто складати спектральні канали, або часові відліки між собою. При цьому частотна роздільна здатність падає, але збільшується співвідношення С/Ш.

2.3.2 Метод постдетекторної компенсації дисперсійної затримки часу поширення радіоімпульсів

Як було показано у першому розділі дисертаційної роботи, у плазмовому середовищі виникає явище нормальної частотної дисперсії. Сигнал на нижніх частотах поширюється повільніше відносно сигналу на верхніх частотах. Для візуального пошуку АП на динамічних спектрах чи часових профілях пульсарного сигналу необхідно усувати дисперсійну затримку. При цьому часова роздільна здатність не має бути високою, тож зручно проводити постдетекторну обробку сигналу (рис. 2.2). Значення прицільної МД в цьому випадку теж не потребує високої точності.

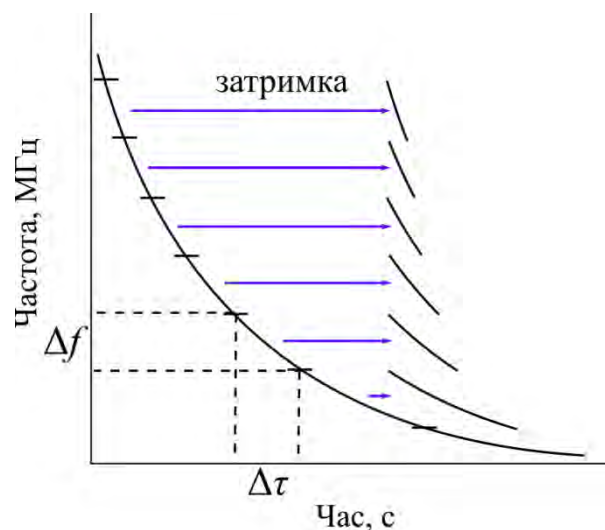


Рис. 2.2. Ілюстрація постдетекторного методу компенсації дисперсійної затримки. Повний частотний діапазон розподіляють на окремі смуги Δf , в кожній з яких необхідно розрахувати та скомпенсувати свою затримку $\Delta \tau$.

Постдетекторна компенсація дисперсії застосовується до динамічного спектру радіовипромінювання [101]. На рисунку 2.3 показаний приклад динамічно спектру до (рис. 2.3, ліва панель) та після (рис. 2.3, права панель) усунення дисперсійної

затримки постдетекторним методом. Частотна смуга спостереження розділяється на канали Δf . До сигналу у кожному із каналів на частоті f , яка є центральною частотою даного каналу Δf , додається зворотня до дисперсійної часова затримка $\Delta\tau_{DM}(f)$. Вона розрахована таким чином, щоби верхні частоти каналів розташовувались одна під одною. Для цього використовують формулу:

$$\Delta\tau_{DM}(f) = C DM \left(\frac{1}{f^2} - \frac{1}{f_H^2} \right), \quad (2.3)$$

де DM — МД, $C = \frac{2\pi e^2}{m_e c}$ — коефіцієнт, e — заряд електрона, m_e — маса спокою електрона, c — швидкість світла у вакуумі. Затримку розраховують відносно верхньої частоти динамічного спектру f_H , тобто перший частотний канал (рахуючи згори) має нульову затримку. В індексному вигляді, в залежності від f_i , формула (2.3) має вигляд:

$$\Delta\tau_{DM}(f_i) = C DM \left(\frac{1}{f_i^2} - \frac{1}{f_H^2} \right). \quad (2.4)$$

Частотна роздільна здатність цього методу визначається шириною Δf кожного каналу динамічного спектру. Точність методу, а саме часова роздільна здатність, що зумовлена часом затримки в сигналі, який виникає на межах нижнього каналу, тобто на максимальній довжині хвилі. Наприклад, у пульсара J0814+7429 МД дорівнює $5.75 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. Якщо застосовувати постдетекторну обробку до динамічного спектру цього пульсара в частотній смузі 18 — 30 МГц з шириною одного каналу 8 кГц (частотна роздільна здатність), то затримка між крайніми частотами в нижньому каналі складатиме $\Delta\tau_{DM} = 6.5 \text{ мс}$. Це і буде оцінкою точності постдетекторного методу обробки для даного конкретного пульсара з відомими параметрами.

В даному методі виникає проблема «поганих» відліків на межах динамічного спектру після введення часової затримки. Кожний частотний канал зсувається на певну відстань, наприклад, ліворуч. Динамічний спектр перестає бути прямокутним

(див. рис. 2.3, ліва панель). Всі проміжки, в яких сигналу немає (на рисунку 2.4 — це області із білим кольором), зручно заповнювати нулями — тоді динамічний спектр знову приймає прямокутну форму. Але на його межах вже буде знаходитись неповна інформація про сигнал.

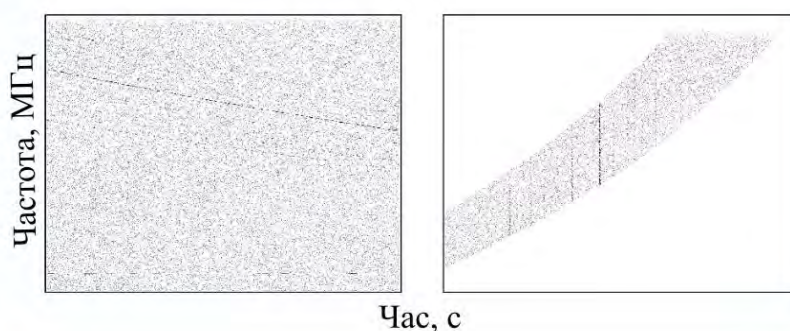


Рис. 2.3. Усунення дисперсійної затримки постдетекторним методом. Динамічний спектр з АП пульсара J0953+0755 до (ліворуч) та після (праворуч) зсуву частотних каналів Δf на величину $\Delta\tau_{DM}(f)$.

Часова затримка сигналу квадратично зростає з падінням частоти та досягає найбільших значень у декаметровому діапазоні. Наприклад максимальна затримка поширення сигналу між частотами 18 та 30 МГц у пульсара J0814+7429 ($M_D = 5.75 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$) складає приблизно 40 с. Це означає, що після зсуву динамічного спектру на необхідний інтервал часу, «погані» відліки на його межах займатимуть проміжок 80 с (вони виникають з обох боків спектрограми). Для того, щоб після компенсації дисперсії отримати неспотворений сигнал у повній частотній смузі на проміжку часу T , необхідно захопити кадр, який має ширину $T + 80$ с.

В даній дисертаційній роботі проводили кількагодинні сесії спостережень пульсарів. Такий великий об'єм даних неможливо обробити за один раз, тому він має бути розділений на частини — кадри, які окремо проходять постдетекторну компенсацію дисперсії. Оброблені таким чином кадри динамічних спектрів необхідно скласти між собою, враховуючи «погані» відліки на межах кожного. Перший варіант — це запам'ятовувати тільки центральну частину динамічного

спектру, в якій сигнал існує у повній частотній смузі без «поганих» відліків. Кадр обробки кожного разу має циклічно зсуватись в один бік на кількість поганих відліків. Для цього використовують ковзне вікно. Такий підхід схематично представлений на рисунку 2.4. В разі застосування алгоритму із ковзним вікном значна частина спектрограм, куди потрапляють погані відліки, буде «марно» оброблятися кілька разів. Такий шлях є не дуже ефективним.

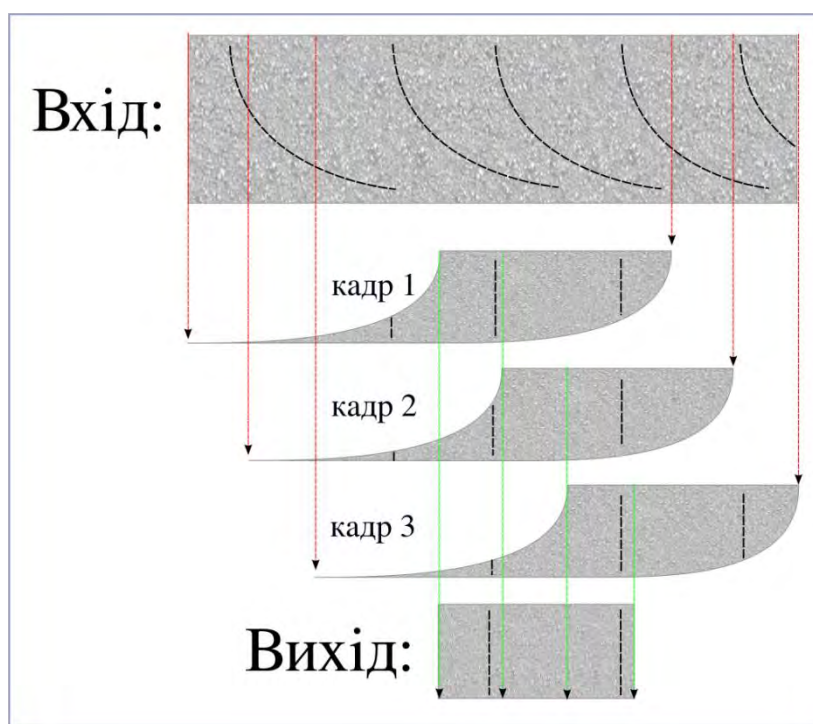


Рис. 2.4. Постдетекторний метод усунення дисперсійної затримки із ковзним вікном. Кадр обробки циклічно зсувається. В пам'ять комп'ютера записується тільки корисна частина динамічного спектру, в якій сигнал присутній у повній смузі частот. Значний об'єм даних при цьому обробляється повторно.

В даній дисертаційній роботі розроблено алгоритм, який дозволяє прискорити постдетекторну обробку сигналу шляхом складання «поганих» відліків послідовних кадрів між собою. Схематично він представлений на рисунку 2.5. «Погані» відліки, які мають нульову спектральну потужність, складають поординатно з додатною спектральною потужністю наступного кадру. В такому випадку кожний кадр даних обробляється тільки один раз, а час обробки зменшується майже в два рази.

Оптимально кадр динамічного спектру має містити $2N_b$ часових відліків, де N_b — це кількість поганих відліків, яку розраховують з максимальної затримки в нижньому каналі τ_{max} за формулою $N_b = \Delta\tau_{max} / \delta t$. Треба вказати, що погані відліки на початку першого та в кінці останнього кадрів все ж таки будуть містити неповну інформацію про імпульсний сигнал.

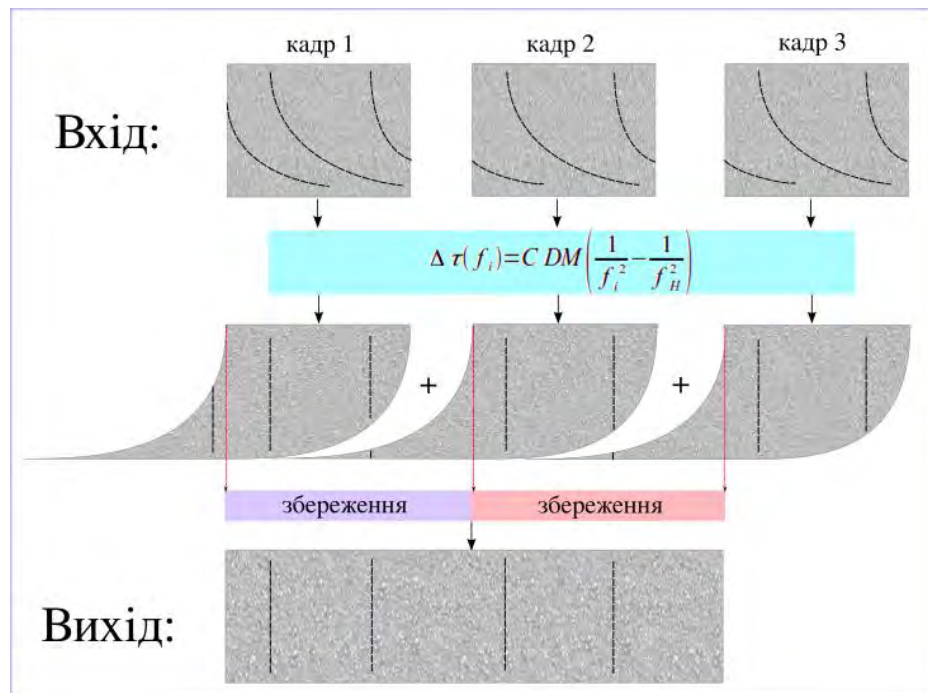


Рис. 2.5. Покращений метод постдетекторної компенсації дисперсійної затримки. Кадри динамічного спектру (Вхід) обробляються постдетекторним методом за формулою (2.3). Після цього вони складаються між собою з урахуванням «поганих» відліків. В результаті додавання отримується повний динамічний спектр із скомпенсованою дисперсією (Вихід).

Ефективність розробленого методу майже в два рази вища за попередній метод із ковзним вікном. Це означає, що час обробки зменшується майже на половину. При цьому майже не потребується додаткових ресурсів операційної пам'яті, бо кожний кадр проходить обробку тільки один раз.

2.3.3 Метод когерентної компенсації дисперсійної затримки часу поширення радіоімпульсів

Сутність когерентного методу полягає в компенсації фази $\varphi(\omega)$, якої набуває сигнал в середовищі поширення. Це необхідно робити у відносно вузькій смузі частот у спектральній області після Фур'є перетворення сигналів, які були зареєстровані у хвильовій формі [101]. Після компенсації фази та зворотнього Фур'є перетворення, сигнал у часовій області має максимально можливу роздільну здатність. Однак, метод когерентної компенсації потребує значних ресурсів обчислювальної техніки та часу обробки.

Пошук тонкої структури індивідуальних імпульсів у декаметровому діапазоні хвиль неможливий без застосування когерентного методу усунення дисперсійної затримки. Це ілюструють результати, які отримані у праці [100]. Порівняння двох методів, які були послідовно застосовані при обробці одного й того ж індивідуального імпульсу, показано на рисунку 2.6. Це АП найближчого до Землі пульсара J0953+0755, чия МД дорівнює $2.972 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. Ліворуч імпульс, який було оброблено постдетекторним методом. В цьому імпульсі більшість деталей тонкої структури є згладженими. Праворуч показаний той же самий імпульс після когерентного усунення дисперсійної затримки. В цьому випадку ми бачимо два виразні локальні максимуми імпульсу та більш тонкі мікроімпульси. Крім того, на правому динамічному спектрі можливо спостерігати ефект Фарадея, який пов'язаний з наявністю еліптичної поляризації у випромінюванні цього імпульсу.

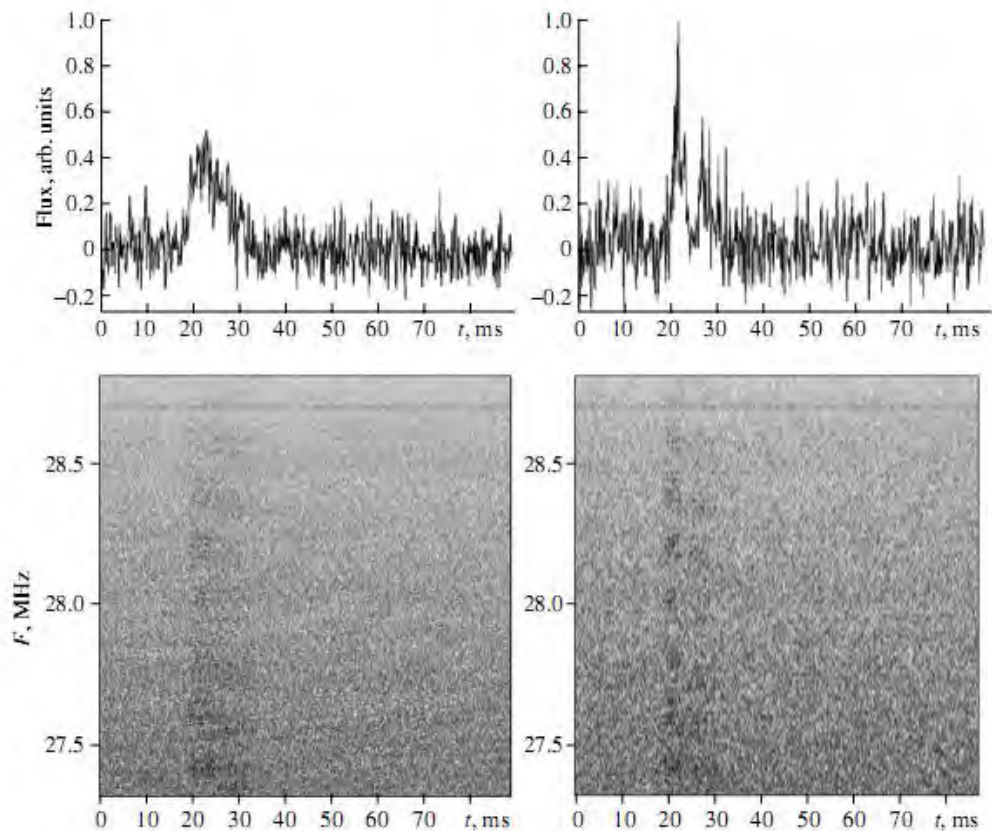


Рис. 2.6. Порівняння постдетекторного та когерентного методів компенсації дисперсії. Профілі АП пульсара J0953+0755 (верхні панелі) та його динамічні спектри (нижні панелі), які отримані постдетекторним (ліворуч) та когерентним (праворуч) методами компенсації дисперсії [100].

Аналогічні порівняння двох методів були проведені й в даній дисертаційній роботі на прикладі АП пульсарів J0814+7429 та J0953+0755 (див. рис. 2.7).

Вплив МЗС на радіосигнал, який поширюється вздовж променя зору по осі z можливо описати лінійним фільтром з передатною функцією: $\dot{H}(\omega, z) = e^{-ik(\omega)z}$ (якщо знехтувати затушенням). Для того, щоб відновити оригінальний сигнал, необхідно застосувати до нього зворотній фільтр із передатною функцією $\dot{H}'(\omega, z) = e^{+ik(\omega)z}$. В показнику експоненти стоїть модуль хвильового вектора в середовищі поширення $k(\omega)$ та відстань z вздовж променя зору, на яку поширився сигнал. Хвильовий вектор в середовищі можливо розписати через хвильовий вектор у вакуумі $k_0(\omega)$ та

коефіцієнт заломлення $n(\omega)$: $\mathbf{k}(\omega) = n(\omega)\mathbf{k}_0(\omega)$. Хвильовий вектор у вакуумі можна представити як $\mathbf{k}_0(\omega) = \frac{2\pi}{\lambda}\mathbf{j} = \frac{\omega}{c}\mathbf{j}$, де \mathbf{j} — одиничний вектор, який є дотичним до променя зору.

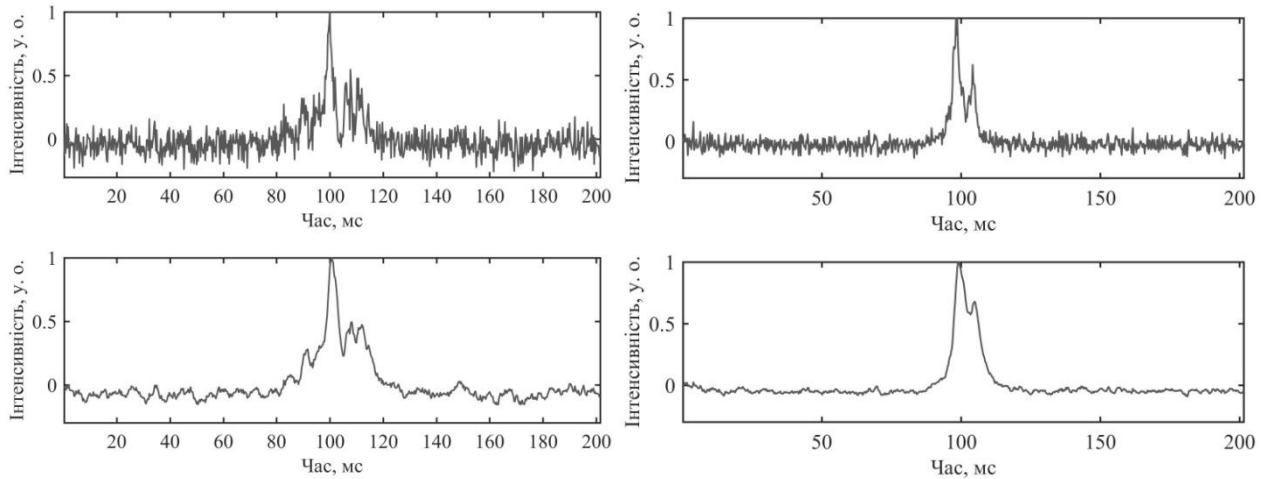


Рис. 2.7. Порівняння постдетекторного та когерентного методів компенсації дисперсії. АП пульсарів V0814+7429 (ліворуч) та J0953+0755 (праворуч), які отримані постдетекторним (нижні панелі) та когерентним (верхні панелі) методами компенсації дисперсії на частоті 25.5 МГц. Апаратні часова та частотна роздільні здатності в обох випадках складають 0.25 мс та 3 МГц. Фактично ж фізична роздільна здатність у верхніх та нижніх профілів відрізняється у 2 — 3 рази.

Як було показано в першому розділі дисертаційної роботи, коефіцієнт заломлення в холодній ізотропній плазмі, до якої в першому наближенні належить плазма у МЗС, можливо спростити до виразу: $n(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2}$. Тоді фаза гармонійного сигналу, яка змінюється при поширенні сигналу вздовж променя зору та входить у комплексну передатну функцію $\dot{H}(\omega) = \exp(-i\varphi(\omega))$, має вигляд:

$$\varphi(\omega) \approx \left(1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2}\right) \cdot \frac{\omega}{c} z. \quad (2.5)$$

Аргумент передатної функції поширення хвиль у МЗС (2.5) може бути представлений в розширеному вигляді, якщо його розкласти у ряд Тейлора навколо центральної частоти ω_0 :

$$\varphi(\omega) = \frac{z}{c} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \right) \omega_0 + \left(1 + \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \right) (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^3} (\omega - \omega_0)^2 + \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^4} (\omega - \omega_0)^3 + \dots \right]. \quad (2.6)$$

Ми аналізуємо сигнал в дуже вузькій частотній смузі B (такій, щоб зберігалось співвідношення $(\Delta\omega \approx 2\pi B / 2 \ll \omega_0)$). Тоді можливо розглянути передатну функцію, яка є зсунутою відносно нульової центральної частоти $\dot{H}(\omega_0, \Delta\omega)$:

$$\dot{H}(\omega_0, \Delta\omega) = \exp \left[-i \left[\frac{z\omega_0}{c} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \right) + \frac{z}{c} \left(1 + \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \right) \Delta\omega - \frac{z}{2c} \frac{\omega_p^2}{\omega_0^3} \Delta\omega^2 + \frac{z}{2c} \frac{\omega_p^2}{\omega_0^4} \Delta\omega^3 + \dots \right] \right]. \quad (2.7)$$

Нульовий член цього ряду $b_0 = \frac{z\omega_0}{c} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \right)$ залежить тільки від центральної частоти та визначає постійний фазовий зсув, тож його можна відкинути. Перший член $b_1 = \frac{z}{c} \left(1 + \frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \right) \Delta\omega$ являє собою вже відомий прояв явища нормальної дисперсії, який можна виразити через міру дисперсії DM :

$$b_1 = \omega \left(t_0 + \frac{CDM}{\omega_0^2} \right), \quad (2.8)$$

де $C = \frac{2\pi e^2}{m_e c}$. Він включає час $t_0 = z/c$, який необхідно витратити сигналу на поширення від пульсара до спостерігача на відстань z , якби він поширювався у вакуумі. Дисперсія збільшує цей час на доданок $C DM / \omega_0^2$. Наступні члени b_2, b_3, \dots можуть бути використані для збільшення точності розрахунків.

Розглянемо точність когерентного метода усунення дисперсійної затримки. Вона залежить від кількості членів ряду Тейлора, які враховуються при компенсації фазової затримки. Ми провели моделювання, в якому в імпульсну характеристику було штучно введено дисперсійну фазову затримку $\varphi_{DM}(\omega, DM) = \omega \Delta\tau_{DM}(\omega, DM)$ із відомою мірою дисперсії DM та часом затримки $\Delta\tau_{DM}$. Наступним кроком ця дисперсійна затримка була скомпенсована когерентним методом. Для прикладу, ми взяли перші три члени ряду Тейлора з ненульовими індексами. Фазовий набіг, який був використаний для компенсації дисперсійної затримки, мав вигляд: $\varphi_T(\omega, DM) = C DM (b_1 + b_2 + b_3)$, C — коефіцієнт з виразу (2.7), b_1, b_2, b_3 — члени ряду Тейлора з відповідним індексом з формули (2.6).

Дисперсійна затримка є скомпенсованою належним чином, якщо комплексна передатна функція приблизно дорівнює одиниці $\Delta\dot{H} = \exp(-i(\varphi_T + \varphi_{DM})) \approx 1$, а фазовий кут приблизно дорівнює нулю $\alpha = |\varphi_T + \varphi_{DM}| \approx 0$.

Похибка когерентного методу $P(\omega, \omega_0)$ характеризується відношенням модуля першого відкинутого члена ряду Тейлора до модуля суми попередніх врахованих членів:

$$P(\omega, \omega_0) = \left| \frac{b_4}{b_1 + b_2 + b_3} \right| = \left| \frac{\Delta\omega^3}{\omega_0^3 - \omega^2\Delta\omega + \omega\Delta\omega^2} \right|, \quad (2.9)$$

де $\Delta\omega = \omega - \omega_0$.

Моделювання когерентного методу усунення дисперсії ілюструє графік 2.8, який дещо нагадує посмішку Чеширського кота з відомого твору Льюїса Керролла. На графіку показано дві функції. Одна з них — це фазовий кут $\alpha = |\varphi_T + \varphi_{DM}|$. Інша функція — це перший неврахований член ряду Тейлора. Фазовий кут повторює криволінійну форму першого неврахованого члена ряду. Обидві розраховані на центральній частоті $f_0 = 22$ МГц. Отримана похибка, яка пов'язана із методом розрахунку, є досить малою, щоб впливати на оцінку МД. Тож обмеження у

визначенні цього параметру накладають фізичні явища, які впливають на сигнал у середовищі поширення, а не алгоритм розрахунків. В першу чергу, це розсіяння на просторових неоднорідностях електронної концентрації на промені зору. Точність оцінки МД, яка пов'язана з параметрами середовища поширення, буде розрахована нижче у підрозділі «Оцінка характерного часу розсіяння радіовипромінювання пульсарів та похибки у вимірюванні точного значення МД».

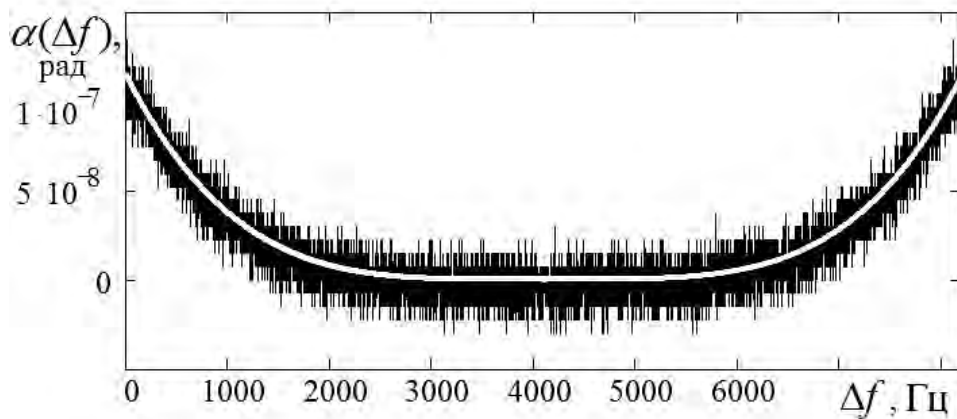


Рис. 2.8. Похибки алгоритму когерентної компенсації дисперсійної затримки. На похибку впливає перший неврахований член ряду Тейлора b_4 (біла лінія). Фазовий кут $\alpha = |\varphi_T + \varphi_{DM}|$ (чорна лінія), який є різницею між аналітичним виразом фазової дисперсійної затримки та тією, що розрахована за допомогою ряду Тейлора, за формою збігається з неврахованим членом b_4 .

Інтервал дисперсійної затримки зростає пропорційно квадрату довжини хвилі. Тому у декаметровому діапазоні він досягає максимального значення. Зважаючи на залежність похибки методу, тут необхідно не тільки враховувати кілька членів розкладання в ряд Тейлора, але й розраховувати її у відносно вузькій частотній смузі.

У декаметровому діапазоні проблема обчислювальних ресурсів при обробці когерентним методом набуває ще більших масштабів порівняно із постдетекторним методом. Когерентний метод потребує фазових операцій, які проходять у спектральній області. Як було показано вище, для когерентної компенсації

дисперсійної затримки у пульсара J0814+742 в смузі 18 — 30 МГц необхідно захопити кадр обробки довжиною щонайменше у 80 секунд. Для розрахунку фази до цього кадру обробки застосовується швидке перетворення Фур'є, що вимагає значних ресурсів оперативної пам'яті комп'ютера.

Розрахуємо конкретні значення об'єму пам'яті, необхідні для обробки. В нашому випадку часова роздільна здатність сигналу у хвильовому вигляді складає $\delta t = 1.5 \cdot 10^{-8}$ с. Кадр довжиною 80 с з такою роздільною здатністю вміщує $N = 80 / (1.5 \cdot 10^{-8}) \approx 53 \cdot 10^8$, або п'ять мільярдів точок. Операції FFT та IFFT необхідно застосовувати до чисел у форматі з рухомою крапкою (floating point). Одне число в такому форматі займає 32 біта (4 байта) пам'яті. Таким чином, кадр довжиною 80 с у форматі floating point буде важити 20 Гб та потребувати відповідної оперативної пам'яті для швидкого перетворення Фур'є.

В даній дисертаційній роботі була вирішена проблема обчислювальних ресурсів в когерентному методі компенсації дисперсійної затримки шляхом послідовної циклічної обробки. МД, яка має бути скомпенсована, розбивається на кілька рівних частин відповідно до наявної оперативної пам'яті комп'ютеру (наприклад, у пульсара J0814+7429 МД = $5.75 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$, вона була розбита на 10 частин (по $0.575 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ кожна), а один кадр обробки потребував 2 Гб оперативної пам'яті). До необхідної МД наближаються ітеративно, обробляючи повний запис спостережень необхідну кількість разів. Даний спосіб обробки є універсальним. Він дозволяє працювати із даними спостережень будь-якого за часом розміру та пульсарами із будь-якою МД. Але зі збільшенням МД, час обробки також лінійно зростає.

В когерентному методі компенсації дисперсійної затримки існує проблема поганих відліків (так само як і у постдетекторному методі). Один кадр даних в хвильовій формі (див. рис. 2.9, ліва панель) після когерентної обробки має вигляд, як показано на рисунку 2.9 (права панель). Інтенсивність сигналу спадає на межах кадру, через що інформація в цих областях губиться. Існує два шляхи вирішення

проблеми «поганих» відліків. Перший полягає у записі тільки центральної частини кадру без «поганих» відліків. Для цього необхідно застосовувати ковзне вікно та циклічно зсувати кадр обробки на кількість «поганих» відліків. Другий спосіб полягає у складанні «поганих» відліків двох послідовних кадрів між собою (аналогічно як ми це робили у випадку постдетекторного методу).

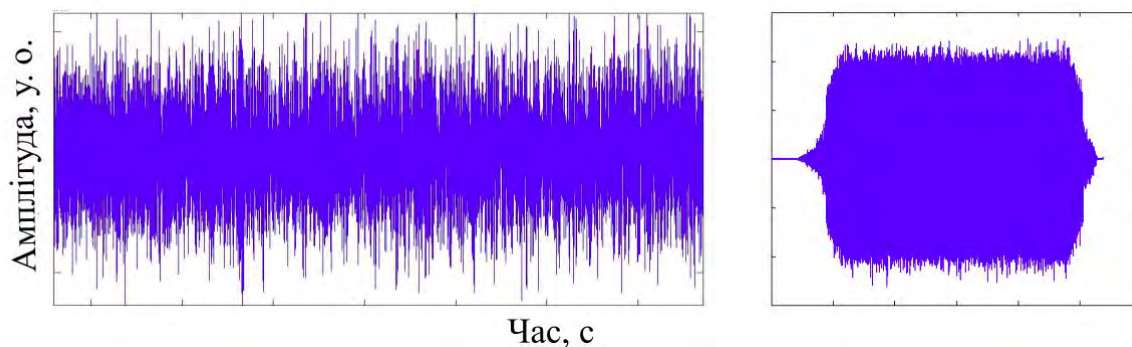


Рис. 2.9. «Погані» відліки у когерентному методі компенсації дисперсійної затримки. Дані спостережень пульсара у хвильовому вигляді до (ліва панель) та після (права панель) когерентної компенсації дисперсійної затримки. На межах кадру після компенсації дисперсії інформація про сигнал загублена.

В даній дисертаційній роботі ми використовували обидва методи компенсації дисперсійної затримки: постдетекторний для візуального пошуку АП та когерентний для більш детального аналізу окремих АП. Була вирішена проблема «поганих» відліків, яка виникає в обох методах обробки сигналу. Обидва методи були вдосконалені для підвищення продуктивності та зменшення часу обробки сигналу. В результаті було досягнуте майже двократне зменшення часу обробки порівняно з алгоритмами, що існують. Також була розрахована точність обох методів, які використовувались для усунення дисперсійної затримки у декаметровому діапазоні.

2.4 Аналіз даних спостережень

2.4.1 Спектральний та кореляційний аналіз

Як було згадано в цьому розділі, радіотелескоп УТР-2 оперує у відносно широкій частотній смузі. Для аналізу тонкої структури індивідуальних імпульсів ми використовували цифровий смуговий фільтр зі смугою 18 — 30 МГц, частоти зрізу якого вказані на рівні сигналу -3 дБ. Ця частотна смуга обрана з урахуванням властивостей декаметрового діапазону та параметрів УТР-2. Ефективна площа радіотелескопу швидко падає на частотах вищих за 30 МГц. На низьких частотах зростає рівень завад земного походження та рівень шумового фону Галактики [130]. Потужність іоносферних мерехтінь також збільшується на низьких частотах [120]. З іншого боку, інтенсивність радіовипромінювання пульсарів падає зі зниженням частоти спостережень внаслідок наявності низькочастотного завалу у їхніх спектрах [132, 136, 145]. Всі ці фактори призводять до того, що за межами обраного діапазону 18 — 30 МГц співвідношення С/Ш у сигналів від пульсарів, які спостерігаються на радіотелескопі УТР-2, значно падає.

Для подальшого аналізу повна смуга спостережень 18 — 30 МГц була розділена на чотири більш вузькі смуги шириною 3 МГц. Центральні частоти f_c цих смуг дорівнювали 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Ширина смуги аналізу 3 МГц є певним компромісом. З одного боку, стала часу розсіяння сильно залежить від частоти, тож у відносно широкому діапазоні варто оцінювати цей параметр на кількох частотах. З іншого боку, співвідношення С/Ш сигналу зменшується при інтегруванні у вузькому частотному діапазоні. Це може призвести до втрати сигналу у надто вузьких спектральних смугах.

Кореляційний аналіз є зручним інструментом пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсарів та вивчення її параметрів. Він включає побудову автокореляційної функції (АКФ) від інтенсивності індивідуального імпульсу та взаємокореляційної функції (ВКФ) від інтенсивностей різних індивідуальних імпульсів пульсара. АКФ виявляє максимуми періодичних процесів всередині

імпульсу, ВКФ дозволяє відстежити кореляцію характерних масштабів тонкої структури у різних імпульсів та усунути вплив шумів та завад, які не корелюють з корисним сигналом, або не корелюють в різних проміжках часу.

Статистичний взаємозв'язок двох чи більше випадкових величин називають кореляцією. Математично кореляцію двох випадкових величин X та Y описують коефіцієнтом кореляції $R(X, Y)$, який розраховується за формулою

$$R(X, Y) = \frac{M[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y},$$

де M — це взаємне математичне очікування, μ_X, μ_Y — це математичні очікування X та Y , $\sigma_X \sigma_Y$ — це середньоквадратичні відхилення X та Y . Вираз $cov(X, Y) = M[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]$ називають коваріацією випадкових величин X та Y . Таким чином, кореляція є нормованою коваріацією відносно взаємної дисперсії випадкових величин $R(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$. Коефіцієнт кореляції

може бути додатним, від'ємним чи нульовим, та лежить у проміжку $[-1, 1]$.

Аналітичний вигляд сигналу пульсара має наступний вигляд. Комплексна залежність інтенсивності випромінювання пульсара $I(t)$ від часу t у вузькій частотній смузі, яку реєструють на Землі, можливо описати як процес варіації білого шуму на центральній частоті f_0 [67, 72]:

$$I(t) = \Re[x(t) \exp(2\pi i f_0 t)], \quad (2.10)$$

де \Re — це реальна частина комплексної функції. $x(t)$ — це амплітуда комплексного сигналу. Її Фур'є перетворення має вигляд $x(t) = \int X(f) \exp(2\pi i f t) df$, а $X(f)$ — це її Фур'є образ.

У теорії цифрової обробки сигналів функція автоковаріації інтенсивності $I(t)$ за період T має наступний вигляд:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int I(t) I^*(t + \tau) dt, \quad (2.11)$$

де I^* — це комплексне спряження, а τ — це величина зсуву.

З точки зору ефективності обробки великих масивів даних набагато швидше виконувати операцію швидкого Фур'є перетворення та подальшого перемноження зображень сигналу у спектральному просторі. За теоремою про згортку, АКФ розраховується наступним чином:

$$R(\tau) = \frac{1}{N} IFFT \left\{ FFT [I(t)] \cdot FFT [I^*(t)] \right\}, \quad (2.12)$$

де $FFT [*]$ та $IFFT [*]$ — це пряме та зворотнє швидке Фур'є перетворення, N — коефіцієнт нормування.

Типова середня АКФ інтенсивності імпульсів, які містять в собі тонку структуру з різних характерними масштабами, показана на рисунку 2.10. Злами на АКФ вказують на характерні масштаби кореляції в імпульсах. Найкоротший масштаб модуляції інтенсивності, який знаходиться біля нульового зсуву, відповідає зворотній частотній смузі $1/B$. Він визначає кореляційний відгук шумової складової сигналу. Наступний масштаб відповідає найкоротшому інтервалу кореляції, який є в сигналі. Це може бути нано-, мікро- або міліімпульсна структура (в залежності від частоти спостережень). Цей масштаб є обмеженим сталою часу розсіяння на даній частоті. Наступна більш широка компонента АКФ відповідає субімпульсній структурі. Широке низько інтенсивне плато відноситься до середнього профілю імпульсу. Одночасно АКФ чи ВКФ можуть виказувати декілька не скорельованих між собою масштабів тонкої структури, чи квазіперіодичну тонку структуру.

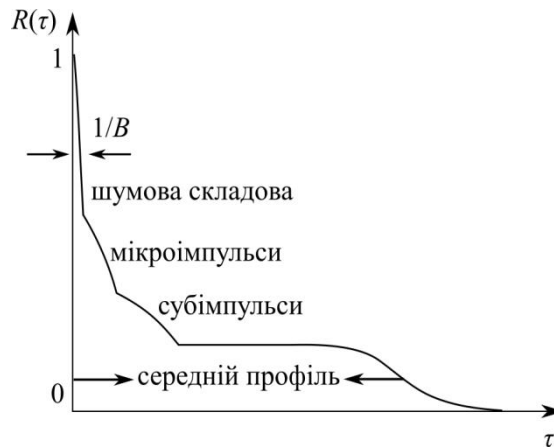


Рис. 2.10. Схематичне зображення середньої АКФ інтенсивності пульсара. Злами АКФ вказують на різні масштаби тонкої структури, які містять у собі індивідуальні імпульси пульсара. На АКФ також проявляється шумова складова та середній профіль імпульсів.

В залежності від встановленої задачі, вивчають середні АКФ імпульсів та АКФ індивідуальних імпульсів. Якщо мікроімпульси з характерним масштабом присутні у більшості імпульсів, то цей масштаб проявиться на середній АКФ в незалежності від того, на якій довжині імпульсу виникають мікроімпульси. При накопиченні АКФ збільшується співвідношення С/Ш. З іншого боку, у декаметровому діапазоні форми індивідуальних імпульсів є надто мінливими, тож в даній дисертаційній роботі більше уваги приділялось саме індивідуальним АКФ АІП пульсарів. Це більш детально висвітлено у третьому розділі дисертаційної роботи.

2.4.2 Деконволюція сигналу з урахуванням моделі тонкого фазового екрану

Одним із шляхів підвищення контрасту тонких деталей, які містяться в радіовипромінюванні пульсара, є деконволюція (зворотня до згортки операція) імпульсу з модельною імпульсною характеристикою середовища поширення. На приймальній стороні огинаюча імпульсу $s_{obs}(\tau)$ є результатом згортки огинаючої

імпульсу, який був випромінений магнітосферою пульсара $s_{rad}(t)$ та імпульсної характеристики середовища поширення $h(t)$:

$$s_{obs}(\tau) = s_{rad}(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{rad}(t) \cdot h(\tau - t) dt. \quad (2.13)$$

Будемо спиратись на теорію ТФЕ (яка була викладена у першому розділі дисертаційної роботи). Ця теорія описує просту та адекватну модель впливу розсіяння на просторових неоднорідностях електронної концентрації на радіовипромінювання близьких до Землі пульсарів. Відповідно до неї імпульсна характеристика $h(t)$ визначається рівнянням: $h(t) = \exp(-t / \tau_{sc}(f))$, де $\tau_{sc}(f)$ — стала часу розсіяння на частоті f .

Необхідно відновити початковий сигнал $s_{rad}(t)$, виключивши із нього вплив розсіяння. В сенсі прискорення обробки сигналу, деконволюцію краще проводити через Фур'є перетворення. Якщо використати теорему про згортку, то можливо записати рівняння (2.13) в частотній області наступним чином: $\dot{S}_{obs}(f) = \dot{S}_{rad}(f) \cdot \dot{H}(f)$, де $\dot{S}_{obs}(f)$, $\dot{S}_{rad}(f)$, $\dot{H}(f)$ — це спектральні образи відповідних змінних $s_{obs}(t)$, $s_{rad}(t)$, $h(t)$. З цього рівняння ми можемо відновити сигнал, який був випромінений магнітосферою пульсара, як $\dot{S}_{rad}(f) = \dot{H}(f) / \dot{S}_{obs}(f)$. Цим ми компенсуємо вплив середовища поширення (в рамках прийнятої моделі ТФЕ). Оскільки тонка структура в процесі розповсюдження зазнає сильного впливу розсіяння, то процедура деконволюції, що наведена вище, дозволить виявити «оригінальну» тонку структуру імпульсу, яка пов'язана з процесами генерації випромінювання в магнітосфері пульсара.

Результат деконволюції індивідуального імпульсу показаний на рисунку 2.11. Це АІ пульсара J0814+7429 в чотирьох частотних смугах на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Стала часу розсіяння в імпульсній характеристиці була взята з роботи [100] та дорівнювала $\tau_{sc} = 2.5$ мс. Співвідношення С/Ш імпульсів після деконволюції падає, але збільшується контрастність тонких компонент.

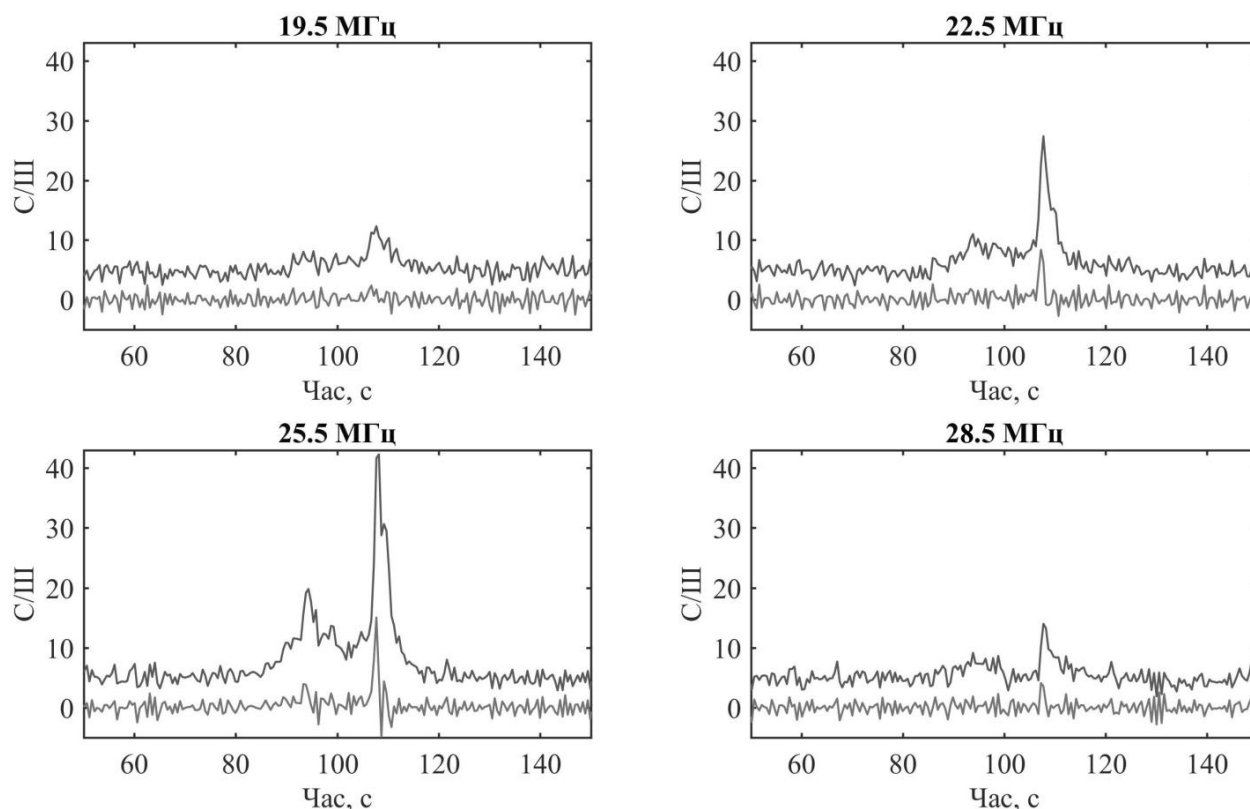


Рис. 2.11. Деконволюція АП пульсару J0814+7429 в чотирьох частотних діапазонах. Верхні профілі — це оригінальні імпульси, зареєстровані на УТР-2. Нижні профілі — результат деконволюції з імпульсною характеристикою середовища поширення в рамках моделі ТФЕ. Частоти спостереження 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Всі профілі наведені в одиницях співвідношення С/Ш. Часова та частотна роздільні здатності складають 0.5 мс та 3 МГц відповідно.

2.5 Оцінка характерного часу розсіяння радіовипромінювання пульсарів та похибки у вимірюванні точного значення МД

Оцінка сталої часу розсіяння на неоднорідностях середовища поширення є важливим етапом у дослідженнях тонкої структури радіовипромінювання пульсарів, оскільки вона обмежує найкоротший масштаб тонкої структури на даній частоті. Тонка структура, зі свого боку, може бути використана для більш точної оцінки МД та характерного часу розсіяння. Особливо це актуально для пульсарів, чий профілі імпульсів мають складну форму (як, наприклад, у пульсара J0953+0755). В цьому

випадку час розсіяння треба визначати за короткими компонентами головного імпульсу. Так само МД необхідно оцінювати за максимальним відгуком інтенсивності окремих компонент імпульсу при варіюванні МД.

Як було показано в першому розділі дисертаційної роботи, стала часу розсіяння має наступну залежність від частоти: $\tau_{sc}(f) = \tau_{sc}(f_0) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha}$, де $\tau_{sc}(f_0)$ – стала часу розсіяння, виміряна на опорній частоті f_0 , α - показник ступеня, що характеризує просторовий спектр розподілення неоднорідностей електронної щільності (він лежить у проміжках $3.6 \leq \alpha \leq 4.5$ в залежності від закону просторового розподілення неоднорідностей). Для пульсарів J0814+7429 та J0954+0755 логарифмічні залежності $\tau_{sc}(f)$ зображені на рисунку 2.12. На ці графіки нанесені точки, які відповідають конкретним значенням характерного часу розсіяння, які були отримані на низьких частотах [100]. Модельна залежність була розрахована відповідно до τ_{sc} на частоті 1 ГГц [30]. Як видно із графіків, для пульсара J0954+0755 модельна функція розсіяння дає занизькі значення $\tau_{sc}(f)$ порівняно із тими, що отримані зі спостережень.

Час розсіяння визначають за шириною розсіяного профілю імпульсу на рівні інтенсивності 0.5. Це найпростіший метод, але він погано підходить для пульсарів зі складними формами профілів. В даній роботі ми оцінювали $\tau_{sc}(f)$ за шириною АКФ від профілів імпульсів на рівні коефіцієнту кореляції 0.25 (саме на цьому рівні, бо АКФ відповідає нормованим одиницям спектральної густини потужності). Окремі компоненти імпульсу розсіюються однаковою чином та кожна робить внесок у АКФ профілю імпульсу. Крім того, АКФ за визначенням є нормованими на квадрат інтенсивності при нульовому зсуві. Це все робить АКФ найкращими засобами для оцінювання часу розсіяння у декаметровому діапазоні, де форма індивідуальних імпульсів зазнає значних морфологічних змін.

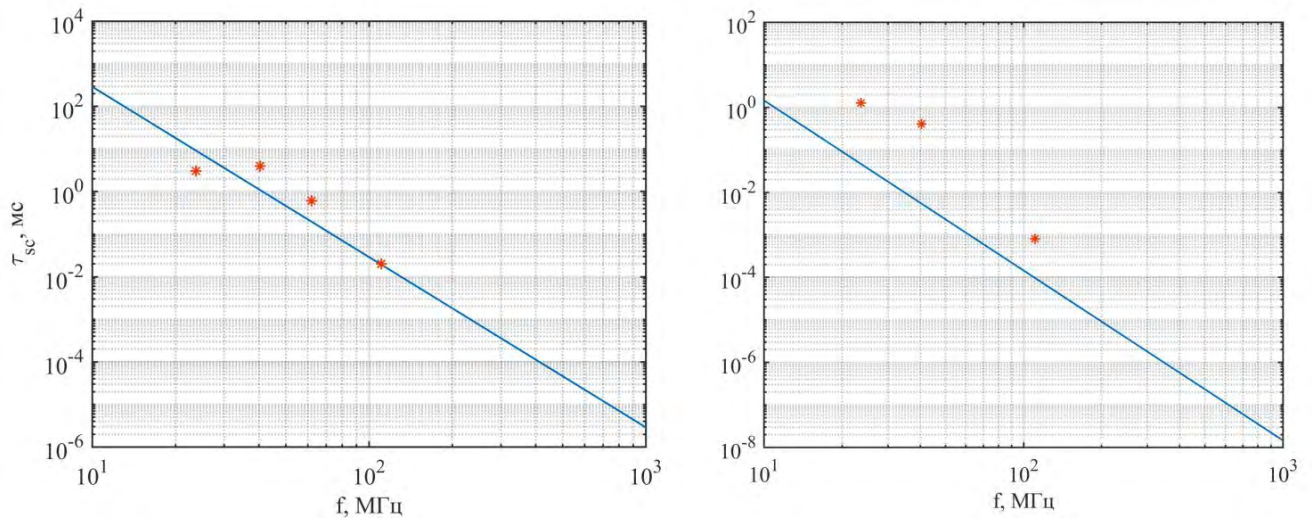


Рис. 2.12 Логарифмічна залежність характерного часу розсіяння від частоти $\tau_{sc}(f)$ для пульсарів J0814+7429 (ліворуч) та J0954+0755 (праворуч). Залежність побудована для нормального розподілення неоднорідностей електронної щільності [30]. Зірочками відмічені значення часу розсіяння на частотах 23.7, 40 та 62 МГц, які отримані зі спостережень [100].

Ще більш точним методом оцінки часу розсіяння є мінімізація середньоквадратичних відхилень між модельною функцією вигляду $e^{-t/\tau_{sc}(f)}$ та реальним сигналом на часовому інтервалі $\sim 3\tau_{sc}(f)$. Приклад вписаної експоненційної функції розсіяння в реальний профіль АП пульсара J0814+7429 на частоті 22.5 МГц показаний на рисунку 2.13.

Розсіяння сигналів на неоднорідностях середовища обмежує точність вимірювання МД, оскільки ми не можемо побачити затримку між крайніми частотам у каналі меншу за час розсіяння на даній частоті: $\tau_{DM}(f) \geq \tau_{sc}(f)$. Це обмеження точності залежить виключно від фізичних процесів у середовищі поширення. З рівняння (2.3) витікає точність оцінки МД у діапазоні частот f_L — f_H :

$$\delta DM(f) = \frac{\tau_{sc}(f)}{C} \left(\frac{1}{f_L^2} - \frac{1}{f_H^2} \right)^{-1}. \quad (2.14)$$

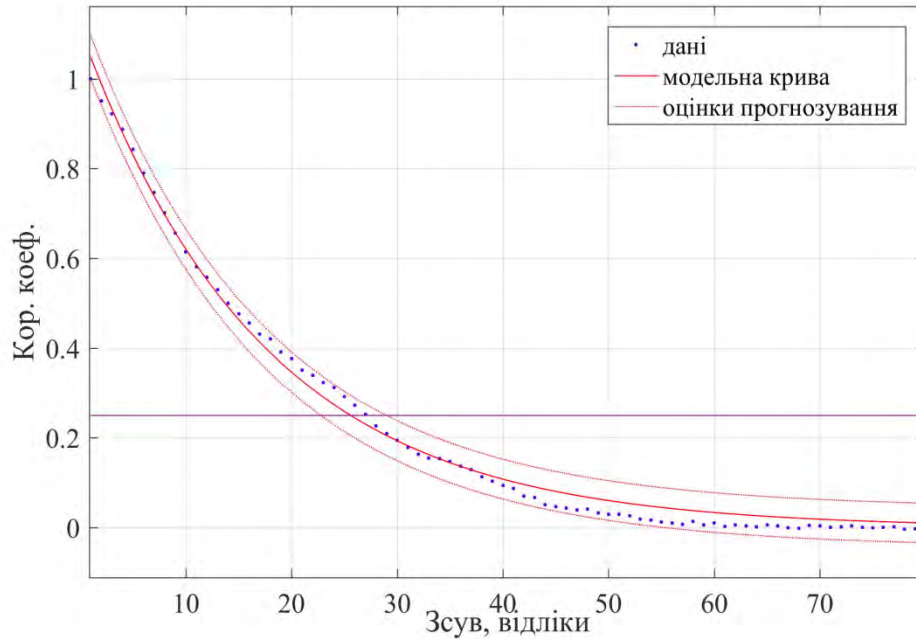


Рис. 2.13. Оцінка часу розсіяння шляхом мінімізації СКВ. Для прикладу обрано профіль АП пульсара J0814+7429 у спектральній смузі шириною 3 МГц на частоті 22.5 МГц з часовою роздільною здатністю 0.5 мс, від якого побудовано АКФ. Модельна експоненційна функція має вигляд $e^{-t/\tau_{sc}(f_c)}$ (червона крива), вона вписана у «хвіст» АКФ (блакитні точки), за який відповідає розсіянню. Горизонтальною прямою позначений рівень коефіцієнта кореляції 0.25. Похибка оцінки на рівні 3σ позначена пунктирними кривими праворуч та ліворуч від модельної залежності.

Розрахуємо конкретні значення. У пульсара J0814+7429 час розсіяння на частоті 23.7 МГц складає 3 мс [100]. У частотній смузі 21 — 24 МГц похибка у визначенні МД становить $\delta DM = 1.4 \cdot 10^{-3}$ пк·см⁻³, а відносна похибка: $\delta DM / DM = 2.4 \cdot 10^{-4}$ (МД дорівнює 5.751 пк·см⁻³). Ті ж похибки для пульсара

J0954+0755 ($\tau_{sc} = 1.27$ мс на 23.7 МГц та $DM = 2.972$ пк·см⁻³ [100] складають $\delta DM = 5 \cdot 10^{-4}$ пк·см⁻³ та $\delta DM / DM = 2 \cdot 10^{-4}$. Для пульсара J0243+6257 на початок досліджень даної дисертаційної роботи не існувало оцінок сталої часу розсіяння.

Таким чином, відносна точність у визначенні МД у декаметровому діапазоні у найближчих пульсарів складає приблизно 10^{-4} в смузі частот завширшки 3 МГц. Саме ця похибка, яка пов'язана з розсіянням сигналу, і буде визначати реальну точність оцінки МД та часову роздільну здатність при використанні когерентного методу усунення дисперсійної затримки.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В даному розділі представлені методи спостереження та обробки даних, необхідних для дослідження тонкої структури радіовипромінювання пульсарів з урахуванням особливостей декаметрового діапазону. Дослідження індивідуальних імпульсів пульсарів на низьких частотах є складною задачею. Саме тому зазвичай вивчають середні профілі імпульсів, а методики, необхідні для обробки індивідуальних імпульсів в цьому діапазоні, розроблені недостатньо добре.

Всі спостереження радіовипромінювання пульсарів були проведені на найбільшому в світі декаметровому радіотелескопі УТР-2. Показано, що спектральної чутливості УТР-2 достатньо для проведення такого роду досліджень, однак тільки якщо предметом аналізу є АП, які випромінюються близькими до Землі пульсарами. Велика ефективна площа УТР-2 також дозволяє реєструвати сигнали з високою часовою роздільною здатністю. Фактично, в даній роботі фактором обмеження роздільної здатності є не апаратура радіотелескопу, а фізичні параметри середовища поширення.

В роботі розроблені прискорені методи усунення дисперсійної затримки постдетекторним та когерентним методами у широкому діапазоні частот. Час обробки обома методами скорочується майже вдвічі порівняно з тими, що існували. Ці методи можуть бути застосовані до широкого спектру астрофізичних задач, які пов'язані не тільки з пульсарами, але й іншими транз'єнтними джерелами радіовипромінювання. Вони можуть бути використані для побудови швидких конвеєрних програм обробки даних радіоастрономічних спостережень.

Розрахована точність когерентного методу усунення дисперсії у декаметровому діапазоні. Показано, що відносна точність, яку можливо забезпечити для оцінки міри дисперсії у декаметровому діапазоні пов'язана з розсіянням сигналу на просторових неоднорідностях електронної концентрації. Для близьких пульсарів вона складає $\sim 10^{-4}$. Ця точність є вирішальною при оцінюванні МД з використанням

когерентного методу усунення дисперсійної затримки, оскільки вона зумовлена фізикою процесів розсіяння.

Розроблено методи, які дозволяють оцінювати характерний інтервал тонкої структури з більшою точністю для імпульсів складної форми, яка є звичайною в низькочастотному діапазоні.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1 — 25].

РОЗДІЛ 3

ПАРАМЕТРИ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ J0243+625, J0814+7429 ТА J0953+0755

Даний розділ присвячено аналізу даних спостережень декаметрового радіовипромінювання пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755 з високою часовою роздільною здатністю. Спостереження проводились на декаметровому радіотелескопі УТР-2. Мета аналізу — це пошук тонкої структури радіовипромінювання даних пульсарів, оцінка її параметрів та дослідження впливів ефектів середовища поширення на параметри тонкої структури. За отриманими параметрами тонкої структури є можливим розділити магнітосферу пульсара перпендикулярно та вздовж променя зору.

3.1 Аналіз декаметрового радіовипромінювання пульсара J0243+6257

В цьому підрозділі викладені результати обробки даних радіовипромінювання пульсара J0243+6257, які були отримані під час спостережень на радіотелескопі УТР-2. Дослідження параметрію декаметрового радіовипромінювання цього пульсара проводились вперше. Метою досліджень були оцінки точного значення МД в цьому діапазоні, оцінка сталої часу розсіяння, яка проводилась вперше, та виявлення тонкої структури АП.

3.1.1 Спостереження пульсара J0243+6257 та оцінка сталої часу розсіяння у декаметровому діапазоні

Спостереження пульсара J0243+6257 проводилися 27 та 28 жовтня 2014 року на радіотелескопі УТР-2 в хвильовому однопроменевому двоканальному режимі з частотою дискретизації 33 МГц в смузі частот 16 — 33 МГц. Аналогічно до аналізу спостережень пульсара J0814+ 7429, було застосовано цифровий смуговий фільтр 18 — 30 МГц, який потім був розбитий на 4 додаткові смуги з шириною по 3 МГц кожна на центральних частотах $f = 19.5, 22.5, 25.5$ та 28.5 МГц. Спостереження

даного пульсара у декаметровому діапазоні в хвильовому режимі з високою часовою роздільною здатністю проводились вперше.

Пульсар J0243+6257 вперше був відкритий на частоті 350 МГц в огляді пульсарів та радіотранзйєнтів в північній галактичній площині. Цей огляд проводився на радіотелескопі GBT в 2007 р. [139]. В даному огляді для цього пульсару були визначені координати, період обертання, який становить 592 мс, та МД, яка становить $4 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}$. У декаметровому діапазоні випромінювання пульсара J0243+6257 було вперше зареєстровано в роботі [4].

В даній дисертаційній роботі вперше проводився аналіз індивідуальних імпульсів пульсара J0243+6257. Під час спостережень було зареєстровано шість АП з мінімальним співвідношенням С/Ш > 5 в максимумі хоча б в одній з чотирьох смуг. Основні результати були отримані із даних з часовою та частотною роздільними здатностями 0.25 мс та 8 кГц відповідно. Зафіксовані АП є широкосмуговими в межах смуги спостереження. Вони виникають на тлі субімпульсної компоненти та їх ширина значно вужча за субімпульсну компоненту. Приклад інтенсивного АП показаний на рисунку 3.1.

Аналогічно до обробки попередніх пульсарів, ми застосовували постдетекторний метод компенсації дисперсійної затримки до всієї серії спостережень для візуального пошуку АП та когерентний метод компенсації до кожного окремого АП. Ми використовували $DM = 4 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}$ у постдетекторній обробці та в якості прицільного значення у когерентній обробці, яку взяли з роботи [148]. Далі, ми уточнили значення МД за допомогою когерентної обробки по максимальному відгуку інтенсивності імпульсу. Воно виявилось $DM = 3.8214 \pm 0.0001 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}$, що відповідає значенню, яке було отримане раніше у декаметровому діапазоні [4].

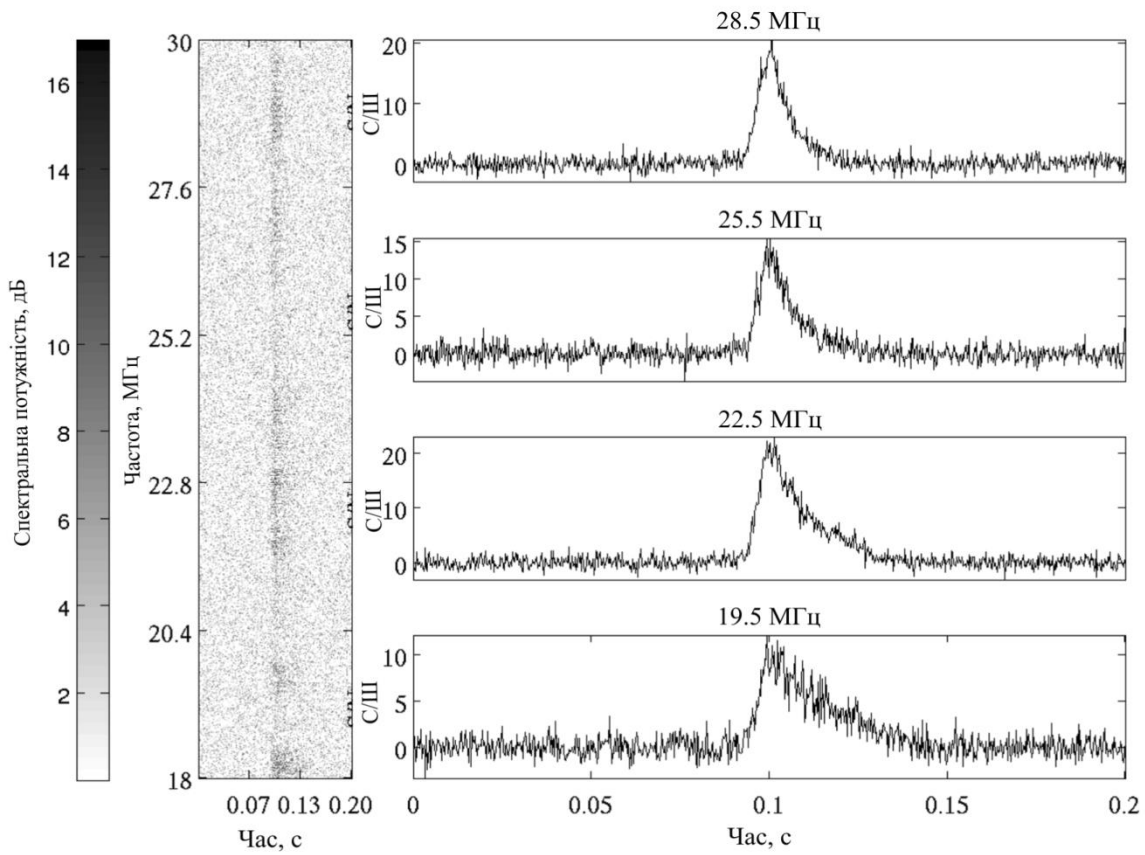


Рис. 3.1. АП пульсара J0243+6257. Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц; праворуч: 4 проінтегровані профілі на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Часова та частотна роздільні здатності динамічного спектру складають 0.25 мс та 8 кГц.

Після компенсації дисперсійної затримки ми визначали характерний час розсіяння $\tau_{sc}(f)$ в чотирьох смугах. Наскільки відомо, для пульсара J0243+6257 немає жодних оцінок часу розсіяння в жодному частотному діапазоні. Ми проводили аналіз розсіяння двома методами. У першому випадку $\tau_{sc}(f)$ вимірювалась з АКФ інтенсивності імпульсів на рівні коефіцієнта кореляції 0.25 (рис. 3.2). Другий спосіб полягав в мінімізації середньоквадратичних відхилень між модельною функцією та реальним сигналом на часовому інтервалі $\sim 3\tau_{sc}(f)$. В якості моделі було обрано

експонентну функцію вигляду $e^{-t/\tau_{sc}(f_c)}$, яка була вписана у «хвіст» розсіяння профілю імпульсу.

В зареєстрованих сигналах пульсара J0243+6257 зустрічається сильне та слабе розсіяння. АКФ профілів АП розділяються групи імпульсів з «короткою» та «довгою» шкалами випромінювання. Особливо чітко це проявляється на частотах 25.5 і 28.5 МГц (див. рис. 3.2). У даного пульсара спостерігаються два імпульси з «довгою» шкалою та чотири з «короткою» шкалою випромінювання (у пульсара J0814+7429 навпаки тільки два імпульси з усіх містили «коротку» компоненту). В даному випадку СКВ σ можливо розрахувати лише для АП з «короткою» шкалою, а у двох імпульсів з «довгою» шкалою визначено мінімаксні оцінки похибки. Результати зібрані у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Характерна ширина АП радіовипромінювання пульсара J0243+6257

f , МГц		19.5	22.5	25.5	28.5
Характерна ширина імпульсів та СКВ, мс	«довга» шкала τ_{lng} , мс	$20 \pm 1.0^*$	$18.5 \pm 0.9^*$	$21 \pm 1.15^*$	$17.4 \pm 0.3^*$
	«коротка» шкала τ_{sh} , мс	18.25	16.0	15.4	12.3
	СКВ σ , мс	3.6	0.9	0.6	1.0

* - мінімаксна оцінка похибок.

Зареєстровані АП мають сильну лінійну поляризацію. На це вказує квазіперіодична модуляція інтенсивності в залежності від частоти на динамічному спектрі АП на рисунку 3.3. Ефект Фарадея, що спостерігається у даному випадку, дозволяє оцінити міру обертання в даного пульсара [3, 17, 25].

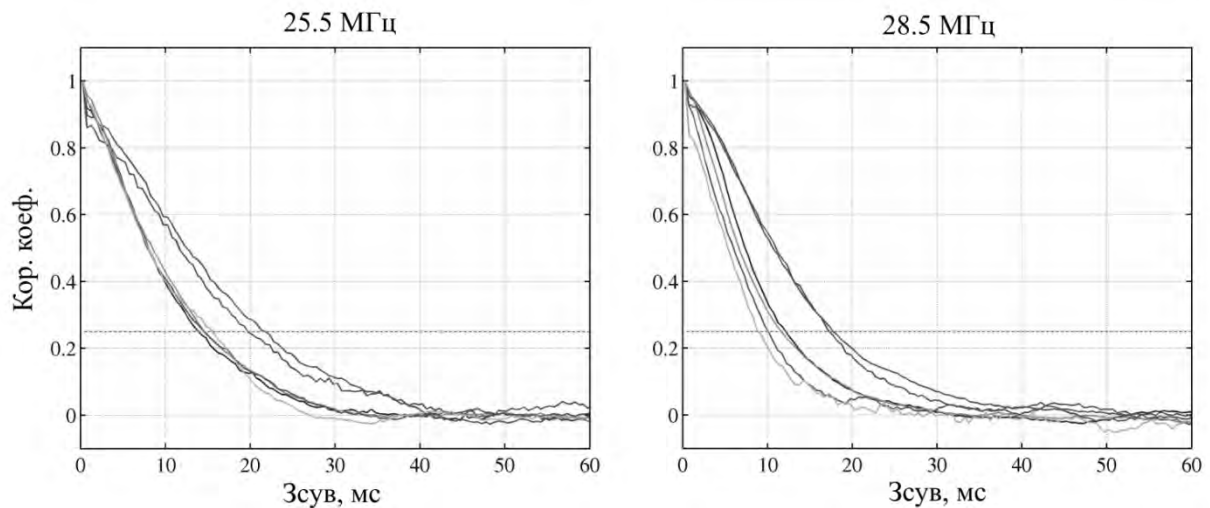


Рис. 3.2. АКФ АП пульсара J0243+6257 на частотах 25.5 МГц та 28.5 МГц. АКФ поділяються на дві групи, які відповідають АП з «короткою» та «довгою» шкалою когерентності випромінювання. Часова та частотна роздільні здатності 0.5 мс та 3 МГц. Пунктиром вказано рівень 0.25 коефіцієнту кореляції від максимуму АКФ.

3.1.2 Пошук тонкої структури радіовипромінювання пульсара J0243+6257

Для пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсара J0243+6257 ми також використовували кореляційний аналіз. Ми збільшували контрастність АКФ імпульсів декількома способами, проте в жодному з них не вдалося зафіксувати тонкі компоненти імпульсу. Це досить очікуваний результат. Навіть на динамічних спектрах АП виглядають гладкими та пологими (див. рис. 3.1, 3.3). Але й найкоротший час розсіяння випромінювання J0243+6257, який був отриманий вище, є досить великим (порівняно з пульсаром J0814+7429). Приклад контрастної АКФ інтенсивності АП показаний на рисунку 3.4. В даному випадку АКФ побудовано від профілю імпульсу, який є результатом віднімання профілів з високою та низькою часовими роздільними здатностями (як це було зроблено для пульсара J0953+0755).

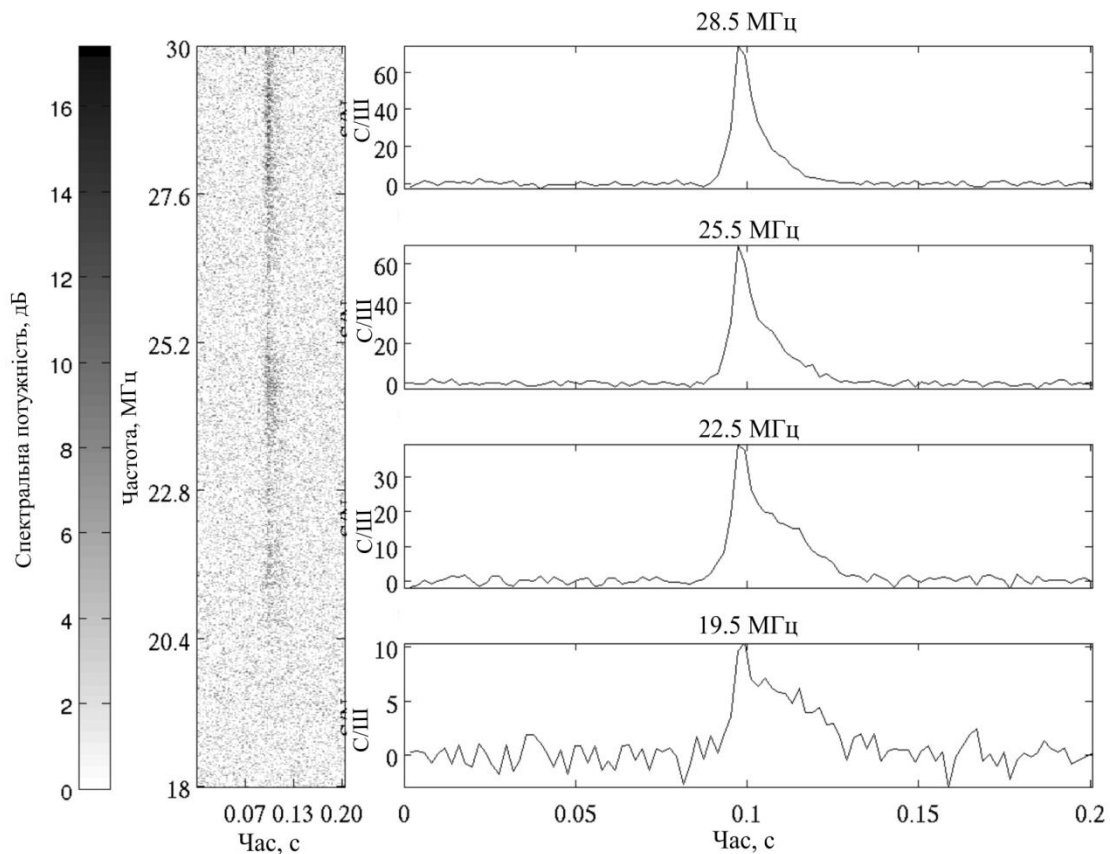


Рис. 3.3. АП пульсара J0243+6257. Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц; праворуч: 4 проінтегровані профілі на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Часова та частотна роздільні здатності динамічного спектру складають 2 мс та 8 кГц. На динамічному спектрі проявляється обертання площини поляризації.

У декаметровому діапазоні неможливо зафіксувати тонку структуру радіовипромінювання пульсара J0243+6257 з часом кореляції меншим за ~ 12 мс. Це можна пояснити розташуванням цього пульсара у галактиці Чумацький Шлях. J0243+6257 знаходиться в місцевому рукаві Оріона, в той час як пульсари J0814+7429 та J0953+0755 розташовані у напрямку перпендикулярному до диска Галактики відносно Сонячної системи (див. рис. 3.5). Вплив МЗС на сигнал від пульсара J0243+6257 значно вищий, та при сумірних значеннях МД, стала часу розсіяння J0243+6257 більша у кілька разів, ніж у двох інших пульсарів. Так, у

пульсара J0953+0755 $DM = 2.972$ пк·см⁻³, а розсіяння $\tau_{sc} = 1.27$ мс на частоті 23.7 МГц. У пульсара J0814+7429 $DM = 5.7$ пк·см⁻³ та $\tau_{sc} = 7 \div 13$ мс на частоті 25.5 МГц. У пульсара J0243+6257 $DM = 3.8$ пк·см⁻³ та $\tau_{sc} = 15 \div 21$ на 25.5 МГц. Всі значення τ_{sc} наведені на рівні інтенсивності сигналу 0.5 (або рівні коефіцієнту кореляції 0.25).

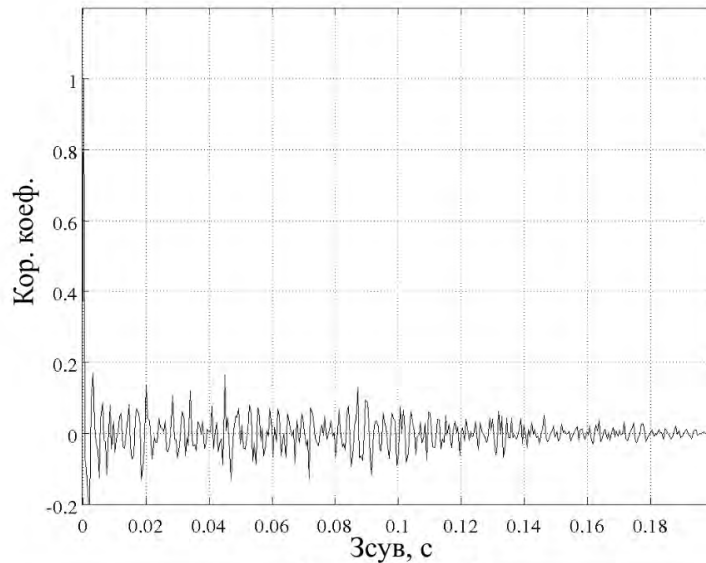


Рис. 3.4. Приклад контрастної АКФ АП пульсара J0243+6257. На цій АКФ проявляється тільки шумова складова сигналу. Часова та частотна роздільні здатності складають 0.5 мс та 3 МГц відповідно.

Стала часу розсіяння сигналу пульсара J0243+6257 вища, ніж у інших пульсарів, які розташовані в радіотихому районі Галактики. Можна очікувати, що рівень турбулентності міжзоряної плазми в напрямку на пульсар J0243+6257 підвищений, що і призводить до сильного розсіяння сигналу. Даний факт вимагає більш детального вивчення та додаткових досліджень пульсара J0243+6257 в широкому частотному діапазоні. Такі спостереження можливо провести з новою мережею низькочастотних радіоінтерферометрів ГУРТ, які розташовані на території радіоастрономічної обсерваторії ім. академіка С. Я. Брауде. ГУРТ розширює частотну смугу УТР-2 до 18 — 80 МГц.

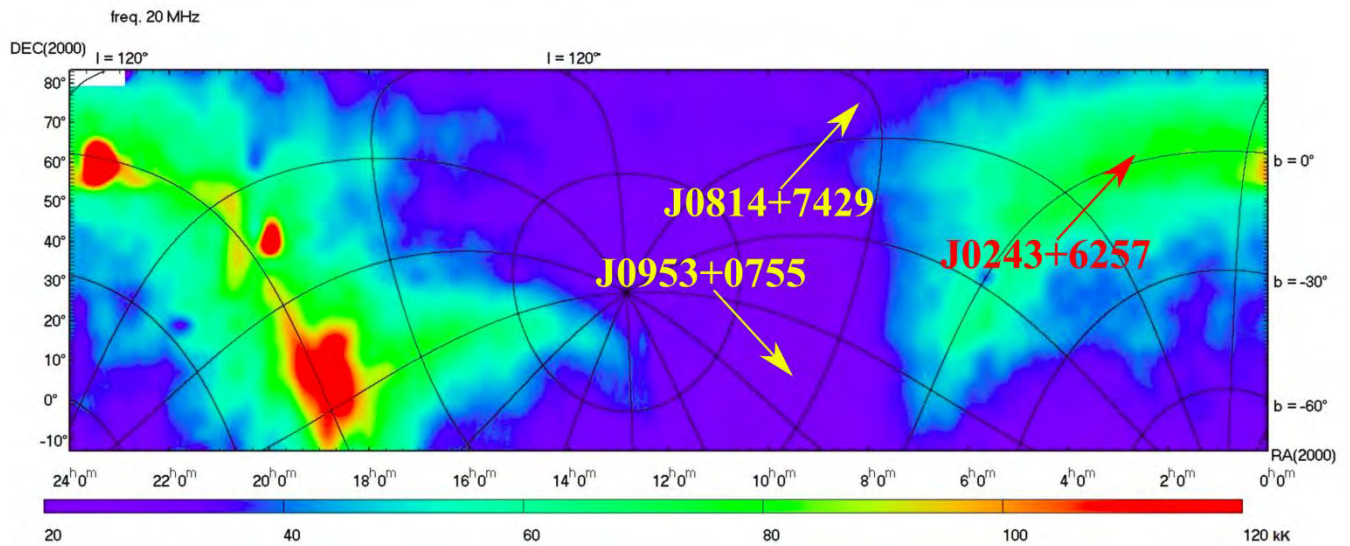


Рис. 3.5. Карта розподілу температурного фону Галактики у Північній півкулі на частоті 20 МГц. На карті стрілками вказані положення досліджуваних пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755. [130]

3.1.3 Підсумки аналізу спостережень пульсара J0243+6256

В даній частині дисертаційної роботи було вперше проведено спостереження пульсара J0243+6256 у хвильовому режимі та вперше проведено аналіз його декаметрового радіовипромінювання з високою часовою роздільною здатністю. Завдяки таким спостереженнями були виявлені АП даного пульсара. Також вперше для цього пульсара були оцінені стала часу розсіяння та показник ступеня в законі розсіяння.

Імпульси пульсара J0243+6256 розділяються на дві групи за характерним часом розсіяння: одні мають «коротку» шкалу випромінювання, а інші — «довгу» шкалу. Це може бути пов'язано з геометрією самої ділянки випромінювання.

Оскільки пульсар J0243+6256 має досить великий час розсіяння порівняно з іншими близькими до Землі пульсарами, неможливо спостерігати тонку структуру його радіовипромінювання з часом кореляції, який буде менший за відкриту «коротку» шкалу його випромінювання. Відповідно в даній роботі було досягнуто мінімально доступного для спостережень масштабу тонкої структури в діапазоні

частот нижче 30 МГц. Вірогідно, що на більш високих радіочастотах існує можливість спостерігати тонку структуру для цього пульсара, але це треба підтверджувати додатковими дослідженнями з використанням інших високочастотних радіотелескопів.

3.2 Аналіз декаметрового радіовипромінювання пульсара J0814+7429

В цьому підрозділі викладені результати обробки спостереження пульсара J0814+7429, які були проведені 2 грудня 2013 року на радіотелескопі УТР-2. Метою спостережень було виявлення тонкої структури індивідуальних АП цього пульсара. Раніше подібна структура була знайдена на частоті 25 МГц [55] без вказівок на те, що вона випромінюється всередині АП.

3.2.1 Спостереження пульсара J0814+7429 та пошук тонкої структури його випромінювання

Для аналізу тонкої структури радіовипромінювання індивідуальних імпульсів ми використовували цифровий смуговий фільтр зі смугою пропускання 18 — 30 МГц (частоти зрізу вказані для рівня сигналу -3 дБ). Саме таку частотну смугу було обрано з врахуванням особливостей спостереження пульсарів у декаметровому діапазоні та параметрів радіотелескопу УТР-2. Повна смуга аналізу 18 — 30 МГц була розділена цифровим шляхом на 4 додаткові смуги, кожна завширшки 3 МГц. Центральні частоти цих смуг дорівнювали $f = 19.5, 22.5, 25.5$ та 28.5 МГц. Було отримано чотири часових профілі АП за рахунок накопичення спектральної густини динамічного спектру у чотирьох спектральних смугах. Ці профілі аналізувались окремо.

Ми використовували різні значення часу інтегрування сигналу. Основні результати отримано з часовою та частотною роздільними здатностями, які дорівнювали $\delta t = 0.5$ мс, $\delta f = 8$ кГц. Часову роздільну здатність було обрано зважаючи на відомий характерний час розсіяння J0814+7429, який дорівнює $\tau_{sc} = 3$ мс на частоті 23.7 МГц [100].

Компенсація часової затримки внаслідок дисперсії проводилася двома методами. Вся серія спостережень довжиною в одну годину була оброблена за допомогою постдетекторної компенсації. Для отримання середнього профілю та візуального пошуку АП на динамічних спектрах пульсара ми використали прицільне значення $DM = 5.752 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}$, яке збігається з середнім значенням МД якщо використовувати один й той самий шаблон імпульсу (див. табл. 3 [31]). Існує ще одна оцінка МД для так званої динамічної моделі випромінювання цього пульсара $DM = 5.733 \pm 0.001 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}$ [149], однак для попереднього аналізу динамічних спектрів достатньо використовувати одне прицільне значення МД. Когерентний метод компенсації дисперсійного впливу був застосований нами до окремих знайдених АП на часових проміжках $\pm 120 \text{ с}$ відносно максимуму інтенсивності знайденого АП. МД уточнювалася під час аналізу по максимальному відгуку інтенсивності окремо для кожного зареєстрованого АП.

Вікно спектрального та кореляційного аналізу у часовій області ми обрали довжиною 200 мс зважаючи на наступне. З праці [144] відомо, що ширина середнього профілю імпульсу пульсара J0814+7429 на частоті 23.7 МГц дорівнює 125.84 мс. Характерна довгота субімпульсів на тій самій частоті є 8° , що відповідає $\sim 30 \text{ мс}$. Ширина АП дорівнює 16.33 мс (на рівні інтенсивності 0.5). Тож в інтервал аналізу 200 мс точно потрапляє субімпульсна компонента радіовипромінювання пульсара. Порівняння середнього профілю та АП у часовому вікні 200 мс наведено на рисунку 3.6.

Відомо, що АП виникають на тлі субімпульсної структури, але вони завжди набагато вужчі ніж субімпульси [100]. З іншого боку, інтенсивність АП завжди набагато вища, ніж у субімпульсів, тому внесок АП у зареєстровану інтенсивність радіовипромінювання (відповідно й у АКФ) є визначальним. Нас цікавлять найкоротші з характерних масштабів радіовипромінювання, тож ми будемо розглядати тонку структуру радіовипромінювання АП, та якщо необхідно, робитимемо зауваження щодо субімпульсної структури.

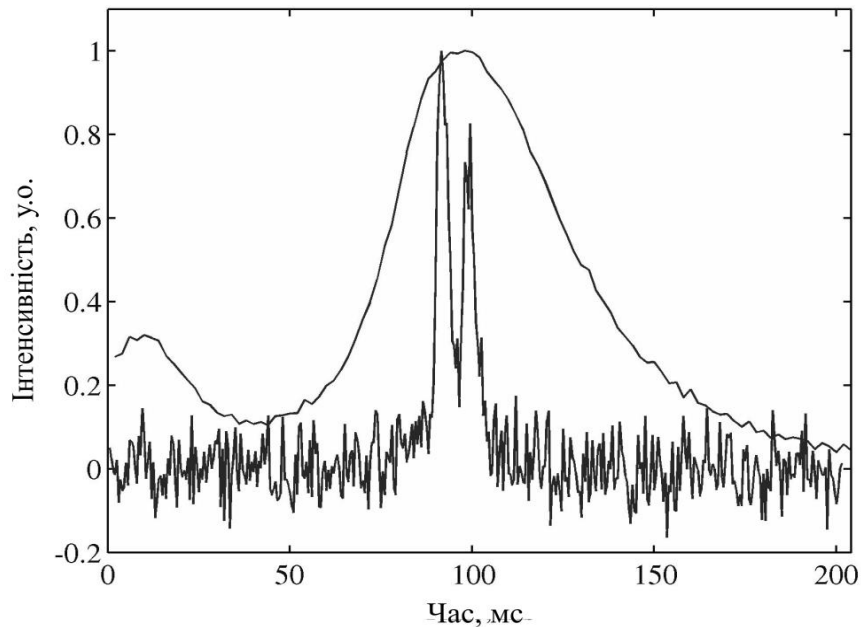


Рис. 3.6. Порівняння АП та середнього профілю імпульсу пульсара J0814+7429. Нижній профіль: АП з часовою роздільною здатністю 0.25 мс. Верхній профіль: середній профіль імпульсу на частоті 24 МГц. Вікно аналізу складає 200 мс. Інтенсивності обох профілів нормовані до одиниці.

Зі всієї серії спостережень були обрані дев'ять АП пульсара J0814+7429 зі співвідношенням С/Ш в максимумі > 10 (хоча б в одній з чотирьох смуг) та з мінімальним впливом радіозавад. Ці дев'ять АП розділилися на дві групи за шириною їхнього профілю. Ми назвали їх імпульсами з «короткою» τ_{sh} та «довгою» τ_{lng} часовою шкалою. Приклади однокомпонентних АП з «короткою» та «довгою» шкалою показані на рисунках 3.7 та 3.8. Це динамічні спектри імпульсів у повній смузі частот 18 — 30 МГц та проінтегровані профілі у 4 окремих смугах.

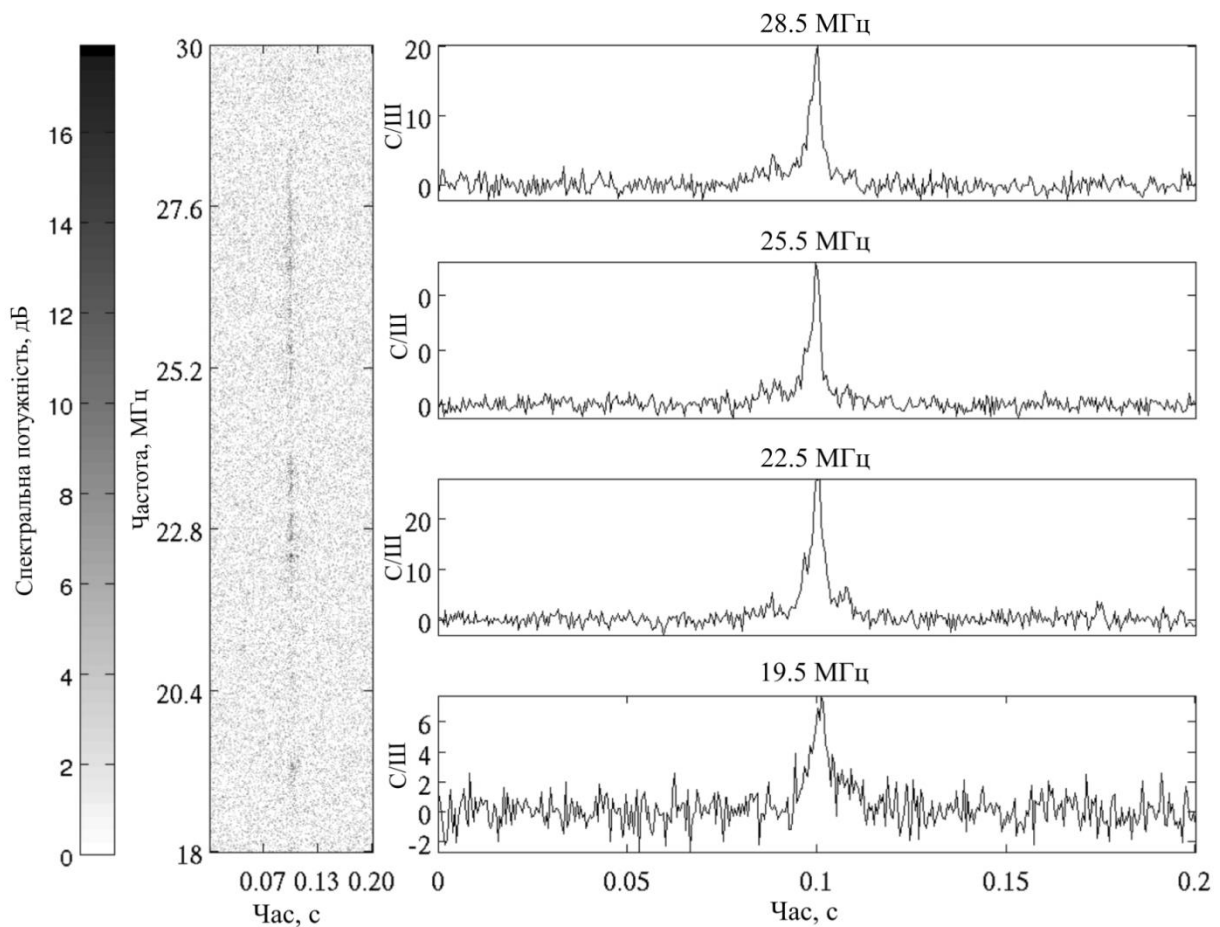


Рис. 3.7. АП пульсара J0814+7429 з «короткою» τ_{sh} шкалою випромінювання. Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц; праворуч: 4 проінтегровані профілі на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Часова та частотна роздільні здатності динамічного спектру складають 0.5 мс та 8 кГц.

Ми проводили кореляційний аналіз окремо у чотирьох спектральних смугах. Для кожного профілю імпульсу у вікні 200 мс на частотах $f = 19.5, 22.5, 25.5$ та 28.5 МГц були розраховані АКФ. За цими АКФ ми оцінювали характерну ширину імпульсу $\Delta\tau(f)$. На рисунку 3.9 наведені графіки АКФ інтенсивності всіх дев'яти АП на частоті 22.5 МГц з часовою роздільною здатністю $\delta t = 0.5$ мс. На цьому рисунку видно, що АКФ розділені на дві групи. Два імпульси мають коротку

ширину, а 7 імпульсів — довгу, відносно один одного. Це імпульси з «короткою» та «довгою» шкалою радіовипромінювання, про які йшлося вище.

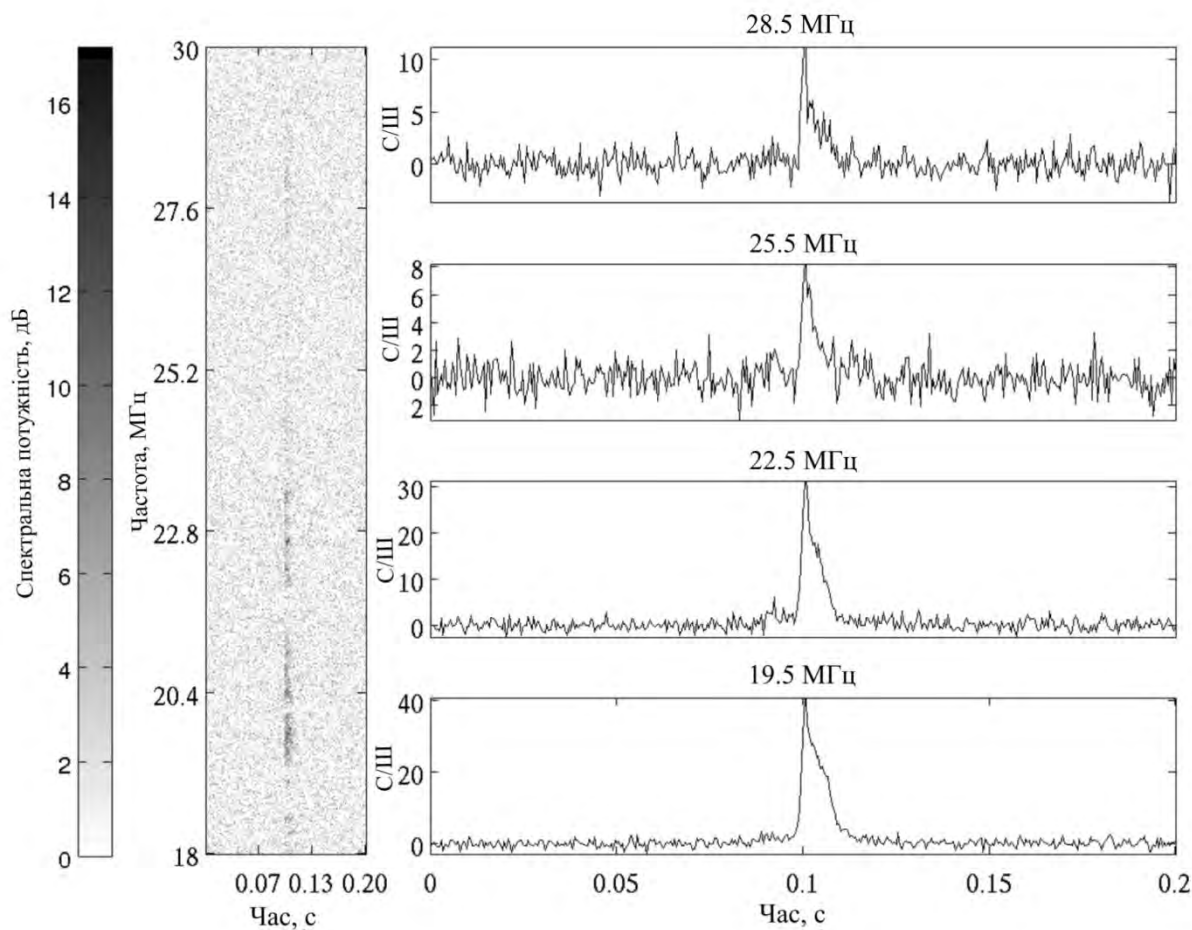


Рис. 3.8. АП пульсара J0814+7429 з «довгою» τ_{Int} шкалою випромінювання.

Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц; праворуч: 4 проінтегровані профілі на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Часова та частотна роздільні здатності динамічного спектру складають 0.5 мс та 8 кГц. На частотах 22.5, 25.5 та 28.5 МГц видно, що АП випромінюються на тлі слабо інтенсивних субімпульсів.

Характерні масштаби «короткої» та «довгої» шкали АП були оцінені на частотах 22.5 та 25.5 МГц (див. рис. 3.9), оскільки саме в цих спектральних смугах досягається максимальне співвідношення С/Ш. Ширина вимірюв на рівні

коефіцієнта кореляції 0.25 нормованої на одиницю АКФ. Цей рівень відповідає рівню інтенсивності 0.5 у профілі імпульсу. Результати оцінки наведені у таблиці 3.2. «Коротка» шкала τ_{sh} складає 9.7 та 7 мс, а «довга» τ_{lng} — 13 та 13.44 мс на обраних частотах. Середні квадратичні відхилення (СКВ) в оцінці часу розсіяння є можливим розрахувати тільки для АП з «довгою» шкалою та воно складає $\sigma \sim 2$ мс. Для АП з «короткою» шкалою в таблиці 3.2 наведені мінімаксні оцінки похибки. Ширини АКФ двох імпульсів із «короткою» шкалою випромінювання майже однакові. Решта АП з «довгою» шкалою навпаки мають більший розподіл за ширинами АКФ.

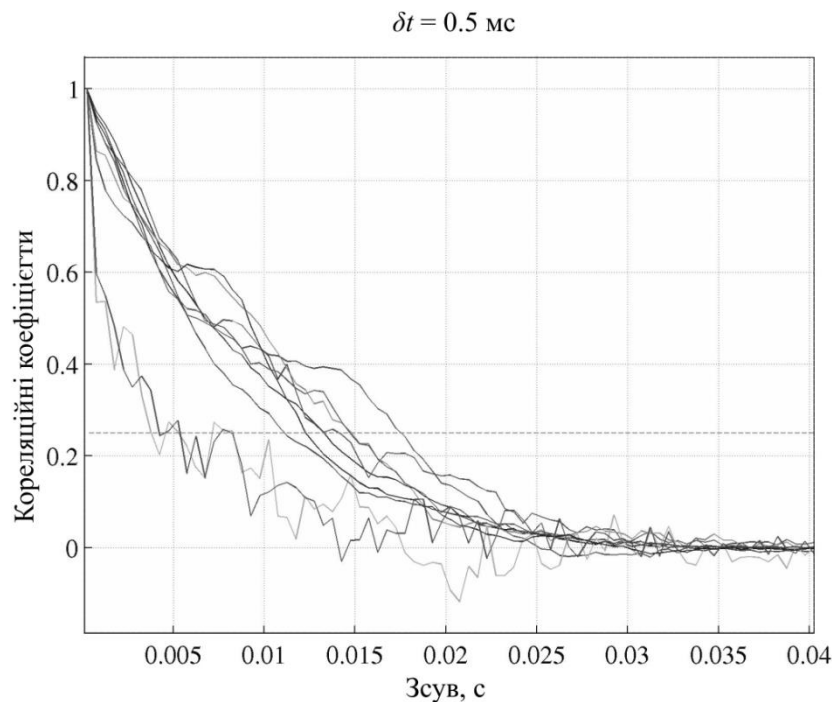


Рис. 3.9. АКФ серії АП пульсара J0814+7429. АКФ розділяються на дві групи, які відповідають АП з «короткою» та «довгою» шкалами випромінювання. Пунктиром показаний рівень коефіцієнту кореляції 0.25 від максимуму АКФ. Часова та частотна роздільні здатності складають 0.5 мс та 8 кГц, центральна частота спектральної смуги дорівнює 22.5 МГц.

У найінтенсивніших АП відбувається розщепленні профілю імпульсу (див. рис. 3.10). Про це свідчать й характерні злами на АКФ (див. рис. 3.11). За шириною цих зламів можливо оцінити час кореляції імпульсних компонент радіовипромінювання з «короткою» та «довгою» шкалами. В деяких випадках у профілях АКФ було виявлено локальні максимуми. Ці максимуми характеризують наявність розщеплень у профілі АП (див. рис. 3.10, праві панелі).

Таблиця 3.2

Характерні ширини АП радіовипромінювання пульсара J0814+7429

f_c , МГц	22.5			25.5		
Шкала	«довга»		«коротка»	«довга»		«коротка»
радіовипромінювання	«коротка»	«довга»	σ	«коротка»	«довга»	σ
АП	τ_{sh}	τ_{lng}		τ_{sh}	τ_{lng}	
Характерна ширина імпульсів та СКВ σ , мс	$9.7 \pm 0.8^*$	13.0	1.5	$7.04 \pm 0.24^*$	13.44	1.7

* – мінімаксна оцінка похибки.

Час життя «короткої» шкали АП J0814+7429 складає $\tau_{sh} = 7$ мс на частоті 25.5 МГц, що приблизно дорівнює подвоєній сталій часу розсіяння $\tau_{sc} = 3$ мс (на частоті 23.7 МГц з роботи [100]). Це може бути пов'язано з тим, що швидкості зростання переднього фронту та спадання заднього фронту у «коротких» АП пропорційні (див. рис. 3.12, імпульс № 3). Це свідчить на користь приблизної рівності характерної ширини початкових «коротких» АП та характерної ширини імпульсної характеристики середовища поширення $h(t)$. У випадках, коли передній фронт зареєстрованих АП є доволі крутим (див. рис. 3.12, імпульси № 6, 8, 9), ці АП мають «довгу» шкалу радіовипромінювання. Раніше у праці [55] у цього пульсара була зафіксована мікроструктура масштабу 2 — 4 мс на частоті 25 МГц. Тож оцінка характерного часу когерентності тонкої структури, яка була проведена в даній дисертаційній роботі, підтверджує результати, які були отримані іншою групою дослідників. Це говорить на користь методів, розроблених в даній роботі.

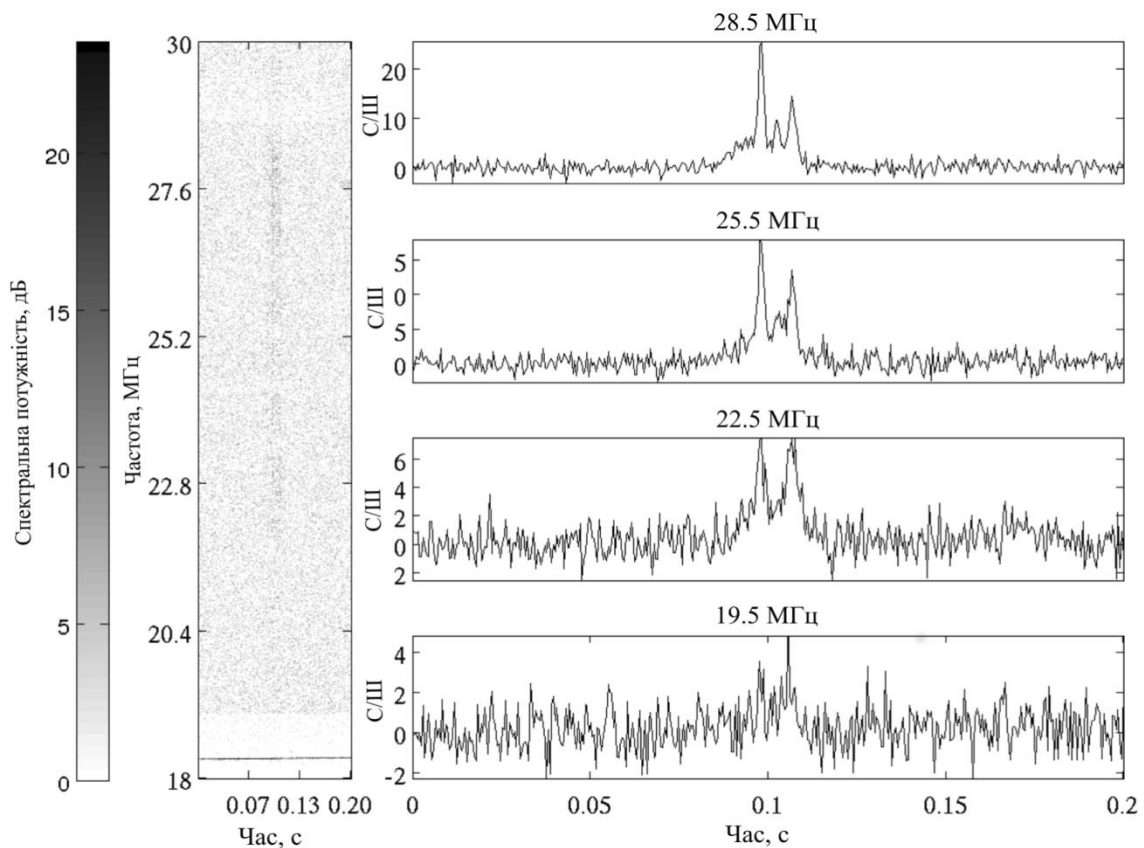


Рис. 3.10. Багатокомпонентна тонка структура АП пульсара J0814+7429. Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц; праворуч: 4 проінтегровані профілі на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Часова та частотна роздільні здатності динамічного спектру складають 0.5 мс та 8 кГц. Профілі імпульсу розщеплюються на кілька компонент.

«Довга» шкала випромінювання може бути результатом як широких (порівняно зі сталою часу розсіяння) імпульсів, що випромінюються в магнітосфері, так і серією коротких імпульсів, які були «розмазані» під час проходження через МЗС. Для того, щоб з'ясувати це, необхідно провести деконволюцію АП з використанням моделі ТФЕ, яка імітує середовище поширення (див. рис. 3.12).

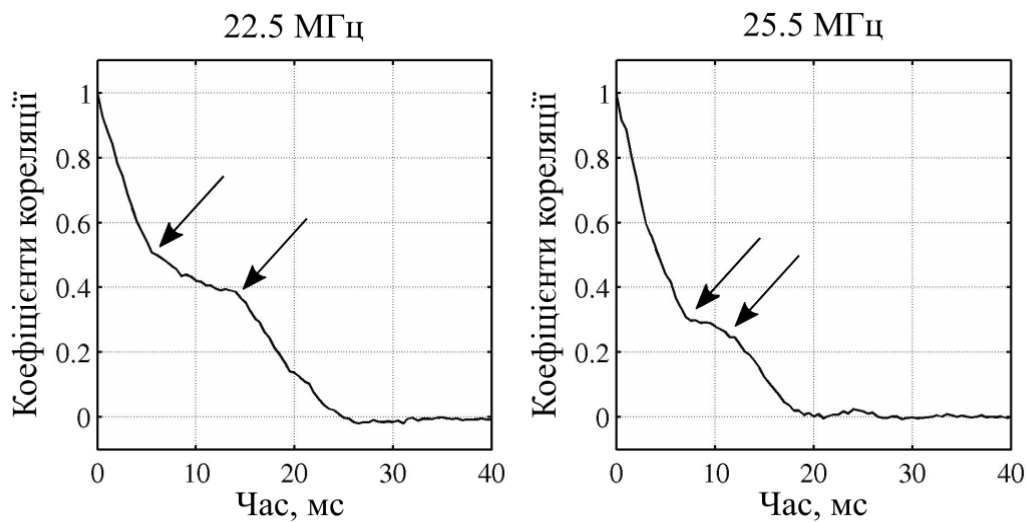


Рис. 3.11. АКФ профілю АП пульсара J0814+7429 на частотах 22.5 та 25.5 МГц. Стрілками вказані злами на АКФ, які відповідають зареєстрованій тонкій структурі з відповідною «короткою» шкалою. Характерний час кореляції дорівнює $\tau_{sh} = 5$ мс на частоті 22.5 МГц та $\tau_{sh} = 7$ мс на частоті 25.5 МГц. Другий злам на цих АКФ характеризує «довгу» часову шкалу тонкої структури АП. Він відповідає $\tau_{lng} = 14$ мс на частоті 22.5 МГц та $\tau_{lng} = 11.5$ мс на частоті 25.5 МГц. Третя гілка зі зломом поряд нульового коефіцієнта кореляції відповідає вже всій ширині АП. Часова роздільна здатність дорівнює 0.5 мс.

Як було показано у підрозділі «Деконволюція сигналу з імпульсною характеристикою середовища поширення», на боці прийому огинаюча крива $s_{obs}(\tau)$ імпульсу, що реєструється, є згорткою огинаючої імпульсу, який випромінюється магнітосферою пульсара $s_{rad}(t)$, та імпульсною характеристикою середовища поширення $h(t)$ на частоті f :

$$s_{obs}(\tau) = s_{rad}(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{rad}(t) \cdot h(\tau - t) dt. \quad (3.1)$$

Відповідно до моделі ТФЕ, імпульсну характеристику $h(\tau)$ на частоті f описує рівняння: $h(t) = \exp(-t / \tau_{sc}(f))$, де $\tau_{sc}(f)$ — це стала часу розсіяння на

даній частоті, яку ми оцінюємо як половину ширини АКФ (на рівні інтенсивності 0.25) найкоротшої зареєстрованої структури $\tau_{sc}(f) = \frac{1}{2} \tau_{sh}(f)$.

Наша задача полягає у відновленні оригінального сигналу $s_{rad}(t)$. За допомогою теореми про згортку рівняння (3.1) можливо виразити у частотній області, як $\dot{S}_{obs}(f) = \dot{S}_{rad}(f) \cdot \dot{H}(f)$, де $\dot{S}_{obs}(f)$, $\dot{S}_{rad}(f)$, $\dot{H}(f)$ — це Фур'є образи відповідних величин $s_{obs}(t)$, $s_{rad}(t)$, $h(t)$ у часовій області. Тоді сигнал, що був випромінений в магнітосфері пульсару, знаходиться через рівняння: $\dot{S}_{rad}(f) = \dot{H}(f) / \dot{S}_{obs}(f)$.

З урахуванням вже відомих значень часу розсіяння на конкретних частотах f , вдалося відновити імпульсні компоненти тих імпульсів, для яких співвідношення С/Ш достатньо велике (див. рис. 3.12).

Деконволюція зменшує співвідношення С/Ш, тому її доцільно проводити виключно для імпульсів зі співвідношенням С/Ш більше, ніж 20. Деякі імпульси (див. рис. 3.12 імпульси № 1 на 25.5 МГц; № 6 на 22.5 та 28.5 МГц; № 8 на 28.5 МГц та № 9 на 28.5 МГц) розпалися на серію більш коротких імпульсів, які мають ширину $\sim \tau_{sc}(f)$. Аналогічний результат був отриманий для пульсара J0953+0755 в роботі [59]. Такий ефект може свідчити про те, що у магнітосфері пульсара випромінюється серія коротких імпульсів, які при проходженні через МЗС замиваються. До такого ж висновку доходять автори в роботі [60]. В такому випадку може спостерігатися квазіперіодична тонка структура. Як правило, подібні вузькі імпульси випромінюються короткими серіями, або випромінюються на початку плато (див. рис. 3.12 імпульси № 3 на 22.5 МГц, та № 6 на 19.5 та 22.5 МГц). За обраних параметрах часової та частотної роздільної здатностей, та обмеженнях у чутливості радіотелескопу, ми не в змозі розділити «довгу» імпульсну компоненту. Однак не виключено, що вона так само складається з серії коротких, але менш інтенсивних імпульсів (це впливає зі спільного аналізу зареєстрованого та відновленого імпульсів № 6 та № 9 на 28.5 МГц, див. рис. 3.12).

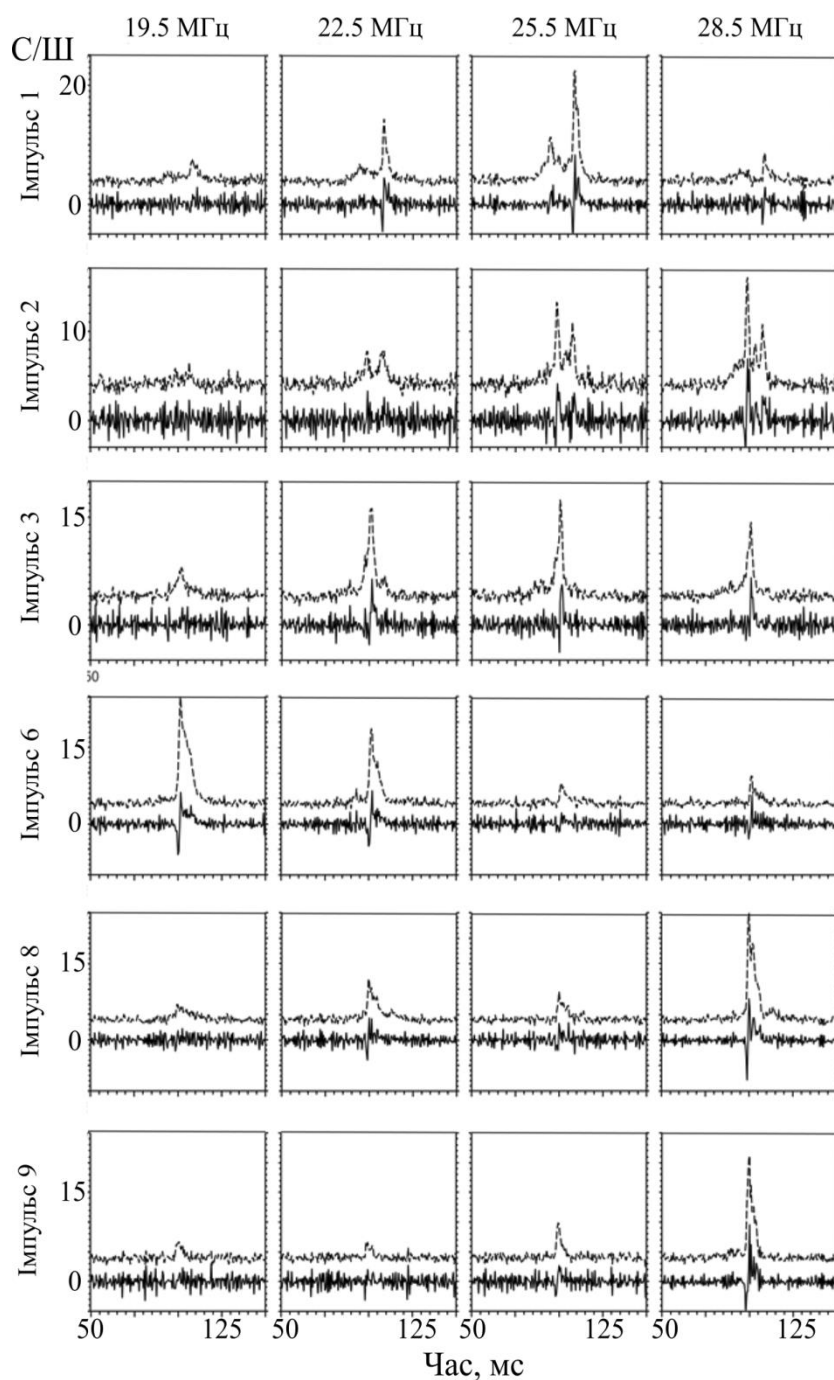


Рис. 3.12. Деконволюція АП пульсара J0814+7429 з імпульсною характеристикою середовища поширення $h(\tau)$. Верхні профілі: АП з «короткою» та «довгою» компонентами випромінювання, що були зареєстровані на УТР-2. Нижні профілі: ці АП після деконволюції. Всі профілі наведені в одиницях співвідношення С/Ш. Імпульси пронумеровані в порядку їхньої реєстрації.

3.2.2 Підсумки аналізу спостережень пульсара J0814+7429

Під час аналізу радіовипромінювання пульсара J0814+7429 в діапазоні частот 18 — 30 МГц ми обробили 9 АП з співвідношенням С/Ш >10 в максимумі інтенсивності. За характерними ширинами імпульсів, вони розділилися на дві групи. До однієї групи належать АП з «короткою» шкалою радіовипромінювання з характерним інтервалом кореляції 7 — 10 мс, до другої – імпульси з «довгою» шкалою з характерним інтервалом кореляції 13 мс.

Форма імпульсів з «короткими» компонентами вказує на те, що час розсіяння для цих імпульсів складає приблизно половину їхнього інтервалу кореляції. «Довгі» імпульси, вірогідно, виникають, коли розсіяні тонкі компоненти цих імпульсів накладаються один на інший, через що їх неможливо розділити на приймальній стороні.

Деконволюція АП з імпульсною характеристикою середовища поширення усунула вплив середовища поширення в рамках моделі ТФЕ та виявила оригінальну форму імпульсів, що були випромінені в магнітосфері пульсара J0814+7429. Найбільш інтенсивні імпульси після деконволюції розпадаються на серію коротких імпульсів. Вони мають тривалість порядку 2 — 3 мс. В деяких випадках вони випромінюються на фоні «довгої» компоненти, яка створює слабо інтенсивне плато.

В даній частині роботи ми зареєстрували тонку структуру декаметрового радіовипромінювання пульсара J0814+7429 з характерним часом кореляції, який співвідноситься із часом розсіяння $\tau_{sc} = 3$ мс для даного пульсара в області частот спостережень. Це означає, що ми спостерігали тонку структуру із найкоротшим можливим масштабом та досягли фізичних обмежень часу кореляції через розсіяння сигналу у середовищі поширення.

3.3 Аналіз декаметрового радіовипромінювання пульсара J0953+0755

У цьому підрозділі викладені результати обробки спостережень пульсара J0953+0755, які були проведені 22 і 23 лютого 2013 р. на радіотелескопі УТР-2. Для

аналізу ми обрали найінтенсивніший АП зі співвідношенням С/Ш = 20, для якого провели оцінки точного значення МД та характерного масштабу тонкої структури.

3.3.1 Огляд основних параметрів радіовипромінювання пульсара J0953+0755

Пульсар J0953+0755 — це звичайний (не мілісекундний) радіопульсар з періодом обертання 253 мс [30]. Дослідження цього пульсара велися протягом довгого часу, тому він є добре вивченим у широкому діапазоні частот. Це один із найближчих до Землі пульсарів, відстань до нього складає 262 пк [150]. Стала часу розсіяння дорівнює 1 мс на 25 МГц [100]. Середнє значення МД складає $2.970 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}$ (див. напр. [30]). Однак, в різних літературних джерелах наведені значення МД, які сильно відрізняються одне від одного в залежності від діапазону спостережень (див. табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Середні значення МД пульсара J0953+0755, які отримані в різних частотних діапазонах

МД, $\text{пк}\cdot\text{см}^{-3}$	Частота спостережень, f	Телескоп	Посилання
2.972(2)	25 МГц	УТР-2	[31]
2.9702 ± 0.0001	430, 1408 МГц	Аресібо	[151]
2.9686 ± 0.0001	102 МГц	Пуціно, ВСА	[59]
2.9696 ± 0.0001	67 — 102 МГц	Пуціно, ДКР-1000	[53, 60]
2.9702 ± 0.0001	-	ATNF	[30]
2.9701 ± 0.0003	-	-	[152]
2.9694(5)	-	LOFAR	[153]
2.9597 ± 0.005	325, 610 MHz	GMRT	[154]

Морфологія середнього профілю пульсара змінюється досить сильно в залежності від частоти та часу спостережень [53, 60, 155–157]. На частотах менших

за 400 МГц середній імпульс частіше має дві компоненти [152, 158]. Іноді з'являються три компоненти середнього профілю [159]. Відстань між компонентами зростає з падінням частоти, цю залежність можна описати формулою: $\theta_v \sim \nu^{-\alpha}$ (показник ступеня α дорівнює 0.1 — 0.6) [60]. За деякими моделям випромінювання пульсарів, конус випромінювання збільшується з пониженням частоти, що призводить до збільшення відстані між компонентами.

Пульсар J0953+0755 випромінює ГІ на метрових [155, 160] та дециметрових [52] хвилях. На декаметрових хвилях спостерігаються АП [100].

У даного пульсара присутній **дрейф субімпульсів** в його радіовипромінюванні. Період дрейфу дорівнює $P_3 \approx 6.5 P_0$ [161, 162]. Однак, в праці [163] автори не зафіксували дрейф субімпульсів при спостереженнях на 21 см довжини. Ймовірно що дрейф існує на більш низьких частотах.

Вперше мікроструктура радіовипромінювання пульсара J0953+0755 була виявлена в метровому діапазоні довжин хвиль з характерним масштабом ~ 10 мкс [52]. Це були послідовні періодичні мікроімпульси (від 9 до 12 циклів) з періодами від 300 до 700 мкс.

В роботі [156] були проведені дослідження мікроструктури радіовипромінювання пульсара J0953+0755 в метровому діапазоні. У 50% випадків мікроструктура виникає на частотах 102.5 МГц та 79.7 МГц, та тільки в 20% — на 67.59 МГц. У даній роботі було знайдено принаймні два масштаби періодичності тонкої структури. Довга шкала з характерною шириною 200 мкс виникає переважно на частоті 102.5 МГц. Короткі мікроімпульси менші за 70 мкс з'являються незалежно на різних частотах в більш широкому діапазоні. Короткі мікроімпульси з'являються частіше (в 60% від усіх мікроімпульсів), однак довгі мікроімпульси більш інтенсивні, що робить їх помітніше на середній автокореляційній функції. Автори показали, що характерний час мікроструктури радіовипромінювання цього пульсара не має чіткої частотної залежності, проте кількість мікроімпульсів падає з пониженням частоти.

Два масштаби тонкої структури радіовипромінювання J0953+0755 були виявлені також на сантиметрових довжинах хвиль [65]. При спостереженнях цього пульсара в Пушино [59] була зафіксована квазіперіодична тонка структура з періодом 60 мкс. Автори пояснюють відкриту квазіперіодичність впливом середовища поширення.

Загалом, імпульсне випромінювання пульсара J0953+0755 має спорадичний характер. Інтенсивні імпульси з'являються групами по 10 — 12 штук [62]. Мікроімпульси також спорадичні, залежність появи мікроімпульсів від частоти поки не встановлена. Деякі індивідуальні імпульси можуть містити нечіткі, аморфні субімпульси.

Радіовипромінювання пульсара J0953+0755 є сильно поляризованим [42]. Воно має сильну лінійну поляризацію близьку до 70 % — 80 % на частоті 111 МГц [159]. У даній роботі було встановлено зв'язок тонкої структури і поляризації у радіовипромінювання даного пульсара. Автори оцінили міру обертання, яка склала близько $4 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-2}$ (це значення виявилось в 3 рази більшим, ніж встановлене раніше).

У пульсара J0953+0755 може виникати **інтерімпульси** на довготі 152° відносно головного імпульсу [164]. Інтерімпульс має свою мікроструктуру [79] з характерним часом життя 88 — 130 мкс.

Тонка структура радіовипромінювання J0953+0755 спостерігається давно та в різних частотних діапазонах. Однак, на декаметрах її все ще не зафіксовано. Потужні АП, які виникають у декаметровому діапазоні, роблять J0953+0755 гарним кандидатом для пошуку тонкої структури. Велика кількість наявної інформації про J0953+0755 сприяє використанню його для розробки та вдосконалювання алгоритмів спостережень та обробки даних, що направлені на дослідження тонкої структури радіовипромінювання пульсарів загалом.

3.3.2 Спостереження пульсара J0953+0755

Спостереження пульсара J0953+0755 були проведені 22 та 23 лютого 2013 р. на радіотелескопі УТР-2. Радіотелескоп стежив за джерелом з перемиканням діаграми спрямованості раз в 2 хвилини в однопроменевому одноканальному режимі з частотою дискретизації 66 МГц. Було встановлено смуговий фільтр 18 — 30 МГц (частоти зрізу вказані для рівня сигналу -3 дБ). В ході спостережень була зафіксована серія АП, яка включала близько 10 імпульсів (див. рис. 3.13).

На рисунку 3.13 показаний динамічний спектр серії АП в частотній смузі 18 — 30 МГц після компенсації дисперсійної затримки. До всього масиву даних ми застосовували постдетекторний метод та для окремих АП користувались когерентним методом. Прицільний параметр МД дорівнював $2.972 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ [31].

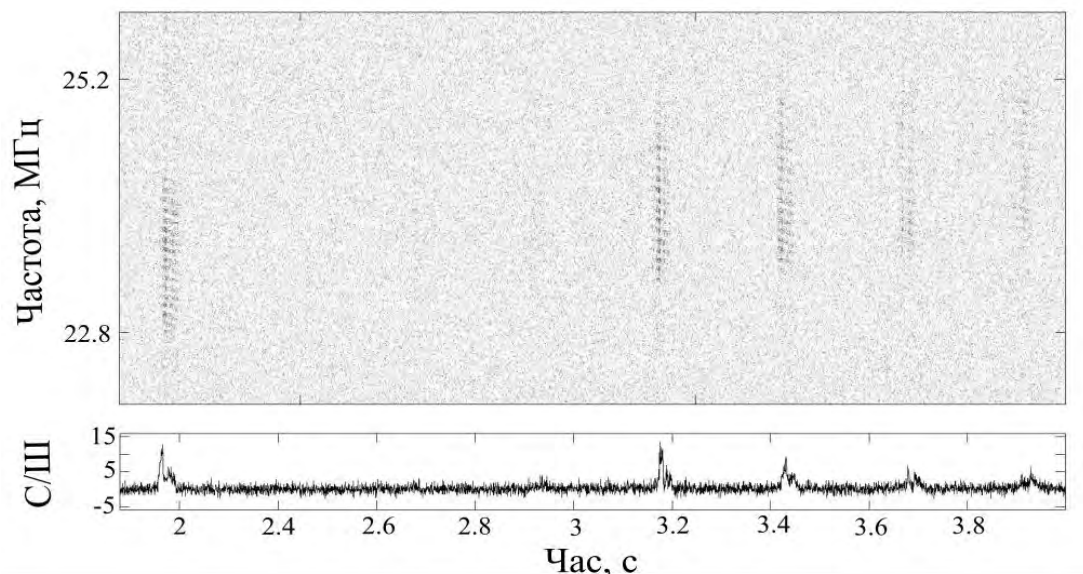


Рис. 3.13. Серія АП пульсара J0953+0755. Верхня панель: динамічний спектр з часовою та частотною роздільними здатностями 0.5 мс та 8 кГц. Нижня панель: проінтегрований за частотою верхній динамічний спектр. Смуга частот дорівнює 18 — 30 МГц.

Особливу увагу привертає найбільш інтенсивний імпульс зі співвідношенням $S/N = 20$ в максимумі інтенсивності (див. рис. 3.14 (a)). Він корелює в смузі частот

18 — 28 МГц. Саме цей імпульс був обраний для пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсара J0953+0755.

На динамічному спектрі з високою часовою роздільною здатністю 62 мкс видно, що цей АІ складається з 4 компонент (див. рис. 3.14 (b)). Компоненти діляться на парні та непарні. Непарні компоненти розташовані в смузі частот 18 — 26 МГц, а парні — в 23 — 28 МГц. В проінтегрованому у всій смузі 18 — 28 МГц профілю імпульсу (див. рис. 3.14 (c)) 4 компоненти проявляються не так чітко.

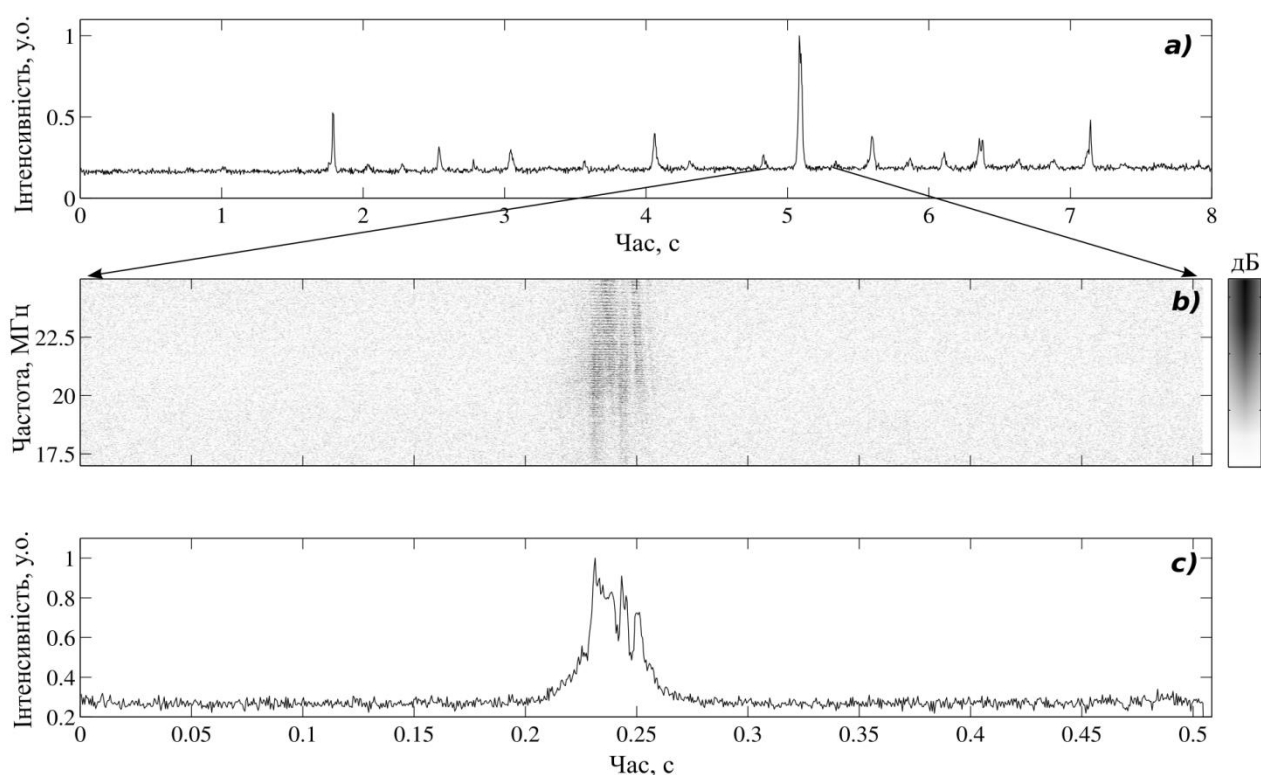


Рис. 3.14. Серія АІ пульсара J0953+0755. Верхня панель: профілі імпульсів з часовою роздільною здатністю 4 мс. Середня панель: динамічний спектр імпульсу з найбільшою інтенсивністю із загальної серії у смузі частот 17 — 25 МГц з часовою та частотною роздільними здатностями 62 мкс та 32 кГц. Нижня панель: проінтегрований у всій смузі частот профіль найінтенсивнішого імпульсу. МД дорівнює $2.972 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$.

3.3.3 Варіації параметру МД в межах індивідуального імпульсу пульсара J0953+0755

Всім чотирьом компонентам імпульсу відповідають різні значення видимої МД. Це можна побачити на динамічному спектрі імпульсу з часовою роздільною здатністю 62 мкс (див. рис. 3.14 (b)). За допомогою когерентного методу компенсації дисперсійної затримки ми оцінили точні значення МД для кожної компоненти по максимальному відгуку їхньої інтенсивності. Вони виявилися наступними: $DM_1 = 2.9720$, $DM_2 = 2.9731$, $DM_3 = 2.9720$, $DM_4 = 2.9729$ пк·см⁻³.

Точність визначення МД зумовлена двома факторами. Апаратна точність оцінки залежить від частоти спостережень та частотної смуги фільтра пропускання. У разі смуги 18 — 30 МГц апаратна точність складає $\delta DM_{bw} = \pm 2 \cdot 10^{-8}$ пк·см⁻³. Фізична точність залежить від параметрів середовища поширення, переважно від розсіювання сигналу. На інтервалах часу порядку 1 мс у спектральній смузі 18 — 30 МГц флуктуації МД складають $\delta DM = \pm 1.2 \cdot 10^{-4}$ пк·см⁻³. Виходить, що фізична точність в оцінюванні МД переважає.

Для детального аналізу інтенсивного АП ми провели компенсацію дисперсійної затримки когерентним методом двічі з двома різними параметрами МД. Для непарних компонент брали середнє значення

$$DM_{odd} = \frac{1}{2}(DM_1 + DM_3) = 2.9720 \pm 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3},$$

$$DM_{even} = \frac{1}{2}(DM_2 + DM_4) = 2.9730 \pm 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Обидва результати показані на рисунку 3.15.

Різниця між середніми значеннями МД двох пар компонент складає $\Delta DM = |DM_{odd} - DM_{even}| = 1 \cdot 10^{-3} \pm 1.2 \cdot 10^{-4}$ пк·см⁻³. Ця величина перевершує аналогічні параметри, які виникають в МПС та іоносфері Землі. Дослідження блискавок на Сатурні показало, що частотна дисперсія сигналу, що проходить через МПС, в середньому становить $DM_{IPM} \sim 4 \cdot 10^{-5} \pm 1 \cdot 10^{-5}$ пк·см⁻³ (див. [165–167]).

Повна електронна концентрація (TEC — total electron concentration) в іоносфері Землі складає $DM_{Earth} \sim 10^{-6}$ пк·см⁻³ [168, 169]. Досягнуте в роботі значення $\Delta DM = 10^{-3}$ пк·см⁻³ із точністю $\delta DM \sim 10^{-4}$ пк·см⁻³, на кілька порядків вище, ніж зазначені параметри DM_{IPM} та DM_{Earth} . Тому, отримана величина не тільки є значущою, але й дозволяє вважати, що ми спостерігаємо різницю в дисперсійній затримці, що виникає всередині магнітосфери пульсара.

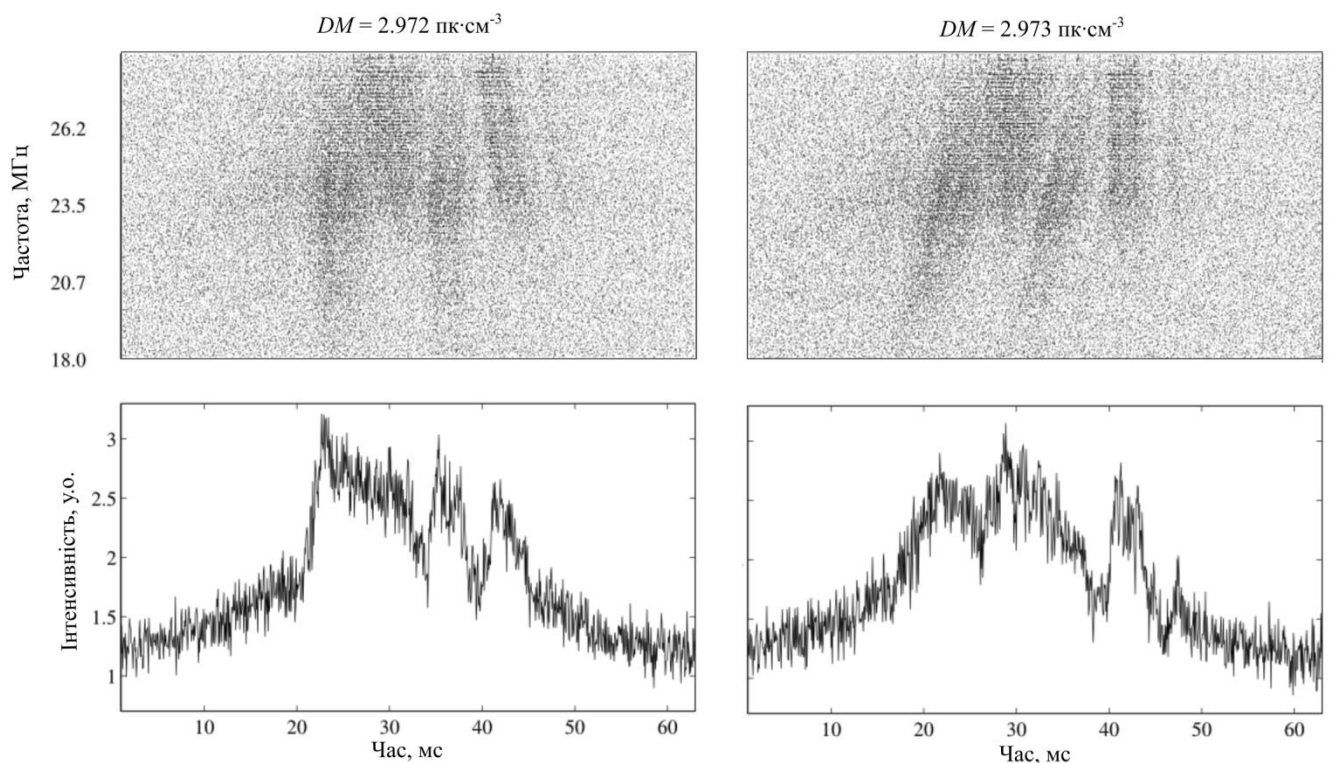


Рис. 3.15. АП пульсара J0953+0755 з різними за значенням МД. Верхні панелі: динамічний спектр у смузі частот 18 — 28 МГц з часовою та частотною роздільними здатностями 62 мкс та 32 кГц. Нижні панелі: проінтегрований у всій смузі частот профіль. Ліві панелі — непарні компоненти імпульсу, $DM_{odd} = 2.9720$ пк·см⁻³. Праві панелі — парні компоненти імпульсу, $DM_{even} = 2.9730$ пк·см⁻³.

Стрибок параметру МД на такому малому проміжку часу спостерігається вперше. МД характеризує інтегральну концентрацію електронів на промені зору.

Однак, даний параметр адекватно описує тільки слабо анізотропну плазму з повільним рухом неоднорідностей як, наприклад, плазма в МЗС. Для розрахунку різниці електронної концентрації в сильно анізотропному магнітоактивному середовищі біля НЗ (магнітосфера, пульсарний вітер) прості сталі залежності МД не підходять.

Коректна оцінка МД є вкрай важливою для ряду задач, які пов'язані з пульсарами. В першу чергу, це визначення точного періоду обертання («pulsar timing», який був описаний в першому розділі дисертаційної роботи). Інша задача — це дослідження індивідуальних імпульсів та тонкої структури радіовипромінювання, особливо в низькочастотному діапазоні. Фактично, при дослідженнях пульсарів з високою часовою роздільною здатністю слід кожен раз коригувати відоме значення МД.

На прикладі пульсара J0953+0755 можна побачити, наскільки відрізняються значення МД, які отримані на різних частотах спостережень різними дослідниками (див. табл. 3.1). Такі відмінності пов'язані з тим, що середовище поширення постійно змінюється, а присутні на промені зору локальні неоднорідності дрейфують з різними швидкостями. На динаміку МД також впливає й власна швидкість руху пульсара в середовищі (типова швидкість $\sim 100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$).

Флуктуації МД спостерігаються на різних часових масштабах. Існують річні флуктуації [151, 170, 171]. Особливе значення цей ефект має для таймінгу пульсарів, де обробляються дані спостережень за якомога триваліший період.

Спостереження мілісекундних пульсарів на радіотелескопі GMRT зафіксували флуктуації МД на місячних та тижневих проміжках [154] у більшості пульсарів. Точність вимірювань МД в даній роботі становила $10^{-4} \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. Крім того, на більш високих частотах МД виявилася вищою, ніж відома до того у більшості пульсарів (для J0953+0755 частотні смуги становили 325 та 610 МГц). Цей ефект був зафіксований й іншими авторами [151]. Такі флуктуації МД пов'язують з градієнтною зміною локальної електронної концентрації в МЗС. Але ніхто раніше не фіксував флуктуацій МД на мілісекундних інтервалах часу.

Виявлена нами різниця МД, як показано вище, швидше за все виникає поблизу пульсара. Це дозволяє використовувати параметр МД для зондування магнітосфери пульсара вздовж променя зору. У роботі [172] розглядається така можливість. Точне значення МД визначається за допомогою тонкої структури на різних частотах спостережень (на прикладі пульсара В1133+16). Імпульс, який був випромінений на всіх частотах одночасно, але з різних висот в магнітосфері, набуває різну МД. Звідси можна оцінити час аберації та ретардації імпульсу.

Вищезгадане показує, що аналіз дисперсійної затримки відіграє значну роль в дослідженні пульсарів та обробці їх сигналів, а параметр МД має складну залежність від концентрації електронів на промені. Значення МД, що спостерігається, слід оцінювати в кожному окремому випадку особливо в низькочастотному спектрі.

3.3.4 Тонка структура радіовипромінювання пульсара J0953+0755

Наступний етап обробки даних полягав в отриманні двох профілів компонент імпульсу з різною часовою роздільною здатністю. Профіль з відносно низькою роздільною здатністю — «гладкий» профіль, віднімається від профілю з відносно великою роздільною здатністю — «детального» профілю. Після такої процедури зростає контрастність тонкої структури, яка потенційно міститься в «детальному» профілі імпульсу.

Профіль з високою часовою роздільною здатністю, оброблений когерентним методом, потенційно містить тонку структуру (див. рис. 3.16 (a)). Ми обрали часову роздільну здатність $\delta t = 4$ мкс таким чином, щоби вона була значно менша за час розсіяння цього пульсара на частотах спостереження ($\tau_{sc} = 1$ мс на частоті 25 МГц). Це і є «детальний» профіль імпульсу, в якому може проявлятися тонка структура радіовипромінювання.

Часова роздільна здатність другого профілю (див. рис. 3.16 (b)) становить 4 мс (тобто в 1000 разів гірша, ніж у першого профілю, та у кілька разів вища за сталу часу розсіяння). Це «гладкий» профіль імпульсу, який не містить в собі жодних

тонких компонент. Для того, щоб обидва профілі мали однакову кількість часових відліків, апаратна роздільна здатність «гладкого» профілю штучно приводилась до значення 4 мкс.

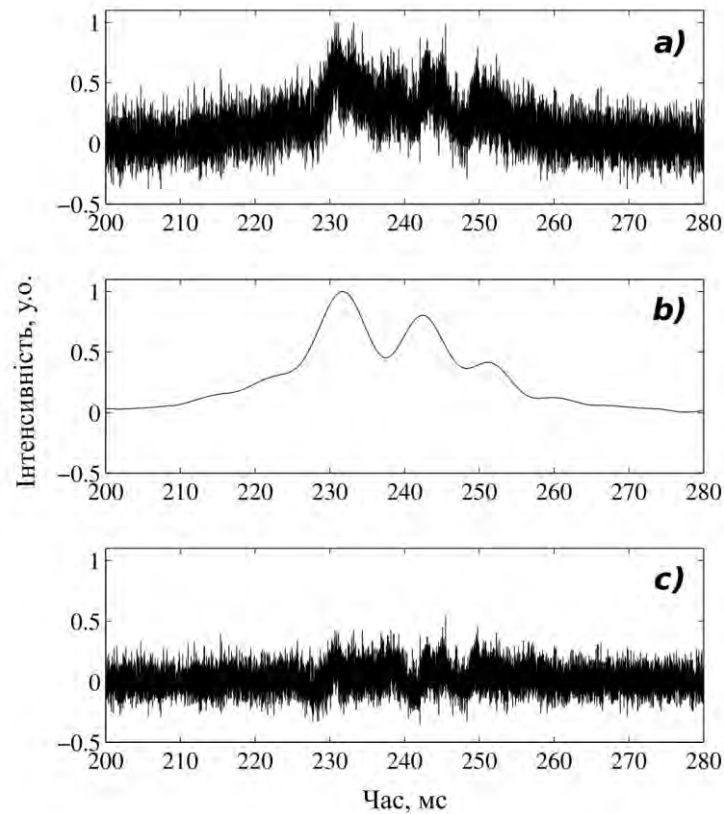


Рис. 3.16. Профілі АІ пульсара J0953+0755 з різними часовими роздільними здатностями. «Детальний» профіль (a) має 4 мкс; «гладкий» профіль (b) має 4 мс. Результат віднімання двох верхніх профілів (c) збільшує контраст тонкої структури.
 $DM_{odd} = 2.9720 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$.

Цю процедуру слід застосовувати двічі для профілів імпульсу з двома значеннями МД. Таким чином підвищується співвідношення С/Ш в кожній парі компонент. Для подальшого аналізу пари компонент відокремлюються одна від одної за допомогою двогорбого вікна у часовій області. Відокремлені пари компонент, а також їх взаємна кореляція, представлені на малюнку 3.17. З ККФ

видно, що характерна ширина однієї компоненти складає $\Delta\sigma = 2 — 3$ мс, а сусідні максимуми відстоять один від одного на 6.25 мс.

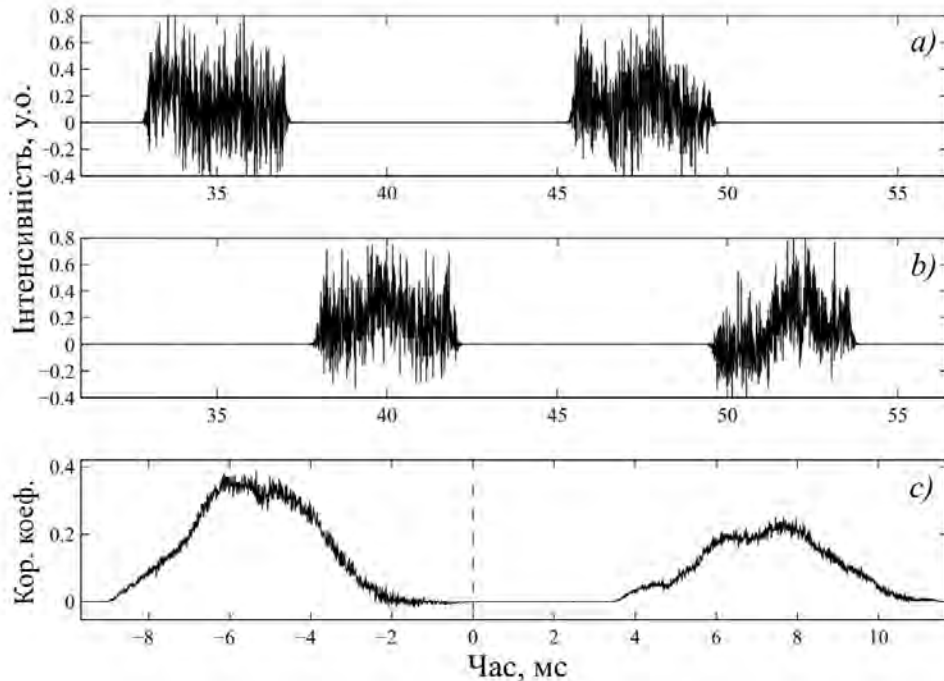


Рис. 3.17. Відокремлені пари компонент АП пульсара J0953+0755 та їхня взаємна кореляція. Результат віднімання двох профілів імпульсу з високою ($\delta t = 4$ мкс) та низькою ($\delta t = 4$ мс) роздільними здатностями для (a) парних компонент з $DM_{odd} = 2.9720$ $\text{пк}\cdot\text{см}^{-3}$; (b) непарних компонент з $DM_{even} = 2.9730$ $\text{пк}\cdot\text{см}^{-3}$ АП пульсара J0953+0755. Пари компонент відокремлені одна від одної двогорбим часовим вікном. c) взаємна кореляція двох верхніх профілів з апаратною роздільною здатністю $\delta t = 4$ мкс.

Після зазначеної процедури, співвідношення С/Ш в обох парах компонент стало достатнім для виявлення тонкої структури на АКФ в кожній з двох пар (див. рис. 3.18). На АКФ, а також на ККФ цих двох пар (рис. 3.19 (c)) видно структури різних масштабів кореляції, які знаходяться в межах АП. Найкоротша структура має час кореляції близько $\tau_{sh} \approx 1$ мс (вказана стрілками на АКФ). Масштаби 3.5 мс та

4 мс відповідають інтервалам двогорбого вікна, яке було застосовано для відокремлення компонент.

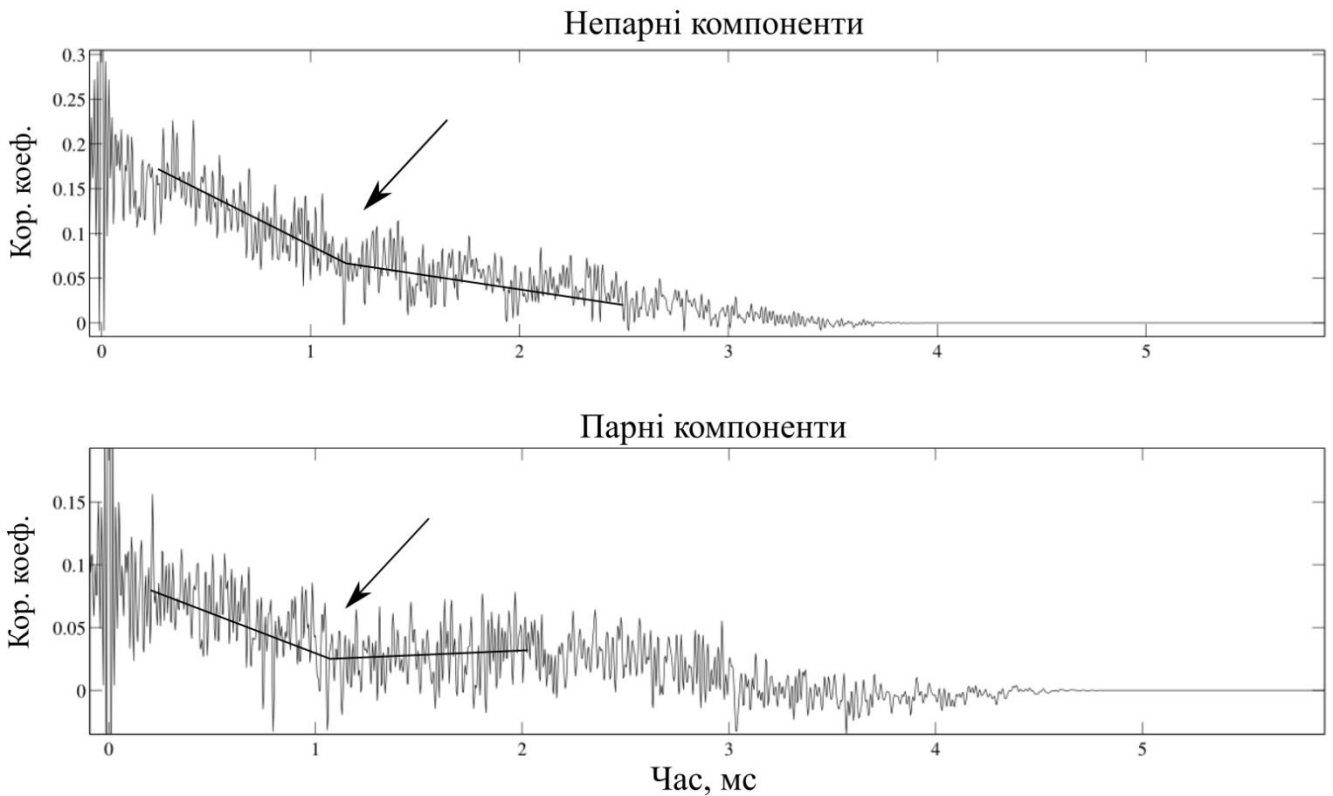


Рис. 3.18. АКФ профілів двох пар компонент АП пульсара J0953+0755. Верхня панель: непарні компоненти з $DM_{odd} = 2.9720$ пк·см⁻³; нижня панель: парні компоненти $DM_{even} = 2.9730$ пк·см⁻³. Пари компонент відокремлені одна від одної, в кожній парі підвищена контрастність. Апаратна часова роздільна здатність $\delta t = 4$ мкс.

Час кореляції $\tau_{sh} = 1$ мс відповідає частотному спектру ~ 1 кГц. При цьому, характерний спектр мерехтінь на неоднорідностях електронної концентрації в МПС складає ~ 1 Гц, а в іоносфері Землі, відповідно, ~ 0.1 Гц [120]. Це, швидше за все, означає, що найкоротший масштаб тонкої структури формується в межах плазми в магнітосфері пульсара або в межах пульсарного вітру.

За характерною шириною тонкої структури $\tau_{sh} = 1$ мс можливо дати оцінку діаметру променя, що випромінює ці тонкі компоненти імпульсу. Вона складає $\Delta s = c \tau_{sh} = 3 \cdot 10^5$ м.

Отриманий час кореляції тонкої структури τ_{sh} дозволяє оцінити Лоренц-фактор γ заряджених частинок, що випромінюють в цьому діапазоні. Абераційне стиснення діаграми спрямованості пучка електронів пропорційно часу кореляції тонкої структури. З іншого боку, кут розкриття діаграми спрямованості є зворотно пропорційним Лоренц-фактору зарядів. Тому справедливо рівняння:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{P_0}{\tau_{sh}} \approx 253, \quad (3.2)$$

де v - швидкість електронів, c — швидкість світла, P_0 — період обертання пульсара.

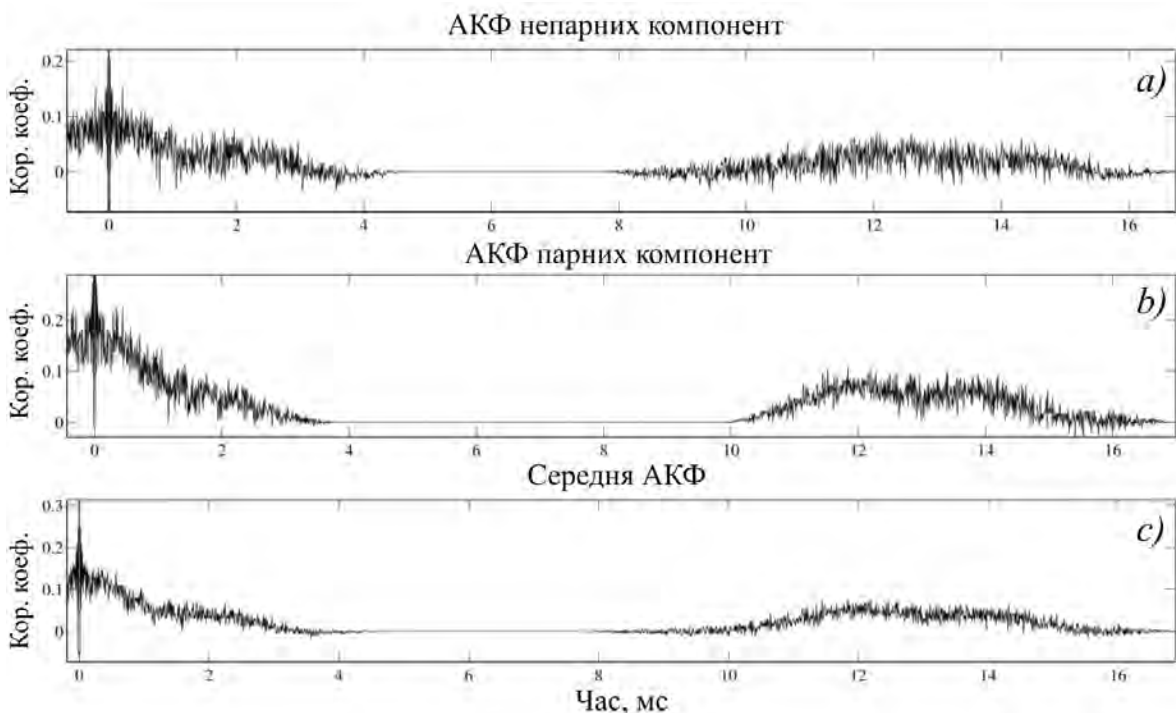


Рис. 3.19. АКФ різних пар компонент профілю АП пульсара J0953+075. *a)* АКФ парних компонент; *b)* АКФ непарних компонент; *c)* середня АКФ (між двома верхніми профілями). Апаратна роздільна здатність $\delta t = 4$ мкс.

Чотирьохкомпонентну структуру та різницю у параметрі МД в межах АП можливо пояснити наступними чином.

1. Пари компонент випромінюються в різних областях в магнітосфері пульсара. Якщо компоненти випромінюються з проміжком в $\Delta\tau = 6.25$ мс (відстані між сусідніми компонентами на динамічному спектрі імпульсу, рис. 3.15, верхні панелі), то груба оцінка радіальної різниці між областями випромінювання складає $\Delta l = c\Delta\tau = 1875$ км.
2. Радіохвиля розпадається на звичайну та незвичайну моди випромінювання при проходженні через сильне магнітне поле пульсара. Зареєстроване випромінювання має високу ступінь лінійної поляризації, про що свідчить ефект Фарадея, який спостерігається на динамічному спектрі (рис. 3.13, рис. 3.15, верхні панелі). У сильному магнітному полі виникає двопротенезаломлення та еліптично поляризована хвиля розпадається на дві моди випромінювання. Дане явище було відкрито у деяких пульсарів [173]. На низьких частотах спостереження цей ефект особливо контрастний.

3.3.5 Підсумки аналізу спостережень пульсара J0953+0755

Аналіз радіовипромінювання пульсара J0953+0755 у декаметровому діапазоні показав стрибок (швидку зміну) параметру МД у різних компонент одного АП. Оскільки проміжок часу між парами компонент складає всього близько 6 мс, можна вважати, що цей ефект народжується в навколишньому просторі біля НЗ: в магнітосфері чи в пульсарному вітрі. Використовуючи дані варіації МД вдалося розділити магнітосферу пульсара та оцінити відстань між областями випромінювання пар компонент, яка склала 1875 км. Різниця висоти по параметру МД між областями випромінювання різних пар становить $1 \cdot 10^{-3}$ пк·см⁻³.

Різниця МД, яка отримана в цій дисертації, може бути використана в подальших теоретичних роботах, пов'язаних із побудовою моделі магнітосфери. Використовуючи певний закон розподілення електронів у магнітосфері, як наприклад закон Голдрайха-Джуліана просторового розподілу зарядів (1.1), то

можливо дати безпосередні оцінки висоти та відстані між областями випромінювання у магнітосфері.

Аналізуючи різні компоненти імпульсу окремо вдалось зафіксувати тонку структуру радіовипромінювання пульсара J0953+0755. Для обох пар компонент її характерний час кореляції склав $\tau_{sh} \approx 1$ мс. За встановленим часом кореляції вдалось оцінити лінійний розмір області випромінювання, що склав $\Delta s = 3 \cdot 10^5$ м в діаметрі, та Лоренц-фактор зарядів, які є джерелом генерації цієї тонкої структури, який становив $\gamma \approx 253$. Тонка структура декаметрового радіовипромінювання цього пульсара спостерігається вперше. Цей результат є важливим у розрізі дослідження тонкої структури пульсара J0953+0755 у широкому діапазоні частот, а також вивчення АІ та гігантських імпульсів цього пульсара.

Отримані результати дозволили розділити магнітосферу пульсара J0953+0755 перпендикулярно та вздовж променя зору.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У цьому розділі представлені результати обробки даних спостережень пульсарів J0953+0755, J0814+7429 та J0243+6257, які були проведені у хвильовому режимі реєстрації радіовипромінювання з високою часовою роздільною здатністю на радіотелескопі УТР-2. В ході спостережень у всіх пульсарів були зафіксовані АП. Ці імпульси були досліджені за допомогою кореляційного та спектрального аналізу. Метою аналізу був пошук тонкої структури радіовипромінювання цих пульсарів та оцінка характерного часу розсіяння.

Були розроблені алгоритми, що дозволяють підвищити контраст кореляційних функцій для пошуку тонкої структури. Завдяки цьому вперше у декаметровому діапазоні було зафіксовано тонку структуру радіовипромінювання пульсара J0953+0755. Також підтверджено її наявність у пульсара J0814+7429. АП пульсара J0243+6257 є сильно гладкими через сильне розсіяння у середовищі поширення, тож у декаметровому діапазоні найкоротший можливий для реєстрації масштаб його випромінювання є не меншим за 12 мс.

У пульсарів J0814+7429 та J0243+6257 виявлені два масштаби когерентності розсіяння імпульсів. Вони розділяються на імпульси із «короткою» та «довгою» шкалою випромінювання.

У всіх досліджуваних пульсарів були проведені оцінки точного значення МД у декаметровому діапазоні за допомогою когерентного методу усунення дисперсійної затримки. При схожих значеннях МД у цих трьох пульсарів стала часу розсіяння пульсара J0243+6257 відрізняється майже на порядок. Це говорить про те, що для оцінки відстані до пульсара знання тільки одного параметру МД недостатньо. Для коректної оцінки слід враховувати розсіяння сигналу на флуктуаціях електронної плазми та спектр цих флуктуацій.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [5 — 7, 9, 12, 17, 18, 20 — 25].

ВИСНОВКИ

У результаті проведених комплексних досліджень досягнуто головну мету роботи — отримано просторове розділення магнітосфери пульсара перпендикулярно та вздовж променя зору за допомогою таких параметрів випромінювання, як міра дисперсії та характерний час когерентності тонкої структури. Показано, яким чином розсіяння лімітує нижній масштаб тонкої структури, який можливо спостерігати на певній частоті.

Головними оригінальними результатами роботи є наступні:

1. Вперше в широкому діапазоні частот знайдено ефект швидкої зміни міри дисперсії на ультракоротких інтервалах часу 5 — 6 мс в межах індивідуального імпульсу пульсара. Цей ефект спостерігався в аномально інтенсивному імпульсі пульсара J0953+0755. Такий стрибок міри дисперсії має відбуватись в самій магнітосфері пульсара чи в межах пульсарного вітру. Це дозволяє розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору.

2. Вперше у пульсара J0953+0755 виявлено тонку структуру радіовипромінювання з характерним часом когерентності 1 мс у декаметровому діапазоні. Це дозволило оцінити лінійні розміри ділянки випромінювання в магнітосфері та розділити магнітосферу цього пульсару за довготою. Також оцінено Лоренц-фактор зарядів, які є джерелом генерації тонкої структури.

3. Вперше у пульсара J0243+6257 зареєстровано та проведено аналіз індивідуальних аномально інтенсивних імпульсів. Дано оцінку сталої часу розсіяння радіовипромінювання пульсара J0243+6257 у декаметровому діапазоні, яка наразі є першою та єдиною в широкому діапазоні частот. Виявлено, що у декаметровому діапазоні в його радіовипромінюванні присутні два масштаби когерентності. Показано, що розсіяння сигналу від цього пульсара на просторових флуктуаціях електронної концентрації середовища поширення не дозволяє спостерігати тонку структуру в даному частотному діапазоні.

4. Вперше у пульсара J0814+7429 зафіксовано два масштаби когерентності радіовипромінювання. Вірогідно, вони пов'язані з морфологією тонких компонент, з яких складається індивідуальні імпульси. За допомогою методів деконволюції вдалось усунути вплив розсіяння на найінтенсивніші імпульси цього пульсара в рамках моделі тонкого фазового екрану. Показано, що широкі компоненти таких імпульсів складаються із серії більш коротких компонент з шириною 2 — 3 мс. У даного пульсара зафіксована тонка структура радіовипромінювання, за допомогою якої дано оцінку лінійного розміру ділянки випромінювання в його магнітосфері.

5. Запропоновано та втілено оригінальні методи обробки декаметрового радіовипромінювання пульсарів, які мінімізують вплив середовища поширення сигналу та дозволяють проводити пошук тонкої структури радіовипромінювання. До них відносяться прискорені методи постдетекторного та когерентного усунення дисперсійної затримки, які дозволяють робити обробку сигналу майже вдвічі швидше. Також, до них відносяться методи підвищення контрасту кореляційних функцій інтенсивності імпульсу, які виявляють наявні характерні масштаби тонкої структури радіовипромінювання.

Загалом отримані результати підтверджують необхідність проведення досліджень тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні та показують переваги низькочастотного діапазону для спостереження тонких проявів ефектів поширення. Але це стосується тільки тих близьких до Землі пульсарів, які випромінюють аномально інтенсивні імпульси, а значення міри дисперсії та міри розсіяння в напрямку на ці пульсари є відносно малими.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ulyanov O. M., Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars / Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Mukha D. V. and Seredkina A. A. // *Baltic Astronomy*. – 2013. – Vol. 22. – P. 53 – 65.
2. Vasylieva I. Y., Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey / Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I. and Seredkina A. A. // *Odessa Astronomical Publications*, 2013. – Vol. 26. – P. 159.
3. Ульянов О.М., Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров / Ульянов О. М., Шевцова А. И. и Скорик А. А. // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2013. – Т. 109. – No. 4. – С. – 159 – 168.
4. Ульянов О. М., Алгоритмы определения поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров / Ульянов О. М., Шевцова А. И. и Скорик А. А. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19. – No. 2. – С. – 101–110.
5. Vasylieva I. Y., Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results / Vasylieva I. Y., V. V. Zakharenko, Konovalenko A.A. [et al], ... Skoryk A. O. // *Radio physics and Radio astronomy*. – 2014. – Vol. 19. – No. 3. – P. 197.
6. Ulyanov O. M., Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range / Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Shevtsova A. I. [et al.] // *MNRAS*. – Jan. 2016. – Vol. 455. – Pp. 150 – 157.
7. Konovalenko A., The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT / Konovalenko A., Sodin V., Zakharenko V., ... Skoryk A. [et al.] // *Experimental Astronomy*. – Aug. 2016. – Vol. 42. – Pp. 11 – 48.
8. Kravtsov I. P., Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / Kravtsov I. P., Zakharenko V.V., Vasylieva I.Y., ... Skoryk A. O. [et al.] // *Odessa Astronomical Publications*. – 2016. – Vol. 29. – P. 179.
9. Коноваленко А. А., Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения /

- Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. ... Скорик А. О. [и др.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 2016. – Т. 21. – No. 2. – С. 83 – 131.
10. Zakharenko V., Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT / Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., ... Skoryk A. [et al.] // Journal of Astronomical Instrumentation. – Mar. 2016. – Vol. 5. – Pp. 1641010 – 738.
 11. Ульянов О. М. Моделирование эффектов распространения импульсного излучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. А. Середкина, А. И. Шевцова // "Электромагнитные методы исследования окружающего пространства" : материалы 11 укр. конф., Харьков, 25 — 27 сентября 2012 г. / ХНУ им. В.Н. Каразина, Харьков, 2012. – Пост. 16.
 12. Ulyanov O. M. Origin of the pulsar pulse fine structure / O. M. Ulyanov, A. A. Seredkina, A. I. Shevtsova // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. — Vol. 8, No. S291. — P. 527–529.
 13. Ulyanov O. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Seredkina // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. — Vol. 8, No. S291. — P. 530–532.
 14. Ulyanov O. M. Investigation of the earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // Advances in Radio Astronomy if Near-Erath Environment : proceedings of the Ventspils International Radio Astronomy Conference, 13 — 15 August 2012. — Ventspils, Latvia, 2012. – P. 53 – 65.
 15. Seredkina A. O. The modeling of propagation effects of pulsar pulse radiation / A. O. Seredkina, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YSF «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics» : proceedings of the XII Kharkiv Young Scientist Conference on, Kharkiv, 4 — 7 December, 2012. — Kharkiv, Ukraine, 2012. — CD-ROM.

16. Ulyanov O. M. The methods of polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. M. Ulyanov, A. A. Shevtsova, A. A. Seredkina // Cosmic magnetic fields: Legacy of A.B. Severny : proceedings of the COSPAR Symposium, Nauchny, 1 — 6 September 2013 : abstract. — Nauchny, Ukraine, 2012. - P. 159 – 168.
17. Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 decametric radio emission / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YERAC : proceedings of the 44th Young European Radio Astronomers Conference, Torun, Poland, 8 — 12 September 2014. — Torun, Poland, 2014. — P. 6.
18. Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 radiation in the low frequency range radio astronomy / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova [et al.] // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : proceedings of the 14th Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 14 — 17 October. — Kharkiv, Ukraine, 2014. – CD-ROM.
19. Ulyanov O. M. New technique of testing and calibration of the UTR-2 radio telescope / O. M. Ulyanov, M. A. Sidorchuk, V. V. Zakharenko, S. N. Yerin, I. N. Bubnov, A. A. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, D. V. Mukha, E. R. Rudavin // Antenna Theory and Techniques, Kharkiv, 21 — 24 April, 2015 : proceedings of the 10th International Conference. — Kharkiv, Ukraine, 2015. – P. 6.
20. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // YERAC : proceedings of the 45th Young European Radio Astronomers Conference, Ventspils, 19 — 21 August, 2015. — Ventspils, Latvia, 2015. – P. 86.
21. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // YSF : proceedings of the International Young Scientists Forum on Applied Physics, Dnipropetrovsk, 29 September – 2 October 2015. – Dnipropetrovsk, 2015. – CD-ROM.
22. Skoryk A. O. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. I. Shevtsova //

- YSF : proceedings of the 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics, Kharkiv, 14 — 20 August, 2016. — Kharkiv, 2016. — CD-ROM.
23. Skoryk A. O. Anomalously intense pulses as a pulsar magnetosphere probes / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova. — YSF: proceedings of the 2017 International Young Scientists Forum on Applied Physics, Lviv, 17 — 20 October, 2017. — Lviv, 2017. — CD-ROM.
 24. Ulyanov O. M. Rotation measure estimation for anomalously intense pulses of PSR J0243+6257 / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, V. V. Zakharenko, A. O. Skoryk, Ia. Y. Vasylieva // “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology” : proceedings of the 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-school, Odessa, 13 — 20 August, 2017. — Odessa, 2017. — P. 31.
 25. Скорик А. А., Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 у дециметровом диапазоне / А. А. Скорик, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. И. Шевцова, Я. Ю. Васильева, М. С. Плахов, И. П. Кравцов // Радиофизика и радиоастрономия.— 2017.— Т. 22,— No. 2.— С. 93 — С. 111.
 26. Hewish A. Observation of a rapidly pulsating radio source / A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington [et al.] // Nature. — 1968. — Vol. 217, No. 5130. — P. 709–713.
 27. Pacini F. Energy emission from a neutron star / F. Pacini // Nature. — 1967. — Vol. 216, No. 5115. — P. 567–568.
 28. Baade W. Remarks on super-novae and cosmic rays / W. Baade, F. Zwicky // Physical Review. — 1934. — Vol. 46, No. 1. — P. 76–77.
 29. Малов И. Ф. Радиопульсары / И. Ф. Малов. — М. : Наука, 2004. — 191 с.
 30. Manchester R. N. The australia telescope national facility pulsar catalogue / R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, M. Hobbs // AJ. — 2005. — Vol. 129, No. 4. — P. 1993.
 31. Zakharenko V. V. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars / V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, A. A. Konovalenko [et al.] // MNRAS. — 2013. — Vol. 431, No. 4. — P. 3624–3641.

32. Edwards R. T. The swinburne intermediate-latitude pulsar survey / R. T. Edwards, M. Bailes, W. V. Straten, M. C. Britton // *MNRAS*. — 2001. — Vol. 326, No. 1. — P. 358–374.
33. Lovelace R. V. E. On the discovery of the period of the Crab nebular pulsar / R. V. E. Lovelace, G. L. Tyler // *The Observatory*. — 2012. — Vol. 132. — P. 186–188.
34. Smith D. A. Gamma-ray pulsars with Fermi / D. A. Smith, L. Guillemot, M. Kerr [et al.] // *ArXiv e-prints*. — 2017.
35. Goldreich P. Pulsar electrodynamics / P. Goldreich, W. H. Julian // *ApJ*. — 1969. — Vol. 157. — P. 869.
36. Malov I. F. Angle between the magnetic field and the rotation axis in pulsars / I. F. Malov // *Sov. Astr.* — 1990. — Vol. 34. — P. 189.
37. Sturrock P. A. A model of pulsars / P. A. Sturrock // *ApJ*. — 1971. — Vol. 164. — P. 529.
38. Ruderman M. A. Theory of pulsars – polar caps, sparks, and coherent microwave radiation / M. A. Ruderman, P. G. Sutherland // *ApJ*. — 1975. — Vol. 196. — P. 51–72.
39. Radhakrishnan V. Fifteen months of pulsar astronomy / V. Radhakrishnan // *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*. — 1969. — Vol. 1. — P. 254–263.
40. Komesaroff M. M. Possible mechanism for the pulsar radio emission / M. M. Komesaroff // *Nature*. — 1970. — Vol. 225. — P. 612–614.
41. Lyne A. G. Pulsar astronomy / A. G. Lyne, F. Graham-Smith, F. Graham-Smith. — Cambridge University Press, 2006.
42. Cordes J. M. Pulsar polarization fluctuations at 430 MHz with microsecond time resolution / J. M. Cordes, T. H. Hankins // *ApJ*. — 1977. — Vol. 218. — P. 484–503.
43. Cordes J. M. Pulsar microstructure – periodicities, polarization and probes of pulsar magnetospheres / J. M. Cordes // *Australian Journal of Physics*. — 1979. — Vol. 32. — P. 9–24.

44. Backer D. C. Statistical summaries of polarized pulsar radiation / D. C. Backer, J. M. Rankin // *ApJ Suppl. Ser.* — 1980. — Vol. 42. — P. 143–173.
45. Ginzburg V. L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas / V. L. Ginzburg. — Oxford : Pergamon, 1970.
46. Zheleznyakov V. V. Radiation in astrophysical plasmas / V. V. Zheleznyakov. — Moscow : Yanus-K, 1997. — 528 p.
47. Lyubarskii Y. E. Resonant inverse Compton scattering by secondary pulsar plasma / Y. E. Lyubarskii, S. A. Petrova // *A&A.* — 2000. — Vol. 355. — P. 406–412.
48. Drake F. D. Second periodic pulsation in pulsars / F. D. Drake, H. D. Craft // *Nature.* — 1968. — Vol. 220. — P. 231–235.
49. Staelin D. H. Slow periodic variations in pulsars / D. H. Staelin, M. S. Ewing, R. M. Price, J. M. Sutton // *ApJ Lett.* — 1970. — Vol. 160. — P. L7.
50. Rankin J. M. Toward an empirical theory of pulsar emission. III - mode changing, drifting subpulses, and pulse nulling / J. M. Rankin // *ApJ.* — 1986. — Vol. 301. — P. 901–922.
51. Gil J. Drifting subpulses and inner acceleration regions in radio pulsars / J. Gil, G. I. Melikidze, U. Geppert // *A&A.* — 2003. — Vol. 407. — P. 315–324.
52. Hankins T. H. Microsecond intensity variations in the radio emissions from CP 0950 / T. H. Hankins // *ApJ.* — 1971. — Vol. 169. — P. 487.
53. Smirnova T. V. Dual-frequency correlation of pulsar micropulses / T. V. Smirnova, V. A. Soglasnov, M. V. Popov, A. Y. Novikov // *Sov. Astr.* — 1986. — Vol. 30. — P. 51–56.
54. Rickett B. J. The location, spectrum and beamwidth of pulsar radiation from polar cap models / B. J. Rickett, J. M. Cordes // *Symposium – International Astronomical Union.* — 1981. — Vol. 95. — P. 107–109.
55. Novikov A. Y. Observations of pulsar PSR 0809+74 at a frequency of 25 MHz with a time resolution of 100 microsec / A. Y. Novikov, M. V. Popov, V. A. Soglasnov [et al.] // *Ahz.* — 1984. — Vol. 61. — P. 343–347.

56. Hankins T. H. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar / T. H. Hankins, J. S. Kern, J. C. Weatherall, J. A. Eilek // *Nature*. — 2003. — Vol. 422. — P. 141–143.
57. Hankins T. H. Radio emission signatures in the Crab pulsar / T. H. Hankins, J. A. Eilek // *ApJ*. — 2007. — Vol. 670, No. 1. — P. 693.
58. Cordes J. M. Pulsar radiation as polarized shot noise / J. M. Cordes // *ApJ*. — 1976. — Vol. 210. — P. 780–791.
59. Kuzmin A. D. High temporal resolution observations of the pulsar microstructure at 102 MHz / A. D. Kuzmin, P. A. Hamilton, Y. P. Shitov [et al.] // *MNRAS*. — 2003. — Vol. 344, No. 4. — P. 1187–1192.
60. Popov M. V. Microstructure of pulsars PSR:0809+74 PSR:0950+08 and PSR:1133+16 in the 67-102-MHz range / M. V. Popov, T. V. Smirnova, V. A. Soglasnov // *Sov. Astr.* — 1987. — Vol. 31. — P. 529.
61. Soglasnov V. A. A statistical analysis of the finescale time structure of PSR1133+16 / V. A. Soglasnov, M. V. Popov, O. A. Kuzmin // *Sov. Astr.* — 1983. — Vol. 27. — P. 169–173.
62. Cordes J. M. Quasiperiodic microstructure in radio pulsar emissions / J. M. Cordes, J. M. Weisberg, T. H. Hankins // *AJ*. — 1990. — Vol. 100. — P. 1882–1891.
63. Ferguson D. C. A case for light-cylinder pulsar models / D. C. Ferguson // *Comments on Astrophysics*. — 1981. — Vol. 9. — P. 127–143.
64. Ferguson D. C. Correlation of pulsar microstructure over 1 GHz / D. C. Ferguson, V. Boriakoff // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1979. — Vol. 11. — P. 704.
65. Popov M. V. Pulsar microstructure and its quasi-periodicities with the S2 VLBI system at a resolution of 62.5 nanoseconds / M. V. Popov, N. Bartel, W. H. Cannon [et al.] // *A&A*. — 2002. — Vol. 396. — P. 171–187.
66. Hankins T. H. Short-timescale structure in two pulsars / T. H. Hankins // *ApJ Lett.* — 1972. — Vol. 177. — P. L11.
67. Craft H. D. Submillisecond radio intensity variations in pulsars / H. D. Craft, J. M. Comella, F. D. Drake // *Nature*. — 1968. — Vol. 218, No. 5147. — P. 1122–1124.

68. Taylor J. H. Observations of rapid fluctuations of intensity and phase in pulsar emissions / J. H. Taylor, G. R. Huguenin // *ApJ*. — 1971. — Vol. 167. — P. 273.
69. Taylor J. H. Polarization of the drifting subpulses of pulsar 0809+74 / J. H. Taylor, G. R. Huguenin, R. M. Hirsch, R. N. Manchester // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1971. — Vol. 3. — P. 365.
70. Rickett B. J. Amplitude-modulated noise – an empirical model for the radio radiation received from pulsars / B. J. Rickett // *ApJ*. — 1975. — Vol. 197. — P. 185–191.
71. Cordes J. M. Observational limits on the location of pulsar emission regions / J. M. Cordes // *ApJ*. — 1978. — Vol. 222. — P. 1006–1011.
72. Benford G. Model for the microstructure emission of pulsars / G. Benford // *MNRAS*. — 1977. — Vol. 179, No. 3. — P. 311–315.
73. Benford G. Coherent pulsar radio radiation by antenna mechanisms: general theory / G. Benford, R. Buschauer // *MNRAS*. — 1977. — Vol. 179, No. 2. — P. 189–207.
74. Tzach D. Coherent curvature radiation from an electron beam rotating in a plasma / D. Tzach, G. Benford, C. W. Roberson, N. Rostoker // *Journal of Applied Physics*. — 1979. — Vol. 50, No. 10. — P. 6241–6246.
75. Buschauer R. Narrowband versus broadband emission processes in pulsars / R. Buschauer, G. Benford // *MNRAS*. — 1980. — Vol. 190, No. 4. — P. 945–959.
76. Chian A. C.-L. Self-modulational formation of pulsar microstructures / A. C.-L. Chian, C. F. Kennel // *Astrophysics and Space Science*. — 1983. — Vol. 97, No. 1. — P. 9–18.
77. Boriakoff V. Microstructure crosscorrelation in pulses simultaneously observed at frequencies separated by up to 1 GHz / V. Boriakoff, D. C. Ferguson // *Pulsars: 13 Years of Research on neutron Stars*. — 1981. — Vol. 95. — P. 191–196.
78. Boriakoff V. Pulsar AP 2016+28 - high-frequency periodicity in the pulse microstructure / V. Boriakoff // *ApJ Lett*. — 1976. — Vol. 208. — P. L43–L46.

79. Boriakoff V. On the radio pulse emission mechanism of PSR 1133+16 simultaneous dual-frequency high time resolution observations / V. Boriakoff // *ApJ*. — 1983. — Vol. 272. — P. 687–701.
80. Ferguson D. C. A case for light-cylinder pulsar models / D. C. Ferguson // *Comments on Astrophysics*. — 1981. — Vol. 9. — P. 127–143.
81. Ventura J. E. Neutron stars: theory and observation / J. E. Ventura, D. Pines. — Springer Netherlands, 1991. — P. 592.
82. Blaschke D. Physics of neutron star interiors / D. Blaschke, N. K. Glendenning, A. Sedrakian. — Springer Science & Business Media, 2001. — 521 p.
83. Harding A. K. Propagation effects in a shearing field-free plasma and pulsar microstructure / A. K. Harding, E. Tadamaru // *ApJ*. — 1979. — Vol. 233. — P. 317–326.
84. Harding A. K. Propagation in a shearing plasma. II – turbulence and the frequency range of pulsar microstructure / A. K. Harding, E. Tadamaru // *ApJ*. — 1980. — Vol. 238. — P. 1054–1065.
85. Harding A. K. Propagation in a shearing plasma. III – magnetic field effects and pulsar microstructure periods / A. K. Harding, E. Tadamaru // *ApJ*. — 1981. — Vol. 243. — P. 597–611.
86. Machabeli G. Nature of microstructure in pulsar radio emission / G. Machabeli, D. Khechinashvili, G. Melikidze, D. Shapakidze // *MNRAS*. — 2001. — Vol. 327, No. 3. — P. 984–988.
87. Petrova S. A. Toward explanation of microstructure in pulsar radio emission / S. A. Petrova // *A&A*. — 2004. — Vol. 417. — P. L29–L32.
88. Petrova S. A. Interpretation of the low-frequency peculiarities in the radio profile structure of the Crab pulsar / S. A. Petrova // *MNRAS*. — 2008. — Vol. 385. — P. 2143–2150.
89. Petrova S. A. The mechanism of component formation out of the main pulse of a radio pulsar. I. the precursor / S. A. Petrova // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2008. — Vol. 13. — P. 5.

90. Ferrière K. M. The interstellar environment of our galaxy / K. M. Ferrière // *Reviews of Modern Physics*. — 2001. — Vol. 73, No. 4. — P. 1031–1066.
91. Tanaka Y. The diffuse soft x-ray sky – astrophysics related to cosmic soft x-rays in the energy range 0.1-2.0 keV / Y. Tanaka, J. A. M. Bleeker // *Space Science Reviews*. — 1977. — Vol. 20. — P. 815–888.
92. Snowden S. L. A model for the distribution of material generating the soft x-ray background / S. L. Snowden, D. P. Cox, D. McCammon, W. T. Sanders // *ApJ*. — 1990. — Vol. 354. — P. 211–219.
93. Cordes J. M. The galactic distribution of free electrons / J. M. Cordes, J. M. Weisberg, D. A. Frail [et al.] // *Nature*. — 1991. — Vol. 354, No. 6349. — P. 121–124.
94. Phillips J. A. Electron density fluctuations in the local interstellar bubble / J. A. Phillips, A. W. Clegg // *Nature*. — 1992. — Vol. 360, No. 6400. — P. 137–139.
95. Taylor J. H. Pulsar distances and the galactic distribution of free electrons / J. H. Taylor, J. M. Cordes // *ApJ*. — 1993. — Vol. 411. — P. 674–684.
96. Gupta Y. Multiple imaging of pulsars by the ISM / Y. Gupta // *International Astronomical Union Colloquium*. — 1996. — Vol. 160. — P. 463–467.
97. Rickett B. J. Radio propagation through the turbulent interstellar plasma / B. J. Rickett // *Ann. Rev. of A&A*. — 1990. — Vol. 28, No. 1. — P. 561–605.
98. Schwenn R. Large-scale structure of the interplanetary medium / R. Schwenn // *Physics of the Inner Heliosphere I*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 1990. — P. 99–181.
99. Kelley M. C. The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics / M. C. Kelley. — Academic Press, 2009. — 593 p.
100. Ul'yanov O. M. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths / O. M. Ul'yanov, V. V. Zakharenko // *Astr. Rep.* — 2012. — Vol. 56. — P. 417–429.
101. Hankins T. H. Removal of dispersion distortion from pulsar radio signals / T. H. Hankins // *A&A Suppl. Ser.* — 1974. — Vol. 15. — P. 363.

102. Hankins T. H. Pulsar signal processing / T. H. Hankins, B. J. Rickett // *Methods in Computational Physics. Volume 14 – Radio astronomy.* — 1975. — Vol. 14. — P. 55–129.
103. Mylostna K. Study of Saturn electrostatic discharges in a wide range of time scales / K. Mylostna, V. Zakharenko, A. Konovalenko [et al.] // *Odessa Astronomical Publications.* — 2013. — Vol. 97. — P. 251.
104. Cordes J. M. NE2001.I. a new model for the galactic distribution of free electrons and its fluctuations / J. M. Cordes, T. J. W. Lazio // *ArXiv Astrophysics e-prints.* — 2002.
105. Downs G. S. Techniques for measuring arrival times of pulsar signals 1: DSN observations from 1968 to 1980 / G. S. Downs, P. E. Reichley // *NASA STI/Recon Technical Report N.* — 1980. — Vol. 80.
106. Lee K. J. Model-based asymptotically optimal dispersion measure correction for pulsar timing / K. J. Lee, C. G. Bassa, G. H. Janssen [et al.] // *MNRAS.* — 2014. — Vol. 441, No. 4. — P. 2831–2844.
107. Salpeter E. E. Pulsar amplitude variations / E. E. Salpeter // *Nature.* — 1969. — Vol. 221. — P. 31–33.
108. Rickett B. J. Frequency structure of pulsar intensity variations / B. J. Rickett // *Nature.* — 1969. — Vol. 221, No. 5176. — P. 158–159.
109. Rickett B. J. Interstellar scintillation and pulsar intensity variations / B. J. Rickett // *MNRAS.* — 1970. — Vol. 150. — P. 67.
110. Sutton J. M. Scattering of pulsar radiation in the interstellar medium / J. M. Sutton // *MNRAS.* — 1971. — Vol. 155, No. 1. — P. 51–64.
111. Narayan R. The physics of pulsar scintillation / R. Narayan // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A.* — 1992. — Vol. 341. — P. 151–165.
112. Scheuer P. A. G. Amplitude variations in pulsed radio sources / P. A. G. Scheuer // *Nature.* — 1968. — Vol. 218. — P. 920–922.

113. Armstrong J. W. Electron density power spectrum in the local interstellar medium / J. W. Armstrong, B. J. Rickett, S. R. Spangler // *ApJ*. — 1995. — Vol. 443. — P. 209–221.
114. Lazarian A. Turbulence in atomic hydrogen / A. Lazarian // *Proceedings of the 2nd Guillermo Haro Conference*. — Cambridge University Press. — 1999. — P. 95.
115. Lazarian A. Properties of interstellar turbulence and its implications / A. Lazarian, J. Cho, A. Esquivel, H. Yan. // *American Astronomical Society, 201st AAS Meeting*, id.47.02; *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 2002. — Vol. 34. — P. 1178.
116. Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds' numbers / A. N. Kolmogorov // *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. — 1941. — Vol. 30. — P. 301–305.
117. Rickett B. J. Interstellar scattering and scintillation of radio waves / B. J. Rickett // *Ann. Rev. of A&A*. — 1977. — Vol. 15. — P. 479–504.
118. Bhat N. D. R. Pulsar scintillation and the Local Bubble / N. D. R. Bhat, Y. Gupta, A. P. Rao // *ApJ*. — 1998. — Vol. 500, No. 1. — P. 262.
119. Lotova N. A. Spectrum of small-scale interplanetary plasma inhomogeneities / N. A. Lotova, I. V. Chashey // *GeomagnetISM and Aeronomy*. — 1973. — Vol. 12. — P. 695.
120. Kalinichenko N. N. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique / N. N. Kalinichenko // *Astrophysics and Space Science*. — 2009. — Vol. 319, No. 2–4. — P. 131–138.
121. Parker E. N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. / E. N. Parker // *ApJ*. — 1958. — Vol. 128. — P. 664.
122. Shapirovskaja N. I. Interpretation of pulsar long-term intensity variations / N. I. Shapirovskaja, W. Sieber // *A&A*. — 1984. — Vol. 136. — P. 171–174.
123. Romani R. W. Refractive effects in pulsar scintillation / R. W. Romani, R. Narayan, R. Blandford // *MNRAS*. — 1986. — Vol. 220, No. 1. — P. 19–49.

124. Bhat N. D. R. Multifrequency observations of radio pulse broadening and constraints on interstellar electron density microstructure / N. D. R. Bhat, J. M. Cordes, F. Camilo [et al.] // *ApJ*. — 2004. — Vol. 605, No. 2. — P. 759–783.
125. Cordes J. Pulsar space velocities from interstellar scintillations / J. Cordes, J. Weisberg // *Birth and Evolution of neutron Stars: Issues Raised by Millisecond Pulsars. Proceedings of the NRAO Workshop, held at the National Radio Astronomy Observatory (NRAO) Green Bank, West Virginia, June 6-8, 1984.* Edited by S.P. Reynolds and D.R. Stinebring. Green Bank: National Radio Astronomy Observatory. — 1984. — P. 138.
126. Coles W. A. Interplanetary scintillation observations of the high-latitude solar wind / W. A. Coles // *Space Science Reviews*. — 1995. — Vol. 72, No. 1–2. — P. 211–222.
127. Shishov V. I. Fluctuation structure of pulsar pulses scattered by a turbulent interstellar phase screen / V. I. Shishov // *Ahz*. — 1980. — Vol. 57. — P. 321–327.
128. Melrose D. What causes the circular polarization in pulsars? / D. Melrose // *Radio Pulsars, ASP Conference Proceedings*. — 2003. — Vol. 302. — P. 179.
129. Melrose D. B. Pulsar emissions / D. B. Melrose // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2003. — Vol. 45. — P. 523–534.
130. Sidorchuk M. A. Large-scale structure of the northern sky at decametric waves / M. A. Sidorchuk, O. M. Ulyanov, D. V. Shepelev V. A. and Mukha [et al.] // *Scientific Workshop – Astrophysics with E-LOFAR*. — 2008.
131. Roger R. S. Flux densities of radio sources at 22.25 MHz. / R. S. Roger, C. H. Costain // *AJ Supplement*. — 1968. — Vol. 73. — P. 199.
132. Izvekova V. A. Radio spectra of pulsars / V. A. Izvekova, A. D. Kuzmin, V. M. Malofeev, Y. P. Shitov // *Astrophysics and Space Science*. — 1981. — Vol. 78, No. 1. — P. 45–72.
133. Bruck Y. M. Decametric pulse radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919 / Y. M. Bruck, B. Y. Ustimenko // *Nature Physical Science*. — 1973. — Vol. 242, No. 117. — P. 58–59.

134. Ulyanov O. M. The detection of individual pulses of pulsars B0808+74; B0834+06; B0950+08; B0943+10; B1133+16 in decameter waverange / O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2006. — Vol. 11. — P. 113–133.
135. Ulyanov O. M. Two-frequency observations of six pulsars using UTR-2 and GEETEE radio telescopes / O. M. Ulyanov, A. Deshpande, V. V. Zakharenko [et al.] // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2007. — Vol. 12. — P. 5.
136. Malofeev V. M. Spectra of 45 pulsars / V. M. Malofeev, J. A. Gil, A. Jessner [et al.] // *A&A*. — 1994. — Vol. 285. — P. 201–208.
137. Ershov A. A. Detection of giant pulses from the pulsar PSR B1112+50 / A. A. Ershov, A. D. Kuzmin // *Astron. Lett.* — 2003. — Vol. 29, No. 2. — P. 91–95.
138. Popov M. V. Statistical properties of giant pulses from the Crab pulsar / M. V. Popov, B. Stappers // *A&A*. — 2007. — Vol. 470. — P. 1003–1007.
139. Hessels J. W. T. The GBT350 survey of the northern galactic plane for radio pulsars and transients / J. W. T. Hessels, S. M. Ransom, V. M. Kaspi [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. — 2008. — Vol. 983, No. 1. — P. 613–615.
140. Men A. V. The principles of the construction and characteristics of the radio telescope UTR-2 antennas / A. V. Men, L. G. Sodin, Sharykin N. K., Y. M. Bruk // *Antennas*. — 1978. — Vol. 26. — P. 15–57.
141. Braude S. I. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. IV – spectra of 266 discrete sources in the range 10 to 1400 MHz / S. I. Braude, A. V. Megn, B. P. Riabov [et al.] // *Astrophysics and Space Science*. — 1978. — Vol. 54. — P. 145–179.
142. Zakharenko V. V. Modernization of commutation devices and an improvement of main parameters of the UTR-2 radio telescope / V. V. Zakharenko, N. K. Sharykin, E. R. Rudavin // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel Supplement*. — 2005. — Vol. 5. — P. 90–92.
143. Ryabov V. B. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun,

- pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz / V. B. Ryabov, D. M. Vavriy, P. Zarka [et al.] // *A&A*. — 2010. — Vol. 510. — P. A16.
144. Ul'Yanov O. M. The parameters of pulsar subpulse emission at decameter wavelengths / O. M. Ul'Yanov, V. V. Zakharenko, Y. M. Bruck // *Astr. Rep.* — 2008. — Vol. 52. — P. 917–924.
145. Bruck Y. M. Binary-discrets delay lines (phase shifters) for broadband phase arrays with electronic control. / Y. M. Bruck, G. A. Inyutin // *Antennas*. — Moscow : Sviaz, 1978. — P. 107–121.
146. Hankins T. H. Short-timescale structure in two pulsars / T. H. Hankins // *ApJ*. — 1972. — Vol. 177. — P. L11.
147. Rickett B. J. Amplitude-modulated noise – an empirical model for the radio radiation received from pulsars / B. J. Rickett // *ApJ*. — 1975. — Vol. 197. — P. 185–191.
148. Hessels J. W. T. The GBT350 survey of the northern galactic plane for radio pulsars and transients / J. W. T. Hessels, S. M. Ransom, V. M. Kaspi [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. — 2008. – Vol. 983. – Is. 1. – Pp. 613-615.
149. Hassall T. E. Wide-band simultaneous observations of pulsars: disentangling dispersion measure and profile variations / T. E. Hassall, B. W. Stappers, J. W. T. Hessels [et al.] // *A&A*. — 2012. — Vol. 543. — P. A66.
150. Brisken W. F. Measurement of the parallax of PSR B0950+08 using the VLBA / W. F. Brisken, J. M. Benson, A. J. Beasley [et al.] // *ApJ*. — 2000. — Vol. 541, No. 2. — P. 959.
151. Phillips J. A. Precision measurements of pulsar dispersion / J. A. Phillips, A. Wolszczan // *ApJ*. — 1992. — Vol. 385. — P. 273–281.
152. Hankins T. H. Microstructure-determined pulsar dispersion measures and the problem of profile alignment / T. H. Hankins, V. A. Izvekova, V. M. Malofeev [et al.] // *ApJ Lett*. — 1991. — Vol. 373. — P. L17–L21.
153. Donner J. Dispersion measure variations for 80 pulsars on short time scales observed with LOFAR / J. Donner, G. Shaifullah // 2014.

154. Ahuja A. L. Tracking pulsar dispersion measures using the GMRT / A. L. Ahuja, Y. Gupta, D. Mitra, A. K. Kembhavi // *MNRAS*. — 2005. — Vol. 357, No. 3. — P. 1013–1021.
155. Smirnova T. V. Giant pulses from the pulsar PSR B0950+08 / T. V. Smirnova // *Astr. Rep.* — 2012. — Vol. 56. — P. 430–440.
156. Popov M. V. The study of the microstructure of the pulsars PSR 0809 + 74, 0950 + 08, and 1133 + 16 in the 67-102 MHz frequency range / M. V. Popov, T. V. Smirnova, V. A. Soglasnov // *Ahz.* — 1987. — Vol. 64. — P. 1013–1029.
157. Smirnova T. V. Narrowband variation of the average pulse profile of PSR B0950+08 at meter wavelengths / T. V. Smirnova, T. V. Shabanova // *Sov. Astr.* — 1992. — Vol. 36. — P. 628.
158. Kuz'min A. D. Observations of the mean profiles of radio pulsars and the structures of their emitting regions at 102 MHz / A. D. Kuz'min, B. Y. Losovskii // *Astr. Rep.* — 1999. — Vol. 43. — P. 288–304.
159. Shabanova T. V. Properties of the linearly polarized radiation from PSR B0950+08 / T. V. Shabanova, Y. P. Shitov // *A&A*. — 2004. — Vol. 418, No. 1. — P. 203–211.
160. Tsai J.-W. Observations of giant pulses from pulsar B0950+08 using LWA1 / J.-W. Tsai, J. H. Simonetti, B. Akukwe [et al.] // *AJ*. — 2015. — Vol. 149, No. 2. — P. 65.
161. Backer D. C. Pulsar fluctuation spectra and the generalized drifting-subpulse phenomenon / D. C. Backer // *ApJ*. — 1973. — Vol. 182. — P. 245–276.
162. Wolszczan A. A correlation of the P3 periods of pulsars with their magnetic fields and ages / A. Wolszczan // *A&A*. — 1980. — Vol. 86. — P. 7–10.
163. Weltevrede P. The subpulse modulation properties of pulsars at 21 cm / P. Weltevrede, R. T. Edwards, B. W. Stappers // *A&A*. — 2006. — Vol. 445, No. 1. — P. 243–272.
164. Rickett B. J. Further impulsive emission from CP 0950 / B. J. Rickett, A. G. Lyne // *Nature*. — 1968. — Vol. 218, No. 5145. — P. 934–935.
165. Konovalenko A. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant e-storm detected by Cassini

- spacecraft in early 2006 / A. A. Konovalenko, N. N. Kalinichenko, H. O. Rucker [et al.] // *Icarus*. — 2013. — Vol. 224, No. 1. — P. 14–23.
166. Mylostna K. Study of Saturn electrostatic discharges in a wide range of time scales / K. Mylostna, V. Zakharenko, A. Konovalenko [et al.] // *Odessa Astronomical Publications*. — 2013. — Vol. 26. — P. 251.
167. Mylostna K. Fine temporal structure of Saturn electrostatic discharges / K. Mylostna, V. Zakharenko, V. Konovalenko A. [et al.] // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2014. — Vol. 19. — P. 10–19.
168. Afraimovich E. L. Cepstral analysis of broad-band radio emission – new possibilities in radio astronomy / E. L. Afraimovich // *A&A*. — 1981. — Vol. 97. — P. 366–372.
169. Afraimovich E. L. Ionospheric Faraday modulation of the intensity of radio astronomical signals / E. L. Afraimovich // *Doklady Earth Sciences*. — 2007. — Vol. 417. — P. 1444–1448.
170. Bhat N. D. R. Long-term scintillation studies of pulsars. I. observations and basic results / N. D. R. Bhat, A. P. Rao, Y. Gupta // *ApJ Suppl. Ser.* — 1999. — Vol. 121, No. 2. — P. 483.
171. Keith M. J. Measurement and correction of variations in interstellar dispersion in high-precision pulsar timing / M. J. Keith, W. Coles, R. M. Shannon [et al.] // *MNRAS*. — 2012. — Vol. 429, No. 3. — P. 2161–2174.
172. Kardashev N. S. PSR 1133+16 – determination of the dispersion measure and the locations of the emitting regions / N. S. Kardashev, N. I. Nikolaev, A. I. Novikov [et al.] // *A&A*. — 1982. — Vol. 109. — P. 340–343.
173. Noutsos A. Pulsar polarisation below 200 MHz: average profiles and propagation effects / A. Noutsos, C. Sobey, V. I. Kondratiev [et al.] // *A&A*. — 2015. — Vol. 576. — P. A62.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ulyanov O. M., Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // *Baltic Astronomy*. – 2013. – Vol. 22. – P. 53 – 65.

Автор розробляла математичну модель імпульсного радіовипромінювання пульсарів та модель середовища для побудови методів зондування іоносфери Землі.

2. Vasylieva I. Y., Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, P. Zarka, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. A. Seredkina // *Odessa Astronomical Publications*. – 2013. – Vol. 26. – P. 159.

Автор проводила спостереження пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 у спектральному, кореляційному та хвильовому режимах. Також брала участь в обговоренні отриманих результатів та підготовці тексту до публікації.

3. Ульянов О.М., Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров / О. М. Ульянов, А. И. Шевцова, А. А. Скорик // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2013. – Т. 109, – No. 4. – С. 159 – 168.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсарів В0809+74 та В0950+08 на радіотелескопі УТР-2, та проводила обробку спостережень. Також автор разом із колегами обговорювала фізичну інтерпретацію результатів.

4. Ульянов О. М., Алгоритмы определения поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. И. Шевцова, А. А. Скорик // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, – No. 2. – С. 101 – 110.

Автор брала участь в обговоренні моделі магнітосфери пульсарів та параметрів середовища поширення, а також проводила модельні розрахунки. Автор спільно із колегами готувала статтю до публікації.

5. Vasylieva I. Y., Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko, P. Zarka, O. M. Ulyanov, A. I.

Shevtsova, A. O. Skoryk // Radio physics and Radio astronomy.– 2014.– Vol. 19,– No. 3.– P. 197.

Автор проводила частину оглядового спостереження пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2, а також брала участь в обговоренні результатів.

6. Ulyanov O. M., Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range / O. M. Ulyanov, A. O. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, O. O. Ulyanova // MNRAS.– Jan. 2016.– Vol. 455.– Pp. 150 – 157.

Автор проводила спостереження пульсара B0950+08 у хвильовому режимі на радіотелескопі УТР-2, була одним із розробників методів пошуку тонкої структури декаметрового радіовипромінювання пульсарів та проводила обробку даних спостережень та аналіз зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів. Автор проводила аналіз стрибка міри дисперсії та разом із колегами обговорювала його фізичну інтерпретацію. Також автор готувала текст статті до публікації.

7. Konovalenko A., The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT / Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovsky V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. // Experimental Astronomy.– Aug. 2016.– Vol. 42.– Pp. 11 – 48.

Автор проводила аналіз аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0243+6257 та J0953+0755 та робила оцінку точної міри дисперсії для цих імпульсів у декаметровому діапазоні.

8. Kravtsov I. P., Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / I. P. Kravtsov, V.V. Zakharenko, I.Y. Vasylieva, S. Mykhailova, O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Skoryk // Odessa Astronomical Publications. - 2016. – Vol. 29. – P. 179.

Автор проводила частину оглядових спостережень пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2 та брала участь в обговоренні та підготовці остаточної редакції статті.

9. Коноваленко А. А., Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения / Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А.И., Милостная К. Ю. // Радиофизика и радиоастрономия.– 2016.– Т. 21.– №. 2.– С. 83 – 131.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання антенної решітки ГУРТ для спостереження імпульсів пульсарів й оцінки міри дисперсії у довготривалих відрізках часу.

10. Zakharenko V., Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT / Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylkivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko

G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L. Coffre A., Griebmeier J.-M. // *Journal of Astronomical Instrumentation*. – Mar. 2016. – Vol. 5. – Pp. 1641010 – 738.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання фазованих решіток УТР-2 та ГУРТ для одночасного спостереження пульсарів у ширококутовому режимі, спираючись на результати попередніх спостережень та обробці даних пульсарів, які були отримані на радіотелескопі УТР-2.

11. Скорик А. А., Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 у декаметровом диапазоне / А. А. Скорик, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. И. Шевцова, Я. Ю. Васильева, М. С. Плахов, И. П. Кравцов // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2017. – Т. 22, – No. 2. – С. 93 — С. 111.

Автор проводила спостереження та аналіз даних пульсара J0814+7429 спрямовані на пошук тонкої структури його радіовипромінювання. Автор розробляла методи оцінки ширини імпульсів, оцінки точного значення міри дисперсії та методів підвищення контрасту для пошуку тонкої структури. Також автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та готувала текст публікації.

12. Ульянов О. М. Моделирование эффектов распространения импульсного излучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. А. Середкина, А. И. Шевцова // *Электромагнитные методы исследования окружающего пространства : материалы 11 укр. конф., Харьков, 25 — 27 сентября 2012 г. / Харьков. ХНУ им. В.Н. Каразина. — Харьков : ХНУ им. В.Н. Каразина. 2012. – С. 3.*

Автор проводила моделювання імпульсного радіовипромінювання пульсарів, на яке впливає середовище поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для стендової доповіді.

13. Ulyanov O. M. Origin of the pulsar pulse fine structure / O. M. Ulyanov, A. A. Seredkina, A. I. Shevtsova // *IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. — Vol. 8, No. S291. — P. 527–529.*

Автор проводила моделювання імпульсного радіовипромінювання пульсарів та вплив на них середовища поширення. Автор брала участь у постановці задачі та обговоренню результатів, а також готувала матеріали для виступу та публікації тексту тез конференції.

14. Ulyanov O. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Seredkina // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. – Vol. 8, No. S291. – P. 530 – 532.

Автор брала участь в обговоренні отриманих результатів, та разом із співавторами готувала матеріали для публікації тез конференції.

15. Ulyanov O. M. Investigation of the earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // Advances in Radio Astronomy in Near-Earth Environment : proceedings of the Ventspils International Radio Astronomy Conference, 13 – 15 August 2012. – Ventspils, Latvia, 2012. – P. 53 – 65.

Автор розробляла модель імпульсного випромінювання пульсарів під впливом ефектів поширення, брала участь в обговоренні результатів, готувала матеріали для виступу та публікації тез доповіді на конференції.

16. Seredkina A. O. The modeling of propagation effects of pulsar pulse radiation / A. O. Seredkina, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YSF «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics» : proceedings of the XII Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 4 — 7 December, 2012. — Kharkiv, Ukraine, 2012. — CD-ROM.

Автор проводила моделювання впливу ефектів поширення на імпульсне радіовипромінювання пульсарів, разом із співавторами обговорювала отримані результати, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез доповіді.

17. Ulyanov O. M. The methods of polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. M. Ulyanov, A. A. Shevtsova, A. A. Seredkina // Cosmic magnetic fields : Legacy of A.B. Severny : proceedings of the COSPAR Symposium, Nauchny, 1 — 6 September 2013 : abstract. — Nauchny, Ukraine, 2012. - P. 159 – 168.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання імпульсного радіовипромінювання пульсарів для зондування магнітосфер пульсарів, готувала матеріали для доповіді на конференції.

18. Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 decametric radio emission / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YERAC : proceedings of the 44th Young European Radio Astronomers Conference, Torun, Poland, 8 — 12 September 2014. — Torun, Poland, 2014. — P. 6.

Автор проводила спостереження та обробку даних пульсара J0953+0755, аналізувала точне значення міри дисперсії та оцінювала характерний час когерентності тонкої структури у цього пульсара. Брала участь в інтерпретації отриманих результатів, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез конференції.

19. Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 radiation in the low frequency range radio astronomy / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova [et al.] // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : proceedings of the 14th Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 14 — 17 October 2014. — Kharkiv, 2014. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження та обробку даних пульсара J0953+0755, аналізувала точне значення міри дисперсії та оцінювала характерний час когерентності тонкої структури у цього пульсара. Брала участь в інтерпретації отриманих результатів, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез конференції.

20. Ulyanov O. M. New technique of testing and calibration of the UTR-2 radio telescope / O. M. Ulyanov, M. A. Sidorchuk, V. V. Zakharenko, S. N. Yerin, I. N. Bubnov, A. A. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, D. V. Mukha, E. R. Rudavin // Antenna Theory and Techniques : proceedings of the 10th International Conference, Kharkiv, 21 — 24 April 2015 — Kharkiv, 2015. — P. 6.

Автор брала участь у роботі з вимірювання передатних характеристик у тракті сигналу радіотелескопу УТР-2, обробляла дані вимірювання. Також брала активну

участь в обговоренні моделі калібрування фазованих антенних решіток та отриманих результатів вимірювання.

21. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // YERAC : proceedings of the 45th Young European Radio Astronomers Conference, Ventspils, 19 — 21 August 2015. — Ventspils, Latvia, 2015. — P. 86.

Автор проводила спостереження пульсарів та обробку даних спостережень. Разом із співавторами брала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді.

22. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // YSF : proceedings of the International Young Scientists Forum on Applied Physics, Dnipropetrovsk, 29 September – 2 October 2015. — Dnipropetrovsk, 2015. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсарів та обробку даних спостережень. Разом із співавторами брала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді та текст тез конференції.

23. Skoryk A. O. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. I. Shevtsova // YSF : proceedings of the 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics, Kharkiv, 14 — 20 August, 2016. — Kharkiv, 2016. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсару B0809+74, попередню обробку даних спостережень, пошук тонкої структури радіовипромінювання та аналіз характерних масштабів когерентності в радіовипромінюванні цього пульсара. Автор готувала матеріали доповіді та текст для публікації тез конференції.

24. Skoryk A. O. Anomalously intense pulses as a pulsar magnetosphere probes / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova. — YSF : proceedings of the 2017 International Young Scientists Forum on Applied Physics, Lviv, 17 — 20 October, 2017. — Lviv, 2017. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсару B0809+74, проводила попередню обробку даних спостережень та деконволюцію аномально інтенсивних імпульсів. Також автор готувала матеріали доповіді та текст для публікації тез конференції.

25. Ulyanov O. M. Rotation measure estimation for anomalously intense pulses of PSR J0243+6257 / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, V. V. Zakharenko, A. O. Skoryk, Ia. Y. Vasylieva // *Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology : proceedings of the 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-school, Odessa, 13 — 20 August 2017.* – Odessa, 2017. – P. 31.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсара J0243+6257 та робила попередню обробку даних спостережень, а також брала участь в обговоренні отриманих результатів.