

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОПОВ ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.371 + 537.86

ДИСЕРТАЦІЯ

МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІСНУЮЧИХ РАДІОСИСТЕМ НАЗЕМНОГО ТА КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ

01.04.03 - радіофізика

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
_____ I. В. Попов

Науковий керівник Луценко Владислав Іванович
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Попов І. В. Моніторинг довкілля з використанням випромінювання існуючих радіосистем наземного та космічного базування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізики. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м Харків, 2021.

Дисертацію присвячено розв'язанню задачі дистанційної діагностики стану поверхні моря, тропосфери Землі та виявлення в ній утворень та об'єктів природного й антропогенного походження з використанням випромінювань телевізійних, радіомовних станцій і штучних супутників Землі (ШСЗ) систем глобальної навігації. У роботі розроблено методику й експериментально досліджено рефракційні властивості тропосфери по амплітуді ультракороткохвильових (УКХ) сигналів на загоризонтних трасах шляхом вимірювання множника послаблення в просторово рознесених по висоті точках. Експериментально досліджено характеристики інверсійних відбиваючих шарів в тропосфері по змінах інтенсивності сигналу на приземних загоризонтних трасах для середньої смуги широт. Розроблено методику для оцінки дальності виявлення й ефективна поверхня розсіювання (ЕПР) повітряних об'єктів для активно - пасивних систем зондування й отримано оцінки ЕПР літаків у декаметровому діапазоні в резонансній області. Розроблено методику й експериментально досліджено можливість застосування сигналів систем глобальної супутникової навігації для діагностики стану морської поверхні та моніторингу хвильовання. Розроблено імітаційну модель завад, створюваних випромінюванням радіомовних станцій короткохвильових (КХ) і УКХ діапазонів й експериментально досліджено їх властивості. Розроблено методику синтезу нееквідистантних розріджених антенних решіток для систем моніторингу навколошнього середовища, засновану на використанні магічних квадратів, і досліджено їх властивості. Експериментально досліджено уповільнення електромагнітної хвилі симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей з діаметром і кроком

спіралі, малими в порівнянні з довжиною хвилі. Досліджено методики, що засновані на використанні вкладених напівмарківських процесів, атомарних функцій Кравченка - Рвачова та апарату матриць кореляції спектральних компонент (МКСК) для опису нестационарних процесів.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Запропоновано методику оцінки рефракційних властивостей тропосфери по амплітуді УКХ сигналів на загоризонтній трасі шляхом вимірювання множника послаблення в просторово рознесених по висоті точках.
2. Експериментально отримано характеристики інверсійних шарів, що відбивають у тропосфері, по змінах інтенсивності сигналу на приземних загоризонтних трасах для середньої смуги широт. Показано, що у більшості випадків кількість інверсійних шарів не перевищує 2-х зі стрибком індексу рефракції на межі шарів 6 ... 14 N- одиниць. Висота їх розміщення, як правило, не перевищує 650 м, а швидкість зміни висоти – кілька сотень метрів на годину.
3. Запропоновано методику оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно - пасивних систем зондування. Наведено теоретичні оцінки ЕПР повітряних об'єктів для різних поляризацій опромінення.
4. З використанням іоносферної хвилі мовних КХ станцій як сигналу підсвічування вперше експериментально встановлено, що ЕПР літаків у резонансній області як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях сягають тисяч м². Це дає можливість використовувати для освітлення повітряного стану у КХ діапазоні поверхневу хвиллю вертикальної поляризації.
5. Вперше запропоновано методику використання сигналів супутників глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) для оцінки коефіцієнтів відбиття від схвильованого моря та ступеня шорсткості поверхні та хвильовання моря.
6. На основі вкладених двокомпонентних напівмарківських процесів запропоновано імітаційну модель завад, створюваних випромінюванням радіомовних станцій КХ і УКХ діапазонів.

7. Запропоновано методику синтезу нееквідистантних розріджених антенних решіток для систем моніторингу навколошнього середовища, засновану на використанні магічних квадратів, і вивчено їх властивості.

8. Експериментально досліджено уповільнення електромагнітної хвилі симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей з діаметром і кроком спіралі, малими в порівнянні з довжиною хвилі. Показано, що такий вібратор є структурою, що сповільнює, в якій мають місце резонанси, коли вздовж вібратора укладається ціле число півхвиль.

9. Запропоновано опис статистичних взаємозв'язків різних спектральних компонент сигналу радіомовних станцій із використанням апарату МКСК. Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент сигналів радіомовних станцій дозволили виявити наявність корельованої області в спектрах. Встановлено, що поява додаткових елементів із високою кореляцією на частотах гармонік свідчить про наявність нелінійних спотворень у приймальному тракті та може використовуватися для їх моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновані підходи, засновані на використанні радіовипромінювання станцій КХ і УКХ діапазонів, дозволяють без істотних матеріальних і фінансових витрат отримати дані про атмосферні процеси, здійснювати безперервний контроль стану тропосфери та розв'язувати задачі радіолокації.

2. Запропонована методика використання сигналів ГНСС може бути використана для діагностики стану підстильної поверхні, оцінки коефіцієнтів відбиття, шорсткості поверхні та ступеня хвильовання моря.

3. Отримані оцінки ЕПР літака, що спостерігається в дослідах, величина яких становить кілька тисяч квадратних метрів, дозволяють при порівнянних потенціалах РЛС збільшити дальність виявлення в КХ діапазоні в 30 ... 300 разів у порівнянні з діапазоном надвисоких частот (НВЧ).

4. Запропонована методика синтезу нееквідистантних розріджених антенних решіток, що заснована на використанні властивостей магічних квадратів, дозволяє конструювати великі антенні решітки, що забезпечують з додатковими елементами

повне покриття просторових частот при малих значеннях коефіцієнтів заповнення до 0,01 і надмірності менше ніж 0,5.

5. Геометричні розміри симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей, можуть до 10 разів бути меншими, ніж у традиційного лінійного симетричного вібратора, при цьому відрізняючись ширшою смugoю робочих частот, що важливо для побудови антен КХ діапазону.

6. Використання апарату МКСК може застосовуватися для створення спектрально-поляризаційних портретів розсіяних сигналів, які можуть бути корисними при розв'язанні задач розпізнавання та синтезі багатоканальних систем виявлення, вивчення особливостей, які властиві відбиттям від морської поверхні, гідрометеорів, наземних і надводних об'єктів та випромінюванням мовних станцій КХ діапазону.

Ключові слова: розсіювання радіохвиль, радіолокаційна станція (РЛС), інтерференційні явища, коефіцієнта заломлення тропосфери, ЕПР, матриці кореляції, нееквідистантні решітки, інверсійний шар, підстильна поверхня.

ABSTRACT

Popov I. V Monitoring of environment by using radiation from existing ground and space-based radio systems. – Qualification research work as a manuscript.

Thesis for a degree of Candidate in Physics and Mathematics, speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the problem of developing methods for monitoring the refractive properties of the troposphere, sea waves, solving radar problems using existing high frequency (HF) radio broadcasting, very high frequency (VHF) television stations, global navigation satellite systems GPS, GLONAS. In this work, a technique has been developed and the refractive properties of the troposphere are experimentally investigated in terms of the amplitude of VHF signals on over-the-horizon paths by measuring the attenuation factor at points spaced apart in height. The characteristics

of reflecting inversion layers in the troposphere on intensity of signals are propagating on the over-the-horizon (OTH) paths for the middle latitudes are experimentally investigated. A technique has been developed for assessing the detection range and radar cross section (RCS) of airborne objects for active - passive sensing systems and the obtained estimates of RCS of aircraft in the decameter range in the resonant region. A technique has been developed and the possibility of using signals from global satellite navigation systems for diagnosing the state of the sea surface and monitoring waves has been experimentally investigated. A simulation model of interference created by the radiation of radio broadcasting stations in the HF and VHF bands has been developed and their properties have been experimentally investigated. A technique for the synthesis of non-equidistant rarefied antenna arrays for environmental monitoring systems, based on the use of magic squares, has been developed, and their properties have been investigated. The deceleration of an electromagnetic wave of a symmetric vibrator is experimentally investigated, the arms of which consist of cylindrical spirals with a diameter and a spiral pitch that are small in comparison with the wavelength. Methods based on the use of nested semi-Markov processes, Kravchenko - Rvachev atomic functions and the apparatus of spectral component correlation matrices (MCSC) for describing nonstationary processes are investigated.

The scientific novelty of the results

1. A technique for assessing the refractive properties of the troposphere by the amplitude of VHF signals on the OTH path by measuring the attenuation factor at points spaced apart along the height is proposed.
2. The characteristics of inversion reflecting layers in the troposphere are experimentally obtained from changes in the signal intensity on the surface OTH paths for the middle latitudes. It is shown that in most cases the number of inversion layers does not exceed 2 with a jump in the refractive index at the layer boundary of 6 ... 14 N-units. The altitude of their placement, as a rule, does not exceed 650 m, and the lifting speed is several hundred meters per hour.
3. The technique for assessing the detection range and RCS of air objects for active - passive sounding systems is proposed. The spectral characteristics of the signals of HF broadcasting stations are experimentally investigated at various polarizations of the

received radiation. Theoretical estimates of the RCS of air objects for various polarizations of the incident radiation are given.

4. It was experimentally established for the first time when an An-74 aircraft was detected using HF radio broadcasting stations as an ionospheric wave illumination signal, the RCS of aircraft in the resonance region both at horizontal and vertical polarizations reach thousands of square meters. This makes it possible to use the vertical polarization of the surface wave to illuminate the air state in the HF range.

5. For the first time, a method is proposed for using GNSS signals to assess the reflection coefficients from rough sea, the degree of surface roughness and sea roughness.

6. The proposed simulation model of interference caused by the radiation of radio broadcasting stations in the HF and VHF bands based on nested two-component semi-Markov processes.

7. The proposed method for the synthesis of non-equidistant rarefied antenna arrays for environmental monitoring systems based on the use of magic squares and studied their properties.

8. The deceleration of an electromagnetic wave, the distribution of the surface current and the input impedance of a symmetrical vibrator, the arms of which consist of cylindrical spirals with a diameter and pitch that are small in comparison with the wavelength, are experimentally investigated. It is shown that such a vibrator is a decelerating structure in which resonances appear, when an integer number of half-waves is laid along the vibrator.

9. The description of the statistical interconnections of the different spectral components of the signal of radio stations by using the CMSC has been propounded. It is established that in the CMSC of the signal of HF range radio stations, which is the illuminating signal for active-passive radars, the correlation of the same spectral components is the most.

The practical significance of the results

1. The proposed approaches based on the use of radio emission from stations in the HF and VHF bands allow obtaining data on atmospheric processes, carrying out continuous monitoring of the troposphere state and solving radar problems without significant material and financial costs.

2. The proposed technique for using GNSS signals can be used to diagnose the state of the underlying surface, assess the reflection coefficients, surface roughness and the degree of sea roughness.

3. The obtained estimates of the RCS of the aircraft, which is observed in experiments, is several thousand square meters, allow, with comparable radar potentials, to increase the detection range in the HF range by 30 ... 300 times compared to the VHF range.

4. The proposed technique for the synthesis of non-equidistant sparse antenna arrays, based on the use of the properties of magic squares, makes it possible to design large antenna arrays, provide full coverage of spatial frequencies at small values of the fill factors up to 0.01 and redundancy less than 0.5.

5. The dimensions of a symmetrical vibrator, the arms of which consist of cylindrical spirals, can be up to 10 times smaller than that of a traditional linear symmetrical dipole, while differing in a wider operating frequency band, which is important for the construction of HF antennas.

6. The use of the CMSC technique can be used to create spectral-polarization portraits of scattered signals, which can be used in solving problems of recognition and synthesis of multichannel detection systems, studying the features inherent in reflection from the sea surface, hydrometeors, ground, surface objects and radiation of HF broadcasting stations.

Keywords: scattering of radio waves, radar, interference phenomena, tropospheric refractive index, RCS, correlation matrices, non-equidistant arrays, inversion layer, underlying surface.

Список основних публікацій за темою дисертації

1. Мельяновский П. А. Спиральная антенна с поперечным излучением / П. А. Мельяновский, И. В. Попов // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. – 2003. – Т. 8, № 3. – Харьков. – С. 438-441.

2. Луценко И. В. Спектральные методы оценивания характеристик вторичных источников в каналах с многолучевостью / И. В. Луценко, И. В. Попов, В. И. Луценко. //, Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. – 2006. – Т. 11, № 1. – Харьков. – С. 144- 148.

3. Луценко В. И. Использование методов обнаружения-измерения для анализа характеристик каналов с многолучевостью / И. В. Попов, И. В. Луценко, В. И. Луценко //, Радиофизика и электроника: сб. научн. тр – 2006. – Т. 11, № 2. – Харьков. – С. 305-308.
4. Луценко В.И. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона. / И.В. Попов, В.И. Луценко, В.И. Луценко // Радиофизика и электронника: сб. научн. трудов – 2007. – Т. 12, № 1. – Харьков. – С. 199-203.
5. Луценко В.И. Мониторинг воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций коротковолнового диапазона / В.И. Луценко, И.В. Луценко, И.В. Попов // Изв. Вузов Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 10-20.
6. Кравченко В.Ф. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе «магических» квадратов / Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В., Ло Иян, Мазуренко А.В., Попов И.В. // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6, № 3(25). – С. 4-27.
7. Kravchenko V.F. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays Based On Magic Squares / Kravchenko V.F., Lutsenko V. I., Lutsenko I.V. , Popov I.V., LUO Yi-Yang, A.V.Mazurenko // Journal of Measurement Science and Instrumentation. -2017, V.8, No 3, Sept. 2017, P. .244-253.
8. Lutsenko V. I. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions / V.F. Kravchenko, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, Luo Yiyang // Journal of Measurement Science and Instrumentation. -2017, V.8, № 1, Mar. 2017, P 37-45.
9. Lutsenko V. I. Non-equidistant two-dimensional antenna arrays are based on Latin squares for registration of cosmic, atmospheric and lithospheric radiation / Nguyen Xuan Anh, V. I. Lutsenko, Luo Yiyang, I. V. Popov // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 17, N 4B. P. 14-20.
10. Кравченко В. Ф. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе латинских квадратов / В. Ф. Кравченко, В. И. Луценко, Ло Иян, И. В. Попов // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7, № 1(27). С. 4-23.
11. Lutsenko V. I. Interference to Active-Passive Radar Systems Created by Emissions from HF and VHF Broadcasting Stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak,

I. V. Popov, N. X. Anh, & Y. Luo // Telecommunications and radio engineering – 2020, vol. 79, Issue 10, P 829-845.

12. Lutsenko V. I. Testing of GNSS Receivers of Space Objects in Earth Conditions and the Implementation of Spoofing using Simulator of GNSS Signals / N.X. Anh, A.G. Laush, Yu. Khomenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, & I.V. Popov // Telecommunications and radio engineering – 2020, vol. 79, Issue 20, PP 1773-1784.

13. Луценко В. И. Обнаружение–измерение параметров неизвестного количества сигналов в условиях негауссовых помех / И. В. Попов, И. В. Луценко, В. И. Луценко // АНПРЭ "Прикладная радиоэлектроника" – 2006. – Т. 5, № 3. – Харьков. – С. 378-382.

14. Луценко В. И. Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ диапазона / И. В. Попов, В. И. Луценко, И. В. Луценко // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научн. трудов. Под ред. Громыко А. И., Сарафанова А. В. М.: Радио и связь, 2006. С. 25-28.

15. Кривенко О. В. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко, І. В. Луценко, Д. О. Попов, І. В. Попов, О. В. Соболяк // ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, № 3 С.83-90.

16. Мельяновский П. А. Малогабаритный активный доплеровский калибратор / П. А. Мельяновский, И. В. Попов // 14th International Crimean Conference, Microwave and Telecommunication Technology, CriMico 2004, 13-17 September, 2004 P: 701-702.

17. Lutsenko V. I. Illumination of Air Environment Using Radiationof SB Broadcast Station / V. I. Lutsenko, I. V. Popov // International Radar Symposium IRS 2006, 24-26 May. 2006: conf. proc. – Krakov, P. 233-236.

18. Lutsenko V. I. Illumination of Air Environment Using Radiation of SW Broadcasting stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, Popov I.V. // The 5th European Radar Conference, 30–31 October 2008, Amsterdam, The Netherlands, P. 396-399.

19. Lutsenko I. V. Usage of Electromagnetic Fields of Antropogenic Irradiation Sources for Remote Sensing of Atmosphere / I. V. Lutsenko, V. I. Lutsenko, I. V. Popov, V. B. Sinitsky, E. V. Tarnavsky, N. X. Anh // The 6th European Radar Conference, 2009, EuRAD, 28 Sept - 2 Oct 2009, Rome, Italy, P. 545-548.

20. Gudkov V. N. Using Signals of the Global Navigation Satellites for Diagnostics of Above Land Troposphere Refraction / V. N. Gudkov, V. I. Lutsenko, I.V Lutsenko, N. X. Anh, I. V Popov, V. B. Sinitiskiy // The 7th European Radar Conference, 2010, EuRAD, 30 Sept - 1 Oct 2010, Paris, France, P. 495-498.
21. V. I. Lutsenko Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays are Based on Magic Squares / V. I. Lutsenko, I. V. Popov, I. V. Lutsenko Luo Yiyang, A. V. Mazurenko // *9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, Kharkiv, 2016, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538080, IEEE Conference Publications.
22. Kravchenko V. F. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions / V. F. Kravchenko, Luo Yiyang, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov // *9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, Kharkiv, 2016, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538171, IEEE Conference Publications.
23. Луценко В. И. Мониторинг тропосферной рефракции с использованием излучений телевизионных центров на загоризонтной трассе / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И. В. Попов, Н. С. Ань (NguyenXuanAnh), Цзян Гуо (QiangGuo), Юн Джин (YuZheng) // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», 26 - 28 июня 2018г., Муром, Россия, С. 220-227.
24. Луценко В. И. Радиоклиматические особенности Вьетнама / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И. В. Попов, Н. С. Ань (Nguyen Xuan Anh) // IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26 - 28 июня 2018г., Муром, Россия, - С. 668-697.
25. V. I. Lutsenko Characteristics of Interference to Active-Passive Radar Systems from Emissions of HF and VHF Broadcasting Stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, Anh Nguyen, & Luo Yiyang. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). – P. 259-262.
26. V. I. Lutsenko Use of Radiation of Broadcast Stations of HF Range for Detection of Air Objects / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, Anh Nguyen. //

2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). – P. 267-271.

27. V. I. Lutsenko GNSS Signal Use for Sea Waves Monitoring / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, Yi-yang Luo, Nguyen Xuan Anh, Qiang Guo, Yu Zheng. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, Volume 2 on 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – P. 768-771.

ЗМІСТ

Стор.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	16
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ДОВКІЛЛЯ	26
1.1 Використання комерційних джерел випромінювання для моніторингу довкілля	26
1.2 Особливості поширення радіохвиль в атмосфері Землі	27
1.3 Дистанційні методи діагностики атмосфери Землі	30
1.4 Антени радіотелескопів КХ діапазону	38
Висновки до розділу 1	40
РОЗДІЛ 2 МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ РАДІОЛОКАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ РАДІОМОВНИХ І ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СТАНЦІЙ КХ І УКХ ДІАПАЗОНІВ ТА СИСТЕМ ГНСС.	43
2.1 Оцінка рефракційних властивостей тропосфери по множнику послаблення поля УКХ за горизонтом	43
2.2 Двоканальне вимірювання амплітудних значень УКХ сигналів на загоризонтній трасі	48
2.3 Визначення характеристик інверсійних відбиваючих шарів в тропосфері по змінах інтенсивності сигналу на приземних загоризонтних трасах	53
2.4 Бістатичні РЛС з підсвічуванням через іоносферу	61
2.5 ЕПР повітряних об'єктів в КХ діапазоні	66
2.6 Моніторинг морського хвилювання з використанням ГНСС - сигналів	71
Висновки до розділу 2	83

РОЗДІЛ 3 ЗАВАДИ СТВОРЮВАНІ ВИПРОМІНЮВАННЯМИ МОВНИХ СТАНЦІЙ УКХ І КХ ДІАПАЗОНІВ ДЛЯ АКТИВНО-ПАСИВНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ	85
3.1 Експериментальні дослідження сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів	85
3.2 Дослідження густини і функцій розподілу амплітуд в різних ділянках спектра радіомовних станцій КХ і УКХ діапазонів	91
3.3 Імітаційна модель завад, створюваних активно-пасивним системам	96
3.4 Експериментальне дослідження рівнів завад для бістатичних РЛС	104
Висновки до розділу 3	110
РОЗДІЛ 4 НЕЕКВІДИСТАНТНІ ДВОВИМІРНІ АНТЕННІ РЕШІТКИ НА ОСНОВІ МАГІЧНИХ КВАДРАТІВ	112
4.1 Синтез нееквідистантних антенних решіток з використання магічних квадратів	112
4.2 Властивості антенних решіток на основі магічних квадратів	116
4.3 Дослідження антенних решіток на основі магічних квадратів	117
4.4 Елементи вимірювальних комплексів активно-пасивного дистанційного зондування довкілля КХ діапазону	130
Висновки до розділу 4	137
РОЗДІЛ 5 ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЇ $UP(X)$ ТА МАТРИЦЬ КОРЕЛЯЦІЇ СПЕКТРАЛЬНИХ КОМПОНЕНТ ДО ОПИСУ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ТА СТАТИСТИЧНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ДЕЯКИХ ВИДІВ НЕСТАЦІОНАРНИХ НЕГАУСОВИХ ПРОЦЕСІВ	139
5.1 Описи статистик розсіяного морем сигналу	141
5.2 Сезонна зміна ПЕПР розсіяного рослинними покривами сигналу	146
5.3 Застосування матриць кореляції спектральних компонент для візуалізації статистичних зв'язків спектральних компонент при виявленні та розпізнаванні	148

Висновки до розділу 5	153
ВИСНОВКИ	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	158
ДОДАТОК А НАУКОВІ РОБОТИ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ	184
ДОДАТОК Б ДВОКАНАЛЬНЕ ВИМІрювання Амплітудних Значень УКХ Сигналів	188
ДОДАТОК В ЕПР ДЕЯКИХ ТИПІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	194
ДОДАТОК Г ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ ТА МОНІТОРИНГ ХВИЛЮВАННЯ	196
ДОДАТОК Д АПАРАТУРА І ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНЦІЙ ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ВИМІрювання ЗАВАД, СТВОРЮВАНИХ ВИПРОМІнюванням Мовних Станцій УКХ І КХ ДІАПАЗОНІВ	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АР	– антенна решітка
АРП	– автоматичне регулювання підсилення
ВП	– вертикальна поляризація
ДП	– горизонтальна поляризація
ГНСС	– глобальна навігаційна супутникова система
ГЛОНАСС	– глобальна навігаційна супутникова система (Росія)
дБ	– децибел
КХ	– короткі хвилі
лідар	– транслітерація LIDAR англ. Light Identification, Detection and Ranging
МКСК	– матриця кореляції спектральних компонент
РЛС	– радіолокаційна станція
РРП	– ручне регулювання підсилення
НВЧ	– надвисокі частоти
ССЗ	– співвідношення сигнал - завада
УКХ	– ультракороткі хвилі
ПЕПР	– питома ЕПР
ЕПР	– ефективна поверхня розсіювання
GPS	– Global Positioning System
L_{TrT}, L_{TR}	– втрати при поширенні радіохвиль від передавача до цілі та від цілі до приймача
n	– коефіцієнт заломлення
R_{TrT}	– дальність між передавачем і ціллю
R_{TR}	– дальність між ціллю і приймачем
S_{lj}	– значення елементів квадрата
$\ Z\ $	– комплексна матриця
$\ Z\ $	– інверсна матриця

wav	– Waveform Audio File Format
α	– коефіцієнт заповнення решітки
β	– коефіцієнт надмірності решітки
θ_{Tr}, θ_R	– напрямки від цілі на передавач і приймач
λ	– робоча довжина хвилі
μ	– співвідношення сигнал-шум
μ_{TR}	– відношенням сигналу цілі до сигналу підсвічування
μ_{SN}	– відношенням рівня спектральної лінії несучої до спектральної щільності шуму
σ	– ЕПР

ВСТУП

Актуальність теми дисертації. Для діагностики довкілля використовуються спеціалізовані активні радіолокаційні комплекси, які споживають значну кількість електроенергії та вимагають ремонту й обслуговування висококваліфікованим персоналом. Дальність дії таких систем 200-300 км. Для радіолокаційного покриття великих територій потрібно розміщення відповідної кількості радіолокаційних комплексів, що економічно витратно. Використання радіочастот вимагає спеціальних дозволів, а перенасичення радіопередавальних засобів значної потужності сприяє електромагнітному «забрудненню» довкілля.

Сьогодні перспективними представляються підходи, пов'язані з використанням для дистанційного зондування зовнішнього підсвічування сигналами наявних систем наземного та космічного базування, в тому числі не призначених для цілей моніторингу, що дозволяє мінімізувати витрати на дослідження та отримати систему, яка не потребує використання додаткових джерел випромінювання, проводити безперервний моніторинг довкілля на великих територіях без застосування дорогих та енергомістких радіопередавальних пристрій.

Представляє також інтерес дослідження взаємозв'язку між змінами параметрів сигналів, що випромінюються передавачами КХ, УКХ станцій та супутниковими системами глобальної навігації (ГНСС), і зв'язку з процесами, що відбуваються в іоносфері та тропосфері Землі. Вивчення поведінки сигналів ГНСС дозволяє розв'язувати відразу дві задачі: створення методів діагностики атмосфери Землі, тобто розв'язання оберненої задачі, та поліпшення характеристик точності навігаційного обладнання, основним джерелом похибок для яких і є процеси в атмосфері планети. Крім аналізу прямого сигналу, який підпадає під вплив довкілля, цікавими є також питання, пов'язані з вивченням сигналів, відбитих від підстильної поверхні та розсіяних повітряними об'єктами, що знаходяться на шляху поширення сигналів.

Використання випромінювання КХ радіомовних станцій для діагностики внаслідок особливостей зверхдалекого поширення радіохвиль цього діапазону

дозволяє здійснювати виявлення повітряних об'єктів іоносферною хвилею на відстані в кілька тисяч кілометрів від передавальної станції. Довжини хвиль мовних станцій КХ діапазону (10...100 м) співмірні з геометричними розмірами літаків, і розсіювання від них відбувається в резонансній області, на відміну від НВЧ діапазону, де ЕПР літаків не перевищує 10 m^2 та досягає сотень - тисяч квадратних метрів, що полегшує умови їх виявлення. У цьому діапазоні хвиль також на ЕПР не позначається форма об'єкта та наявність покриттів, що поглинають, тобто підходи технології "Стелс", які дозволяють знизити на кілька порядків ЕПР літаків у НВЧ діапазоні, в діапазоні декаметрових хвиль виявляються неефективними.

Таким чином, актуальність теми дисертації зумовлено необхідністю розв'язання задач моніторингу та визначення параметрів довкілля з використанням випромінювань наявних систем наземного та космічного базування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. У дисертації наведено узагальнені результати досліджень, отримані автором в період 2003 - 2020 рр., засновані на програмах, планах і держбюджетних темах наукових досліджень Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України: «Просторово-часові нестационарні електромагнітні та акустичні взаємодії в системі атмосфера - море - речовина; вплив стану середовища та складних відбивачів на дистанційну діагностику при локаційному і ретрансляційному зондуванні та на метеорний радіозв'язок (шифр «Обрій»), яка виконувалася в період із 01.01. 2013 р. по 31.12. 2017 р. на підставі Постанови Бюро ВФА НАН України від 23.05.2012 р., протокол № 5, № державної реєстрації 0113U000048 (виконавець);.

«Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів», шифр «Діагностика» (2013 –2014 рр.), № Державної реєстрації 0113U002976 (виконавець), яка виконувалась відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 – 2016 рр. за розпорядженням Президії НАН України від 01.02.13 № 56 (1-й етап) та від 04.03.14 № 140 (2-й етап).

«Взаємодії електромагнітних і акустичних хвиль в системі довкілля-речовина та їх використання для вирішення проблем радіолокації, енергетики, екології, медицини та

зв'язку» (шифр "Обрій-2"), яка виконується в період із 01.01.2018 р. по 31.12.2022 р. на підставі Постанови Бюро ВФА НАНУ від 06.06.2017р., протокол № 4, № державної реєстрації 0118U003034 (виконавець).

Мета і завдання дослідження. Мета досліджень полягає в розробці радіофізичних методик моніторингу навколошнього середовища з використанням випромінювань наявних телевізійних і радіомовних станцій, а також систем супутникової глобальної навігації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було виконати такі **завдання:**

- Теоретично й експериментально дослідити особливості застосування сигналів радіомовних і телевізійних станцій КХ і УКХ діапазонів, ГНСС для моніторингу навколошнього середовища та розв'язання задач радіолокації.
- Розробити та створити двоканальний вимірювальний комплекс для вимірювання амплітуд сигналів телевізійних центрів УКХ діапазону на просторово рознесені антени, вимірювальні комплекси для приймання сигналів КХ діапазону, мобільний комплекс для дистанційного моніторингу та діагностики стану морської поверхні за допомогою сигналів навігаційних супутників.
- Теоретично й експериментально дослідити статистичні характеристики сигналів передавальних станцій УКХ і КХ діапазонів, які можуть бути використані для підсвічування, в смузі доплерівських частот для оцінки характеристик виявлення активно-пасивних систем радіолокації та розробки алгоритмів виділення сигналів, відбитих від повітряних об'єктів.
- Дослідити можливість використання властивостей магічних квадратів для побудови двовимірних нееквідistantних антенних решіток. Розробити способи побудови й алгоритми синтезу двовимірних антенних решіток, що забезпечують, при високому ступені розрідження решітки, досить малий рівень бічних пелюсток.
- Дослідити уповільнення електромагнітної хвилі симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей із діаметром і кроком спіралі, малими порівнянно з довжиною хвилі.

- Розробити нові методики, засновані на використанні вкладених напівмарківських процесів, атомарних функцій Кравченко - Рвачова та апарату матриць кореляції спектральних компонент (МКСК) для опису нестационарних процесів.

Об'єкт дослідження – процеси поширення радіохвиль в атмосфері Землі та розсіювання природними й антропогенними неоднорідностями.

Предмет дослідження – параметри прийнятого випромінювання радіомовних КХ, телевізійних УКХ станцій, навігаційних супутників Землі й їх взаємозв'язок із характеристиками тропосфери та підстильної поверхні, методики моніторингу довкілля.

Методи досліджень. Теоретичні методи статистичної радіофізики, дистанційного зондування атмосферних процесів, радіотехніки, математичної статистики, теорії статистичних рішень та експериментальні методи вивчення особливостей поширення радіохвиль в атмосфері.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано методику оцінки рефракційних властивостей тропосфери по амплітуді УКХ сигналів на заобрійній трасі шляхом вимірювання множника послаблення в просторово рознесених по висоті точках.

2. Експериментально отримано характеристики інверсійних відбиваючих шарів в тропосфері по змінах інтенсивності сигналу на приземних заобрійних трасах для середньої смуги широт. Показано, що у більшості випадків кількість інверсійних шарів не перевищує двох, до того ж стрибок індексу рефракції на межі шарів сягає 6 ... 14 N - одиниць. Висота розміщення відбиваючих шарів, як правило, не перевищує 650 м, а швидкість зміни висоти - кілька сотень метрів на годину.

3. Запропоновано методику для оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно – пасивних систем зондування. Експериментально досліджено спектральні характеристики сигналів радіомовних КХ станцій за різних поляризацій прийнятого випромінювання. Наведено теоретичні оцінки ЕПР повітряних об'єктів для різних поляризацій опромінення.

4. При виявленні літака Ан-74 з використанням іоносферної хвилі радіомовних станцій КХ діапазону як сигналу підсвічування вперше експериментально встановлено, що ЕПР літаків в резонансній області як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях сягають тисяч м². Це дає можливість використовувати для освітлення повітряного стану у КХ діапазоні вертикальну поляризацію поверхневої хвилі.

5. Вперше запропоновано методику використання сигналів ГНСС для оцінки коефіцієнтів відбиття від схильованого моря та ступеня шорсткості поверхні та хвильовання моря.

6. Запропоновано імітаційну модель завад, створюваних випромінюванням радіомовних станцій КХ і УКХ діапазонів, на основі вкладених двокомпонентних напівмарківських процесів.

7. Запропоновано методику синтезу нееквідistantних розріджених антенних решіток для систем моніторингу навколошнього середовища, засновану на використанні магічних квадратів і вивчені їх властивостей.

8. Експериментально досліджено уповільнення електромагнітної хвилі, розподіл поверхневого струму та вхідного імпедансу симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей з діаметром і кроком, малими в порівнянні з довжиною хвилі. Показано, що такий вібратор є структурою, що сповільнює, в якій відбуваються резонанси, коли вздовж вібратора укладається ціле число півхвиль.

9. Запропоновано опис статистичних взаємозв'язків різних спектральних компонент сигналу радіомовних станцій з використанням апарату МКСК. Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент сигналів радіомовних станцій дозволили виявити наявність корельованої області в спектрах. Встановлено, що поява додаткових елементів із високою кореляцією на частотах гармонік свідчить про наявність нелінійних спотворень в приймальному тракті та може використовуватися для їх моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Запропоновані підходи, засновані на використанні радіовипромінювання станцій КХ і УКХ діапазонів, дозволяють без істотних матеріальних і фінансових

витрат отримати дані про атмосферні процеси, здійснювати безперервний контроль стану тропосфери та розв'язувати задачі радіолокації.

2. Запропонована методика використання сигналів ГНСС може бути використана для діагностики стану підстильної поверхні, оцінки коефіцієнтів відбиття, шорсткості поверхні та ступеня хвилювання моря.

3. Отримані в експериментальних дослідженнях оцінки ЕПР літака, величина якої становить кілька тисяч квадратних метрів, дозволяють при порівняннях потенціалах РЛС збільшити дальність виявлення в КХ діапазоні в 30 ... 300 разів у порівнянні з діапазоном НВЧ.

4. Запропонована методика синтезу нееквідistantних розріджених антенних решіток, що заснована на використанні властивостей магічних квадратів, дозволяє конструювати великі антенні решітки, які забезпечують з додатковими елементами повне покриття просторових частот при малих значеннях коефіцієнтів заповнення до 0,01 і надмірності менше ніж 0,5.

5. Геометричні розміри симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей, можуть до 10 разів бути меншими, ніж у традиційного лінійного симетричного вібратора, при цьому відрізняючись ширшою смugoю робочих частот, що важливо для побудови антен КХ діапазону.

6. Використання апарату МСКК може застосовуватися для створення спектрально-поляризаційних портретів розсіяних сигналів, які можуть використовуватися при розв'язанні задач розпізнавання та синтезі багатоканальних систем виявлення, вивчення особливостей, які властиві відбиттям від морської поверхні, гідрометеорів, наземних і надводних об'єктів і випромінюванням радіомовних станцій КХ діапазону.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, виконаних автором самостійно та в співавторстві з колегами. Особистий внесок дисертанта полягає в наступному.

У роботах [135, 216] – розробка методик і створення двоканального апаратурного комплексу для моніторингу тропосферної рефракції за множниками

послаблення сигналів телевізійних центрів на заобрійних трасах, проведення експериментальних досліджень, обробка й аналіз отриманих даних.

У роботах [136, 138-140, 142, 144, 145] – розробка методики виявлення повітряних об'єктів у бістатичних РЛС, які використовують як сигнал підсвічування іоносферні сигнали радіомовних КХ станцій, проведення експериментальних досліджень, обробка й аналіз отриманих даних.

У роботах [137, 145-147, 223] – розробка методики застосування сигналів ГНСС для діагностики тропосферної рефракції, стану морської поверхні, моніторингу хвильовання, проведення експериментальних досліджень, обробка й аналіз отриманих даних.

У роботах [180 - 182] – розробка методики для опису завад, що створюють для систем моніторингу випромінювання радіомовних станцій КХ та УКХ діапазонів на основі напівмарківських вкладених процесів, створення апаратурного комплексу для дослідження завад активно-пасивних систем, які використовують для підсвічування випромінювання радіомовних станцій КХ і УКХ діапазонів, проведення експериментальних досліджень, обробка й аналіз отриманих даних.

У роботах [184 - 187] – розробка концепції побудови двовимірних нееквідistantних антенних решіток з використанням властивостей магічних квадратів.

У роботах [188-190] – експериментальне дослідження властивостей спірального напівхвильового вібратора, що працює в режимі поперечного випромінювання, розробка відбивача-калібратора для зовнішнього калібрування РЛС та імітації ЕПР рухомої радіолокаційної цілі.

У роботах [211-215] – розробка методик опису законів розподілу різних нестационарних процесів за допомоги атомарних функцій Кравченка - Рвачова, апарату МКСК.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися на міжнародних і вітчизняних конференціях і симпозіумах (усього 12 доповідей), в тому числі: 2nd Microvave & Radar Week in Poland: International Radar Symposium IRS (Krakow 2006, 2009), European Radar Conference EURAD (Paris 2010, Amsterdam

2012), 16th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON (Krakow, 2006), The 38th European Microwave Conference EuMC (Amsterdam, 2008), IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике» (Муром 2018), International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv 2016, 2020), Международная Крымская конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" КрыМиКо 2004 (Севастополь 2004).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 15 статтях [136, 139, 140, 143, 147, 173-175, 181, 186, 187, 189, 202, 214, 223] в наукових зарубіжних і вітчизняних виданнях, які належать до списку фахових видань України, і в 12 тезах [99, 135, 137, 142, 144, 161, 179, 180, 182, 185, 190, 211] міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 5-ти додатків. Її повний обсяг складає 210 сторінок, з них 132 сторінки основного тексту. Дисертація містить 48 рисунків (з них 6 на 6 окремих сторінках) і 18 таблиць (з них 2 на 2-х окремих сторінках). Список використаних джерел на 26 сторінках нараховує 234 найменування. Додатки займають 27 сторінок.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ДОВКІЛЛЯ

1.1 Використання комерційних джерел випромінювання для моніторингу довкілля

Зараз для діагностики навколишнього середовища, широко використовуються спеціалізовані активні радіолокаційні комплекси, які споживають значну кількість електроенергії і вимагають ремонту й обслуговування висококваліфікованим персоналом. Дальність дії таких радіолокаційних систем сягає 200 ...300 км. Для радіолокаційного покриття великих територій потрібне розміщення відповідної кількості радіолокаційних комплексів, що є економічно дуже витратним. Використання частот вимагає спеціальних дозволів, а перенасичення радіо передавальних засобів значної потужності сприяє електромагнітному «забрудненню» навколишнього середовища.

Разом із тим, дистанційне зондування з використанням випромінювань наявних радіосистем як зовнішнє підсвічування дозволяє проводити безперервний моніторинг навколишнього середовища на великих територіях без застосування дорогих та енергомістких радіопередавальних пристройів.

Поява комерційних телевізійних і радіопередавальних радіостанцій з амплітудною та частотною модуляцією стимулювало використання випромінювання телевізійних і радіопередавальних станцій як джерел зовнішнього підсвічування [1 - 3] та привело до створення фірмою «Lockheed Martin» пасивного радіолокатора «Silent Sentry®», що використовує як підсвічування сигнали телевізійних і радіостанцій для виявлення і супроводу повітряних об'єктів [4]. Із розвитком стільникового зв'язку почали проводитись роботи із побудови пасивних радіолокаційних систем із використанням сигналів діапазонів GSM 900, 1800 і 3G для підсвічування цілей [5]. В Англії у 2003 р. фірмою «Roke Manor» було розроблено пасивний радіолокатор «Celldar», що використовував для підсвічування сигнали

стільникових станцій. Так само проводилися роботи по використанню сигналів Wi-Fi [6], WiMAX [7], LTE [8] та цифрового радіомовлення [9]. Компанією «Thales» було розроблено радар «Homeland Alerter 100» [10], який використовує частотно модульовані сигнали діапазону 88-108 МГц. Для дослідження умов поширення радіохвиль також використовується випромінювання навігаційних супутників систем GPS і ГЛОНАСС [11]. Із використанням поверхневої та іоносферної хвилі радіопередавальних станцій КХ діапазону [12-15] здійснюється локація надводних об'єктів та діагностика умов поширення радіохвиль. Подальший розвиток ідей використання комерційних радіопередавальних радіостанцій дозволить здійснювати безперервний моніторинг процесів, що протікають в атмосфері, робити діагностику небезпечних метеорологічних явищ і розв'язувати задачі радіолокації.

1.2 Особливості поширення радіохвиль в атмосфері Землі

Радіохвилі при поширенні в атмосфері Землі піддаються впливу як атмосфери, так і об'єктів, що знаходяться на шляху поширення електромагнітної хвилі. Характер поширення радіохвиль визначається станом атмосфери, а також фізичними процесами, що протікають вздовж траси поширення.

В атмосфері спостерігаються добові та сезонні особливості, які впливають на поширення радіохвиль. При нагріванні й охолодженні земної поверхні відбувається випаровування вологи, конденсації водяної пари та випадання її в вигляді опадів, появи як горизонтальних, так і вертикальних зсувів повітряних мас [16]. Повітряні маси можуть піддаватися як ламінарним зсувам, так і турбулентному перемішуванню. Нерівномірність нагрівання земної поверхні призводить до утворення, переміщення та зникнення локальних неоднорідностей. Процеси, що протікають в атмосфері, призводять до розсіювання радіохвиль на неоднорідностях, ослаблення та відхилення напрямку поширення від прямолінійного [17].

Вплив атмосфери має складний характер, що визначається самою структурою атмосфери і різноманітністю процесів, що відбуваються в ній. Атмосфера Землі має шаруватий характер і складається з електрично нейтральної області, а також

іоносфери, сильно іонізованої внаслідок впливу сонячного та космічного випромінювання, яка знаходитьться на висотах приблизно від 50 до 300 км. Хоча вплив кожної області на поширення радіохвиль розглядається незалежно один від одного, між іоносферою та нейтральною атмосферою існує взаємозв'язок [18, 19], геомагнітне поле і явища, що відбуваються на Сонці, впливають на процеси, що протікають як в іоносфері Землі, так і в нейтральній атмосфері. У роботах [20, 21] були проведені спостереження та показано наявність сильного взаємозв'язку між станом F шару іоносфери та метеорологічними параметрами нижньої атмосфери. Варіації повної електронної концентрації F шару мають залежність до 30% від метеорологічних параметрів стратосфери за умови спокійного геомагнітного стану.

Стан іоносфери як електрично зарядженого середовища залежить від багатьох факторів природного й антропогенного характеру. Вплив, який чиниться на іоносферу, може носити як циклічний, так і випадковий характер. Основний вплив виявляється "зверху" – у вигляді радіаційних і корпускулярних потоків енергії, що поширяються від Сонця. Вплив "знизу" надають землетруси, вибухи, запуски ракет, виверження вулканів, циклонічна активність, що генерують внутрішні атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) [22-24], які виступають як переносник збурень з тропосфери в іоносферу.

Поряд із регулярною висотною залежністю електронної концентрації іоносферний шар може містити велику кількість неоднорідних утворень різного розміру, які знаходяться в постійному русі, з'являючись і зникаючи. Розсіювання на цих неоднорідностях призводить до появи багатопроменевості. Існування неоднорідних утворень призводить до можливості поширення радіохвиль на частотах, які значно перевищують максимальну прийнятні [25].

До основних особливостей використання сигналів КХ діапазону можна віднести багатопроменевість, яка виникає при відбитті радіохвиль від шарів і навіть при однострибковому поширенні в умовах спокійної іоносфери. Багатопроменевість призводить до завмирань сигналів в точці приймання. Так само до завмирань призводить інтерференція звичайної та незвичайної складових магніторозщепленої хвилі та поворот площини поляризації хвилі при поширенні в напрямку силових ліній

магнітного поля Землі. Основним способом боротьби із завмираннями є просторова селекція із застосуванням антен з вузькою діаграмою спрямованості, а також рознесення антен по поляризації, одночасне приймання на вертикальну та горизонтальну антени з подальшим складанням сигналів [26].

Збурення іоносфери, викликані впливом радіохвиль великої потужності, призводять до появи нелінійності, яка може проявлятися у вигляді перехресної модуляції сигналів Люксембург - Горьківський ефект, а також і до спотворень і загасання сигналу, відбитого від іоносфери самої хвилі, що збурює[27].

При прогнозуванні поширення КХ радіохвиль необхідно визначення добового ходу максимальних застосовних частот (МЗЧ), оптимальних робочих частот (ОРЧ), напруженості електричного поля в місці приймання або визначення добового ходу найменших застосовних частот (НЗЧ).

Для іоносфери, яка є диспергуючим середовищем, коефіцієнт заломлення в радіодіапазоні є меншим за одиницю, залежить від частоти та збільшення шляху поширення сигналу та приводить до групового запізнювання і фазового випередження радіосигналів [28].

У загальному випадку для атмосфери коефіцієнт заломлення описується виразом [29, 30]:

$$n = \frac{c_1 p}{T} + \frac{c_2 p_w}{T} + \frac{c_3 p_w}{T^2} \pm \frac{c_4 \cdot 10^6 N_e}{f^2}, \quad (1.1)$$

де $c_1 = 77.6 \text{ } ^\circ\text{K}/\text{мбар}$, $c_2 = 71.6 \text{ } ^\circ\text{K}/\text{мбар}$, $c_3 = 3.747 \cdot 10^5 \text{ } ^\circ\text{K}^2/\text{мбар}$, $c_4 = 40.308 \text{ } \text{м}^3/\text{с}^2$;

p - парціальний тиск сухого повітря,

p_w - парціальний тиск водяної пари,

N_e - електронна концентрація.

Для висот, де розташована іоносфера, переважає останній доданок (1.1), в той час, як для тропосфери істотні другий і третій доданок.

1.3 Дистанційні методи діагностики атмосфери Землі

В якості неконтактних, дистанційних методів діагностики атмосфери Землі використовуються радіометричний, радіопросвічування, радіолокаційний, лазерний, акустичний, радіоакустичного, які ґрунтуються на явищах поширення, поглинання і розсіяння електромагнітних і звукових хвиль [31- 36]. Використовуються, як активні, так і пасивні методи [37]. В активних системах зондування для підсвічування використовується сигнал, що випромінюється передавачем, який взаємодіє з об'єктом або середовищем, а потім приймається приймачем. У пасивних системах зондування приймається власне випромінювання об'єкта дослідження [38].

Акустичні методи зондування дозволяють при невеликих витратах проводити безперервну діагностику метеопараметрів атмосфери в реальному часі. Актуальність розвитку акустичних методів визначається необхідністю моніторингу навколошнього середовища в умовах посилення техногенного впливу. Акустичні хвилі більш чутливі до зміни метеопараметрів, ніж електромагнітні і тому для зондування може бути використана досить проста апаратура. Разом з тим, звукові хвилі, що застосовуються в акустичному зондуванні, мають невелику, у порівнянні з електромагнітними хвильами, проникливу здатність в атмосфері. Дальність зондування обмежується молекулярним поглинанням, вітровою та температурною рефракцією, турбулентним послабленням. Тому природною областью застосування акустичного зондування є нижня частина атмосфери до висот порядку одного кілометра. Акустичне зондування (АЗ) є ефективним засобом контролю атмосферного прикордонного шару (АПШ). Для дистанційного зондування атмосфери випромінювання звукових хвиль використовується досить давно [39-41]. Принцип дії заснований на здатності акустичних хвиль розсіюватися на неоднорідностях показника заломлення, утворених турбулентністю в атмосфері [42, 43].

Унікальні можливості для моніторингу навколошнього середовища відкриваються при спільному використанні електромагнітних та акустичних полів [44]. Метод радіоакустичного зондування дозволяє визначити висотні профілі

вологості та температури, приземний тиск і оцінити значення коефіцієнта заломлення [45]. Вимірювання температурних профілів засноване на використанні залежності швидкості звуку від температури та швидкості руху середовища та на частковому відбитті електромагнітних хвиль від періодичних неоднорідностей густини, створюваних звуковою хвилею, що розповсюджується [46]. При виконанні умови Брегга $\lambda_e = 2\lambda_a \sin \theta$, рівень відбитого сигналу в системах радіоакустичного зондування стає достатнім для реєстрації й обробки. λ_e , λ_a – довжини електромагнітної та звукової хвиль, θ – кут відбиття електромагнітної хвилі. Оскільки довжина звукової хвилі істотно залежить від значень метеопараметрів, то виникає необхідність підстроювання частоти акустичного або радіосигналу, в залежності від міливості метеорологічного стану, під умови Брегга. В процесі вимірювань випромінюються короткі посили звукових хвиль, швидкість і напрямок яких вимірюють за допомогою доплерівського радіолокатора. На шляху поширення звукової хвилі створюються періодичні зміни діелектричної проникності повітря, які здатні розсіювати електромагнітні хвилі з когерентним складанням фаз в разі виконання умови Брегга [46]. Довжина електромагнітної хвилі від стану атмосфери практично не залежить, водночас довжина хвилі акустичного сигналу під час поширення звукового імпульсу вздовж траси зондування змінюється в залежності від змін температури повітря. Істотний вплив на амплітуду розсіяного сигналу та на точність вимірювань надає зміна метеопараметрів вздовж траси зондування, що призводить до деформації (розтягування або стиснення) звукової хвилі вздовж просторової координати, а отже, до переміщення спектра акустичного сигналу по осі частот, внаслідок чого максимуми просторових спектрів сигналів, що взаємодіють, не збігаються, а діапазон перекриття спектрів звужується. Амплітуда результуючого розсіяного сигналу зменшується. Систематична похибка, що виникає при визначенні швидкості звуку по доплерівському зсуву частоти, призводить до істотних похибок у визначенні температури [47]. У деяких випадках під впливом метеопараметрів акустичний сигнал може виявитися повністю прозорим для радіосигналу [48].

Основою акустооптичних методів є дифракція світла на ультразвукових хвілях. Раніше ці методи застосовувалися лише для дуже високих частот. Але пізніше

акустооптичні методи почали застосовуватися для порівняно низьких частот (для яких довжина хвилі співмірна із діаметром світлового променя) [48, 49]. У тропосферу випромінюються гармонічне акустичне коливання та немодульований оптичний промінь [50]. При інтерференції двох променів (акустичних або електромагнітних) утворюється система інтерференційних смуг. Характеристики цієї системи (в першу чергу, просторова частота – період смуг) визначаються, з одного боку, довжиною хвилі, а з іншого – геометричними параметрами променів: кутом між хвильовими векторами, розходженням променів і т. і., тобто, для заданих геометричних параметрів (що визначаються конструкцією приладу) по вимірюванню періоду смуг можна визначити і довжину хвилі, якщо при цьому відома частота хвилі, то неважко знайти й її фазову швидкість. Отже, по суті, завдання зводиться до визначення періоду смуг. Разом з тим, цей період досить нескладно знайти по різниці фаз сигналів, отриманих у двох точках інтерференційної картини [51].

Лазерне зондування атмосфери проводиться за допомоги активного оптичного приладу – лідара, що працює як в безперервному, так і імпульсному режимах, випромінюючи лазерний промінь в атмосферу та приймаючи випромінювання, розсіяне АПШ у зворотному напрямку. Лідар може бути розташований як на землі, так і на літальних об'єктах. Методика дослідження атмосфери за допомогою лідара використовується вже протягом декількох десятиліть і описана в численній літературі [52-54]. Лідари можуть використовувати випромінювання в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній частинах електромагнітного спектра. Випромінювання різних діапазонів має свої особливості при взаємодії з атмосферою, в якій відбуваються різноманітні фізичні процеси. Таким чином, є можливість отримати інформацію про різні процеси в атмосфері, такі як температура, склад атмосфери та параметри вітру [55-56]. Внаслідок малої розбіжності променя лазера забезпечується висока просторова роздільність [58].

Радіометричне дослідження атмосфери засновано на прийманні власного (теплового) випромінювання досліджуваного середовища і на взаємозв'язку характеристик цього випромінювання (ослаблення, інтенсивності, поляризації,

товщини скін - шару і т. і.) з фізичними параметрами середовища. Радіометричне дослідження є досить потужним засобом, що має точність та оперативність, і дозволяє судити про кількісне співвідношення компонент, що випромінюються в атмосфері.

Дистанційні методи оцінки рефракційних ефектів, засновані на вимірюванні радіояркістної температури атмосфери в лініях поглинання кисню та водяної пари, дозволяють відновлювати висотні профілі температури та вологості [59], за якими розраховується висотний профіль коефіцієнта заломлення. Однак профілі розподілу метеорологічних параметрів, в першу чергу, вологості, отримані таким шляхом, не мають необхідної точності та просторової роздільної здатності.

Використовуючи залежності радіояркістної температури від довжини шляху променя, в межах шару атмосфери, який ефективно поглинає, можна оцінювати умови поширення радіохвиль [60-62], тому використання радіометричного методу для оперативної діагностики умов поширення є перспективним для оцінки умов поширення по радіотепловому випромінюванню атмосфери. В Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України (ІРЕНЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ) проводились дослідження радіояркістної температури, на контрольній заобрійній трасі над морем при ковзних кутах, які дозволили визначити узагальнені параметри її залежності від кута місця на вертикальній поляризації, що добре корелює з умовами поширення радіохвиль [63].

Особливістю мікрохвильового випромінювання земної атмосфери є чутливість його характеристик до великого числа фізико-хімічних параметрів: температури, вологості, водності хмар, тиску, газового складу, турбулентності й т. і [29]. При цьому чутливість цих характеристик до змін окремих параметрів істотно різні по спектру. Використання декількох (найбільш чутливих) спектральних ділянок НВЧ діапазону дає можливість визначення цілого ряду фізико-хімічних параметрів атмосфери. Пасивними дистанційними методами зондування визначаються такі важливі параметри атмосфери, як висотні розподіли температури й вологості, інтегральний вміст парообразної й рідкої води, зони та інтенсивність опадів, зміст деяких домішкових газів [16].

Застосування радіолокаційного методу засноване на дослідженні зворотного розсіювання радіохвиль гідрометеорами, діелектричними неоднорідностями, супутніми атмосферними явищами, частками аерозолю та інші [64-71]. Крім того, користуються штучними відбивачами, що викидаються в атмосферу, типу металізованих голок розміром $\sim \lambda/2$, де λ – довжина хвилі, а також спеціальними радіолокаційними відбивачами або активними відповідачами – мініатюрними радіопередавачами, що підіймаються на кулях-зондах.

Відбиття радіоімпульсів від турбулентних та інверсійних шарів в тропосфері вперше відмічені ще в 1936 р. Колвелом і А. Френдом (США) із використанням середньохвильового й короткохвильового радіодіапазонів [72]. Перші повідомлення про виявлення опадів за допомогою радіолокаторів сантиметрового діапазону були отримані 20 лютого 1941 року на узбережжі Великобританії при спостереженні за літаком за допомогою радіолокаційної станції на відстані 11 км [73]. Під час другої світової війни було виявлено, що поширення високочастотних хвиль сильно залежить від метеорологічних умов, а їх відбиття відбувається від інверсійних шарів, хмарних і пилових мас і т. і. Створені спеціальні метеорологічні радіолокатори почали широко застосовуватися в багатьох країнах [29].

За допомоги метеорологічних радіолокаторів проводяться дослідження хмар, зон опадів, областей з наявністю підвищених градієнтів температури та вологості, а так само іонізовані сліди розрядів блискавок і ін. Дані радіолокаційних спостережень дозволяють судити про просторове положення, переміщення, структуру, форму і розміри об'єктів що виявляються й їх фізичні властивості. При розсіянні радіохвиль на частинках хмар та опадів, коли розміри r цих часток малі в порівнянні з довжиною хвилі λ (Релеївське розсіювання), інтенсивність відбитого радіолокаційного сигналу $\sim r^6/\lambda^4$. Внаслідок сильної залежності інтенсивності відбитого сигналу від розміру часток радіолокаційні зображення не завжди збігаються з візуальними розмірами об'єкту. Інтенсивність розсіяних сигналів різко зменшується зі збільшенням λ , а для міліметрових і коротших хвиль сигнал сильно послаблюється, що обмежує діапазон частот метеорологічних радіолокаторів, які тому, як правило, використовують сантиметровий і міліметровий діапазони довжини хвиль [74].

Середня потужність відбитих сигналів та інтенсивність опадів пов'язані емпіричним співвідношенням, на підставі якого є можливість отримати розподіл інтенсивності та кількості опадів, що випадають вздовж напрямку випромінювання радіолокатора. Вимірювання послаблення радіохвиль призводить до підвищення точності вимірювань інтенсивності опадів і водності хмар [75, 76]. Для визначення послаблення радіохвиль використовують двохвильові радіолокатори. Якщо довжина хвилі співставна з розмірами часток, закон розсіяння істотно відрізняється від релейського, і при відомій частотній залежності послаблення радіохвиль вимірювання відбитих сигналів на декількох довжинах хвиль дозволяє оцінити розміри частинок опадів. Рух розсіювачів призводить до зміщення частоти відбитих сигналів внаслідок ефекту Доплера. Вимірювання доплерівського зсуву частоти, а також інших параметрів спектра радіолокаційних сигналів, відбитих від хмар та опадів, великих частинок аерозолю, штучних розсіювачів, дозволяє досліджувати структуру різних рухів в атмосфері (вітер, турбулентність, впорядковані вертикальні потоки) [77].

Використання як інформативних ознак гідрометеорів поляризаційних характеристик [78, 79] і застосування когерентної обробки відбитих сигналів [80], заснованої на вимірюванні спектральних характеристик, дозволяє значно поліпшити інформативність радіолокаційних сигналів.

Поляризаційна структура і спектральні характеристики відбитого сигналу служать для визначення мікроструктури хмар, оцінки турбулентних пульсацій повітряних мас і переміщенні елементарних розсіювачів (крапель дощу, сніжинок і частинок граду) [81- 84]. Для визначення просторового розподілу інтенсивності опадів і оцінки потенційного ступеня їх небезпеки використовуються поляризаційні та спектральні характеристики сигналів, розсіяних і поглинених гідрометеорами. Створення параметрів сигналу (частоти та рівня) випромінюваного штучними супутниками Землі (ШСЗ) при русі по навколоzemній орбіті можуть бути використані для діагностики небезпечних метеорологічних явищ [85], рефракційних властивостей тропосфери над морською поверхнею і сушею [86], розв'язання задач радіолокації [87], дослідження підстильної поверхні [88]. В основі цього методу лежить

взаємозв'язок між мірою атмосферної рефракції та параметрами прийнятого сигналу [89].

При поширенні сигналів ШСЗ над поверхнею моря на приймальну антenu приходять прямі та відбиті від поверхні моря сигнали, що формує інтерференційну структуру прийнятого сигналу, яка дозволяє відновлювати профілі показника заломлення $n(h)$ в приводному шарі атмосфери, порівнюючи з набором аналогічних аналітично розрахованих залежностей для різних атмосферних умов [90, 91]. Розв'язання оберненої задачі рефракції дозволяє провести відновлення профілю показника заломлення по доплерівській методиці з точністю не гірше 20 ... 30 Н-одиниць [92]. Останнім часом робляться спроби використання сигналів ГНСС (GPS – США і ГЛОНАСС – РФ) для діагностики атмосферних процесів (тропосферної рефракції [93-96], виявлення зон опадів [97-100]), визначення шорсткості земної поверхні [101-104], а також виявлення повітряних об'єктів [105, 106].

Для досліджень іоносфери, прогнозування умов поширення радіохвиль уздовж трас поширення, заобрійної радіолокації застосовуються дистанційні методи, засновані на розсіюванні радіохвиль на вільних електронах, неоднорідностях, теплових флюктуаціях іоносферної плазми. До таких методів належать методи вертикального, похилого, зворотно-похилого зондування, і т. і [107-109].

Складним, але найбільш інформативним є метод некогерентного розсіяння радіохвиль [110]. Радари некогерентного розсіювання працюють з радіохвильами високих частот, істотно перевищують власні частоти іоносфери. За потужністю розсіяного сигналу визначається електронна концентрація, по спектру можуть бути отримані значення іонної та електронної температур, іонного складу, швидкості іонного дрейфу. Таким чином, метод некогерентного розсіювання дозволяє проводити спостереження практично всіх іоносферних параметрів, але тільки над вимірювальною установкою. На відміну від іонозонда, радар некогерентного розсіювання вимірює значення параметрів іоносфери не тільки нижче максимуму електронної концентрації, але також і на великих висотах. Ще однією перевагою даного методу дослідження іоносфери є те, що він не залежить від її стану. Найбільшими недоліками радарів некогерентного розсіяння є їх дорожнеча і високе

енергоспоживання. Тому такі вимірювальні установки досить рідкісні, і вимірювання проводяться ними тільки протягом коротких проміжків часу [110].

Простішим і поширенім методом спостереження за станом іоносфери є метод вертикального зондування, який до теперішнього часу залишається основним засобом дослідження структури іоносфери [109]. Дослідження іоносфери цим методом здійснюється за допомогою іоносферної станції, приймально-передавального пристрою, що дозволяє експериментально отримати профіль висоти відбиття від поступово змінюваної частоти вертикально випромінюваної хвилі [109].

Передавач працює в імпульсному режимі з тривалістю імпульсу приблизно $50 \div 70$ мкс. Робоча частота передавача плавно змінюється в діапазоні від 1 до 20 МГц за час $20 \div 30$ мкс. При частоті проходження імпульсів близько 50 Гц. Ефективна потужність передавача в імпульсі складає близько $PG = 1 \div 20$ кВт. Максимум випромінювання антени направляється вертикально вгору [109].

Висота шару, що відбиває, визначається за часом поширення хвилі, яка випромінюється до точки відбиття та назад. Частота відбитої хвилі дорівнює плазмовій частоті в точці відбиття, яка пов'язана з електронною концентрацією. Таким чином, іонограмою є графік залежності електронної концентрації від висоти. До недоліків методу відноситься те, що вимірювання параметрів іоносфери проводиться тільки над іонозондом, іонозонд використовує тільки короткі хвилі, електронна концентрація може бути виміряна тільки до висоти максимуму шару F2 [109].

Для досягнення високої роздільної здатності та великих відстаней, необхідне застосування потужних передавачів, що своєю чергою призводить до збільшення витрат, появі нелінійних ефектів та виникає проблема електромагнітної сумісності системи що зондує в цілому. Для підвищення енергетичного потенціалу і забезпечення високої роздільної здатності за часом при обмеженні випромінюваної потужності передавача для дослідження іоносфери широко використовуються сигнали з лінійною частотною модуляцією [111].

Метод діагностики декаметрового радіоканалу в режимі реального часу за даними зворотного зондування іоносфери за безперервним ЛЧМ - сигналом

засновано на виділенні переднього фронту сигналу зворотного розсіювання при обробці та інтерпретації експериментальних іонограм, де інтерпретація сигналів на іонограмі здійснюється за результатами розрахунку мінімального групового шляху переднього фронту сигналу зворотного розсіювання [111].

Для дослідження області іоносфери на висотах 60 - 100 км одним з найбільш ефективних є метод часткових відбиттів, заснований на розсіянні слабкими природними неоднорідностями концентрації плазми радіохвиль в діапазоні довжин хвиль 2 - 6 МГц [112]. Даний метод використовується для моніторингу висотно-часових іоносферних параметрів концентрації [113-115], частот зіткнень електронів з нейтральними частинками [113], величини і напряму швидкості вітру [116-118], визначення параметрів хвильових збурень [119-121]. З урахуванням великомасштабного характеру збурень що з'являються бажано мати рознесені або рухомі пункти дистанційного радіозондування.

Для дослідження великомасштабних і глобальних збурень в нижній іоносфері та реакції іоносфери на енергетичні процеси природного та антропогенного походження, які спрямовані з боку Землі отримали поширення активні експерименти, при розігріві іоносфери потужним радіовипромінюванням [122- 125]. В цьому випадку явно відомі як параметри джерела енергії, так і місце, і час дії.

При проведенні досліджень іоносфери за допомогою методу похилого зондування як джерела випромінювання можуть виступати КХ радіостанції [126, 127]. В такому випадку реалізується схема пасивного радара, яка може забезпечити цілодобове, безперервне зондування одночасно на декількох трасах поширення радіохвиль.

1.4 Антени радіотелескопів КХ діапазону.

У 1933 р. американський астроном Карл Янський виявив космічне випромінювання в декаметровому діапазоні довжин хвиль. Спостереження в даному діапазоні хвиль мають велике значення для вивчення радіогалактик і квазарів, міжзоряного і міжпланетного середовища, залишків спалахів наднових, пульсарів,

Сонця і простору біля нього. Для спостережень в цьому діапазоні характерними є такі проблеми, як висока яскравісна температура галактичного нетеплового фону, екранування космічного випромінювання іоносфeroю, інтенсивні радіозавади земного походження, а так само великі габаритні розміри, складність і дорожнеча побудови антенних систем, що відповідають необхідним параметрам [128].

Антенні системи радіоастрономічних інструментів повинні відповідати жорстким, іноді суперечливим вимогам. При великих займаних площах фазованої антенної решітки, понад 10^5 м^2 мати гарне узгодження, чутливість антенних елементів і високу кутову роздільну здатність. Кутова роздільна здатність визначається, своєю чергою тим, наскільки оптимальна конфігурація та заповнення решітки антенними елементами. При цьому антена повинна мати ширину діаграми спрямованості $< 1^\circ$ в широкому діапазоні частот, допускати електричне керування діаграмою спрямованості по обох координатах, велике поле зору, бути завадостійкою, надійною, з ефективними системами фазування, управління, контролю та калібрування [128].

На цей час найбільш ефективними радіотелескопами в декаметровому діапазоні довжин хвиль є українські системи УТР-2 (Український Т - подібний Радіотелескоп, 2-а модель), УРАН (Український радіоінтерферометр Академії наук), ГУРТ (Гігантський український радіотелескоп), голландський LOFAR (The Low-Frequency Array) і LWA (The Long Wavelength Array), що знаходиться в Нью Мексико. УТР-2 [129, 130] має найбільшу ефективну площину 140000 м^2 і найбільшу чутливість в діапазоні $8\div32$ (40) МГц. На основі радіотелескопа УТР-2 була побудована система декаметрових радіоінтерферометрів для спостереження радіоджерел в режимі РНДБ (Радіоінтерферометрія з наддовгою базою). В УРАН [131, 132] входять УТР-2 і ще 4 досить великих (з ефективними площами від 7000 до 28000 м^2) Радіотелескопи - УРАН-1, ..., УРАН-4, утворюючи з УТР-2 бази довжиною від 42 до 950 км забезпечують поляриметричні можливості. Дані радіотелескопи успішно беруть участь в міжнародних дослідженнях Сонця, сонячних зв'язків, сонячного вітру, Сатурна, Юпітера та інших астрономічних об'єктів. Радіотелескоп ГУРТ складається зі 100 антенних решіток по 25 елементарних антен, які приймають в діапазоні 10-80 МГц. LOFAR [132] – інтерферометр, що складається з радіотелескопів, приймає

космічне випромінювання в діапазоні від 10 МГц до 240 МГц. Перекриття всього частотного діапазону забезпечується 2-ма наборами антен: низькочастотних Low Band Antenna (LBA) 10-80 МГц і високочастотним High Band Antenna (HBA) 120 - 240 МГц. Як antennі елементи інтерферометра використано близько 20000 малих всеспрямованих антен згрупованих на 48 майданчиках, розташованих в Нідерландах, Німеччині, Великобританії, Франції, Швеції та Ірландії. Загальна площа антенного поля приблизно 300000 м². LWA [133] – радіотелескоп, розташований в центральній частині Нью-Мексико. Робочий діапазон довжин хвиль від 10 до 88 МГц і використовується для вивчення релятивістських частинок, еволюції космосу, астрофізичної плазми, радіовипромінювання планет подібних Юпітеру в декаметровому діапазоні і гігантських спалахів від магнітарів. На цей час складається з 256 антен [134], з перспективою побудови 53 станцій із загальною кількістю 13000 дипольних антен, розташованих на площі кола діаметром близько 400 кілометрів.

Зміна напрямку приймання випромінювання в даних інструментах відбувається за допомогою зміни фазової затримки сигналів, що приходять від окремих антен, синтез діаграм спрямованості відбувається за допомогою програмного забезпечення. Проблема оптимізації антенних систем таких унікальних і дорогих вимірювальних інструментів є надзвичайно актуальною.

Висновки до розділу 1

На цей момент значний інтерес проявляється до створення активно-пасивних комплексів моніторингу довкілля, що використовують як сигнал підсвічування випромінювання наявних станцій наземного та космічного базування, які мають різне призначення та перекривають широкий діапазон частот. При поширенні в атмосфері Землі радіохвилі піддаються впливу як атмосфери, так і об'єктів, що знаходяться на шляху поширення радіохвиль. Для прогнозування умов поширення потрібно вивчення особливостей поширення радіохвиль в атмосфері Землі, створення методів діагностики параметрів тропосфери, моніторингу небезпечних метеорологічних явищ, розробка нових методів та методик моніторингу навколошнього середовища

(атмосфери), об'єктів в ній природного (опади) і антропогенного (літальні апарати) походження, а також характеристик підстильної поверхні (суші, моря).

Антенні системи, які є однією з визначальних складових частин приймальних систем дистанційного зондування КХ діапазону, з огляду на значні габарити вимагають подальшої розробки алгоритмів оптимізації як розташування приймальних елементів антен без погіршення основних параметрів, таких як кутова роздільна здатність, ширина діаграми спрямованості, діапазон частот і можливістю електричного керування променем, так і зменшення габаритів окремих елементів.

У результаті аналізу теоретичних та експериментальних робіт, присвячених методам і способам використання комерційних джерел випромінювання різних діапазонів довжин хвиль і різного призначення для моніторингу навколошнього середовища, особливостей поширення радіохвиль в атмосфері Землі, діагностики параметрів атмосфери, проблемам розвитку антенних систем КХ діапазону сформульовані задачі, які не були розв'язані до початку цієї роботи та вирішення яких необхідне для подальшого розвитку активно-пасивних систем моніторингу навколошнього середовища та розв'язання задач радіолокації.

Для цього необхідне розв'язання наступних задач:

- 1) Теоретично й експериментально дослідити особливості застосування сигналів радіомовних і телевізійних станцій КХ і УКХ діапазонів, ГНСС для моніторингу навколошнього середовища та розв'язання задач радіолокації.
- 2) Розробити та створити двоканальний комплекс для вимірювання амплітуд сигналів телевізійних центрів УКХ діапазону на просторово рознесені антени, комплекси для приймання сигналів КХ діапазону, мобільний комплекс для дистанційного моніторингу та діагностики стану морської поверхні за допомогою сигналів навігаційних супутників.
- 3) Теоретично та експериментально дослідити статистичні характеристики сигналів передавальних станцій УКХ і КХ діапазонів, які можуть бути використані для підсвічування, в смузі доплерівських частот для оцінки характеристик виявлення активно-пасивних систем радіолокації та розробки алгоритмів виділення сигналів, відбитих від повітряних об'єктів.

4) Дослідити можливість використання властивостей магічних квадратів для побудови двовимірних нееквідistantних антенних решіток. Розробити способи побудови та алгоритми синтезу двовимірних антенних решіток, що забезпечують, при високому ступені розрідження решітки, досить малий рівень бічних пелюстків.

5) Розробити методики, засновані на використанні вкладених напівмарковських процесів, атомарних функцій Кравченка - Рвачова та апарату матриць кореляції спектральних компонент (МКСК) для опису нестационарних процесів.

РОЗДІЛ 2

МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ РАДІОЛОКАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ РАДІОМОВНИХ І ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СТАНЦІЙ КХ І УКХ ДІАПАЗОНІВ ТА СИСТЕМ ГНСС.

У цьому розділі розглянуто методики діагностики рефракційних властивостей тропосфери по амплітуді УКХ сигналів на загоризонтній трасі [135], проведено аналіз характеристик інверсійних шарів у каналі поширення по флюктуаціях прийнятого сигналу.

Наведено оцінки ЕПР повітряних об'єктів на частотах, відповідних резонансному розсіюванню, отримано оцінки ЕПР повітряних об'єктів для бістатичних РЛС з підсвічуванням через іоносферу з використанням експериментальних даних по виявленню цілей на доплерівських частотах [136].

Розглянуто можливість застосування сигналів систем глобальної супутникової навігації для діагностики стану морської поверхні та моніторингу хвильовання [137].

Основні результати опубліковані в роботах [135 - 146].

2.1 Оцінка рефракційних властивостей тропосфери по множнику послаблення поля УКХ за горизонтом

Як теоретичну основу для дослідження рефракційних властивостей тропосфери по множнику послаблення сигналу УКХ на загоризонтних трасах було використано роботи А. І. Калініна [147, 17].

При використанні спрощеної методики наближених оцінок напруженості поля в зонах тіні та напівтіні [147] похибки при розрахунку

множника послаблення для діапазону УКХ не перевищують 2 дБ. Відомо, що залежність множника послаблення від дистанції в зоні тіні має характер близький до експоненціального, причому швидкість убування залежить від довжини хвилі та рефракції, яку враховують через еквівалентний радіус Землі, поляризації випромінювання і приймання, а також електричних параметрів земної поверхні. Найбільш часто для визначення напруженості поля, а отже, і множника послаблення в області тіні, з урахуванням параметрів підстильної поверхні, використовують метод Введенського [148].

У діапазоні УКХ при розташуванні антен не дуже близько до земної поверхні, залежність множника послаблення V має експоненціальний характер не тільки для зони геометричної тіні, а й поблизу неї, на межі області прямої видимості в зоні напівтіні [147]

$$V[dB] = V_0[dB] - 17,1\sqrt{Y_1} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right) (\xi - 1), \quad (2.1)$$

де $\xi = R/R_{\text{пр}}$, $R_{\text{пр}}$ – відстань прямої видимості (до радіогоризонту), $m = Y_1/Y_2 \leq 1$, Y_1, Y_2 – наведені висоти пункту що приймає та передає.

$V_0[dB]$ множник послаблення електромагнітного поля на відстані прямої видимості:

$$x_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{пр}}}{R_0} = \frac{\sqrt{2a_e}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})}{R_0} = \sqrt{Y_1} + \sqrt{Y_2}. \quad (2.2)$$

При цьому похибка обчислення множника послаблення менше 2 дБ досягається при $x_{\text{пр}} \gg 0,5$. Для аналітичних розрахунків використовується поліноміальна апроксимація виду:

$$V_0(\mu) = \sum_{i=0}^k A_i \mu^i, \quad (2.3)$$

де A_i - коефіцієнти апроксимуючого полінома.

Для вимірювання множника послаблення поля та оцінки за експериментальними даними значень ефективного градієнта індексу рефракції були обрані 3 траси, основні характеристики яких наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики вимірювальних каналів

№ траси	Розташування передавального пункту	Довжина траси, км	Частота, МГц	№ каналу	Потужність передавача, кВт	Висота передавальної антени, м	К-т посилення передавальної антени, дБ	Радіус I зони Френеля, м
1	*Б	63	175	6	5,0	175	10	348
1	*Б	63	223	12	5,0	175	10	308
1	*Б	63	519	27	1,0	190	5,5	202
1	*Б	63	655	44	0,5	146	5	180
2	*Кр	193	191	8	5,0	250	10	548
3	*Кг	207	207	10	40,0	203	10	513

Примітки:

1. *Б – Бєлгород;
2. *Кр – Курськ;
3. *Кг – Красногорівка, Полтавська область.

Вибір трас поширення проводився з необхідності охоплення дослідженнями обох зон поширення радіохвиль (дифракційної та далекого тропосферного поширення). Траса №1 (Бєлгород - Харків) охоплювала перехідну область напівтіні - тіні в той час, як траси №2 та №3 (Курськ -

Харків і Красногорівка - Харків) охоплювали область глибокої тіні, де домінує при поширенні радіохвиль розсіювання на неоднорідностях тропосфери. Траси №2 і №3 мали приблизно однакову довжину і взаємно ортогональну орієнтацію (кут близько 90°). Така орієнтація трас забезпечувала можливість аналізу впливу напрямків переміщення повітряних мас відносно траси поширення на множник послаблення поля за горизонтом. Для досліджень використовувалися сигнали, що випромінюються телевізійними центрами. Приймальний пункт розташувався в м. Харків. Для загоризонтних трас, характеристики яких представлені в табл. 2.1, отримано похиби апроксимації, які наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Похиби залежності V_0 від μ

Порядок регресії, k	Коефіцієнт кореляції, R	Залишкова похибка апроксимації, σ	Кількість точок, N
2	0,984	2,07	13
3	0,998	0,68	13
4	0,999	0,59	13
5	0,9993	0,52	13
6	0,9994	0,51	13

На підставі аналізу похибок апроксимації з використанням критерію Фішера [149] для подальших розрахунків був обраний поліном з $k = 5$. Похиби оцінки значення множника послаблення не більше 2 дБ при похибках у вимірі довжини траси та висот пунктів, що кореспонduють не більше 15%. У роботах [150-152] отримано залежність градієнта індексу рефракції від значень множника послаблення $g(V)$ для розрахованих залежностей множника послаблення V (g) від градієнта індексу рефракції g :

$$g(V) = \sum_{i=0}^k A_i V_i^k. \quad (2.4)$$

Остаточне рівняння з урахуванням (2.4) та табл. 2.2 має вигляд:

$$g = A_0 + A_1 V + A_2 V^2 + A_3 V^3 + A_4 V^4 + A_5 V^5. \quad (2.5)$$

Результатуючі коефіцієнти апроксимації для всіх трас представлені в табл. 2.3 [135].

Таблиця 2.3

Коефіцієнти поліноміальної апроксимації залежності градієнта коефіцієнта заломлення від множника послаблення для різних трас і каналів

Канал	Місто	Коефіцієнти полінома					
		A0	A1	A2	A3	A4	A5
6	*Б	-0,6971	-0,1553	-0,0161	$-8,418 \cdot 10^{-4}$	$-2,114 \cdot 10^{-5}$	$-2,052 \cdot 10^{-7}$
12	*Б	-0,2728	-0,050	-0,0056	$-3,381 \cdot 10^{-4}$	$-9,594 \cdot 10^{-6}$	$-1,033 \cdot 10^{-7}$
27	*Б	-0,0950	-0,0049	$-1,243 \cdot 10^{-4}$	$-1,718 \cdot 10^{-5}$	$-7,619 \cdot 10^{-7}$	$-1,114 \cdot 10^{-8}$
8	*Кр	-0,1665	-0,0011	$2,049 \cdot 10^{-6}$	$-2,550 \cdot 10^{-8}$	$-1,776 \cdot 10^{-10}$	$-4,012 \cdot 10^{-13}$
8	*Кг	-0,17223	-0,0012	$1,545 \cdot 10^{-6}$	$-4,411 \cdot 10^{-8}$	$-3,049 \cdot 10^{-10}$	$-7,130 \cdot 10^{-13}$
10	*Кг	-0,16853	-0,0012	$1,224 \cdot 10^{-6}$	$-4,492 \cdot 10^{-8}$	$-3,115 \cdot 10^{-10}$	$-7,386 \cdot 10^{-13}$

Примітки:

1. * Б – Бєлгород;
2. * Кр – Курськ;
3. * Кг – Красногорівка.

Слід зазначити, що в табл. 2.3 наведено параметри поліноміальної апроксимації, які є кращими з точки зору критерію Фішера. Отримані

співвідношення дозволяють оцінити значення ефективного градієнта індексу рефракції по експериментально отриманих значеннях множника послаблення поля, які можуть бути порівняні з даними метеорологічних вимірювань.

2.2 Двоканальне вимірювання амплітудних значень УКХ сигналів на загоризонтній трасі

Як джерело випромінювання УКХ сигналів було використано випромінювання телевізійного центру, розташованого в м. Бєлгород. Приймальний пункт розташувався в м. Харків, висота розміщення центру двох приймальних антен становила 30,7 м щодо поверхні Землі, і 207,2 м щодо рівня моря. Відстань між нижньою та верхньою антенами (база) становило близько 10 м, що відповідає приблизно 15 ... 20 довжинам хвиль сигналу, який приймається в залежності від номера телевізійного каналу.

На рис. [Б.2](#) зображена карта місцевості з розташуванням приймального і передавального пунктів, а також профіль траси поширення з урахуванням висот антен, кривини землі та профілю місцевості, отриманий з використанням топографічної карти. Для визначення профілю місцевості використовувалися топографічні карти та спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє за ними визначати профіль рельєфу [\[153\]](#).

Середньоквадратичне відхилення висоти відносно середнього рівня на трасі не перевищує 20 м. На рис. [Б.1](#) зображена схема розташування передавальних антен на вежі телецентру м. Бєлгород. Так само на рис. [Б.1](#) наведено параметри передавачів, такі як потужність випромінювання, значення несучої частоти, назва телевізійного каналу, тип передавального пристрою. Дальність до телецентру м. Бєлгород становить близько 63 км. Вимірювальний комплекс повинен забезпечувати можливість вимірювання рівня сигналів на просторово рознесених антенах в смузі частот телевізійних

сигналів, а також вимір кутів приходу сигналу, тобто нахилу фазового фронту, що приходить на приймачі електромагнітної хвилі. Як приймальний пристрій використовувалася багатофункціональна мікросхема R820T, що є приймачем з високим ступенем інтеграції, структурна схема якого зображена на рис. [Б.3](#). До складу приймача входять малошумний підсилювач (LNA), змішувач, фільтри ВЧ і ПЧ, система фазового автопідстроювання частоти (PLL), вихідний підсилювач зі змінним коефіцієнтом посилення (VGA), стабілізатор напруги, стежачий фільтр, при цьому виключається необхідність в застосуванні зовнішніх фільтрів, підсилювачів, узгоджувальних трансформаторів і стабілізаторів. На рис. [Б.4](#) приведено структурну схему двоканального приймача для вимірювання кутів приходу із загальним гетеродином на базі мікросхеми R820T.

Даний вимірювальний комплекс є програмно-визначальною радіосистемою (Software-defined radio, SDR), де радіоприймач, який використовує технологію, що дозволяє за допомоги програмного забезпечення встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи, зокрема, діапазон частот, ширину смуги, тип демодуляції.

Значна частина цифрової обробки сигналів виконується на персональному комп'ютері, що дозволяє обслуговувати велику кількість радіо протоколів. Вимірювальний комплекс складається з супергетеродинного приймача, який перетворює сигнал з радіочастоти на проміжну частоту, а також аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Основні параметри приймача: діапазон робочих частот 42 - 1002 МГц, коефіцієнт шуму 3.5 dB, рівень фазових шумів -98 dBm/Гц у смузі частот 10 кГц, максимальна потужність на вході + 10 dBm, придушення перешкоди по дзеркальному каналу 65 dBm. Основні параметри УКХ каналів телевізійного центру м. Бєлгород, які були використані в експерименті, наведено в табл. [Б.1](#). На рис. [2.1](#) представлено приклади записів сигналів (а, б) та їх спектрів (в, г) при

прийманні 21 каналу телецентру м. Бєлгород, частота 471 МГц з 01.05 по 08.05 2018 року на вертикально рознесені антени.

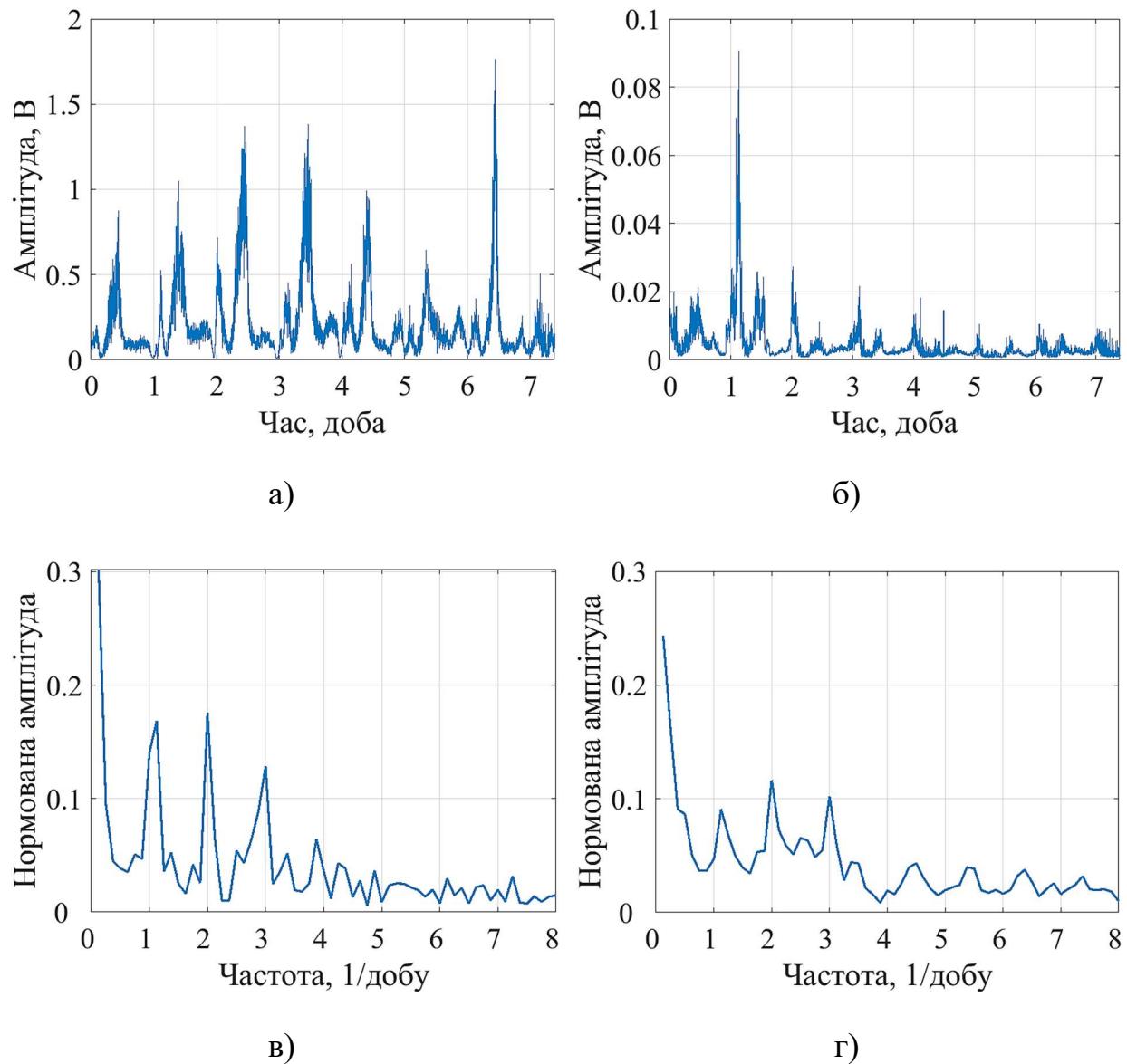


Рисунок 2.1 - Записи рівнів сигналів 21 каналу телецентру м. Бєлгород (а, б) та їх нормовані спектри (в, г), для рознесених по висоті антен, верхній (а, в) і нижньої (б, г) на частоті 471 МГц з 01.05. 18 р. по 08.05.18 р.

Спостерігаються трендові добові зміни рівнів прийнятоого на верхню (а) і нижню (б) антени, причому рівень сигналу верхньої антени (а) істотно (більш, ніж на 6 дБ) перевищує рівень нижньої (б), що безпосередньо випливає

з розглянутої методики оцінки поля сигналу УКХ за горизонтом. При використаних в експериментах розносах між верхньою і нижньою антенами (блізько 10 м.) обидві вони перебували на схилі першого інтерференційного пелюстка.

Ці особливості проявляються і в спектрах прийнятих сигналів, як в низькочастотній частині, як добові тренди, так і в високочастотній, що обумовлено впливом тропосферних неоднорідностей. Видно, що в спектрах спостерігається збіг частот найбільш енергійних спектральних ліній (перших трьох), хоча їх відносна інтенсивність дещо відрізняється.

При вертикальному розносі антен відбувається зміщення в просторі зон істотних для поширення. Коефіцієнт взаємної кореляції реалізацій досить низький - 0.1431.

Як приклад, на рис. 2.2 наведені записи сигналів УКХ телевізійного центру м. Бєлгород за 20 діб та дані індексу рефракції на рис. 2.3 за цей же період. Суміщені дані, усереднені за добу та три доби наведені на рис. 2.4.

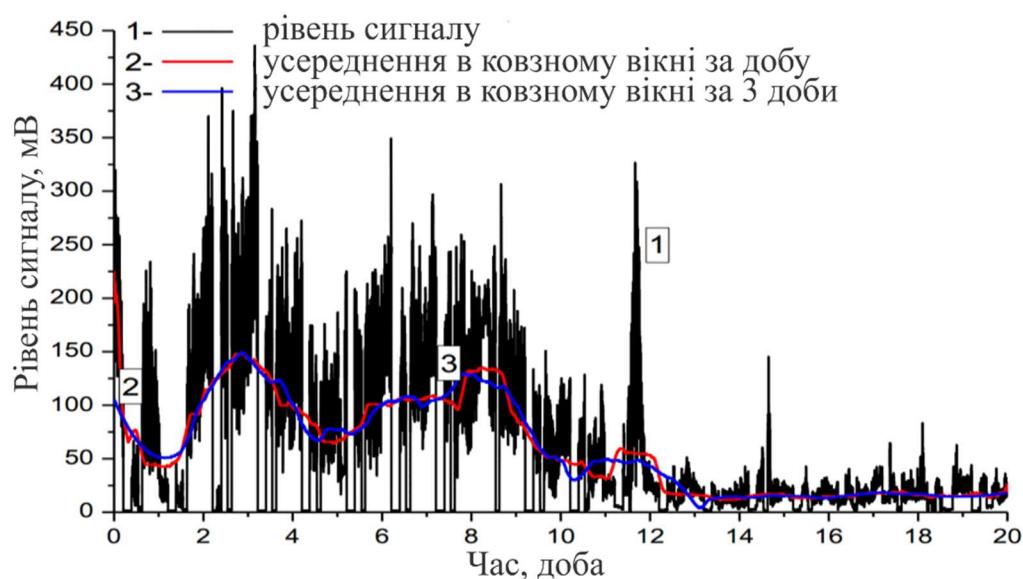


Рисунок 2.2 - Зміни рівнів сигналів 44 каналу телеканалу м. Бєлгород, частота 655МГц з 28.03.18 р. по 17.04.18 р. сигнал верхнього каналу початкові дані та з усередненням за 1 та 3 доби

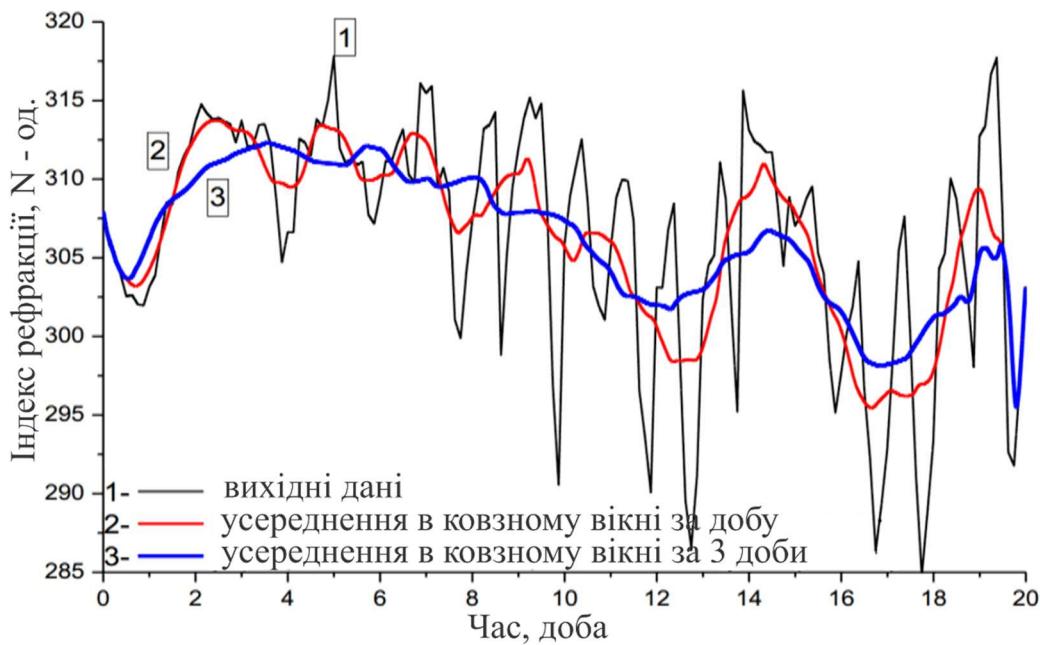


Рисунок 2.3 - Дані індексу рефракції зняті з інтервалом 3 години (1), і усереднені за 1 (2) і 3 (3) доби

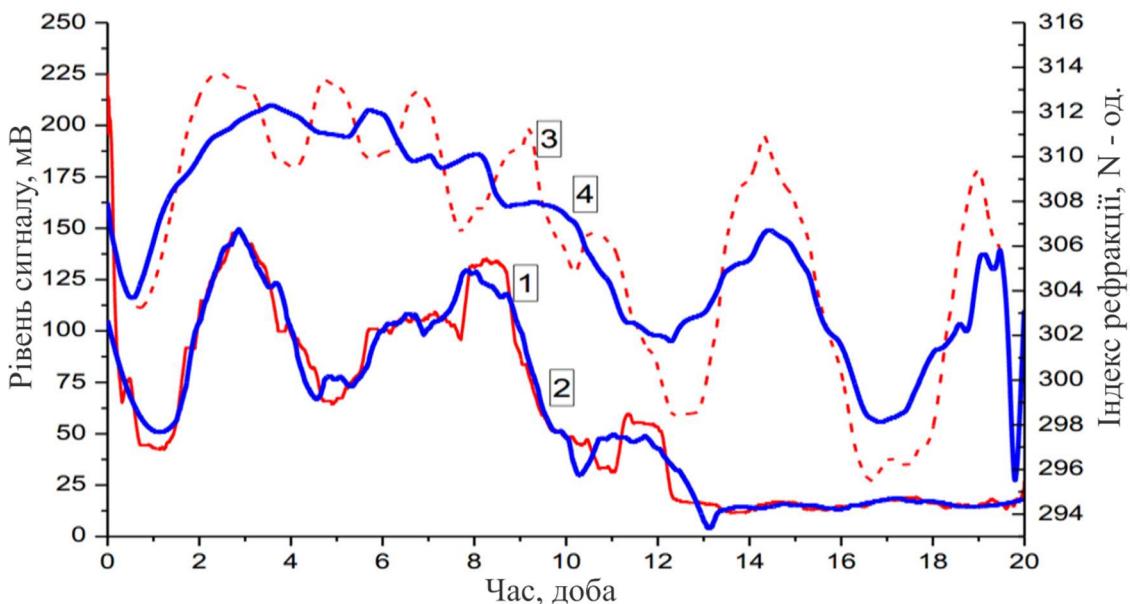


Рисунок 2.4 - Дані рівня сигналу (1, 2) та індексу рефракції (3, 4), усереднені за 1 добу (1, 3) і 3 доби (2, 4)

Для сигналу характерна циклічність, пов'язана з добовим характером поведінки сигналу. Крім того, слід зазначити, що крім добових змін

спостерігаються і трендові більш повільні зміни. В цілому спостерігається тенденція до зниження рівня сигналу при зменшенні індексу рефракції тропосфери, що узгоджується з теоретично очікуваними змінами. Так на початковому етапі вимірювань (з 28.03.2018 р. до 08.04.2018 р.) середній рівень сигналу суттєво, приблизно в 6 ... 7 разів вище, ніж у другому періоді вимірювань (з 09.04.2018 р. до 17.04.2018 р.). Збільшення інтервалу згладжування призводить до зростання коефіцієнта кореляції прийнятого сигналу та індексу рефракції. При зміні інтервалу згладжування від 3 годин до 3 діб коефіцієнт кореляції зростає від 0.35 до 0,8. Оскільки рівень прийнятого на загоризонтній трасі сигналу визначається значенням ефективного вертикального градієнта індексу рефракції тропосфери на трасі та висотою розміщення приймальної антени, то прийняті рознесеними в просторі антенами сигнали можуть використовуватися для оцінки ефективного значення коефіцієнта заломлення шару тропосфери, істотного для поширення радіохвиль [135].

2.3 Визначення характеристик інверсійних відбиваючих шарів в тропосфері по змінах інтенсивності сигналу на приземних загоризонтних трасах.

Для зони середніх широт, в якій розташована Україна, при прийманні радіохвиль УКХ діапазону в зоні близньої геометричній тіні, в умовах спокійної атмосфери спостерігаються як сезонні [154], так і добові зміни рівня сигналу, як після заходу і дещо пізніше сходу Сонця, що пов'язано зі зміною рефракційних властивостей тропосфери [17, 31, 141, 150 - 152]. Разом з тим, у весняно-осінній період більш ніж в 30% випадків, поряд з плавним зростанням сигналу (до 10 dB) після заходу Сонця, і таким же спаданням його після сходу спостерігалися інтерференційні явища з глибокими завмираннями. Типова

поведінка сигналу на загоризонтній трасі при наявності інверсійних шарів представлено на рис 2.5 та рис Б.5. Видно наявність глибоких завмирань сигналу, викликаних багатопроменевістю в каналі поширення.

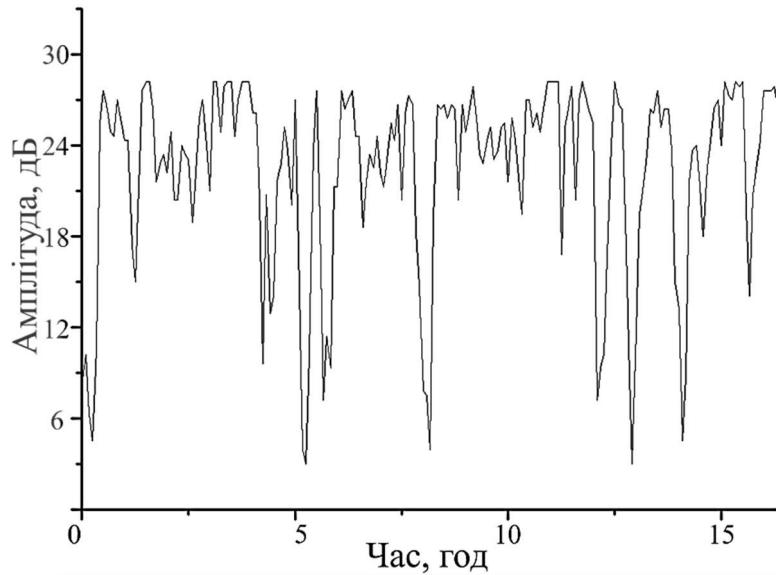


Рисунок 2.5 - Поведінка сигналу при наявності інверсійних відбиваючих шарів на загоризонтній трасі

Коли в точці прийому присутні не тільки прямий сигнал від передавального пункту, але так само і відбитий від інверсійного шару [155, 156].

$$\dot{S}_{\text{пр}} = \dot{S}_B \dot{V} + \dot{S}_B \dot{\rho} \quad (2.6)$$

де \dot{S}_B , $\dot{S}_{\text{пр}}$ – випромінюваний та прийнятий сигнал, \dot{V} – коефіцієнт послаблення сигналу на загоризонтній трасі, $\dot{\rho}$ – коефіцієнт відбиття від інверсійного шару

На рис.2.6 схематично представлено канал поширення в рамках моделі еквівалентного радіуса Землі a_e [31] з урахуванням наявності в тропосфері одного піднятого інверсійного шару.

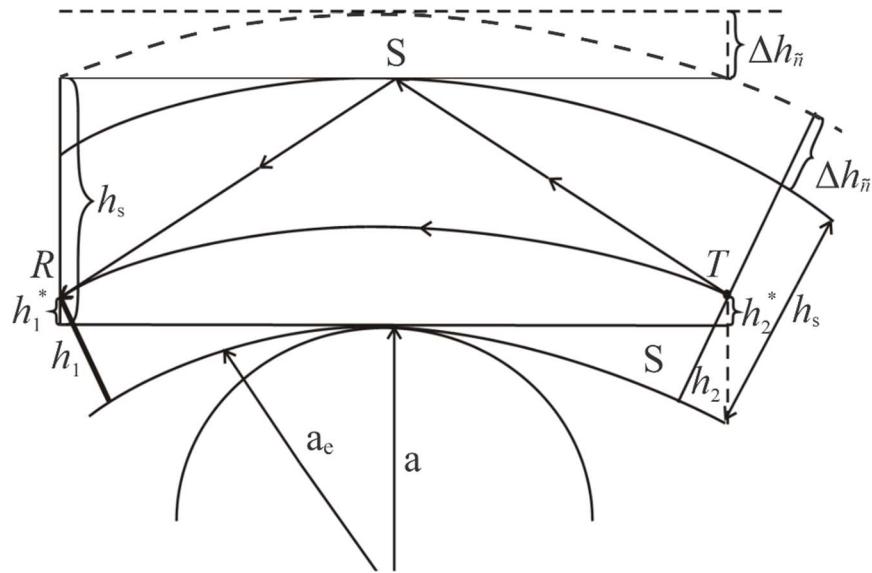


Рисунок 2.6 - Схематичне зображення каналу поширення

Дана модель враховує радіус кривизни як самої Землі, так і інверсійного шару та висоти розташування антен. На рис. 2.6. показано наявність одного піднесеного інверсійного шару, хоча в загальному випадку їх може бути кілька. Через рефракцію в тропосфері в рамках моделі еквівалентного радіуса Землі a_e .

$$a_e = \frac{a}{1+g},$$

де a – радіус Землі, g – градієнт індексу рефракції.

Зміна висоти інверсійного шару $\Delta h_{\tilde{n}}$ може бути визначена за інтерференційною картиною прийнятого сигналу [157]

$$\Delta h_{\tilde{n}} = \frac{(h_1^* + h_2^*)}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\tilde{n}\lambda R}{(h_1^* + h_2^*)^2}} - 1 \right], \quad (2.7)$$

де \tilde{n} – кількість напівперіодів коливань амплітуди прийнятоого сигналу внаслідок зміщення піднятого інверсійного шару в тропосфері на висоту Δh_n , h_1^*, h_2^* – наведені висоти відповідних точок щодо інверсійного шару визначаються як:

$$h_1^* = h_s - h_1 - \Delta h_1,$$

$$h_2^* = h_s - h_2 - \Delta h_2,$$

де $h_1, h_2, h_s, \Delta h_1, \Delta h_2$ – висота кореспондуючих пунктів, інверсійного шару, а також їх збільшення в наслідок заломлення.

Швидкість зміни висоти інверсійного шару за період цих коливань, Δt_n можна оцінити:

$$v = \frac{\Delta h_{\tilde{n}}}{\Delta t_{\tilde{n}}}. \quad (2.8)$$

Відносний коефіцієнт відбиття від інверсійного шару γ можна оцінити за допомогою вимірювань максимального та мінімального рівнів прийнятоого сигналу з періодичною зміною:

$$\gamma = \frac{1 - V_{\min}/V_{\max}}{1 + V_{\min}/V_{\max}},$$

а коефіцієнт відбиття від шару ρ отримують з використанням експериментально отриманих даних значень коефіцієнту послаблення [156].

Висотний профіль градієнта індексу рефракції оцінювався на основі інформації показників метеорологічних куль-зондів про температуру, вологість і тиск.

На рис. 2.7 надана залежність висоти переміщення шару $\Delta h_{\tilde{n}}$ між сусідніми максимальним і мінімальними значеннями в прийнятому сигналі від ефективного градієнта індексу рефракції, яка отримана з використанням [154, 157].

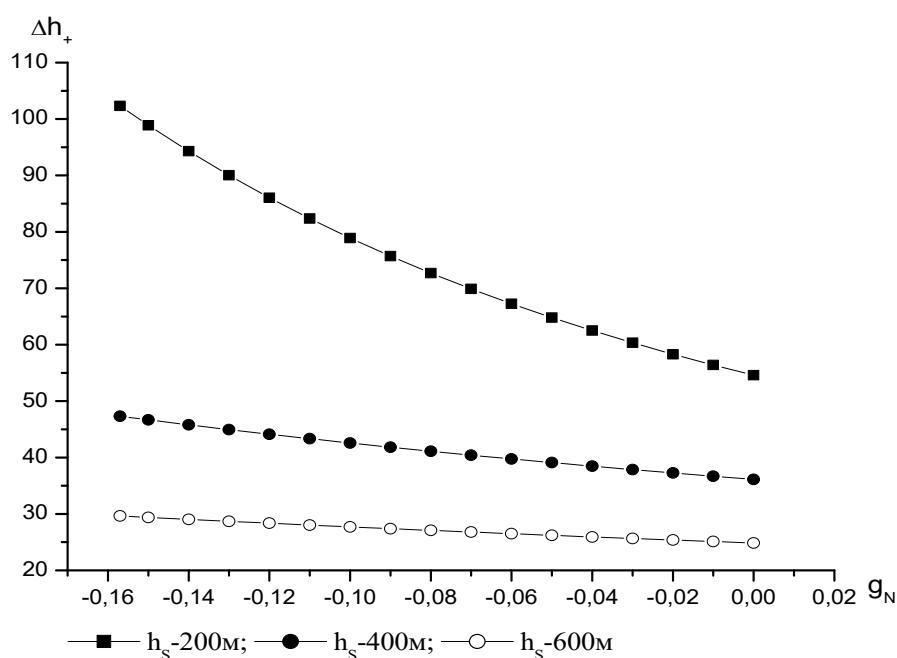


Рисунок 2.7 - Залежність зміни висоти шару між сусідніми max і min сигналу від ефективного градієнта індексу рефракції

Теоретично очікувані оцінки коефіцієнта відбиття від шару з поступовою зміною індексу рефракції на ΔN можна отримати, використовуючи співвідношення [158]:

$$\rho \approx \frac{\Delta N}{2\theta_{\tilde{n}}^2},$$

що справедливо для малих, але все ж більших, ніж кут повного внутрішнього відбиття $\theta_{\tilde{n}}$, для сигналу що стикається з шаром визначається співвідношенням:

$$\theta_{\tilde{n}} = \frac{h_2^* + h_1^*}{R}$$

Кути огляду, що відповідають сумарному внутрішньому відбиттю $\theta_{\tilde{n}} \leq \sqrt{2\Delta N}$, де ΔN – виражається в N – одиницях, $\theta_{\tilde{n}}$ – в мілірадіанах.

Вищезазначені співвідношення дозволяють визначити коефіцієнти відбиття від шару, швидкість зміни його висоти та величину стрибка індексу рефракції за інтерференційною структурою сигналу на загоризонтній трасі.

Було проаналізовано дані за 2004 рік, коли одночасно із вимірюванням рівнів сигналів УКХ, які приймалися при поширенні на загоризонтній трасі між телевізійним центром розташованим в м. Бєлгород і приймальним пунктом в м. Харків проводилися вимірювання температури, тиску, вологості за допомоги запусків куль зондів. Вимірювання проводилися в період весни-літа (з травня по серпень, табл. 2.2), коли наявність інверсійних шарів найбільш ймовірна.

Використовуючи методи оцінювання характеристик каналів з багатопроменевістю [157, 159, 160] для обробки прийнятих сигналів, а також дані аерологічних зондувань, встановлено, що кількість інверсійних шарів, як правило, не перевищує двох, зі стрибком індексу рефракції на кордоні шарів 6 ... 14 N- одиниць, глибина завмирань сигналу становить від -3 дБ до - 23 дБ, висота інверсійного шару що відбиває становить від 50 м до 650 м, період завмирань сигналу від 0,5 до 3,75 години, швидкість зміни висоти шару від 9,27 до 141,22 м/год, коефіцієнт відбиття від -31,14 дБ до -16,67 дБ, середній градієнт коефіцієнта заломлення від -0,105 до -0,033 N - одиниць/м (табл. 2.4).

На рис. 2.8. представлено функції розподілу (а) та гістограми (б) градієнту індексу рефракції в шарі на трасі поширення радіохвиль, характеристик інверсійних шарів та відбитих від них сигналів.

Таблиця 2.4

Характеристики інверсійних шарів що відбивають за даними експерименту

параметр	Глибина завмірань ΔV , dB	Висота шару h_s , м	Середній градієнт індексу рефракції g_N , N- одиниць/м	Відносний к-т відбиття γ	K-т відбиття ρ , dB	Зміна висоти Δh , м.	Період завмірань сигналу Δt , год.	Швидкість зміни висоти шару $\Delta h/\Delta t$, м/год
середнє	10,35	369,64	-0,0529	0,5080	-24,08	67,32	2,03	38,41
ст. відхилення	0,81	34,15	0,0031	0,0301	0,720	12,75	0,141	6,81
медіана	10	450	-0,048	0,5195	-24,02	35,02	2	24,87
мода	7	450	-0,049	0,3825	-16,67	34,84	1,5	
СКВ	4,74	180,7	0,0164	0,1757	3,8824	67,45	0,813	36,05
дисперсія	22,43	32655,4	0,00027	0,0309	15,07	4550	0,662	1299,5
к-т ексцесу	0,471	-0,541	5,924	-0,515	-0,518	6,376	-0,85	1,921
асиметрія	0,858	-0,389	-2,386	0,170	0,0487	2,592	0,374	1,684
інтервал	19,5	600	0,072	0,669	14,474	258,6	3,25	131,95
мінімум	3,5	50	-0,105	0,1987	-31,14	23,77	0,5	9,27
максимум	23	650	-0,033	0,8678	-16,67	282,4	3,75	141,22
сума	352	10350	-1,532	17,273	-698,4	+1885	67,15	1075,5
інформант	34	28	29	34	29	28	33	28

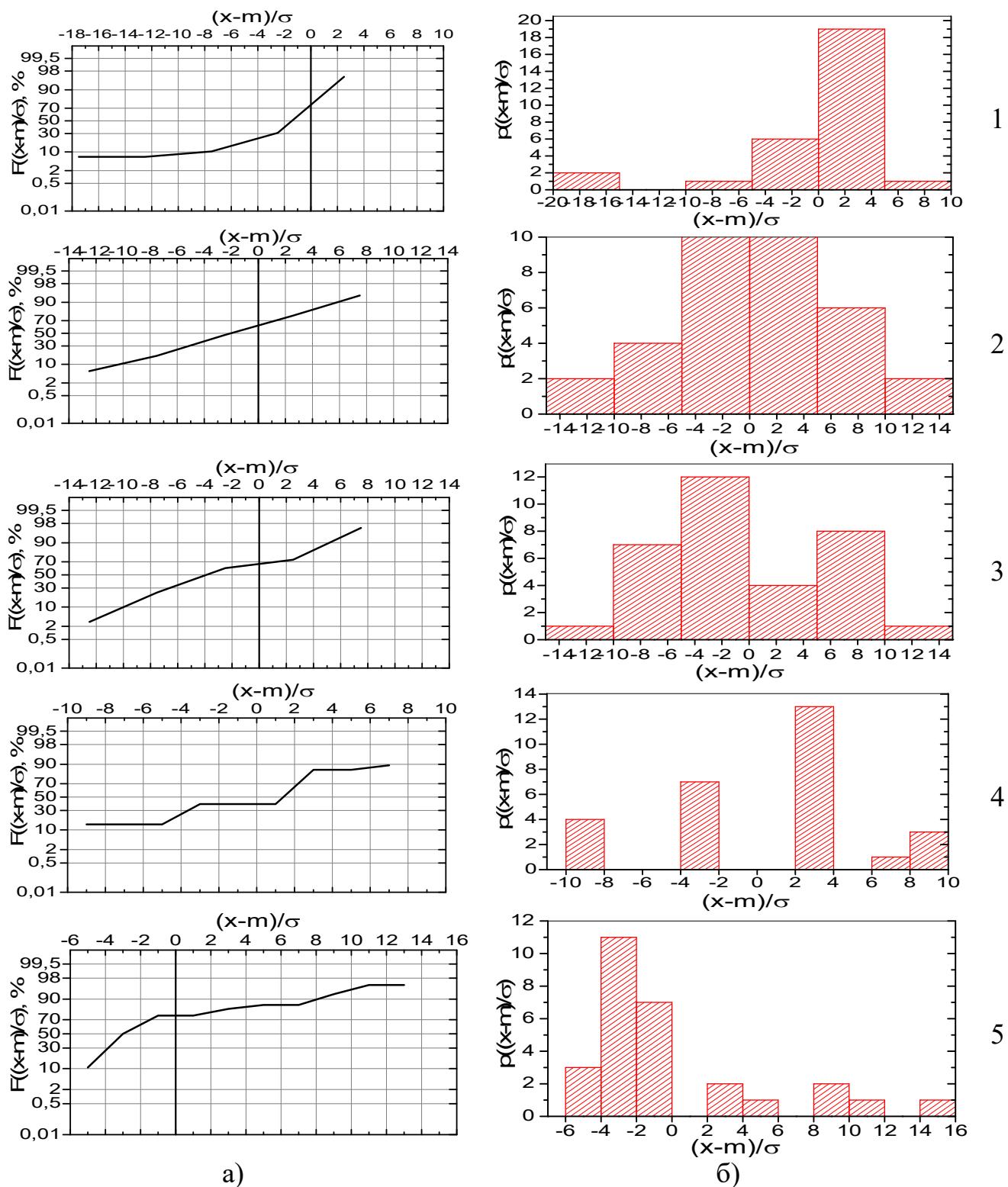


Рисунок 2.8 - Характеристики інверсійних шарів і відбитих від них сигналів, що поширяються на загоризонтній трасі: функції розподілу (а) та гістограми (б): ефективного градієнту індексу рефракції в шарі поширення радіохвиль (1), коефіцієнт відбиття від шару (2), глибина завмирань (3), висота інверсійного шару, що відбиває (4), швидкість його руху (5)

На рис. 2.8 інтегральні функції розподілу дані в масштабі, який лінеаризує нормальний закон розподілу. У цьому випадку значення процесу (абсциса) центрується та нормалізується до середньоквадратичного значення, дані про які наведені в табл. 2.4. Оскільки коефіцієнти асиметрії і ексцесу для розподілу різниці інтенсивностей сигналу, висоти шару, коефіцієнтів відбиття від нього та тривалості завмирання малі, то можна використовувати стандартні гаусові моделі для їх опису.

Водночас розподіл середнього градієнта в шарі та швидкість його переміщення істотно відрізняються від стандартних моделей, є більш асиметричними та загостреними, ніж розподіл Гауса.

2.4 Бістатичні РЛС з підсвічуванням через іоносферу.

Сигнали УКХ використовуються для моніторингу навколошнього середовища вже досить давно. Перші досліди по використанню зміни рівня сигналів на загоризонтній трасі для оцінки рефракційних властивостей тропосферного каналу поширення проводилися ще в 1950-ті рр. Подальший розвиток вони отримали при використанні випромінювань телевізійних центрів для просвічування загоризонтного тропосферного каналу [161].

Сигнали телевізійних центрів можуть використовуватися не тільки для діагностики умов поширення та рефракційних властивостей тропосфери, але і для виявлення повітряних об'єктів [162]. Однак виявлення об'єктів при використанні підсвічування повітряного стану сигналами УКХ можливо тільки в межах прямої видимості. Разом з тим, особливості поширення КХ сигналів в каналі Земля – іоносфера дозволяють використовувати їх не тільки для діагностики стану іоносфери [163], а й для виявлення повітряних об'єктів за горизонтом [164]. Для КХ діапазону розміри літаків порівнянні з довжиною хвилі і їх ЕПР може сягати значної величини, отже, технології зменшення

радіопомітності, які широко застосовуються на цей час будуть неефективні для її зниження. Останнім часом особливий інтерес викликають так звані активно-пасивні системи, що використовують для підсвічування повітряного стану випромінювання наявних радіомовних КХ станцій. Така система виявлення може бути віднесена до класу бістатичних радіолокаційних станцій, де виявлення проводиться з використанням випромінювання мовних станцій, розсіяного повітряними об'єктами. Для селекції корисного сигналу, відбитого від об'єкта на фоні пасивних завад, створюваних відбиттями від місцевості, можна використовувати когерентну обробку з виділенням сигналу доплерівської частоти, поява якої обумовлена зміною відстані, яку проходить електромагнітна хвиля по трасі: джерело підсвічування – іоносфера – об'єкт – приймач. Потужність відбитого від цілі сигналу P_t визначається співвідношенням:

$$P_t = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R F^2(\theta_T) \sigma_T(\theta_{Tr}, \theta_R) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{TrT}^2 R_{TR}^2 L_{TrT} L_{TR}}, \quad (2.9)$$

де P_{Tr}, P_T – потужність яка випромінюється і приймається, після відбиття від цілі;

G_{Tr}, G_R – коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен;

R_{TrT}, R_{TR} – дальності між передавачем і ціллю та ціллю і приймачем, $\sigma(\theta_{Tr}, \theta_R)$ – бістатична ЕПР цілі, де θ_{Tr}, θ_R – напрямки на передавач і приймач відповідно; $F^2(\theta_T)$ – значення діаграми спрямованості передавальної антени по потужності в напрямку на передавач, L_{TrT}, L_{TR} – втрати при поширенні радіохвиль від передавача до цілі та від цілі до приймача відповідно; λ – робоча довжина хвилі випромінювання. Використання для оцінки прийнятого відбитого від цілі сигналу співвідношення (2.9) утруднене, у зв'язку з апріорною невизначеністю втрат при поширенні сигналу L_{TrT}, L_{TR} на трасі, що

призводить до значних похибок при оцінці дальності дії таких систем [15]. Для зниження цих похибок була розроблена методика, що використовує при оцінках добре контролювані значення рівнів прямого сигналу підсвічування в точці приймання.

Потужність прийнятого сигналу P_R від передавальної станції:

$$P_R = \frac{P_{Tr}G_{Tr}G_R F^2(\theta_{Tr})\lambda^2}{(4\pi)^2 R_{TrR}^2 L_{TrR}}, \quad (2.10)$$

де R_{TrR} – дальність між передавачем і приймачем, $F^2(\theta_{Tr})$ – значення діаграми спрямованості приймальної антени по потужності в напрямку на передавач під кутом θ_{Tr} , а L_{TrR} – втрати при поширенні від передавача до приймача.

З урахуванням того, що відстань від станції підсвічування до цілі та приймальної системи істотно більша, ніж відстань від цілі до приймача $R_{TrT}^2 \approx R_{TrR}^2 \gg R_{TR}^2$, а втрати при поширенні до цілі і приймача приблизно однакові $L_{TrT} \approx L_{TrR}$, причому ціль в цьому діапазоні можна вважати такою, що відбиває ізотропно $\sigma_T(\theta_{Tr}, \theta_R) \approx \sigma_T = const$ і знаходиться в межах прямої видимості приймальної системи $L_{TR} \approx 1$, відношення потужностей сигналів, відбитого від цілі та прямого від передавальної мовної станції μ_{TR} з урахуванням (2.9, 2.10) визначається співвідношенням:

$$\mu_{TR} = \frac{P_T}{P_R} \approx \frac{F^2(\theta_T)}{F^2(\theta_{Tr})} \frac{\sigma_T}{(4\pi)R_{TR}^2}. \quad (2.11)$$

До отриманого співвідношення (2.11) не входять параметри, що важко визначити, такі як втрати на трасі поширення. З виразу (2.11) випливає, що для збільшення дальності виявлення, необхідно формувати мінімум діаграми спрямованості приймальної антени в напрямку станції підсвічування і

максимум в напрямку на ціль. Ступінь придушення сигналу підсвічування діаграмою спрямованості приймальної станції буде обмежувати максимальну дальність виявлення. Необхідно звернути увагу, що для повітряних об'єктів довжина хвилі поля радіомовних станцій, що опромінюють, може бути порівняна з їх розмірами, і це може призводити до зростання ЕПР. Крім вибору резонансної довжини хвилі сигналу, що опромінює, формування нуля діаграми спрямованості в напрямку на станцію підсвічування, підвищення співвідношення сигнал - завада може бути досягнуто шляхом застосування вузькосмугової доплерівської фільтрації. Спектр зворотного розсіювання від повітряних об'єктів над поверхнею води та землі навіть у НВЧ діапазоні при відбитті сигналу від корпусу об'єкта не перевищує десятка Гц [165-167]. Дослідження зворотного розсіювання від надводних і повітряних об'єктів в КХ діапазоні [168, 169] дозволяють зробити висновок про те, що ширина несучої відбитого сигналу становить соті частки герца і визначається, в основному, флюктуаціями проекції вектора швидкості об'єкта на напрям опромінення за час формування спектральної оцінки. При використанні доплерівської селекції, співвідношення сигнал - завада (ССЗ) μ буде визначатися відношенням рівня сигналу від цілі до сигналу підсвічування μ_{TR} , і відношенням рівня спектральної лінії несучої до спектральної густини шуму в діапазоні доплерівських частот μ_{SN} , де відбувається виявлення цілі:

$$\mu = \mu_{TR}\mu_{SN}. \quad (2.12)$$

Дальність виявлення для бістатичних РЛС при використанні сигналів радіомовних КХ станцій для підсвічування підставляючи (2.11) в (2.12) можна записати:

$$R_{TR} = \sqrt{\frac{\mu_{SN}}{\mu} \frac{\sigma_T}{(4\pi)} \frac{F^2(\theta_T)}{F^2(\theta_{Tr})}}. \quad (2.13)$$

Вперше такий підхід для оцінки дальності виявлення був запропонований нами в роботі [139]. З (2.13) випливає, що для повітряних об'єктів при ЕПР в резонансній області $10^3...10^4 \text{ м}^2$, ССЗ $10...15 \text{ дБ}$, необхідному для виявлення з вірогідністю правильного виявлення $0,9 ... 0,99$ і помилкової тривоги $10^{-2}...10^{-5}$, формуванні мінімуму ДС антени в напрямку станції підсвічування близько 40 дБ , рівні завад щодо спектральної густини несучої на $40 ... 50 \text{ дБ}$ при відбудові на доплерівський зсув частоти дальність виявлення може сягати більш ніж 100 км [136].

Для оцінки ЕПР повітряних об'єктів за експериментальними даними, так само можна використовувати співвідношення (2.13). Якщо виявлення літака відбулося на максимальній дальності R_{TRmax} при використанні для підсвічування станції, у якій рівень несучої перевищує рівень шумів на доплерівських частотах в μ_{SN} раз, то ЕПР літака, як видно з (2.13) буде

$$\sigma_T = (4\pi) \frac{\mu}{\mu_{SN}} \frac{F^2(\theta_{Tr})}{F^2(\theta_T)} R_{TRmax}^2. \quad (2.14)$$

Якщо при виявленні використовуються ненаправлені антени, то $F^2(\theta_{Tr}) \approx F^2(\theta_T) \approx 1$ і співвідношення (2.14) набуває вигляду

$$\sigma_T = (4\pi) \frac{\mu}{\mu_{SN}} R_{TRmax}^2 \quad (2.15)$$

і може використовуватися для експериментальної оцінки ЕПР об'єктів.

2.5 ЕПР повітряних об'єктів в КХ діапазоні.

Дані, що існують на цей час про ЕПР повітряних об'єктів в КХ діапазоні, були отримані при використанні РЛС в моностатичному режимі, вони нечисленні та суперечливі [15, 170].

Оскільки горизонтальні розміри літаків в КХ діапазоні є співмірними з довжиною хвилі при горизонтальній поляризації поля, що опромінює об'єкт, розсіяння відбувається в резонансної області та ЕПР таких об'єктів може досягати значної величини. Однією з основних особливостей радіолокації поверхневою вертикально поляризованою хвилею в КХ діапазоні є принципова можливість виявлення об'єктів, що знаходяться в зоні близньої геометричної тіні, що обумовлено ефектом дифракції радіохвиль на поверхні моря, яка має добру провідність. Практична реалізація такої можливості при виявленні низьколетючих об'єктів скрутна, що, в першу чергу, пов'язано з їх малою ЕПР. Раніше вважалося, що ЕПР літаків поблизу поверхні розподілу, в зоні, де переважає вертикальна поляризація випромінювання, що зондує, є малою, оскільки вертикально - орієтовані елементи конструкції малі в порівнянні з довжиною хвилі, і при цьому відбувається закон розсіювання Релея, коли $\sigma \sim \lambda^{-4}$, де σ – ЕПР об'єкта, λ – довжина хвилі поля, що опромінює. За різними оцінками [15, 170, 171], вважалося, що ЕПР таких об'єктів лежить в межах $0,1 \dots 20 \text{ м}^2$. В той самий час для високо летючих літаків, коли вони знаходяться в полі зі значною інтенсивністю горизонтально - поляризованого випромінювання, що характерно для РЛС іоносферної хвилі, вважалось, що ЕПР літаків при виборі довжини хвилі РЛС, сумірною з розмахом крила, може досягати значень $\sigma \sim \lambda^2$, що для КХ діапазону становить $80 \dots 2000 \text{ м}^2$. Призначення, габаритні розміри основних елементів та отримані оцінки ЕПР деяких типів літальних апаратів в тому числі літаків 5 покоління, виконаних за технологією "стелс", на вертикальній і

горизонтальній поляризаціях наведено в табл. В.1. [136]. ЕПР і значення резонансних частот, отримано з використанням емпіричних співвідношень для складних конструкцій, які досліджені в роботах [171-173], де наведено результати модельних експериментів у резонансній області зі складними конструкціями, що імітують елементи літака.

Для літаків 5 покоління, виготовлених з використанням технологій "стелс", заявлені значення ЕПР для НВЧ діапазону складають $0.001 \dots 0.1 \text{ м}^2$, в той самий час наведені в табл. В.1 оцінки показують, що в резонансній області їх ЕПР може бути на $3 \dots 5$ порядків більше ніж у НВЧ діапазоні. Це означає, що при порівнянних потенціалах РЛС дальність виявлення в КХ діапазоні, як випливає з (2.13), може в $30 \dots 300$ разів перевищувати їх дальності виявлення у НВЧ діапазоні. Однак слід зазначити, що в КХ діапазоні практично неможливо реалізувати в бортових літакових РЛС настільки ж високі потенціали, як і у НВЧ діапазоні.

Для оцінки потенціалу виявлення повітряних об'єктів з використанням як сигналу підсвічування випромінювання радіомовних станцій КХ діапазону нами була проведена серія експериментів [138 - 140, 174].

Схема експерименту обумовлена фізичним розташуванням злітної смуги та Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова, де було розташовано приймальне обладнання, траєкторією польоту літаків. В експериментах було використано кілька КХ станцій. Станції вибиралися в залежності від часу доби, і від кількості відбиттів від іоносфери, співвідношення сигнал-перешкода. Експерименти охоплювали серії з послідовних вимірювань на горизонтальній і вертикальній поляризаціях. Об'єктами виявлення були літаки типів АН-74 та АН-140.

У телеграфному режимі приймання за допомогою 3-го гетеродина здійснювалося зміщення несучої на частоту $1700 \dots 1850$ Гц, що давало

можливість дослідити відбиті сигнали, як при позитивних, так і негативних доплерівських зсувах частоти.

На рис. 2.9 наведені спектри сигналів несучої та зміщеною на доплерівську частоту щодо неї лінії корпусу літака АН-74 для вертикальної та горизонтальної поляризацій приймання.

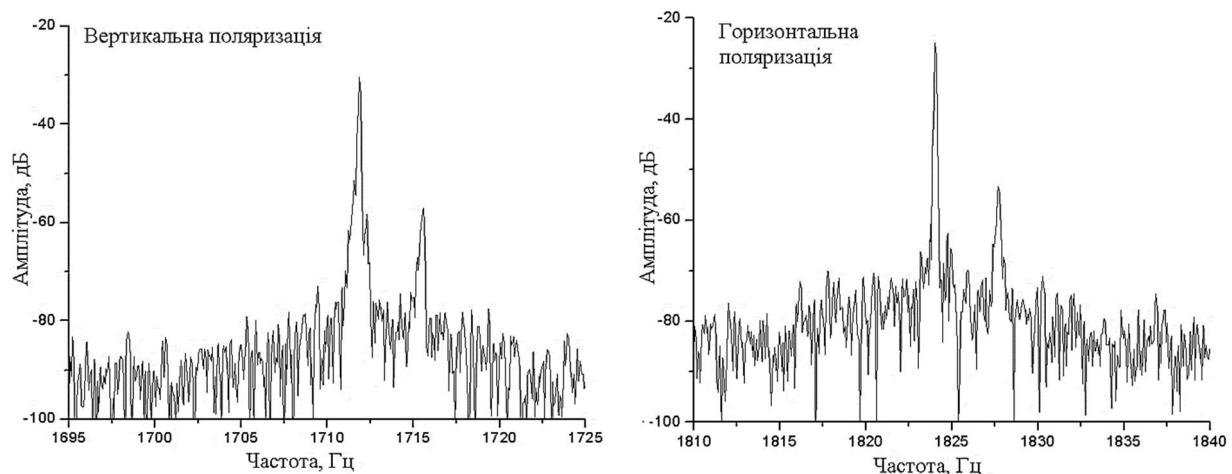


Рисунок 2.9 - Спектри сигналів після гетеродинного перетворення несучої частоти КХ станції та зміщених на доплерівську частоту відбиттів від літаків

Як сигнал підсвічування для даного експерименту використано випромінювання радіостанції, що ведуть передачі на частоті 15130 кГц, азимутальний кут θ_{TrT} становив близько 75° [136]. Траєкторія польоту літака, після зльоту з аеродрому перетинала базу вимірювального комплексу під кутом близько 40° і проходила поблизу приймального пункту. Відстань злітно-посадкової смуги до лінії бази становило близько 1500 м. Зміна поляризації приймання здійснювалася шляхом повороту приймальної антени на кут 90° . Як приймальна антена використовувався диполь з ефективною довжиною близько 0,4 м. У процесі експерименту реєструвався сигнал, відбитий від літака, що наближається до приймача або віддаляється від нього.

Характеристики сигналу для кількох дослідів, такі як співвідношення рівнів сигналу несучої частоти та спектральної лінії відбитого від літака сигналу [136], а також її ширина при різних поляризаціях прийнятого випромінювання, значення ЕПР для літака наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Характеристики відбиттів від ліній корпусу літака

Частота, МГц	Поляризація	Лінія корпусу		ССЗ, дБ при відбудові від несучої на μ_{SN}		Співвідношення сигнал-несуча, дБ μ_{TR}	ЕПР
		Частота, Гц	Ширина, Гц	10 Гц	3 Гц		
15,130	ВП	4.22	1.12	38.8	24.8	-27	4010
15,130	ДП	4.03	0.68	32.2	20.4	-26	5047
15,130	ВП	3.58	1.05	34.7	23.6	-28	3185
15,130	ДП	3.58	0.9	32.3	21.7	-29	2529

Дальності виявлення літака в експериментах становили до декількох кілометрів.

Використовуючи співвідношення для доплерівського зсуву частоти,

$$\frac{V_D}{V_0} = \cos(\theta_{TrT} - \theta_T) + \cos(\theta_{TR} - \theta_T), \quad (2.16)$$

а також дані табл. 2.5 по частотах і азимутальні кути станції підсвічування можна оцінити доплерівський зсув частоти сигналу, відбитого від літака в момент зльоту (швидкість 230 ... 240 км/год), який має величину 4,06 ... 4,23 Гц, що задовільно узгоджується з даними, отриманими під час експерименту. Слід зазначити, що відбиті від літака сигнали, як горизонтальної, так і

вертикальної поляризацій мають приблизно однакову величину та перевищення над рівнем завад. У дослідах використовувався диполь, який в азимутальній площині мав кругову діаграму спрямованості. Час формування спектральної оцінки становив близько 15 с, дальність спостереження літаків становила одиниці кілометрів. З табл. 2.4 видно, що співвідношення сигналу шуму перевищує 30 дБ при відбудові від несучої на 10 Гц і понад 20 дБ при відбудові 3 Гц.

Видно, що отримані ССЗ для сигналу достатні для надійного виявлення. При формуванні провалу в діаграмі спрямованості приймальної антени в напрямку станції підсвічування глибиною близько 40 дБ, при незначному послабленні сигналу, відбитого від цілі, дозволить реалізувати її виявлення на відстанях понад 100 км. Проведені виміри на вертикальній і горизонтальній поляризаціях приймання при використанні для підсвічування сигналу іоносферної хвилі підтвердили для виявлення літаків відсутність істотних відмінностей як між ЕПР, так і в рівнях завад [136].

Використовуючи співвідношення (2.15), отримані експериментально співвідношення між рівнем несучої та завадами в смузі доплерівських частот, а також реалізовані дальності виявлення можна оцінити значення спостережуваної в дослідах ЕПР літака приблизно в кілька тисяч квадратних метрів (табл. 2.5), що узгоджується з результатами теоретичних оцінок. Для літака Ан-74, який виявляється в дослідах, розрахункові значення ЕПР в резонансній області мають значення на горизонтальній поляризації 2700 - 3500 м², на вертикальній 340 м², хоча в дослідах не було виявлено суттєвої різниці при виявленні сигналу на вертикальній і горизонтальній поляризаціях, що узгоджується з результатами модельних експериментів з вивчення матриць розсіювання тіл складної форми [173]. Це може мати вирішальне значення для моніторингу в КХ діапазоні малопомітних об'єктів із використанням поверхневої хвилі на вертикальній поляризації. [136, 138 - 140, 174].

2.6 Моніторинг морського хвилювання з використанням ГНСС-сигналів.

Системи моніторингу навколишнього середовища, що використовують випромінювання телевізійних центрів і мовних КХ станцій, дозволяють контролювати атмосферні процеси та виявляти антропогенні об'єкти на трасі між станцією підсвічування та приймачем. Тобто здійснювати локальний моніторинг. Використання випромінювань, що існують на цей момент ГНСС, GPS – США та ГЛОНАСС – РФ, а в перспективі розгортаються Galileo – ЄС і BeyDou – КНР, дозволяють перейти до побудови систем глобального моніторингу атмосфери та вивчення процесів в ній. Однак крім аналізу прямого сигналу, який підпадає під вплив навколишнього середовища, цікаве також питання пов'язане із вивченням відбитих сигналів від земної водної поверхні, які несуть в собі інформацію про їх стан [157, 159, 175 -177]. Для тестування приймачів ГНСС і підвищення точності вимірювання величин потрібне застосування спеціальної апаратури, введення поправок в алгоритми та вдосконалення алгоритмів обробки інформації, що приймається [178].

Для використання сигналів ГНСС для моніторингу морської поверхні був створений мобільний вимірювальний комплекс [137], що складається з одночастотного вітчизняного ГНСС - приймача типу СН-4706, телескопічної антени й персонального комп'ютера з програмним забезпеченням для збору й обробки навігаційної інформації.

Приймач СН-4706 призначений для використання в інтегрованих навігаційних системах як датчик координат для визначення поточних значень координат (широта, довгота, висота), вектора швидкості споживача, а також поточного часу за сигналами супутниковых навігаційних систем (СНС) ГЛОНАСС, GPS і SBAS в будь-якій точці земної кулі, в будь-який момент часу

і незалежно від метеоумов. Основні характеристики приймача CH-4706 представлени в таблиці Г.1.

Розташування антени на місцевості та розташування супутників під час вимірювань показано на рис. 2.10.

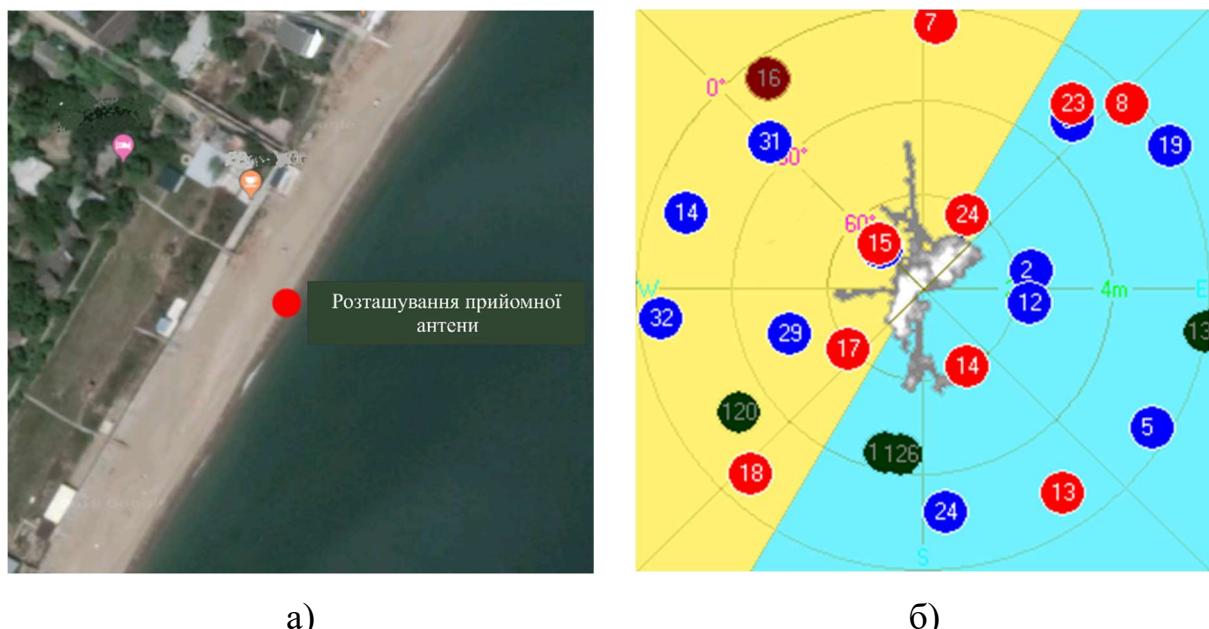


Рисунок 2.10 - Розташування вимірювального комплексу (а), мішень з вимірюваними координатами та нанесеними положеннями й номерами супутників (б) при розташуванні комплексу безпосередньо на березі моря

Антена розташовувалася на невеликих висотах (не більше 8 м) і відстанях від берегової лінії, де на випромінювання супутників що заходять та сходять буде впливати не тільки відбиття від морської поверхні, але й характеристики приводного шару атмосфери. Відзначимо, що діаграма приймальної антени сформована таким чином, щоб мінімізувати вплив сигналів з нижньої півплощини, тому при високих кутах візуування супутника внесок відбитих променів істотно знижується.

На рис. 2.11 показано зовнішній вигляд і розташування вимірювального комплексу на місцевості (а), (б), (в), діаграма спрямованості антени (д) та інтерфейс програми накопичення навігаційних даних (е).

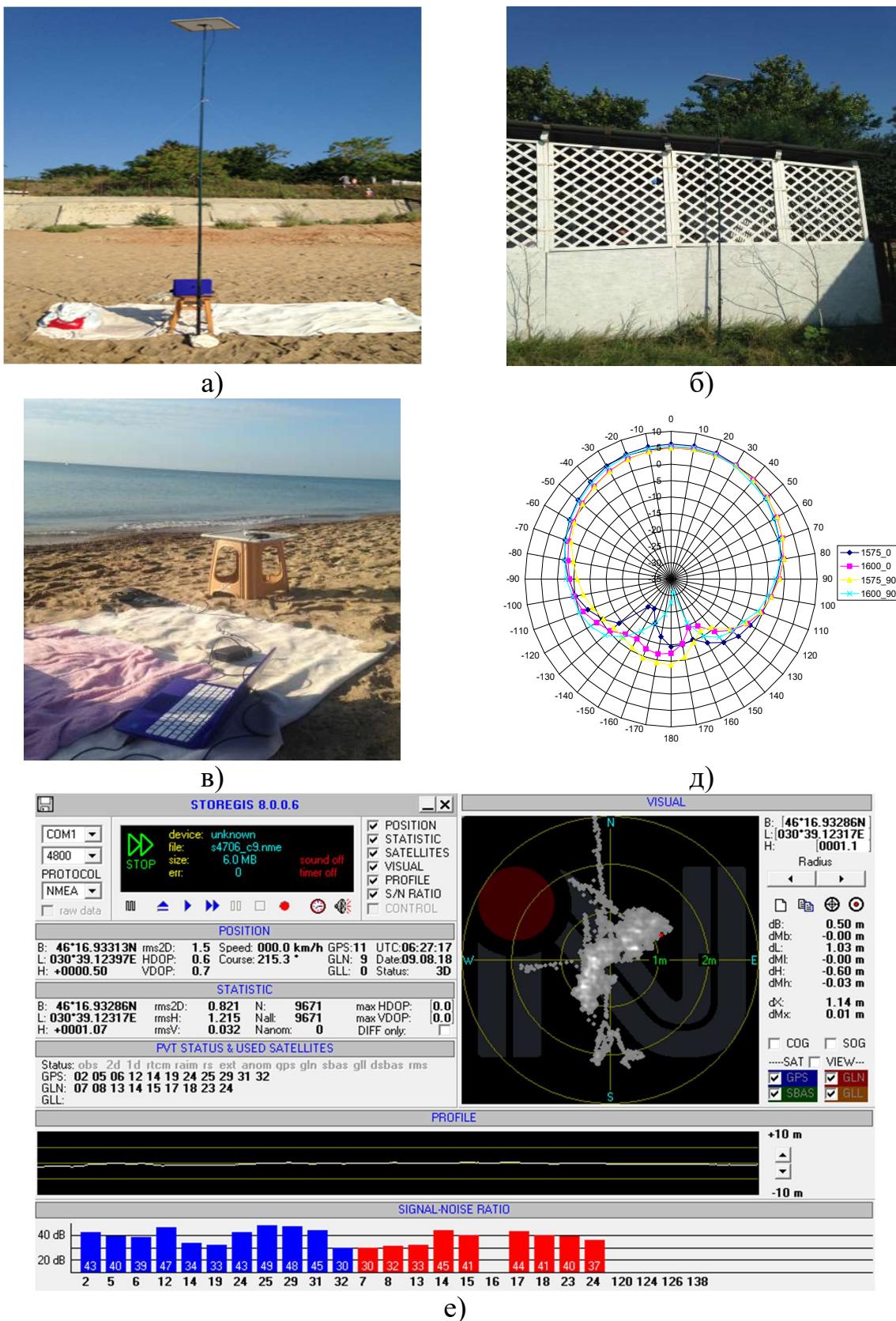


Рисунок 2.11 - Зовнішній вигляд і розташування вимірювального комплексу (а, б, в), діаграма спрямованості антени (д) та інтерфейс програми накопичення навігаційних даних (е)

Антена розташовувалася на телескопічній щоглі, висота якої могла змінюватися від 1 м до 4 м (рис. 2.11 (а), (б)). Вимірювання проводились на північно-західному узбережжі Чорного моря в районі м. Чорноморськ. Комплекс розміщувався в безпосередній близькості від моря (рис. 2.11 (а)) або на височині берега заввишки близько 4 м і на відстані приблизно 50 м від берегової лінії моря (рис. 2.11 (б)). Вимірювальний комплекс здійснював приймання сигналів при різних рівнях хвильовання морської поверхні і дозволяв реєструвати сигнали супутників навіть при негативних кутах візуування. Вид діаграм спрямованості використовуваних у вимірювальному комплексі антен наведено на рис. 2.11 (д). На рис. 2.11 (е) наведено інтерфейс програми накопичення навігаційних даних, на якому стовпчиками синього кольору показані рівні сигналів прийнятих GPS супутників, а також їх номери, а червоними – для супутників ГЛОНАСС. Там же показана мішень, що характеризує розкид вимірюваних координат, а також наведені результати експрес статистичної обробки похибок оцінювання координат.

Попередньо були оцінені траєкторії переміщення супутників і час їх знаходження в зоні видимості вимірювального комплексу. Вони наведені на рис. Г.1 для супутників G – GPS, R – ГЛОНАСС для всіх днів. На верхніх рисунках для кожного з днів приведені спостережувані з точки розміщення комплексу траєкторії руху супутників, а на нижніх рисунках - час їх видимості. Подібний підхід дозволяє вибрати виходячи з передбачуваного часу сеансів вимірювань супутники, які будуть становити найбільший інтерес. Оскільки американські супутники GPS приблизно через 12 годин спостерігаються під тими ж кутами, то їх і доцільно використовувати для відпрацювання методики моніторингу стану морської поверхні. Це дозволяє, зіставивши флюктуаційні та трендові характеристики спостережуваних сигналів ГНСС GPS, отримані при різних умовах хвильовання встановити їх взаємозв'язок необхідний для розв'язання оберненої задачі визначення стану морської поверхні за сигналами ГНСС.

При реєстрації навігаційних сигналів в рамках проведених експериментів передбачалося, що результуючі сигнали в моделі супутник - підстильна поверхня - приймальна антена будуть являти собою суму прямого і відбитого від морської поверхні сигналів. При наявності морського хвилювання в прийнятому сигналі будуть з'являтися флюктуаційні компоненти, частота та інтенсивність яких буде залежати від шорсткості поверхні та періоду морського хвилювання. Виділення флюктуаційної компоненти здійснювалася одним з двох способів. При першому здійснювалася високочастотна фільтрація прийнятого від супутника і відбитого від поверхні моря сигналу. Вона проводилася за допомоги фільтра черезперіодної компенсації:

$$\hat{S}(\beta_i) = S(\beta_i) - S(\beta_{i-1}), \quad (2.17)$$

де $S(\beta_i)$, $S(\beta_{i-1})$ – сигнали при кутах місця (підвищеннях супутника β_i та β_{i-1} відповідно).

При іншому підході виділення флюктуаційної складової здійснювалося з використанням вейвлет перетворення, виділення його високочастотних компонентів і здійснення зворотного вейвлет перетворення.

Для виділення трендової складової використовувалося також два підходи. Перший полягав у згладжуванні вихідної реалізації сигналу в ковзному вікні. При іншому також використовувалося вейвлет перетворення, фільтрація його низькочастотних компонент і потім зворотне вейвлет перетворення.

Глибина інтерференційних завмирань (V_{min} , V_{max}) дозволяє оцінити величину коефіцієнта відбиття від морської поверхні R з співвідношень:

$$V_{min} = 1 - R, \quad V_{max} = 1 + R, \quad \frac{V_{max}}{V_{min}} = \alpha = \frac{1+R}{1-R}, \quad R = \frac{\alpha+1}{\alpha-1}. \quad (2.18)$$

Таким чином, оцінюючи співвідношення максимального і мінімального значень сигналу

$\frac{V_{max}(\beta)}{V_{min}(\beta)} = \alpha(\beta)$ можна визначити значення коефіцієнта відбиття морської поверхні для даних значень кута візуування супутника:

$$R(\beta) = \frac{\alpha(\beta)+1}{\alpha(\beta)-1}; \quad \alpha(\beta) = \frac{V_{max}(\beta)}{V_{min}(\beta)}. \quad (2.19)$$

Коефіцієнт дзеркального відбиття від морської поверхні залежить від ступеня її шорсткості [179] і визначається з використанням співвідношення:

$$R(\beta) = \exp - 2(2\pi\sigma_h)\sin(\beta)/\lambda)^2, \quad (2.20)$$

на підставі якого, за відомими значеннями коефіцієнта відбиття $R(\beta)$, кутах візуування супутника ГНСС β можна визначити значення середньоквадратичних значень нерівностей поверхні:

$$\sigma_h = \frac{\lambda}{2\pi\sin(\beta)} \sqrt{-\frac{1}{2}\ln(R(\beta))}. \quad (2.21)$$

Рівняння (2.21) можна використовувати для оцінювання з використанням методу найменших квадратів середньоквадратичних значень висоти морських хвиль.

Навігаційні дані, отримані від супутників, дозволяють аналізувати часові та кутомірні залежності рівнів сигналів. Одночасно можуть спостерігатися супутники, які знаходяться приблизно під одним і тим же кутом візуування, але мають різні азимутальні напрямки. В такому випадку є можливість одночасно вивчати сигнали, відбиті як від водної, так земної поверхні, що дозволяє зіставити поведінку сигналів, характер і інтенсивність яких повинні відрізнятися для різних станів підстильної поверхні та азимутів її спостереження.

На рис. 2.12 наведені сигнали від супутників при відбитті від суші і морської поверхні, для однакових кутів візуування [137].

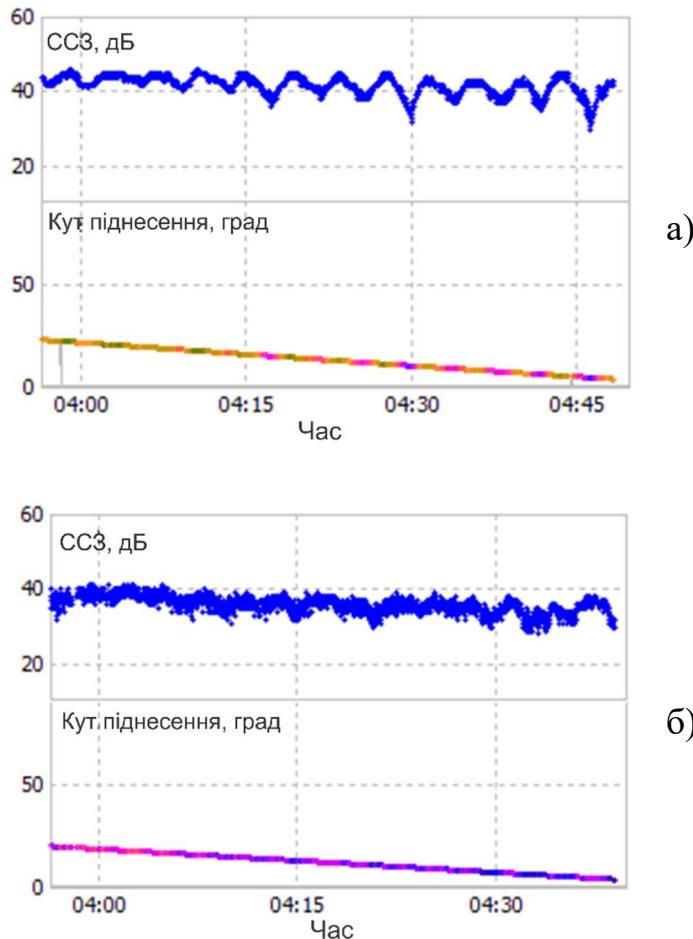


Рисунок 2.12 - Сигнали навігаційних супутників в залежності від типу підстильної поверхні, а) GPS15 – відбиття від суші, б) GLN12 – відбиття від моря

Сигнали прийняті від супутників, траєкторія яких проходить над земною поверхнею (рис. 2.12 (а)) мають більший період флуктуацій на відміну від сигналів супутників, траєкторія яких проходить над поверхнею моря, де в прийнятому сигналі присутня високочастотна компонента при наявності слабкого хвилювання моря (рис. 2.12 (б)).

Необхідно відзначити, що для порівняння використовувалися як супутники GPS, так і супутники системи ГЛОНАСС. Оскільки характер поведінки сигналів на схожих траєкторіях руху супутників носить для них аналогічний характер, то це дозволяє порівнювати дані від різних систем при одночасних вимірюваннях. Для аналізу були обрані 5 днів, протягом яких спостерігалося морське хвилювання різної інтенсивності від 3 ... 4 балів до близького до штилю стану моря. Відзначимо, що при спокійному стані моря, або слабкому хвилюванні морської поверхні, флуктуації, які спостерігаються у супутників, що пролітають в напрямку перпендикулярному береговій лінії, носять стабільно регресивний характер глибини флуктуацій із підвищеннем кута візуування, що пояснюється поступовим зростанням впливу шорсткості поверхні та зниженням коефіцієнта відбиття.

З отриманих результатів видно, що наявність моря, яке відбиває, призводить до підмішування високочастотних флуктуацій (рис. 2.13).

На рівень флуктуаційної компоненти впливає одночасно ступінь хвилювання і розмір площинки, що відбиває. Максимальне значення, яке може приймати коефіцієнт дифузного розсіяння 0,4. При подальшому збільшенні шорсткості коефіцієнт дифузного розсіяння залишається сталим.

Однак при зміні хвилювання та ступеня шорсткості це насичення може відбуватися при менших кутах для великих хвилювань й кути та розміри площинки що відбиває, яка визначається розмірами зони Френеля, можуть бути меншими.

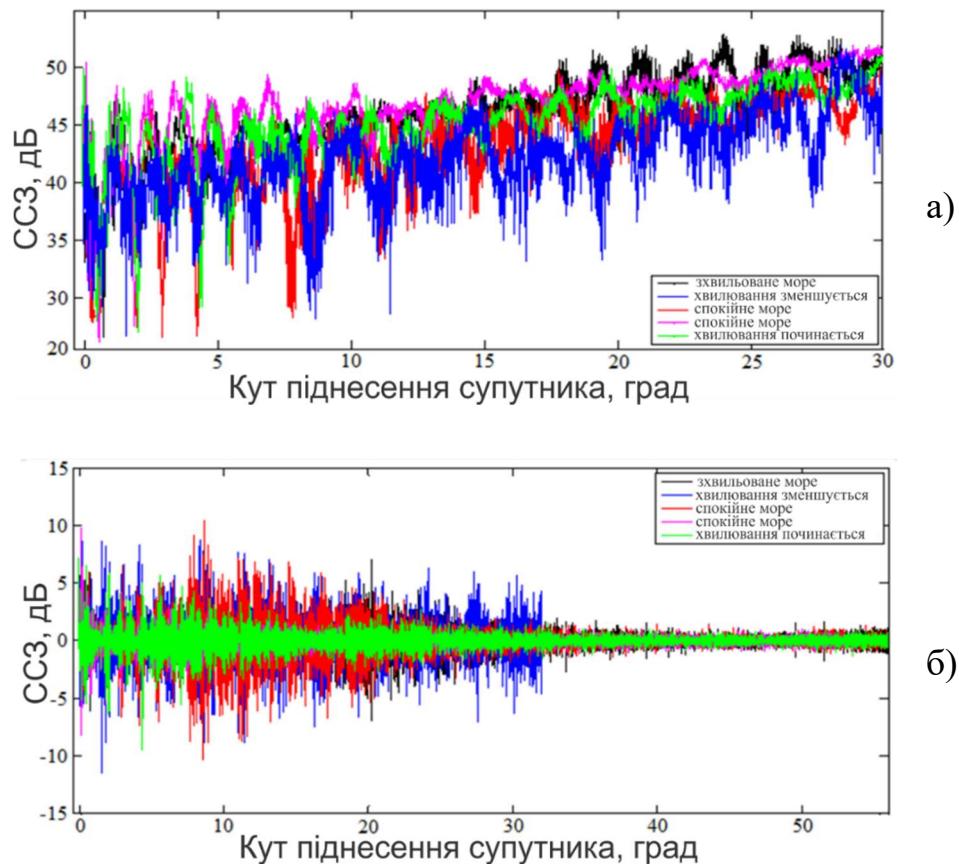


Рисунок 2.13 - Рівні сигналів від супутника (а) і амплітуди флюктуацій сигналів від супутника (б) в напрямку на море

При аналізі сигналу необхідно розділяти спостереження на кілька ділянок:

- до 3° - 4° , де рівень сигналу істотно зростає внаслідок значного збільшення товщини атмосфери і відповідно її впливу [177];
- від 4° до 30° , де в залежності від стану морської поверхні можуть спостерігатися інтерференційні ефекти, спровоковані локальними змінами інтенсивності відбиттів.
- кути вище 30° , де хвильовання морської поверхні надає мінімальний ефект внаслідок того, що з одного боку зменшуються розміри площасти що

відбиває на поверхні моря, а з іншого знижується коефіцієнт відбиття через зростання параметра шорсткості.

На рис. 2.14 наведені рівні сигналів для супутника GPS02 і амплітуда флюктуацій, отримана шляхом вирахування ($i - 1$)-го відліку із i -го.

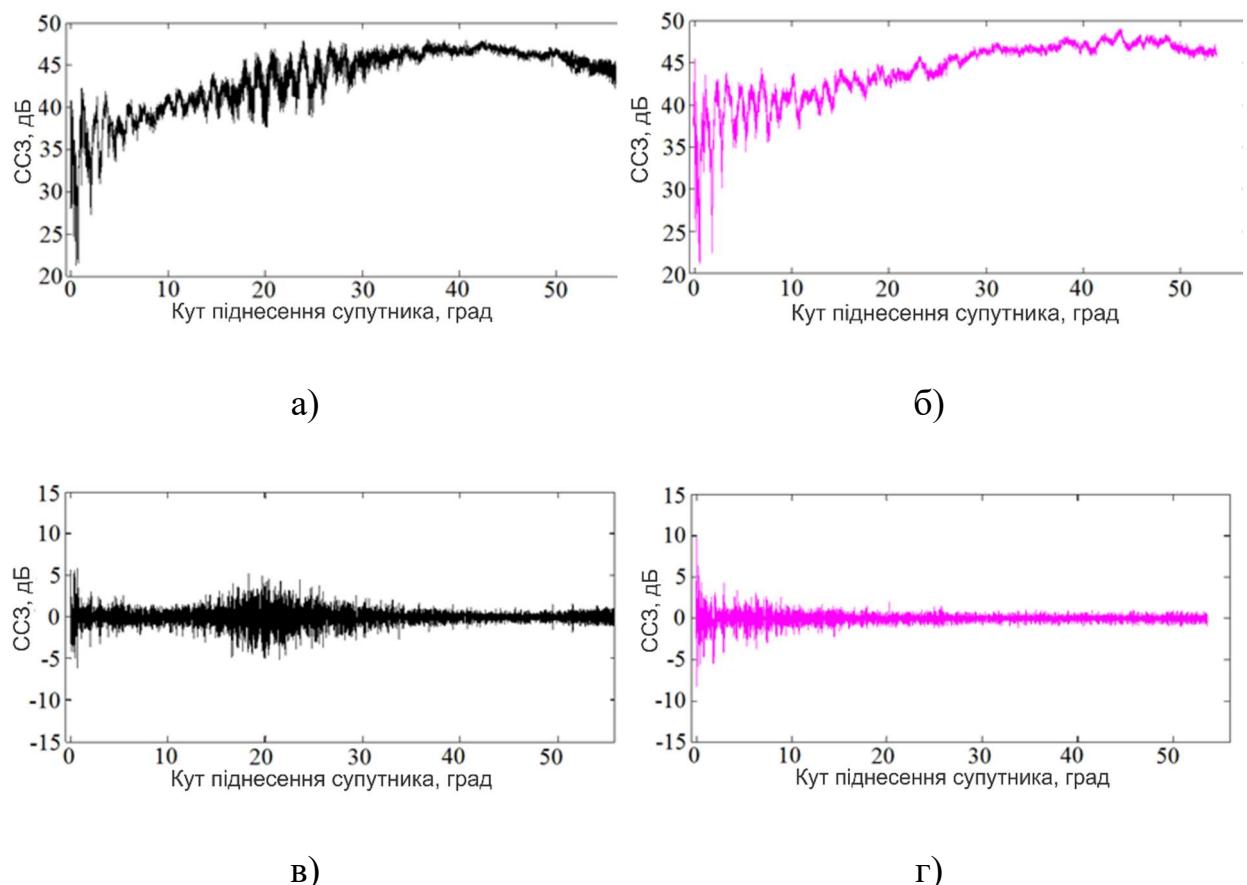


Рисунок 2.14 - Сигнали навігаційного супутника GPS02 (а, в) – в умовах сильного морського хвилювання, (б, г) – спокійного моря, і (в, г) флюктуаційна компонента сигналу

На рис. 2.15 (а, в, д) показані виділені за допомогою усереднення в ковзному вікні інтерференційні завмирання сигналу при різних станах морської поверхні та оцінені по ним з використанням співвідношень (2.18) значення коефіцієнта відбиття рис. 2.15 (б, г, е).

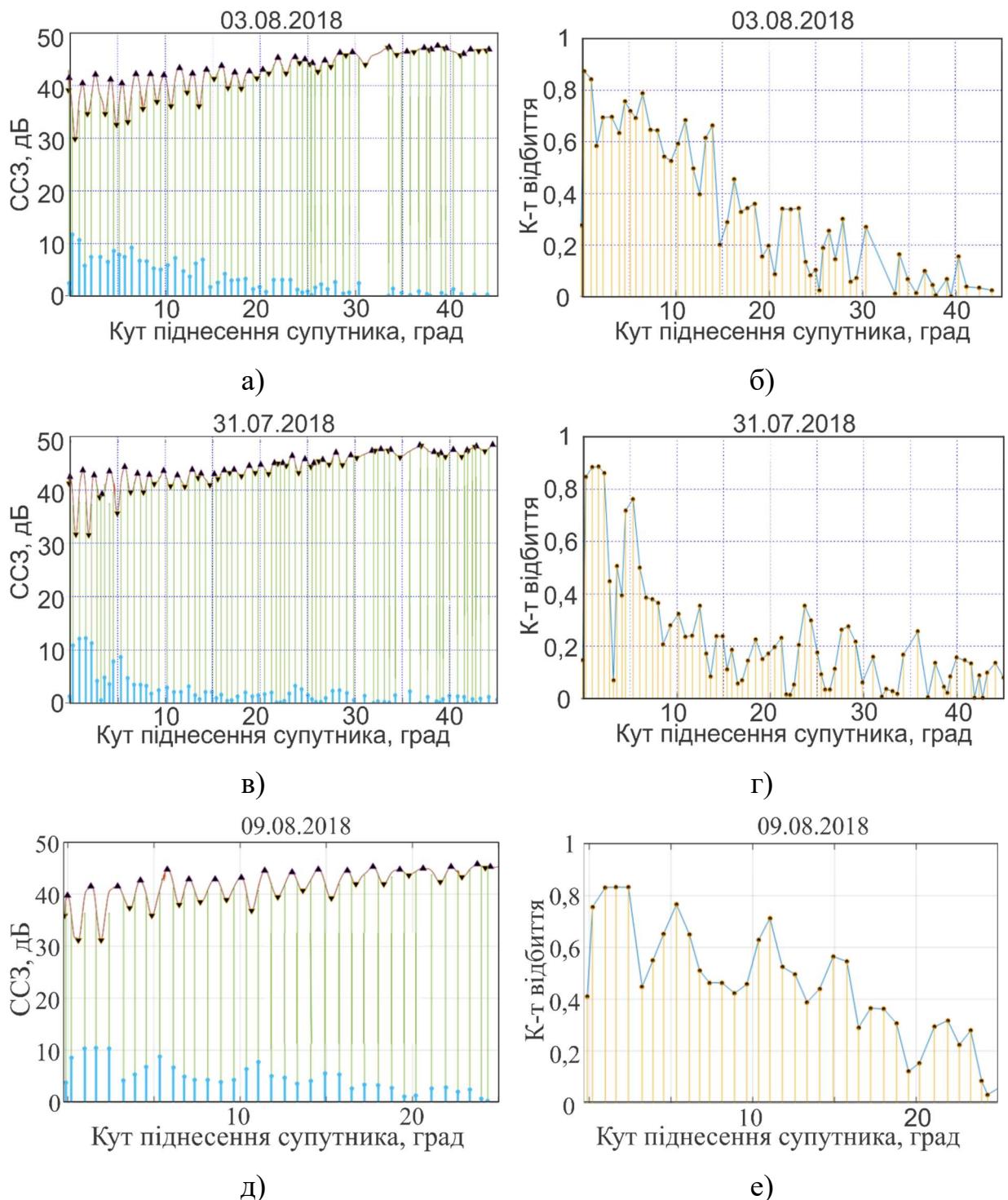


Рисунок 2.15 - Трендова складова сигналу радіосходу супутника ГНСС, виділена за допомогою згладжування в ковзному вікні (а, в, д) і оцінені по ній значення коефіцієнта відбиття від моря (б, г, е) для хвилювання 0 ... 1 бал – (а, б), 1 ... 2 бали – (в, г), 3 ... 4 бали – (д, е)

На рис. 2.16 (а, в) – показано виділені за допомоги вейвлет перетворення інтерференційні завмірання сигналу при різних станах морської поверхні й

оцінено по ним з використанням співвідношень (2.18) значення коефіцієнта відбиття рис. 2.16 (б, г). На рис. 2.16 (а, в) видно, що при більшому хвилюванні, при зміні кута візуування супутника швидше знижується глибина провалів в інтерференційній структурі поля сигналу, а значить і швидше знижуються значення спостережуваного коефіцієнта відбиття від морської поверхні.

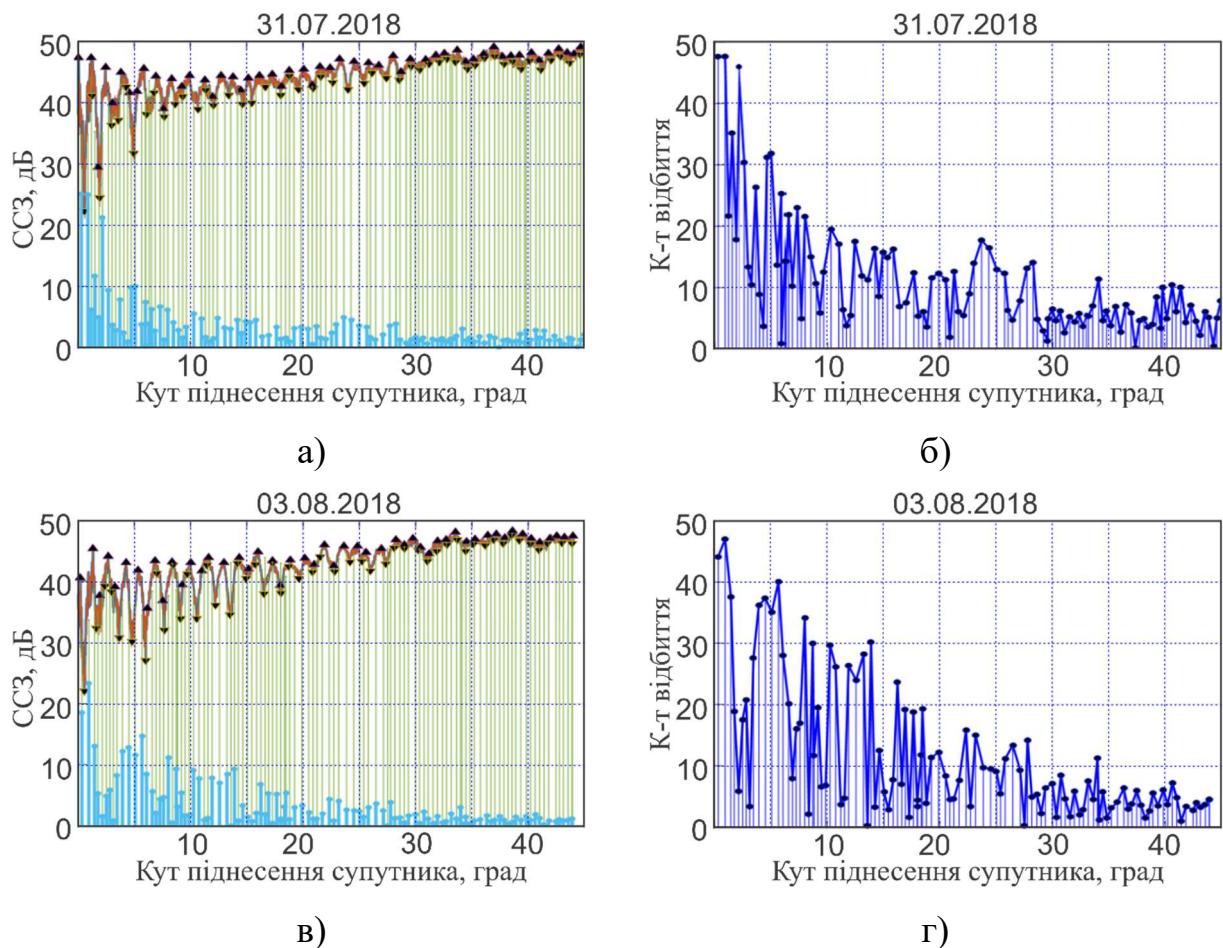


Рисунок 2.16 - Інтерференційна структура сигналу радіосходу супутника ГНСС, виділена за допомогою вейвлет перетворення (а, в) та оцінені по ній значення коефіцієнта відбиття від моря (б, г) для хвилювання 3 ... 4 бали – (а, б) і 1 ... 2 бали – (в, г)

При розрахунку коефіцієнтів відбиття сигналів ГНСС відбитих від морської поверхні поки не враховувався вплив діаграми спрямованості приймальної антени, тому отримані оцінки коефіцієнтів відбиття дещо

занижені. В подальшому планується враховувати вплив ДС шляхом введення діаграмних поправок.

Зіставлення результатів, отриманих з використанням високочастотного фільтра і вейвлет перетворення, показує їх задовільну відповідність [137]. Оскільки обидва підходи дають близькі результати то можуть успішно використовуватися для оцінки коефіцієнта відбиття від морської поверхні та відповідно її середньоквадратичних нерівностей (ступеня хвилювання).

Висновки до розділу 2

Створено двоканальний апаратурний комплекс, що забезпечує можливість вимірювання рівня сигналів на просторово рознесених антенах в смузі частот телевізійних сигналів для моніторингу тропосферної рефракції по множниках послаблення сигналу на загоризонтній трасі. Встановлено слабка (менше ніж 0,15) кореляція сигналів, що приймаються на просторово-рознесені антени (на $15 \dots 20 \lambda$) як для однакових, так і різних частотних каналів.

Експериментально досліджені інтерференційні явища в каналі поширення на загоризонтних трасах в середній смузі широт (Україна) по змінах рівня сигналу від телевізійних центрів, що виникають при наявності інверсійних шарів. Показано, що кількість інверсійних шарів, як правило, не перевищує двох, зі стрибком індексу рефракції на межі шарів $6 \dots 14 N$ одиниць, висота їх розміщення не перевищує 650 м, швидкість переміщення становить від одиниць до декількох сотень метрів на годину, глибина завмирань сигналу становить від -3 дБ до -23 дБ.

Встановлено, що для опису статистики завмирання, коефіцієнтів відбиття і висот інверсійних шарів може використовуватися стандартна Гаусова модель, в той самий час розподіли ефективного градієнта індексу

рефракції в шарі, істотному для поширення радіохвиль і швидкості інверсійних шарів, відрізняються від Гаусових моделей.

Запропонована методика для оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно – пасивних систем зондування. Експериментально досліджено спектральні характеристики сигналів радіомовних КХ станцій при різних поляризаціях прийнятого випромінювання. Наведено теоретичні оцінки ЕПР повітряних об'єктів для різних поляризацій випромінювання що падає.

Вперше експериментально встановлено при виявленні літака Ан-74 з використанням як сигнал підсвічування іоносферну хвилю радіомовних КХ станцій, що ЕПР літаків в резонансній області як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях сягають тисяч m^2 . Це дає можливість використовувати для освітлення повітряного стану в КХ діапазоні поверхневу хвилю вертикальної поляризації.

У результаті проведених досліджень сигналів навігаційних супутників показана можливість їх використання для дистанційного моніторингу та діагностики стану морської поверхні. Експериментально встановлено мінливість рівня флюктуаційної компоненти та завмирань (пов'язаних з інтерференційною компонентою) сигналів GNSS-супутників, розсіяних морською поверхнею від ступеня морського хвилювання. Експерименти показують, що рівні флюктуаційної компоненти та глибина завмирань (трендів) сигналів навігаційних супутників чутливі до зміни стану підстильної поверхні та ступеня хвилювання. Це може бути покладено в основу здійснення моніторингу хвилювання моря за сигналами ГНСС.

РОЗДІЛ 3

ЗАВАДИ, СТВОРЮВАНІ ВИПРОМІНЮВАННЯМИ МОВНИХ
СТАНЦІЙ УКХ І КХ ДІАПАЗОНІВ ДЛЯ АКТИВНО-ПАСИВНИХ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ

У якості завад активно-пасивним системам, які використовують для підсвічування випромінювання мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, виступають спектральні компоненти переданих інформаційних повідомлень в доплерівських смугах частот сигналів, відбитих від об'єктів.

У цьому розділі проведено аналіз отриманих у ході експериментів співвідношень несучої до рівня завад на різних частотах для різних поляризацій прийому та частот сигналу.

Проведено аналіз завмирань сигналу для однострибкових і багатострибкових трас для режимів АРП і РРП прийому.

Розглянуто імітаційна модель завад, створюваних випромінювання мовних станцій КХ і УКХ діапазонів.

Основні результати опубліковані в роботах [180 - 182].

3.1. Експериментальні дослідження сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів.

Доплерівський зсув частоти F_D рухомого об'єкта при швидкостях V до 2500 км/год в декаметровому діапазоні в залежності від довжини хвилі λ не буде перевищувати 140 Гц:

$$F_D = \frac{2V}{\lambda}. \quad (3.1)$$

З цього випливає, що для цього діапазону довжин хвиль доплерівські частоти сигналів, відбитих від більшості повітряних об'єктів, не будуть

перевищувати величини в 60 ... 70 Гц, що відповідає початку спектра інформаційного сигналу мовної станції. Для дециметрового діапазону доплерівська частота сигналів, відбитих від цих же об'єктів, може лежати в діапазоні частот сигналів мовлення станції, який і буде виступати в ролі завади, перешкоджаючи виявленню відбитих від об'єктів вторинних сигналів. Вивчення статистичних характеристик сигналів передавальних станцій, які можуть бути використані для підсвічування, в смузі доплерівських частот, в якій здійснюється виявлення є важливим для розробки алгоритмів виділення сигналів, відбитих від повітряних об'єктів. Вперше експериментальне підтвердження ідея використання вторинного поля, розсіяного повітряними об'єктами для їх виявлення, отримала в роботах [138-140].

Для проведення експериментальних досліджень характеристик завад, створюваних випромінюванням мовних станцій КХ і УКХ діапазонів системам моніторингу були використані допрацьовані професійні приймачі КХ діапазону 1 ... 39 МГц: Канал-Р, Катран, а також всехвильовий УКХ, КХ, СХ, ДХ приймач Degen DE-1127 короткий опис і основні технічні характеристики яких наведені в додатку [Д](#).

На рис. 3.1 представлено спектри сигналів станцій підсвічування, характеристики яких наведені в табл. [Д.4](#), що отримані при прийомі сигналів в телефонному (Тлф) і телеграфному (Тлг) режимах роботи приймача. У телефонному режимі несуча після детектування лежить в області нульових частот - рис. 3.1 (б), в той час як в телеграфному режимі вона за допомоги гетеродина зміщується в область звукових частот (для наведених на рис. 3.1(а) прикладів близько 50 ... 100 Гц). Видно, що в залежності від характеру переданої інформації область частот, в якій зосереджена основна енергія сигналу в телефонному режимі, розташована від 100 ... 200 Гц до 400 ... 600 Гц. Більш високочастотні компоненти мають рівень приблизно на 10 ... 15 дБ нижче і розташовані до 1500 ... 1600 Гц, після чого їх рівень плавно знижується на 30 ... 35 дБ на частотах близько 2000 Гц.

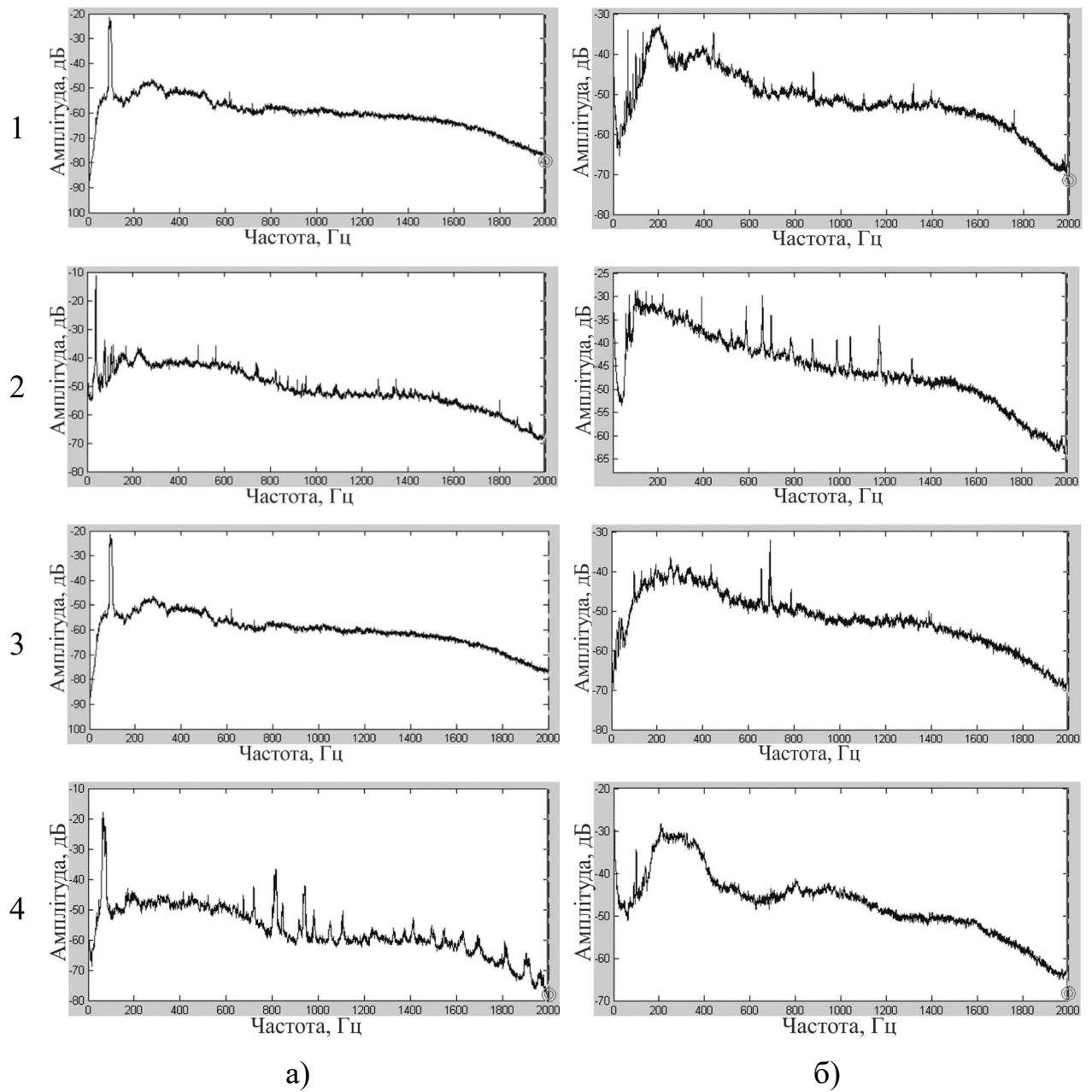


Рисунок 3.1 - Спектри сигналів на виході приймача «Канал-Р» в телеграфному (а) і телефонному (б) режимах, (1) - Shijiazhuang, China 6100км., (2) - Kashi, China – 3300 км., (3) - Issoudun, France – 2500 км. (4) - Emirler, Turkey – 1200 км

Номери ліворуч на рис. 3.1 відповідають станціям підсвічування, характеристики яких наведені в табл. Д.4. Вони розташувалися на відстанях від приймача від приблизно 1200 км до 6100 км, під різними азимутними кутами. На частотах приблизно до $\pm 40 \dots 50$ Гц відносно несучої рівень спектральної густини є істотно нижчим, ніж у несучої й інформаційних сигналів, які

розташовуються в діапазоні частот до декількох кілогерц. Форми спектрів як у телеграфному, так і телефонному режимах є схожими. Найбільшу спектральну густину мають частоти в діапазоні, як правило до 600 ... 800 Гц, хоча в окремих випадках може бути до 400 Гц – рис. 3.1 (4-6). На частотах вище 1600 Гц спектральна густина плавно зменшується. Рівень спектральної густини несучої приблизно на 35 ... 50 дБ вище, ніж при відлаштуванні від неї на ± 100 Гц.

Спектр можна апроксимувати залежностями виду:

$$S(F) = \left[1 + \left| \frac{F - F_0}{\Delta F_{\pm}} \right|^{\dot{n}_{\pm}} \right]^{-1}, \quad (3.2)$$

де F_0 – частота максимуму спектральної густини, ΔF_{\pm} – напівширина, а \dot{n} характеризує швидкість зменшення правого \dot{n}_+ і лівого \dot{n}_- скатів спектра. Апроксимація низькочастотної ділянки спектра здійснювалася від приблизно 2 Гц до 100 Гц, а високочастотного – від 100 Гц до приблизно 2000 Гц.

Використовуючи співвідношення (3.2) можна оцінити швидкості зменшення спектральної густини вище та нижче частоти максимуму. Слід зазначити, що у подвійному логарифмічному масштабі (по осі частот та спектральної густини) вираз (3.2) в областях частот $(|F - F_0|/\Delta F_{\pm}) \gg 1$ апроксимується лінійними залежностями. Рівняння для опису спектра з урахуванням виразу (3.2) мають вигляд:

$$S(F)[dB] = \begin{cases} a_- [dB] + \dot{n}_- * 10 \lg F [Hz], & 2Hz < F[Hz] \leq 100Hz \\ a_+ [dB] - \dot{n}_+ * 10 \lg F [Hz], & 100Hz < F[Hz] \leq 2000Hz \end{cases}$$

Апроксимація низькочастотної ділянки спектра здійснювалася від приблизно 2 Гц до 100 Гц, а високочастотної – від 100 Гц до приблизно 2000 Гц.

Результати апроксимації спектрів радіомовних КХ станцій підсвічування, характеристики яких наведені в табл. Д.5, методом найменших квадратів (МНК) та отримані оцінки швидкості зменшення спектральної густини вище та нижче частоти максимуму по кожній із груп спектрів показано на рис. 3.2 лініями (для

високих і низьких частот окремо). Параметри апроксимації низькочастотної (НЧ) і високочастотної (ВЧ) частин спектрів радіомовних станцій, приведено в табл. 3.1.

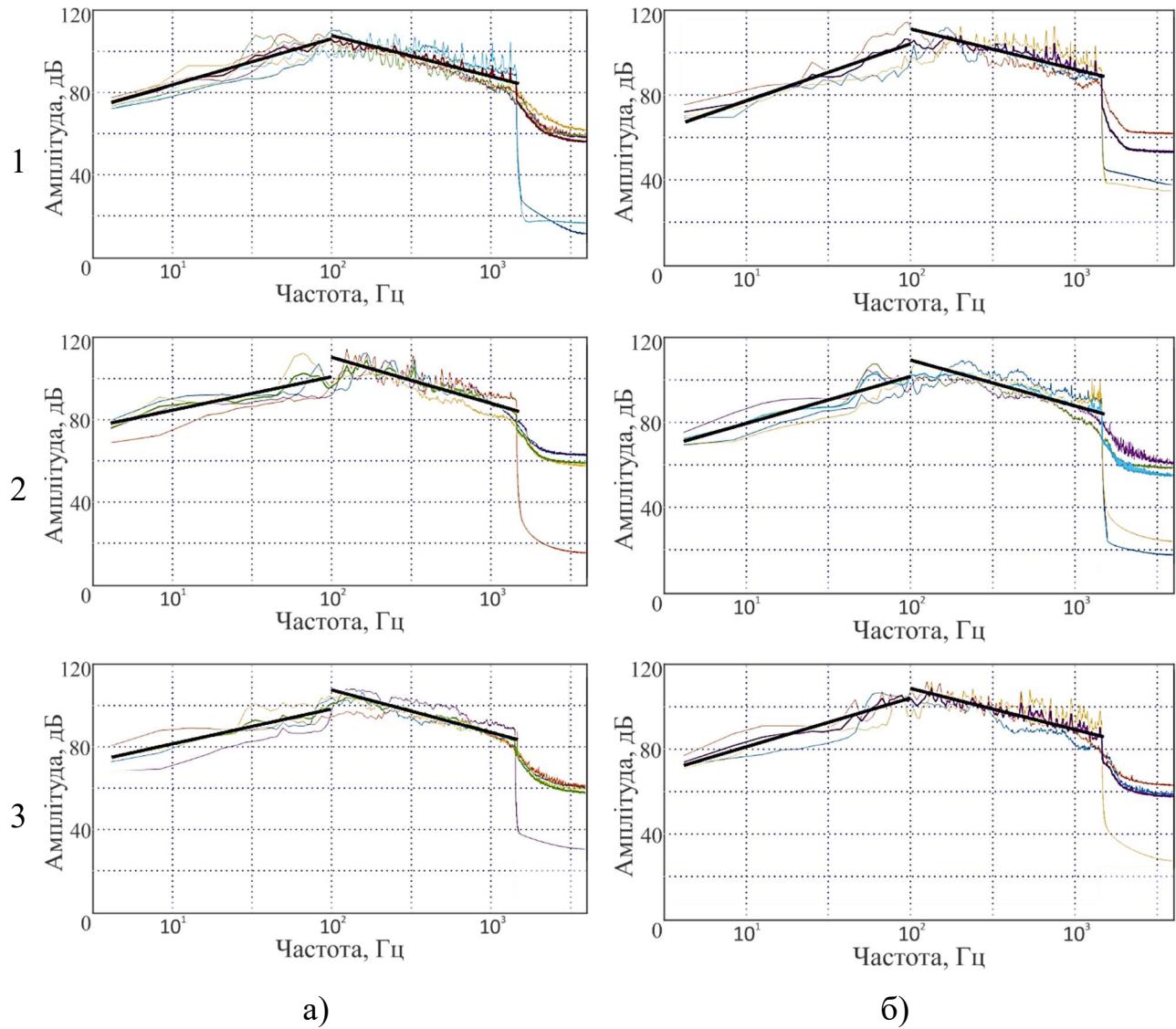


Рисунок 3.2 - Нормовані спектри сигналів радіомовних КХ станцій наведених в табл. Д.5. 1а – (1.1-1.6), 1б – (2.1-2.3), 2а – (3.1-3.4), 2б – (4.2-4.5), 3а – (5.1-5.4), 3б – (6.1-6.3), середні спектри та їх лінійні апроксимації

В табл. 3.1 наведені значення нахилів спектрів n_- та n_+ які отримані в результаті апроксимації низькочастотної і високочастотної частин спектрів радіомовних станцій. Незалежно від частоти КХ станції та часу доби вони слабо відрізняються та мають величину від 1,6 до 2,3.

У смузі 8 Гц рівень потужності на частотах 8 ... 50 Гц становить приблизно -40 ... -55 дБ відносно рівня повної потужності інформаційного сигналу на частотах біля 1кГц близько -30 ... -40 дБ.

Таблиця 3.1

Параметри апроксимації спектрів випромінювання радіомовних станцій

№ спектра на рис. 3.2	НЧ частина спектра		ВЧ частина спектра	
	α_- [дБ]	\dot{n}_-	α_+ [дБ]	\dot{n}_+
1а	61,6	2,232	147,6	1,985
1б	51,1	2,264	148,5	1,889
2а	68,6	1,610	154,7	2,219
2б	57,8	2,198	152,6	2,156
3а	64,7	1,687	148,6	2,040
3б	58,3	2,309	148,0	1,947

При зміні роздільної здатності з урахуванням того, що спектральна густини змінюються слабо в межах доплерівських частот, значення спектральної густини необхідно перерахувати з використанням співвідношення:

$$p(F, \Delta F = \delta F[\text{Hz}]) = p(F, \Delta F = 8\text{Hz}) \frac{\delta F[\text{Hz}]}{8}. \quad (3.3)$$

При досить вузьких смугах доплерівських фільтрів можна розглядати заваду як білий шум, і звуження смуги з 8 до 1 Гц призведе до зниження рівня спектральної густини приблизно на 9 ... 10 дБ.

Для підвищення потенціалу системи виявлення та вимірювання доцільно використання вужчих смуг пропускання доплерівських фільтрів. Це дозволяє пропорційно смузі поліпшити як роздільну здатність за швидкістю, так і знизити рівень завад у смузі виявлення корисного сигналу.

3.2 Дослідження густини і функцій розподілу амплітуд в різних ділянках спектра радіомовних станцій КХ і УКХ діапазонів.

Випромінювання мовних станцій КХ і УКХ діапазонів використовуються в системах активно-пасивної радіолокації для підсвічування обстановки [138 – 140, 143]. При відбитті їх від рухомого об'єкту вони отримують доплерівське зміщення, яке і дозволяє здійснити селекцію вторинних розсіяних об'єктами сигналів на фоні завад, створюваних прямим сигналом мової станції. Вивчення статистичних характеристик завад необхідно при оцінці характеристик виявлення активно-пасивних систем радіолокації та моніторингу. На рис.3.3 наведено часові реалізації сигналів КХ мовних станцій з амплітудного виходу приймача тривалістю близько 100 с, для режимів ручного й автоматичного регулювання підсилення (РРП, АРП).

Видно, що за відсутності АРП (рис. 3.3 (а, в, д)) на виході приймача спостерігаються завмирання глибиною 20 ... 30 дБ і періодичністю в десятки секунд. Застосування АРП (рис. 3.3 (б, г, е)) істотно знижує динамічний діапазон флюктуацій, що позитивно позначається на умовах прийому, проте може призводити до появи негативних ефектів, пов'язаних з обмеженням великих сигналів.

Збільшення рівня сигналу або коефіцієнта підсилення приймача призводить до зниження розмаху флюктуацій сигналу та появи навіть у режимі РРП ефектів, характерних для АРП – обмеження сигналу – рис. 3.3 (д, е).

Здійснюючи фільтрацію корисного сигналу в смузі доплерівських частот, можна істотно знизити рівень завад, створюваних сигналом підсвічування мової станції. Однак, як видно з порівняння рис. 3.3 кривих (1, 2) фільтрація в смузі 0 ... 70 Гц призводить до зростання діапазону флюктуацій сигналу, що буде приводити до зміни його статистик.

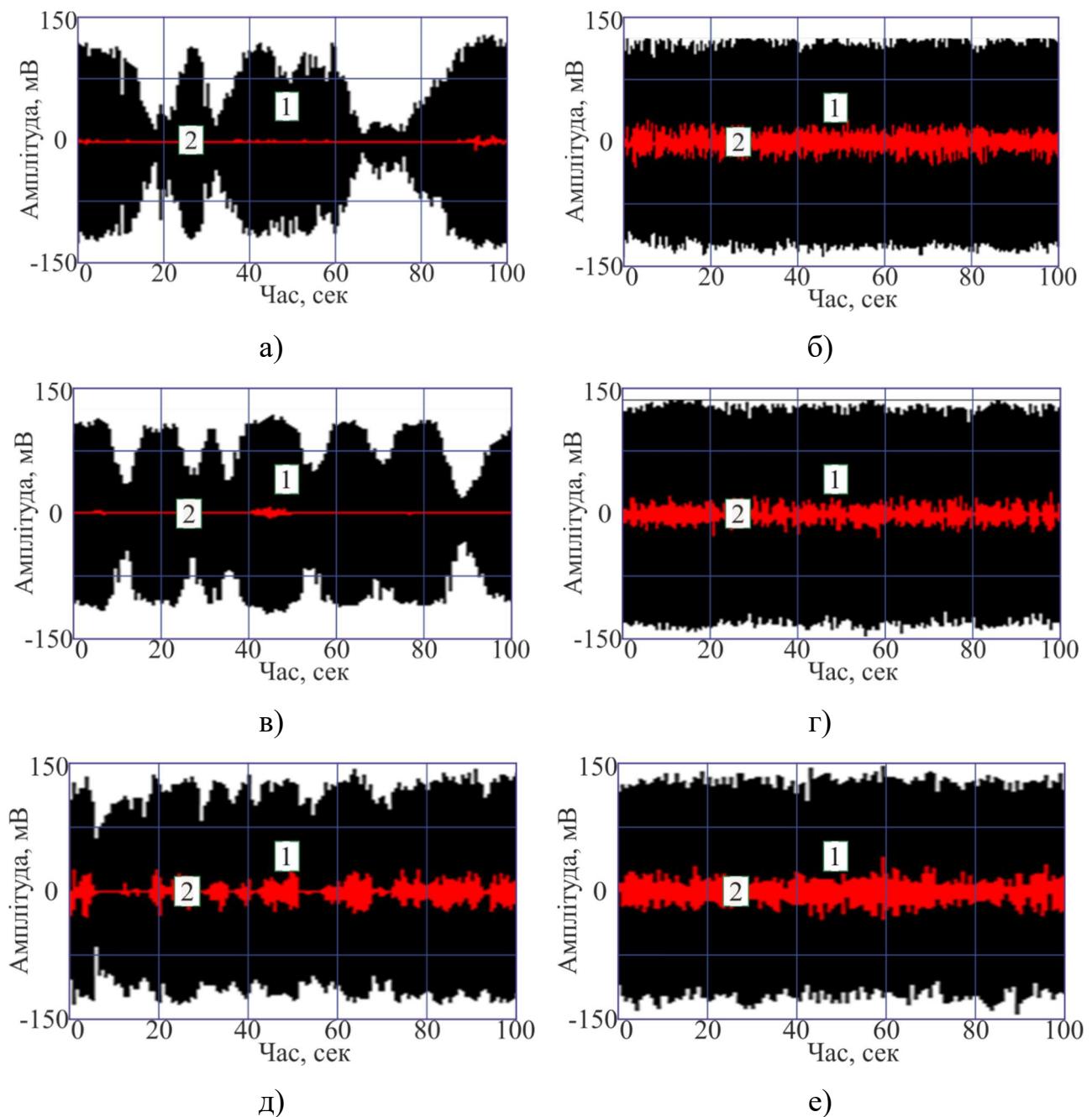


Рисунок 3.3 - Часові реалізації з виходу амплітудного детектора сигналу мовних станцій підсвічування КХ діапазону. (1) - в смузі 0 ... 10 кГц, (2) - в смузі 0 ... 70 Гц, (а, б) - частота 17490 кГц; (в, г) – 12160 кГц; (д, е) – 17560 кГц., (а, в, д) - режим РРП, (б, г, е) режим АРП

На рис. 3.4 в масштабі, лінеаризуючому нормальному закону розподілу, представлені функції розподілу сигналів КХ діапазону мовної станції, які виступають у вигляді завади для систем активно-пассивної радіолокації при наявності і відсутності АРП приймача.

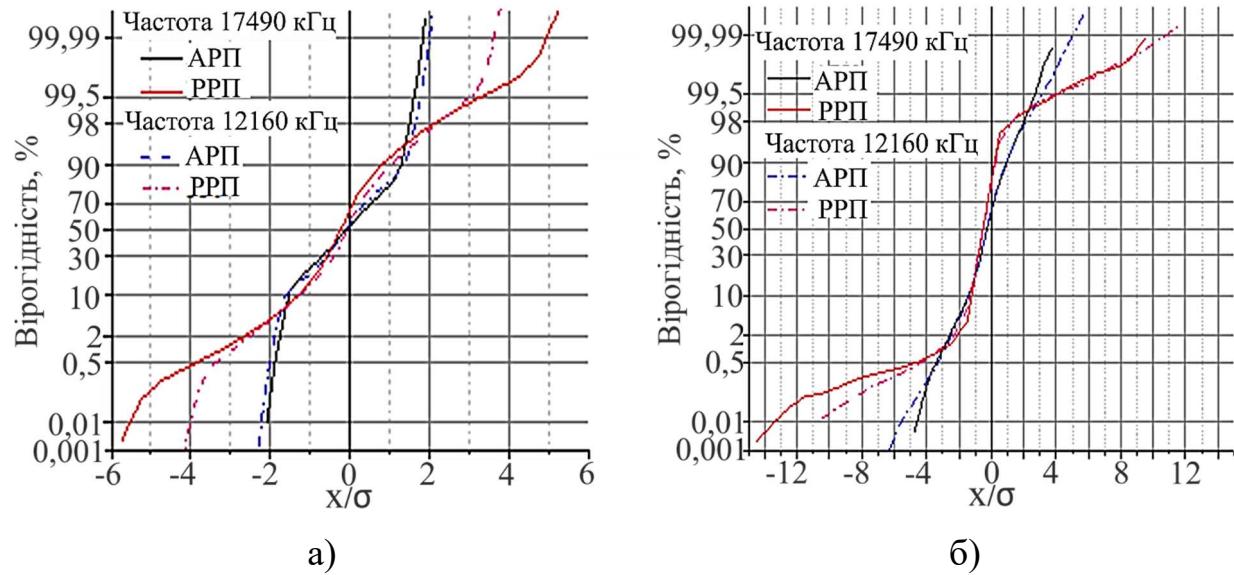


Рисунок 3.4 - Функції розподілу сигналу на різних частотах в режимах АРП і РРП у всій смузі (а) і після фільтрації в смузі 0 ... 70 Гц (б)

Вони отримані на різних частотах для НЧ сигналу у всій смузі від 0 до 10 кГц щодо несучої та після здійснення фільтрації низькочастотних компонент у діапазоні 0 ... 70 Гц, які відповідають доплерівським частотам сигналів повітряних об'єктів.

Видно, що для функцій розподілу характерна негаусовість, яка проявляється у відхиленні їх від лінійної залежності. По осі абсцис відкладено значення, нормоване на середньоквадратичне значення процесу. Це дозволяє усунути як добову мінливість потужності прийнятого сигналу, так і вплив частоти прийому. Функції розподілу на різних частотах (17490 кГц і 12160 кГц), зняті в різний час доби, практично не відрізняються. Загини функцій розподілу при великих значеннях (по модулю) пов'язано з впливом ефекту обмеження сигналу приймачем. Це видно і на гістограмах розподілу (рис.3.5). Обмеження проявляється в немонотонному характері зміни гістограми розподілу. Слід зазначити, що при АРП крім зниження динамічного діапазону флюктуацій сигналу відбувається нормалізація його статистик (рис. 3.4 (а)). Фільтрація сигналу в НЧ області в смузі частот 0 ... 70 Гц призводить до зростання ступеня негаусовості сигналу, прийнятого в режимі РРП. Вона проявляється в більшому викривленні функції розподілу, побудованої в нормалізуючому масштабі

(рис.3.4 (б)). У той же час в режимі АРП, як для вихідного сигналу (рис.3.4 (а)), так і після фільтрації в смузі 0 ... 70 Гц (рис.3.4 (б)) призводить до його нормалізації.

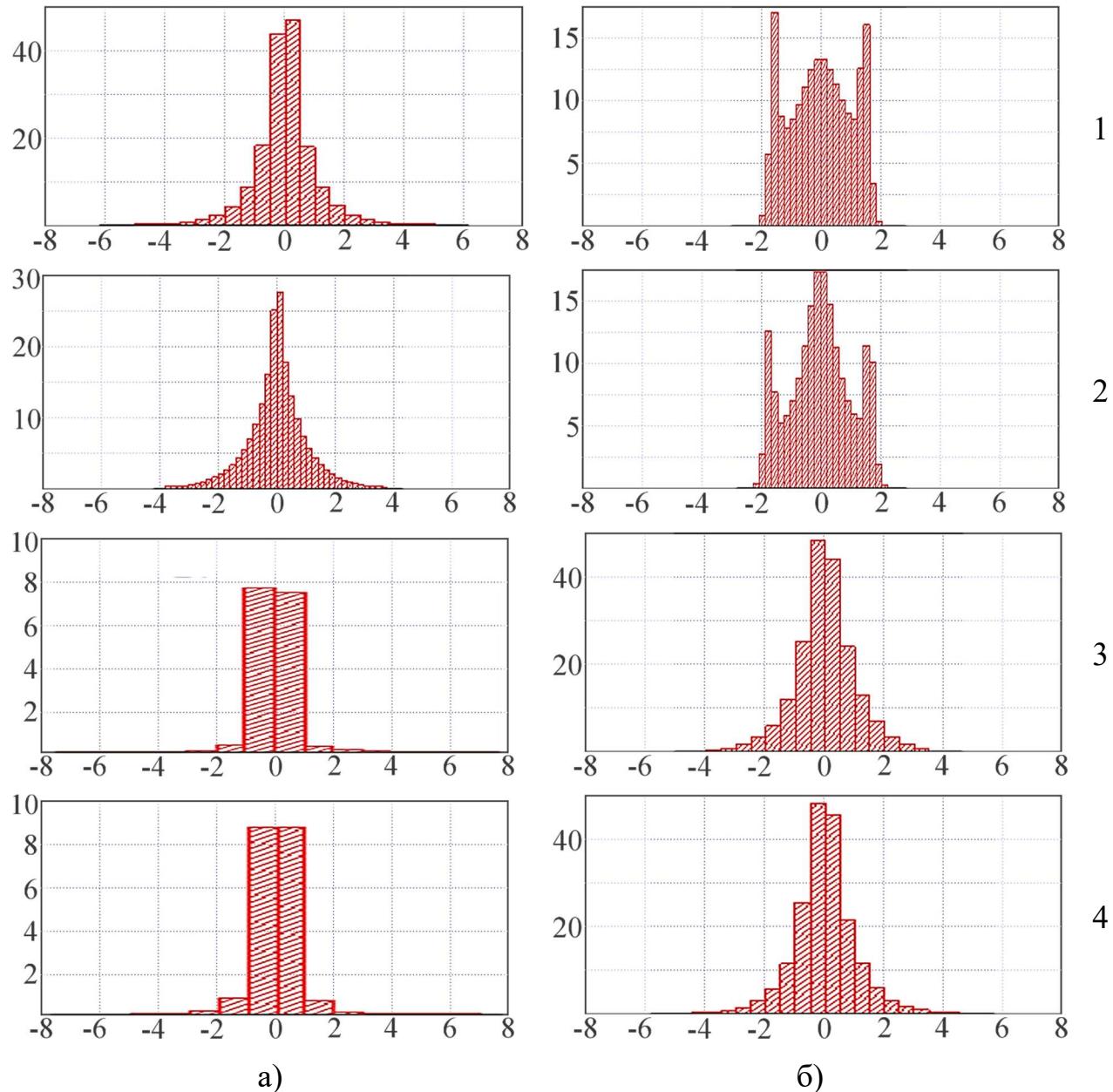


Рисунок 3.5 - Гістограми розподілу значень на виході приймача на різних частотах і в різний час доби: а-PRP; б-АРП; 1, 2 - смуга 10 кГц; 3, 4 смуга 0 ... 70 Гц; 1, 3-17490 кГц; .2, 4-12160 кГц

У першому наближенні, сигнал, який приймається при використанні АРП, можна вважати таким, що описується нормальним законом розподілу.

Результати апроксимації функцій розподілу складеним нормальним (полігаусовим) законом (3.4) наведено в табл.3.4.

$$p(x) = \sum_{i=1}^{i=k} P_i p_i(x), \quad (3.4)$$

P_i , $p_i(x)$, $p(x)$ – фінальна ймовірність і густина розподілу процесу в i -му стані, а також результатуюча густина його розподілу.

Таблиця 3.2

Апроксимація функцій розподілу сигналу підсвічування складеним нормальним законом розподілу.

Робоча частота. кГц	У всій смузі аналізу				У смузі 0 ... 70 Гц			
	Параметр негаусовості $\gamma = (\sigma_2/\sigma_1)^2$, дБ		Імовірність викиду, Р%		Параметр негаусовості $\gamma = (\sigma_2/\sigma_1)^2$, дБ		Імовірність викиду, Р%	
	РРП	АРП	РРП	АРП	РРП	АРП	РРП	АРП
12160	8,2	0	25	0	9,0	6,8	3,5	27
17490	9,7	0	15	0	15,2	4,2	4	30
17490	9,7	0	15	0	12,2	-	18,5	-
17560	5,1	0	37	0	8,2	9,2	25	25

При цьому розподіл процесу в фазовому стані може описуватися, як вказувалося раніше, нормальним законом розподілу:

$$p_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (3.5)$$

σ_i^2 - дисперсія процесу в i -му стані, а для фінальних ймовірностей справедливо умова нормування:

$$\sum_{i=1}^k P_i = 1, \quad (3.6)$$

де k загальна кількість фазових станів процесу.

Параметри апроксимації функцій розподілу сигналу підсвічування мовних станцій в режимах АРП і РРП як у всій смузі частот, так і в смузі 0 ... 70 Гц, що відповідає доплерівським зсувам від цілей, наведені в табл. 3.2.

Видно, що в режимі АРП завада сигналу підсвічування у всій смузі на всіх частотах декаметрового діапазону незалежно від часу доби задовільно описується гаусівською функцією розподілу. У той же час для режиму ручного регулювання підсилення характерна негаусовість розподілу.

Співвідношення інтенсивності компонент (ступінь негаусовості) для сигналу у всій смузі має значення 5 ... 10 дБ при ймовірності наявності другої компоненти (сплесків) 15% ... 40%. Фільтрація в смузі доплерівських частот 0 ... 70 Гц призводить, як правило, до появи негаусовості навіть в режимі АРП. Параметр негаусовості має величину 4 ... 10 дБ зростаючи при РРП до 8 ... 16 дБ. При цьому ймовірності викидів, як правило, знижуються до 25 ... 30% в режимі АРП і 3,5 ... 25% в режимі РРП.

Оскільки опис функції розподілу може базуватися на полігаусовом розподілі, то імітаційна модель завади від сигналу підсвічування може будуватися на основі напівмарківських вкладених процесів [183].

3.3 Імітаційна модель завад, створюваних активно-пасивним системам.

Статистичний опис завад, створюваних активно-пасивним системам випромінюванням мовних станцій засноване на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів $\{\overrightarrow{S(t)}, \theta(t)\}$, у яких одна компонента неперервна $\overrightarrow{S(t)}$, а інша дискретна $\theta(t) = v_i$ [183]. Тут t – узагальнена координата, в якості якої можуть виступати час і просторові координати. Ці компоненти є залежними і, в загальному випадку, не є марківськими. Це означає, що не накладається ніяких обмежень на розподіл часу існування процесу в

кожному з K фазових станів. Для кожного моменту часу, в загальному випадку, процес знаходиться в одному з можливих фазових станів $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$. Окремим випадком є система з двома фазовими станами. Вважається відомим початковий стан $\theta_0 = \nu_i$ в момент часу $t = 0$ і однокрокові ймовірності переходу π_{ij} , де $i, j = \overrightarrow{1 \dots K}$. Зіставимо кожному ненульовому елементу π_{ij} матриці ймовірності переходу випадкову величину T_{ij} з густину розподілу $f_{ij}(t)$, яку будемо називати часом очікування в стані ν_i до переходу в стан ν_j . Якщо величини T_{ij} розподілені за експоненціальним законом, то такий процес буде марківським. На практиці, в багатьох випадках, таке припущення не виконується, зокрема, для відбиттів від суші і моря [183]. Тоді процес, у якого зміна станів описується марківським ланцюгом, а густина розподілу часів існування в кожному з них відрізняється від експоненційної, належить до класу напівмарківських. Усередині кожного з ν_i станів процес будемо вважати квазістационарним, що описується своєю густиною розподілу значень $[P_i(S)]$ і спектром $[S_i(\omega)]$. Для опису процесу всередині фазового стану в ряді випадків можуть бути використані стандартні моделі гаусових процесів. Однак можуть використовуватися і атомарні функції [183].

Для k -фазних процесів з детермінованою зміною фазових станів процесу матриця $|\pi_{ij}|$ ймовірності переходу матиме вигляд:

$$|\pi_{ij}| = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix}, \quad (3.7)$$

для двофазних процесів, таких як відбиття від моря, шум вітру, дощу, шум кроків людини, звуку пострілу $|\pi_{ij}|$ ймовірності переходу мають вигляд:

$$|\pi_{ij}| = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad (3.8)$$

В якості багатофазних процесів з детермінованою зміною станів можуть виступати системи, що мають циклограму з кількістю станів, більшою двох. У той же час для дуже великої кількості процесів досить використання двох фазових станів із різними інтенсивностями, спектрами і законами розподілу значень. Так, для завад, створюваних активно-пасивним систем випромінюванням мовних станцій КХ діапазону, як для всієї смуги частот, так і в смузі доплерівських частот 0 ... 70 Гц також характерна наявність двох фаз різної інтенсивності, які фізично обумовлені дискретним характером модулюючих сигналів: звуків мови та музики. Для отримання можливості порівнювати характер поведінки сигналу на різних частотах і в різний час доби, функції розподілу будувалися після нормування значень на середньоквадратичне значення. Так, видно, що зняті в різний час і на різних частотах функції розподілу після нормування мають приблизно одинаковий характер поведінки (рис. 3.4 (a)). Відмінності проявляються на "хвостах" функцій розподілу, при значеннях $\left| \frac{X}{\sigma} \right| \geq 3.5$, Коли починають позначатися ефекти обмеження сигналу приймальним пристроєм. Використання АРП призводить до зменшення динамічного діапазону флуктуацій сигналу підсвічування, що видно як на гістограмах (рис.3.6 і рис.3.7). Так і інтегральних функціях розподілу (рис. 3.8). Видно, що при АРП обмеження починають позначатися вже при $\left| \frac{X}{\sigma} \right| \geq 1.5$. Використання АРП дозволяє нормалізувати статистику сигналу, який виступає в якості завади. Видно, що після фільтрації в смузі доплерівських частот негаусовість статистик сигналу підсвічування суттєво зростає при зменшенні загального рівня завади в смузі аналізу. Коефіцієнти придушення завад K_p при фільтрації в цій смузі наведено в табл. 3.3.

$$K_p = \frac{P_0}{P_1},$$

де P_0 , P_1 – потужності сигналу завади (підсвічування) на вході та виході пристрою придушення. Вимірювання проводилися в двох режимах: телефонному та телеграфному. У телефонному режимі здійснювався стандартний прийом з використанням режиму амплітудного детектування. При цьому в якості повного сигналу виступала потужність інформаційного сигналу у всій смузі 0 ... 6000 Гц. Потужність несучої, яка перебувала в області нульових частот при цьому не враховувалася, що дає кілька занижені значення коефіцієнта придушення. В телеграфному режимі несуча за допомоги гетеродину зміщувалася на 70 ... 100 Гц. Це дозволяло оцінити повну потужність вихідного сигналу з урахуванням несучої і, відповідно, усунути похибки в одержуваних коефіцієнтах придушення сигналу підсвічування при фільтрації в смузі доплерівських частот 0 ... 70 Гц.

Таблиця 3.3

Коефіцієнти придушення завад від сигналу підсвічування при фільтрації в смузі доплерівських частот - 0 ... 70 Гц

Частота, кГц	режим	Коефіцієнт придушення, дБ	
		РРП	АРП
17490	Телефон	29,8	20,2
12160	Телефон	34,8	24,8
17560	Телефон	30,2	20,6
17560	телеграф	29,8	20,2

Видно, що в приймачі з АРП коефіцієнт придушення завад сигналу підсвічування в телефонному режимі в смузі доплерівських частот становить 20 ... 25 дБ, в той час як без АРП – приблизно 30 ... 35 дБ. Додавання підсилення при РРП призводить до появи ефекту обмеження, як і при АРП і знижує коефіцієнт придушення приблизно до 20 дБ. Це означає, що рівень завад у доплерівській смузі частот є на 20 ... 35 дБ нижчим, ніж завад у всій смузі аналізу. Співвідношення дисперсії компонент, що характеризує ступінь негаусовості

вихідного сигналу підсвічування в режимі РРП, становить близько 4 ... 10 дБ, зростаючи до 8 ... 16 дБ після фільтрації в смузі доплерівських частот. При виявленні негаусовість є причиною появи додаткових втрат у співвідношенні сигнал / завада (ССЗ), які для наведених значень параметра негаусовості можуть мати величину до 10 дБ [182]. При збільшенні рівня сигналу ефекти обмеження, як вже вказувалося, починають проявлятися раніше. На рис.3.6 та рис.3.7 наведено вихідні записи та густини розподілу сигналів станції підсвічування 17560 кГц.

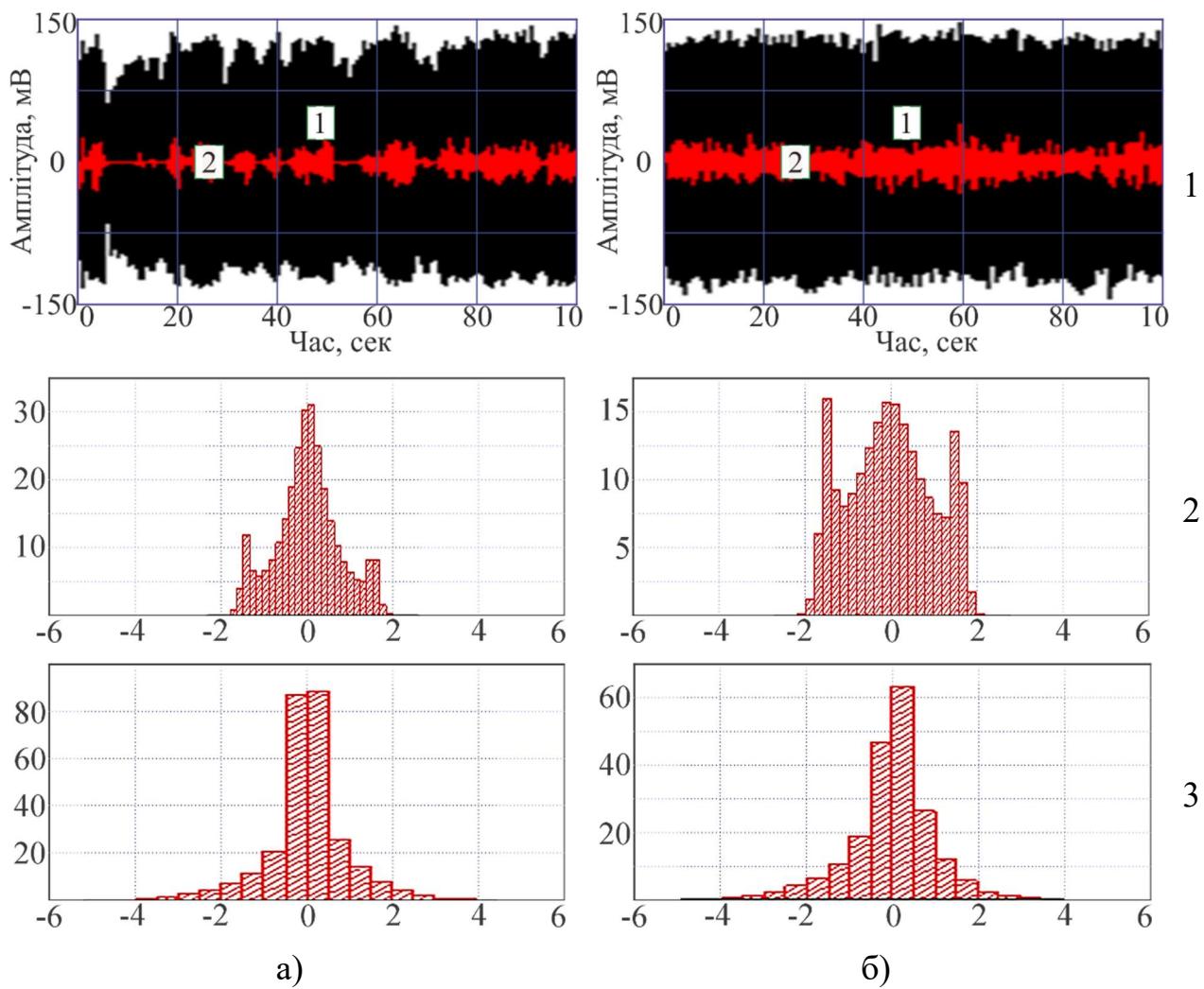


Рисунок 3.6 - Сигнал підсвічування (1) мової КХ станції частотою 17560 кГц в телефонному режимі і густина його розподілу (2, 3) при ручному РРП (а) і автоматичному АРП (б) регульованні підсилення в усій смузі частот-2 і після фільтрації в смузі 0 ... 70 Гц -3

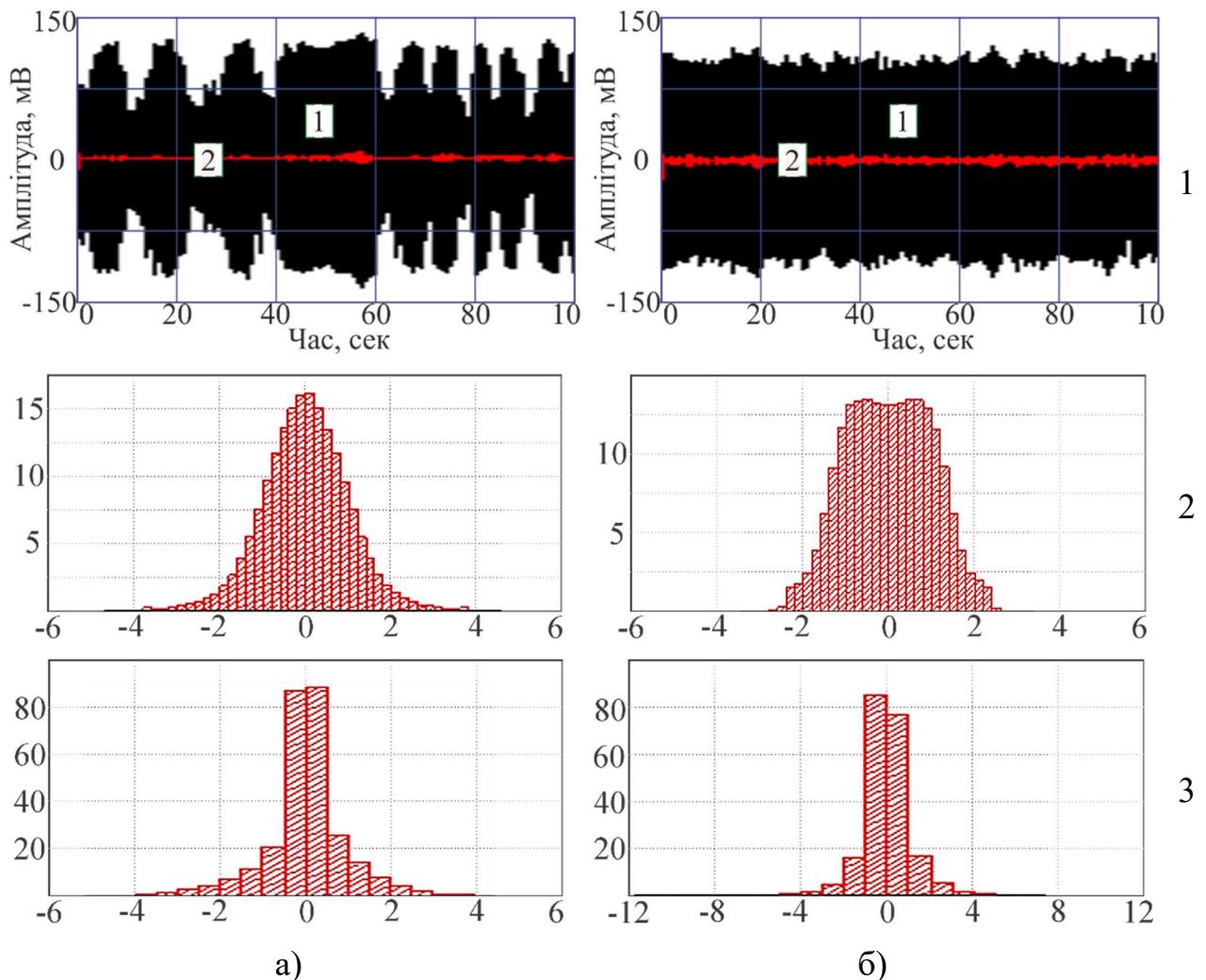


Рисунок 3.7 Сигнал підсвічування (1) мовної КХ станції частотою

17560 кГц в телеграфному режимі і густина його розподілу (2, 3) при ручному РРП (а) і автоматичному АРП (б) регулюванні підсилення в усій смузі частот – (2) і після фільтрації в смузі 0 ... 70 Гц – (3)

Записи сигналів проводилися в режимах РРП і АРП, у всій смузі частот і після їх фільтрації в смузі 70 Гц.

У телефонному режимі реєструється тільки флуктуаційна компонента, яка є корисним сигналом радіостанції (рис. 3.6) в той час, як при роботі приймача в телеграфному режимі і зміщення частоти третього гетеродину на 100 Гц відносно несучої реєструється так само і несуча (рис. 3.7).

На рис. 3.8 і рис. 3.9 наведено інтегральні функції розподілу та спектри сигналів КХ діапазону мовної станції для телефонного та телеграфного режимів роботи в масштабі, що лінеаризує нормальний закон розподілу, які виступають

у вигляді завади для систем активно-пасивної радіолокації при наявності та відсутності АРП приймача. Функції розподілу отримані для НЧ сигналу у всій смузі від 0 до 10 кГц відносно несучої і після здійснення фільтрації низькочастотних компонент в діапазоні 0 ... 70 Гц, які відповідають доплерівським частотам сигналів повітряних об'єктів.

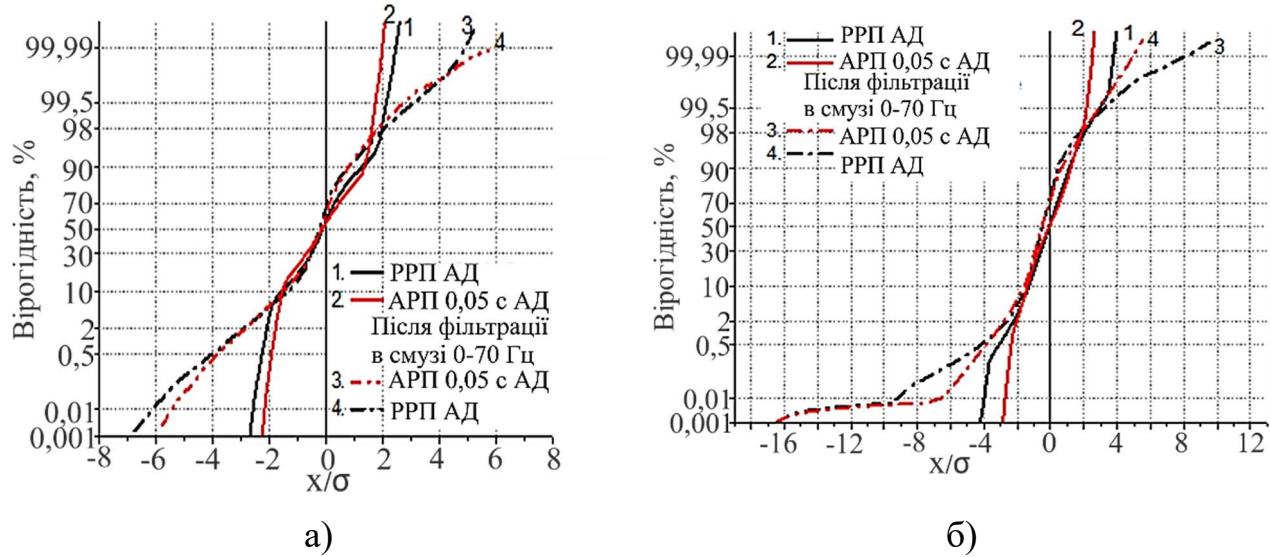


Рисунок 3.8 - Функції розподілу сигналу підсвічування КХ станції (17650 МГц) в телефонному (а) і телеграфному (б) режимах, постійна часу АРП 0,05 сек

Видно, що для функцій розподілу і в даному випадку характерна негаусовість, яка проявляється у відхиленні їх від лінійної залежності при побудові у логарифмічному масштабі. По осі абсцис відкладено значення, нормоване на середньоквадратичне значення процесу. Це дозволяє усунути добову мінливість розподілу сигналу. Функції розподілу, зняті в різний час доби, практично не відрізняються. Загини функцій розподілу при великих за модулем значеннях, пов'язані з впливом ефекту обмеження сигналу приймачем. Слід зазначити, що при АРП крім зниження динамічного діапазону флюктуацій сигналу відбувається нормалізація його статистик рис. 3.8 (криві 1, 2). Фільтрація сигналу в НЧ області в смузі частот 0 ... 70 Гц призводить до зростання ступеня негаусовості, прийнятого в режимі РРП сигналу рис. 3.8

(криві 3, 4), що проявляється в більшому викривленні функції розподілу, побудованої в нормалізуючому масштабі (рис. 3.8 (б)). У той же час в режимі АРП, як для початкового сигналу (рис. 3.8 (а)), так і після фільтрації в смузі 0 ... 70 Гц (рис. 3.8 (б)) відбувається його нормалізація. У першому наближенні прийнятий сигнал при використанні АРП можна вважати таким, який описується нормальним законом розподілу. На рис. 3.9 наведені спектри завад при різних режимах роботи приймача.

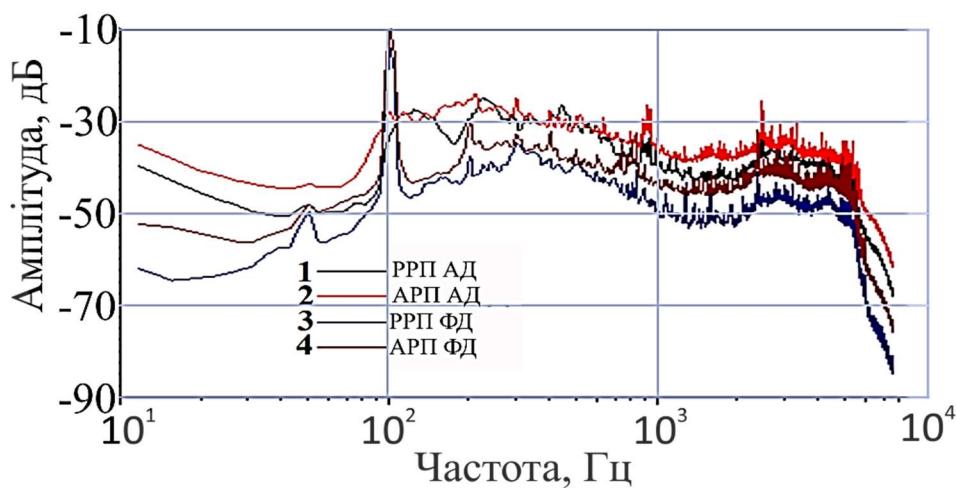


Рисунок 3.9 - Спектри сигналів в телефонному (1, 2) і телеграфному (3, 4) режимах при використанні ручного (1, 3) і автоматичного (2, 4) регулювання підсилення

Спостерігається поява несучої при використанні телеграфного режиму, коли сигнал несучої за допомоги гетеродина зміщувався на частоту 100 Гц і аналізувалися спектри сигналів в телефонному та телеграфному режимах для станції підсвічування частотою 17560 кГц. При використанні ручного і автоматичного регулювання підсилення спектри мають подібний характер. Рівень несучої, як видно, перевищує спектральну густину інформаційних частот приблизно на 20 ... 30 дБ. У той же час частоти, зміщені відносно несучої приблизно на 40 Гц, тобто що лежать в смузі доплерівських частот, мають рівень на 35 ... 45 дБ нижче.

3.4 Експериментальне дослідження рівнів завад для бістатичних РЛС.

При використанні в якості сигналу підсвічування мовних станцій КХ діапазону довжин хвиль розсіяний об'єктом сигнал $\dot{S}_T(t)$ має структуру схожу із структурою сигналу підсвічування $\dot{S}_{Tr}(t)$. Доплерівське зміщення частоти ω_D розсіяного об'єктом сигналу визначається швидкістю зміни суми відстаней від передавача до цілі і від цілі до приймача:

$$\omega_D = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\partial(R_{TrT} + R_{TR})}{\partial t} \leq \frac{2\pi}{\lambda_0} 2V_0, \quad (3.9)$$

де $\vec{R}_{TrT}(\theta_{TrT})$ – відстань між передавачем станції підсвічування і об'єктом; $\vec{R}_{TR}(\theta_{TR})$ – відстань між об'єктом і приймальні антеною; $\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0}$ – довжина хвилі несучої; V_0 – швидкість польоту цілі.

Швидкість зміни відстані визначається проекцією вектора швидкості на напрямок поширення електромагнітної хвилі (напрямок між передавачем станції підсвічування і об'єктом – $\vec{R}_{TrT}(\theta_{TrT})$, а також на напрямок між об'єктом і приймальні системою – $\vec{R}_{TR}(\theta_{TR})$). При цьому θ_{TrT} , θ_{TR} – кути, що характеризують напрямок на об'єкт від станції підсвічування і від об'єкта на приймач, а θ_T – курсовий кут об'єкта.

Враховуючи що:

$$\frac{\partial R_{TrT}}{\partial t} = \frac{(\vec{V}(\theta_T) * \vec{R}_{TrT})}{|\vec{R}_{TrT}|} = V_0 \cos(\theta_{TrT} - \theta_T), \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial R_{TR}}{\partial t} = \frac{(\vec{V}(\theta_T) * \vec{R}_{TR})}{|\vec{R}_{TR}|} = V_0 \cos(\theta_{TR} - \theta_T),$$

співвідношення (3.9, 3.10) дозволяють записати рівняння, що описує поведінку доплерівської швидкості $V_D = \lambda_0 \omega_D / 2\pi$, а значить, і доплерівського зсуву частоти:

$$\frac{v_D}{v_0} = \cos(\theta_{TrT} - \theta_T) + \cos(\theta_{TR} - \theta_T). \quad (3.11)$$

Якщо дальність до станції підсвічування R_0 суттєво перевищує дальність до цілі: $R_0 \approx R_{TrT} \gg R_{TR}$, то $\theta_{TrT} \rightarrow 0$, тоді співвідношення для доплерівського зсуву частоти можна записати як

$$v_D = \frac{v_D}{v_0} = \cos \theta_T + \cos(\theta_{TR} - \theta_T). \quad (3.12)$$

Залежність нормованої доплерівської швидкості від величини курсового кута, розрахована з використанням співвідношення (3.12), представлена на рис. 3.10.

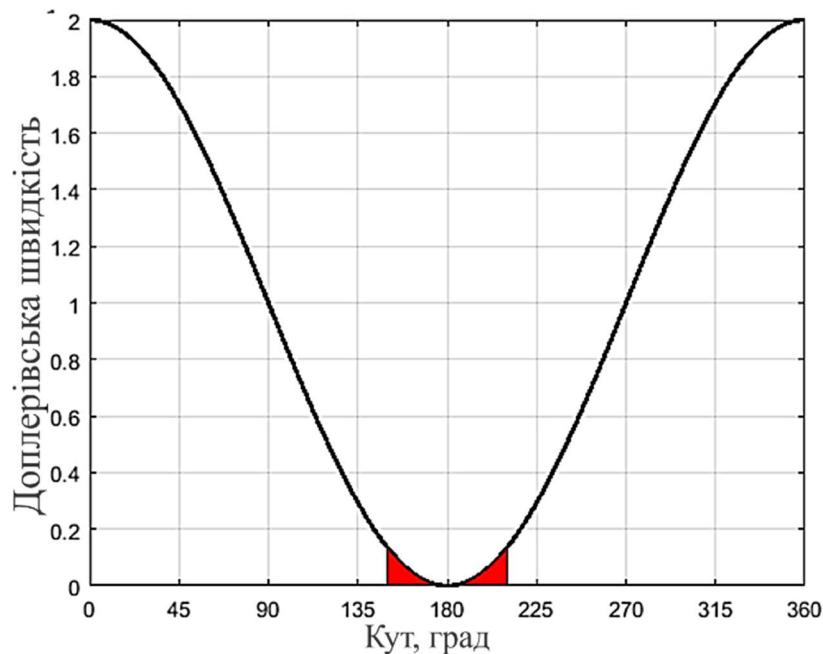


Рисунок 3.10 - Залежність нормованої доплерівської швидкості від величини курсового кута

Видно, що в досить широкому секторі курсових кутів доплерівські зсуви частоти мають величини, достатні для селекції сигналу об'єкта на фоні відбиттів від місцевості. І лише в секторі кутів $150^\circ \leq \theta_{TR} \leq 210^\circ$ виникають певні проблеми, пов'язані з попаданням доплерівського зсуву частоти в область

несучої частоти сигналу підсвічування. Оцінки з використанням співвідношення (3.9) показують, що для повітряних об'єктів, які мають крейсерські швидкості польоту 600 км/год ... 2000 км/год, діапазон доплерівських зсувів частоти в декаметровому діапазоні довжин хвиль 60 м ... 20 м лежить в межах 3 ... 30 Гц. У той же час спектр інформаційного сигналу мовних станцій зосереджений на частотах вище 50 Гц. Це означає, що в інтервалі частот між несучою та частотами інформаційного повідомлення можливе виявлення сигналів, відбитих від повітряних об'єктів.

Для експериментального вивчення рівнів завад у діапазоні частот між лінією несучої й інформаційним сигналом було використано вимірювальний комплекс, основні технічні характеристики якого наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Основні технічні характеристики вимірювального комплексу.

Технічна характеристика	Позначення	одиниця вимірювання	величина
Діюча висота антени	h_e	м	0.4
Діапазон робочих частот	f	МГц	1.0 - 31.999
Чутливість	U_{min}	мкВ	≤ 0.6
Смуга пропускання приймача	Δf	кГц	0.3; 1.0; 3.0; 6.0
Динамічний діапазон приймача	A	дБ	≥ 70
Розрядність перетворення		біт	16
Точність установки частоти гетеродину	Δ	Гц	1
Стабільність частоти гетеродинів	$\Delta f / f$		$2.5 * 10^{-8}$
Роздільна здатність по частоті	ΔF	Гц	0.06

В якості антени використовувався диполь з ефективною висотою близько 0,4 м. Він розміщувався на опорно-поворотному пристрії, що забезпечує зміну

поляризації прийому, шляхом повороту диполя на 90° . Через симетрючий пристрій антена підключалася до супергетеродинного приймача Р-399А («Катран»), вихід фазового детектора якого через звукову карту був підключений до комп'ютера.

Оскільки у звукової карти комп'ютера існують обмеження по нижній граничній частоті вхідного сигналу, то при прийомі здійснювалася відлаштування сигналу гетеродину від частоти несучої.

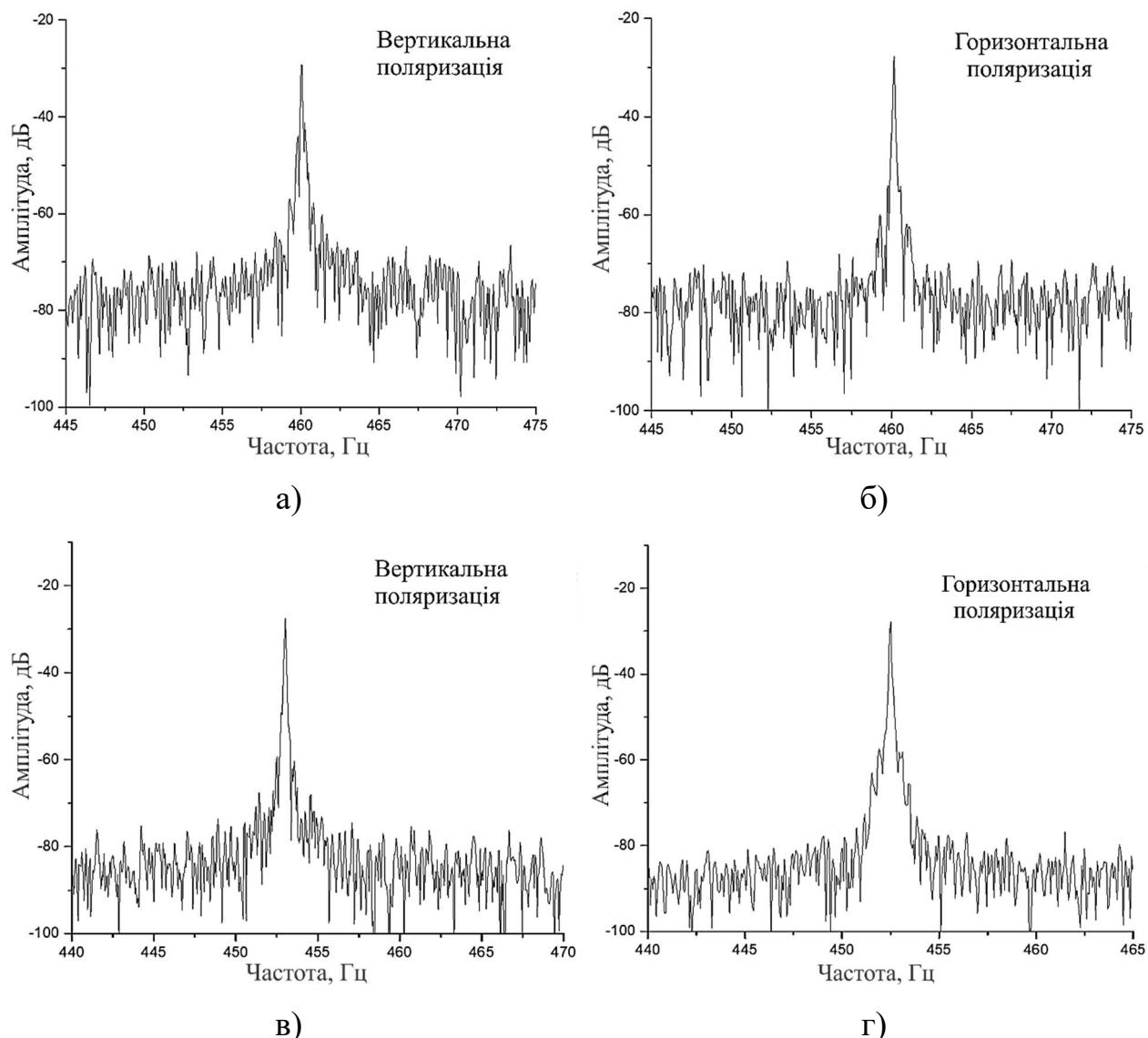


Рисунок 3.11 - Спектри сигналів мовних станцій в околі несучої на частотах 5909 кГц (а, б), 9490 кГц (в, г). при прийомі горизонтальній (б, г) і вертикальної (а, в) поляризації

Слід зазначити, що в різних дослідах і для різних поляризацій прийому цей зсув відрізняється. Спектри сигналів мовних станцій, що працюють на частотах 5909, 9490 кГц і 13904, 15130 кГц в околі несучої при вертикальній і горизонтальній поляризаціях прийому, показано на рис. 3.11 і 3.12.

На рис. 3.11 має місце однострибкове поширення радіохвиль, тоді як на рис. 3.12 – двострибкове. Видно, що для радіостанцій, які ведуть мовлення на частотах 5909 і 9490 кГц, рівень несучої перевищує рівень завад більш, ніж на 40 дБ.

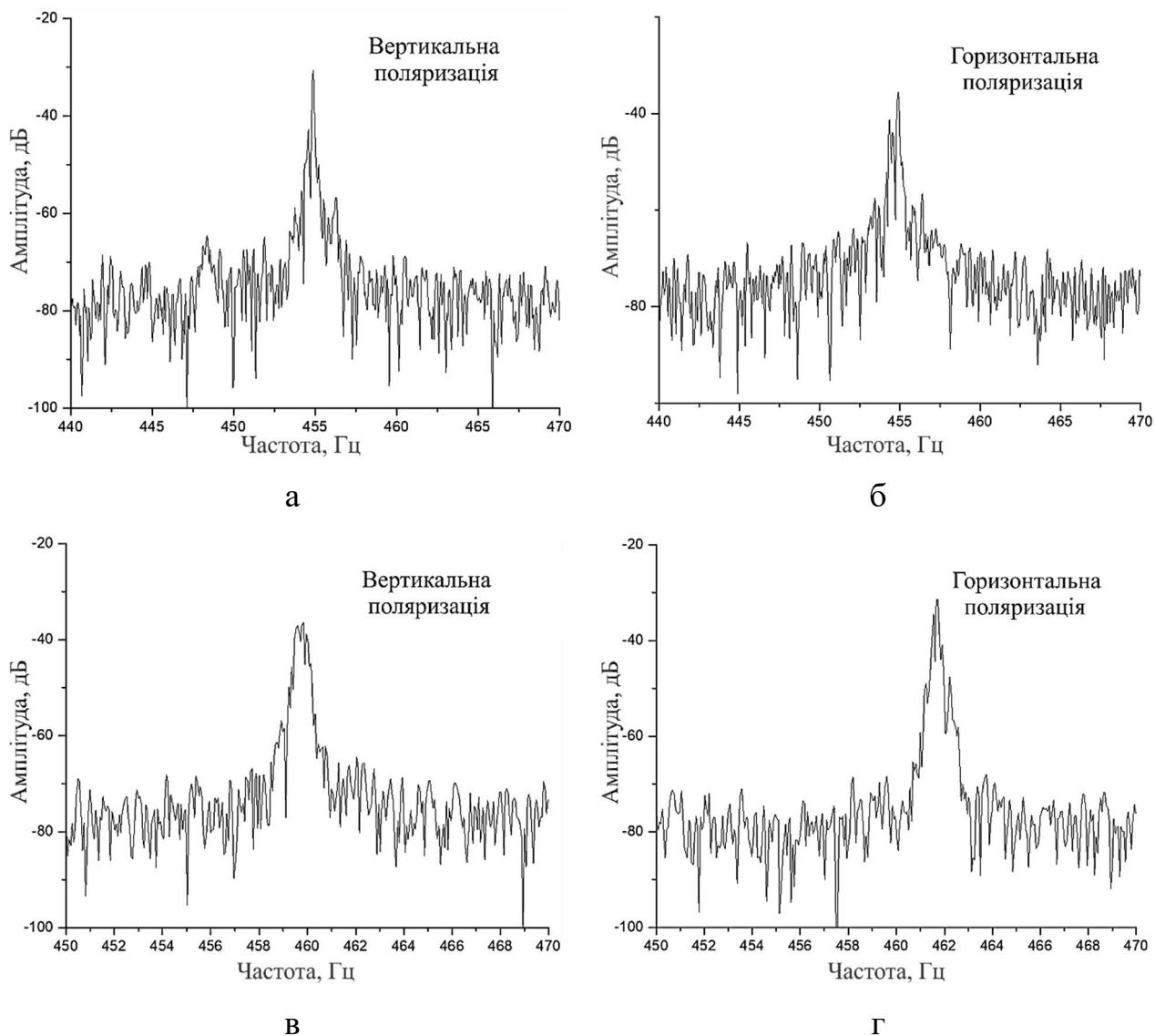


Рисунок 3.12 Спектри сигналів мовних станцій в околі несучої на частотах 13904 кГц (а, б), 15130 кГц (в, г) при прийомі горизонтальній (б, г) і вертикальної (а, в) поляризацій

Проведене експериментальне вивчення рівнів завад у проміжку частот між лінією несучої й інформаційним сигналом показало, що як рівні несучої частоти, так і завад слабо змінюються при зміні поляризації прийому.

Отримане в ході експериментів співвідношення несучої до рівня завад на різних частотах і поляризація прийому наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

ССЗ на різних частотах і поляризаціях прийому

Частота, МГц	Поля- ризация	Ширина лінії несучої, Гц	ССЗ, дБ при відбудові від несучої	
			-10 Гц	+10 Гц
15,130	ВП	0.56	61.1	57.8
15,130	ГП	0.5	54.2	52.9
9,590	ГП	0.34	60.4	60.4
9,590	ВП	0.28	57.9	58.2
13,840	ВП	0.77	50.1	48.2
13,840	ГП	1.17	44.3	44.3
5,990	ВП	0.34	52.0	52.9
5,990	ГП	0.42	47.9	49.5

Аналіз даних, отриманих в ході експериментів, показує, що рівень завад є практично однаковим при зміщенні як ліворуч, так і праворуч від несучої частоти. Різниця, як правило, не перевищує 3 дБ. Однозначний висновок про вплив зміни поляризації на співвідношення між несучою та рівнем завад зробити не вдалося, проте в ряді випадків більш великі ССЗ спостерігалися при вертикальній поляризації прийому. Разом з тим можна відзначити, що ширина лінії несучої, як правило, менше в тих випадках, коли мають місце великі ССЗ. Це, мабуть, пов'язано з впливом на прямий сигнал дальності між передавачем і приймачем. У випадках однострібкового поширення спостерігаються більш

вузька ширина смуги несучої та більше ССЗ, ніж у випадках багатострибкового поширення.

Висновки до розділу 3

У результаті апроксимації спектрів мовних станцій отримані оцінки швидкості зменшення спектральної густини вище та нижче частоти максимуму спектральної густини інформаційного сигналу. Апроксимація низькочастотної ділянки спектра здійснювалася від 2 Гц до 100 Гц, а високочастотного – від 100 Гц до 2000 Гц. Слід зазначити, що для всіх частот КХ діапазону, незалежно від часу доби нахил спектра, як правило, має значення $n \approx 1,6 \dots 2,3$.

У результаті експериментальних досліджень рівнів завад у проміжку частот між лінією несучої й інформаційним сигналом встановлено, що рівень несучої частоти, і рівень завад слабо змінюються при зміні поляризації прийому. Різниця в рівнях завад при зміщенні як ліворуч, так і праворуч від несучої частоти, як правило, не перевищує 3 дБ. Встановлено, що ширина лінії несучої, як правило, менше в тих випадках, коли має місце великі ССЗ.

Експериментальні дослідження сигналів КХ станцій показали, що при відсутності АРП на виході приймача спостерігаються завмирання глибиною 20 ... 30 дБ з періодичністю в десятки секунд. Збільшення дистанції між передавачем і приймачем призводить до зниження періоду завмирань, тобто для багатострибкових трас буде характерний менший період завмирань, ніж для однострібкових. Застосування АРП істотно знижує динамічний діапазон флюктуацій, що позитивно позначається на умовах прийому, проте може призводити до появи негативних ефектів, пов'язаних з обмеженням великих сигналів.

Встановлено, що збільшення рівня сигналу або коефіцієнта підсилення приймача призводить до зниження розмаху флюктуацій сигналу і появі в режимі РРП ефектів обмеження сигналу, характерних для АРП.

Встановлено, що фільтрація корисного сигналу в смузі доплерівських частот 0 ... 70 Гц, яка необхідна для зниження рівня завад, створюваних інформаційним сигналом станції підсвічування, призводить до зростання діапазону флюктуацій сигналу, що буде приводити до зміни його статистик.

З огляду на наявність двох фаз різної інтенсивності, які фізично зумовлені дискретним характером модулюючих сигналів радіомовних станцій запропонована імітаційна модель, що описує завади, створювані активно-пасивним системам випромінюванням мовних станцій на основі вкладених двокомпонентних випадкових процесів.

У результаті апроксимації функцій розподілу сигналу підсвічування складовим нормальним законом розподілу встановлено, що в режимі АРП завада сигналу підсвічування у всій смузі на всіх частотах декаметрового діапазону незалежно від часу доби задовільно описується гаусівською функцією розподілу. У той же час для режиму РРП для статистик сигналу характерна негаусовість. Співвідношення інтенсивностей компонент (ступінь негаусовості) для сигналу у всій смузі має значення 5 ... 10 дБ при ймовірності наявності другої компоненти (сплесків) 15% ... 40%. Фільтрація в смузі доплерівських частот 0 ... 70 Гц призводить, як правило, до появи негаусовості навіть в режимі АРП. Параметр негаусовості має величину 4 ... 10 дБ, зростаючи при РРП до 8 ... 16 дБ. При цьому ймовірності викидів, як правило, знижуються до 25...30% в режимі АРП і 3,5...25% в режимі РРП.

РОЗДІЛ 4

НЕЕКВІДІСТАНТНІ ДВОВИМІРНІ АНТЕННІ РЕШІТКИ НА ОСНОВІ МАГІЧНИХ КВАДРАТІВ.

У цьому розділі розглянуто можливість синтезу двовимірних нееквідистантних антенних решіток для систем моніторингу навколошнього середовища, активно-пасивної радіолокації та радіоастрономії на основі магічних квадратів і досліджені їх властивості.

Вивчено вплив на діаграму спрямованості (ДС) розрідженої антенної решітки, сформованої елементами магічного квадрата, введення додаткових елементів, поворотів, зсувів.

Запропоновано алгоритми отримання максимального покриття просторових частот розрідженої антенної решітки шляхом додавання елементів решітки, сформованої елементами магічного квадрата додатковими елементами [184 - 187].

Експериментально досліджено уповільнення електромагнітної хвилі, розподіл поверхневого струму та вхідного імпедансу симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей із діаметром і кроком, малими порівняно з довжиною вібратора [188, 189]. На базі симетричного спірального вібратора запропоновано відбивач-калібратор для зовнішньої калібрування РЛС та імітації ЕПР рухомої радіолокаційної цілі [190].

Основні результати опубліковано в роботах [184-190].

4.1 Синтез нееквідистантних антенних решіток з використанням магічних квадратів

Нееквідистантні лінійні антенні решітки (АР) давно використовуються при побудові антен радіотелескопів та радіолокаторів [191- 203]. Їхня основна перевага – скорочення числа елементів в антені без помітної втрати роздільної здатності при збереженні досить низького рівня бічних пелюсток. Необхідність отримання високої просторової роздільної здатності, для чого потрібні апертури великих розмірів,

складність і трудомісткість реалізації окремих елементів антени призводять до необхідності використання незаповнених апертур. Велика кількість спроб знайти простий спосіб побудови нееквідистантної решітки з малими бічними пелюстками, в більшості своїй була невдалою. Пошук глобального мінімуму бокового випромінювання при фіксованих розмірах решітки, кількості елементів і роздільній здатності призводив до того, що завдання виявлялося настільки складним, що вимагало величезних обчислювальних витрат. Використувані раніше спрощення призводили до помітної втрати якості. Тому при створенні нееквідистантних решіток, в більшості випадків, користувалися статистичними методами [192].

Істотне зрушення було досягнуто в 1978 р. Ліпером [195], який запропонував розміщувати елементи лінійної антени в деяких вузлах рівномірної сітки, причому вузли вибирати таким чином, щоб послідовність їх номерів утворювала циклічну різницеву множину (ЦРМ). Подальший розвиток цей підхід отримав в роботах Л. Є. Копиловича, та був узагальнений і на випадок конструювання двовимірних антенних решіток [196-201]. Однак узагальнення було здійснено на основі використання добутку одновимірних базисів її сторін, що було зроблено дещо штучним.

Цікавим є дослідження можливості використання різних математичних конструкцій, наприклад, таких, як магічні квадрати, для побудови двовимірних нееквідистантних антенних решіток.

Магічний квадрат – це квадратна таблиця (матриця), заповнена числами так, що сума чисел у кожному рядку, кожному стовпці і на обох діагоналях є однаковою. Сума чисел в кожному рядку, стовпці і на діагоналях, називається магічною константою **М**.

Ідея використання магічних квадратів з ряду натуральних чисел полягає в тому, що в квадраті кожне число повторюється тільки один раз, а це означає, що якщо розглядати його елемент як відстань між двома елементами інтерферометра, то при використанні натурального ряду чисел як елементів квадрата будуть гарантовано покриті просторові частоти від 1 до \hat{N} . При цьому частково будуть покриті частоти і на всій апертурі 1 ... М. При використанні магічних квадратів з простих чисел

викликає інтерес можливість зниження коефіцієнта надмірності та коефіцієнта заповнення апертури.

При розгляді елементів магічного квадрата як відстані між сусідніми елементами інтерферометра S_{lj} , елемент квадрата знаходиться на S_{lj} відстанях по осіх абсцис та ординат від сусідніх елементів антеною решітки. Тоді координати x_{lj} , y_{lj} елементів складових антенної решітки можуть бути записані через значення S_{lj} елементи квадрата в рядку l і стовпці j . Кількість елементів визначається порядком квадрата \hat{n} :

$$y_{lj} = \sum_{l=1}^l S_{lj} = y_{l-1j} + S_{lj}; x_{lj} = \sum_{j=1}^j S_{lj} = x_{lj-1} + S_{lj} \quad (4.1)$$

де x_{lj} – абсциса, y_{lj} – ордината.

Отримані комплексні цілі числа $Z_{lj} = x_{lj} + iy_{lj}$ є гаусовими числами, у яких дійсна та уявна частина є цілими числами, та визначають координати елементів антенної решітки. Кількість елементів решітки визначається порядком породжуючого її квадрата і дорівнює \hat{n}^2 .

При цьому матриця $\|Z\|$ визначає координати елементів двовимірної нееквідистантної антенної решітки. Координати Z_{lj} елемента зміщені від попередніх елементів по осі абсцис і ординат на значення S_{lj} . Частоти y_q та x_g , які покриваються по осіх y та x визначаються різницею координат елементів решітки:

$$y_q = y_{lj} - y_{km} \text{ і } x_g = x_{lj} - x_{km}. \quad (4.2)$$

Оскільки в нормальніх магічних квадратах $S_{lj} \in (1, \hat{n}^2)$, це означає, що синтезована на основі квадрата \hat{n} -го порядку двовимірна антenna решітка буде повністю покривати, принаймні, просторові частоти, відповідні числам від 1 до \hat{n}^2 .

При створенні антенних решіток привабливим є створення такої решітки, яка при повному покритті необхідної області частот має мінімальну кількість елементів і прийнятними значеннями рівня бічних пелюсток. Одним з важливих завдань є

знаходження безнадлишкової конфігурації (БК) з заданим числом елементів, що забезпечує повне покриття центральної області максимального розміру в площині просторових частот (u, v-площині) [197]. Для безнадлишкових решіток характерне повне покриття всієї сітки частот в області розташування антени [200].

Очевидно, що магічний квадрат, побудований з послідовності натуральних чисел $(1, \hat{n}^2)$ – нормальний квадрат за визначенням покриває в u та v-площині частоти $(1, \hat{n}^2)$. Координати елементів решітки є елементами комплексної матриці $\|Z\|$, отриманої з використанням (4.1) і породжуючої матриці $\|S\|$, елементами якої є елементи магічного квадрата.

Можна визначити матрицю $\|\hat{Z}\|$, яку в подальшому будемо називати інверсною до матриці $\|Z\|$ по модулю M :

$$\|\hat{Z}\| + \|Z\| = \|M\|, \quad (4.3)$$

де $\|\dot{M}\| = M\|\dot{1}\|$, причому

$$\|\dot{1}\| = \begin{pmatrix} 1+i & 1+i \dots 1+i \\ 1+i & 1+i \dots 1+i \\ \dots \dots \\ 1+i & 1+i \dots 1+i \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Інверсна матриця $\|\hat{Z}\|$, незважаючи на вигляд розташування елементів, який істотно відрізняється від $\|Z\|$, еквівалентна їй, оскільки решітка, координати елементів якої вона визначає, покриває таку ж область просторових частот, що і решітка $\|Z\|$.

Дійсно, частоти, які покриваються визначаються різницею координат елементів, і для інверсної решітки їх можна записати:

$$\hat{y}_l = \hat{y}_{ij} - \hat{y}_{km} = M - y_{ij} - (M - y_{km}) = \hat{y}_{km} - \hat{y}_{ij}, \quad (4.5)$$

$$\hat{x}_m = \hat{y}_{lj} - \hat{y}_{kl} = M - y_{lj} - (M - y_{kl}) = y_{kl} - y_{lj}, \quad (4.6)$$

тобто частоти решітки для матриці $\|\hat{Z}\|$ збігаються за величиною з частотами, що покриваються елементами решітки, яка визначається вихідної матрицею $\|Z\|$.

Використовуючи матриці $\|Z\|$ і $\|\hat{Z}\|$, що описують координати антенних решіток, можна утворити матрицю:

$$\|Z^*\| = \|Z\| \cup \|\hat{Z}\|, \quad (4.7)$$

яка містить як елементи матриці $\|Z\|$, так і $\|\hat{Z}\|$. Її надалі будемо називати матрицею сполученою з $\|Z\|$. І в той час, як елементи цих матриць покривають області частот, що збігаються при доповненні однієї з них елементами іншої, область покриття може бути розширенна, оскільки можуть з'явитися додаткові частоти покриття між елементами цих двох матриць.

4.2 Властивості антенних решіток на основі магічних квадратів

Очевидно, що елементи в останньому стовпці x_{ij} , тобто при $j = \hat{n}$ і останньому рядку y_{ij} , тобто при $i = \hat{n}$ мають значення рівне постійній магічному квадрату, тобто $x_{i\hat{n}} = M$, де $i \in (1, \hat{n})$ та $y_{\hat{n}j} = M$, де $j \in (1, \hat{n})$.

ДС антенної решітки визначається співвідношеннями [191]:

$$G(\cos \alpha_x, \cos \alpha_y) = \sum_{\substack{m=1, \\ \hat{n}=1}}^{m=m-1} |A_{m\hat{n}}| \exp i t (x_{m\hat{n}} \cos \phi + y_{m\hat{n}} \sin \phi), \quad (4.8)$$

де $\cos \alpha_x = \sin \theta * \cos \phi$, та $\cos \alpha_y = \sin \theta * \sin \phi$ – напрямні косинуси, $t = \frac{2\pi}{\lambda} d_0$, λ – довжина хвилі, d_0 – крок решітки, $|A_{m\hat{n}}|$ – амплітуда живлення $m\hat{n}$ елемента решітки. У нашому випадку $|A_{m\hat{n}}| = 1$.

Середній рівень випромінювання по бічних пелюстках можна оцінити з використанням співвідношення [186]:

$$\delta = \sqrt{\sum_{l=l_0}^N |\dot{G}(\Delta\phi l)|^2 / (N - l_0)}, \quad (4.9)$$

де підсумовування здійснюється $l \in (l_0, N)$ поза межами основного пелюстка ДС.

Якщо елементами магічного квадрата є елементи арифметичної прогресії, в окремому випадку, ряд натуральних чисел $i, j \in (1, \hat{n}^2)$ (так звані нормальні квадрати), то при цьому \hat{n}, \hat{n}^2 визначають порядок квадрата і кількість його елементів. Зрозуміло, що якщо до кожного елементу квадрата S_{lj} додати постійне число a , тобто $\hat{S}_{lj} = S_{lj} + a$, або помножити його на константу b , тобто $\hat{S}_{lj} = bS_{lj}$, то отримані породжуючі матриці $\|\hat{S}\|$ і $\|\hat{\hat{S}}\|$ також будуть магічними квадратами. Отримані на їх основі нееквідistantні решітки будуть еквівалентні, оскільки додавання константи призводить до зміщення всіх елементів решітки в просторі, а множення на константу до стиснення чи розтягування областей просторових частот [187].

При зміні в магічному квадраті порядку прямування стовпців або рядків сума по рядках або стовпцях не змінюється, тобто отриманий таким чином квадрат буде, принаймні, полумагічним.

4.3 Дослідження антенних решіток на основі магічних квадратів

На рис. 4.1 та рис. 4.2 показані результати досліджень кількох антенних решіток, отриманих з використанням (4.1) для широко відомих магічних квадратів: диявольський квадрат Кхаджурахо, квадрати Дюрера і Дьюдени, Джонсона, а також пандіагонального квадрата [184 -187].

Перші три – квадрати четвертого порядку, причому якщо перші два - нормальні (складені з чисел від 1 до 16), то квадрати Дьюдени і Джонсона, складені з простих чисел. Вони є нетрадиційними. Останній квадрат є квадратом п'ятого порядку. Всі

квадрати, крім квадратів Дьюдени і Джонсона є пандігональними, так званими диявольськими квадратами.

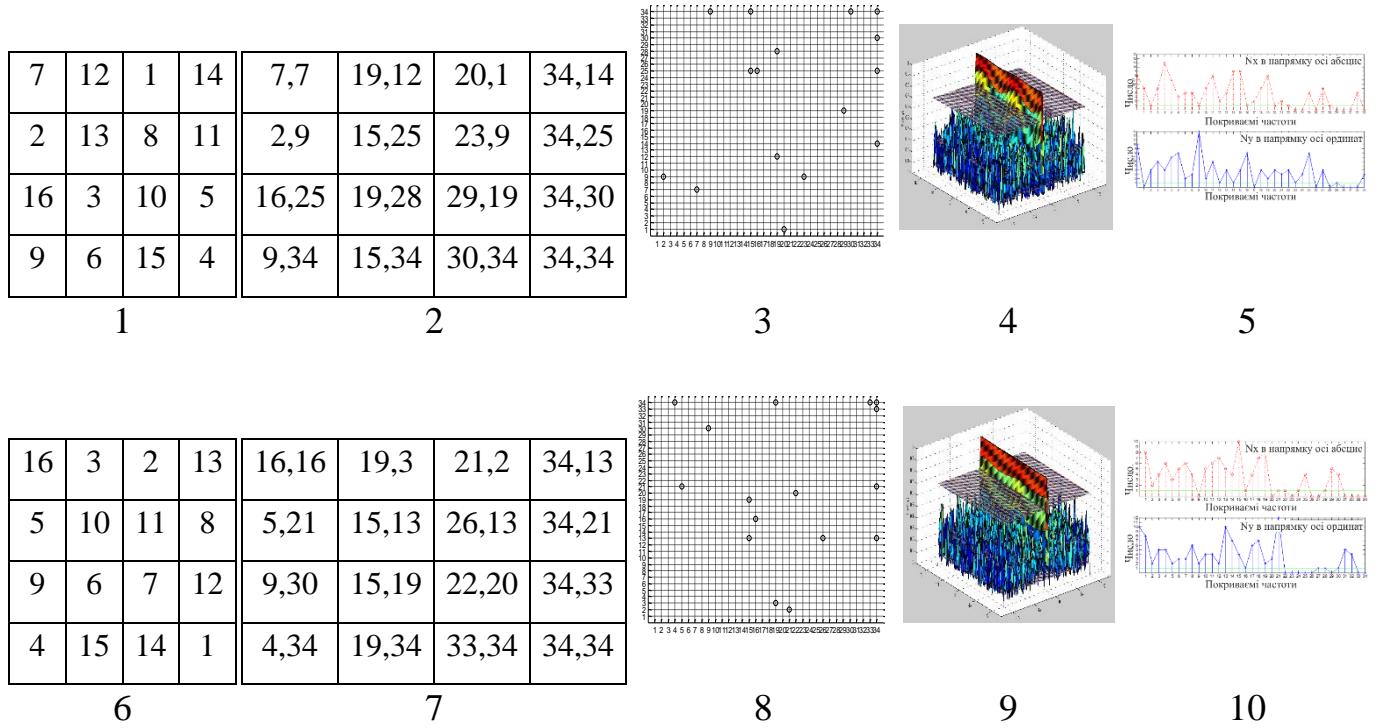


Рисунок 4.1 Магічні квадрати і характеристики отриманих з них антенних решіток: диявольський квадрат Кхаджурахо (1-5); квадрат Дюрера (6-10); 1, 6 - магічні квадрати; 2, 7 - координати елементів решіток отриманих на основі квадратів; 3, 8 - решітки на основі квадратів; 4, 9 - ДС антенних решіток в декартових координатах; 5, 10 – частоти, які покриваються, верхня крива по осі абсцис, нижня по осі ординат

Для квадрата Дюрера, крім того, що сума чисел на будь-якій горизонталі, вертикалі і діагоналі дорівнює 34, ця сума також зустрічається у всіх кутових квадратах 2×2 , в центральному квадраті ($10 + 11 + 6 + 7$), в квадраті з кутових клітин ($16 + 13 + 4 + 1$), в квадратах, побудованих «ходом коня» ($2 + 8 + 9 + 15$ і $3 + 5 + 12 + 14$), в прямокутниках, утворених парами середніх клітин на протилежних сторонах ($3 + 2 + 15 + 14$ і $5 + 8 + 9 + 12$).

Важливими характеристиками антенних решіток є коефіцієнт заповнення α :

$$\alpha = \frac{m}{v}, \quad (4.10)$$

і коефіцієнт надмірності β :

$$\beta = \frac{m}{\sqrt{S}}, \quad (4.11)$$

де m – кількість елементів решітки, а v – кількість пронумерованих вузлів решітки в області, де вона розташовується, S – площа, яку займає решітка.

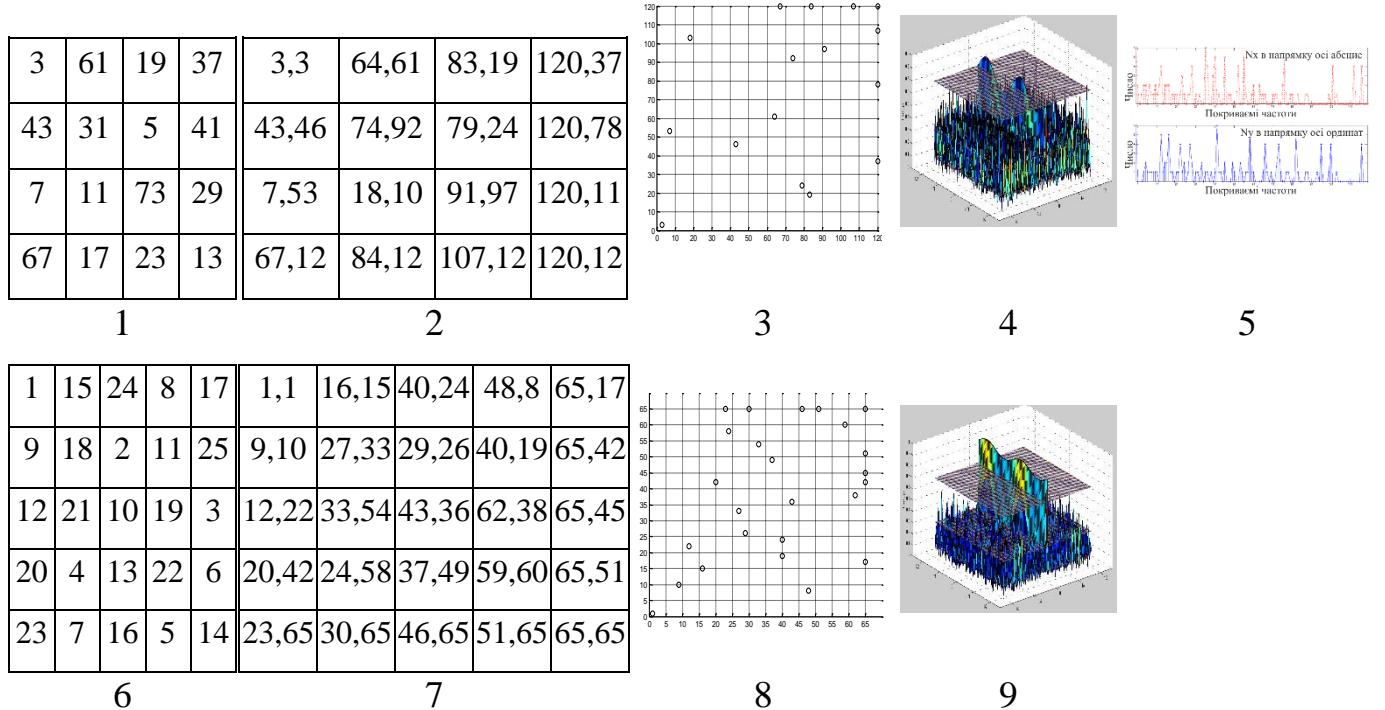


Рисунок 4.2 Магічні квадрати і характеристики отриманих з них антенних решіток: квадрат Джонсона (1-5); пандіагональний (5×5) квадрат (6-9); 1, 6 – магічні квадрати; 2, 7 – координати елементів решіток отриманих на основі квадратів; 3, 8 – решітки на основі квадратів; 4, 9 – ДС антенних решіток в декартових координатах; 5 – частоти, які покриваються, верхня крива по осі абсцис, нижня по осі ординат

Для прямокутних повністю заповнених еквідистантних решіток $S = v = \hat{n}^2$, а $m = \hat{n}^2$, тому коефіцієнт заповнення для них $\alpha = 1$, а коефіцієнт надмірності $\beta = \hat{n}$ – значний.

Для антенних решіток у вигляді хреста Міллса $S = v = \hat{n}^2$, а $m = 3\hat{n}$.

Коефіцієнт заповнення $\alpha = \frac{3}{\hat{n}}$, а надмірності $\beta = 3$.

Для антенної решітки, отриманої на основі магічного квадрата $S = v = M^2 = (\hat{n}(\hat{n}^2 + 1)/2)^2$, а $m = \hat{n}^2$.

Коефіцієнт заповнення

$$\alpha = \frac{4}{(\hat{n}^2+1)^2}, \quad (4.12)$$

та надмірності:

$$\beta = \frac{2\hat{n}^2}{\hat{n}(\hat{n}^2+1)} = \frac{2\hat{n}}{(\hat{n}^2+1)}. \quad (4.13)$$

Таким чином, зростання порядку магічного квадрата, використаного для побудови АР, призводить до значного зниження, пропорційно $\alpha \approx \frac{4}{\hat{n}^4}$ - коефіцієнта заповнення і пропорційно $\beta \approx \frac{2}{\hat{n}}$ - коефіцієнта надмірності [186].

Базис решітки D – сукупність елементів, інтервали між якими покривають задану область D_f .

Оптимальний базис для решітки D характеризується мінімальними значеннями коефіцієнта надмірності.

Оскільки перший елемент решітки не знаходиться на початку системи координат, було досліджено вплив зміщення початку координат, так, щоб найближчий з джерел знаходився на одній з осей. Крім того, розглядався варіант введення додаткового джерела на початку системи координат. Отримані при цьому результати наведені в табл. 4.1.

Видно, що за відсутності джерела на початку координат при зміщенні початку координат так, щоб найближчий з джерел потрапив на одну з осей, параметри основного пелюстка не змінюються. Додавання джерела в початок системи координат як вихідної, так і отриманої шляхом зміщення АР, призводить як до звуження

основного пелюстка, так і зменшення рівня бічних пелюстків. За визначенням елемент магічного квадрата – це відстань між елементами інтерферометра.

Таблиця 4.1

Вплив зсуву координат і введення додаткового джерела на початок координат на ДС решітки [186, 187].

	Початок решітки (0,0) Без джерела (0,0)	Початок решітки (0,0) З джерелом (0,0)	Початок решітки (2,1) Без джерела (0,0)	Початок решітки (2,1) З джерелом (0,0)
w	0.1572	0.1485	0.1572	0.1499
m	0.2452	0.2447	0.2525	0.2446

Тому перші елементи МК – це відстань між елементом АР, розміщеним на початку координат і наступним елементом АР, відстань до якого і визначає цей елемент квадрата. Спочатку даний факт не був врахований, тому досліджували решітки без нульового елемента і з ним окремо. Перенесення системи координат при наявності джерела в її початок зменшує розміри решітки і розширює рівень основного пелюстка [184-187].

У табл. 4.2 наведені числові характеристики решіток, одержуваних при поворотах вихідних матриць.

Таблиця 4.2

Характеристики АР, одержуваних при поворотах магічних квадратів.

	S	S *	S '	S ''*	S "	S "''*	S "''	S "'''*
w	0.1485	0.1572	0.1483	0.1585	0.1443	0.1561	0.1441	0.1578
n	0.2447	0.2452	0.2456	0.2536	0.2403	0.2476	0.2459	0.2533

* Елемент на початку координат (0,0) решітки відсутній, а S ', S ", S "'' – позначає поворот матриці магічного квадрату на 90^0 , 180^0 , 270^0 відповідно.

Аналіз наведених результатів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Ширина ДС без елемента на початку решітки більше, ніж ширина у АР з ним, тобто $W(\text{Без } (0,0)) > W$
2. Рівень бічних пелюсток без елемента на початку решітки більше, ніж з ним, тобто $n(\text{Без } (0,0)) > n$
3. Ширина ДС при повороті АР в ряді випадків може зменшуватися., Тобто $wS > wS' > wS''$

Зміна частот, що покриваються при додаванні в початок координат джерела ілюструє рис. 4.3.

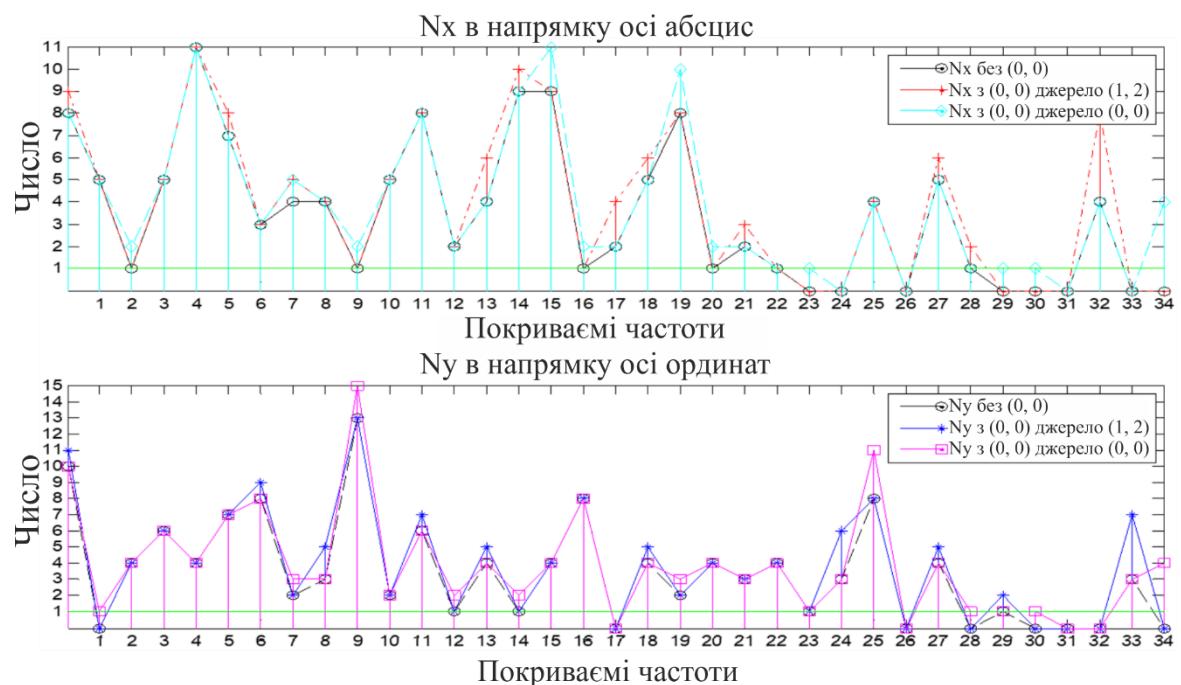


Рисунок 4.3 Зміна області частот, що покриваються при додаванні в початок координат джерела.

Для забезпечення повного покриття частот проводилося доповнення елементів решітки, сформованої елементами магічного квадрата додатковими елементами. Алгоритм доповнення полягав у наступному. Вибиралася максимальна непокрита частота, і обчислювалися координати елемента, який дозволяв її покрити. Після цього перевірялося покриття частот з урахуванням нового елемента. Якщо залишалися ще

непокриті частоти, то процес повторювався. Знову бралася максимальна непокрита частота, і визначалися координати елемента, який її покриває і так до тих пір, поки не реалізовувалося повне покриття частот. У другому варіанті використовувався спеціальний «Жадібний» алгоритм для повного покриття частот за рахунок введення додаткових елементів.

Жадібний алгоритм (англ. Greedy algorithm)- алгоритм, що полягає в прийнятті локально оптимальних рішень на кожному етапі, допускаючи, що кінцевий розв'язок також виявиться оптимальним [204].

Розглянуто 6 варіантів, в кожному з яких додавання здійснювалося з елементами. Координати додаткових елементів, отримані при цьому значення ширини основного пелюстка і середнього рівня бокових пелюстків решіток, отриманих на основі квадрата Кхаджурахо, наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Порівняння параметрів решіток на основі квадрата Кхаджурахо з додатковими елементами

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	S
Координати додаткових елементів	(1,2) (25,2) (32,32)	(1,32) (25,2) (32,2)	(1,2) (25,32) (32,2)	(1,2) (25,32) (32,32)	(1,32) (25,2) (32,32)	(1,32) (25,32) (32,2)	
w	0.1476	0.1436	0.1463	0.1532	0.1473	0.1472	0.1572
m	0.2340	0.2305	0.2303	0.2333	0.2337	0.2300	0.2525

У таблиці використані наступні позначення: w – ширина основного пелюстка за рівнем 3dB, m – середній рівень бічних пелюсток.

В якості прикладу на рис. 4.3 показані АР з додатковими елементами, побудовані на основі квадрата 4 порядку, області частот, що покриваються, а також одержувані при цьому ДС [184-187]. Введення додаткових елементів до розрідженої антенної решітки, як і слід було очікувати, призводить до зниження рівня бічних пелюсток. При порівнянні характеристик решіток наведених в табл. 4.3 для різних

варіантів доповнення квадрата елементами видно, що варіант 6 (1,32) (25,32) (32,2) є найкращим, тому що у нього найнижчий середній рівень бічних пелюстків m , і найменша ширина головного пелюстка.

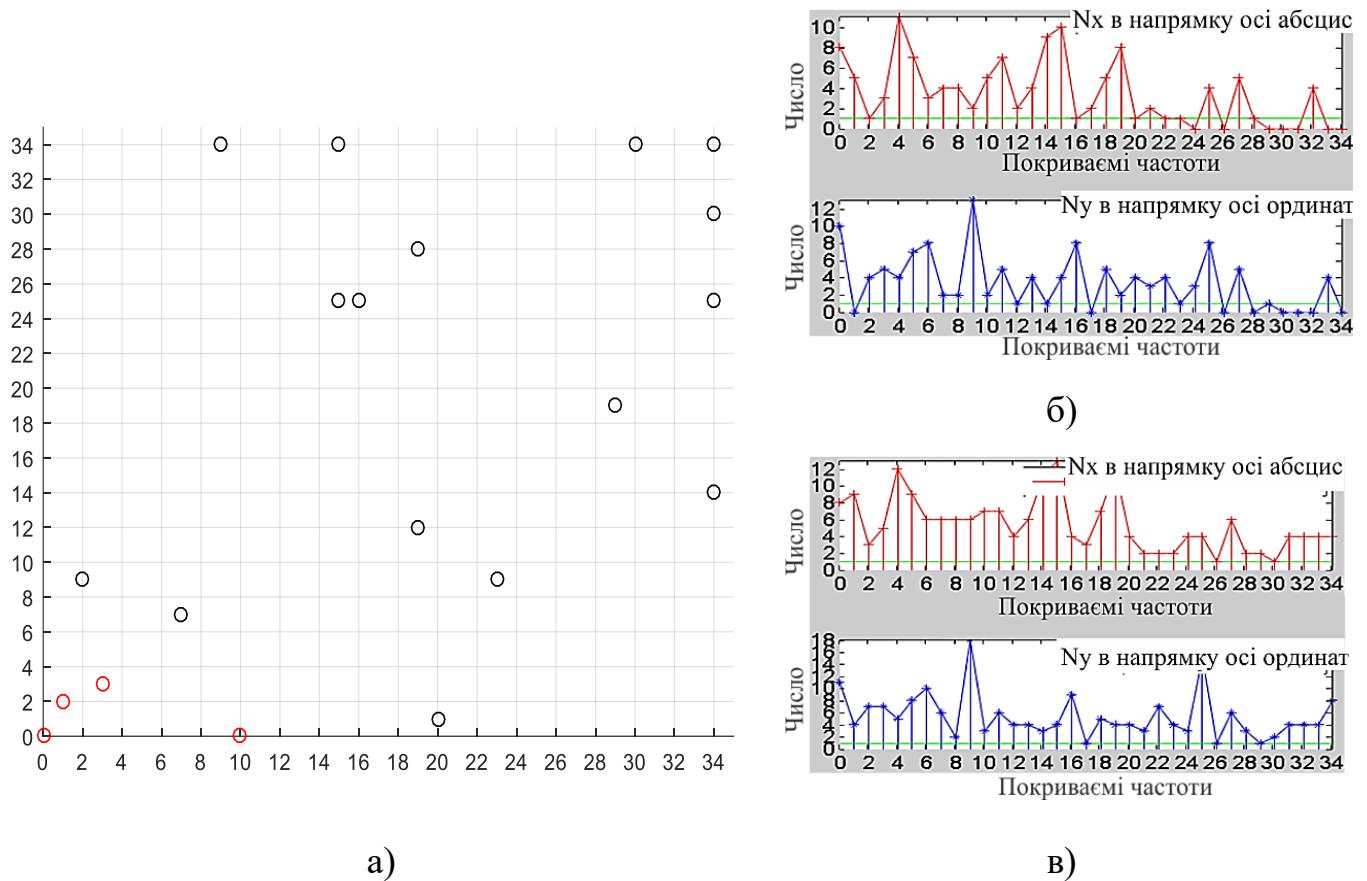


Рисунок 4.4 Антенні решітки Кхаджурахо з додатковими елементами (позначені червоним) забезпечують повне покриття – а; б-вихідне покриття частот, в – після доповнення елементами

Варіанти 2 (1, 32) (25, 2) (32, 2) і 3 (1, 2) (25, 32) (32, 2) теж дають непогані результати. Порівняння варіантів 2, 3, 6, показує, що вони мають одну спільну точку (32, 2). При порівнянні, варіантів 2, 5, 6, можна відзначити, що ці три варіанти також мають одну спільну точку (1, 32).

На рис. 4.5 представлена АР пандіагонального «магічного» квадрата, області частот, що покриваються, а також одержувані ДС.

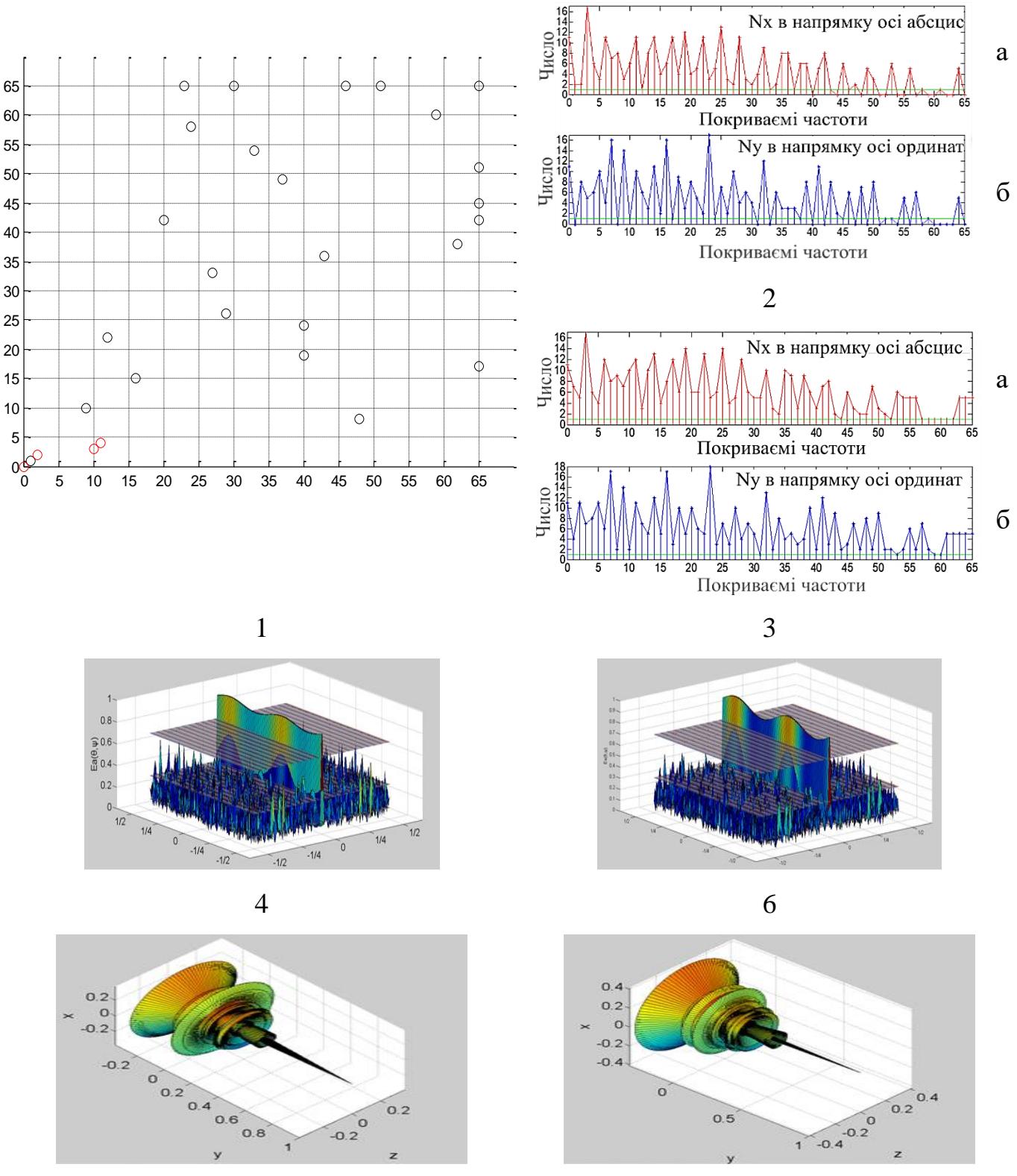


Рисунок 4.5 АР на основі пандіагонального квадрата 5 – го порядку -1, частоти що покриваються -2 (виходна АР), 3 – (АР з додатковими елементами), ДС вихідної АР – 4, 5, та з додатковими елементами – 6, 7. В декартових – 4, 6 та полярних – 5, 7 координатах.

У табл. 4.4. представлені характеристики, пандіагонального «магічного» квадрата, зображеного на рис. 4.5.

Таблиця 4.4

Параметри АР для різних матриць координат на основі «магічного» пандіагонального квадрата

параметри АР	$\ Z_0\ $	$\ Z_0^*\ $	$\ Z_{0+}\ $	$\ Z_+^*\ $
$\Delta w_{0.707}$ (Рад)	0.1723	0.0936	0.1345	0.0905
m	0.2032	0.1546	0.2023	0.1506
α	0.0059	0.0118	0.0069	0.0123
β	0.3846	0.7692	0.4462	0.800

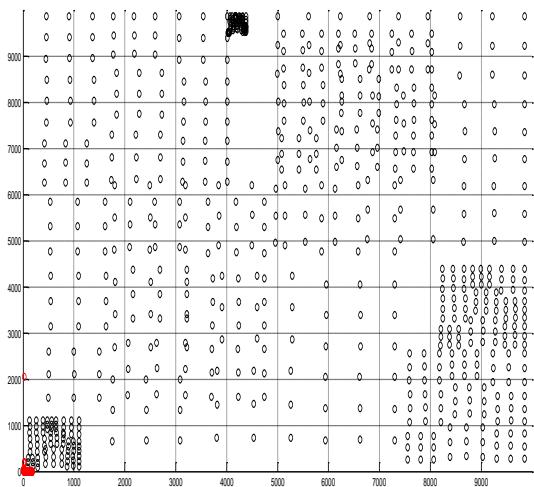
Примітка:

1. $\|Z_0\|$ – вихідна матриця
2. $\|Z_0^*\|$ – сполучена матриця
3. $\|Z_{0+}\|$ – вихідна матриця доповнена елементами до повного покриття
4. $\|Z_+^*\|$ – сполучена матриця, доповнена елементами, що забезпечують повне покриття.

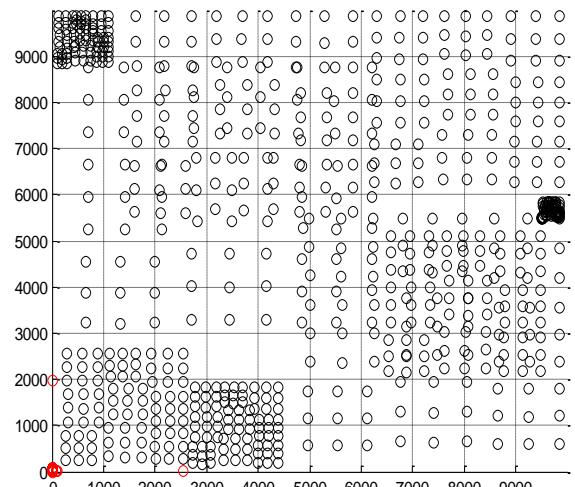
Для більшості з існуючих методів синтезу розріджених антенних решіток виникають серйозні труднощі при великих розмірах апертури і великій кількості елементів. У даний час відсутні проблеми при створенні магічних квадратів до 35 порядку. Разом з тим становить інтерес створення решіток більшого розміру. Для цього можна використовувати складені магічні квадрати [203], які дозволять з використанням запропонованого підходу синтезувати антенні решітки великих розмірів.

Як приклад на рис. 4.6 представлена антенна решітка третього рівня вкладення, які побудовані на основі "магічного" квадрата четвертого порядку з різними параметрами повороту першого другого і третього шарів вкладених матриць. Там же червоним кольором показані додаткові елементи, які дозволяють домогтися повного

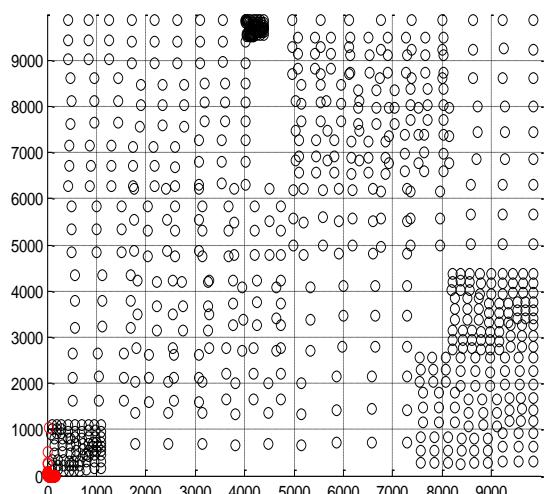
покриття частот. Слід зазначити істотно нерівномірну щільність розміщення елементів вздовж антенної решітки.



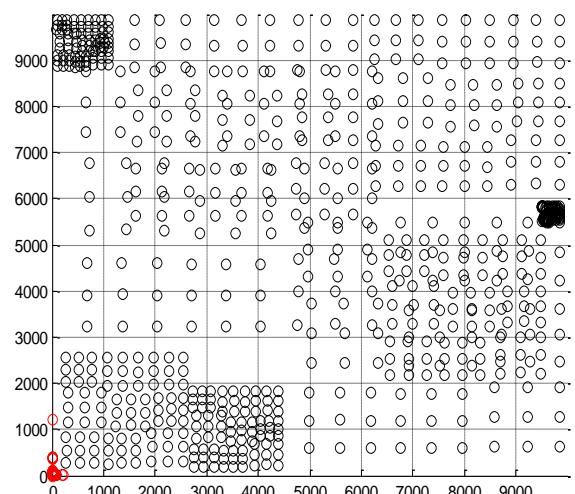
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.6 АР третього рівня вкладення на основі "магічного" квадрата Кхаджурахо: (а) - вихідна АР на основі "магічного" квадрата; (Б) - АР з поверненим на 90° другим шаром і з поверненим на 180° третім шаром; (В) - АР з поверненим на 90° першим шаром; (Г) - АР з поверненим на 90° першим і другим шаром.

Алгоритм доповнення елементів решітки, сформованої елементами магічного квадрата додатковими елементами для забезпечення повного покриття частот АР,

може бути так само ефективно використаний і для побудови АР на основі складеного квадрата [184-187].

Порівнямо параметри антенних решіток, побудованих на основі деяких відомих «магічних» квадратів 3-го, 4-го, 5-го порядків з антенними решітками на основі циклічних різницевих множин. На рис.4.7 вказані параметри координатних матриць порівнюваних АР.

(0,1)	(0,12)	(1,2)	(1,11)
(2,0)	(3,4)	(3,9)	(5,0)
(6,0)	(7,5)	(7,8)	(10,6)
(10,7)	(11,0)	(15,3)	(15,10)

а)

(0,0)	(0,3)	(0,4)	(0,7)
(4,0)	(4,3)	(4,4)	(4,9)
(5,0)	(5,3)	(5,4)	(5,9)
(6,0)	(6,3)	(6,4)	(6,9)
(13,0)	(13,3)	(13,4)	(13,9)

б)

(67,67)	(68,1)	(111,43)	
(13,80)	(50,38)	(111,104)	
(31,111)	(104,111)	(111,111)	

в)

(7,7)	(19,12)	(20,1)	(34,14)
(2,9)	(15,25)	(23,9)	(34,25)
(16,25)	(19,28)	(29,19)	(34,30)
(9,34)	(15,34)	(30,34)	(34,34)

г)

(3,3)	(64,61)	(83,19)	(120,37)
(43,46)	(74,92)	(79,24)	(120,78)
(7,53)	(18,103)	(91,97)	(120,107)
(67,120)	(84,120)	(107,120)	(120,120)

д)

(16,16)	(19,3)	(21,2)	(34,13)
(5,21)	(15,13)	(26,13)	(34,21)
(9,30)	(15,19)	(22,20)	(34,33)
(4,34)	(19,34)	(33,34)	(34,34)

е)

(1,1)	(16,15)	(40,24)	(48,8)	(65,17)
(9,10)	(27,33)	(29,26)	(40,19)	(65,42)
(12,22)	(33,54)	(43,36)	(62,38)	(65,45)
(20,42)	(24,58)	(37,49)	(59,60)	(65,51)
(23,65)	(30,65)	(46,65)	(51,65)	(65,65)

ж)

Рисунок 4.7 Матриці координат елементів АР: $Z_{ЦРМ16}$ – на основі ЦРМ з кількістю елементів 16 [197] ($v = 15 \times 12$) – (а), $Z_{ЦРМ20}$ – на основі ЦРМ з кількістю елементів 20 [197] ($v = 13 \times 9$) – (б), $Z_{Дью3}$ – на основі "магічного" квадрата Дьюдени 3-го порядку – (в), $Z_{Кх4}$ – на основі "магічного" квадрата Кхаджурахо 4-го порядку – (г), $Z_{Дж4}$ – на основі "магічного" квадрата Джонсона 4-го порядку – (д), $Z_{Дор4}$ – на основі "магічного" квадрата Дюрера 4-го порядку – (е), $Z_{Пан5}$ – на основі пандіагонального "магічного" квадрата 5-го порядку – (ж).

У табл. 4.5 представлена характеристики антенних решіток побудованих на підставі зазначених матриць координат. Індексом «+» відзначенні параметри АР на основі вихідних матриць координат з додаванням елементів для повного покриття просторових частот, індексом «*» – на основі сполучених матриць.

Порівняльний аналіз параметрів різних АР

	$\Delta w_{0.707}$ (Рад)	m	α	β
Z_{IIPM16}	0.3739	0.2396	0.0889	1.1926
Z_{IIPM20}	0.4225	0.2029	0.1709	1.8490
$Z_{IIPM20+}$	0.3726	0.1926	0.1966	2.1264
Z_{IIPM20}^*	0.2444	0.1423	0.3419	3.6980
$Z_{IIPM20+}^*$	0.2297	0.1360	0.3761	4.0678
$Z_{Д\circ\circ 3}$	0.2235	0.3601	0.00073	0.0811
$Z_{Д\circ\circ 3+}$	0.1002	0.1942	0.0028	0.3153
$Z_{Д\circ\circ 3}^*$	0.1025	0.2577	0.0015	0.1622
$Z_{Д\circ\circ 3+}^*$	0.0638	0.1510	0.0044	0.4865
Z_{Kx4}	0.1572	0.2525	0.0138	0.4706
Z_{Kx4+}	0.1958	0.2465	0.0173	0.5882
Z_{Kx4}^*	0.1473	0.1792	0.0277	0.9412
Z_{Kx4+}^*	0.1524	0.1870	0.0294	1.0000
$Z_{Дж4}$	0.1109	0.2643	0.0011	0.1333
$Z_{Дж4+}$	0.0731	0.2022	0.0023	0.2750
$Z_{Дж4}^*$	0.0728	0.1905	0.0022	0.2667
$Z_{Дж4+}^*$	0.0602	0.1552	0.0033	0.4000
$Z_{Дор4}$	0.1563	0.2617	0.0138	0.4706
$Z_{Дор4+}$	0.1467	0.2300	0.0173	0.5882
$Z_{Дор4}^*$	0.1464	0.1847	0.0277	0.9412
$Z_{Дор4+}^*$	0.1465	0.1778	0.0294	1
$Z_{Пан5}$	0.1723	0.2032	0.0059	0.3846
$Z_{Пан5+}$	0.1345	0.2023	0.0069	0.4462
$Z_{Пан5}^*$	0.0936	0.1546	0.0118	0.7692
$Z_{Пан5+}^*$	0.0905	0.1506	0.0123	0.800

З табл. 4.5 видно що:

- АР на основі ЦРМ з матрицею координат сполученої до вихідної $Z_{ЦРМ20}^*$ мають значно меншу ширину головного і нижчий рівень бічних пелюстків ДС, хоча при цьому значно вище надмірність АР. Додавання додаткових елементів ($Z_{ЦРМ20+}$ і $Z_{ЦРМ20+}^*$) дозволяє домогтися повного покриття просторових частот, а також зменшувати ширину головного пелюстка та рівень бічних;

- використання "магічних" квадратів для синтезу АР загалом забезпечує найкращі характеристики ніж використання ЦРМ. Причому використання пов'язаних матриць координат дозволяє звузити ширину головного пелюстка та зменшити рівень бічних пелюсток у порівнянні з вихідними матрицями, хоча при цьому збільшується надмірність АР (порівняємо, наприклад, з $Z_{Дью3}$ і $Z_{Дью3}^*$);

- застосування запропонованого вище алгоритму для забезпечення повного покриття просторових частот призводить до незначного звуження головного та зменшення бічних пелюсток ДН, а також збільшує надмірність АР;

- серед представлених АР на основі "магічних" квадратів найгірші характеристики вийшли у АР на основі квадрата Кхаджурахо 4-го порядку (див. Z_{Kx4} , Z_{Kx4}^* , Z_{Kx4+}^*). При цьому найменша ширина головного пелюстка і рівень бічних серед АР на основі "магічних" квадратів 4-го порядку забезпечені в АР на основі квадрата Джонсона ($Z_{Дж4+}^*$). Це, очевидно, обумовлено тим, що квадрати Джонсона і Дьюдені не є нормальними, а складені з простих чисел. Через це вони дозволяють при малій щільноті елементів покривати досить великі області просторових частот.

4.4 Елементи вимірювальних комплексів активно-пасивного дистанційного зондування довкілля КХ діапазону

При розв'язанні задачі оптимізації антенних систем декаметрового діапазону поряд з мінімізацією загальної кількості елементів антенних решіток, необхідно

створення малогабаритних антенних пристрійв, що мають задовільні електричні параметри. Для розв'язання цієї задачі необхідно як експериментальне та теоретичне дослідження електричних характеристик малогабаритних антен, так і дослідження якісно нових методів розробки антен малих розмірів.

Перспективним напрямом вдосконалення існуючих і створення нових нетрадиційних антен є використання уповільнених електромагнітних хвиль [205]. Уповільнення електромагнітних хвиль супроводжується пропорційним величині уповільнення збільшенням ефективності взаємодії хвилі з середовищем. Уповільнені електромагнітні хвилі часто називають поверхневими хвилями, маючи на увазі поверхневий характер їх розподілу. Конкретні системи, які уповільнюють, вимагають використання відповідних моделей. В якості уповільнюючої структури, яка знижує фазову швидкість хвилі, що збуджується в антенній структурі, розглянемо спіральний вібратор, який може бути представлений набором рамок і прямолінійних відрізків по яких тече струм [206], рис. 4.8.

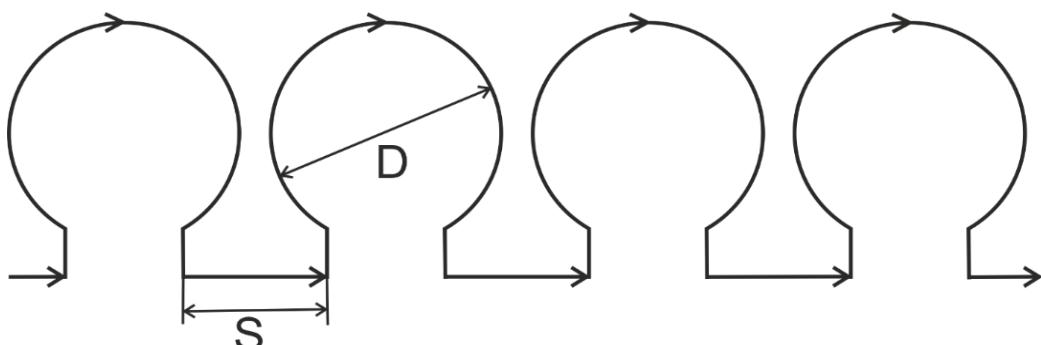


Рисунок 4.8 Еквівалентна схема спірального вібратора у вигляді круглих пласких рамок і електричних диполів.

Кожен із витків спіралі через малі його розміри може бути представлений у вигляді суми плаского витка, де D його діаметр та аксіального лінійного відрізка довжиною S , що дорівнює відстані між витками, як показано на рис.4.8.

Поле випромінювання такого провідника в нормальніх до осі напрямках, тобто при $\theta = 90^\circ$, має тільки одну складову електричного вектора E_θ , рівну

$$E_\theta = -j \frac{30\kappa I_0 S}{r} e^{-jkr}. \quad (4.14)$$

Плаский виток створює поле, що має одну складову E_ϕ , рівну

$$E_\phi = \frac{60I_0 \pi}{r^2} (ka)^2 e^{-jkr}, \quad (4.15)$$

де I_0 – амплітуда струму, k – хвильовий коефіцієнт, $a = \frac{D}{2}$ – радіус спіралі;

$$\left| \frac{E_\phi}{E_\theta} \right| = \frac{\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2}{\left(\frac{2S}{\lambda} \right)}. \quad (4.16)$$

Співвідношення (4.16) визначається електричними розмірами S/λ та D/λ спіралі і характеризує еліптичність поля, яке випромінюється в далекій зоні.

При $L \ll \lambda$, де L і λ – довжина витка спіралі і довжина хвилі, антена працює в режимі поперечного випромінювання. У цьому режимі струми в діаметрально протилежних точках витка мають в просторі протилежний напрямок, опір випромінювання витка буде дуже малим (рамковий ефект). Для багатовиткової спіралі при $\frac{\tilde{n}L}{\lambda} < 1$, де \tilde{n} – число витків, випромінювання уздовж осі спіралі дорівнює нулю, максимум випромінювання кожного витка і всієї антени виходить в поперечній площині спіралі, в антені встановлюється режим стоячої хвилі. З аналізу залежностей (4.14) - (4.16) випливає, що уздовж спіральної структури антени, яка працює в режимі поперечного випромінювання, відбувається уповільнення електромагнітної хвилі на поверхні вібратора, яке залежить від діаметра і кроку спіралі, а так само від робочої довжини хвилі, що свідчить про наявність дисперсії в спіральній структурі антени. На рис. 4.9 та рис. 4.10 представлені результати експериментальних досліджень вхідного імпедансу та розподілу поверхневого струму симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей з діаметром і кроком, малими в порівнянні з довжиною вібратора.

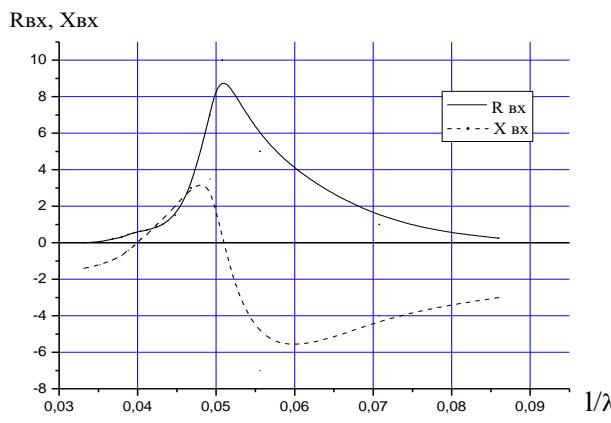


Рисунок 4.9 Активна і реактивна складові вхідного імпедансу вібратора.

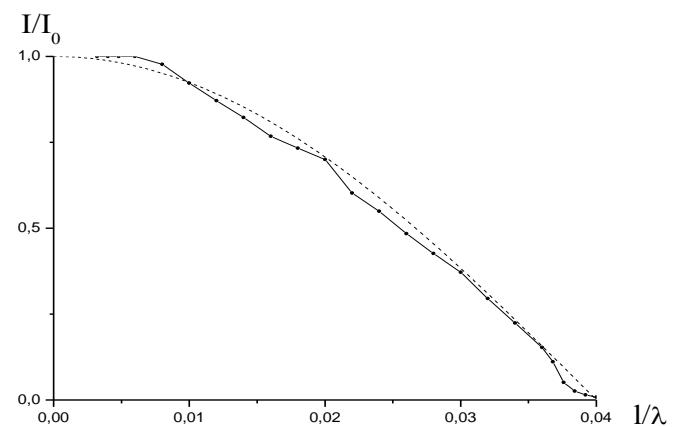


Рисунок 4.10 Розподіл струму уздовж плеча спірального вібратора при першому резонансі.

На рис. 4.9 видно, що перший резонанс (послідовний) має місце при $0,04 \text{ } l/\lambda$; при $0,051 \text{ } l/\lambda$ спостерігається другий резонанс (паралельний) зі значним зростанням активного опору. На рис. 4.10 представлено розподіл поверхневого струму уздовж плеча спірального вібратора при першому послідовному резонансі, який по формі близький до синусоїdalного та відповідає розподілу струму півхвильового симетричного вібратора. При цьому вимірюй коефіцієнт уповільнення хвилі склав величину 6,25. З виразу для величини уповільнення, наведено в роботі [207],

$$\frac{c}{v} = \sqrt{1 + 20(ND)^{2.5} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{0.5}} \quad (4.17),$$

де: c – швидкість світла, v – фазова швидкість хвилі уздовж вібратора, N – кількість витків на одиницю довжини, D – діаметр витка, λ – довжина хвилі при резонансі, отримуємо значення коефіцієнта уповільнення $c/v = 5,3$.

На рис. 4.11 показана залежність уповільнення електромагнітної хвилі на поверхні вібратора від співвідношення діаметра D спіралі і довжини l плеча вібратора,

збільшення відносини D/l від 0,01 до 0,3, призводить до зростання коефіцієнта уповільнення від 3,7 до 8,2.

На рис. 4.12 представлена вимірювана залежність добротності спірального вібратора від його електричної довжини (крива 2) і добротності прямолінійного вібратора з довжиною плеча 1 м. (крива 1). З огляду на те, що омічні втрати спірального вібратора порівняно невеликі (-0,1 Ома), спіральний вібратор виявляється більш широкосмуговим і зручним для узгодження з навантаженням.

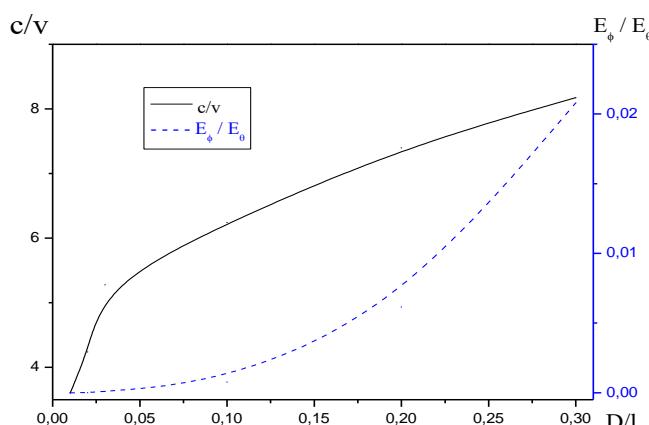


Рисунок 4.11 Залежність уповільнення хвилі на поверхні спірального вібратора і відносної напруженості електричного поля ортогональної компоненти від відносини D/l .

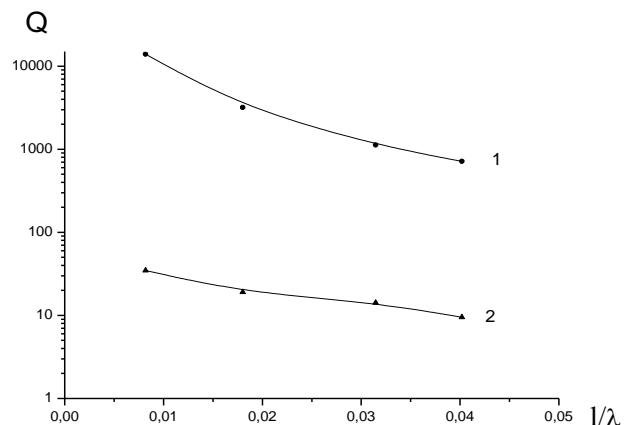


Рисунок 4.12 Залежність добротності лінійного тонкого (крива-1) і спірального симетричного вібратора (крива-2) від відносини l/λ .

З огляду на невеликі габарити даного вібратора і відсутність недоліків несиметричних антен, які потребують хорошого заземлення, що практично не здійснюється при використанні їх в мобільних радіокомплексах на основі уповільнюючої випромінюючої структури у вигляді спірального напівхвильового симетричного вібратора, працюючого в режимі поперечного випромінювання, запропоновано відбивач-калібратор для зовнішньої калібрування РЛС і імітації ЕПР рухомі радіолокаційні цілі [190].

За своєю будовою відбивач-калібратор є звичайною дротяною антеною, що працює в режимі відбивання сигналів. Зазначений режим досягається коротким замиканням антени в точці підключення фідера. При падінні хвилі на такий відбивач в ньому наводиться електрорушійна сила, під дією якої протікає струм, що створює вторинне, розсіяне поле. У загальному випадку ЕПР об'єкта, що розсіює поле ЕМ хвилі, описується формулою (4.18) [208]:

$$\sigma = 4\pi R^2 \left(\frac{E_s}{E_i} \right), \quad (4.18)$$

де R – відстань від об'єкта, що розсіює до точки спостереження, E_s – амплітуда розсіяного поля в точці спостереження, E_i – амплітуда поля опромінюючої хвилі в точці розташування антени, що розсіює.

В антені, виготовленій з ідеального провідника, вся прийнята енергія відбивається, створюючи розсіяне поле.

Якщо хвиля падає на диполь під кутом θ , поляризація падаючої хвилі та вібратора збігаються, електрична довжина вібратора l дорівнює $\lambda/2$, то значення його ЕПР визначається формулою (41.9):

$$\sigma = 0,86\lambda^2 \cos^4 \theta \quad (4.19)$$

Якщо кут $\theta = 0$, то ЕПР буде максимальним і для декаметрового діапазону ($\lambda = 10 \dots 100$ м) становитиме від 86 до 8600 м². Для антени з імпедансом Z_a , яка навантажена на імпеданс Z_l ЕПР можна оцінити, використовуючи формулу (4.20) [209]:

$$\sigma \approx \frac{4AGR_a^2}{|Z_a+Z_l|}, \quad (4.20)$$

де значення апертури $A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$, G – коефіцієнт посилення антени, $R_a = Re(Z_a)$.

Виходячи з формули (4.20) Якщо антена не навантажена зовсім (режим ХХ), то ЕПР

дорівнюватиме 0 і розсіювання буде відсутнє. Для півхвильового резонансного вібратора якщо розімкнути його плечі, відбивати будуть 2 чвертьхвильових вібратора, і їх ЕПР на 22 ... 25dB нижче напівхвильового, а з огляду на те, що їх два і вони синфазні, то рівень буде приблизно на 16dB нижче, ніж у короткозамкненого [209].

Залежність ЕПР антени від навантаження можна використовувати для модуляції розсіяного сигналу по амплітуді [210, 211]. Комутація входу відбивача призводить до появи детермінованих складових в спектрі сигналу, що дозволяє імітувати ЕПР радіолокаційної цілі, що рухається.

Конструктивно вібратор складається з діелектричного циліндра діаметром 5 см., на якому розміщено два плеча вібратора у вигляді спіралей з кроком 1 см. У центрі вібратора встановлено блок комутації [190].

Найпростіша схема модулятора є діодною ключовою схемою з включенням діода на вході антени. Ключова схема управляється модулюючим імпульсним сигналом з частотою повторення, що відповідає допплерівській частоті рухомої цілі.

На рис. 4.13 представлена структурна схема допплерівського відбивача. Він складається з генератора прямокутних імпульсів який перебудовується, схеми управління діодним перемикачем і симетруючого пристрою, підключенного до входу спірального напівхвильового симетричного вібратора, що працює в режимі поперечного випромінювання.

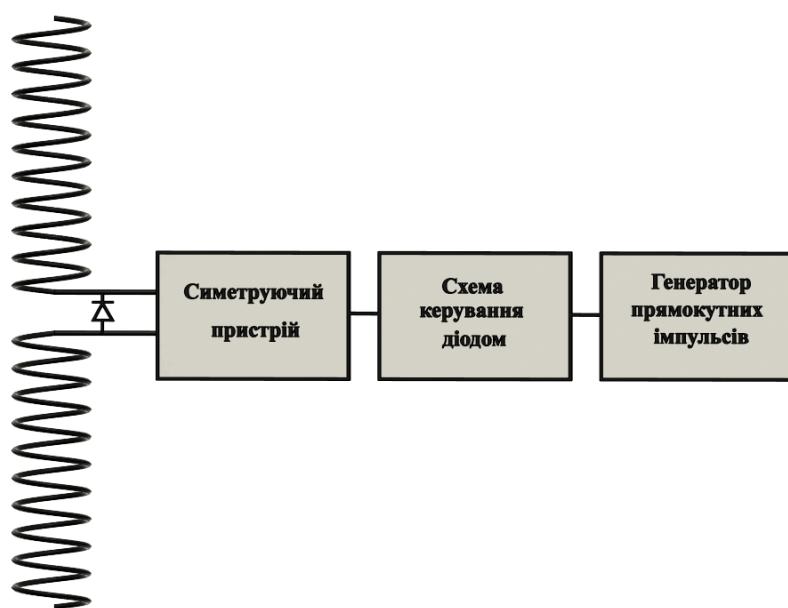


Рисунок 4.13 Структурна схема активного допплерівського калібратора.

Періодичне відмикання та замикання діода на вході антени призводить до амплітудної модуляції розсіяного сигналу з двома боковими лініями в спектрі, що відповідають спектру модулюючого сигналу. При модуляції відбитого сигналу відповідачем імпульсною послідовністю типу «меандр» спектр відбитого сигналу містить зсунені відносно несучої в обидві сторони непарні, кратні частоті повторення модулюючого сигналу спектральні лінії, які імітують цілі, які наближаються і віддаляються з різною швидкістю та ЕПР. Великий коефіцієнт уповільнення поверхневої хвилі спірального вібратора створює перший резонанс на частоті 10 МГц., що відповідає електричній довжині вібратора на цій частоті 15 м, у той час як геометрична довжина вібратора становить лише 1,8 м.

Висновки до розділу 4

Розв'язуючи задачу оптимізації антенних систем, що особливо актуально при створенні антенних систем декаметрового діапазону, була розроблена методика синтезу нееквідistantних антенних решіток, заснована на використанні властивостей магічних квадратів. Досліджено властивості одержуваних при цьому антенних решіток. Показано, що при розміщенні джерел решітки, використовуючи значення елементів «магічних» квадратів, вдається отримати при малих коефіцієнтах заповнення до 0,01 і надмірності менше ніж 0,5 з додатковими елементами повне покриття просторових частот в області розміщення елементів.

Встановлено, що доповнення апертури антени, синтезованої на основі «магічного» квадрата, елементами, отриманими шляхом інверсії по модулю «магічної» константи, дозволяє істотно знизити рівень бічних пелюстків і поліпшити покриття просторових частот.

Показано, що синтез великих АР можливий з використанням вкладення декількох магічних квадратів. Алгоритм доповнення елементів решітки, сформованої елементами магічного квадрата, додатковими елементами для забезпечення повного покриття частот АР може бути так само ефективно використаний і для побудови АР

на основі складеного квадрата. Використовуючи взаємні повороти окремих шарів, що входять в решітку, яка синтезується, можна істотно поліпшити її характеристики.

Експериментально показано, що симетричний спіральний вібратор з малими діаметром і шагом спіралі в порівнянні з довжиною хвилі є уповільнюючою структурою, в якій мають місце резонанси, коли вздовж вібратора укладається ціле число напівхвиль. Геометричні розміри такого вібратора можуть бути до 10 разів меншими, ніж у традиційного лінійного симетричного вібратора, при цьому відрізняючись ширшою смugoю робочих частот.

Запропоновано відбивач-калібратор, створений на основі уповільнюючої структури у вигляді спірального напівхвильового симетричного вібратора, працюючого в режимі поперечного випромінювання для зовнішньої калібрування РЛС і імітації ЕПР рухомі радіолокаційної цілі.

РОЗДІЛ 5

ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЇ UP(X) ТА МАТРИЦЬ КОРЕЛЯЦІЇ СПЕКТРАЛЬНИХ КОМПОНЕНТ ДО ОПИСУ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ТА СТАТИСТИЧНИХ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ДЕЯКИХ ВИДІВ НЕСТАЦІОНАРНИХ НЕГАУСОВИХ ПРОЦЕСІВ

У цьому розділі розглянуто можливість використання атомарних функцій (АФ) Кравченка - Рвачова для опису законів розподілу сигналів, відбитих від поверхні моря та сезонної зміни питомої ЕПР (ПЕРП) рослинного покриву, застосування апарату матриць кореляції спектральних компонент (МКСК) для опису статистичних взаємозв'язків різних спектральних компонент сигналу, розсіяного об'єктами, підстильними поверхнями та гідрометеорами. Експериментально вивчена кореляція спектральних компонент перешкод активно-пасивним системам декаметрового діапазону від випромінювань мовних станцій КХ діапазону.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [79, 167, 179, 212 - 217].

При створенні методів моніторингу навколошнього середовища доводиться стикатися з необхідністю аналізу широкого спектра нестаціонарних негаусових процесів, для яких стандартні методи опису, розроблені для квазістаціонарних гауссових процесів, виявляються слабо застосовні. Це спонукає шукати нові підходи до їх опису та аналізу.

На цей час поширення набуло опис процесів які мають різну фізичну природу за допомоги АФ Кравченка-Рвачева [218 - 223]. Моделі засновані на використанні АФ є більш фізичними ніж необмежені, наприклад функції Гауса.

Зараз АФ знаходять широке застосування в теорії апроксимації, чисельному аналізі, цифровій обробці сигналів, вейвлет-аналізі та інших областях [224, 225]. Добре апроксимуючі властивості функції $up(x)$ засновані на тому факті, що за допомогою лінійної комбінації зрушень-стиснень $up(x)$ можна представити алгебраїчний поліном будь-якого ступеня [226].

АФ $up(x)$ [226 - 230] є фінітною диференційованою функцією, її похідна може бути представлена двома функціями, кожна з яких є зрушеною та стислою копією вихідної функції з точністю до масштабного коефіцієнта

$$up'(x) = 2up(2x + 1) - 2up(2x - 1).$$

Функція $up(x)$ є парною, $up(x) = up(-x)$, $up(x) = 1 - up(x)$, максимум функції $up(x)$ сягає одиниці та має площину, що дорівнює одиниці.

Спектр функції $up(x)$ також є парною, дійсною функцією, яка швидко зменшується та має нулі в точках, які кратні 2π . Рівень першого бічного пелюстка дорівнює – 23,5 дБ.

Функція $up(x)$ може розглядатися як згортка нескінченного числа прямокутних імпульсів та може бути записана через Фур'є-перетворення характеристичної функції, яку для цього випадку можна записати через твір характеристичних функцій прямокутних імпульсів $p(\xi)$ [226, 230]:

$$up(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_R \prod_{j=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{t}{2^j}\right) \exp^{it\xi} dt \quad (5.1)$$

На рис. 5.1 показан розподіл густини вірогідності функції $up(\xi)$.

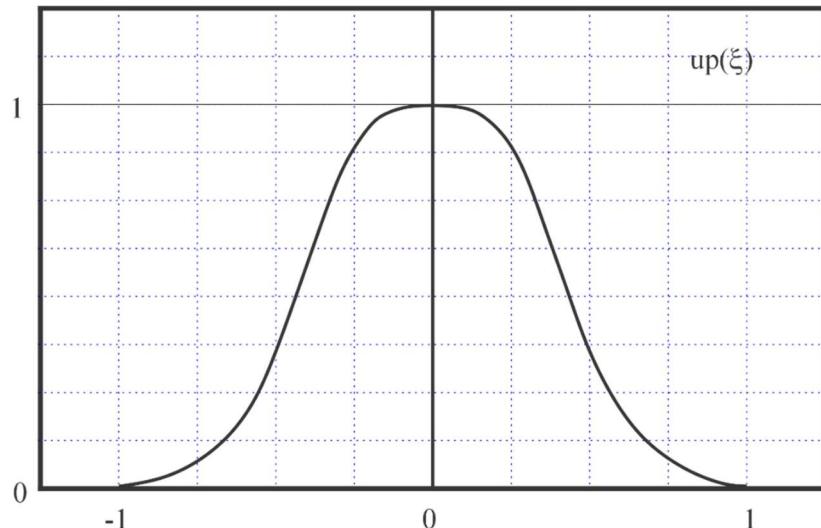


Рисунок 5.1 - Розподіл густини вірогідності функції $up(\xi)$

На основі атомарної функції $up(x)$ (5.1) обчислені значення параметрів функцій Кравченка-Рвачева.

5.1 Описи статистик розсіяного морем сигналу

При високій роздільній здатності по дальності та кутових координатах спостерігаються істотні відхилення законів розподілу флюктуацій від стандартних сигналів, відбитих від підстильних поверхонь та «ясного» неба [183]. Це обумовлено послідовним і роздільним спостереженням ділянок поверхні з відмінними статистичними властивостями нерівностей, які породжують нестационарність і негауссовість розсіяного сигналу. Для морської поверхні це ділянки, в яких знаходяться гребені морських хвиль, що характеризуються підвищеною відбивною здатністю. Для опису статистик відбитого морем сигналу в фазових станах сплеску-паузи використовувалися гауссові розподіли. Розглянемо можливість використання АФ Кравченка-Рвачова.

Для обробки використовувалися фотографічні зображення радіолокаційних відбиттів від морської поверхні, отримані з екрана імпульсно-когерентної РЛС з довжиною хвилі 2 см, із тривалістю випромінюваного імпульсу 0,4 мкс (роздільна здатність по відстані 60 м.), який працює в режимі секторного огляду простору (рис. 5.2 (а, б) та рис. 5.3 (а, б)) [216]. На радіолокаційних зображеннях простежується періодичність, пов'язана з періодом морських хвиль і напрямком опромінення. На рис. 5.2 (в, г, д, е) та рис. 5.3 (в, г, д, е) цифрою (1) позначені густини розподілу експериментальних значень, та цифрою (2) їх апроксимації функціями Кравченка-Рвачова та Гаусса. Характер поведінки густини розподілу радіолокаційного зображення морської поверхні для зони інтенсивного відбиття є бімодальним. Перший максимум відповідає зонам слабкого відбиття, другий – сильного (гребені морських хвиль).

На великих відстанях рис. 5.3 різниця максимальних значень густини розподілу для рівнів «чорного» і «білого» стає настільки великою, що фактично видно тільки один максимум - рівень чорного.

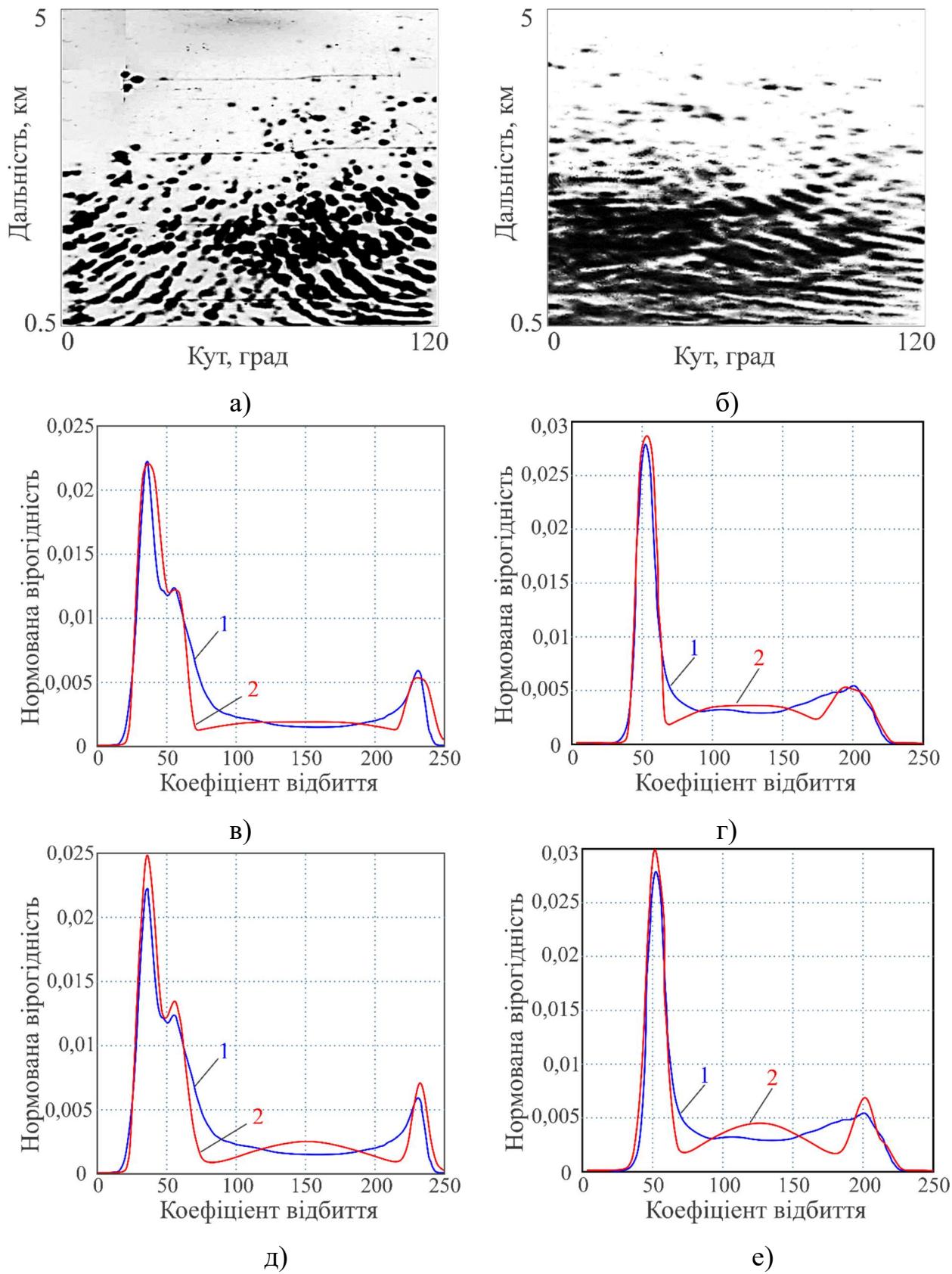


Рисунок 5.2 - Радіолокаційні зображення (а, б) морської поверхні на відстанях 0,5 ... 5 км, в секторі сканування 120 град., довжина хвилі РЛС 2 см, хвильованні моря 6 балів; густини розподілу значень і їх апроксимація функціями Кравченка-Рвачова (в, г) і Гаусса (д, е): а, в, д - 1 скан; б, г, е - 4 скана

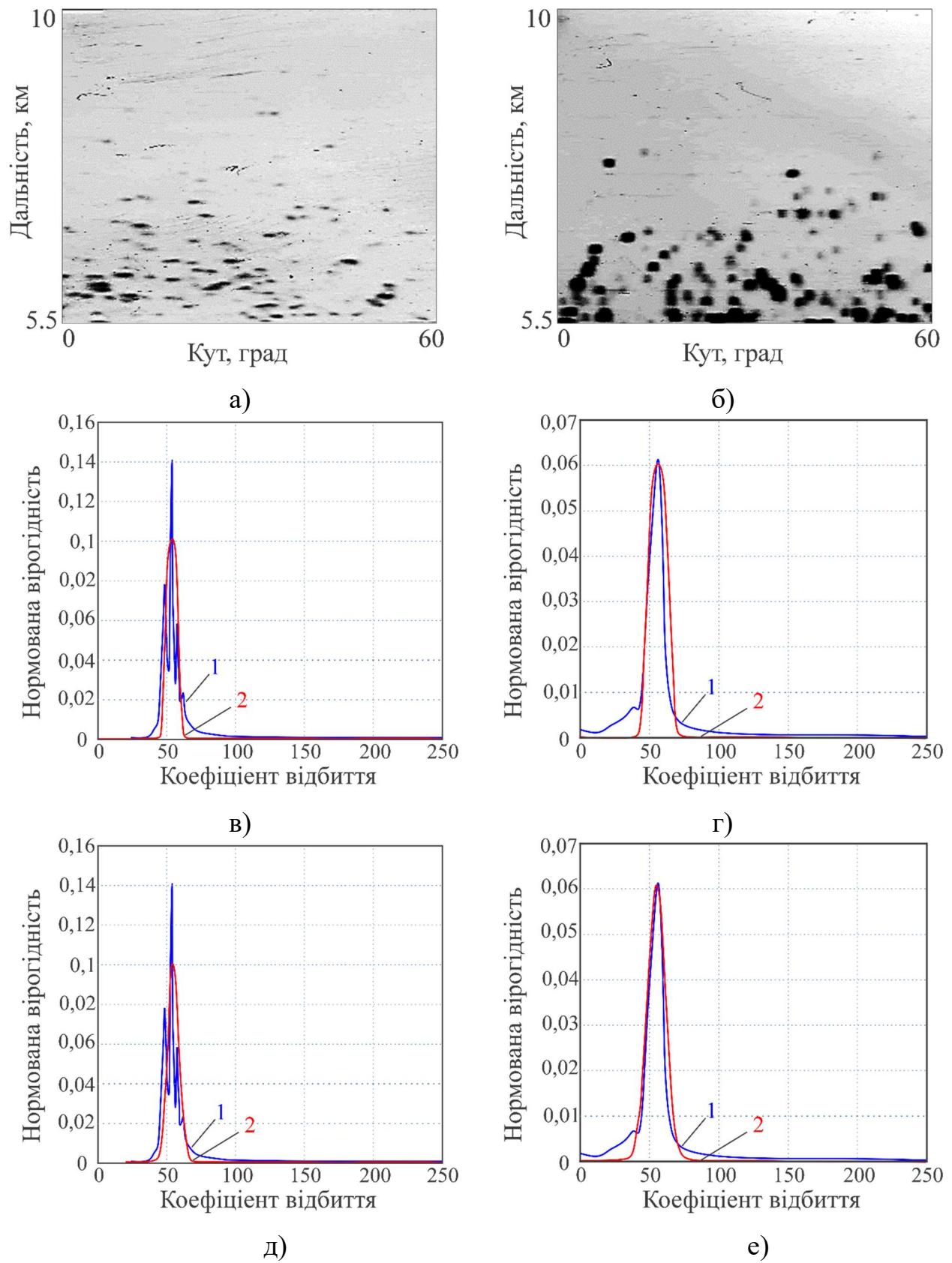


Рисунок 5.3 - Радіолокаційні зображення (а, б) морської поверхні на відстанях 5,5 ... 10 км., в секторі 60 град., довжина хвилі РЛС 2 см., хвилювання моря 6 балів, густини розподілу значень і їх апроксимація функціями Кравченка-Рвачова (в, г) і Гаусса (д, е): а, в, д – 2 скана, б, г, е - 4 скана

Апроксимація експериментально отриманих густин розподілу здійснювалася функціоналами виду:

$$p(I) = \sum_{k=1}^{k_0} p_k \phi_k(I), \quad (5.2)$$

де p_k – фінальні ймовірності кожного з k – фазових станів, причому, в загальному випадку $k \in (1, 2, 3)$, де $k = 1$ – рівень чорного, $k = 2$ – рівень сірого, $k = 3$ - рівень білого. В якості апроксимуючих функціоналів використовувалися гаусові густини розподілу:

$$\phi_k(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(\frac{(I-I_k)^2}{\sigma_k^2}\right), \quad (5.3)$$

а також фінітні функції Кравченка-Рвачєва:

$$\phi_k(I) = \frac{1}{b_k} \text{up}\left(\frac{I-I_k}{b_k}\right) \quad (5.4)$$

Обчислення густини розподілу функції Кравченка-Рвачєва $\text{up}(x)$ може бути здійснено шляхом оберненого перетворення Фур'є від характеристичної функції, отриманої як добуток характеристичних функцій прямокутних імпульсів, або шляхом обчислення густини розподілу ряду, утвореного як сума ряду випадкових чисел з рівномірними законами розподілу [231]. Останній підхід і використовувався для отримання базової материнської функції $\text{up}(x)$. Отримана випадкова величина масштабувалася коефіцієнтами b_k і зміщувалася на I_k . Таким чином, формувалася величина I з густиною розподілу $\phi_k(I)$, яка і використовувалися для апроксимації експериментальних даних. Апроксимація здійснювалася як експериментально отриманих густин розподілу, так і інтегральних функцій розподілу за критерієм мінімізації дисперсії похибки. Отримані при цьому похибки апроксимації для різних фрагментів радіолокаційних зображень моря показані в табл.5.2.

Таблиця 5.2

Дисперсії похибки апроксимації експериментальних густин і функцій розподілу функціями Гауса і Кравченка-Рвачова [216].

густина розподілу		функція розподілу	
Функції Кравченка - Рвачова	Гаусові функції	Функції Кравченка - Рвачова	Гаусові функції
$2.3 \cdot 10^{-6}$	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$6.36 \cdot 10^{-4}$	$7.04 \cdot 10^{-4}$
$1.46 \cdot 10^{-6}$	$1.86 \cdot 10^{-6}$	$8.07 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
$1.34 \cdot 10^{-4}$	$9.96 \cdot 10^{-5}$	$1.35 \cdot 10^{-2}$	$1.16 \cdot 10^{-2}$
$1.05 \cdot 10^{-5}$	$8.03 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
$1.61 \cdot 10^{-6}$	$2.06 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$7.42 \cdot 10^{-4}$
$8.63 \cdot 10^{-5}$	$6.36 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$9.07 \cdot 10^{-4}$
$2.32 \cdot 10^{-5}$	$2.32 \cdot 10^{-5}$	$4.59 \cdot 10^{-4}$	$5.60 \cdot 10^{-4}$
$3.98 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$8.73 \cdot 10^{-4}$
$8.91 \cdot 10^{-6}$	$1.47 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$5.49 \cdot 10^{-4}$
$4.97 \cdot 10^{-6}$	$3.69 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$7.34 \cdot 10^{-4}$
$2.04 \cdot 10^{-6}$	$2.003 \cdot 10^{-6}$	$4.68 \cdot 10^{-4}$	$8.31 \cdot 10^{-4}$
$1.86 \cdot 10^{-5}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$

З порівняння дисперсії похибок апроксимації експериментальних густин і функцій розподілу функціями Гауса та Кравченка-Рвачова (табл. 5.2) видно, що обидві апроксимації дають приблизно однакові результати. Однак приблизно в одній третині випадків для густини розподілу і половини випадків для інтегральної функції розподілу радіолокаційних зображень морської поверхні атомарні функції Кравченка-Рвачова дають кращі результати, ніж стандартні функції Гауса (найменші похибки апроксимації виділені сірим).

5.2 Сезонна зміна ПЕПР розсіяного рослинними покривами сигналу

При виявленні малорозмірних об'єктів на фоні відбиттів від підстильних поверхонь велике значення має величина та статистичні характеристики ПЕПР цих поверхонь. Визначення ПЕПР є достатньо об'ємним та складним завданням. ПЕПР підстильних поверхонь, які покриті рослинністю залежить від обсягу біомаси, вмісту вологи, яка визначається типом рослинності, фазою вегетації та сезонними змінами, а також від довжини хвилі та поляризації відбитого випромінювання [232].

Процеси наростання біомаси рослинних покривів мають сезонний характер і обумовлені багатьма процесами, наприклад, зміною вологості і потоку тепла [233]. Зі зміною кількості біомаси пов'язано і зміна відбивних властивостей рослинних покривів. Так, якщо ПЕПР листяних лісів і ділянок місцевості, покритих трав'яним покровом, представити у вигляді двох компонент, одна з яких дає значення ПЕПР в зимовий період σ_0 , а інша в сезон вегетації при наростанні біомаси то добавку ПЕПР, що отримується за рахунок цього можна записати [217]:

$$\Delta\sigma(t) = \Delta\sigma \frac{m(t)}{\max m(t)} = \Delta\sigma \operatorname{up}\left(\frac{t-t_0}{\alpha\Delta t_0} - 1\right), \quad (5.5)$$

де $m(t)$ – біомаса рослинності, t_0 та $\alpha\Delta t_0$ – час початку і тривалість циклу її вегетації, α - емпіричний коефіцієнт, $\Delta\sigma$ – приріст ПЕПР за рахунок наростання біомаси, зазвичай становить 5 ... 7 дБ [234].

Апроксимація експериментально отриманої динаміки місячного приросту зеленої фіто маси проводилася із використанням Функцій Гауса, Лоренца та Кравченка-Рвачова.

На рис. 5.3 в якості прикладу показано поведінку біомаси протягом сезонів 2002 – го (а) та 2003 – го (б) років [233] і їх апроксимація функціями Лоренца, Кравченка-Рвачова та Гауса.

Оскільки початок вегетації пов'язано з середніми температурами, то це дозволяє пов'язати сезонну зміну ПЕПР рослинних покривів з сезонною зміною температур і, в кінцевому рахунку, з циклами сонячної активності [232].

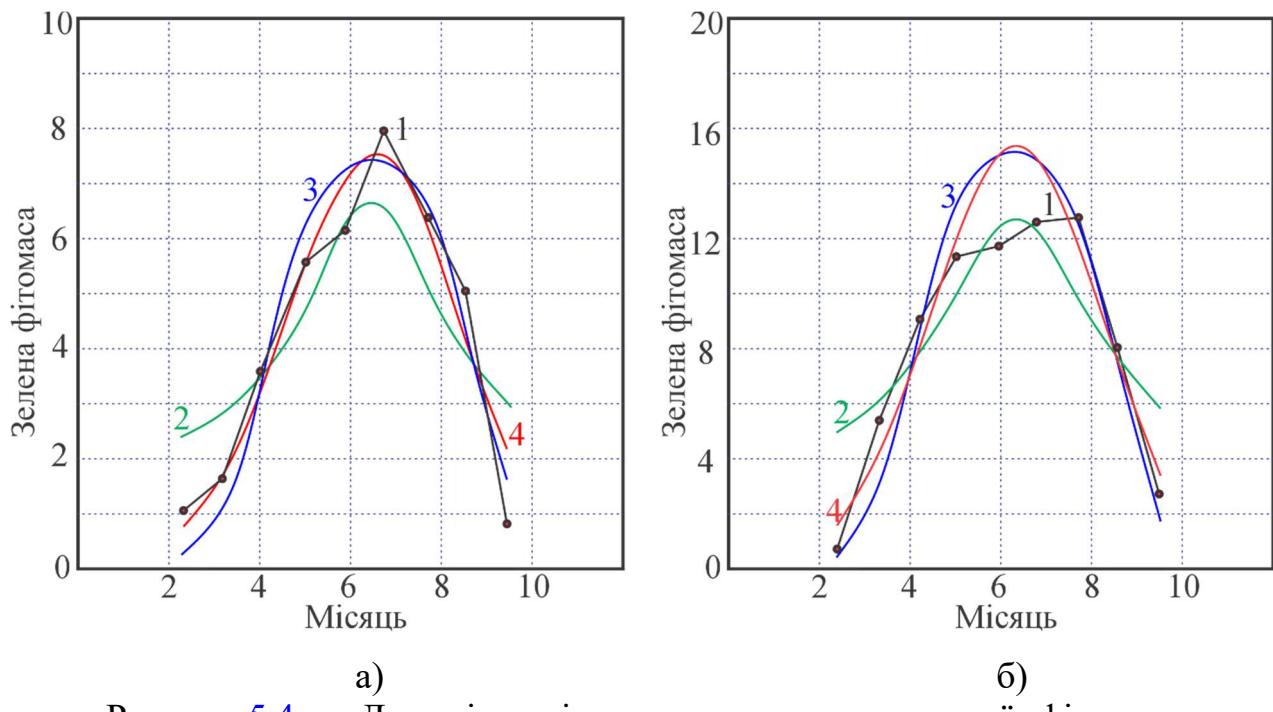


Рисунок 5.4 - Динаміка місячного приросту зеленої фіто маси за вегетаційний період 2002 (а) і 2003 (б) роки [233]. Експеримент 1 – біомаса; апроксимації функціями: 2 – Лоренца, 3 – Кравченка-Рвачова, 4 – Гаяса

У табл. 5.3 наведені результати апроксимації наростання біомаси за вегетаційний період 2002 та 2003 роки різними функціями: Лоренца, Кравченка-Рвачова та Гаяса [216].

Таблиця 5.3

Похибки апроксимації наростання біомаси різними функціями.

Рисунок		Кравченка	Гаусса	Лоренца
Рис. 5.4 (а)	$D_{\min} * 1000$	0.0052	0.0051	0.0169
	$D_o * 1000$	0.0092	0.0118	0.0215
Рис. 5.4 (б)	$D_{\min} * 1000$	0.0236	0.0246	0.0499
	$D_o * 1000$	0.0354	0.0458	0.0538

При цьому D_o – дисперсія похибки апроксимації, коли середнє і дисперсія бралися за експериментальними даними, а D_{\min} – при середньому значенні і дисперсії, що мінімізують дисперсію апроксимації.

З аналізу похибок апроксимації наростання біomasи різними функціями (табл. 5.3) видно, що в ряді випадків із використанням фінітних функцій Кравченка-Рвачова похибки є меншими, ніж із використання функцій Гауса і, тим більше – Лоренца (найменші похибки апроксимації виділені сірим).

5.3 Застосування матриць кореляції спектральних компонент (МКСК) для візуалізації статистичних зв'язків спектральних компонент при виявленні та розпізнаванні

При синтезі багатоканальних систем виявлення становить інтерес вивчення статистичних зв'язків між сигналами різних каналів. Для систем розпізнавання типів цілей важливо знання статистичних взаємозв'язків між різними спектральними компонентами сигналу [79, 167, 213].

Оскільки сигнали радіомовних станцій в активно-пасивних системах використовуються для підсвічування обстановки і є завадою для вторинних полів, розсіяних ціллю, то становить інтерес вивчення спектральних кореляційних зв'язків в синалах підсвічування. Вивчення статистичних взаємозв'язків компонентів сигналу, розсіяного від об'єктів і завад, відкриває можливості для створення багатоканальних систем виявлення і розпізнавання.

Нехай є сигнал $S(t)$, його спектральна густина на часовому сегменті тривалістю T визначається за допомоги віконного перетворення Фур'є:

$$\dot{S}(F, t) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} S(t) \exp^{-i2\pi F} dt. \quad (5.6)$$

Для вивчення міжспектральних кореляційних зв'язків у нестационарних сигналів S_1 та S_2 можна використовувати запропоновані в роботах [183, 213] МКСК:

$$\rho(F_i, F_j) = \frac{\langle S_1(F_i, t)S_2(F_j, t) \rangle - \langle S_1(F_i, t) \rangle \langle S_2(F_j, t) \rangle}{\sqrt{(\langle S_1^2(F_i, t) \rangle - \langle S_2(F_i, t)^2 \rangle)(\langle S_2^2(F_j, t) \rangle - \langle S_2(F_j, t)^2 \rangle)}}, \quad (5.7)$$

де $S(F_i, t), S(F_j, t), \rho(F_i, F_j)$ – модуль спектральної густини на F_i та F_j частотах в момент часу t і коефіцієнт їх взаємної кореляції відповідно.

При цьому в якості сигналів S_1 та S_2 можуть виступати відбиття від підстильних поверхонь, гідрометеорів та об'єктів на різних поляризація. Тоді $S_1 = S_H$, $S_2 = S_V$ де H та V належать до горизонтальної та вертикальної поляризації відповідно. Це дозволяє дослідити статистичні зв'язки між різними спектральними компонентами відбиттів на різних поляризаціях. Іноді важливо вивчити статистичні взаємозв'язки флюктуацій спектральної густини на різних частотах для одного нестационарного сигналу. Тоді $S_1 = S_2 = S$. Для вивчення МКСК були використані раніше отримані експериментально, за допомогою когерентних РЛС з імпульсним і безперервним випромінюванням, записи сигналу зворотного розсіювання від моря та об'єктів.

Відбиття від моря та дощу є перешкодами для систем радіолокації. Вивчення внутрішньо спектральних кореляційних зв'язків на ортогональних поляризаціях необхідно для синтезу систем виявлення і розпізнавання.

Поляризаційно-спектральна структура радіолокаційних відбиттів від моря може досліджуватися за допомогою матриць коефіцієнтів взаємної кореляції спектральних компонент (5.7).

Обчислена матриця коефіцієнтів кореляції $\rho(F_i, F_j)$ представляється графічно. Елементи матриці зображуються у вигляді кола, діаметр якого пропорційний коефіцієнту кореляції. На рис. 5.5 наведені такі матриці для відбиттів від моря отриманих за допомогою РЛС с довжиною хвилі 8 мм при

випромінюванні імпульсів 0,2 мкс на похилій 45° поляризації для хвилювання моря 5 ... 6 балів (рис. 5.5 (а)), а також слабкого (близько двох балів) хвилювання (рис. 5.5 (б)).

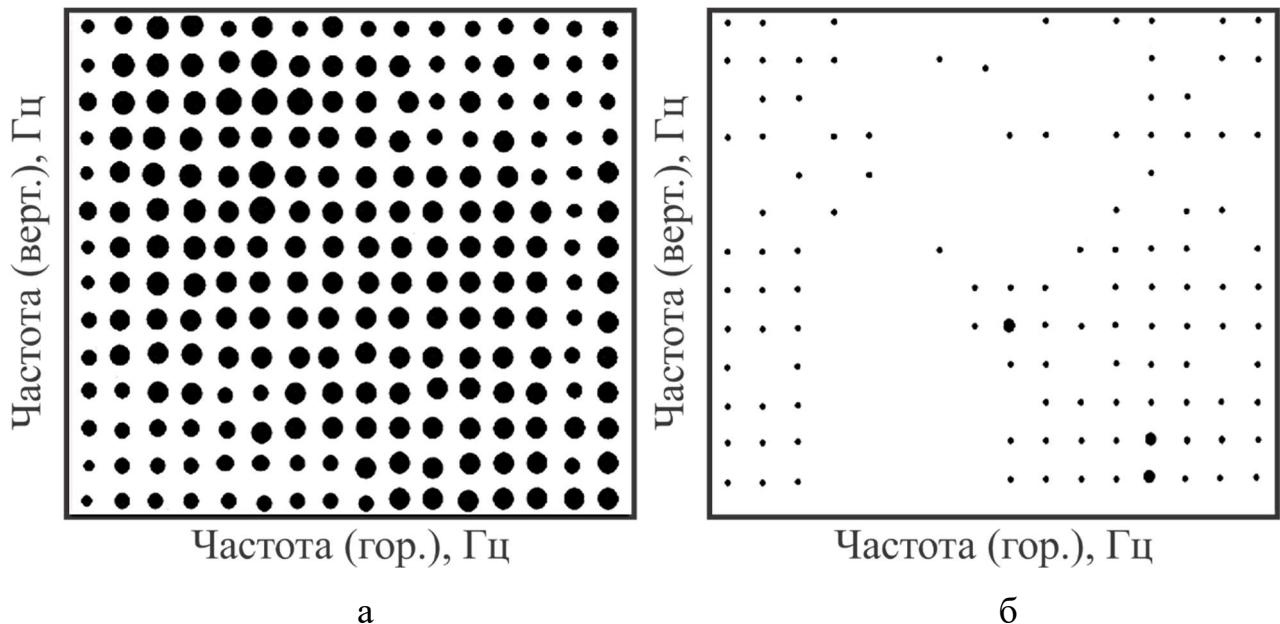


Рисунок 5.5 - МКСК відбиття на ортогональних поляризаціях від поверхні моря при хвилюванні 4 ... 5 балів (а) та 1 ... 2 бали (б); ● - 0,8; ● - 0,4

Вони розраховані за раніше отриманими експериментально даними відбиттів від моря.

Діапазон аналізу по частоті становив 500 Гц при роздільній здатності 32 Гц. Необхідно відзначити, що при сильному хвилюванні моря, матриці коефіцієнтів кореляції мають приблизно одинаковий вигляд при опроміненні поверхні сигналами, як при похилій, так і вертикальній поляризації.

Найбільшу величину мають діагональні елементи, тобто сильніше корельовані на ортогональних поляризаціях спектральні компоненти, що збігаються за частотою. При слабкому хвилюванні кореляція спектральних компонент на ортогональних поляризаціях практично відсутня (рис. 5.5 (б)). Для відбиттів від дощу і об'єктів характерна кореляція тільки співпадаючих спектральних компонент (діагональних елементів) (рис. 5.6 (а, б)).

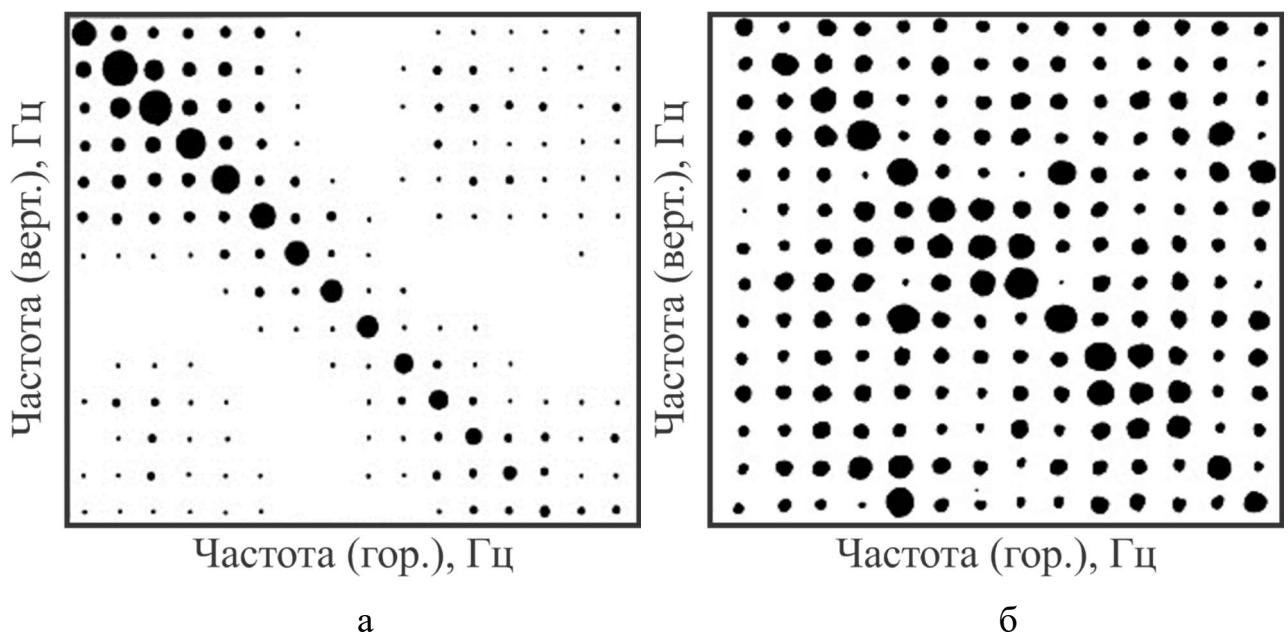


Рисунок 5.6 - МКСК відбиття на ортогональних поляризаціях дощу (а), корабля (б) • - 0,8;● - 0,4

Коефіцієнт кореляції для дощу може досягати 0,95, а для цілей (транспортних засобів, кораблів) значення трохи нижчі $\approx (0,5 \div 0,85)$. Характерний вигляд МКСК для об'єктів, дощу і морської поверхні може використовуватися при вирішенні задач виявлення і розпізнавання.

Вивчення внутрішньо спектральних кореляційних зв'язків завад від радіомовних станцій. Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент дозволили виявити наявність корельованої області в спектрі сигналів радіомовних станцій. На рис. 5.7 наведені спектри (а, в) і матриці коефіцієнтів кореляції (б, г) спектральних компонент $\rho(F_i, F_j)$ на частотах F_i, F_j для станції підсвічування з частотою 17490 кГц, що розташована на території Китаю на відстані 5350 км. Спектри (рис. 5.7 (а)) наведені, як в широкій смузі – верхні спектrogramами, так і вузькій на початковій ділянці – нижні спектrogramами. Величина коефіцієнта взаємної кореляції визначається яскравістю. Шкала яскравості приведена поруч з рисунком. В телеграфному режимі несуча була зміщена гетеродином приблизно на 40 Гц.

З вигляду матриць кореляції спектральних компонент (рис.5.7 (б, г)) видно, що найбільша кореляція спостерігається у діагональних елементів. При зміщенні від діагоналі коефіцієнт кореляції різко падає. Крім того, збільшення коефіцієнта підсилення приймача та поява в тракті нелінійних спотворень призводить до появи зон кореляції на гармоніках спектральних компонент інформаційного повідомлення.

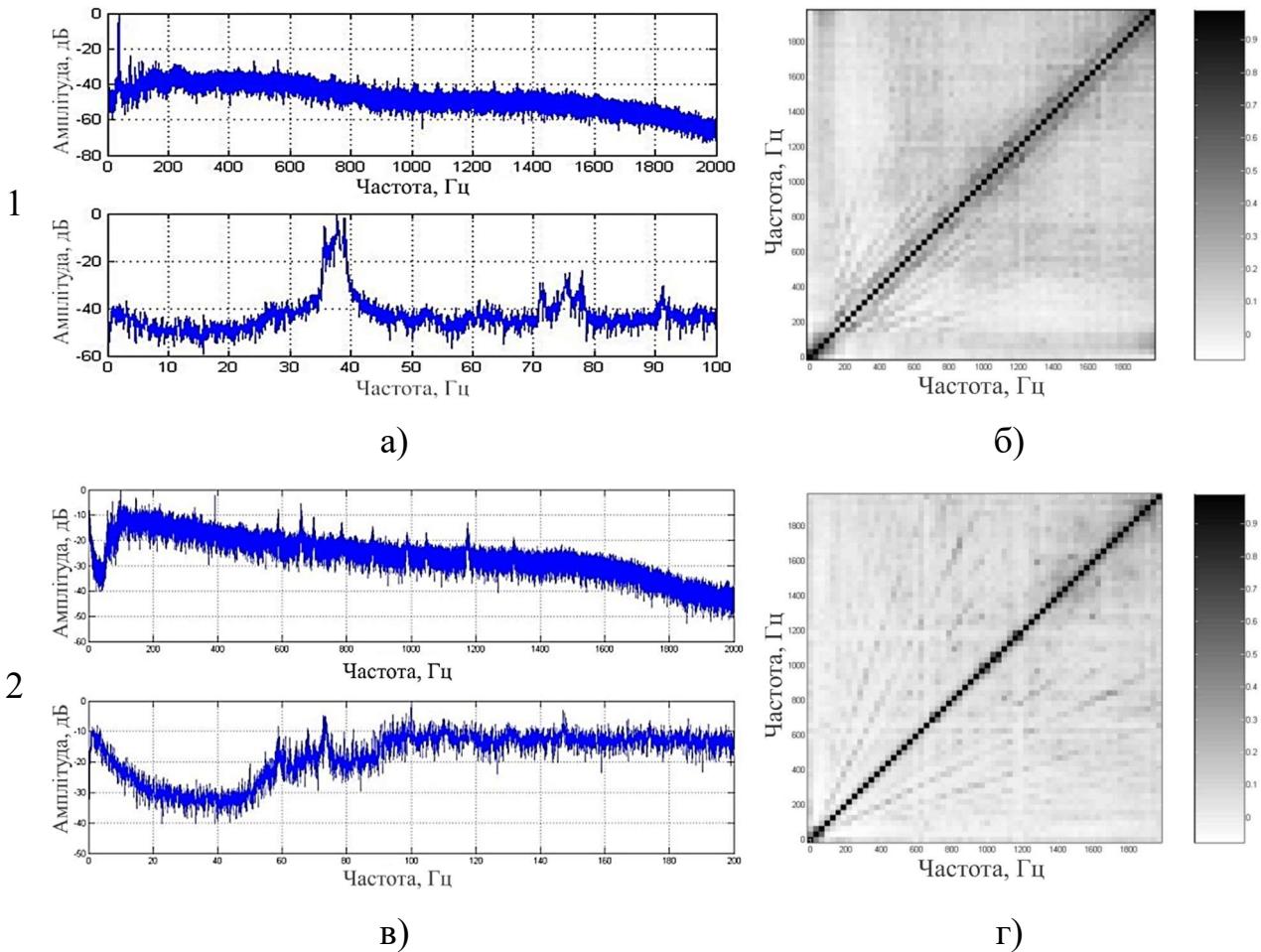


Рисунок 5.7 - Спектри (а, в) та матриці коефіцієнтів кореляції спектральних компонент (б, г) станції мовлення Kashi, China частота 17490 кГц. Потужність 500 кВт, відстань 5350 км. азимут підсвічування 95^0 , 1 – телеграфний та 2 – телефонний режим

Вони виглядають так само, як і зона основної кореляції, однак під кутами, залежними від номера гармоніки (рис.5.7 (г)). Це може використовуватися для діагностики наявності нелінійних спотворень в тракті передачі сигналу.

Висновки до розділу 5

Розглянуто можливість використання атомарних функцій Кравченка - Рвачова для опису законів розподілу сигналів, відбитих від поверхні моря та сезонної зміни питомої ЕПР (ПЕРП) рослинного покриву. Показано, що фінітність атомарних функцій Кравченка-Рвачова має фізичні передумови їхнього використання для процесів з декількома фазовими станами, де в середині кожного фазового стану як апроксимуючі функціонали використовуються гаусові густини розподілу. Аналіз похибок апроксимації експериментальних густин показав, що використання фінітних функцій Кравченка - Рвачова в більшості випадків дає кращі результати, ніж використання функцій Гауса, і тим більше – Лоренца.

Встановлено, що використання апарату матриць кореляції спектральних компонент дозволяє встановити синхронність появи в спектрах сигналів окремих спектральних компонентів і може використовуватися для створення спектрально-поляризаційних портретів розсіяних сигналів, які можуть знайти застосування при розв'язанні задач розпізнавання і синтезі багатоканальних систем виявлення.

Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент сигналів радіомовних станцій дозволили виявити наявність корельованої області в спектрах. Встановлено, що поява додаткових елементів з високою кореляцією на частотах гармонік свідчить про наявність нелінійних спотворень в приймальному тракті і може використовуватися для їх моніторингу.

ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі наведено розв'язання актуальної науково-практичної задачі - використання КХ радіомовних, УКХ телевізійних станцій та глобальних навігаційних супутниковых систем GPS і GLONAS для моніторингу довкілля. У ході багаторічних досліджень експериментально вивчені характеристики сигналів УКХ та КХ станцій. Вивчено завади, створювані випромінюванням радіомовних станцій УКХ і КХ діапазонів для активно-пасивних радіолокаційних систем. Розроблено методики оптимізації антенних систем КХ діапазону. Розглянуто можливість використання нових підходів для опису законів розподілу різних нестационарних процесів, в тому числі перешкод активно-пасивним системам декаметрового діапазону від радіомовних станцій КХ діапазону. Проведено достатню кількість експериментальних досліджень реальних сигналів КХ і УКВ станцій, супутників ГНСС, що дозволяє говорити про достовірність отриманих результатів.

У ході виконання роботи були отримані наступні основні результати.

1. Створено методику моніторингу тропосферної рефракції по множниках послаблення сигналу на загоризонтній трасі на просторово рознесених антенах в УКХ діапазоні частот. Створено апаратурний комплекс та проведені експериментальні дослідження, які показали слабку (менше ніж 0,15) кореляцію сигналів, що приймаються на просторово - рознесені антени (на 15 ... 20 λ) як для однакових, так і різних частотних каналів.
2. Експериментальні дослідження інтерференційних явищ в каналі поширення на загоризонтних трасах у середній смузі широт (Україна), які виникають при наявності інверсійних шарів, показали, що кількість інверсійних шарів, як правило, не перевищує 2-х, зі стрибком показника

заломлення на межі шарів 6 ... 14 N одиниць, висота їх розміщення не перевищує 650 м, швидкість переміщення становить від одиниць до декількох сотень метрів на годину, глибина завмирань сигналу становить від -3 дБ до -23 дБ.

3. Створено методику для оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно - пасивних систем зондування.

4. При виявленні літака Ан-74 з використанням як сигналу підсвічування іоносферної хвилі радіомовних КХ станцій вперше експериментально встановлено, що ЕПР літаків в резонансній області як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях сягають тисяч м². Це означає, що при порівнянних потенціалах РЛС дальність виявлення в КХ діапазоні може в 30 ... 300 разів перевищувати їх дальності виявлення у НВЧ діапазоні, а також дає можливість використовувати для освітлення повітряного стану в КХ діапазоні поверхневу хвилю вертикальної поляризації.

5. Створено методику використання сигналів ГНСС для дистанційного моніторингу та діагностики стану морської поверхні. Експериментально встановлено, що рівні флюктуаційної компоненти та глибина завмирань (трендів) сигналів навігаційних супутників чутливі до зміни стану підстильної поверхні та ступеня хвильування. Показано можливість визначення по ним стану морської поверхні.

6. Створено імітаційну модель завад, створюваних для активно-пасивних систем випромінюванням радіомовних станцій на основі вкладених напівмарківських процесів з урахуванням присутності в сигналі двох фаз різної інтенсивності, які фізично обумовлені дискретним характером модулюючих сигналів. Проведено аналіз отриманих в ході експериментів співвідношень рівня несучої до рівня завад на різних частотах для різних поляризацій приймання та частот сигналу. Показано, що їх співвідношення

сягає 40 дБ. Проведено аналіз періоду завмирань сигналу для різних однострибкових і багатострибкових трас для автоматичного та ручного режимів регулювання підсилення (АРП і РРП) при прийманні.

7. Розроблено методику синтезу нееквідистантних антенних решіток, яку засновано на використанні властивостей магічних квадратів. Показано, що при розміщенні елементів решітки, використовуючи числа, з яких складений «магічний» квадрат, вдається отримати при малих коефіцієнтах заповнення до 0,01 і надмірності менше ніж 0,5 з додатковими елементами повне покриття просторових частот в області розміщення елементів. Показано, що синтез великих АР можливий з використанням вкладення декількох магічних квадратів. Алгоритм доповнення елементів решітки, сформованої елементами магічного квадрата додатковими елементами для забезпечення повного покриття частот АР, може бути так само ефективно використаний і для побудови АР на основі вкладеного квадрата. Використовуючи взаємні повороти окремих шарів, що входять до синтезованої решітки, можна істотно поліпшити її характеристики.

8. Експериментально досліджено симетричний спіральний вібратор з малими діаметром і шагом спіралі в порівнянні з довжиною хвилі та показано, що він є структурою що сповільнює, в якій мають місце резонанси, коли вздовж вібратора укладається ціле число півхвиль, та на його основі запропоновано відбивач-калібратор для зовнішнього калібрування РЛС.

9. Розглянуто можливість використання атомарних функцій Кравченка - Рвачова для опису законів розподілу нестационарних негаусових процесів. Показано, що фінітність атомарних функцій Кравченка-Рвачова має фізичні передумови їхнього використання для процесів, з декількома фазовими станами, де в середині кожного фазового стану як апроксимуючі функціонали використовуються гауссові густини розподілу. Аналіз похибок апроксимації

експериментальних густин показав, що використання фінітних функцій Кравченка - Рвачова в більшості випадків дає кращі результати, ніж використання функцій Гауса, і тим більше – Лоренца.

10. Запропоновано опис статистичних взаємозв'язків різних спектральних компонент сигналу радіомовних КХ і УКХ станцій з використанням апарату МКСК. Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент сигналів радіомовних станцій дозволили виявити наявність корельованої області в спектрах. Встановлено, що поява додаткових елементів з високою кореляцією на частотах гармонік свідчить про наявність нелінійних спотворень в приймальному тракті і може використовуватися для їх моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Griffiths H.D., Long N.R. Television based bistatic radar: IEE Proc. F. Commun. Radar Signal Process, 1986. № 133 (7), P. 649-657.
2. Howland P.E. Target tracking using television-based bistatic radar: IEE Proc. Radar Sonar Navig., 1999. № 146 (3), P. 166-174.
3. A. D. Lanterman Tracking and Recognition of Airborne Targets via Commercial Television and FM Radio Signals: Acquisition, Tracking, and Pointing XIII, SPIE Proc. 3692, Eds: M.K. Masten and L.A. Stockum, Orlando, FL, April 1999. P. 189-198.
4. Silent Sentry® Innovative Technology for Passive, Persistent Surveillance URL: http://www.mobileradar.org/Documents/Silent_Sentry.pdf.
5. Sun H., Tan D. K. P. and Lu Y. Aircraft target measurements using A GSM-based passive radar: *IEEE Radar Conference*, Rome, Italy, 2008, P. 1-6, doi: 10.1109/RADAR.2008.4721053.
6. P. Falcone, F. Colone, A. Macera and P. Lombardo Localization and tracking of moving targets with WiFi-based passive radar: IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA, 2012, P. 0705-0709, doi: 10.1109/RADAR.2012.6212229.
7. Sinha, N. B., et al. Target localization accuracy using WiMAX radar networks: Journal of Theoretical & Applied Information Technology, Vol. 27, No. 2, 2011.
8. Salah, A. A., R. S. A. Raja Abdullah, A. Ismail, and F. Hashim Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bistatic radar applications: Electronics Letters, 2014, Vol. 50, No. 7, P 545–547.
9. D. Poullin and M. Flecheux Passive 3D tracking of low altitude targets using DVB (SFN Broadcasters): *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2012, vol. 27, No. 11, P. 36-41, November, doi: 10.1109/MAES.2012.6380824.
10. Thales “Homeland Alerter 100”, URL <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/homeland-alerter-100>

11. Кутузова Б. Г., Кравченко В. Ф., Луценко В. И. и др. Использование излучений ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования окружающей среды: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. –М, 2014.
- URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4381.
12. A. Dzvonkovskaya, T. Helzel, L. Petersen, C. R. Merz, Y. Liu and R. H. Weisberg Initial results of ship detection and tracking using WERA HF ocean radar with MIMO configuration: *15th International Radar Symposium (IRS)*, Gdansk, Poland, 2014, P. 1-3, doi: 10.1109/IRS.2014.6869265.
13. P. A. Melyanovsky, I. S. Turgenev Bistatic HF radar for oceanography applications with the use of both ground and space waves: *Telecom. and Radio Eng.* 1997. V 51, № 2. P. 30–41.
14. J. M. Thomas, C. J. Baker and H. D. Griffiths DRM signals for HF passive bistatic radar: *IET International Conference on Radar Systems*, Edinburgh, UK, 2007, P. 1-5, doi: 10.1049/cp:20070642.
15. А.В. Вичкань, П.А. Мельяновский, А.И. Шуть Пассивная когерентная радиолокация в коротковолновом диапазоне: Часть 1. Обнаружение воздушных целей. Радиофизика и электроника. 2010. Т. 15, №1. С. 72–77.
16. Хргиан А. Х. Физика атмосферы: - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Гидрометеоиздат, 1978. 247 с.
17. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний: – М.: Связь, 1976. 296 с.
18. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы: Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59-106.
19. Зализовский А.В. Роль тропосферных процессов в формировании спорадических слоев Е-области ионосферы над Антарктическим полуостровом: Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13, № 1. С. 26-39.
20. J. M. Forbes, S. E. Palo, X. Zhang Variability of the ionosphere: *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 685-693.

21. Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below: J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. Vol. 68. P. 479-497.
22. Gershman B. N. , Grigor'ev G. I. A Review: Izvestia vuzov. Radiofizika.– 1968.– Vol. 11, N 1. P. 5-27.
23. Kazimirovsky E. S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review: Ann. of Geophys.– 2002.– Vol. 45, N 1.– P. 1-29.
24. Лазоренко О. В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы: - Х: ХНУ имени В.Н. Каразина. 2009. 576 с.
25. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера: Изд. 2-е, перераб. и доп.. - М. : Наука, 1972. 564 с.
26. Грудинская Г. П Распространение радиоволн: учеб. пособие для радиотехн. вузов и фак. - М. : Высшая школа, 1967. 243 с.
27. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. 1960. С 552.
28. Rizos C. Principles and Practice of GPS Surveying: Sydney (Australia): SNAP, School of Geomatic Engineering, UNSW, 1999.– URL: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap>.
29. Насилов Д.Н. Радиометеорология. М.:, 1966, 336 с.
30. Бин Б. Р. , Даттон Е. Дж. Радиометеорология: пер. с англ. Т. И. Арсеньян, под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеорологическое изд – во, 1971. – 362 с.
31. Распространение ультракоротких волн: Пер с англ. под ред. Б. А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. 710 с.
32. Степаненко В. Г. , Гальперин С. М. Радиотехнические методы исследования гроз: Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 204 с.
33. Сухонин Е. В. Ослабление миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере с гидрометеорами: дисс. доктора физ.– мат. наук: 01.04.03 "Радиофизика" – М.: ИРЭ АН СССР, 1988. 351 с.
34. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере: – М.: Сов радио, 1970. 496 с.
35. Калиновский А. Б., Пинус Н. З. Аэрология: – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 345 с.

36. Жуков Б. В., Кабанов В. А., Мыщенко И. М., Синицкий В. Б. и др. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере: под ред. Г. И. Хлопова. – Киев: Наукова думка, 2010. 263 с.
37. Исимару И. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах – М.: Мир, 1981. Т. 2. 317 с.
38. Быстров Р. П., Загорин Г. К., Соколов А. В., Фёдорова Л. В. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов: Монография / под ред. Р.П. Быстрова, А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
39. Brown E.H., Hall F.F. Jr. Advances in atmospheric acoustics: Rev. Geophys. and Space Phys. 1978. V. 16. № 1. P. 47-100.
40. Hall F.F., Wescott J.W. Simmons W.R. Acoustic echo sounding of atmosphere thermal and wind structure: Seventh International Symposium on Remote Sensing of the Environment, (Proceeding). Univ. of Michigan, 1971. V 1. P. 1715-1732.
41. Татарский В.И. К теории распространения звуковых волн в турбулентном потоке: ЖЭТФ. 1953. Т. 25. С. 74.
42. Bergmann P . G. Propagation of radiation in a medium with random inhomogeneities: Phys. Rev. 1946. V. 70. P. 456.
43. Bradley, S. Atmospheric Acoustic Remote Sensing: CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008.
44. Ch. Liu, A.Yu. Panchenko, M.I. Slipchenko Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas: Part 2: Diffraction problem. Telecommunication and Radio Engineering. 2015. №74(19) P. 1745-1753.
45. Каллистратова М.А., Кон А.М. Радиоакустическое зондирование атмосферы: - М.: Наука, 1985. 198 с.
46. Карташов В. М., Кушнир М. В. Алгоритм управления параметрами систем радиоакустического зондирования атмосферы: Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 5(2). С. 28-32. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_5\(2\)_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_5(2)_7).

47. Карташов, В. М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы: монография. – Харьков: ВЦ ХНУРП, 2011. 230 с. ISBN 978-966-659-181.
48. Коломиец С. М. Измерение скорости движения прозрачной жидкости методами акустооптики: Известия РАН. Серия ФАО, 2000. Т. 36, № 6. С. 847-852.
49. Коломиец С. М. Способ определения скорости звука: Патент 2221224 РФ. Выдан 10 января 2004 г.
50. Kolomiets S. M. Interference method for determining refractive index of medium or speed of sound in this medium: Physics of Vibration, 2002. V. 10, № 4. P. 222 – 227.
51. Kolomiets S. M. Sounding of ocean and atmosphere using Doppler effect in inhomogeneous media: Physics of Wave Phenomena, 2003. V. 11. № 3. P. 159-167.
52. Carsewell A.I. LIDAR measurements of the atmosphere: Can. J. Phys. 1982, V. 61. P 378-393.
53. Argall, P.S.; Sica, R.J. LIDAR. In Encyclopedia of Imaging Science and Technology; Hornak, J.P., Ed.; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2002.
54. Wandinger U. Introduction to Lidar. In Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere: Weitkamp, C., Ed.; Springer: New York, NY, USA, 2005; P. 6-11.
55. Menut L., Flamant C., Pelon J., Flamant P. H. Urban boundary layer height determination from lidar measurements over the Paris area: Appl. Opt. 1999, V. 38, P 945-954.
56. Murayama T., Okamoto H., Kaneyasu N., Kamataki H., Miura K. Application of lidar depolarization measurement in the atmospheric boundary layer: Effects of dust and sea-salt particles. J. Geophys. Res. 1999, V. 104, P 31781-31792.
57. Buttler, W.T.; Soriano, C.; Baldasano, J.M.; Nickel, G.H. Remote sensing of three-dimensional winds with elastic lidar: Explanation of maximum cross-correlation method. Bound.-Lay. Meteor. 2001. V. 101. P 305-328.
58. Stephens, G.L. Remote Sensing of the Lower Troposphere: An Introduction: Oxford University Press: New York, NY, USA, 1994; P. 427.

59. Маркина Н. Н., Наумов А. П. , Сумин М. И. Определение высотных профилей коэффициента преломления атмосферы в оптическом и СВЧ – диапазонах волн по ее тепловому излучению: Изв. ВУЗов, Радиофизика 1987. Т. 30. № 8. С. 951-960.
60. Гурвич А. С., Ершов А. Т. О радиотепловом излучении атмосферы при волноводном распространении: Изв. АН СССР, ФАО. 1979. Т. 15. № 2. С. 218-221.
61. Щукин Г. Г., Мельник Ю. А., Гальперин С. М., Ильин Я. К., Михайлов Н. Ф., Рыжков А. В. Оценка условий распространения радиоволн над морем радиометрическим методом: Тр. Гл. геофиз. Обсерватории, Методы активной и пассивной радиолокации в радиометеорологии. 1982. Вып. 451. С. 65-68.
62. Михайлов Н. Ф., Рыжков А. В., Щукин Г. Г. Радиометеорологические исследования над морем: Л.: Гидрометиздат, 1990. 208 с.
63. Кабанов В. А. Оценка условий распространения радиоволн над морем по радиометрическим измерениям в области скользящих углов: Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков. 2006. Т.11. №3. С. 400-403.
64. Войтович О. А., Линкова А. М., Хлопов Г. И. Двухчастотное профилирование параметров дождя: Радиофизика и электроника. 2011. Т. 2(16). № 3. С. 51-60.
65. Белов Е. Н., Войтович О. А., Линкова А. М., Руднев Г. А., Хлопов Г. И., Хоменко С. И. Двухчастотное зондирование жидких осадков с помощью метеорадара МРЛ-1: Радиофизика и электроника. 2012. Т. 3(17). № 1. С. 49-59.
66. Жуков Б. В. и др. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере [Текст] : монография ; ред. Г. И. Хлопов; Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. - К. : Наук. думка, 2010. 263 с.
67. Кабанов В.А. Структура коэффициента преломления атмосферы и диагностика условий распространения УКВ над морем. Диссертация на соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук (01.04.03 «Радиофизика»).– Харьков. 1996. 161 с.

68. Дорфман Н.А., Кабанов В.А., Кивва Ф.В., Тургенев И.С. Статистические характеристики показателя преломления в приводном слое атмосферы: Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 5. С. 549-552.
69. Замараев В. Б., Синицкий В. Б. Определение характеристик тропосферной рефракции в зоне тени по излучению удаленного источника. Часть 1. Модель: Радиофизика и электроника. 2014. Т. 5(19), № 3. С. 41-48
70. Кабанов В. А., Моргун Г. М., Синицкий В. Б., Тургенев И. С. Определение характеристик тропосферной рефракции в зоне тени по излучению удаленного источника. Часть 2. Эксперимент: Радиофизика и электроника. 2014. Т. 5(19), № 4. С. 56-62.
71. Хоменко С. И., Хлопов Г. И., Халамейда Д. Д. Исследование рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоинтерферометра: Радиофизика и электроника. 2012. Т. 3(17), № 2. С. 50-53.
72. A. W. Friend and R. C. Colwell Measuring the Reflecting Regions in the Troposphere: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 25. № 12. P. 1531-1541. Dec. 1937, doi: 10.1109/JRPROC.1937.228765.
73. Смирнова А. А. Объективный анализ облачности и опасных явлений погоды поданным радиолокационных и станционных наблюдений: Под ред. Н. А. Калинина. Пермь: Изд-во Перм. Ун-та. 2005. 124 с.
74. Солонин А. С. Состояние и перспективы развития метеорологических радиолокаторов: 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» Междунар. конф. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (CPPCH-2008), 22-24 октября 2008: Сб. научн. Трудов.-Харьков. 2008. Ч. 1. С. 9-13.
75. Веселовська Г. Б. Зворотнє розсіювання електромагнітних хвиль полідисперсним середовищем несферичних крапель у задачах двочастотного дистанційного зондування: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (01.04.03 – «Радіофізика»).– Харків. 2014. 147 с.

76. Лінкова А.М. Комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ в атмосфері: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (01.04.03 – «Радіофізика»).– Харків. 2012. 168 с.
77. Луценко В. И., Луценко И. В., Ань Н. С. Использование доплеровских РЛС для изучения турбулентности воздушных масс в облаках: Известия ВУЗов Радиоэлектроника. 2010. Т.53, №6. С. 3-12.
78. Marchuk V. V., Ostrovsky Y. P., Mazura I. V., Yanovsky F. J. Methods of Turbulence Detection by Analyzing Precipitation Behaviour: 2nd Microwave & Radar Week in Poland, International Radar Symposium IRS 2006. 24-26 May 2006. Krakow. Poland: Proceedings. 2006. P. 161-164.
79. V. Lutsenko, I. Popov and G. Khlopov Millimeter Wave Radar for Study of Polarization-Spectrum Features of Signals Scattered by Hydrometeors: *International Radar Symposium*, Krakow, Poland, 2006, pp. 1-4, doi: 10.1109/IRS.2006.4338052.
80. Khlopov G. I. The Spectra of Coherent Millimeter Wave Signals, Reflected from Hydrometeors: Telecommunications and Radio Engineering. 1997. V. 51. № 1. P. 17-24.
81. Козлов А. И., Логвин А. И. Развитие радиополяриметрии в России: Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999. №7. С. 62-71.
82. Загорин Г. К., Кожевников Н. И., Щупляцкий А. Б. Определение микроструктуры кристаллических и смешанных облаков по поляризационным характеристикам радиолокационного сигнала: Методы и средства зондирования атмосферы: Труды ЦАО. 1990. Вып.168. С. 82-93.
83. Ostrovsky Y. P., Yanovsky F. J., Rohling H. Turbulence and Precipitation Classification based on Doppler- Polarimetric Radar Data: 2nd Microwave & Radar Week in Poland, International Radar Symposium IRS 2006, 24-26 May 2006, Krakow, Poland: Proceedings. Krakow, 2006. P. 275-278.
84. Горелик А. Г., Стерлядкин В. В. Влияние вибрации дождевых капель на поляризационные характеристики радиоэха: Изв. АН СССР, ФАО. 1989. Т. 25. №9. С. 960-968.

85. Kravchenko V. F., Kravchenko O. V., Lutsenko V. I., Lutsenko, I. V., Popov D. O. Usage of Global Navigation Systems for Detection of the Dangerous Meteorological Phenomena: Journal of Measurement Science & Instrumentation. March 2015. Vol. 6. Issue 1. P. 68-74.
86. Гудков В. Н., Луценко В. И., Луценко И. В., Ань Н. С. Диагностика рефракционных свойств тропосферы над сушей с использованием систем глобальной навигации: Известия ВУЗов Радиоэлектроника. 2010. Т.53. №7. С. 3-12.
87. Лауш А. Г., Луценко В. И., Луценко И. В. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации: Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2015. Т.58. №11. С. 14-27
88. Луценко В. И., Попов Д. О., Луценко И. В. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы: Радіофізика та електроніка. 2016. Т. 7(21), № 1. С. 31-39.
89. Lusignan B., Modrell G., Morrison A., Pomalaza J., Ungar S. G. Sensing the Earth's atmosphere with occultation satellites: Proceed. IEEE. April 1969. V. 57. № 4. P. 438-467.
90. Anderson K. D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements: Radio Sci. 1982. V. 17, № 3. P. 653-663.
91. Hitney H. V. Means for determining the refractive index profile of the atmosphere: U.S. Patent 4 093 918: June 6. 1978.
92. Арманд Н. А., Андрианов В. А., Смирнов В. М. Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов ИСЗ: Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. Вып. 4. С. 673–680.
93. Кутузов Б. Г., Кравченко В. Ф., Луценко И. В., Попов Д. О. Использование излучений ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования окружающей среды: Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: 10- 14 ноября 2014 г., г. Москва, URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4381.

94. Луценко И. В., Попов Д. О. Диагностика атмосферы и подстилающей поверхности с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем: 14-а українська конференція з космічних досліджень. Ужгород, -12 вересня 2014 р. Тези доповідей конференції С. 33.
95. С.А. Левченко , И.В. Луценко, Д.О. Попов Мониторинг атмосферы и поверхности океана при помощи приемников систем глобальной спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС: Proceedings of the International Humboldt conference: Science and technology as a basis of modernization for future sustainable development SSF-2014. -Minsk, Belarus, 18-21 September, 2014, P. 26-30.
96. Луценко И. В., Сытник О. В., Ань Н. С., Гудков В. Н. Прогнозирование коэффициента преломления тропосферы по результатам измерения метеопараметров в опорных пунктах: Радиофизика и электроника: Сб. научн. трудов / НАН Украины Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков. 2012. Т 3(17)., № 4. С. 54-63.
97. Луценко В. И., Луценко И. В., Кривенко Е. В., Попов Д. О. Обнаружение опасных метеорологических явлений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем: Электронные методы исследования окружающего пространства: Первая украинская конференция, 25-27 сентября 2012 г.: сб. тез. докл. – Харьков, 2012. С. 253-255.
98. Lutsenko I. V., Popov I. V., Krivenko E. V., Gudkov V. N., Lukianenko N. V., Anh N. X. Detection of Dangerous Meteorological Phenomena with Usage of GPS Signals: The 9th European Radar Conference, 2012, EuMA, 31 Oct - 2 Nov 2012, Amsterdam. Proceedings: Amsterdam. 2012. Р. 353 - 356.
99. Луценко И. В., Попов Д. О. Обнаружение метеорологических образований при помощи систем глобальной навигации: 5-й международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2014 14-17-октября 2014г.: сб.научн.трудовМРФ-2014, Т. 1. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». -Харьков. 2014. С. 207-210.

100. Kravchenko V. F., Kravchenko O. V., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O. Usage of global navigation systems for detection of dangerous meteorological phenomena: (JMSI) Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2015. Vol. 6, №. 1. P. 68-74.
101. Луценко В. И., Попов Д. О., Луценко И.В. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной и спутниковой системы: Радиофизика и электроника. 2016. Т. 7 (21). № 1. С. 31-39.
102. Nguyen Xuan Anh, Lutsenko V. I., Popov D. O., Cong Pham Chi, Trung Tran Hoai Remote Sensing Of Atmosphere And Underlying Surface Using Radiation Of Global Navigation Satellite Systems: Journal of Marine Science and Technology; Vol. 17, No. 4B; 2017. - P.1-7 DOI: 10.15625/1859-3097/17/4B/12985 URL: <http://www.vjs.ac.vn/index.php/jmst>.
103. Луценко В. И., Попов Д. О., Гуо Цян, Джин Юн Исследование снежного покрова при помощи систем глобальной спутниковой навигации: II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» Муром`2018, 26.06-28.06. 2018 г. Муром. С. 394-398.
104. Lutsenko V. I., Popov D. O., Lutsenko I. V., Nguyen Xuan Anh Remote sensing of the underlying surface using global satellite navigation systems: Международная конференция EuMCE 2019, Prague European Microwave Conference in Central Europe, 13-15 May 2019, Prague, Czech Republic, Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe, Copyright by EuMA ISBN 978-2-87487-066-8 EuMCE2019 online P. 350-353.
105. Лауш А. Г., Луценко И. В., Попов Д.О. Освещение воздушной и надводной обстановки с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем: 5-й международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2014 14-17 октября 2014 г.: сб. научн. трудов МРФ-2014. Т.1 «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». -Харьков. 2014. С. 45-48.

106. Лауш А. Г., Луценко В. И., Луценко И. В. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации: Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, Т. 58. № 11. 2015. С. 14-26.
107. Чернов Ю. А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы: –М.: Связь. 1971. С. 203.
108. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Qiang Guo, Yu Zheng, Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тирнов О. Ф., Цимбал А. М. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере: Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія : Радіофізика та електроніка. 2018. Вип. 28. С. 88-93. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhIPE_2018_28_15.
109. А. И. Галкин и др. Ионосферные измерения: М: Наука. 1971. С. 174.
110. Емельянов Л. Я. Измерения высотных профилей электронной концентрации методом некогерентного рассеяния: Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 1. 2002.- М., С. 116 - 120.
111. Ivanov V. A., Shumaev V. V., Kurkin V. I., Nosov V. E., Uryadov V. P. Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research: Radiophysics and Quantum Electronics. 2003. Т. 46. № 11. С. 821-851.
112. Gardner F. F., Pawsey J. L. Study of the ionospheric D-region using partial reflections: J. Atmos. Terr. Phys. 1953. Vol. 3, № 8. P. 321-324.
113. Иванов В. А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений: – Йошкар-Ола: ВИНИТИ, 1985. 196 с.
114. Гоков А. М., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Экспериментальное исследование реакции среднеширотной D-области ионосферы на рентгеновские и оптические вспышки: Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11, № 3/4. С. 56-67.
115. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь: Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11, № 5/6. С. 12-21.

116. Manson A. H., Meek C. E., Hall G., McMurray R. Winds and waves from the Canadian prairies (CNSR) triple-MF radar system: Geophys. Res. Lett. 1993. Vol. 20, № 13. P. 1375-1378.
117. Namboothiri S. P., Manson A. H., and Meek C. E. Variations of mean winds and tides in the upper middle atmosphere over a solar cycle, Saskatoon, Canada, 52°N, 107°W: J. Atmos. Terr. Phys. 1993. Vol. 55, №. 10. P. 1325-1334.
118. Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений: Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 3. С. 36-54.
119. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения квазипериодических процессов в мезосфере. 1. Теоретические основы и результаты компьютерного моделирования: Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9, № 4. С. 404-416.
120. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Радарные методы наблюдения квазипериодических процессов в мезосфере. 2. Методика и результаты наблюдения: Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10, № 1. С. 38-49.
121. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Выявление волновых возмущений в мезосфере с помощью СЧ – ВЧ-радара: Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 525-535.
122. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощного нестационарного радиоизлучения: Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18, № 1. С. 49-64.
123. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения: Вестник Харьковского университета. Сер. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 29-30.
124. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением: Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62-71.

125. Черногор Л. Ф., Домnin И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. Апериодические крупномасштабные возмущения в Е-области ионосферы, стимулированные мощным радиоизлучением: Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. 173–185.
126. Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar: Bulletin of Karazin Kharkov National University, “Radiophysics and Electronics” series, 2019. Vol. 31. P. 3 - 15.
127. Leonid F. Chernogor, Kostyantyn P. Garmash, Qiang Guo, Victor T. Rozumenko, Yu Zheng. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms: 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25 V. 2. on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS) P 253-258.
128. Коноваленко А. А. И. С. Шкловский и низкочастотная радиоастрономия: Радиофизика и радиоастрономия. 2017. Т. 22. № 1.
129. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2: Антенны. –М.: Связь, 1978. Вып. 26. С. 3-14.
130. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., et al. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT: Exp. Astron. 2016. V. 42. Is. 1. P. 11-48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
131. Мень А. В., Брауде С. Я., Рацковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Иютина Г. А., Христенко А. Д., Булацен В. Г., Браженко А. И., Кошевой В. В., Романчев Ю. В., Цесевич В. П., Галанин В. В. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. 1). Основные принципы. Обзор: Радиофизика и радиоастрономия. 1997. Т. 2, № 4. С. 385-401.
132. Van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W., et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray: Astronomy & Astrophysics 556, A2. 2013. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873.
133. Long Wavelength Array: URL: <http://lwa.unm.edu>.

134. Ellingson S.W. Antennas for the Next Generation of Low Frequency Radio Telescopes: IEEE Trans. Ant. & Prop., Vol. 53, №. 8, August 2005, P. 2480-9. Also available as LWA Memo 22, URL: <http://www.phys.unm.edu/~lwa/memos/>.
135. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов И. В., Н. С. Ань (NguyenXuanAnh), Цзян Гую (Qiang Guo), Юн Джин (Yu Zheng) Мониторинг тропосферной рефракции с использованием излучений телевизионных центров на загоризонтной трассе: II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» Муром 2018. С. 220-227
136. Луценко В.И., Луценко И.В., Попов И.В. Мониторинг воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций коротковолнового диапазона: Изв. Вузов Радиофизика. 2015. Т.58. № 1. С. 10-20.
137. I. V. Popov *et al.* GNSS Signal Use for Sea Waves Monitoring: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 768-771, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252723.
138. Popov I. V., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V. Illumination of Air Environment Using Radiation of SB Broadcast Station: International Radar Symposium IRS 2006: 2nd Microvave & Radar Week in Poland, 24-26 May 2006 Conf. Proc. P. 233-236.
139. Попов И. В., Луценко В. И., Луценко И. В. Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ диапазона: Современные проблемы радиоэлектроники. Сб. научн. трудов. Под ред. Громыко А.И., Сарафанова А.В. М.: Радио и связь, 2006. С. 25-28.
140. Попов И. В., Луценко В. И., Луценко В. И. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона: Радиофизика и электронника, сб. научн. трудов ИРЭ НАН Украины. 2007. Т. 12. № 1. С. 199 - 203.
141. Anh N. X., Khuong P. L., Kabanov V. A., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Sinitsky V. B. Estimation of Atmospheric Parameters Using Radio Occultation Method: J. Geology, Series B. 2008. № 31-32. P. 60-66.

142. Lutsenko V.I., Popov I.V. Illumination of Air Environment Using Radiation of SW Broadcasting stations: The 5th European Radar Conference, 30–31 October 2008 Amsterdam, The Netherlands. Conf. Proc. P. 396-399.
143. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Soboliak A. V., Popov I. V., Anh Nguyen Use of Radiation of Broadcast Stations of HF Range for Detection of Air Objects: 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25 Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS) P267-271.
144. I.V. Lutsenko, V. I. Lutsenko, I.V. Popov, V. B. Sinit斯基, E. V. Tarnavsky, N.X. Anh Usage of Electromagnetic Fields of Anthropogenic Irradiation Sources for Remote Sensing of Atmosphere: The 6th European Radar Conference, 2009, EuRAD, 28 Sept - 2 Oct 2009, Rome. – Proceedings: Italy. 2009. P. 545 - 548.
145. V.N. Gudkov, V.I. Lutsenko, I.V Lutsenko, N.X. Anh, I.V Popov, V.B. Sinitskiy Using Signals of the Global Navigation Satellites for Diagnostics of Above Land Troposphere Refraction: The 7th European Radar Conference, 2010, EuRAD, 30 Sept - 1 Oct 2010, Paris. Proceedings: France. 2010. P. 495 - 498.
146. Кривенко О. В. , Лауш А. Г., Луценко В. І., Луценко І. В., Попов Д. О., Попов І. В., Соболяк О. В. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів: ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 3 С.83-90.
147. Калинин А. И. К расчету напряженности поля в зонах тени и полутиени при распространении ультракоротких волн вдоль гладкой сферической поверхности земли: Радиотехника. 1956. Т. 11, № 6. С. 43-49.
148. Введенский Б. А., Аренберг А. Г. Распространение ультракоротких радиоволн: – М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1938. 274 с.
149. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие .– М.: Высш. школа. 1982. 224 с.
150. Белов Е. Н., Луценко В. И., Луценко И. В., Хоменко С. И. Оценка тропосферной рефракции по множителю ослабления радиоволн при распространении на приземных загоризонтных трассах: Радиофизика и электроника: Сборник научных

- трудов / НАН України. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харків. 2004. Т. 9, № 1. С. 248-258.
151. Belov Ye. N., Lutsenko I. V., Lutsenko V. I., Khomenko S. I. The Troposphere Refraction Estimation by Attenuation Factor of Radiowave Beyond-the-Horizon Propagation: Telecommunication and Radio Engineering. 2003. V. 60, № 10, 11&12. P. 1-14.
152. Луценко В. И., Белов Е. Н., Луценко И. В., Хоменко С. И Диагностика рефракции тропосферы по множителю ослабления поля метровых волн в зоне тени: Вісник Харківського національного університету ім. В. М. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». 2002. № 570. С. 208-209.
153. Кулемин Г. П., Тарнавский Е. В. Моделирование карты помех от земной поверхности для РЛС ММД при малых углах скольжения: Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2004. № 1. С. 5–12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2004_1_3.
154. Луценко В.И., Луценко И. В., Попов И. В., Ань Н. С. (Nguyen Xuan Anh) Радиоклиматические особенности Вьетнама: IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26 - 28 июня 2018г.-Муром. С. 668-697.
155. Богатуров А.Н., Гайкович К.П., Гуревич А.С., Иванов В.К., Кашкаров С.С., Кривоножкин С.Н., Смирнов С.Н., Фрейлихер В.Д., Шевцов Б.М. О возможности определения отражающих слоев в тропосфере над морем по вариациям уровней сигналов ИСЗ: ДАН СССР, серия Геофизика. Т. 315. №4. 1990. С. 830-834.
156. Луценко В. И., Луценко И. В., Белов Е. Н., Хоменко С. И. О возможности определения характеристик отражающих слоев в тропосфере над сушей по вариациям уровней сигналов УКВ на загоризонтных трассах: Вісник Харківського національного університету ім. В.М. Каразіна, Серія Радіофізика та електроніка. 2002. № 570. С. 203-204.
157. И. В. Луценко, И.В. Попов, В.И. Луценко Спектральные методы оценивания характеристик вторичных источников в каналах с многолучевостью: Радиофизика

- и электроника. Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. Харьков. 2006. Т.11. № 1. С. 144-148.
158. Аренберг А. Г. Распространение дециметровых и сантиметровых волн. -М.: Сов.радио. 1957. С 303.
159. Попов И. В., Луценко И. В., Луценко В. И. Использование методов обнаружения-измерения для анализа характеристик каналов с многолучевостью: Радиофизика и электроника. Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. Харьков. 2006. Т. 11. № 2. С. 305-308.
160. Попов И. В., Луценко И. В., Луценко В. И. Обнаружение–измерение параметров неизвестного количества сигналов в условиях негауссовых помех: АНПРЭ "Прикладная радиоэлектроника" –Харьков. 2006. Т. 5. № 3. С. 378-382.
161. Кивва Ф. В., Кортунов В. А., Стрельников Ю. М. О влиянии рефракции на распространение метровых радиоволн вблизи дифракционного горизонта: Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 4.
162. Седышев Ю. Н., Седышев П. Ю., Тютюнник В. А. Бистатические шумовые радиолокаторы с когерентной пространственно-временной обработкой эхо сигналов и активных помех: Прикладная радиоэлектроника, Харьковский национальный Университет Радиоэлектроники (ХНУРЭ). Т. 1. № 2. 2002. С. 189–194.
163. Кацко С. В., Черногор Л. Ф. Оценка влияния ионосферных бурь на ионосферные каналы распространения радиоволн по данным наблюдения на харьковском радаре некогерентного рассеяния: Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Радіофізика та іоносфера. 2015. № 37. С. 36-40.
164. Хлопов Г. И., Хоменко С. И. Развитие научных исследований в отделе физических основ радиолокации ИРЭ НАН Украины: Радіофізика та електроніка. 2008. Т. 13, спец. выпуск. С. 321-332.
165. Небабин В. Г., Сергеев В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания: -М.: Радио и связь, 1984. 284 с.

166. Луценко В. И., Луценко И. В., Хлопов Г. И. Спектральная модель обратного рассеяния радиоволн СВЧ- и КВЧ- диапазонов биологическими объектами: Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 3. С. 9-21.
167. V. I. Lutsenko, G. I. Khlopov, S. I. Khomenko and I. V. Popov Polarization-Spectrum Signatures of Above-Water and Surface Targets: *2006 International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications*, Krakow, Poland, 2006, P. 1192-1195, doi: 10.1109/MIKON.2006.4345401.
168. Брауде С. Я., Мень А. В., Шульга В. Ф. Радиоокеанографические исследования морского волнения: под ред. Брауде С. Я. - К.: И-во Академии наук УССР, 1962. С. 26 -48.
169. Брауде С. Я., Мень А. В., Поплавко Ю. В., Тургенев И. С., Шульга В. Ф. Радиоокеанографические исследования морского волнения: под ред. Брауде С. Я. - К.: И-во Академии наук УССР, 1962. С. 49-78.
170. Лобочко С.Е. Построение системы обнаружения с использованием излучения УКВ и ТВ–пере-датчиков: Международная науч-ная конференция «Излучение и рассеяние ЭМВ» ИРЭМВ*2003, труды конференции, Таганрог, 2003. С. 287-290.
171. Степанов Ю. Г. Противорадиолокационная маскировка: - М.: «Сов радио», 1968. 145 с.
172. Луценко В. И., Тургенев И. С., Хоменко С. И. Об эффектах, которые могут приводить к возрастанию ЭПР малоразмерных объектов в декаметровом диапазоне: Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. - Харьков. 1997. Т. 2, № 1. С. 60-63.
173. Луценко В. И., Хоменко С. И. Частотные зависимости ЭПР объектов в декаметровом диапазоне: Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. - Харьков, 1998. Т. 3. № 2. С. 33-37.
174. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Soboliak A. V., Popov I. V., Anh Nguyen Use of Radiation of Broadcast Stations of HF Range for Detection of Air Objects: 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25 Volume 2 on

2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS) P 267-271.

175. Синицкий В. Б. О возможности использования излучения спутников GPS для диагностики морского волнения: Радиофизика электроника. 2010. Т. 1(15), №3. С. 58-64.

176. Луценко В. И., Попов Д. О., Луценко И. В. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы: Радиофизика и электроника. 2016. Т. 7(21) № 1. С. 31-39.

177. Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report № 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. P 353.

178. Anh N. X., Laush A. G., Yu. Khomenko, Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., & Popov I. V. Testing of GNSS Receivers of Space Objects in Earth Conditions and the Implementation of Spoofing using Simulator of GNSS Signals: Telecommunications and radio engineering 2020. vol. 79. Issue 20. P 1773-1784.

179. Д Бартон., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям -М.: Сов радио. 1976. 392с.

180. Луценко В. И., Ло Иян, Соболяк А. В., Попов И. В. Помехи активно-пассивным системам радиолокации, создаваемые излучениями вещательных станций КВ и УКВ диапазонов: IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26 - 28 июня 2018 г.-Муром. С. 22-24.

181. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Soboliak A. V., Popov I. V., Anh N. X., & Y. Luo Interference to Active-Passive Radar Systems Created by Emissions from HF and VHF Broadcasting Stations: Telecommunications and radio engineering 2020. vol. 79. Issue 10. P. 829-845.

182. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Soboliak A. V., Popov I. V., Anh Nguyen, & Luo Yiyang Characteristics of Interference to Active-Passive Radar Systems from Emissions of HF and VHF Broadcasting Stations: 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week

(UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25 Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS) P. 259-262.

183. Кравченко В. Ф., Луценко В. И., Луценко И. В. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне: - М. Физматлит, 2015. 448 с.

184. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов И. В., Соболяк А. В., Lo Iyan Использование свойств магических квадратов для апертурного синтеза: 8-я Международная конференция Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации 20 – 23 сентября 2015, Сузdalь, Россия Материалы 8-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Сузdalь. Россия. 2015. С. 215-219.

185. Lutsenko V. I., Popov I. V., Lutsenko I. V., Luo Yiyang, Mazurenko A. V. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays are Based on Magic Squares: Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 1 електрон. опт. диск (CD – ROM). IEEE Catalog Number CFP16780-CDR ISBN 978-1-5090-2266-3.

186. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov I. V., LUO Yi-Yang, Mazurenko A. V. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays Based On Magic Squares: Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2017. V. 8. № 3. Sept. 2017. Sum № 20. P. .244-253.

187. Кравченко В. Ф., Луценко В. И., Луценко И. В., Lo Iyan, Мазуренко А. В., Попов И. В. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе «магических» квадратов: Физические основы приборостроения, Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3(25). С. 4–27.

188. Melyanovsky P. A., Popov I. V. Short spiral doublet: Microwave and Telecommunication Technology, 2002. CriMiCo 2002. 12-th International Conference Р 343 – 344.

189. Мельяновский П. А., Попов И. В. Спиральная антенна с поперечным излучением: Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН

- Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. -Харьков, 2003. Т. 9, № 3. С. 438-441.
190. Melyanovsky P. A., Popov I. V. Compact active Doppler calibrator: Microwave and Telecommunication Technology, 2004. CriMico 2004. 14th International Crimean Conference Р. 701 – 702.
191. Копилович Л. Е., Содин Л. Е. Одномерные и двумерные неэквидистантные антенны-решетки с низким уровнем боковых лепестков: Препринт № 293: Ин-т радиофизики и электроники, -Харьков. 1986. 38 с.
192. Заксон М.Б., Меркулов В. В. Неэквидистантные антенные решетки со случайно расположенными элементами: Радиотехника и электроника, 1965. Т.10, № 1. С. 7-13.
193. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн: -М.: Сов.радио, 1970. 383 с.
194. Содин Л.Г. Статистический анализ неэквидистантных линейных антенных решеток: Радиотехника и электроника, 1966. Т. 11. № 11. С. 1063-1959.
195. Leeper D.C. Thinned aperiodic antenna arrays with improved peak side lobe level control: Patent USA № 4071848, 31/01 1978.
196. Копилович Л. Е., Содин Л. Г. Комбинаторные методы в радиофизике, астрономии и радиоастрономии: Радиофизика и радиоастрономия. 1996. Т. 1., № 1. С. 61-70.
197. Lazarus E. Kopilovich, Leonid G. Sodin Linear Non-Equidistant Antenna Arrays: Multielement System Design in Astronomy and Radio Science Astrophysics and Space Science Library Volume 268. 2001. Р 77-96.
198. Копилович Л. Е. Безызбыточные конфигурации элементов на квадратных и гексагональных решетках больших размеров: Радиофизика и электроника. 2014. Т. 5(19). № 1. С. 80-84.
199. Копилович Л.Е. Эмпирическая оценка максимального числа элементов безызбыточной конфигурации на квадратной антенной решетке: Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т.14, № 2. С. 183-188.

200. Копилович Л.Е. Безызбыточные конфигурации антенн на двумерной апертуре интерферометра, дающие полное покрытие центральных областей в плоскости пространственных частот: Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17. № 2. С. 176-182.
201. Lazarus E., Kopilovich Leonid, Sodin G. Multielement System Design In Astronomy And Radio Science: Springer Netherlands, 2001. P 268.
202. Nguyen Xuan Anh, Lutsenko V. I., Luo Yiyang, Popov I. V. Non-equidistant two-dimensional antenna arrays are based on Latin squares for registration of cosmic, atmospheric and lithospheric radiation: *Journal of Marine Science and Technology*. 2017. Vol. 17. № 4B. P. 14-20.
203. Макарова Н. В. Волшебный мир магических квадратов: -Саратов. 2010. 180 с. URL: <https://yadi.sk/d/ehakE2V6S5TzG>.
204. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Риверст Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ: М. Вильямс, 2005. 1296 с. [ISBN 5-8459-0857-4](#).
205. Пчельников Ю. Н. Особенности замедленных волн и возможности их нетрадиционного применения: Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 4. С. 494 - 507.
206. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот: – М.: Сов. радио, 1957. 647 с.
207. George Ploussios An Electronically tuned HF/VHF helical antenna: *Microwave Journal*. 1991. V. 34. № 5. P. 223-224, 227-228, 231, 233-234, 237, 239-240.
208. Вычислительные методы в электродинамике: Под ред. Р. Митры. -М.: Мир, 1977. 486 с.
209. Луценко В. И., Толстель С. Ю. Частотные зависимости матриц рассеяния объектов в резонансной области: Радиофизика и электроника / НАН Украины Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков. 2000. Т. 5. № 1. С. 77-82.
210. R. F. Harrington Electromagnetic scattering by antennas: *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Sep. 1963. vol. 11. №. 5. P. 595-596.
211. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели: -М.: Сов. Радио. 1975. 248 с.

212. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V. Popov I. V. Detection against the background of non-Gaussian clutter from underlying surface: Radar Conference (EuRAD), 2010 European P. 411 - 414.
213. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov I. V. Usage of Spectral – Polarization Features of Backscattering from Objects for Determination of its Movement Direction: International Radar Symposium IRS 2009, Hamburg, Germany 09-11 September 2009 Proceedings: Hamburg, 2009. P. 557-562.
214. Луценко В. И., Луценко И. В., Соболяк А. В., Попов И. В. Оптимальное обнаружение сигналов на фоне стационарных негауссовых помех: VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю. П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. –Черкаси, 2017. С. 121-123.
215. Луценко В. И., Луценко И. В., Соболяк А. В., Попов И. В. Разрешение - обнаружение - измерение параметров сигналов в негауссовых шумах: VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П.Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. –Черкаси, 2017. С. 118-120.
216. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov I. V., Luo Yiyang Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions: Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2017. V. 8. №. 1. Mar. 2017. P. 37-45.
217. Kravchenko V. F., Luo Yiyang, Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov I. V. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions: 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) 20-24 June 2016. P. 1-4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538171.
218. Кравченко В. Ф., Луценко В. И., Луценко И. В. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне: -М : Физматлит., 2015. С. 448. ISBN 978-5-9221-1613-8

219. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O. Statistical models of the troposphere refractive index: Universal Journal of Physics and Application, 2014. V. 2(4), P. 206-212.
220. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Masalov S. A., Pustovoyt V. I. Analysis of nonstationary signals and fields with the use of enclosed semi-Markov processes: Doklady Physics. 2013. vol. 58. №. 11. P. 465-468.
221. Kravchenko V. F., Kravchenko O. V., Safin A. R. Atomic functions in probability theory and stochastic processes: Successes of modern electronics, 2009. № 5. P. 23-37.
222. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O. Description and analysis of non-stationary signals by nested semiMarkov processes: Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2014. vol. 5. № 3. P. 25-32, (Sept. 2014, Sum No19).
223. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Masalov S. A., Khomenko S. I. Using nested semi-Markov processes to describe non-stationary signals and fields: Radio Physics and Electronics, 2012. vol. 3(17). № 3. P. 57-64.
224. Басараб М. А., Волосюк В. К., Горячkin О. В., Зеленский А. А., Кравченко В. Ф., Ксендзук А. В., Кутуза Б. Г., Лукин В. В., Тоцкий А. В., Яковлев В. П. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях: [монография]; под ред. В. Ф. Кравченко.— М. : Физматлит, 2007. 544 с. ISBN 978-5-9221-0871-3.
225. Лазоренко О. В., Вишневецкий О. В., Черногор Л. Ф. Чой-вильямс-анализ в цифровой обработке сигналов: Радиофизика и радиоастрономия. 2007. Т. 12. № 4. С. 410-432.
226. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Сафин А. Р., Чуриков Д. В. Новый класс вероятностных весовых функций в цифровой обработке сигналов и изображений: Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. № 9. Т. 14. С. 31-44.
227. Рвачев В.Л., Рвачев В. О. Про одну фінітну функцію: Доповіді академії наук УРСР. Серія А. 1971. Вип. 7. С. 705-707.

228. Kravchenko V.F., Kravchenko O. V., Pustovoit V. I., Churikov D. V. Atomic Functions in Modern Problems of Radio Physics: Physical Bases of Instrumentation. Special Issue, November. 2011. P. 3-48.
229. Kravchenko V. F., Churikov D. V. Kravchenko probability weight functions in problems of radar signals correlation processing: Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2013. Vol. 4 №. 3. P. 231-237.
230. Кравченко В. Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям: - М.: Радиотехника, 2003. 512 с. ISBN 5-93108-019-8.
231. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Сафин А. Р. Атомарные функции в теории вероятностей и случайных процессов: Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 5. С. 23-37.
232. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования: Под ред. В.С. Вербы. - М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
233. Стасова В. В., Чебакова Н. М., Парфенова Е. И., Бугаенко Т. Н., Чередникова Ю. С. Структура и функционирование наземных экосистем, их биоразнообразие. Сезонная динамика содержания хлорофилла в растительности степей юга Сибири: Всероссийская конференция «Природная и антропогенная динамика наземных экосистем». Мат. Всерос. Конф. – Иркутск: 11-15 октября 2005. С. 72-74.
234. Кравченко В. Ф., Луценко В. И., Луценко И. В. Кривенко Е. В., Соболяк А. В. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши: Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 4(17). С. 3-29

ДОДАТОК А
НАУКОВІ РОБОТИ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ
РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мельяновский П. А. Спиральная антenna с поперечным излучением / П. А. Мельяновский, И. В. Попов // Радиофизика и электронника: сб. научн. тр. – 2003. – Т. 8, № 3. – Харьков. – С. 438-441.
2. Луценко И. В. Спектральные методы оценивания характеристик вторичных источников в каналах с многолучевостью / И. В. Луценко, И. В. Попов, В. И. Луценко. //, Радиофизика и электронника: сб. научн. тр. – 2006. – Т. 11, № 1. – Харьков. – С. 144- 148.
3. Луценко В. И. Использование методов обнаружения-измерения для анализа характеристик каналов с многолучевостью / И. В. Попов, И. В. Луценко, В. И. Луценко //, Радиофизика и электронника: сб. научн. тр – 2006. – Т. 11, № 2. – Харьков. – С. 305-308.
4. Луценко В.И. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона. / И.В. Попов, В.И. Луценко, В.И. Луценко // Радиофизика и электронника: сб. научн. трудов – 2007. – Т. 12, № 1. – Харьков. – С. 199-203.
5. Луценко В.И. Мониторинг воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций коротковолнового диапазона / В.И. Луценко, И.В. Луценко, И.В. Попов // Изв. Вузов Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 10-20.
6. Кравченко В.Ф. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе «магических» квадратов / Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В., Ло Иян, Мазуренко А.В., Попов И.В. // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6, № 3(25). – С. 4-27.
7. Kravchenko V.F. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays Based On Magic Squares / Kravchenko V.F., Lutsenko V. I., Lutsenko I.V. , Popov I.V., LUO

Yi-Yang, A.V.Mazurenko // Journal of Measurement Science and Instrumentation. - 2017, V.8, No 3, Sept. 2017, P. .244-253.

8. Lutsenko V. I. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions / V.F. Kravchenko, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, Luo Yiyang // Journal of Measurement Science and Instrumentation. -2017, V.8, № 1, Mar. 2017, P 37-45.

9. Lutsenko V. I. Non-equidistant two-dimensional antenna arrays are based on Latin squares for registration of cosmic, atmospheric and lithospheric radiation / Nguyen Xuan Anh, V. I. Lutsenko, Luo Yiyang, I. V. Popov // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 17, N 4B. P. 14-20.

10. Кравченко В. Ф. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе латинских квадратов / В. Ф. Кравченко, В. И. Луценко, Ло Иян, И. В. Попов // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7, № 1(27). С. 4-23.

11. Lutsenko V. I. Interference to Active-Passive Radar Systems Created by Emissions from HF and VHF Broadcasting Stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, N. X. Anh, & Y. Luo // Telecommunications and radio engineering – 2020, vol. 79, Issue 10, P 829-845.

12. Lutsenko V. I. Testing of GNSS Receivers of Space Objects in Earth Conditions and the Implementation of Spoofing using Simulator of GNSS Signals / N.X. Anh, A.G. Laush, Yu. Khomenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, & I.V. Popov // Telecommunications and radio engineering – 2020, vol. 79, Issue 20, PP 1773-1784.

13. Луценко В. И. Обнаружение–измерение параметров неизвестного количества сигналов в условиях негауссовых помех / И. В. Попов, И. В. Луценко, В. И. Луценко // АНПРЭ "Прикладная радиоэлектроника" – 2006. – Т. 5, № 3. – Харьков. – С. 378-382.

14. Луценко В. И. Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ диапазона / И. В. Попов, В. И. Луценко, И. В. Луценко // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научн. трудов. Под ред. Громыко А. И., Сарафанова А. В. М.: Радио и связь, 2006. С. 25-28.

15. Кривенко О. В. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко, І. В. Луценко, Д. О. Попов, І. В. Попов, О. В. Соболяк // ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, № 3 С.83-90.
16. Мельяновский П. А. Малогабаритный активный доплеровский калибратор / П. А. Мельяновский, И. В. Попов // 14th International Crimean Conference, Microwave and Telecommunication Technology, CriMico 2004, 13-17 September, 2004 P: 701-702.
17. Lutsenko V. I. Illumination of Air Environment Using Radiationof SB Broadcast Station / V. I. Lutsenko, I. V. Popov // International Radar Symposium IRS 2006, 24-26 May. 2006: conf. proc. – Krakov, P. 233-236.
18. Lutsenko V. I. Illumination of Air Environment Using Radiation of SW Broadcasting stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, Popov I.V. // The 5th European Radar Conference, 30–31 October 2008, Amsterdam, The Netherlands, P. 396-399.
19. Lutsenko I. V. Usage of Electromagnetic Fields of Antropogenic Irradiation Sources for Remote Sensing of Atmosphere / I. V. Lutsenko, V. I. Lutsenko, I. V. Popov, V. B. Sinitsky, E. V. Tarnavsky, N. X. Anh // The 6th European Radar Conference, 2009, EuRAD, 28 Sept - 2 Oct 2009, Rome, Italy, P. 545-548.
20. Gudkov V. N. Using Signals of the Global Navigation Satellites for Diagnostics of Above Land Troposphere Refraction / V. N. Gudkov, V. I. Lutsenko, I.V Lutsenko, N. X. Anh, I. V Popov, V. B. Sinitskiy // The 7th European Radar Conference, 2010, EuRAD, 30 Sept - 1 Oct 2010, Paris, France, P. 495-498.
21. V. I. Lutsenko Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays are Based on Magic Squares / V. I. Lutsenko, I. V. Popov, I. V. Lutsenko Luo Yiyang, A. V. Masurenko // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, 2016, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538080, IEEE Conference Publications.
22. Kravchenko V. F. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions / V. F. Kravchenko, Luo Yiyang, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and

Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, 2016, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538171, IEEE Conference Publications.

23. Луценко В. И. Мониторинг тропосферной рефракции с использованием излучений телевизионных центров на загоризонтной трассе / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И. В. Попов, Н. С. Ань (NguyenXuanAnh), Цзян Гуо (QiangGuo), Юн Джин (YuZheng) // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», 26 - 28 июня 2018г., Муром, Россия, С. 220-227.
24. Луценко В. И. Радиоклиматические особенности Вьетнама / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И. В. Попов, Н. С. Ань (Nguyen Xuan Anh) // IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26 - 28 июня 2018г., Муром, Россия, - С. 668-697.
25. V. I. Lutsenko Characteristics of Interference to Active-Passive Radar Systems from Emissions of HF and VHF Broadcasting Stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, Anh Nguyen, & Luo Yiyang. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). – P. 259-262.
26. V. I. Lutsenko Use of Radiation of Broadcast Stations of HF Range for Detection of Air Objects / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, Anh Nguyen. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). – P. 267-271.
27. V. I. Lutsenko GNSS Signal Use for Sea Waves Monitoring / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, Yi-yang Luo, Nguyen Xuan Anh, Qiang Guo, Yu Zheng. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, Volume 2 on 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – P. 768-771.

ДОДАТОК Б

ДВОКАНАЛЬНЕ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДНИХ ЗНАЧЕНЬ УКХ СИГНАЛІВ

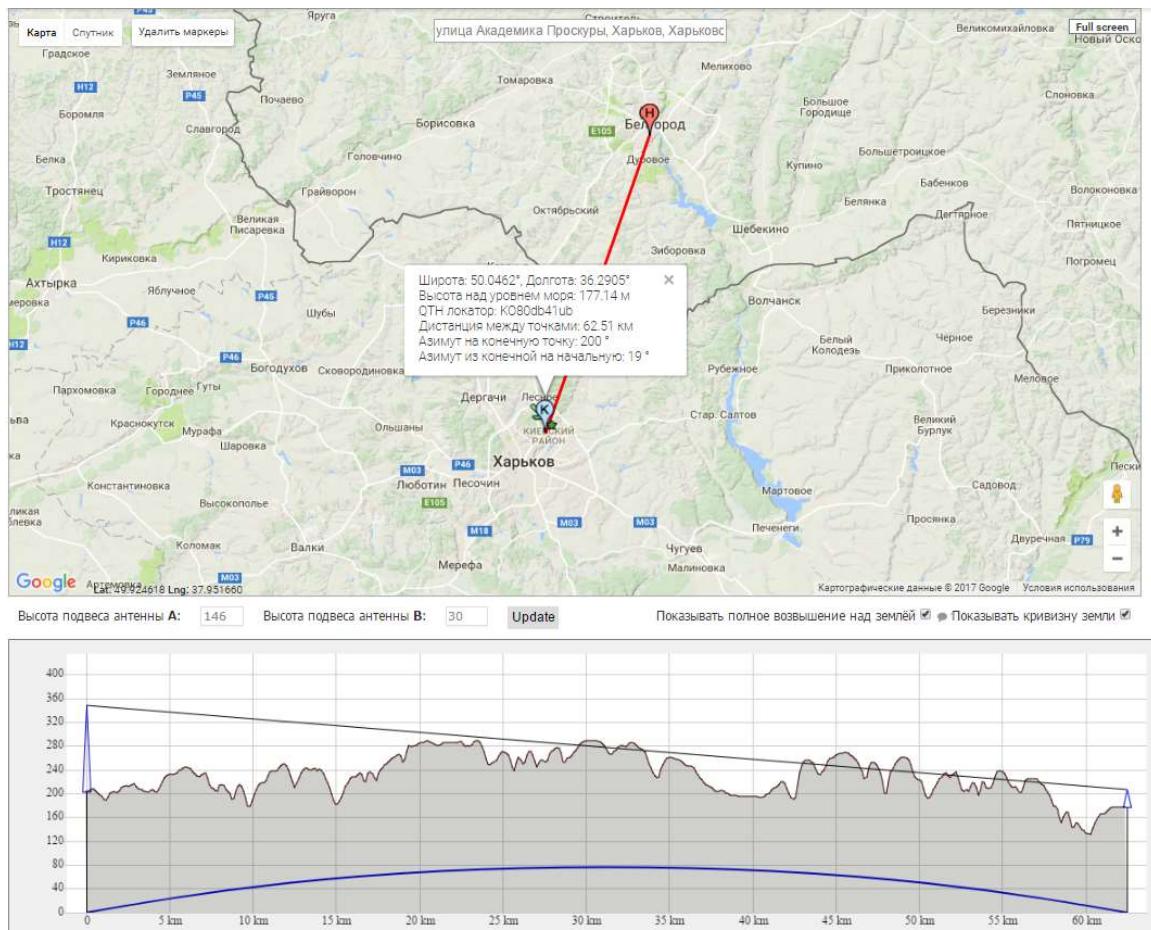


Рис. Б.1. карта місцевості з розташуванням приймального і передавального пунктів, профіль траси поширення з урахуванням висот антен та кривизни землі й профілю місцевості.

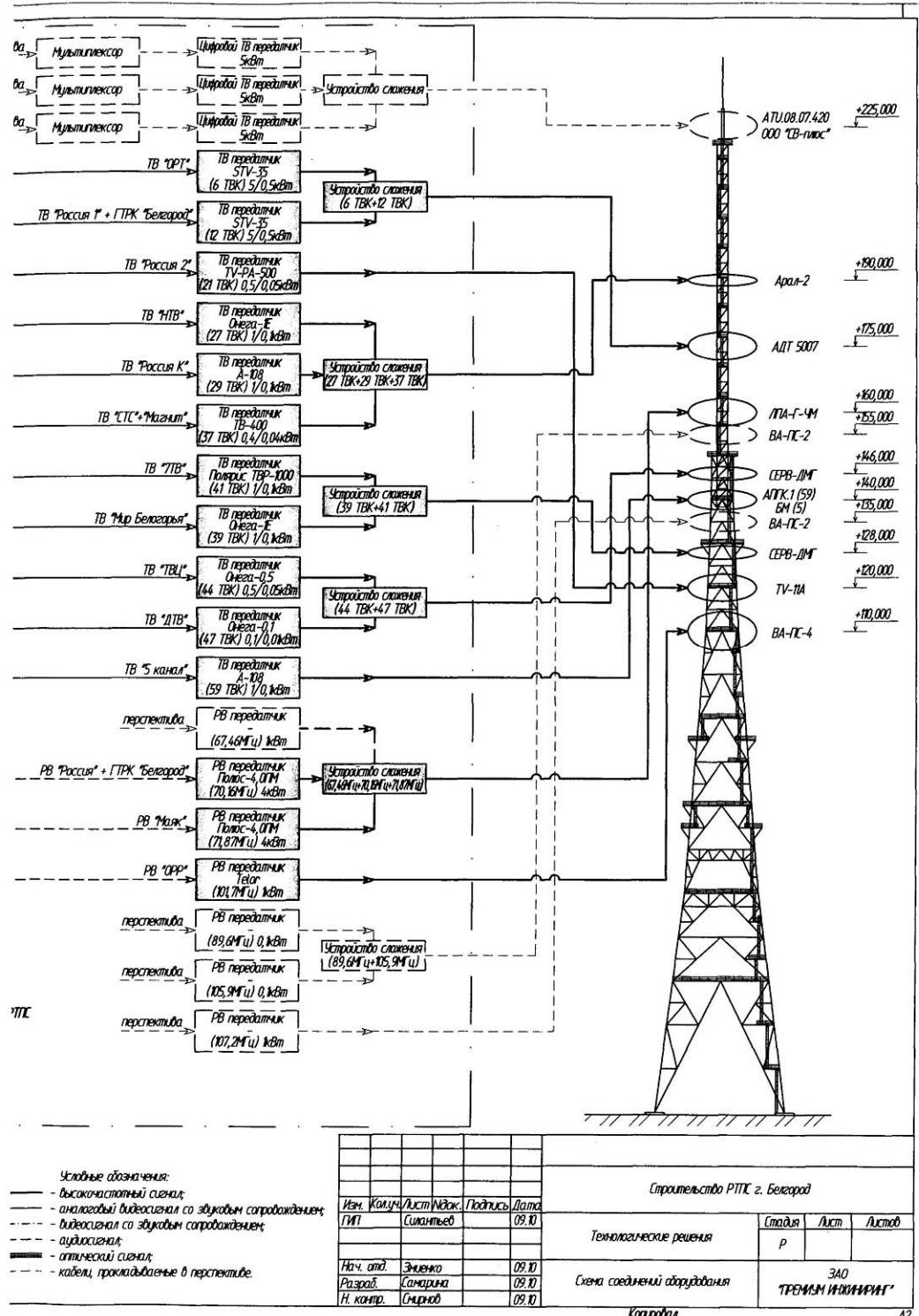


Рис. Б.2. Схема розташування передавальних антен на вежі телекентру міста Білгород.

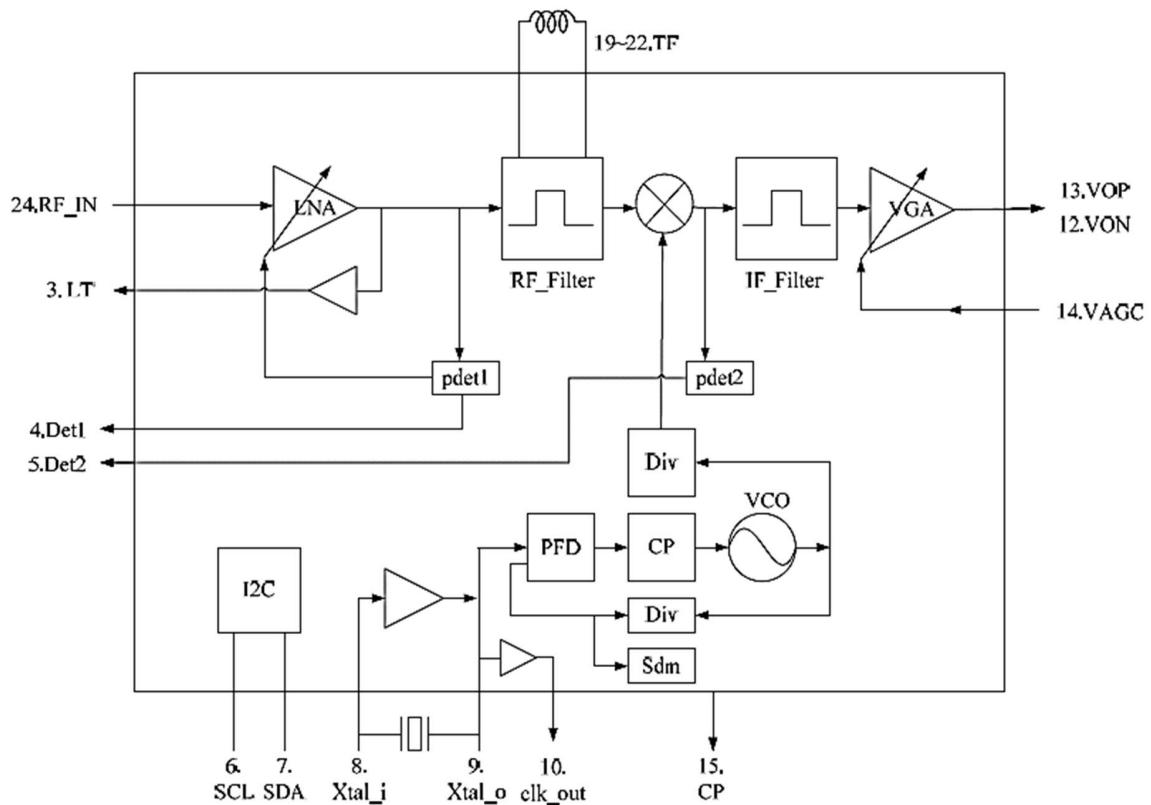


Рис. Б.3.- Структура вимірювального приймача R820T.

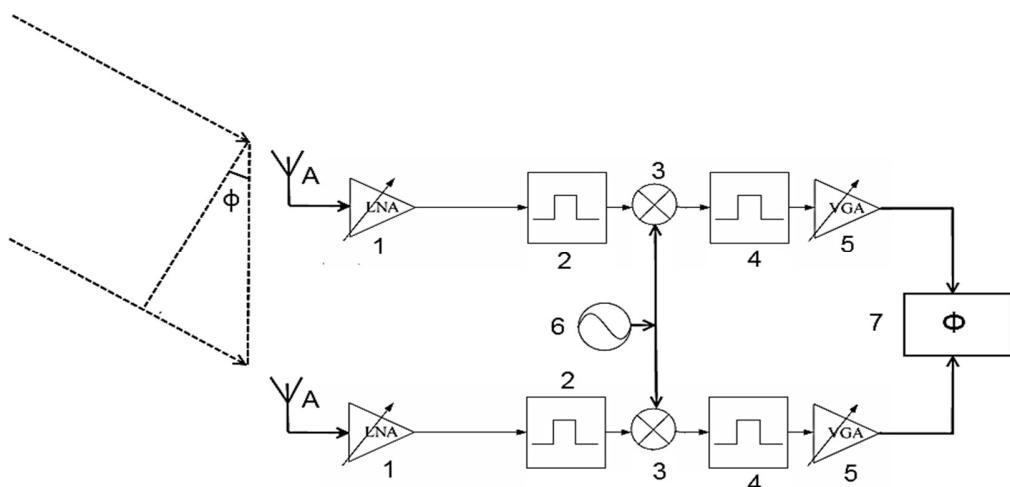


Рис. Б.4. -Структура приймача для вимірювання кутів приходу сигналів телевізійних станцій. А - приймальна антена, 1 - малошумний підсилювач ВЧ сигналу, 2 - фільтр ВЧ, 3 - змішувач, 4 - фільтр ПЧ, 5 - керований підсилювач ПЧ сигналу, 6 - генератор, керований напругою (ГКН), 7 - вимірювач різниці фаз.

Таблиця Б.1.

Використовувані в експерименті ДМВ каналі, що передаються телевізійним центром г. Білгород.

	1	2	3
Частота несучої зображення, МГц	655,25	615,25	471,25
Висота антени над рівнем Землі, м	146	128	120
Потужність передавача, Вт	500	1000	500

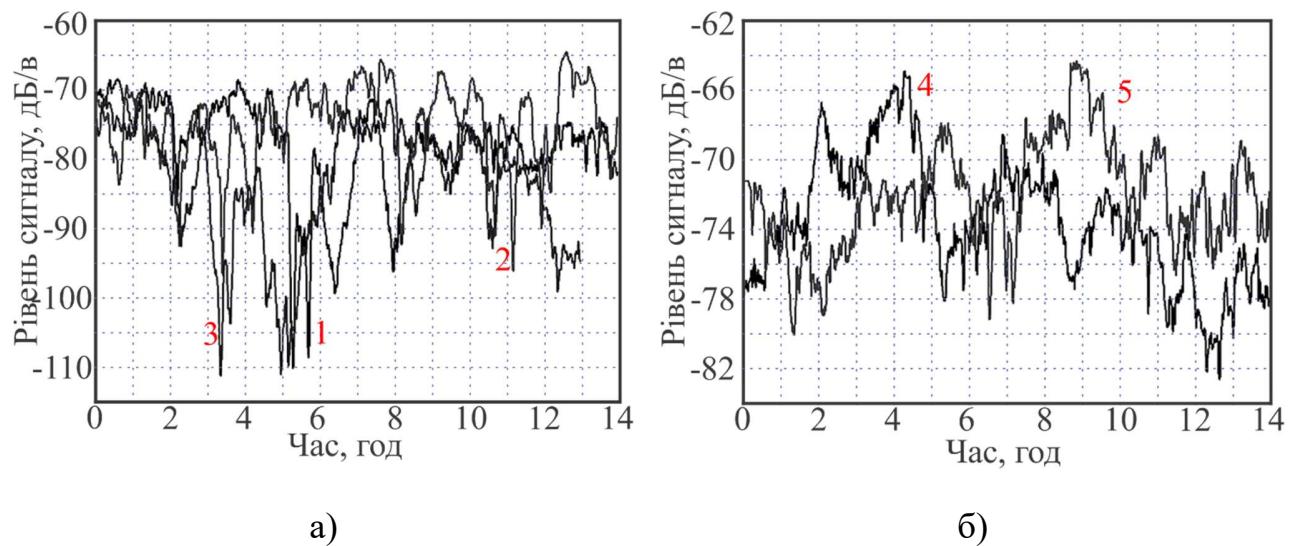


Рис. Б.5. -Типова поведінка сигналу УКХ на заобрійної трасі при наявності інверсійних шарів. Записи сигналів: а (1, 2, 3) - листопад; б (4, 5) – грудень.

Таблиця Б.2.

Характеристики інверсійних шарів, що відбивають.

Дата проведення вимірювань	Глибина завмирань ΔV , dB	Висота шару h_s , м	Середній градієнт індексу рефракції g_N , N- одиниць/м	Відносний к-т відбиття γ	К-т відбиття ρ , dB	Зміна висоти Δh , м.	Період завмірань сигналу Δt , год.	Швидкість зміни висоти шару $\Delta h_+/ \Delta t$, м / год
1	2	3	4	5	6	7	8	9
06.05.	3,5	600	-0,055	0,198793593	-31,139	26,34913	1,6	16,46821
18.05.	11	450	-0,049	0,560259208	-22,875	34,84139	1,5	23,22759
23.05.	5	50	-0,042	0,28013	-29,754	78,22695	1,25	62,58156
07.05.	15,5	450	-0,042	0,71250412	-21,645	34,4909	1,25	27,59272
17.05.	18,5	250	-0,041	0,78754936	-20,898	56,98312	2	28,49156
25.05.	20	650	-0,033	0,818181818	-21,547	23,76695	1,5	15,84463
29.05.	9,5	250	-0,045	0,498166126	-24,386	57,59329	1,5	38,39552
08.06.	10	450	-0,045	0,519493853	-24,021	34,64027	3	11,54676
13.06.	9			0,476218065		282,4583	2	141,2292
14.06.	6	450	-0,045	0,332278849	-27,903	34,64027	1,5	23,09352
15.06.	7	250	-0,044	0,382472305	-26,804	57,43964	2	28,71982
19.06.	7	450	-0,048	0,382472305	-26,313	34,7909	1,75	19,88051
20.06.	11			0,560259208		282,4583	3	94,15278
21.06.	3,5	50	-0,059	0,198793593	-30,649	89,76667	1,25	71,81334
23.06.	7	650	-0,041	0,382472305	-27,171	23,95581	1,5	15,97054

Продовження таблиці Б.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27.06.	6	250	-0,048	0,332278849	-27,535	58,05869	3	19,3529
26.06.	11		-0,046	0,560259208	-23,243		1	
03.07.	10	450	-0,0419	0,519493853	-24,401	34,48594	2	17,24297
04.07.	7	450	-0,051	0,382472305	-25,945	34,94279	3,25	10,75163
05.07.	14,5	450	-0,048	0,682984734	-21,277	34,7909	3,75	9,277573
10.07.	9			0,476218065			3,25	
11.07.	14			0,667324938			2,75	
12.07.	15			0,698040886			2,25	
13.07.	23	450	-0,049	0,867771877	-19,074	34,84139	2,5	13,93655
17.07.	13	450	-0,059	0,634157668	-20,573	35,35413	3	11,78471
18.07.	11	450	-0,054	0,560259208	-22,262	35,09596	3,25	10,79876
19.07.	7	450	-0,047	0,382472305	-26,436	34,74055	1,25	27,79244
20.07.	4	250	-0,06	0,22627364	-29,401	59,9898	0,5	119,9796
25.07.	9	450	-0,049	0,476218065	-24,286	34,84139	1,25	27,87311
26.07.	18	250	-0,058	0,77636846	-18,938	59,66	2,25	26,51556
27.07.	10	50	-0,105	0,519493853	-16,665	137,9143	2,5	55,16572
31.07.	10	50	-0,105	0,519493853	-16,665	137,9143	1,3	106,0879
31.07.	10	650	-0,049	0,519493853	-23,531			
01.08.	7	250	-0,074	0,382472305	-23,126		1,5	

ДОДАТОК В

ЕПР ДЕЯКИХ ТИПІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.

Таблиця В.1.

Габаритні розміри та ЕПР летальних апаратів

Тип літака	Призначення	Довжина, м	Розмах крила, м	Висота, м	Горизонтальна поляризація		Вертикальна поляризація	
					ЭПР/ 1000м ²	Частота МГц	ЭПР/ 1000м ²	Частоти МГц
1	2	3	4	5	6	7	8	9
C-17A	T	53	51	16,79	9,7-9	2,8-2,9	1,25	4,5
EMB-145RS	T	30	20	6,75	3-1,4	5-7,5	0,2	11,1
«Міраж»	I	15,3	9,3	4,5	0,77-0,24	10-17,9	0,09	16,7
F1								
ТА-7	Ш	14,1	11,8	4,9	0,67-0,56	10,7-17,9	0,1	15,3
«Корсар2»								
Бе-12	T	30,1	30,2	7,4	3,1	5	0,24	10,1
Бе-200	T	32	32,7	8,9	3,7-3,5	4,6-4,7	0,35	8,4
Ан-24	П	23,5	29,2	8,3	1,9-2,9	6,4-5,1	0,31-0,33	9-8,7
Ан-26	T	23,8		8,6				
Ан-22	T	57,3	64,4	13,5	12,5-13,5	2,6-2,3	0,81	5,6
Ан-72	T	28	31,9	8,7	2,7-3,5	5,4-4,7	0,34	8,6
Ан-74								
Іл-18	П	35,9	37,4	10,2	4,4-4,8	4,2-4	0,46	7,4
Іл-62	П	53,1	42,5	12,3	9,7-6,2	2,8-4,5	0,67	6,1
Іл-76	T	46,6	50,5	14,8	7,5-8,8	3,2-3	0,97	5,1
Іл-114(Т)	П(Т)	26,9	30	9,3	2,5-3,1	5,6-5	0,38	8,1

Продовження таблиці В.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ту160	СБ	54,1	35,6-55,7	13,1	4,4-10,7	4,2-2,7	0,76	5,7
Ту22М3	СБ	41,46	23,3- 34,28	11	1,9-5,9	6,4-3,6	0,54	6,8
Б-52	СБ	49,05	56,39	12,4	8,3-10,9	3,1-2,7	0,68	6
Міг-29	И	17,32	11,36	4,73	0,4-1	13,2-8,7	0,099	15,9
Су-57	И	19,7	14/10,8 зад.	4,8	13,0	2,6-2,3	0,81	5,6
B2	СБ	20,9	52,12	5,1	1,72-0,87	3,8-5,4	0,10	15,6
F-22	И	18,9	13,56	5,09	1,94-12,06	3,6-1,4	0,12	14,7
F-35	И	15,57	10,67	4,38	1,59-0,82	4,0-5,5	0,12	14,7
J-31	И	16,9	11,5	4,8	1,08-0,51	4,8-7,0	0,09	17,1
J-21	И	10,5	11,6	4,0	0,48-0,6	7,2-6,5	0,07	18,9

Примітки:

Т - транспортний;

СБ - стратегічний бомбардувальник;

Б бомбардувальник

П - пасажирський;

Ш - штурмовик;

И - винищувач.

ДОДАТОК Г

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ І МОНІТОРИНГ
ХВИЛЮВАННЯ*Таблиця Г.1.*

Технічні характеристики приймача CH-4706:

Сигнали, що приймаються:	GPS/GALILEO/COMPASS/SBAS: L1 1575.42 MHz ГЛОНАСС: L1 1597.5...1609.5 М
Кількість каналів стеження:	32
Точність отримання навігаційних параметрів (RMS):	<ul style="list-style-type: none"> • в площині: - в автономному режимі 2.5 м - в диференціальному режимі 1 м • висоти 3 м • швидкості 0.05 м/с • часу (1PPS) ± 25 нс
Час отримання першого достовірного навігаційного рішення:	<ul style="list-style-type: none"> • перезахват < 1 с • «гарячий» старт < 3 с • «холодний» и «теплий» старт 30 с
Чутливість:	<ul style="list-style-type: none"> • супроводження –190 дБт • «холодний» старт –173 дБт
Обмеження на використання:	<ul style="list-style-type: none"> • Швидкість < 500 м/с • прискорення < 5 g • висота < 18 000 м
Системи координат	WGS-84, ПЗ-90 СК-42, СК-95
Тип антени	активна

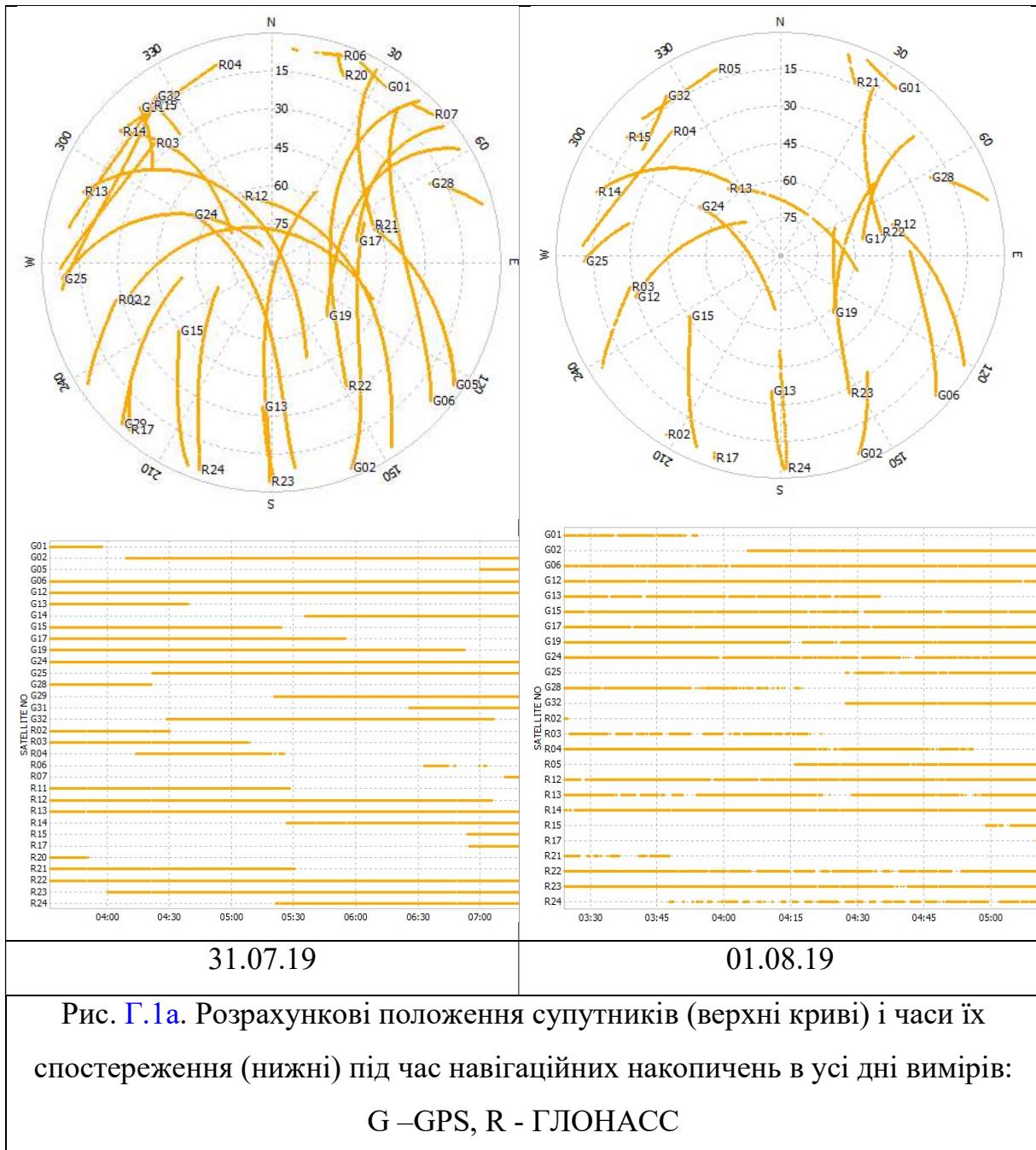


Рис. Г.1а. Розрахункові положення супутників (верхні криві) і часи їх спостереження (нижні) під час навігаційних накопичень в усі дні вимірювань:

G –GPS, R - ГЛОНАСС

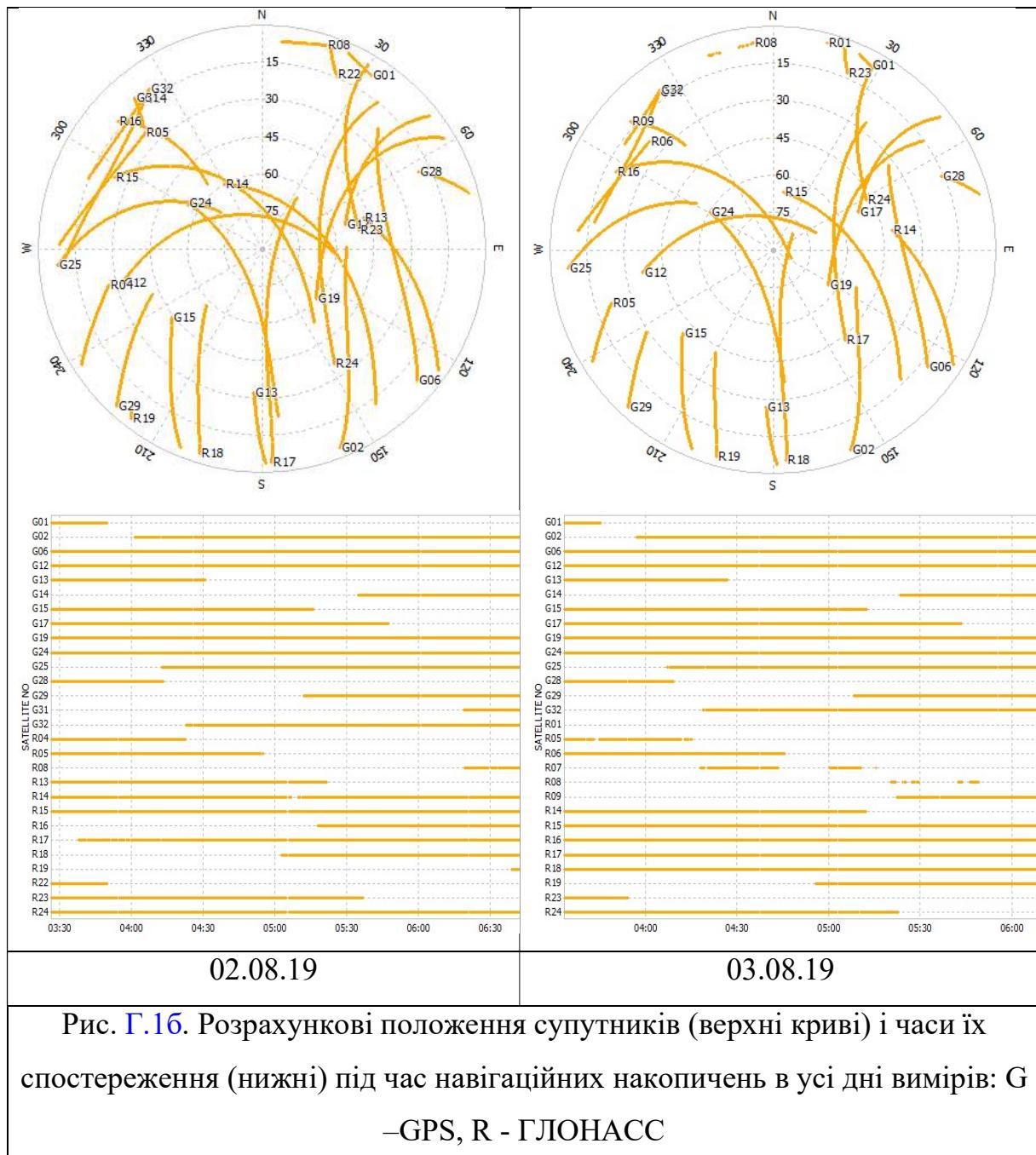


Рис. Г.16. Розрахункові положення супутників (верхні криві) і часи їх спостереження (нижні) під час навігаційних накопичень в усі дні вимірювань: G –GPS, R - ГЛОНАСС

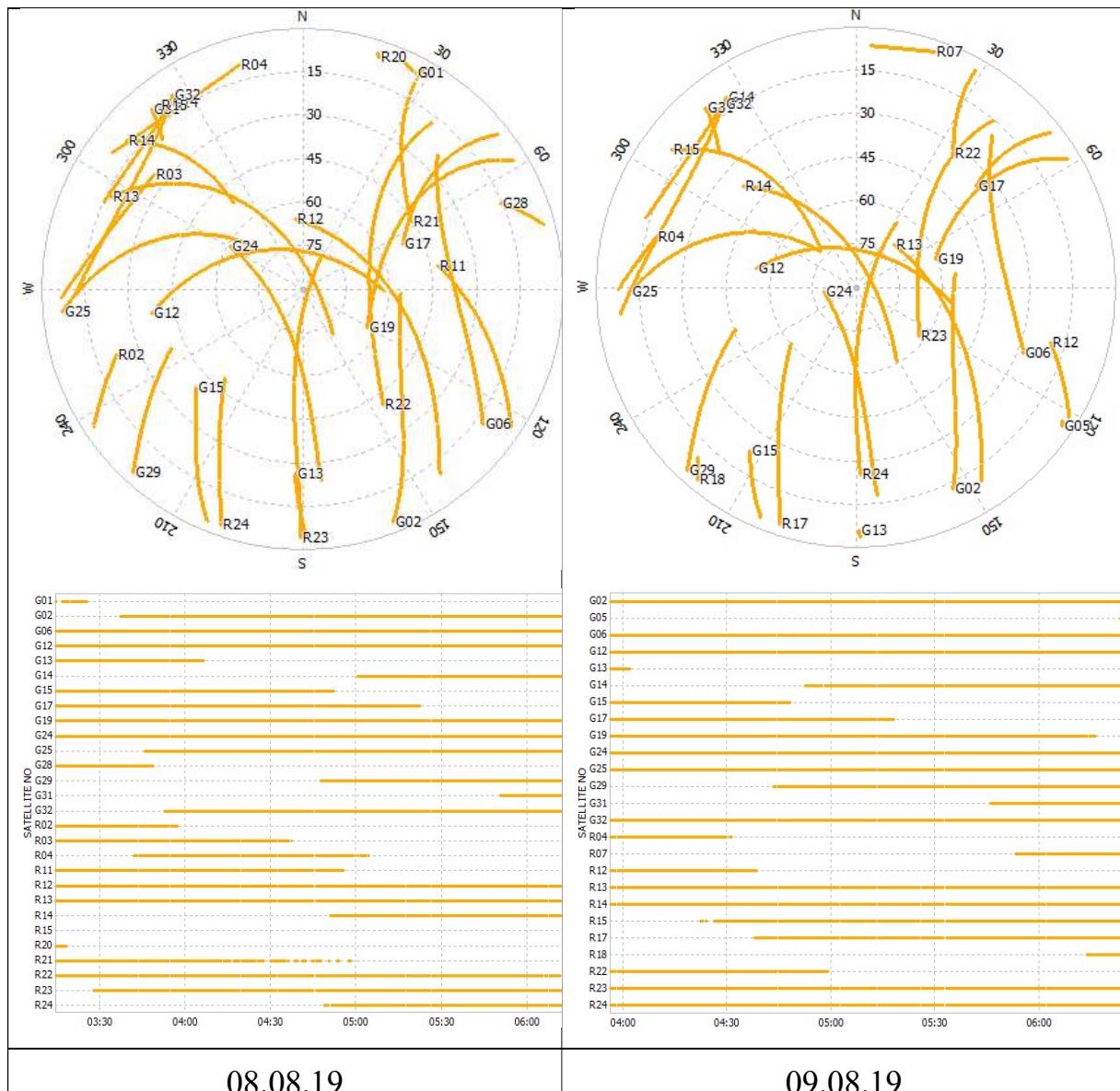


Рис. Г.1в. Розрахункові положення супутників (верхні криві) і часи їх спостереження (нижні) під час навігаційних накопичень в усі дні вимірювань:
G –GPS, R - ГЛОНАСС

ДОДАТОК Д

АПАРАТУРА І ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНЦІЙ ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЗАВАД, СТВОРЮВАНИХ ВИПРОМІНЮВАННЯМ МОВНИХ СТАНЦІЙ УКХ І КХ ДІАПАЗОНІВ

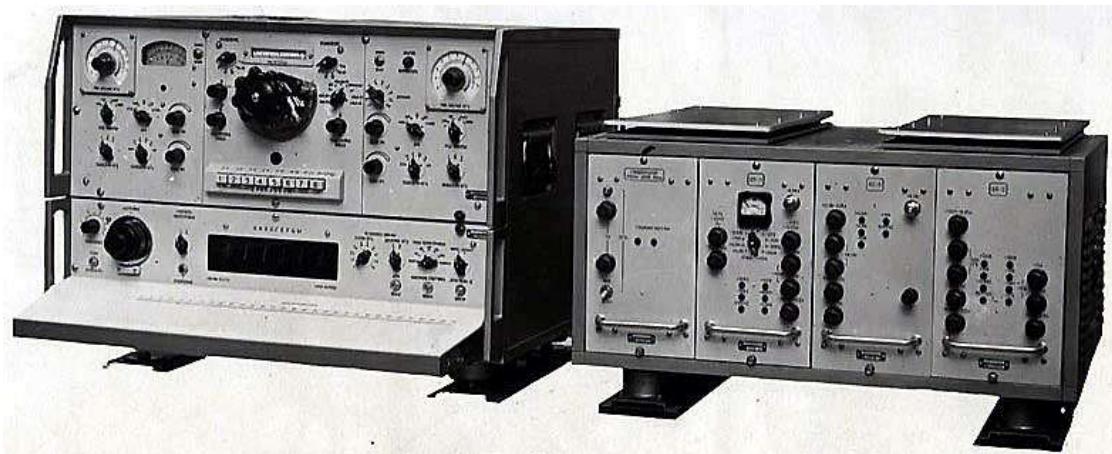


Рис. Д.1 Зовнішній вигляд радіоприймача «Канал-Р»: 1 блок двоканального приймача; 2 блок живлення приймача.

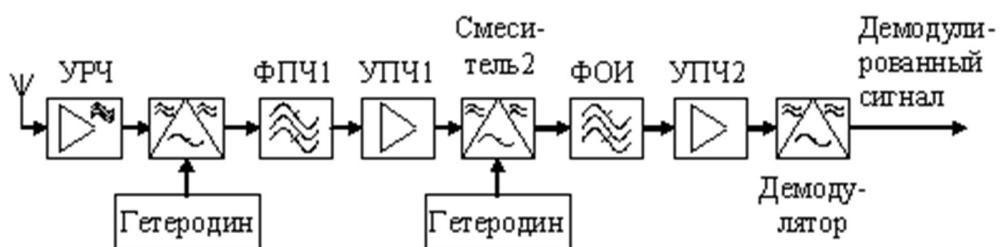


Рис. Д.2 Структурна схема одного каналу супергетеродинного радіоприймача Канал - Р з подвійним перетворенням частоти

Таблиця Д.1

Технічні характеристики професіонального приймача «Канал-Р»

Характеристика	Значення				
Діапазон частот	2 - 32 МГц				
Шкала	цифрова				
Дискретність підстроювання	не більше 5 Гц				
Швидкість автоматичної перебудови	0.3 - 20 КГц/сек (забезпечується реверс напрямки перебудови)				
Межі автоматичної перебудови	в діапазоні 2-4 МГц	не менше 160 кГц			
	в діапазоні 4-12 МГц	не менше 300 кГц			
	в діапазоні більше 12 МГц	не менше 540 кГц			
Види сигналів	CW, AM				
Схема радіоприймача	супергетеродин з подвійним перетворенням				
Динамічний діапазон	не менше 60 dB (по двом потужним сигналам, які відрізняються від основного на 5-10 кГц)				
Частоти ПЧ	1) 1.73 МГц 2) 215 кГц				
Ширина смуги пропускання по другій ПЧ	0.3; 1.2; 3.0; 6.0; 10.0 кГц				

Продовження таблиці Д.1

Характеристика	Значення	
Вибірковість (по дзеркальному каналу)	в діапазоні до 20 МГц	не менше 80 dB
	в діапазоні 20-28 МГц	не менше 70 dB
	в діапазоні більше 28 МГц	не менше 60 dB
Вибірковість (двох сигнална)	при різниці частот = Fпр. або 1ПЧ	не менше 70 dB
	при різниці частот = 2ПЧ	не менше 80 dB
Вибірковість (по 1 и 2 ПЧ)	не менше 80 dB	



Рис. Д.3 Стaцiонарний супергетеродинний короткохвильовий радiоприймач Катран Р-399А

Таблиця Д.2

Основні технічні характеристики приймача Катран

Діапазон частот які приймаються:	1 - 31.999999 МГц
Крок настройки:	вручну $1/10$ Гц
	автоматично от 2 ± 1 до 60 ± 20 кГц /сек
Види сигналів:	AM/CW/SSB (USB/LSB)
Кількість каналів пам'яті:	60
Час налаштування на будь-яку частоту по зовнішньому коду:	не більше 50 мс
Добова нестабільність (відносна) частоти настройки:	не більше 2.5×10^{-8} (після чотиригодинного прогріву с ОГ "Гіацінт-М")
Проміжні частоти:	1 ПЧ = 34.785 МГц; 2 ПЧ = 215 кГц
Чутливість:	2.0 мкВ (AM); 0.6 мкВ (CW/SSB)
Динамічний діапазон:	не менше 70 dB
Рівні ослаблення сигналу на вході аттенюатором:	0; 10 ± 3 ; 20 ± 3 ; 30 ± 3 ; 40 ± 3 dB
Ефективність РРУ по ПЧ:	не менше 80 dB (відносно початкового рівня на вході РПУ 1 мкВ)
Ефективність РРУ по НЧ:	не менше 34 dB

Продовження таблиці Д.2

Ослаблення чутливості:	не менше 80 dB (по дзеркальним, напівдзеркальним і побічних каналах прийому)
	не менше 82 dB (по каналах прийому на частотах, рівних проміжним)



Рис. Д.4 Мультимедійний, всехвильовий, цифровий радіоприймач DEGEN DE-1127с MP3 плеєром та диктофоном.

Таблиця Д.3

Технічні характеристики приймача DEGEN, модель: DE-1127

№ п/п	Характеристика	Величина	Примітка
1	FM, МГц або	64.0...108.0 87.0...108.0	Встановлюється в меню
2	AM, для Європи и Азії кГц або для Північної Америки	522...1710 520...1710	9 кГц крок настройки 10 кГц крок настройки
4	SW, МГц	2.30...23.00	
5	Чутливість, обмежена шумом: FM, мкВ, MW, мВ/м SW, мкВ	< 5 < 2.5 < 50	
6	Вибірковість, дБ	> 40	
7	Цифрове керування гучністю	31 рівень	

Таблиця Д.4

Характеристики станцій підсвічування

№	Станція підсвічування	Відстань до Харкова, км	Азимут, град.	Тип	Частота мовлення кГц	Потужність передавача, кВт
1	Shijiazhuang, China	6098	70.4°	Багато-стрибкова	17735	500
2	Kashi, China	3302.6	95.2°	Одно-стрибкова	17490	500
3	Issoudun, France	2524	275,6°	Одно-стрибкова	17735	500
4	Emirler, Turkey	1196	194°	Одно-стрибкова	13635	500
5	Sirjan, Iran	2805	137.1°	Одно-стрибкова	15150	500
6	Islamabad, Pakistan	3523	107.3°	Одно-стрибкова	11645	100
7	Issoudun, France	2524,2	275,6	Одно-стрибкова	17735	500
8	Issoudun, France	2524,2	275,6	Одно-стрибкова	17735	500
9	Emirler, Turkey	1196.0	194.1	Одно-стрибкова	13635	500

Таблиця Д.5

Характеристики КХ станцій підсвічування іоносферної хвилі.

№ Рис.	Назва станції	Час запису (UTC)/Дата	Частота, кГц	Потужність, кВт	Напрям роботи, град.	Координати	Кут на Харків	Рівень 0...60/100/режи- м
1	2	3	4	5	6	7	9	10
1.1	Radio Taiwan Int.	15 : 07 / 25.06. 2016	7385	100	352	25°4'N, 1 21°31'E	124.8 769°	-47-37/- 14 mp3
1.2	Radio Taiwan Int.	15 : 10 / 25.06. 2016	7385	100	352	25°4'N 121°31' E	124.8 769°	-47-37/- 14 mp3
1.3	Voice Of Tajik	19 : 33 / 29.06. 2016	7245	100	ND	37°32'N 68°42'E	93.55 24°	-37-34/- 12 wav
1.4	China Radio Int.	19 : 40 / 29.06. 2016	7265	500	308	39°21'N 75°45'E	97.21 26°	-36-28/- 18 mp3
1.5	China Radio Int.	19 : 44 / 29.06. 2016	7385	500	294	39°21'N 75°45'E	97.21 26°	-37-30/- 12 wav

Продовження таблиці Д.5

1	2	3	4	5	6	7	9	10
1.6	China Radio Int.	19 : 46 / 29.06. 2016	7395	500	308	39°21'N7 5°45'E	97.21 26°	-82-80/-35
2.1	Voice Of Turkey	19 : 53 / 29.06. 2016	9460	500	310	39°29'N, 32°51'E	199.7 819°	-105-75/-50 mp3
2.2	China Radio Int.	20 : 00 / 29.06. 2016	9600	500	308	39°21'N7 5°45'E	97.21 26°	-110-80/-25 mp3
2.3	Radio Romania Int.	05 : 43 / 30.06. 2016	9620	300	285	47°15'N2 7°26'E	257.6 368°	-95-90/-25 wav
3.1	Radyoya Denge Kurdistane	05 : 47 / 30.06. 2016	1160	300	116	47°17'N2 9°24'E	252.1 593°	-100-90/-45 mp3
3.2	Radio Dabanga	05 : 51 / 30.06. 2016	1380	250	335	18°43'N4 7°37'E	156.2 493°	-90-75/-45 mp3
3.3	Radio Saudi	05 : 57 / 30.06. 2016	1517	500	335	24°30'N4 6°23'E	154.4 945°	-110-85/-50 mp3

Продовження таблиці Д.5

1	2	3	4	5	6	7	9	10
3.4	China Radio Int.	06 : 02 / 30.06.2016	17520	500	294	39°21'N 75°45'E	97.2126 °	-80-70/-23 mp3
4.1	Radyoya Denge Kurdistane	09 : 26 / 30.06.2016	11600	300	116	47°17'N 29°24'E	252.159 3°	-85-80/-40 mp3
4.2	China Radio Int.	09 : 31 / 30.06.2016	15665	500	308	43°35'N 87°30'E	114.981 3°	-120-90/- 45 mp3
4.3	China Radio Int.	09 : 34 / 30.06.2016	17490	500	308	39°21'N 75°45'E	97.2126 °	-85-80/-23 wav
4.4	China Radio Int.	09 : 37 / 30.06.2016	17570	500	308	43°35'N 87°30'E	114.981 3°	
4.5	Radio Farda	09 : 39 / 30.06.2016	17880	100	85	49°41'N 8°30'E	266.363 8	
5.1	Radio Romania Int.	13 : 41 / 30.06.2016	11950	3000	285	47°15'N 27°26'E	257.636 8°	

Продовження таблиці Д.5

1	2	3	4	5	6	7	9	10
5.2	PBS Xinjiang	13 : 44 / 30.06.16	13670	100	230	44°08'N 86°53'E	115.23 69°	
5.3	Athmeey aYatra Radio	13 : 47 / 30.06. 2016	15350	250	89	52°38'N 12°54'E	291.01 83°	
5.4	China Radio Int.	13 : 50/ 30.06. 2016	17650	500	308	39°21'N 75°45'E	97.212 6°	
6.1	VO ISLAMI C REP.IRA N	21 : 26 / 30.06. 2016	7285	500	289	29°28'N 60°53'E	118.46 24°	
6.2	China Radio Int.	21 : 28 / 30.06. 2016	7415	500	308	39°21'N 75°45'E	97.212 6°	
6.3	China Radio Int.	21 : 31 / 30.06. 2016	9430	500	308	43°35'N 87°30'E	114.98 13°	