

*Л.Я. СМЕЛЬЯНОВ, канд. фіз.-мат. наук, О.В. БОГОМАЗ, канд. техн. наук,
Ю.І. ПОД'ЯЧИЙ, канд. фіз.-мат. наук, А.Є. МІРОШНИКОВ*

**ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РАДІОПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ
РАДАРІВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ НДІ ІОНОСФЕРИ НТУ «ХПІ»**

Вступ

Дослідження навколоземного плазмового середовища (іоносфери) є важливими для зміцнення безпеки критичної інфраструктури наземного та космічного базування. Наприклад, під час потужних геомагнітних бур це середовище істотно трансформується, що має негативний вплив на супутниковий зв'язок і навігацію, зокрема, на управління рухом повітряних суден [1], а також на рух космічних апаратів [2].

Метод некогерентного розсіяння (НР) є найбільш інформативним методом дослідження іоносфери. Він дозволяє одночасно визначати низку параметрів іоносфери у великому діапазоні висот з достатньою роздільною здатністю за висотою [3]. Цей метод містить у собі зондування іоносфери потужним сигналом, приймання слабкого сигналу, некогерентно розсіяного іоносферною плазмою, та цифрову обробку прийнятого сигналу.

Для визначення параметрів іоносфери методом НР використовуються великогабаритні антени, потужні радіопередавальні та чутливі радіоприймальні системи [3–10]. Удосконалення обладнання, методів вимірювань, а також алгоритмів обробки даних проводилося на існуючих у світі радарів НР і є актуальним на даний момент [6–12]. Радіофізичне обладнання НДІ Іоносфери [13, 14] також постійно удосконалюється відповідно до розвитку принципів радіолокації розподілених цілей, електронних компонентів і комп'ютерних технологій.

Обсерваторія НДІ Іоносфери розташована поблизу м. Харків. Вона має у своєму складі два радарів НР, іонозонд і GNSS-приймальну станцію.

Радіоприймальна система (РПрС) використовується у складі радарів НР для посилення, перетворення та селекції прийнятого некогерентно розсіяного іоносферою сигналу. Вона є однією з основних систем, що визначають точність вимірювання параметрів іоносфери. Крім дослідження іоносфери вона дозволяє здійснювати моніторинг геокосмічного простору. Одночасно з іоносферними вимірюваннями РПрС використовується для виявлення та вимірювання параметрів космічних об'єктів (дальності та радіальної швидкості), зокрема космічного сміття. В активному режимі роботи радарів або під час автономної роботи РПрС вона дозволяє спостерігати ефективну температуру неба подібно радіоастрономічному приймачу. Модернізація апаратури для покращення моніторингу геокосмосу є в наш час актуальною задачею, оскільки протягом останніх років значно збільшилася кількість штучних космічних об'єктів і космічного сміття і через це підвищилася ймовірність їх зіткнення, у ряді випадків супутники сходили зі своїх орбіт через вплив космічної погоди [15–19].

Порівняно з радіолокаційними приймачами [20] до чутливості, стабільності та завадостійкості РПрС радарів НР висуваються більш жорсткі вимоги. Вони, зокрема, пов'язані з прийманням і первинною обробкою некогерентно розсіяних іоносферою сигналів, потужність яких часто нижча за потужність космічних і апаратних шумів. На відміну від радіоастрономічних приймачів [21, 22], РПрС радарів НР працює в умовах зондування потужними (порядку 2–3 МВт) радіоімпульсами, що потребує ефективного захисту приймача під час випромінювання.

Некогерентно розсіяний іоносферною плазмою сигнал за своєю фізичною природою є випадковим процесом. У процесі його обробки його потужність (а також кореляційна функ-

ція) визначається у вигляді різниці потужності (кореляційної функції) адитивної суміші сигналу та шуму, що вимірюється на ділянках радіолокаційної розгортки, які відповідають досліджуваним висотам, і потужності (кореляційної функції) шуму, усередненої по декількох ділянках розгортки, де НР сигнал відсутній. Тому точність вимірювання параметрів корисного сигналу і, отже, параметрів іоносфери значною мірою залежить від чутливості РПрС і стабільності її параметрів протягом періоду зондування (радіолокаційної розгортки). В умовах моніторингу геокосмосу значення має й довготривала стабільність параметрів радіоприймального тракту.

Одним з основних параметрів іоносфери є швидкість руху іоносферної плазми, визначення якої здійснюється вимірюванням доплерівського зсуву центральної частоти спектра НР сигналу. Цей зсув надзвичайно малий (на 2–3 порядки менше ширини спектра НР сигналу, яка складає одиниці кілогерц, і на 8 порядків менше носійної частоти радару). Це ще більше посилює вимоги до взаємної стабільності частот радіопередавального пристрою радару й гетеродинів РПрС.

За останні роки комп'ютерні технології отримали широкий розвиток. На їх базі створено нову архітектуру побудови радіосистем – програмно визначене радіо (Software Defined Radio, SDR), що знайшла своє застосування у військовому та цивільному радіозв'язку, а також у науковому обладнанні для проведення моніторингу стану геокосмічного середовища. Більше того, усі радіосистеми моніторингу, що розроблюються в наш час, належать до класу SDR, тобто є програмованими радіосистемами [23–30].

Розробка високочастотної програмованої радіосистеми дозволить впровадити на радарі НР нові режими зондування, зокрема з використанням складних сигналів з фазовою маніпуляцією, що покращить висотне розрізнення. Крім того на даний час застосування ручного конфігурування систем радару (задавальної, радіопередавальної, радіоприймальної та обробки даних) значно ускладнює оперативний перехід з одного режиму роботи радарів до іншого та практично унеможливлює введення нових режимів. Впровадження програмованої радіосистеми дасть змогу гнучкої зміни конфігурації апаратних систем шляхом завантаження до комп'ютера відповідного програмного забезпечення.

У статті наведено сучасний стан радіоприймальної системи, яка була розроблена, впроваджена, використовується протягом багатьох років у складі радару НР НДІ Іоносфери й постійно вдосконалюється. Приведено особливості нової розробки: універсальної програмованої радіосистеми, яка значно розширює можливості моніторингу геокосмосу.

Комплекс радарів некогерентного розсіяння НДІ Іоносфери

Радари НР НДІ Іоносфери є єдиними, що розташовані в середньоширотній Європі. Перший з них має спрямовану в zenit параболічну дводзеркальну антену типу Касегрена діаметром 100 м (НДА-100). Ширина основної пелюстки діаграми спрямованості антени становить приблизно 1°, ефективна площа антени близько 3700 м². Другий радар має повноповоротну параболічну антену діаметром 25 м (ППА-25). Ширина основної пелюстки діаграми спрямованості антени становить 5,1°, ефективна площа антени близько 290 м². Робоча частота обох радарів 158 МГц. Кожний з радарів випромінює імпульсний сигнал потужністю 2 МВт. Поляризація радіохвилі, що випромінюється, кругова або лінійна. Частота повторення зондувальних радіоімпульсів дорівнює 24,4 Гц. Шумова температура радіоприймальних пристроїв (РПрП) дорівнює 120–140 К, а смуга пропускання – 11–19 кГц. Основним інструментом є радар зі 100-метровою в діаметрі антеною. У складі радарів є потужні радіопередавачі (по два в кожному радарі), антенно-фідерні двоканальні системи з комутаторами «прийм-передача», багатоканальна високочутлива радіоприймальна система, задавальна система, системи обробки та керування.

Випромінюючі елементи антен складаються з двох ортогональних вібраторів, завдяки чому забезпечується можливість роботи радару НР із сигналами з круговою поляризацією (для уникнення спотворень висотного профілю потужності НР сигналу в результаті впливу

ефекту Фарадея) або двома сигналами з лінійною поляризацією (для вимірювання концентрації електронів із застосуванням ефекту Фарадея [31, 32].

Радари можуть працювати як поодиночі, так і обидва одночасно. Вони мають ідентичні структурні елементи й параметри (за винятком антен).

В залежності від поставленої задачі та геофізичних умов використовується декілька режимів роботи радара НР. Переважно використовуються такі режими зондування [14].

Режим зондування складовим радіоімпульсним двочастотним сигналом, один з елементів якого має тривалість 660 мкс (або, в окремих експериментах, 725 мкс) і носійну частоту $f_0 = 158$ МГц, а другий – тривалість 135 мкс (або 65 мкс) і частоту $f_1 = f_0 + 0,1$ МГц (рис. 1, а).

У РПрС здійснюється частотна селекція некогерентно розсіяних сигналів і виділення квадратурних сигналів для кожного з елементів за допомогою синхронного детектування. У результаті приймання й обробки розсіяного іоносферою сигналу від першого елементу визначаються його кореляційні функції (КФ) $R(t, \tau)$ для ряду дискретних моментів часу t , що відповідають висотам іоносфери $h = ct/2$ (c – швидкість світла). З використанням $R(t, \tau)$ обчислюються концентрація електронів N_e , температури іонів T_i і електронів T_e , вертикальна швидкість руху плазми V_z і іонний склад (зокрема кисню O^+ , водню H^+ , гелію He^+) для низки висот поблизу та вище максимуму іонізації з роздільною здатністю за висотою близько 100 км. Сигнал розсіяння від другого елементу використовується для визначення потужності $P(h)$ НР сигналу, розсіяного плазмою в діапазоні висот 100–550 км, з роздільною здатністю за висотою 20 км (або 10 км) і розрахунку висотного профілю концентрації електронів $N_e(h)$. Цей режим роботи радара НР на теперішній час є основним.

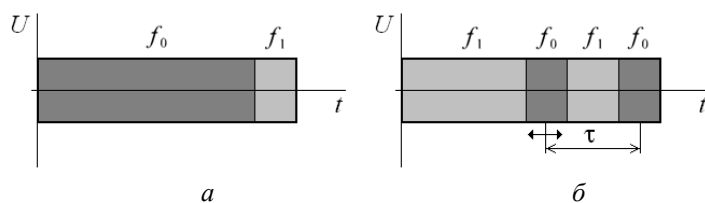


Рис. 1. Зондувальні сигнали в режимі випромінювання двочастотного радіоімпульсу з довгим і коротким елементами (а) та режимі зондування іоносфери циклічною послідовністю коротких одиночних і здвоєних радіоімпульсів (б)

Режим зондування іоносфери циклічною послідовністю одиночних і здвоєних радіоімпульсів використовується для вимірювання параметрів іоносфери в діапазоні висот 100–550 км. У цьому режимі передавач випромінює один (для вимірювання потужності) або два (для вимірювання КФ НР сигналу) коротких (~150 мкс) імпульси зі змінною затримкою між ними (160–1000 мкс), що змінюється від періоду до періоду випромінювання на постійну величину (~40 мкс). З метою уникнення похибок вимірювання іоносферних параметрів, спричинених неідентичністю здвоєних радіоімпульсів (в першу чергу, похибки визначення швидкості руху іоносферної плазми), використовується модернізований режим зондування здвоєними імпульсами – випромінюється складовий сигнал з частотою елементів коротких імпульсів $f_0 = 158$ МГц і міжімпульсним ВЧ заповненням на зсунутій частоті $f_1 = f_0 + 100$ кГц (рис. 1, б).

Режим вимірювання концентрації електронів з використанням ефекту Фарадея. У цьому режимі випромінюється радіохвиля з лінійною поляризацією. Структура зондувального сигналу є такою, що наведена на рис. 1, а, але короткий елемент має частоту f_0 , а довгий елемент – f_1 . Приймання лінійно поляризованих сигналів здійснюється двома взаємно ортогональними вібраторами антени НДА-100, двома каналами фідерної системи й підключеними до них ідентичними РПрП. Обробці підлягають луна-сигнали від короткого елемента зондувального сигналу, тривалість якого складає 135 мкс. Висотний профіль концентрації електронів визначається з отриманих профілів потужностей сигналів на виходах двох приймальних трактів.

Проведення експериментів з одночасним зондуванням у вертикальному й похилому напрямках значно підвищує можливості дослідження іоносфери і, зокрема, динамічних

процесів в іоносфері методом НР [33], але споживана за цих обставин електроенергія зростає майже вдвічі. Робота двох радарів з одночасним зондуванням іоносфери двома антенами, спрямованими вертикально, дозволяє порівнювати результати, отримані незалежними радарними, але із зондованими об'єктами іоносферної плазми, що відрізняються.

Для реалізації роботи радарів з одночасним використанням зенітної та повноповоротної антен були вирішені такі задачі:

- забезпечити синхронну роботу всіх пристроїв радарної установки;
- забезпечити електромагнітну сумісність при синхронній роботі радарів;
- забезпечити вимірювання КФ сигналу НР на низькій частоті.

Першу задачу вирішено завдяки використанню спільного для обох радарів синхронізатора (пристрою керування), який формує сигнали запуску передавачів, сигнали стробування виділення зондувальних імпульсів, бланкувальні імпульси, призначені для замикання РПрП під час зондування та сигнал початку періоду посилок (початку радіолокаційної розгортки), що подається на цифрові пристрої обробки.

Електромагнітна сумісність радарів із зенітною та повноповоротною антенами досягається використанням сигналів з круговою поляризацією з протилежними напрямками обертання вектора електричного поля та екранування окремих вузлів апаратури.

Остання задача полягає в перенесенні в кожному радарі спектра НР сигналу на нульову частоту з точністю до доплерівського зсуву, обумовленого рухом плазми вздовж напрямку зондування, і виділення квадратурних сигналів для кореляційної обробки сигналів на низькій частоті з можливістю визначення швидкості цього руху. Це забезпечується когерентною роботою радарів.

Структурна схема комплексу радарів НР показана на рис. 2.

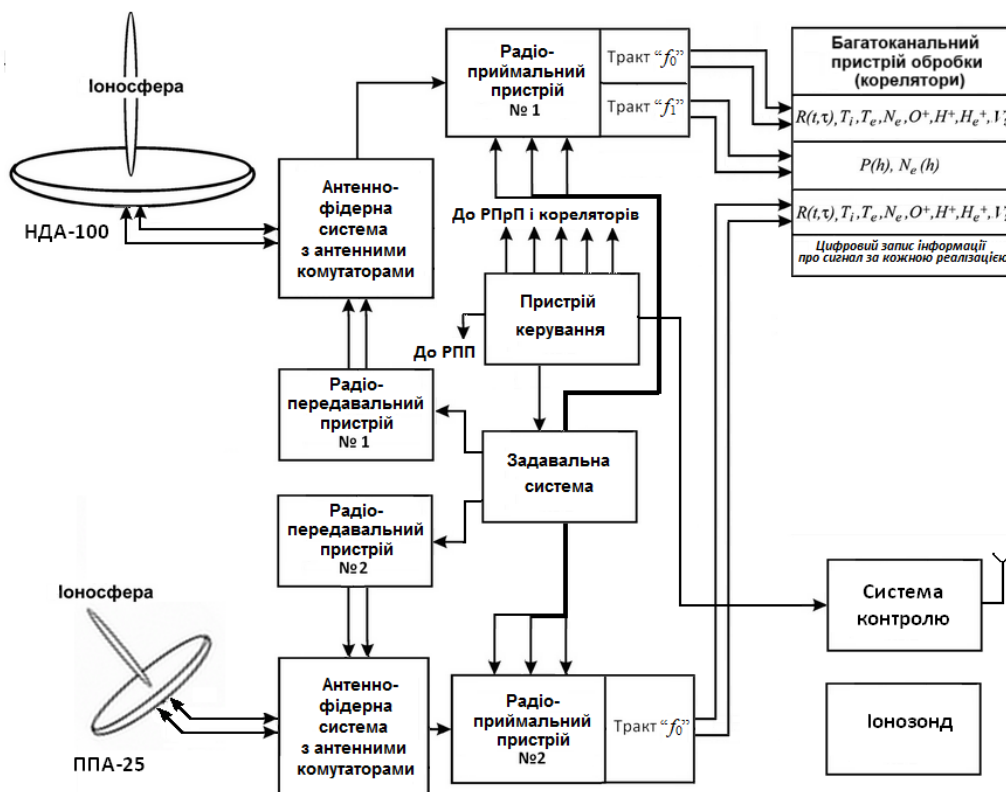


Рис. 2. Структурна схема комплексу радарів НР НДІ Іоносфери

Сформовані задавальною системою складені радіоімпульсні сигнали подаються на радіопередавальні пристрої (РПП), підсилюються й надходять фідерними трактами через антенні комутатори до антен НДА-100 і ППА-25. Антенами випромінюються сигнали відповідно у вертикальному й обраному похилому чи вертикальному напрямках. При одно-

часній роботі радарів передаються та приймаються радіохвилі кругової поляризації з протилежними напрямками обертання вектора електричного поля для усунення взаємних завад.

Розсіяні іоносферою сигнали приймаються цими ж антенами й через антенні комутатори антенно-фідерного тракту подаються на входи відповідних радіоприймальних пристроїв, де здійснюється підсилення прийнятих сигналів, їх селекція в трактах « f_0 » і « f_1 », фільтрація, перенесення спектра в область низьких частот і виділення квадратурних сигналів для кожного з елементів за допомогою синхронного детектування для подальшої кореляційної обробки.

Пристрій керування формує імпульсні сигнали на всі системи радарів НР.

Система контролю формує такі сигнали: білий шум, вузькосмугові радіоімпульсні шумові сигнали з відомими спектрами, що відповідають спектрам некогерентного розсіяння, гармонійний сигнал [34]. Ці сигнали подаються через контрольну антену по ефіру на антени НДА-100 та ППА-25 або безпосередньо на вхід РПрП для контролю антенно-фідерних пристроїв і приймально-обробних систем. Також здійснюється контроль радіопередавальних пристроїв та якості формування сигналів з круговою поляризацією.

Іонозонд використовується для калібрування вимірювань концентрації електронів шляхом прив'язки вимірюваної критичної частоти f_oF_2 до максимуму відносного висотного профілю концентрації електронів (при використанні перших двох режимів зондування), а також для отримання додаткової інформації про іоносферу з іонограм.

Структура й особливості діючої радіоприймальної системи

Радіоприймальна система містить два РПрП, кожен з яких є супергетеродинним приймачем з потрібним перетворенням частоти. Спектр прийнятого сигналу послідовно переноситься з носійної частоти (158 МГц) в область низьких частот, де здійснюється кореляційна обробка. З метою максимального зниження втрат вхідного сигналу та зменшення впливу завад РПрС виконана компактно й розташована в безпосередній близькості від виходів антенно-фідерного тракту. Її структурну схему наведено на рис. 3.

На вході кожного приймача є система вибору поляризації сигналу (що складається з фазообертача та коаксiального суматора сигналів від двох каналів фідерного тракту), циркулятор для узгодження вхідного опору приймача з опором фідера лінії (75 Ом), а також транзисторний підсилювач високої частоти (ПВЧ1) з низьким рівнем шуму. Щоб уникнути перевантаження приймачів й АЦП пристроїв обробки, забезпечено бланкування РПрП у вхідних ланцюгах за допомогою двох швидкодіючих електронних комутаторів на PIN-діодах, що керуються сигналами формувача імпульсів бланка та забезпечують замикання приймачів на час випромінювання зондувального імпульсу.

З виходу антенно-фідерної системи сигнал надходить на вхід відповідного РПрП. Його перетворення розглянемо на прикладі РПрП №1. У вхідному пристрої приймача сигнал посилюється, піддається бланкуванню (під час випромінювання імпульсу передавача) і переноситься на першу проміжну частоту (ПЧ) ($f_{\text{пр1}} \approx 15$ МГц). У тракті ПЧ-1 здійснюється його посилення та поділ на два тракти: тракт виділення відгуку сигналу з носійною частотою f_0 і тракт виділення відгуку сигналу з носійною частотою f_1 . Обидва тракти за своєю структурою ідентичні. У тракті ПЧ-2 спектр сигналу переноситься на другу проміжну частоту ($f_{\text{пр2}} = 972,4$ МГц), і здійснюється його селекція та посилення.

Двоканальний тракт НЧ (тракт виділення сигналів для квадратурної обробки) має два однакові канали, кожен з яких містить синхронний детектор (СД), виконаний на прецизійному інтегральному помножувачі, набір комутованих фільтрів нижніх частот (ФНЧ) і підсилювач. Для здійснення синхронного детектування використовуються сигнали фазообертача третього (синхронного) гетеродина з однаковою амплітудою, частотою $f_{\text{г}}$ та різницею фаз 90° . Виділені синхронними детекторами сигнали піддаються фільтрації у фільтрах НЧ з обраною шириною смуги пропускання й посилюються до рівня напруги, необхідної для нормальної роботи АЦП пристрою обробки.

Структура тракту « f_0 » РПрП №2 така ж, як і РПрП №1.

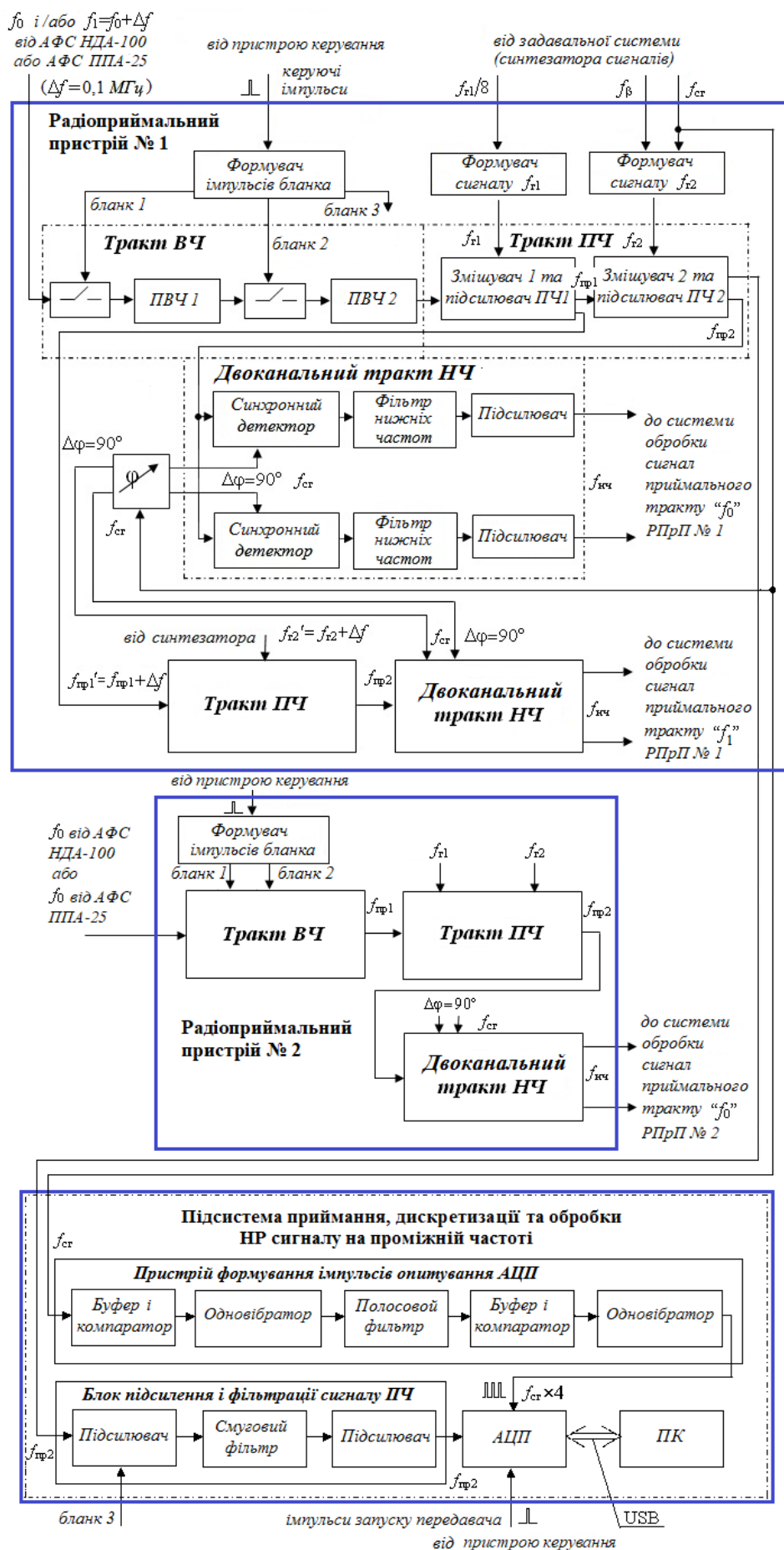


Рис. 3. Структурна схема радіоприймальної системи радару НР

Завдяки формуванню сигналів гетеродинів РПрС із сигналів задавальної системи забезпечується когерентність роботи радару НР і можливість вимірювати одночасно з іншими іоносферними параметрами швидкість руху іоносферної плазми за доплерівським зміщенням спектра НР сигналу.

Сигнал 1-го гетеродину з частотою $f_{г1}$ формується в помножувачі частоти з сигналу синтезатора з частотою $(f_{г1}/8)$. Оскільки носійна частота зондувального сигналу формується синтезатором відповідно до виразу $f_0 = ((f_{г1}/8) - 2f_{\beta}) \cdot 8$, перша ПЧ дорівнює $f_{пр1} = f_{г1} - f_0 = 16f_{\beta}$. Таким чином, вона відома з точністю до доплерівського зміщення спектра НР сигналу, викликаного рухом плазми. Сигнал 2-го гетеродину формується відповідно до виразу: $f_{г2} = 16f_{\beta} + f_{сг}$. Сигнал 3-го (синхронного) гетеродину формується із сигналу синтезатора з частотою $f_{сг}$ за допомогою кварцового фільтра. Тому друга проміжна частота $f_{пр2}$ збігається з частотою $f_{сг}$ синхронного гетеродину (у разі відсутності доплерівського зміщення). Унаслідок синхронного детектування, сигнал переноситься на нульову частоту з доплерівським зміщенням. Таким чином, забезпечується когерентність систем радару та можливість вимірювання швидкості руху іоносферної плазми й об'єктів у геокосмосі.

Для тракту « f_1 » як другий гетеродин з частотою $f_{г2} = f_{г2} + \Delta F$, де $\Delta F \approx 100$ кГц, використовується промисловий синтезатор, стабільність якого цілком задовільна для визначення потужності НР сигналу, виділеного в цьому тракті.

Відповідно до рівняння радіолокації [3] відношення потужності НР сигналу, розсіяного об'ємом плазми з центром на висоті h , до потужності шуму $P_{ш}$ дорівнює

$$q(h) = \frac{0,76 P_i \eta c \tau_i A}{16 \pi k T_c \Delta F} \cdot \frac{\sigma N_e(h)}{h^2}, \quad (1)$$

де P_i – імпульсна потужність передавача; η – к.к.д. антенно-фідерного тракту; c – швидкість світла; τ_i – тривалість зондувального імпульсу; A – ефективна площа антени; σ – ефективний переріз розсіяння; k – постійна Больцмана; T_c – ефективна шумова температура системи включно з антенно-фідерним трактом; ΔF – ефективна ширина смуги пропускання приймача.

Ефективна шумова температура приймальної системи T_c визначається формулою [35]:

$$T_c = T_A + T_{лф}(L - 1) + LT_{пр}, \quad (2)$$

де T_A – ефективна шумова температура антени; $T_{лф}$ – фізична температура фідерної лінії ($T_{лф} \approx T_0 = 300$ К); $T_{пр}$ – ефективна шумова температура приймача; $L = 1/\eta$ – втрати в тракті. Для радару з антеною НДА-100 $T_c = 470\text{--}980$ К в залежності від космічного шуму, який змінюється протягом доби.

Із виразів (1) і (2) видно, що при вибраній тривалості τ_i (виходячи з необхідної роздільної здатності за дальністю), при наявних параметрах P_i і η підвищити відношення сигнал/шум можна зниженням шумової температури (коефіцієнту шуму) РПрП і вибором його оптимальної ширини смуги пропускання.

Оптимізація параметрів РПрП торкнулася насамперед поліпшення їх чутливості та вибору найбільш прийнятних для конкретних умов іоносферних вимірювань параметрів фільтрів нижніх частот вихідних ланцюгів РПрП, які визначають відповідні характеристики всього приймального тракту. Для цього на входах РПрП були встановлені малошумливі підсилювачі та вузькосмугові коаксіальні фільтри високих частот, що забезпечило достатній для метрового діапазону коефіцієнт шуму (1,4–1,5) і високу захищеність від завад. У вихідних трактах квадратурних сигналів використовуються ФНЧ, найбільш прийнятні для умов експериментів: у тракті « f_0 » РПрП антени НДА-100 – фільтри Кауера 7-го порядку з формою АЧХ, близькою до прямокутної, і шириною смуги пропускання за рівнем половинної потужності 9,5 кГц (для визначення параметрів іоносфери на висотах 200–1500 км); у тракті « f_1 » РПрП антени НДА-100 – фільтри Чебишева 3-го порядку з пологими схилами АЧХ і шириною смуги пропускання 6,0 кГц (для визначення потужності НР сигналу на висотах нижче й поблизу

висоти максимуму іонізації); в РПрП антени ППА-25 – фільтри Кауера 7-го порядку з формою АЧХ, близькою до прямокутної, і шириною смуги пропускання за рівнем половинної потужності, що дорівнює 5,5 кГц (для визначення параметрів іоносфери на висотах поблизу максимуму іонізації і нижче, де присутні електрони й іони атомарного кисню).

Статистична похибка визначення іоносферних параметрів тим менше, чим більше відношення сигнал/шум. Якщо порівняти можливості радарів з антенами НДА-100 і ППА-25, встановленої у вертикальному напрямку зондування, за інших рівних умов відношення сигнал/шум відрізняються у 12,8 разів відповідно до виразів (1) та (2), що пов'язано з відмінністю площ їх ефективних поверхонь.

Однією з останніх модернізацій РПрС є підсистема приймання, дискретизації та обробки сигналу на проміжній частоті [36], яка використовує лише один швидкодіючий АЦП, що підключається по шині USB. Обробка сигналу НР на проміжній частоті має переваги в деяких випадках. Вона дозволяє використовувати алгоритми, адаптовані до досліджуваного діапазону висот і стану іоносфери, а також підвищити точність вимірювання параметрів НР сигналу (і, відповідно, параметрів іоносфери), виключаючи вплив низки інструментальних факторів та адаптуючи для цифрової обробки в реальному часі частоту дискретизації сигналу на ПЧ до параметрів розсіяних плазмою сигналів або сигналів, відбитих від дискретних об'єктів у геокосмосі [36, 37].

Підсистема містить у собі блок підсилення та фільтрації сигналу ПЧ (що складається з двох підсилювачів і смугового фільтра), АЦП, персональний комп'ютер (ПК) і пристрій формування опитувальних імпульсів (рис. 3). Для жорсткої прив'язки імпульсів опитування АЦП до проміжної частоти як вхідний сигнал для пристрою формування опитувальних імпульсів використовується сигнал синхронного гетеродина з частотою $f_{\text{сг}} = f_{\text{пр2}} = 972,4$ кГц. На виході пристрою формуються імпульси з частотою слідування $4f_{\text{сг}}$, тобто з періодом слідування, рівним чверті періоду сигналу синхронного гетеродина. Таким чином, сусідні відліки сигналу знаходяться в квадратурній залежності. Це дозволяє визначати ординати квадратурних складових КФ $R(\tau)$ з часовими зсувами (аргументами) τ , кратними періоду ПЧ і оптимальними для конкретних геліогеофізичних умов. Як сигнал позначення початку кожної радіолокаційної розгортки використовуються імпульси запуску передавача радара НР.

До блоку формування імпульсів зчитування АЦП пред'являються особливі вимоги до стабільності і точності множення частоти. Це пов'язано з точністю дискретизації сигналу для забезпечення квадратури його вибірок, які використовуються для подальшого розрахунку параметрів НР сигналу та параметрів іоносфери. Із декілька проаналізованих варіантів помножувачів частоти було обрано найбільш прийнятний варіант для формування імпульсного сигналу з почотвереною ПЧ. Цей варіант заснований на виділенні 4-ї гармоніки з послідовності імпульсів з оптимальним співвідношенням періоду повторення та тривалості.

Параметри іоносфери та відповідні статистичні характеристики сигналу НР істотно змінюються з висотою й залежать від космічної погоди. Від цих факторів також залежить точність оцінки кореляційної функції шумоподібного сигналу НР і, отже, точність визначення параметрів іоносфери. Було запропоновано підвищити точність такої оцінки за рахунок підвищення співвідношення сигнал/шум, використавши додаткову цифрову обробку сигналу, а саме набір цифрових фільтрів, що є оптимізованими для різних висот і стану іоносфери. Смугові фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою були створені за допомогою бібліотеки SciPy мови програмування Python. Для аналізу були створені фільтри типу Чебишева 17-го порядку зі смугою пропускання 10, 14, 19 і 24 кГц з лінійною характеристикою в смузі пропускання та придушенням сигналу за межами смуги пропускання на рівні 60 дБ. Для недопущення зміщення вихідного сигналу після фільтрації щодо вхідного сигналу використовується метод “forward-backward” – двічі застосовується лінійний цифровий фільтр, один раз вперед і один раз назад. Комбінований фільтр має нульову фазу й порядок фільтра, який вдвічі перевищує вихідний.

Розробка універсальної програмованої радіосистеми моніторингу геокосмосу

З метою отримання нових геофізичних знань про навколоземний космічний простір, його моніторингу та спостереженню космічних об'єктів, що перебувають у ньому, було розроблено програмовану радіосистему, що функціонує під керуванням спеціалізованого програмного забезпечення. У процесі виконання роботи було вирішено такі основні задачі: аналіз особливостей формування сигналів у програмованих радіосистемах для радіофізичних досліджень атмосфери та геокосмосу; розробка апаратного та програмного забезпечення для формування й обробки сигналів; проведення тестових випробовувань розробленої радіосистеми та аналіз результатів [38].

Впровадження програмованої радіосистеми до складу обладнання НДІ Іоносфери може здійснюватися за схемою, наведеною на рис. 4. Через те, що передавач і приймач радара знаходяться в різних будівлях, передавальну та приймальну частину програмованої радіосистеми необхідно розміщувати окремо, реалізавши на двох лінійках універсальної програмованої радіосистеми Universal Software Radio Peripheral (USRP).

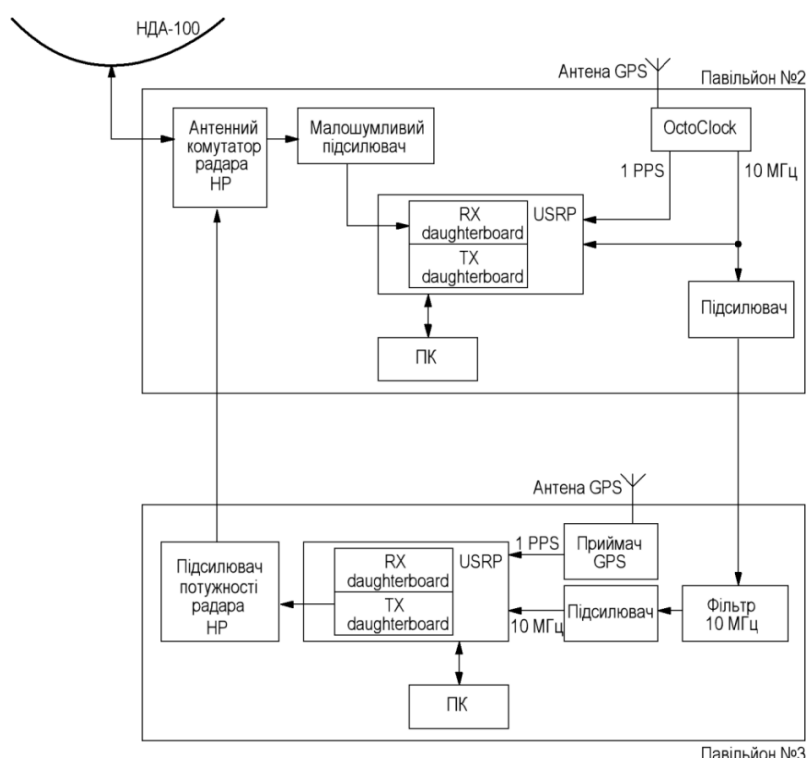


Рис. 4. Структурна схема радіосистеми на базі USRP у складі радара НР НДІ Іоносфери

До складу приймальної частини входить USRP з дочірніми платами BasicRX та BasicTX (частота, на якій передбачається робота радіосистеми, складає 158 МГц), антенний комутатор, малошумливий підсилювач, генератор сигналів з частотами 10 МГц та 1 Гц, а також персональний комп'ютер, який керує USRP, оброблює прийняті сигнали та зберігає результати обробки даних. У структурі передавальної частини присутні попередній підсилювач сигналів від передавальної дочірньої плати USRP і вихідний підсилювач потужності. Передавальна дочірня плата USRP – BasicTX. Синхронізація передавальної та приймальної підсистем відбувається за допомогою OctoClock (1 PPS та 10 МГц) і додаткового приймача GPS для формування сигналу PPS.

Радіоприймальну частину можна використовувати в пасивному режимі для дослідження космічних шумів. Замість вказаної на рис. 4 вертикально спрямованої антени НДА-100 можливе використання повноповоротної антени ППА-25.

Інтегральний GaAs pHEMT малошумливий підсилювач має забезпечувати наведені нижче вимоги:

- коефіцієнт підсилення на частоті 158 МГц – не менше 20 дБ;
- коефіцієнт шуму на частоті на 158 МГц – менше 0,7 дБ;
- коефіцієнт стоячої хвилі по входу на частоті 158 МГц без кіл узгодження на вході – не більше 1,5.

Передавальний тракт використовується тільки в активному режимі та складається з попереднього підсилювача й вихідного підсилювача потужності. Попередній підсилювач забезпечує рівень сигналу, що надходить від USRP, необхідний для роботи підсилювача потужності. Вихідний підсилювач має розвивати на навантаженні з опором 50 Ом потужність від декількох десятків до сотень ватт і може бути побудований на спеціалізованих високочастотних транзисторах, наприклад MRF240.

Для фільтрації сигналу синхронізації від гармонік, що утворюватимуться в підсилювачі, з боку USRP необхідно встановити смуговий кварцовий фільтр.

Програмне забезпечення складається з розроблених для різних режимів роботи радара програм керування модулем USRP на мові програмування C++, керування антенним комутатором тощо. Параметри кожної програми задаються у відповідному конфігураційному файлі. Запис отриманих даних розгортки дальності проводиться в бінарні файли.

Висновки

Розглянуто особливості радіоприймальної системи радара некогерентного розсіяння (НР) НДІ Іоносфери, яка є ключовим елементом для забезпечення високої точності вимірювання параметрів іоносфери та геокосмічного середовища.

Показано, що для успішного приймання та обробки слабких НР сигналів, потужність яких часто значно менша за потужність шумів, необхідна висока чутливість, стабільність і завадостійкість радіоприймальної системи.

Детально охарактеризовано структуру та принцип дії радіоприймальної системи радара НР, зокрема супергетеродинної архітектури з потрібним перетворенням частоти. Реалізація доплерівських вимірювань швидкості руху іоносферної плазми та об'єктів у геокосмосі ґрунтується на когерентній структурі радарного комплексу та узгодженій синхронізації передавальних і приймальних трактів.

Наведено такі методи модернізації діючої системи:

- оптимізація її окремих елементів, зокрема впровадження малошумливих підсилювачів, удосконалення фільтрів нижніх частот, використання високоточних методів синхронного декорелування дозволило значно підвищити чутливість та завадостійкість радіоприймального тракту;

- введення системи вибору поляризації сигналу та спеціалізованих режимів зондування забезпечують гнучке налаштування експериментів відповідно до поставлених дослідницьких задач та поточних геліогеофізичних умов;

- залучення одночасного зондування двома антенами у вертикальному та похилому напрямках значно розширює діагностичні можливості комплексу радарів НР, дозволяючи досліджувати тривимірну динаміку іоносфери;

- введення до складу радара підсистеми приймання, дискретизації та обробки сигналу на проміжній частоті дозволило підвищити точність вимірювання параметрів НР сигналу (і, відповідно, параметрів іоносфери) завдяки виключенню впливу низки інструментальних факторів, характерних для аналогових трактів виділення квадратурних сигналів; адаптації частоти дискретних вибірок сигналу до параметрів розсіяних плазмою сигналів з різних висотних діапазонів; використанню цифрових смугових фільтрів і алгоритмів, що адаптовані до сигналів, відповідних конкретним геліогеофізичним умовам і висотам дослідження.

Розроблено апаратну та програмну складові багатоцільової програмованої радіосистеми на базі SDR (Software Defined Radio) технології, яка призначена безпосередньо для моніторингу геокосмосу й значно розширює можливості радіофізичного обладнання обсерваторії НДІ Іоносфери.

Представлені технічні рішення відповідають вимогам сучасних систем моніторингу геокосмосу та є корисними для дослідження іоносфери та спостереження за штучними космічними об'єктами, зокрема в контексті зростаючої актуальності прогнозування космічної погоди та проблем космічного сміття.

Список літератури:

1. Xue D., Yang J., Liu Z. Potential impact of GNSS positioning errors on the satellite-navigation-based air traffic management // *Space Weather*. 2022. Vol. 20, is. 7, e2022SW003144. <https://doi.org/10.1029/2022SW003144>.
2. Reznichenko M. O., Kotov D. V., Richards P. G., Bogomaz O. V., Reznichenko A. I., Goncharenko L. P., et al. The thermosphere was poorly predictable not only during but also before and after the Starlink Storm on 3–4 February 2022 // *Geophys. Res. Lett.* 2025. Vol. 52. e2024GL112620. <https://doi.org/10.1029/2024GL112620>.
3. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar // *Proceedings of the IEEE*. Vol. 57, no 4. 1969. P. 496–530. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7005>.
4. Sato T., Ito A., Oliver W. L., Fukao S., Tsuda T., Kato S., Kimura I. Ionospheric incoherent scatter measurements with the middle and upper ionosphere radar. Techniques and capability // *Radio Sci.* 1989. Vol. 24. P. 85–98. <https://doi.org/10.1029/RS024i001p00085>.
5. Holt J. M., Erickson P. J., Gorczyca A. M., Grydeland T. MIDAS-W: a workstation-based incoherent scatter radar data acquisition system // *Ann. Geophys.* 2000. Vol. 18, no. 9. P. 1231–1241. <https://doi.org/10.1007/s00585-000-1231-3>.
6. Woodman R. F., Farley D. T., Balsley B. B., Milla M. A. The early history of the Jicamarca radio observatory and the incoherent scatter technique // *Hist. Geo Space. Sci.* 2019. Vol. 10. P. 245–266. <https://doi.org/10.5194/hgss-10-245-2019>.
7. Yue X., Wan W., Ning B., et al. Development of the Sanya incoherent scatter radar and preliminary results // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2022. Vol. 127, e2022JA030451. <https://doi.org/10.1029/2022JA030451>.
8. Lehtinen M., Markkanen J., Väänänen A., Huuskonen A., Damtie B., Nygrén T., Rahkola J. A new incoherent scatter technique in the EISCAT Svalbard Radar // *Radio Sci.* 2002. Vol. 37, no. 4. <https://doi.org/10.1029/2001RS002518>.
9. Wannberg U. G. et al. EISCAT_3D: A Next-Generation European Radar System for Upper-Atmosphere and Geospace Research // *The Radio Science Bulletin*. 2010. No 332. P 75–88.
10. Ding Z., Wu J., Xu Z., Xu B., Dai L. The Qijing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements // *Earth Planets Space*. 2018. Vol. 70, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0859-8>.
11. Grydeland T., Lind F. D., Erickson P. J., Holt J. M. Software Radar signal processing // *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23, no. 1, P. 109–121. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-109-2005>.
12. Damtie B. New incoherent scatter radar measurement techniques and data analysis methods // Department of Physical Sciences, University of Oulu, Finland, 2004, Report №29.
13. Emelyanov L. Ya., Zhivolup T. G. History of the development of IS radars and founding of the Institute of Ionosphere in Ukraine // *Hist. Geo Space. Sci.* 2013. Vol. 4. P. 7–17. <https://doi.org/10.5194/hgss-4-7-2013>.
14. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. Kharkiv Incoherent Scatter Facility // *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”: scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. Kharkiv : NTU “KhPI”*. 2014. No. 47 (1089). P. 28–42. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7.
15. Stone M. L.; Banner G. P. Radars for the Detection and Tracking of Ballistic Missiles, Satellites, and Planets // *Linc. Lab. J.* 2000. Vol. 12, no. 2. P. 217–244. https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol12_no2/12_2detectsatellitesplanets.pdf.
16. Boley A. C., Wright E., Lawler S., Hickson P., Balam, D. Plaskett 1.8 m Observations of Starlink Satellites // *The Astronomical Journal*. 2022. Vol. 163 (5). P. 199. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.12494>.
17. Graham M. J., Kulkarni S. R., Bellm E. C., et al. The zwicky transient facility: science objectives // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2019. 131:078001 (23 pages). <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ab006c>.
18. Parham J. B., Li J., Dickson M., Ginot G., Erickson P. J., Lind F. D. Debris plasma density perturbations as seen through a modern collective Thomson scatter radar processing chain // *2024 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 02–06 September 2024. <https://doi.org/10.1109/ICEAA61917.2024.10701844>.
19. Stamm J., Vierinen J., Gustavsson B., Spicher A. A technique for volumetric incoherent scatter radar analysis // *Ann. Geophys.* 2023. Vol. 41, is. 1. P. 55–67. <https://doi.org/10.5194/angeo-41-55-2023>.
20. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems. New York, McGraw-Hill, 3rd Edition, 2001.
21. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P. et al. Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT // *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2016. Vol. 5, no. 4. 1641010 (19 pages). <https://doi.org/10.1142/S22511717164101051641010-1>.
22. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson Jr. G. W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Cham.: Springer Nature. 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4>.

23. Bostan S. M., Urbina J., Mathews J. D., Bilén S. G., Breakall J. K. An HF software-defined radar to study the ionosphere // *Radio Science*. 2019. Vol. 54. P. 839–849. <https://doi.org/10.1029/2018RS006773>.
24. Kalita B. R., Nath S. J., Bhuyan P. K., Khandare A., Kulkarni A. SAMEERDU—digital ionosonde: Brief system description and initial results from a low-latitude location Dibrugarh // *Radio Science*. 2019. Vol. 54. P. 1142–1155. <https://doi.org/10.1029/2019RS006813>.
25. Barona Mendoza J. J., Quiroga Ruiz C. F., Pinedo Jaramillo C. R. Implementation of an electronic ionosonde to monitor the Earth's ionosphere via a projected column through USRP // *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 5. 946 p. <https://doi.org/10.3390/s17050946>.
26. Rejček L., Kouba D., Mošna Z., Knížová P. K., Tran P. T., Dong C. S. T. Passive ionospheric radar builds with USRP N210 // *Journal of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 70, is. 2. P. 159–164. <https://doi.org/10.2478/je-2019-0023>.
27. Li Y., Yuan K., Yao M., Deng X. The prototype incoherent scatter radar system of Nanchang University // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020. P. 1184–1188. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2994082>.
28. Thayaparan T., Dupont D., Ibrahim Y., Riddolls R. High-frequency ionospheric monitoring system for Over-the-Horizon radar in Canada // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. Vol. 57, is. 9. P. 6372–6384. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2905757>.
29. Holdsworth D. A., Spargo A. J., Reid I. M., Adami C. Low Earth Orbit object observations using the Buckland Park VHF radar // *Radio Sci.* 2020. Vol. 55, is. 2. e2019RS006873. <https://doi.org/10.1029/2019RS006873>.
30. Kenington P. B. RF and baseband techniques for software defined radio. Artech House Mobile Communicat. 2005. 332 p. <https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/WHIWPiloyEJraxXB.pdf>.
31. Farley D. T. Faraday rotation measurements using incoherent scatter // *Radio Sci.* 1969. Vol. 4, no 2. P. 143–152. <https://doi.org/10.1029/RS004i002p00143>.
32. Skvortsov T. A., Yemelyanov L. Ya., Fisun A.V. Radar measurements of geomagnetic field in the ionosphere // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. Vol. 74, No 10. P. 921–931. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i10.80>.
33. Emelyanov L., Chepurnyy Y., Bogomaz O. Simultaneous sounding of the ionosphere in the vertical and oblique directions using incoherent scatter radar // 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2018. P. 458–463. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477456>.
34. Yemelyanov L. Ya. Development of principles and instrumentation for generation of test and control signals of the incoherent scatter radar // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, is. 14. P. 1259–1271. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v76.i14.50>.
35. Kraus J. D. *Radio Astronomy*, 2nd ed. Cygnus-Quasar Books, Powell, OH. 1986.
36. Emelyanov L., Miroshnikov A. Development of methodological, hardware, and software of the incoherent scatter radar of Institute of Ionosphere (Kharkiv, Ukraine) // *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2023. Vol. 69, no. 3. P. 579–586. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.146510>.
37. Emelyanov L., Rogozhkin E., Podyachiy Y. Method for sampling narrowband radio signals with known center frequency of spectrum // 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). May 13–16, 2024, Kyiv, Ukraine, Conference Proceedings. 2024. P. 544–548. <https://doi.org/10.1109/ELNANO63394.2024.10756842>.
38. Bogomaz O., Barabash V., Iskra D. Some aspects of developing a multipurpose radio system for monitoring the geospace // *Advanced Applied Energy and Information Technologies 2021. Proceedings of the International Conference (Ternopil, 15–17 of December 2021.)* Ternopil : TNTU, 2021. P. 114–119. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36934/2/ICAAEIT_2021_Bogomaz_O-Some_aspects_of_developing_114-119.pdf.

Надійшла до редколегії 17.05.2025

Відомості про авторів:

Смельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний інститут Іоносфери Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2117-2675>.

Богомаз Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, Науково-дослідний інститут Іоносфери Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, старший науковий співробітник; Україна; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6824-2346>.

Под’ячий Юрій Іванович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри мікро- та наноелектроніки; Україна; e-mail: uipodyachiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8252-1553>.

Мірошников Артем Євгенійович – Науково-дослідний інститут Іоносфери Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, молодший науковий співробітник; Україна; e-mail: moneytu@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2473-4370>.