

Ю. П. Гончаренко, І. І. Полещук, О. Ф. Соколовський, В. А. Яковенко

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ СТВОРЕННЯ БЮДЖЕТНОГО ІОНОЗОНДА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У статті надано обґрунтування створення сучасного іонозонда, інформація якого може використовуватися для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистем, а також із метою мінімізації ризиків, пов'язаних із впливом атмосферних явищ на електричну інфраструктуру. Характеристики розробленого іонозонда не поступаються сучасним виробам провідних країн світу.

Проаналізовано наявні іонозонди, їх технічні характеристики. Запропоновано метод формування синтезованого лінійно-частотно-модульованого сигналу та його оптимальної фільтрації, проведено дослідження щодо можливості його застосування в радіолокаційній станції вертикального зондування іоносфери. Крім того, обґрунтовано склад апаратно-програмного комплексу частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням лінійно-частотно-модульованих сигналів. Цей комплекс побудовано на основі універсальної платформи USRP N210, яка дозволяє використовувати приймачі та передавачі за технологією SDR у діапазоні частот до 6 ГГц. Такий широкий частотний діапазон може забезпечуватися змінними дочірніми платами.

На основі проведеного аналізу запропоновано розробку іонозонда, вартість виготовлення якого значно менша, ніж аналогів провідних світових виробників радіолокаційній станції вертикального зондування, а деякі технічні характеристики навіть значно кращі. Для порівняння розробленого та сучасних іонозондів були вибрані такі основні параметри: еквівалентна потужність випромінювання та спектр сигналу, який випромінюється.

На базі результатів проведених досліджень визначено вимоги та основні технічні характеристики, яким повинен відповідати ідеальний іонозонд.

Ключові слова: енергосистема; іонозонд; радіолокаційна станція вертикального зондування; синтезований лінійно-частотно-модульований сигнал; оптимальна фільтрація.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У наш час іоносфера відіграє значну роль у передачі електроенергії лініями електропередач, її вплив можна охарактеризувати кількома ключовими аспектами [1–4]:

1. Іоносфера, що містить іонізований газ, може суттєво впливати на передавання електромагнітних хвиль. Це особливо актуально для частот, що використовуються у високовольтних лініях електропередач. Перешкоди з боку іоносфери можуть бути більш вираженими, ніж від самих ліній електропередач.

2. В іоносфері є електричні поля, які можуть взаємодіяти зі струмами, що проходять лініями електропередач. Ця взаємодія може призводити до змін у силі та напрямку електричних полів, що впливає на стабільність та ефективність передачі енергії.

3. Геофізичні збурення: такі геліогеофізичні активності, як сонячна погода та магнітні бурі, можуть викликати безпосередні зміни в стані іоносфери, що відображається на якості й надійності передачі електричної енергії.

4. Розповсюдження радіохвиль: іоносфера впливає не лише на проводи, але й на радіохвилі, які навколо ліній електропередач можуть як посилюватися, так і послаблюватися відповідно до її стану. Це також може впливати на системи зв'язку, підключені до ліній електропередач.

Отже, вплив іоносфери на лінії електропередач багатогранний і може бути як позитивним, так і негативним залежно від поточних умов в атмосфері та іоносфері.

Згідно з викладеним для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистем, а також для мінімізації ризиків, пов'язаних з впливом атмосферних явищ на електричну інфраструктуру, виникає потреба в зондуванні іоносфери.

Відомі різні методи зондування іоносфери, кожен із яких має свої особливості та сфери застосування. Основні методи включають [1, 4]:

іонозонди, які вимірюють профілі електронної концентрації іоносфери на різних висотах. Вони використовують радіохвилі для зондування, відправляючи сигнали та фіксуючи відбиття від іоносферних шарів, що дозволяє отримати дані про розподіл іонів та електронів;

вертикальне зондування, що базується на відправленні радіосигналів вертикально вгору та аналізі отриманих відбиттів. Цей метод застосовують для створення профілів іоносферних шарів та вивчення їх змін залежно від часу доби та сонячної активності;

використання сигналів від супутників глобальної навігаційної супутникової системи дозволяє отримувати дані про стан іоносфери. Ці системи допомагають оцінювати вплив іоносфери на розповсюдження радіохвиль, а також визначати загальний електронний вміст;

радіолокаційні технології застосовують для вивчення динамічних процесів в іоносфері, а також для дослідження її структури на різних висотах, вони можуть бути використані радары когерентного та некогерентного розсіювання. Когерентні радары дозволяють отримувати високу роздільну здатність, а некогерентні можуть оцінювати швидкість руху іоносферних неоднорідностей;

радіометрію використовують для вивчення іоносферного розповсюдження радіохвиль та вимірювання рівня іоносферної активності в певних частотних діапазонах;

математичне моделювання іоносферних процесів допомагає прогнозувати та аналізувати стан іоносфери на основі даних про сонячну активність та гамма-випромінювання.

Кожен із цих методів відіграє важливу роль у вивченні іоносфери, дозволяючи вченим оцінювати її стан, а також розуміти, як вона взаємодіє із сонячним випромінюванням та іншими зовнішніми впливами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За 90 років від початку досліджень іоносфери (Appleton, Barnet (1925); Breit, Tuve (1926)) накопичено величезний експериментальний матеріал, стала зрозумілою фізика основних явищ в іоносфері. Вдалося, з одного боку, з'ясувати її загальні властивості й особливості на різних широтах, її поведінку залежно від часу доби та сезону, а з іншого боку – стала очевидною надзвичайна складність нерегулярних процесів, які відбуваються в іоносфері. В останні десятиліття досліджено механізми впливу земних і наземних процесів (землетрусу, метеорологічних явищ тощо) на стан іоносфери. Роботи з прогнозування стану іоносфери щодо пошуку зв'язку іоносферних явищ із процесами в магнітосфері Землі і в навколосемному просторі вимагають нових, більш детальних і точних експериментальних даних. Вони є основою для розрахунку іоносферних ліній зв'язку, для оцінювання працездатності різних комплексів апаратури, що функціонують на основі іоносферних радіохвиль.

На сьогоднішній день на території України немає станції вертикального зондування іоносфери (ВЗІ), яка регулярно працює. Дослідницьке устаткування, наявне в обсерваторіях Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна та Інституту іоносфери Національної академії наук України, морально і фізично застаріло, його не можливо застосовувати в безперервному режимі для діагностики іоносфери.

Єдиний штатний іонозонд IPS-42 (австралійського виробництва, 1982 р. випуску) регулярно працює в режимі 15-хвилинного зондування. Він функціонує на Українській антарктичній станції (УАС) «Академік Вернадський», хоча давно застарів і в процесі експлуатації регулярно потребує ремонту.

Найближчі до території України сучасні станції ВЗІ знаходяться на великих відстанях (близько 1000 км) у Празі та Москві.

З огляду на активні українські наземно-космічні програми і перспективні проєкти з дослідження геокосмосу, розвитку супутникових технологій у сфері навігації, зв'язку й інформації, назріла необхідність створення національних установок зондування іоносфери.

На жаль, сьогодні жодне з відомств України, яке зацікавлене в інформації про іоносферу, не має фінансових ресурсів для придбання хоча б одного сучасного іонозонда, оскільки його вартість становить понад 200 тис. доларів США [6].

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є аналіз сучасних іонозондів, зокрема їх технічних характеристик, обґрунтування розроблення способу створення синтезованого лінійно-частотно-модульованого (ЛЧМ) сигналу та його оптимальної фільтрації, а також структури сучасного іонозонда. Синтезований ЛЧМ-сигнал за своїми параметрами може бути альтернативою для сучасних радіолокаційних станцій (РЛС) вертикального зондування, а за характеристиками він не поступається сучасним виробам провідних країн світу.

Виклад основного матеріалу. Техніка вертикального зондування постійно вдосконалюється. На зміну іонозондам із кіловатними потужностями приходять компактні малопотужні пристрої на основі складних сигналів. Вони є зручними для іоносферного

забезпечення систем зв'язку та коригування моделі іоносфери в заданому регіоні за реальними даними. Відповідно, ВЗІ на сьогодні залишається основним методом збору інформації про неї. За допомогою станцій вертикального зондування можна отримати відомості про всі зміни електронної концентрації, що відбуваються в іоносфері, тому функціонує опорна мережа таких станцій ВЗІ, дані з яких узагальнюються у відомих емпіричних моделях типу IRI. Розглянемо деякі з них.

Блок-схему сучасної станції вертикального зондування «Вектор» наведено на рис. 1.

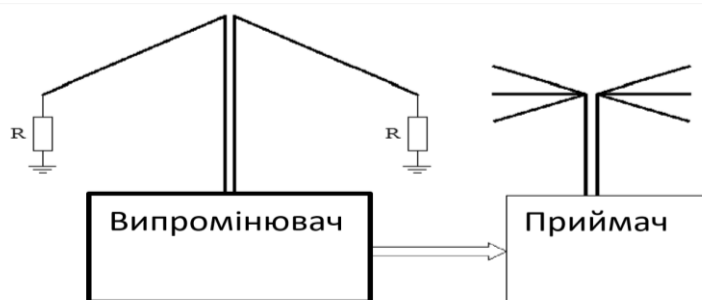


Рис. 1. Блок-схема станції вертикального зондування «Вектор»

Вона містить передавальну і приймальну антени, випромінювач і приймач. Передавальна антена типу антени біжучої хвилі «Дельта» з вертикальною пелюсткою діаграми спрямованості. Вона встановлена на даху будівлі Балтійського федерального університету імені Еммануїла Канта та працює в широкому діапазоні частот. За приймальну антену використовуються два напівхвильові вібратори, доповнені конструктивними елементами до конічних вібраторів для розширення частотного діапазону. Два конічні вібратори розташовані перпендикулярно один до одного для приймання еліптично поляризованих хвиль, відбитих від іоносфери. На антену подається сигнал із амплітудою 400 В. Приймач приймає радіосигнали, відбиті від іоносфери, підсилює їх і перетворює за частотою. Проміжна частота приймача дорівнює 215 КГц. Випромінювач (рис. 1) випромінює M -послідовність радіоімпульсів (рис. 2). Тривалість однієї позиції становить 30 мкс, а M -послідовності $T = 480$ мкс. Інтервал між відліками $\Delta t = 0,2$ мкс, між випромінюванням послідовностями – 6 мс. Цього достатньо, щоб радіохвилі навіть тричі відбилися від іоносфери. Робоча частота змінюється дискретно від 1 МГц до 9 МГц.

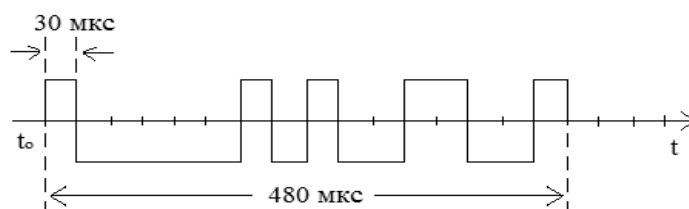


Рис. 2. M -послідовність радіоімпульсів

Вихідну M -послідовність, прийняту приймачем у момент випромінювання, тривалістю однієї позиції 30 мкс, один відлік якої дорівнює 0,2 мкс, показано на рис. 3.

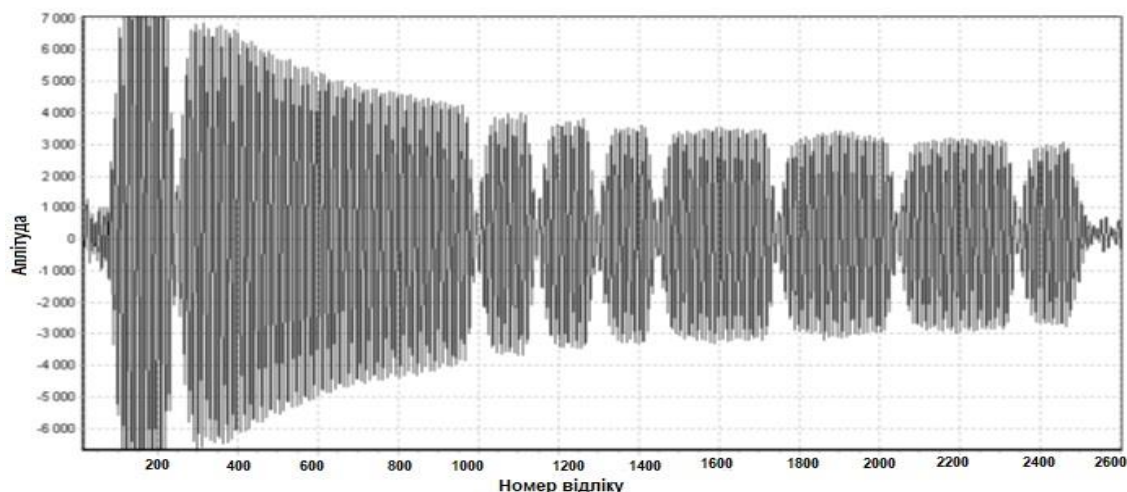


Рис. 3. Структура вихідного сигналу – 16-позиційна M -послідовність

На рис. 4 наведено вихідне повідомлення, отримане на одній частоті, тривалістю 6 мс без оброблення. Такі повідомлення приймаються приймачем на фіксованій частоті. На цій самій частоті приймається і перешкода.

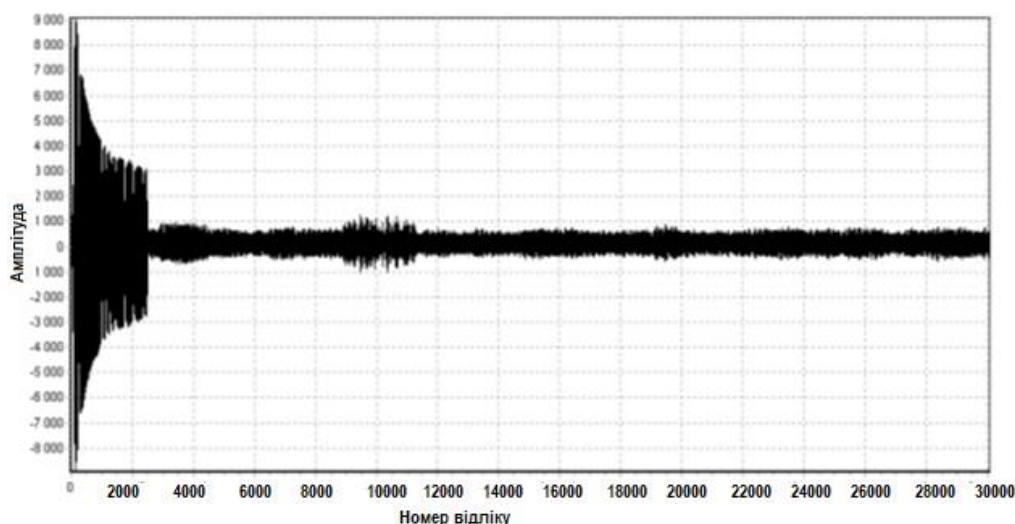


Рис. 4. Відбитий сигнал на виході приймача пристрою вертикального зондування іоносфери (без оброблення)

У результаті кореляційного оброблення (рис. 5) перешкода практично зникає. Кореляційна функція випромінюваної M -послідовності в максимумі досягає значення 1200.

Розглянемо **економічний портативний когерентний іонозонд на базі технології програмного радіо** (Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, м. Харків). Він дозволяє проводити іоносферну діагностику в безперервному режимі й не вимагає великих фінансових витрат. Найближчими цілями для його практичного використання є експлуатація на УАС «Академік Вернадський», а також оснащення аналогічним устаткуванням декількох обсерваторій в Україні для створення системи підсупутникового іоносферного моніторингу та інформаційного забезпечення Центру прогнозування космічної погоди.

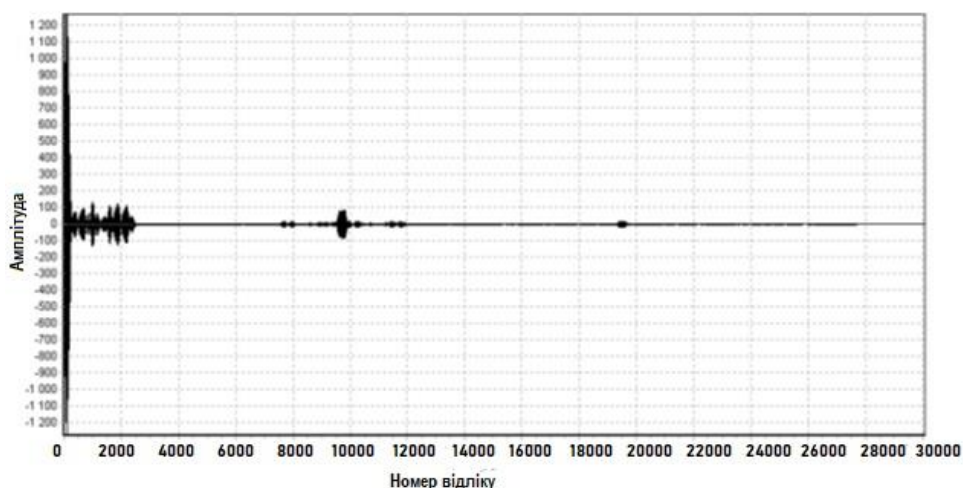


Рис. 5. Структура сигналу після кореляційного оброблення

Слід зауважити, що принцип побудови іонозонда ґрунтується на ідеях, закладених у конструкцію аналогічних сучасних пристроїв, зокрема іонозонда DPS4 [8], а також на використанні технології програмного радіо SDR (Software Defined Radio) для іоносферного зондування.

Основною відмінністю цього комплексу від розроблених раніше аналогів є застосування зв'язкового передавача порівняно малої потужності. Функціонально іонозонд складається з керувального комп'ютера (ПК), програмного радіо USRP N200 KIT (Universal Software Radio Peripheral) [9], антенного комутатора ZX80-DR230+ [https://ww2.minicircuits.com/pdfs/ZX80-DR230+.pdf] і трансивера ICOM-IC-718 [5] із блоком живлення SP-200-13,5 (рис. 6).

Його технічні характеристики: діапазон робочих частот – 1,6–30 МГц; діапазон вимірювальних висот – 90–825 км; роздільна здатність за висотою – 1,4 км; максимальна потужність випромінювання передавача в імпульсі – 100 Вт; фіксована довжина однієї кодової послідовності – 0,6 мс; кількість елементарних субімпульсів – від 4 до 64; в одній кодовій послідовності відзначається зростання ($2n$, $n = 2 \dots 6$); кількість кодових посилок на одній частоті в режимі іонозонда – від 1 до 250.

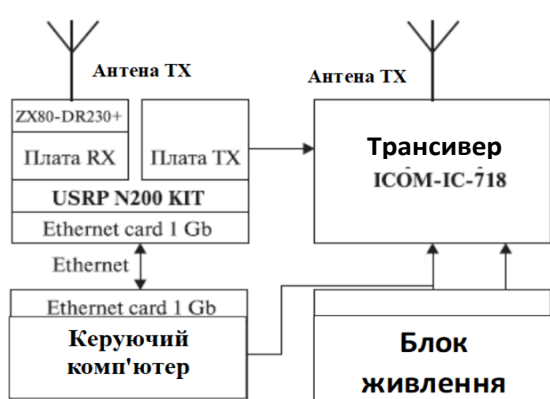


Рис. 6. Блок-схема макета іонозонда

Як видно з рис. 6, для виконання зондувань потрібно дві антени: приймальна та передавальна. На практиці можуть використовуватися антени різних типів із робочою смугою частот 1,6–30 МГц. Для передавальної антени споживання енергії має бути більше ніж 100 Вт, а коефіцієнт стоячої хвилі в антенно-фідерному тракті не повинен перевищувати 2,5.

Пристрій функціонує таким чином: у керувальному ПК на кожній частоті зондування формуються пробні імпульси, що складаються з послідовності фазоманіпульованих субімпульсів («chirps»). Для генерації субімпульсів використовуються комплементарні коди [4], які забезпечують необхідний висотний дозвіл відповідно до довжини одного субімпульсу. Таке кодування покращує співвідношення сигнал/шум пропорційно кількості субімпульсів коду. У програмному радіо USRP за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) ця послідовність перетворюється в аналоговий сигнал, посилюється до необхідного рівня на платі TX і після посилення трансивером ICOM подається на передавальну антену. Відбитий від іоносфери сигнал надходить на приймальну антену, а з неї – на приймальну плату RX пристрою USRP, де він посилюється до рівня вхідної напруги аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Після перетворення в цифру прийнятий сигнал надходить до ПК, який виконує такі функції: управління програмним радіо, формування й оброблення сигналів, відображення та збирання даних, їх зберігання, а також аналіз.

Портативний цифровий іонозонд DPS-4 – система, що складається з іонозонда та чотирьох приймальних антен, відрізняється від своїх попередніх аналогів тим, що має передавач малої потужності (300 Вт проти 10 кВт для попередніх своїх прототипів). Синхронізація часу проводиться через систему глобального позиціонування GPS. Загальний вигляд DPS-4 показано на рис. 7, а його передавальної та приймальної антен DPS-4 – на рис. 8.



Рис. 7. Загальний вигляд DPS-4

Для випромінювання радіосигналів використовується антенна система у вигляді схрещеного вертикального ромба для короткохвильового (КХ) діапазону та чотирьох поперечних приймальних антен типу магнітний диполь.

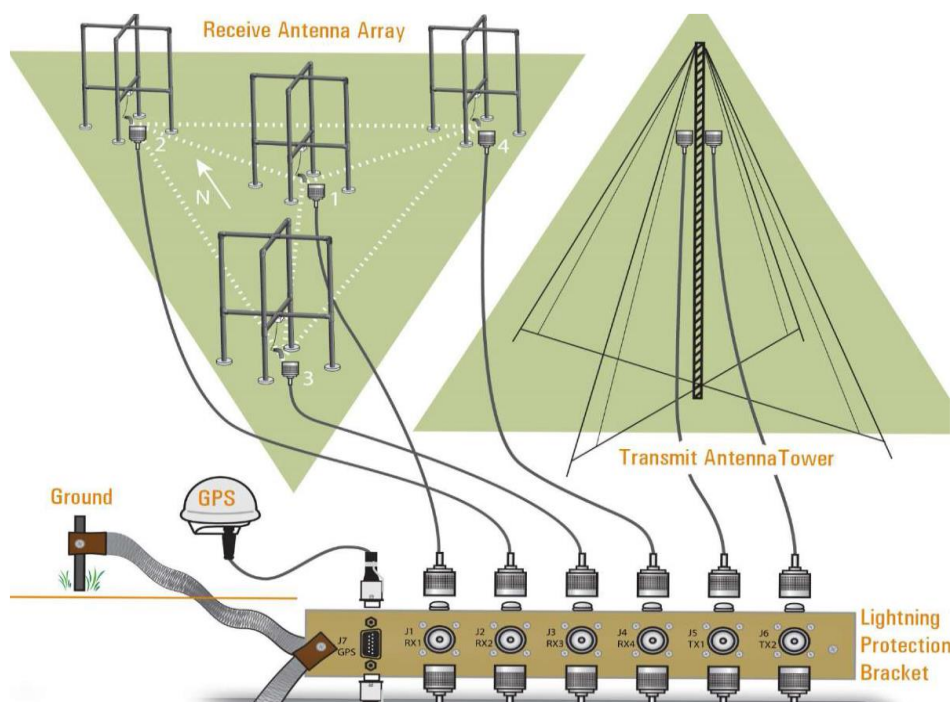


Рис. 8. Загальний вигляд передавальної та приймальної антен DPS-4

Короткий опис цифрової іоносферної станції DPS-41: частотний діапазон випромінювання – 1–30 МГц; потужність випромінювання передавача – 300 Вт; тривалість зондувального імпульсу – 533 мкс; частота проходження імпульсів – 50–100–200 Гц залежно від вибору програми; частотний крок зондування – від 5 кГц до 200 кГц залежно від вибору програми; висотний діапазон – 640 км і 1280 км залежно від вибору програми; габарити – 721 мм x 584 мм x 483 мм; вага – 60 кг.

Отже, система DPS-4 – приймально-передавальний комплекс, здатний контролювати в реальному часі характеристики фізичних властивостей іоносфери й електричні властивості радіосигналів, що розповсюджуються в ній.

Завдяки встановленій у ПК іонозонда мережевій карті можливим є програмно передбачений віддалений контроль та управління станом іонозонда, а також вихід в Інтернет. Відповідно, DPS-4 автоматично може передавати дані вимірювань у світові центри даних, зацікавленим установам та приватним особам тощо. Прямий доступ до управління і даних іонозонда можливий лише з дозволу адміністратора мережі.

Запропоновано **апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням ЛЧМ-сигналів**, побудований на основі універсальної платформи USRP N210, яка дозволяє використовувати приймачі та передавачі за технологією SDR у діапазоні частот до 6 ГГц. Такий широкий частотний діапазон забезпечується змінними дочірніми платами. Оскільки нас цікавить декаметровий діапазон, то як дочірні плати були вибрані LFTX і LFRX, які забезпечують передавання та приймання сигналів у діапазоні до 30 МГц. Основу приймального тракту пристрою становить 14-бітний АЦП, який працює на швидкості 100 MS / s, що дозволяє приймати радіосигнали до 50 МГц без попереднього перетворення. Інфрачервоний промінь формується за допомогою 16-бітного ЦАП і працює на швидкості 400 MS / s.

Структурну схему комплексу наведено на рис. 9. Комплексний ЛЧМ-сигнал для випромінювання формується в ПК. Далі він надходить в універсальну апаратну платформу (USRP), де переноситься на робочу частоту за допомогою цифрового перетворювача вгору (DUC) і перетворюється в аналогову форму (ЦАП). Після підсилювача потужності через комутатор, який управляється функцією, що переключає, сигнал надходить в антену. Відбитий від іоносфери сигнал приймається тією ж антеною і через комутатор надходить в універсальну апаратну платформу (USRP), що реалізує приймач. Тут прийнятий сигнал відразу перетворюється в цифрову форму (АЦП). Далі цифровий понижувальний конвертер (DDC) здійснює вибірку спектра необхідної смуги і передає його в ПК для оброблення в комплексному вигляді. На першому етапі оброблення сигналу полягає в стисненні прийнятого ЛЧМ-сигналу і записі його у файл. Стиснення ЛЧМ-сигналу здійснюється в демодуляторі шляхом перемноження прийнятого сигналу з аналітичним ЛЧМ-сигналом. Далі обчислюється висотно-частотна характеристика (іонограми) і визначаються параметри каналу.

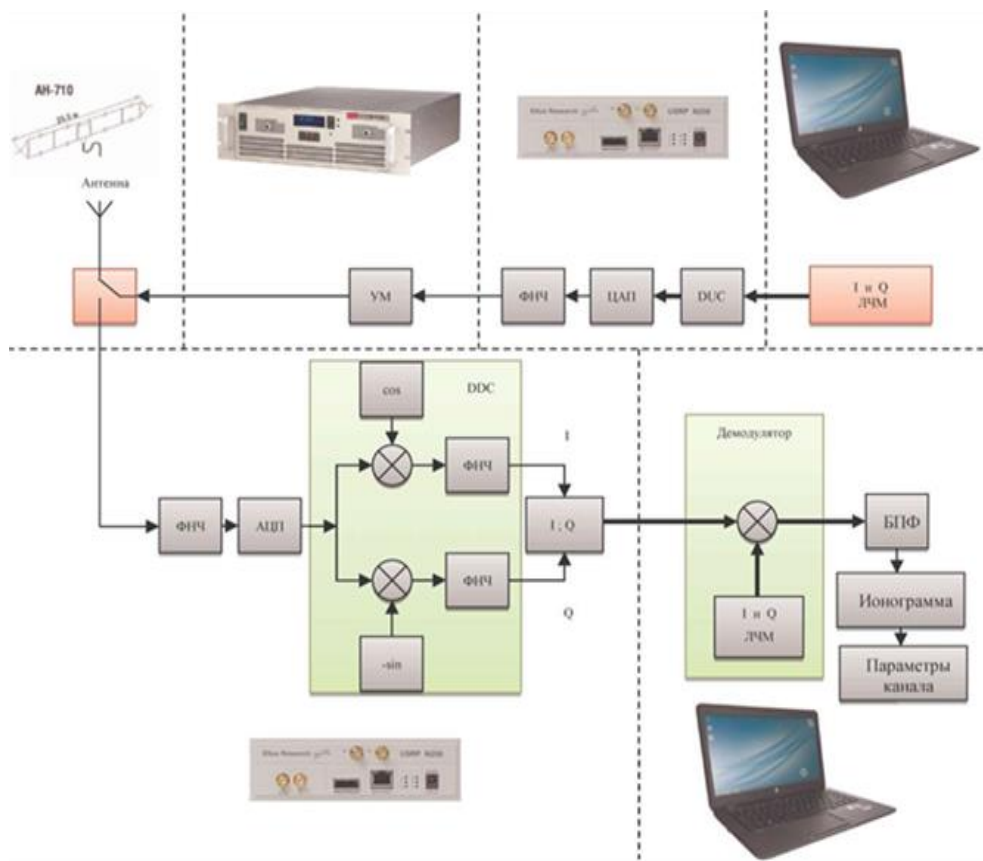


Рис. 9. Структурна схема апаратно-програмного комплексу частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку

Основні технічні характеристики комплексу: діапазон робочих частот – 2–20 МГц; швидкість сканування (зміни) частоти – 50 кГц / с; діапазон висот – 90–1000 км; потужність випромінювання – 5–10 Вт; роздільна здатність за частотою іоносферного каналу – 20,5 кГц; роздільна здатність за часом групового запізнення – 58 мкс.

Зовнішній вигляд комплексу наведено на рис. 10.

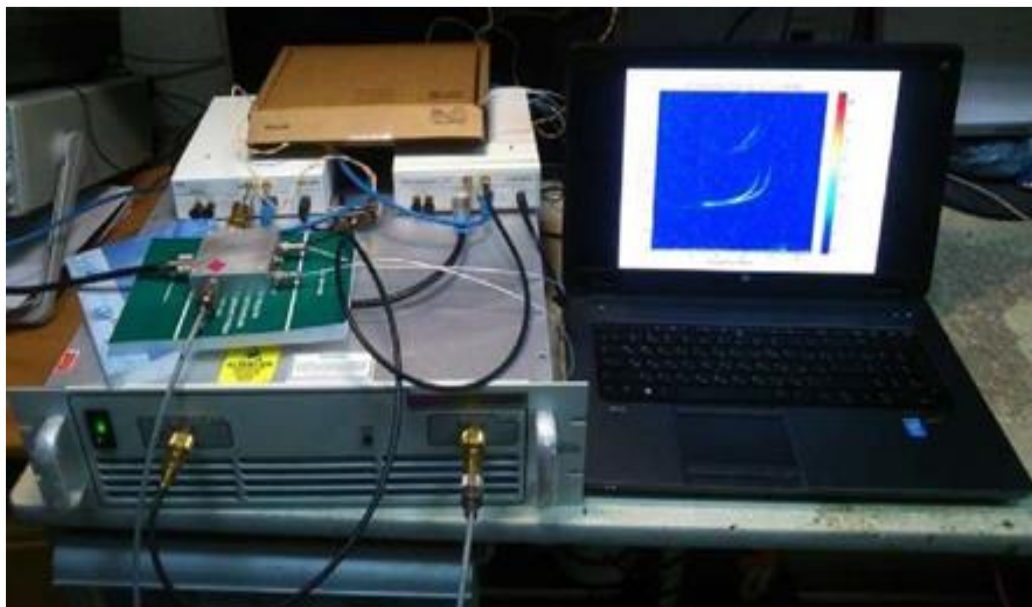


Рис. 10. Апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку

Для роботи на одну приймально-передавальну антену в однопозиційному ЛЧМ-іонозонді використовується антенний перемикач, який блокуватиме вхід приймача на час передавання сигналу та відключатиме сигнал від передавача під час приймання відбитого сигналу. Для забезпечення коротких імпульсів (більше 600 мкс) перемикач повинен мати високу швидкість перемикання, що робить неможливим застосування механічних перемикачів на реле, тому як керувальні елементи використані р-і-п діоди UM904A. Схема складається із самого комутатора на р-і-п діодах і формувача керувальної напруги (драйвера). Генератор керувальної функції формує тимчасові інтервали керувальних імпульсів стандартних логічних рівнів. Потім драйвер перетворює ці рівні напруги в двополярні прямокутні імпульси рівнів $-25 / +25$ В. Перемикач забезпечує час перемикання 12 мкс. З огляду на цю особливість керувальний сигнал був скоригований шляхом додавання захисних інтервалів у керувальну функцію під час формування високочастотного сигналу. При цьому тривалість кожного переданого імпульсу зменшується на 24 мкс.

Підсилювач радіосигналів 5084F OPHIR RF підсилює сигнал із виходу USRP. Для випромінювання і приймання сигналу використовується антена типу горизонтальний диполь Icom AH-710.

Основні характеристики: діапазон робочих частот – 1,9–30 МГц; фізична довжина антени в робочому стані (розмах) – 24,5 м.

Сигнал для зондування формується програмою LFSR Transmitter. Тут синтезується ЛЧМ-сигнал, який використовується для діагностування, а також керувальний сигнал для антенного комутатора передавача однопозиційного іонозонда, побудованого на універсальній платформі USRP. Керувальний сигнал комутації має форму прямокутних імпульсів, що відповідають послідовності перемикання. Цей сигнал генерується в передавальному USRP за допомогою цифрових портів введення-виведення, якими

управляють із ПК. ЛЧМ-сигнал синтезується у вигляді комплексної обвідної. Для генерації зондувального ЛЧМ-сигналу і сигналів, синхронізованих за часом, використовують вбудований у USRP модуль GPS. Це дозволяє виключити з передавального сигналу тимчасові інтервали, відведені на прийом, і накласти на фронти сигналу вагові функції. Для зменшення несмугового випромінювання на імпульси накладаються вагові функції.

Оброблення сигналу здійснюється в програмі dsChirp. Тут проводиться стиснення сигналу, побудова іонограми та їх очищення від станційних шумів методом медіальної фільтрації. Синхронізація за часом забезпечується вбудованим в USRP модулем GPS. Інтерфейс програми наведено на рис. 11.

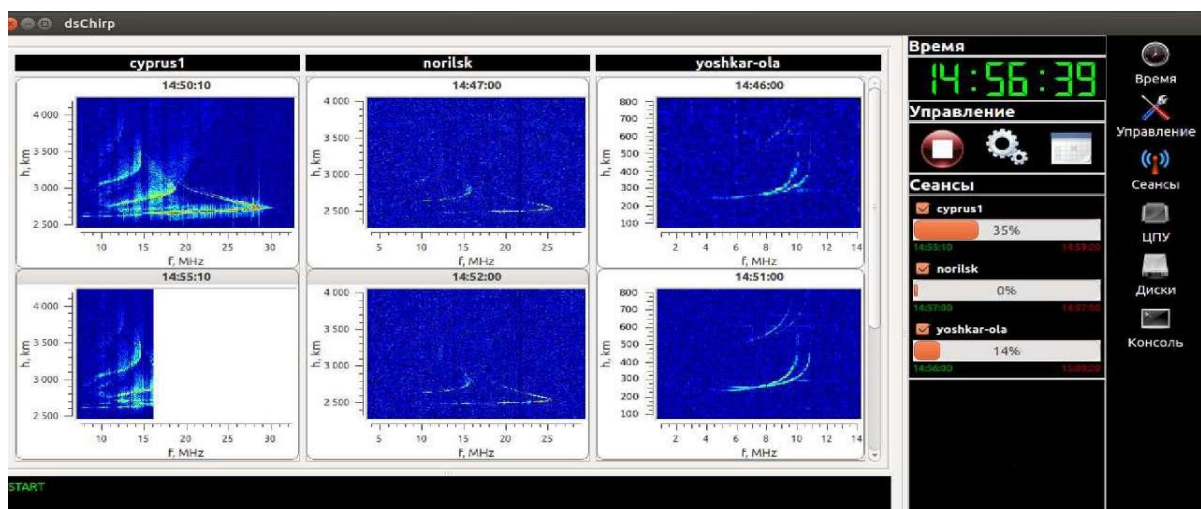


Рис. 11. Інтерфейс програми dsChirp

Для **порівняльного аналізу** сучасних іонозондів візьмемо основні параметри, а саме: еквівалентну потужність випромінювання P_e і спектр сигналу який випромінюється F_c .

Потужність випромінювання сигналу визначає: енергетичні витрати, відношення сигнал / шум, габарити й вагу виробу, розміри та технічні характеристики антен, електромагнітну сумісність із сусідніми радіоелектронними пристроями тощо. Для нівелювання взаємовиключних вимог застосовують широкосмугові сигнали з великою базою, які дозволяють зменшити потужність випромінювання сигналу в базу раз. Тоді еквівалентна потужність випромінювання – це необхідна потужність випромінювання пристрою, який використовує вузькосмуговий сигнал для досягнення таких самих технічних характеристик, що і пристрій із використанням широкосмугових сигналів.

В іоносферному КХ-каналі має місце ефект частотної дисперсії, який із перевищенням смугою сигналу деякої величини (смуги когерентності каналу) призводить до сильного спотворення форми його обвідної [5]). Гранична смуга частотного спектра елемента сигналу не повинна перевищувати ~ 30 кГц. Величиною цієї смуги в ході зондування іоносфери визначається роздільна здатність за висотою відображення, а в разі зондування радіоканалу – точність оцінки розсіювання за затримкою.

Станція вертикального зондування «Вектор» подає на антену сигнал з амплітудою $U_a = 400$ В. Якщо опір антени $R_a = 50$ Ом, то потужність, яка передається антені дорівнює

$$P_a = I \cdot (U_a/2) = U_a^2/2R = 1600 \text{ Вт.}$$

Випромінювач випромінює M -послідовність радіоімпульсів. Тривалість однієї позиції $T_n = 30$ мкс. Тривалість M -послідовності $T = 480$ мкс. Тоді база сигналу, який випромінюється, $B = 16$. Еквівалентна потужність пристрою дорівнює

$$P_e = P_a \cdot B = 25,6 \text{ кВт.}$$

Спектр сигналу дорівнює спектру сигналу однієї позиції, а саме:

$$F_c = 1/N_n = 33,3 \text{ кГц.}$$

Економічний портативний когерентний іонозонд на базі технології програмного радіо (Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, м. Харків). Використовуючи такі дані: максимальну потужність випромінювання передавача в імпульсі – 100 Вт; фіксовану довжину однієї кодової посилки – 0,6; кількість елементарних субімпульсів – від 4 до 64, – отримаємо: еквівалентну потужність пристрою $P_e = 6,4$ кВт; спектр сигналу, який випромінюється, – $F_c = 106,66$ кГц.

Портативний цифровий іонозонд DPS-4 має 16 субімпульсів у зондувальному сигналі, тоді еквівалентна потужність пристрою дорівнює $P_e = 4,8$ кВт (з урахуванням антени для приймання $P_e > 16$ кВт); спектр сигналу, який випромінюється, $F_c = 30$ кГц.

Апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням ЛЧМ-сигналів має такі характеристики: еквівалентна потужність пристрою $P_e > 10$ кВт; спектр сигналу, який випромінюється, $F_c = 30$ кГц.

За своїми характеристиками портативний цифровий іонозонд DPS-4 та апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням ЛЧМ-сигналів є сучасними компактними приладами з багатим функціональним наповненням.

Станція вертикального зондування «Вектор» – це сучасний прилад, проте він використовує значну потужність – 1,6 кВт, що є недоліком. Крім того, потрібно враховувати електромагнітну сумісність із навколишніми радіоелектронними засобами.

Економічний портативний когерентний іонозонд на базі технології програмного радіо (Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, м. Харків) також має деякі сумнівні характеристики іонозонда, оскільки під час його розроблення не були враховані дисперсійні властивості іоносфери. Спектр сигналу перевищує допустимий спектр більше ніж втричі – 103 кГц, а гранична смуга частотного спектра елемента сигналу не повинна перевищувати 30 кГц [5].

Висновки. Виходячи із зазначеного вище, ідеальний іонозонд, інформація якого буде використовуватися для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистем, а також для мінімізації ризиків, пов'язаних із впливом атмосферних явищ на електричну інфраструктуру, повинен мати такі характеристики:

щонайменшу вихідну потужність передавача;

електромагнітну сумісність із навколишніми радіоелектронними засобами;
спектр випромінюваного сигналу F_c повинен бути не більше 30 кГц;
щонайменший час отримання необхідної інформації про стан іоносфери,
функціональність;
інформативність;
простоту реалізації та експлуатації;
надійність, мобільність, екологічність;
оптимальне відношення вартість / якість.

Для реалізації цих характеристик необхідно використовувати: широкосмугові сигнали з великою базою та їх оптимальне оброблення; сучасні антенні системи; новітні алгоритми оброблення сигналів; сучасні передавачі та приймачі радіосигналів.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Кременецький І. О., Черемних О. К. Космічна погода: механізми і прояви / За ред. О. П. Федорова. Київ : Наукова думка, 2009. 144 с
2. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы : Монография. Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 576 с.
3. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11, № 1/2. С. 37–57.
4. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія. 1999. Т. 5, № 1. С. 38–47. <https://doi.org/10.15407/knit1999.01.038>
5. Грицай А. В., Міліневський Г. П. Загальний вміст озону над станцією Київ – Голосіїв за наземними та супутниковими вимірюваннями у 2010–2015 рр. // Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24, № 3. С. 40–54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>
6. Golay M. S. Complementary Codes // IRE Trans. Inform.Theory. April 1961. Vol. 7, № 2. P. 82–87.
7. The Digisonde Portable Sounder – DPS. Techn. Manual. / B. Reinisch et al. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007.
8. Радіостанції цифрові портативні. URL: <https://radio-product.com.ua/p298416014-icom-7200-transiver.html> (дата звернення: 10.11.2025).
9. ETTUS USRP B200 SDR трансивер. URL: <https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT> (дата звернення: 10.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. Kremenetskyi, I. O., & Cheremnykh, O. K. (2009). *Kosmichna pohoda: mekhanizmy i proiavy [Space Weather: Mechanisms and Manifestations]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Lazorenko, O. V., & Chernogor, L. F. (2009). *Sverhshirokopolosnye signaly i processy: Monografiya [Ultra-Wideband Signals and Processes: Monograph]*. Kharkiv [in russian].

3. Burmaka, V. P., Lysenko, V. N., & Chernogor, L. F. (2005). Rezultaty issledovaniya volnovykh processov v ionosfere pri razlichnykh sostoyaniyakh kosmicheskoy pogody [Results of the Study of Wave Processes in the Ionosphere under Various States of Space Weather]. *Kosmichna nauka i tekhnologhiia [Space Science and Technology]*, 11, 1/2, 37–57 [in russian].
4. Chernogor, L. F. (1999). Energetika processov na Zemle, v atmosfere i okolozemnom kosmose v svete proekta «Poperedzhennya» [Energy of Processes on Earth, in the Atmosphere, and in Near-Earth Space in Light of the "Warning" project]. *Kosmichna nauka i tekhnologhiia [Space Science and Technology]*, 5, 1, 38–47 [in russian].
<https://doi.org/10.15407/knit1999.01.038>
5. Hrytsai, A. V., & Milinevskiy, H. P. (2018). Zahalnyi vmist ozonu nad stantsiieiu Kyiv – Holosiiv za nazemnymy ta suputnykovymy vymiriuivanniamy u 2010–2015 rr. [Total Ozone Content over Kyiv-Goloseyev Station by Ground-Based and Satellite Measurements in 2010–2015]. *Kosmichna nauka i tekhnologhiia [Space Science and Technology]*, 24, 3, 40–54.
<https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040> [in Ukrainian].
6. Golay, M. S. (April 1961). Complementary Codes. *IRE Trans. Inform.Theory*, 7, 2, 82–87.
7. Reinisch, B., et al. (2007). *The Digisonde Portable Sounder – DPS. Techn. Manual*. University of Massachusetts Lowell Centerfor Atmospheric Research.
8. Radiostantsii tsyfrovi portatyvni [Digital Portable Radio Stations]. Retrieved from <https://radio-product.com.ua/p298416014-icom-7200-transiver.html> [in Ukrainian].
9. ETTUS USRP B200 SDR Transceiver. (n.d.). Retrieved from <https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>

Yu. P. Honcharenko, I. I. Poleschchuk, O. I. Sokolovskyi, V. A. Yakovenko

JUSTIFICATION OF THE NEED TO CREATE A BUDGETARY IONOSONDE TO INCREASE THE RELIABILITY AND EFFICIENCY OF THE POWER SYSTEM

The main goal of the article is to substantiate the creation of a modern ionosonde, the information from which will be used to improve the reliability and efficiency of power systems, as well as to minimize the risks associated with the impact of atmospheric phenomena on electrical infrastructure, and whose characteristics are on par with modern products from leading countries worldwide.

An analysis of modern ionosondes and their technical characteristics has been carried out. A method for creating a synthesized chirp linear frequency modulation signal and its optimal filtering for use in vertical ionospheric sounding radar has been developed. A method and technique for generating a synthesized linear frequency modulation signal have been developed, and some studies have been conducted regarding the possibility of using this signal in vertical ionospheric sounding radar. The composition of a hardware-software complex for frequency support of short-range HF communication using linear frequency modulation signals is substantiated. The hardware-software complex for frequency support of short-range HF communication is built on the basis of the universal USRP N210 platform. This platform allows the use of receivers and transmitters based on SDR (Software Defined Radio) technology in the frequency range up to 6 GHz. Such a wide frequency range can be provided by interchangeable daughterboards.

Based on the analysis carried out, the development of an ionosonde is proposed, the manufacturing cost of which is significantly lower than that of similar products from global vertical ionospheric sounding radar manufacturers, while some technical characteristics are significantly better. For a comparative analysis of the proposed and modern ionosondes, the following main parameters were selected for comparison, namely the equivalent radiated power and the spectrum of the emitted signal.

Based on the research carried out, the requirements and basic technical characteristics that an ideal ionosonde should meet are determined.

Keywords: *energy system, ionosonde, radar systems for vertical sounding, synthesized linear frequency modulation signal; optimal filtering.*