

В.М. Горобець, В.Б. Синицький, С.І. Хоменко

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: vgorobets777@gmail.com

Дослідження поширення радіохвиль сантиметрового діапазону над морем із використанням високопотенційної доплерівської РЛС

Предмет і мета роботи. Стаття присвячена дослідженням поширення радіохвиль сантиметрового діапазону над морем у прибережній зоні. Особливий інтерес представляють вимірювання множника ослаблення радіохвиль у зоні півтіні і глибокої тіні. Метою роботи є вивчення умов поширення радіохвиль НВЧ-діапазону на загоризонтній трасі в прибережній зоні з використанням радіолокаційного методу.

Методи і методологія роботи. Розроблено й апробовано радіолокаційний метод вимірювання множника ослаблення сантиметрових хвиль на загоризонтній трасі протяжністю 60 км у приводному шарі тропосфери. Для досліджень використовувалися високопотенційна РЛС і доплерівські імітатори цілі (відповідачі). Експерименти включали в себе вивчення часових характеристик сигналів від імітаторів радіолокаційних цілей, які знаходились на різній висоті, і просторової структури поля за допомогою відповідача, що рівномірно переміщується по висоті від 1 до 27 м за 25 хв.

Результати роботи. Розроблено та виготовлено макет високопотенційної когерентної доплерівської радіолокаційної станції (РЛС) неперервного випромінювання сантиметрового діапазону радіохвиль. Розроблено й апробовано радіолокаційний метод вивчення умов поширення радіохвиль НВЧ-діапазону в зоні тіні з використанням РЛС неперервного випромінювання і доплерівських відповідачів з ефективною площею розсіювання близько 60 м^2 .

Висновок. Показано, що за допомогою запропонованого методу можна спостерігати сигнали від відповідачів на приводних трасах на дистанціях до двох дальностей радіогоризонту. Цей метод може бути використаний для калібрування РЛС у процесі вирішення різних локаційних задач у прибережній зоні: виявлення та супроводження малорозмірних і низько літаючих радіолокаційних цілей, їх розпізнавання та ін. *Л. б. Бібліогр.: 14 назв.*

Ключові слова: загоризонтне поширення, множник ослаблення, РЛС, доплерівський відповідач.

Дослідження поширення радіохвиль над морською поверхнею значною мірою пов'язані з вирішенням низки прикладних задач: поліпшенням якості засобів зв'язку і навігації, підвищенням дальності дії радіолокаційної станції (РЛС) та ін. Особливої актуальності ці дослідження набувають при вивченні поширення радіохвиль за радіогоризонтом, у зоні геометричної тіні, де рівень сигналу досить часто перевищує розрахункові значення. Фізичними передумовами для такого збільшення рівня сигналу на загоризонтних трасах є різні механізми аномального поширення радіохвиль: наявність атмосферних хвилеводів у приводному шарі атмосфери, поява інверсійних шарів і ша-

руватих неоднорідностей, а також просторово-часові флуктуації коефіцієнта заломлення атмосфери [1–4].

Усі дослідження щодо вивчення поширення радіохвиль у першу чергу спрямовані на прогнозування і діагностику величини множника ослаблення радіохвиль V у точці приймання. Такі завдання вирішує, наприклад, американська система *IREPS* [5, 6]. Одним із недоліків цієї системи є те, що мінливість клімату на земній кулі весь час посилюється. Це вимагає постійного оновлення даних і, як наслідок, нових досліджень.

Оновлення таких статистичних даних – процес економічно витратний. Це стосується як

вимірювання висотних профілів тропосфери за допомогою куль-зондів, рефрактометрів та ін., так і дистанційних вимірювань множника ослаблення шляхом організації великої кількості вимірювальних трас «приймач–передач» з використанням супутників, кораблів [7, 8] і літаків [9]. Альтернативою таким вимірювальним трасам можуть служити радіолокаційні вимірювання відбитків від морської поверхні для вивчення загоризонтного поширення радіохвиль [10–12]. Однак застосування такої методики можливе тільки для РЛС з високим потенціалом. До того ж невизначеність метеорологічної обстановки в зоні «засвітки», що впливає на ефективну площу розсіювання (ЕПР) морської поверхні, не дозволяє достовірно проводити діагностику і прогнозування величини множника ослаблення за допомогою цього методу.

У даній роботі пропонується використання радіолокаційного методу для вивчення умов поширення радіохвиль і калібрування РЛС НВЧ-діапазону на загоризонтній трасі в прибережній зоні. Відмінною особливістю цього методу є використання високопотенційної РЛС і рупорних відповідачів у якості джерел вторинного випромінювання. Високопотенційна РЛС дозволяє впевнено спостерігати рупорні відповідачі з ЕПР, яка дорівнює ЕПР малорозмірних радіолокаційних об'єктів, що знаходяться практично на рівні моря на відстані до 60 км.

1. Методика і апаратура. Апробація методики, що використовує радіолокаційний метод дослідження просторово-часової структури радіохвиль НВЧ-діапазону над морською поверхнею в прибережній зоні, проводилася в сантиметровому діапазоні хвиль ($\lambda = 4$ см) на двох трасах прямої радіовидимості протяжністю 8 і 21 км [9].

Експерименти включали в себе вивчення часових характеристик сигналів від імітаторів радіолокаційних цілей, які знаходились на різній висоті, і просторової структури поля за допомогою відповідача, що рівномірно переміщався по висоті.

Дослідження на приводних трасах у прибережній зоні показали, що поле в межах прямої видимості має інтерференційний характер і в більшості випадків може бути описане в рамках двопроменевої моделі.

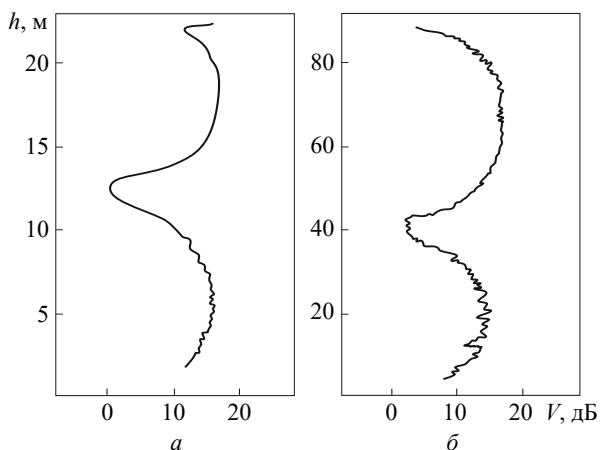


Рис. 1. Висотна залежність $V(h)$ на трасах прямої радіовидимості протяжністю 8 км (а) і 21 км (б)

В експериментах спостерігалися різні типи висотних залежностей $V(h)$, причому переважну частину (~90 %) з них становили профілі «нормального» типу з пелюстками приблизно однакового розміру за висотою (у межах ~20 %) і величиною максимумів, що відрізнялася на 2...5 дБ (рис. 1).

Дослідження висотних залежностей поля дає можливість знайти параметри середовища поширення, важливі для подальшого аналізу. За співвідношенням максимального і мінімального значень пелюсткової структури можна визначити ефективний коефіцієнт відбиття $\Phi_{\text{еф}}$ від поверхні розділу [13]. Це відноситься до висотних залежностей $V(h)$ «нормального» типу. Ефективний коефіцієнт відбиття $\Phi_{\text{еф}}$ визначається як

$$\Phi_{\text{еф}} = \frac{k - 1}{k + 1},$$

де величина $k = V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$ знаходиться із залежності $V(h)$.

Знайдені з дослідів на трасі 21 км значення $\Phi_{\text{еф}}$ для хвилі 4 см становили величину $\approx 0,7$. Потім за величиною коефіцієнта відбиття для цього експерименту і значення множника ослаблення в максимумі пелюстки визначається множник ослаблення вільного простору V_0 , необхідний для калібрування потенціалу апаратури. У дослідях на трасі прямої видимості протяжністю 21 км рівень прийнятого сигналу, відповідний V_0 , в середньому становив $P_{\text{пр}} = -154$ дБВт з ЕПР відповідача $0,1 \text{ м}^2$. Це значення $P_{\text{пр}}$ може служити відправним параметром для визначення характеристик вимірю-

вальної системи, що розробляється для експериментальних досліджень у зоні тіні.

Вибір траси для проведення досліджень у зоні тіні полягає в першу чергу в забезпеченні дальності до відповідачів, необхідної для реалізації на трасі зони тіні з урахуванням висот кореспондуючих пунктів (РЛС і відповідачів). Крім того, важливим моментом є наявність місця для установки відповідачів у даній прибережній зоні, де буде забезпечена можливість проведення досліджень, перш за все – вимірювання висотних залежностей множника ослаблення.

З огляду на те, що зона тіні для трас поширення УКХ в умовах стандартної тропосфери починається з відстані між кореспондуючими пунктами $R = 1,2 R_{\text{пв}}$ [14], де $R_{\text{пв}}$ – відстань прямої видимості, була обрана прибережна траса довжиною 60 км з висотою берега 27 м над рівнем моря в місці розташування відповідачів. За таких умов відстань прямої видимості для РЛС, розташованої на висоті $h_{\text{РЛС}} = 25$ м, і відповідача, розташованого на рівні моря $h_{\text{в}} = 0$ м, становить $R_{\text{пв}} = 4,12(\sqrt{h_{\text{РЛС}}} + \sqrt{h_{\text{в}}}) = 20,6$ км. Експериментальні дослідження просторово-часової структури УВЧ-полів у зоні тіні в приводному шарі тропосфери проводилися на трасі протяжністю 60 км. Експерименти включали в себе дослідження часових характеристик сигналів від відповідачів, розташованих у фіксованих за висотою точках, і просторової структури поля за допомогою рухомого пристрою, що переміщався по висоті.

Вимірювання часових характеристик множника ослаблення $V(t)$ проводилося за допомогою відповідачів, встановлених на 5 фіксованих висотах: 5, 12, 18,5, 24 і 27 м.

Вимірювання висотних залежностей множника ослаблення $V(h)$ здійснювалося за допомогою спеціального підйомника, встановленого на схилі берега, і рухомої каретки з відповідачем. Підйомник дозволяв переміщати відповідач у діапазоні висот 1,5...27 м за 25 секунд. Сумарна похибка визначення висоти відповідача за рахунок нерівномірності руху і помилки синхронізації початку і закінчення підйому не перевищувала 0,5 м.

Вимірювання були виконані в діапазоні $\lambda = 4$ см за допомогою макета високопотенційної доплерівської РЛС і доплерівських відповідачів з ЕПР, рівною 60 м^2 .

Для визначення чутливості приймача РЛС, необхідної для спостереження за відповідачем на мінімальній висоті установки 5 м, задамося величиною погонного загасання радіохвиль сантиметрового діапазону на загоризонтній трасі за експериментальними даними роботи [9]. З урахуванням величини прийнятого сигналу з експериментів на трасі довжиною 21 км і додаткового загасання на ділянці траси в зоні тіні від 20 до 60 км для впевненого приймання сигналів відповідача з ЕПР 60 м^2 чутливість приймача повинна становити не менше -180 дБВт.

Крім високої чутливості, до макета РЛС висуваються інші вимоги – великий динамічний діапазон, низький рівень власних шумів, стабільність частоти випромінюваних коливань, висока когерентність.

Виконання цих вимог забезпечувалося вибором як схемних рішень побудови макета РЛС, так і його складових частин та елементів.

Однією з важливих характеристик РЛС неперервного випромінювання є його динамічний діапазон, що характеризує можливість розрізняти малий рівень сигналу на фоні великого рівня просочування сигналу передавача в приймач, а також сигналу, відбитого від близько розташованих місцевих предметів. Ця вимога є важливою в першу чергу тому, що дослідження проводяться в прибережній зоні на фоні гір берегової лінії з ЕПР близько 105 м^2 .

Розширити динамічний діапазон приймача РЛС неперервного випромінювання, звільняючись від просочування несучої частоти передавального пристрою і супутніх їй шумів бічних смуг вже на НВЧ, можна за рахунок застосування селективних високодобротних контурів на основі резонаторів.

Важливим конструктивним рішенням для зменшення просочування є застосування двох рознесених антен для передавання і приймання. При застосуванні антен з реальними розмірами і прийнятним конструктивним розміщенням вдається отримати розв'язку в 80...85 дБ.

Уся апаратура макета РЛС фізично розміщувалася у двох кабінах, що оберталися: приймальної (П-20_{пр}) і передавальної (П-20_{прд}). Кабіни з'єднувалися за допомогою штанги, що знаходилася на відстані 2 м від осі обертання. Така конструкція забезпечила мінімальні ази-

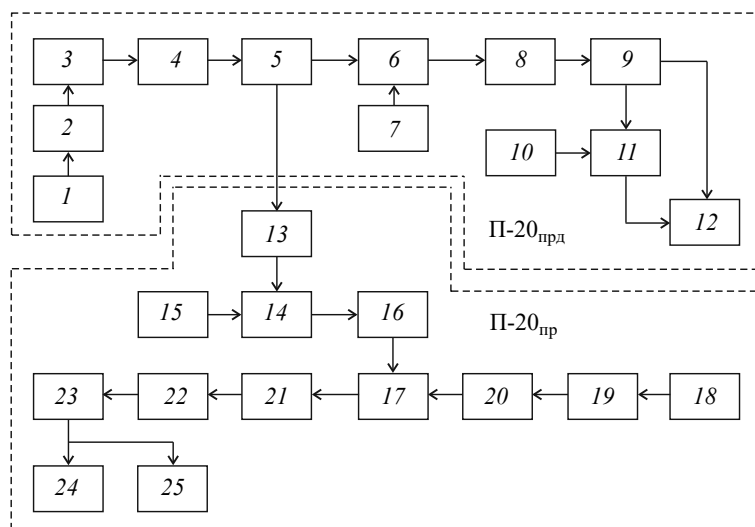


Рис. 2. Функціональна схема макета РЛС сантиметрового діапазону хвиль

мутальні похибки між прийнятною і передавальною антенами при наведенні на ціль (люфт між кабінами становив 5 кутових хвилин). На кожній із кабін розміщувалися антенно-фідерні системи, що складаються з дзеркальних антен діаметром 3 м і рупорних опромінювачів. Для забезпечення додаткової розв'язки між антенами приймача і передавача по периметру кожної з антен прикріплене кільце шириною 120 мм з поглинаючого матеріалу типу ПЕРП-1. Рупорні опромінювачі поміщалися в циліндр з поглинаючого матеріалу, елементи хвилевідних вузлів також покривалися поглиначами. Ці заходи дозволили досягти розв'язки між антенами ~90 дБ.

Функціональну схему РЛС представлено на рис. 2. В якості генератора 1 використовується малошумливий клістрон К-75, ВЧ-коливання якого по хвилеводу через фазообертач 2 надходили на вхід високодобротного об'ємного резонатора 3. Висока стабільність коливань і низький рівень шумів генератора досягалися двома шляхами: зануренням клістрона в трансформаторне мастило для стабілізації температурного режиму і захоплення частоти генерації клістроном f_0 зовнішнім високодобротним резонатором 3.

З виходу об'ємного резонатора ВЧ-коливання через феритовий вентиль 4 подавалися на подвійний хвилевідний трійник 5. З одного плеча хвилевідного трійника ВЧ-коливання подавалися на $p-i-n$ -модулятор 6, який забезпечував роботу макета РЛС у неперервному або імпульсному режимах. Імпульсний режим роботи забез-

печувався шляхом подачі на $p-i-n$ -діод імпульсів тривалістю 5...100 мкс з імпульсного генератора 7. Після $p-i-n$ -модулятора ВЧ-коливання через регульований атенуатор 8 подавалися на ланцюжок підсилюючих клістронів КУ-722, КУ-733 9, 10. Коефіцієнт підсилення кожного з клістронів становив 20 дБ. Вихідна потужність клістронів КУ-722 і КУ-733 становила 30 Вт і 3 кВт відповідно. Для забезпечення роботи РЛС з вихідною потужністю 3 кВт потрібно рідинне охолодження. З цієї метою застосовувався блок живлення від РЛС П-14 11. З виходу клістроном КУ-722 або КУ-733, залежно від необхідної випромінюваної потужності, ВЧ-коливання подавалися на антенно-фідерну систему передавального тракту 12.

З другого плеча подвійного хвилевідного трійника 5 ВЧ-коливання з частотою f_0 через феритовий вентиль 13 подавалися на один із входів модулятора 14. Балансний модулятор виконаний на основі подвійного хвилевідного трійника, у бічних плечах якого стоять хвилевідні модуляторні секції на параметричних діодах. На інший вхід балансного модулятора в якості модулюючого сигналу подавалася опорна напруга з частотою $f_{оп} = 20$ МГц від кварцового генератора 15. З виходу балансного модулятора коливання з частотами $f_0 + f_{оп}$ і $f_0 - f_{оп}$ надходили на вхід високодобротного резонатора 16, де виділялася одна зі складових спектра, наприклад, коливання з частотою $f_0 + f_{оп}$. Ці коливання подавалися на балансний змішувач 17 в якості гетеродина.

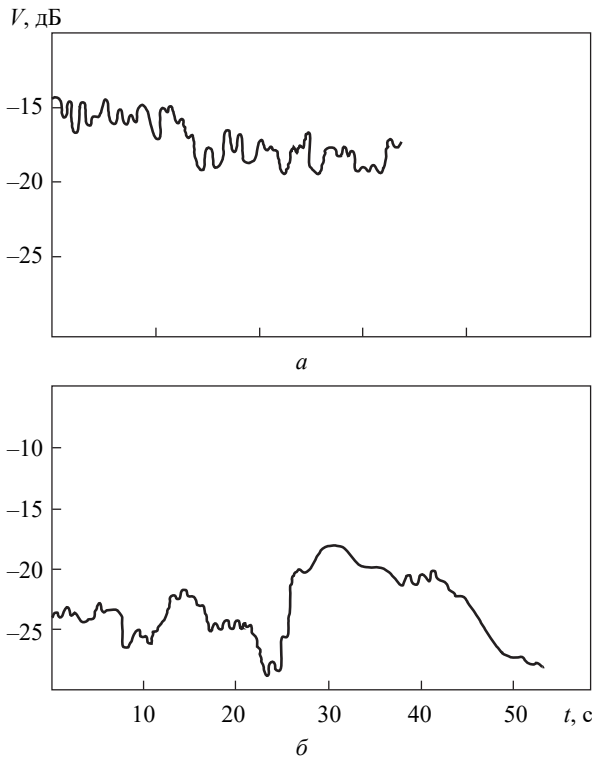


Рис. 3. Приклади часових залежностей множника ослаблення сигналів від відповідачів: а – $h_{\text{від}} = 27$ м, б – $h_{\text{від}} = 18,5$ м

Прийнятий відбитий сигнал $f_0 + f_{\text{оп}}$ через антенно-фідерний пристрій 18 і атенуатор 19 надходив на ВЧ-підсилювач на лампі біжучої хвилі ЛБХ УВ68А 20 з коефіцієнтом шуму 3 дБ, а потім на балансний змішувач 17.

Після змішувача 17 сигнал проміжної частоти $f_{\text{пч}} = f_{\text{оп}} + f_{\text{від}}$ надходив на попередній підсилювач проміжної частоти 21, а потім на вузькосмуговий мостовий режекторний фільтр 22 з кварцовим фільтром в одному з плечей моста. Цей фільтр з режекцією близько 40 дБ призначений для придушення несучої частоти, яка існує на виході балансного змішувача як прояв вторинного відбиття сигналу передавача місцевими предметами, прямого «просочування» сигналу між антенами, а також «просочування» напруги генератора 1 по гетеродинному ланцюгу. Після фільтра сигнал проміжної частоти надходив на головний підсилювач проміжної частоти ГППЧ 23. В якості ГППЧ використовувався корабельний зв'язковий приймач Р-155П з дворазовим перетворенням частоти, в якому частота першого і другого гетеродинів стабілізується високостабільним опорним кварцовим генератором. У приймачі проміжна час-

тота ($f_{\text{оп}} + f_{\text{від}}$) перетворювалася з допомогою другого гетеродина в область звукових частот. Смуга звукових частот у приймачі регулюється в діапазоні 1...10 кГц, що дозволило спостерігати до 6–7 відповідачів одночасно.

Спостереження сигналів доплерівських відповідачів проводилося за допомогою цифрового аналізатора СК4-72 24 з одночасним записом на магнітну стрічку 25. Аналізатор СК4-72 призначений для вимірювання спектра часових процесів у реальному масштабі часу. Діапазон частот вхідного сигналу аналізатора 0,05 Гц...20,0 кГц.

В якості доплерівських відповідачів для проведення експериментів використовувалися рупорні модульовані відбивачі, навантажені на короткозамкнутий хвилевід, в якому розташований модулятор на $p-i-n$ -діоді. Площа розкриву оптимального пірамідального рупора $0,16 \text{ м}^2$. На діод подавалася модулююча напруга прямокутної форми в діапазоні 1...10 кГц. У закритому стані діод не впливає на проходження сигналу. При відкритті діода відбувається коротке замикання хвилеводу. Таким чином, електрична довжина короткозамкнутого відрізка хвилеводу періодично змінюється, і відбувається амплітудна і фазова модуляції сигналу. Ефективна площа розсіювання відповідачів становила 60 м^2 .

2. Результати вимірювань. У процесі натурних експериментів з розповсюдження радіохвиль НВЧ-діапазону на приводних трасах отримані залежності множника ослаблення від часу і просторових координат (висоти). Вимірювання охоплюють різні сезони року і час доби. Внаслідок цього характер поведінки прийнятих сигналів дуже відрізнявся. Приклади часових залежностей множника ослаблення сигналів від відповідачів, встановлених на висотах 18,5 і 27 м, на часовому інтервалі близько 1 хв наведені на рис. 3.

Як показали досліди, рівні сигналів від відповідачів, рознесених по висоті, змінювалися в широких межах, причому в загальному випадку – несинхронно. Як наочний приклад, на рис. 4 наведено спектрограми сигналів від відповідачів, встановлених на різних висотах, виміряні протягом 6 хв. Інтервал між окремими реалізаціями становив 18 хв. Спостерігається сильна мінливість і некорельованість сигналів

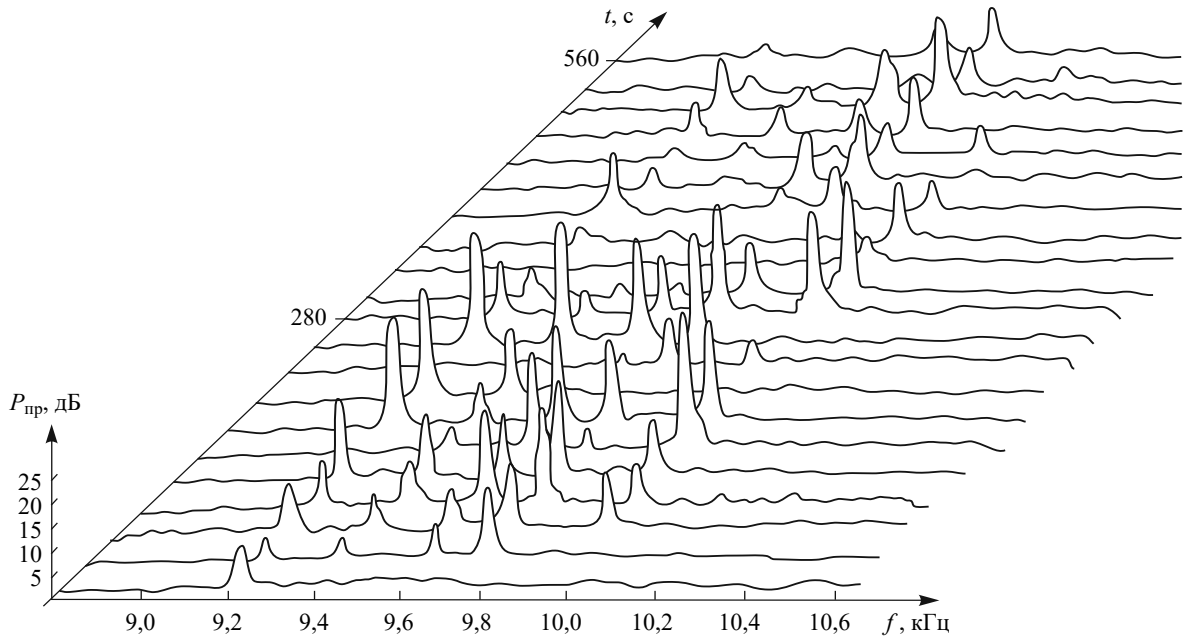


Рис. 4. Спектрограма сигналів від відповідачів, встановлених на висотах 5 м, 12 м, 18,5 м, 24 м і 27 м (частоти модуляції 9,2 кГц, 9,4 кГц, 9,6 кГц, 9,7 кГц, 9,9 кГц відповідно)

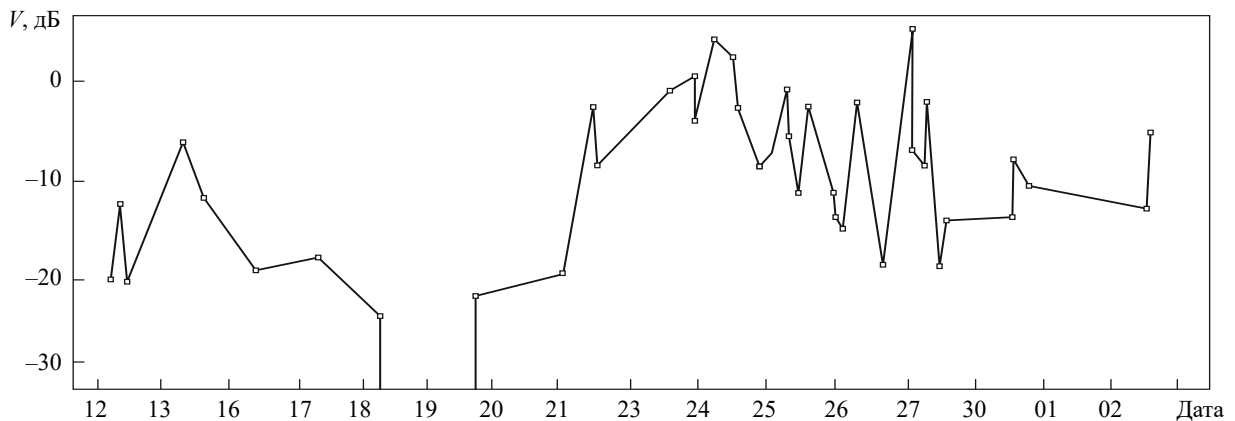


Рис. 5. Зміна середніх значень множника ослаблення на трасі 60 км (висота установки відповідача 27 м) у літній період (з 12 червня до 2 липня)

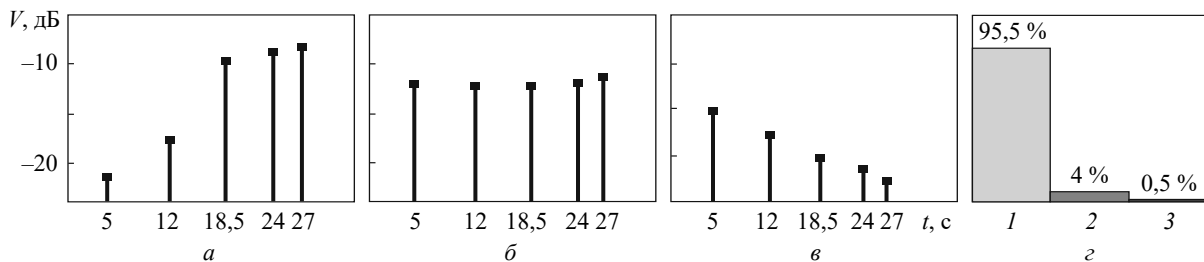


Рис. 6. Висотні залежності множника ослаблення для сигналів від п'яти відповідачів, розташованих на різних висоті: а – «зростаюча» залежність; б – «нейтральна» залежність; в – «спадна» залежність; г – гістограма

від різних відповідачів, рівень деяких в окремі моменти падає до рівня шумів.

Зміну середніх значень множника ослаблення у функції часу від стаціонарного відповідача

на висоті 27 м наведено на рис. 5. Кожна точка являє собою усереднене значення за сеанс. Тривалість сеансу в середньому становила від 5 до 25 хв.

Застосована в роботі методика дозволяла безпосередньо на екрані аналізатора спектра спостерігати «миттєву» висотну залежність множника ослаблення і її зміну в часі. В якості найбільш характерних типів висотних залежностей можна виділити «зростаючу», «нейтральну» і «спадну» висотні залежності.

На рис. 6 наведено типи висотних залежностей множника ослаблення і їх гістограми для осіннього періоду вимірювань. Як впливає з гістограм, у переважній більшості випадків (95,5 %) спостерігалася «зростаюча» 1 висотна залежність, «нейтральна» 2 спостерігалася значно рідше (4 %), а «спадна» 3 – край рідко (0,5 %).

Висновки. Розроблено та виготовлено макет високопотенційної когерентної доплерівської РЛС неперервного випромінювання сантиметрового діапазону радіохвиль.

Основні технічні характеристики макета:

- потужність випромінювання 30 Вт;
- довжина хвилі 4,28 см;
- порогова чутливість –186 дБВт;

- енергетичний потенціал –250 дБВт;
- смуга аналізу доплерівських частот становить 0,05 Гц...20 кГц;
- розрізнення за частотою 1 Гц.

Розроблено та апробовано радіолокаційний метод вивчення умов поширення радіохвиль НВЧ-діапазону в зоні тіні з використанням РЛС неперервного випромінювання і доплерівських відповідачів.

Дослідження показали, що за допомогою запропонованої методики, яка передбачає застосування розробленого макета РЛС і доплерівських відповідачів з ЕПР близько 60 м², можна впевнено спостерігати сигнали від відповідачів на приводних трасах на дистанціях до (1,5...2,0) R_{пв}.

Методика з використанням модульованих відповідачів може бути застосована для калібрування РЛС при вирішенні різних локаційних задач у прибережній зоні: виявлення та супроводження малорозмірних і низько літаючих радіолокаційних цілей, їх розпізнавання та ін.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Kerr D.E. *Transmission along the California coast: Propagation of short radio waves*. Ed. D.E. Kerr. McGraw-Hill, 1951. P. 328–335.
2. Брауде С.Я., Герман В.Л., Островский И.Е., Безуглый И.М., Амосов И.В., Блюх П.В., Санин Ф.С., Цукерник В.М., Шамфаров Я.Л. *Распространение электромагнитных колебаний сантиметрового диапазона над морем при наличии «атмосферного волновода» в условиях повышенной рефракции*. Москва: Советское радио, 1951. 153 с.
3. Пульга В.Ф., Рязанцев В.Ю., Кива Ф.В., Дорфман Н.А. Экспериментальные данные о распространении сантиметровых радиоволн за горизонтом над поверхностью океана. *Труды ИРЭ АН УССР*. Т. 10. Харьков, 1962. С. 15–31.
4. Рязанцев В.Ю. *Исследование распространения сантиметровых и дециметровых радиоволн в зоне полутени и глубокой тени над поверхностью океана*: дис. ... канд. техн. наук.; Ин-т радиопрофики и электрон. АН УССР. Харьков, 1963. 173 с.
5. Hitney N.V., Richter J.H. Integrated Refractive Effects Prediction System (IREPS). *Nav. Eng. J.* 1976. Vol. 88, Iss. 2. P. 257–262. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1976.tb03831.x>.
6. Hattan C.P., Patterson W.L., Hitney H.V., Paulus R.A., Anderson K.D. and Lindem G.E. IREPS Revision 2.2 User's manual. *Naval Ocean Syst. Cen. Teach. Doc.* 659. Oct. 1983. P. 561.
7. Мыщенко И.М. Исследование распространения радиоволн сантиметрового диапазона при наличии волновода испарения. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиопрофики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2008. Т. 13, № 2. С. 173–177.
8. Мыщенко И.М., Роенок А.Н., Хоменко С.И. Диагностика и прогнозирование дальности действия судовых навигационных РЛС трехсантиметрового диапазона. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиопрофики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2001. Т. 6, № 1. С. 67–71.
9. *Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере*. Под ред. Г.И. Хлопова. Киев: Наукова думка, 2010. 263 с.
10. Волков А.В., Латышев К.В., Кошель К.В., Славутский Л.А., Шевцов Б.М., Шишкарев А.А. Пространственные изменения уровня радиолокационных отражений от морской поверхности в условиях сверхрефракции. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1990. Т. 33, № 12. С. 1423–1424.
11. Волков А.В., Кошель К.В., Латышев К.В., Славутский Л.А., Шевцов Б.М., Шишкарев А.А. Использование радиолокационных отражений от морской поверхности для изучения рефракции радиоволн. *XVI Всесоюз. конф. по распространению радиоволн*. Харьков, 1990. Ч. 2. С. 69.
12. Mytsenko I.M., Khomenko S.I. Using the signal reflected from sea surfau for prediction of coverage range of marine navigational microwave radars. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2005. Vol. 63, Iss. 8. P. 699–705.
13. Аренберг А.Г. *Распространение дециметровых и сантиметровых волн*. Москва: Советское радио, 1957. 303 с.
14. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. Москва: Связь, 1972. 336 с.

Стаття надійшла 14.08.2020

REFERENCE

1. Kerr, D.E. ed., 1951. *Transmission along the California coast: Propagation of short radio waves*. McGraw-Hill, pp. 328–335.
2. Braude, S.Ya., German V.L., Ostrovskiy, I.E., Bezuglyy, I.M., Amosov, I.V., Bliokh, P.V., Sanin, F.S., Tsukernik, V.M., Shamfarov, Ya.L., 1951. *Propagation of electromagnetic oscillations of the centimeter range above the sea in the presence of an "atmospheric waveguide" in conditions of increased refraction*. Moscow: Sovetskoe radio Publ. (in Russian).
3. Shulga, V.F., Ruazantsev, V.Yu., Kivva, F.V., Dorfman, N.A., 1962. Experimental data on the propagation of centimeter radio waves over the horizon above the surface of the ocean. In: O.Ya. Usikov, ed. 1962. *Proceedings of the IRE AN UkrSSR*. Kharkov: IRE AN UkrSSR Publ. **10**, pp. 15–31 (in Russian).
4. Ryazantsev, V.Yu., 1963. *Investigation of the propagation of centimeter and decimeter radio waves in the penumbra zone and deep shadow above the ocean surface*. PhD. Institute for Radiophysics and Electronics of AS UkrSSR, Kharkiv, UkrSSR (in Russian).
5. Hitney, N.V., Richter, J.H., 1976. Integrated Refractive Effects Prediction System (IREPS). *Nav. Eng. J.*, 88(2), pp. 257–262. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1976.tb03831.x>.
6. Hattan, C.P., Patterson, W.L., Hitney, H.V., Paulus, R.A., Anderson, K.D. and Lindem, G.E., 1983. IREPS Revision 2.2 User's manual. *Naval Ocean Syst. Cen. Tech. Doc.*, 659, p. 561.
7. Mytsenko, I.M., 2008. Investigation of the cm-radio wave propagation at existing evaporation duct. In: V.M. Yakovenko, ed. 2008. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **13**(2), pp. 173–177 (in Russian).
8. Mytsenko, I.M., Roenko, A.N., Khomenko, S.I., 2001. Diagnosis and prediction of the operation range of a three-centimeter wave band marine navigation radar. In: V.M. Yakovenko, ed. 2001. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **6**(1), pp. 67–71 (in Russian).
9. Khlopov, G.I. ed., 2010. *Diagnosis of VHF propagation conditions in the troposphere*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
10. Volkov, A.V., Latyshev, K.V., Koshel', K.V., Slavutskiy, L.A., Shevtsov, B.M., Shishkarev, A.A., 1990. Spatial changes in the level of radar reflections from the sea surface under conditions of super-refraction. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Radiofizika*, **33**(12), pp. 1423–1424 (in Russian).
11. Volkov, A.V., Koshel', K.V., Latyshev, K.V., Slavutskiy, L.A., Shevtsov, B.M., Shishkarev, A.A., 1990. The use of radar reflections from the sea surface for studying radio wave refraction. In: *XVI All-Union. Conf. Radio propagation: proc.* Kharkov, Ukraine. Pt. 2, p. 69 (in Russian).
12. Mytsenko, I.M., Khomenko, S.I., 2005. Using the Signal Reflected from sea Surface for Prediction of Coverage Range of Marine Navigational Microwave Radars. *Telecommunications and Radio Engineering*, **63**(8), pp. 699–705.
13. Arenberg, A.G., 1957. *Decimeter and centimeter wave propagation*. Moscow: Sovetskoe radio Publ. (in Russian).
14. Doluhanov, M.P., 1972. *Radio wave propagation*. Moscow: Svyaz' Publ. (in Russian).

Received 14.08.2020

V.M. Gorobets', V.B. Sinitsky, S.I. Khomenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

A STUDY OF MICROWAVE OVER-SEA PROPAGATION
WITH HIGH-POTENTIAL X-BAND DOPPLER RADAR

Subject and Purpose. The paper is devoted to the microwave propagation over the sea in the nearshore region. Emphasis is on microwave attenuation measurements in the semi-shade and deep-shade areas with a view to study conditions of the microwave propagation on a beyond-the-horizon path in the nearshore area using a radar method.

Methods and Methodology. A radar technique, developed and tested, provides measuring a microwave attenuation coefficient along a 60 km long beyond-the-horizon path in the tropospheric surface layer. High-grade radar and Doppler radar beacons (racons) are employed. Of interest are experimentally obtained temporal dependences of signals from racons situated at different heights and, also, spatial field distribution curves from a steadily moving racon running a height 1 to 27 m for 25 minutes.

Results. A prototype of high-grade X-band coherent continuous-wave (Doppler) radar has been designed and fabricated. A radar technique has been developed and tested for the analysis of microwave beyond-the-horizon propagation conditions in the shadow region, which involves continuous-wave (Doppler) radar and Doppler racons with a radar cross section (RCS) of about 60 m².

Conclusions. The technique proposed enables reliable tracking of racon responses up to a double radiohorizon range on over-sea paths. This technique can be used for radar calibrations when dealing with various location problems in the nearshore area, including detection and tracking small-size and low-flying targets and their radar identification.

Key words: beyond-the-horizon propagation, attenuation, radar, Doppler racon.