

DOI 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283921

УДК 621.396

СЕРГІЙ МАЗОР,
СЕРГІЙ ВАСИЛЕНКО,
ВІТАЛІЙ КУЗЬМЕНКО,
ЯРОСЛАВ СТЕФАНИШИН,
ТЕТЯНА ХРАНОВСЬКА

РОЗРОБКА АНТЕННОЇ СИСТЕМИ СТАНЦІЇ ТРОПОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

На сьогоднішній день засоби тропосферного зв'язку відіграють важливу роль при організації зв'язку на відстанях значно більших від відстані прямої видимості. Особливості побудови таких ліній, на відміну від радіоліній прямої видимості, пов'язані з особливостями розповсюдження ультракоротких хвиль та їх відбиття від неоднорідностей тропосфери. При цьому використання тропосферних станцій дозволяє забезпечити багатоканальний зв'язок високої якості на інтервалі 150-250 км, при цьому значно скоротивши час на розгортання ліній великої протяжності. На ряду з перевагами тропосферні засоби зв'язку мають досить громіздкі антенні пристрої та потребують значного енергетичного ресурсу. У зв'язку з цим виникає задача у підвищенні енергетики за рахунок розроблення антенних систем станцій тропосферного зв'язку, що будуть задовольняти поставлені вимоги. У роботі, з метою вирішення поставленої задачі, у якості антенних систем станцій тропосферного зв'язку було запропоновано параболічну антену (дзеркало діаметром 1,5 м) та опромінювачі двох типів (опромінювач лінійної поляризації та решітка з 8 елементарних опромінювачів кругової поляризації). Перевірка адекватності запропонованих антен та можливість їх використання на реальних засобах тропосферного зв'язку здійснювалася у коліматорній камері. З метою підтвердження отриманих результатів перевірки було проведено натурні випробування розробленої антенної системи тропосферної станції на інтервалі довжиною 155 км. При цьому сумісне використання запропонованих антенних систем для передавача потужністю 80 Вт дозволяє забезпечити необхідну енергетику тропосферної лінії зв'язку в діапазоні частот 4,5-4,7 ГГц.

Ключові слова: тропосферний радіозв'язок, ультракороткі хвилі, антенна система, параболічна антена, опромінювач, рупор, діаграма спрямованості.

Постановка проблеми. Рівень готовності підрозділу до виконання завдань за призначенням безпосередньо залежить від своєчасності, достовірності та безпечності системи управління. При цьому сучасні системи управління повинні мати високу бойову готовність, необхідну пропускну здатність, стійкість до впливу противника, високу мобільність, доступність, розвідзахищеність, керованість, а також можливість забезпечувати виконання вимог щодо своєчасності, достовірності та безпеки інформації, що у них циркулює.

Активне застосування станцій тропосферного зв'язку при організації систем зв'язку та управління в умовах надзвичайних ситуацій, збройних конфліктів та антитерористичних заходів пояснюється значно більшим, на відміну від радіорелейних станцій, інтервалом зв'язку та більш високою живучістю на відміну від супутникових систем. Також, у деяких випадках, застосування тропосферних станцій може бути економічно доцільніше ніж застосування супутникових систем зв'язку або радіорелейних станцій.

На великих ділянках тропосферний зв'язок має ряд переваг, оскільки підвищена іонізація повітря сприяє сталому проходженню хвиль дециметрового та сантиметрового діапазонів при

їх розсіюванні та відбитті від неоднорідностей тропосфери, що є природним ретранслятором для таких ліній зв'язку [1], [2]. При цьому великі водні завади і морські узбережжя сприяють поліпшенню зв'язку на тропосферних лініях. Оскільки польові вузли зв'язку (ВЗ) пунктів управління (ПУ) знаходяться на певному віддаленні від стаціонарних ВЗ ПУ або інших ВЗ ПУ, то виникає задача встановлення зв'язку на великих відстанях. Обираючи з наземних типів зв'язку обґрунтованим рішенням може бути розгортання загоризонтних ліній зв'язку, що складаються з цифрових тропосферних станцій.

Використання тропосферних станцій можливо також при розгортанні ліній зв'язку в регіонах, де застосування супутникового зв'язку через геостаціонарні та інші супутники принципово неможливо. При цьому можливість організації інтервалів ліній зв'язку більшої довжини досягається за рахунок використання станцій тропосферного зв'язку [3], [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасного стану розвитку станцій тропосферного зв'язку [5] - [8] показав наявність в останніх громіздких та незручних в експлуатації антено-фідерних пристроїв, а також передавачів високої потужності (близько 1,5 кВт) побудованих з використанням клістрона (вакуумний прилад), який, крім низького коефіцієнту корисної дії, має великі нелінійні спотворення амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик. При цьому використовувані методи обробки сигналів є малоефективними та складно реалізованими на застарілій елементній базі. Ці та інші недоліки не дозволяють збільшити швидкість передачі інформації, зменшити потужність передавача та підвищити рівень протидії технічним розвідкам. Зазначені недоліки дозволяють зробити висновок про недоцільність модернізації існуючих станцій тропосферного зв'язку та необхідності розроблення станцій тропосферного зв'язку нового покоління.

На основі вище викладеного можна стверджувати, що область застосування тропосферних станцій зв'язку обмежена у зв'язку з використанням громіздких антенних систем та необхідності потужних джерел живлення. Розглядаючи антенні системи тропосферних станцій, що знаходяться в експлуатації (наприклад Р-412, Р-417, Р-423) також стикаємося з проблемою відсутності можливості управління діаграмою спрямованості (ДС), що значно зменшило б енергетичні витрати та, в свою чергу, призвело б до зменшення споживчої потужності станції.

При цьому природно виникає задача підвищення енергетики радіолінії тропосферного зв'язку за рахунок антенних пристроїв.

Метою статті є розробка антенної системи станції тропосферного зв'язку нового покоління, що дозволить забезпечувати завадостійку передачу інформації стандартним цифровим потоком зі швидкістю 2,048 Мбіт/с (потік Е1) на інтервалі більше 150 км. з ймовірністю помилки не більше 10^{-4} при не значній потужності передавача.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі, з метою підвищення енергетики сигналу станції тропосферного зв'язку, запропоновано використовувати параболічне дзеркало діаметром 1,5 м та опромінювачі двох типів, що відрізняють дану антенну систему від антенних систем тропосферних станцій типу Р-417МУ та Р-423-1МУ [4]. Використання запропонованих опромінювачів дозволяє вирішити задачі керування ДС антенної системи, тобто досягти прийнятної швидкості передачі сигналу за рахунок зменшення потужності передавача.

У роботі, на основі проведених розрахунків, були спроектовані лінійний опромінювач у вигляді відкритого кінця хвилеводу з еліптичним дзеркалом в якості контр-рефлектора (рис. 1) та опромінювач у вигляді антенної решітки з восьми рупорів (рис. 2). Опромінювач з головним дзеркалом по суті являє собою дводзеркальну антену з еліптичним малим дзеркалом (АДЕ).

У рамках роботи було виготовлено латунний перехідник з прямокутного хвилеводу розміром 48×24 мм. на круглий хвилевод діаметром 50 мм, котрий і є опромінювачем малого еліптичного дзеркала. Антена з таким опромінювачем представлена на рис. 3.

З конструкторської документації на антенно-фідерне обладнання радіорелейної станції Р-414 відомо, що технологія виготовлення параболічних дзеркал передбачає наявність в центрі

дзеркала плоскої площадки, відповідно до габаритів опромінювача. Ця площадка по-перше потрібна для формування випромінювання антени знижуючи тіньовий ефект опромінювача, а по-друге – є технологічною. У роботі для виготовлення параболічного дзеркала із плоского листа алюмінію шляхом послідовного притискання його від центру до краю матриці при їх спільному обертанні були виготовлені параболоїди, які використовуються для кріплення до матриці. Такі дзеркала ще називаються «катаними». При такій геометрії параболоїд має не одну точку фокуса, а фокальне кільце, котре ідеально підходить для дводзеркальної антени типу АДЕ. У роботі в якості дзеркала були використані дзеркала з комплекту станції Р-414.

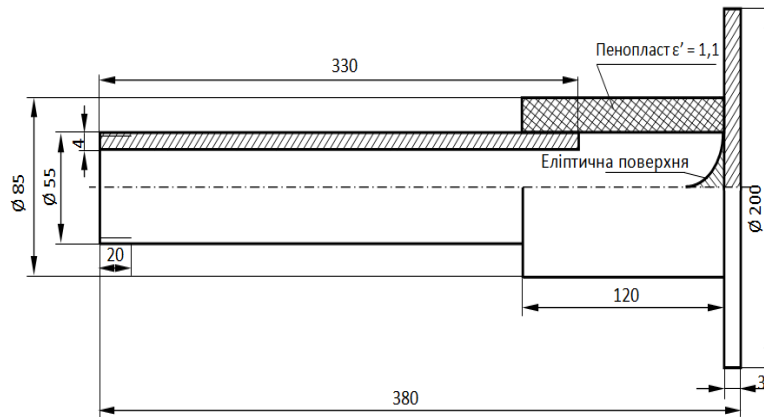


Рисунок 1 – Ескіз опромінювача лінійного типу

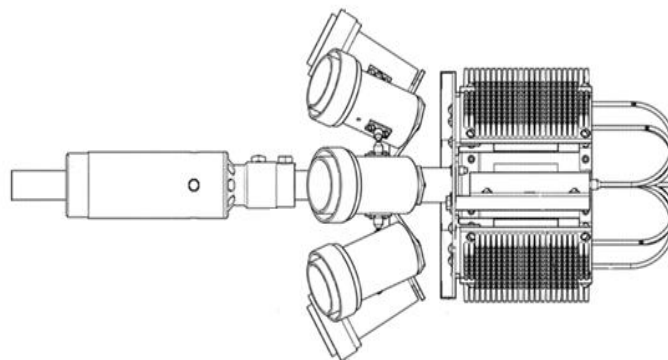


Рисунок 2 – Ескіз антенної решітки з восьми рупорів



Рисунок 3 – Дводзеркальна антена з еліптичним малим дзеркалом

Роль малого дзеркала заключається в перевідбитті падаючої на нього сферичної хвилі опромінювача на велике дзеркало. При цьому в наслідок геометричних властивостей еліпса відбита малим дзеркалом сферична хвиля якби виходить із однієї точки – фокуса F (рис. 4), зіставленого з фокальним кільцем великого дзеркала. Ця хвиля трансформується великим дзеркалом в плоску. Параболічне дзеркало випромінює так, як ніби в його фокусі знаходиться уявний (віртуальний) опромінювач, створюючий сферичну хвилю.

На рисунку 4 зображена схема дводзеркальної антени зі зміщеною фокальною віссю (антена типу АДЕ – антена дводзеркальна з еліптичним малим дзеркалом). Її основне (велике) дзеркало утворене за рахунок обертання частини параболи 1 навколо фокальної осі z , зміщеної відносно осі симетрії антени z' на $\frac{d}{2}$. Поверхня допоміжного дзеркала представляє собою тіло обертання частини еліпса 2 навколо осі z , один фокус якого співпадає з фазовим центром опромінювача (відкритий кінець круглого хвилевода) 3 і лежить на осі симетрії z' , а другий – з'єднаний з фокусом параболи (точка F). Відбиті від малого дзеркала промені збираються в синфазне фокальне кільце, утворене обертанням точки F навколо осі симетрії z' . У наближенні геометричної оптики така схема забезпечує, як зрозуміло з рисунку 4, синфазність збудження розкриву антени [9].

Розглянута антена, на відміну від відомих дводзеркальних антен, має наступні переваги:

- за рахунок розміщення опромінювача в безпосередній близькості від малого дзеркала, зменшується “переливання” енергії за краї цього дзеркала при достатньо рівномірному амплітудному розподіленні;

- відсутність променів, які повертаються в рупор, що в наближенні геометричної оптики призводить до відсутності реакції дзеркала на опромінювач. В реальній системі кромка допоміжного дзеркала є джерелом крайових дифракційних хвиль, частина енергії яких “ловиться” відкритим кінцем хвилеводу і призводить до порушення узгодження;

- промені, які йдуть із фазового центра опромінювача, близькі до вісі системи та мають найбільшу щільність енергії, що перевипромінюється допоміжним дзеркалом на периферію квазіпараболоїда. При цьому промені, відбиті від точок, які знаходяться поблизу країв допоміжного дзеркала, та яким відповідає менша щільність енергії, потрапляють на частини поверхні параболоїда близькі до його центру, що створює сприятливі умови для отримання близького до рівномірного амплітудного розподілу поля в площині розкриву антени.

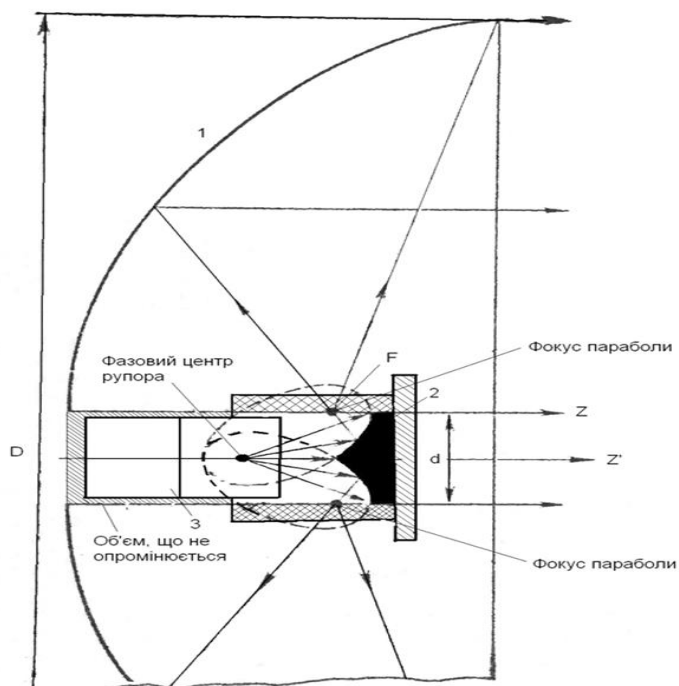


Рисунок 4 – Схема дії антени АДЕ

Результуючий коефіцієнт використання поверхні (КВП) запропонованої антени, в порівнянні із звичайними дводзеркальними антенами, суттєво збільшується ($\text{КВП} \approx 0,75$). При цьому в опромінювачі відсутні діаграми спрямованості спеціальних форм в горизонтальній $F(\varphi)$ і вертикальній $F(\theta)$ площинах.

З метою розширення можливостей параболічної антени було запропоновано використати параболічну антену з багатоелементним опромінювачем (рис. 2). До складу такого антенного блоку передавача входять: подільник потужності на 8, блок підсилювачів потужності (включає 8 підсилювачів потужності на 10 Вт кожний), антена дзеркальна параболічна (з еліпсоїдним малим дзеркалом та 8-елементним опромінювачем), блоки живлення. Принцип роботи запропонованого антенного блоку пояснюється тим, що фазоманіпульований сигнал робочої частоти, який подається на вхід подільника потужності, підсилюється на 30 дБ у кожному з 8 виходів подільника, після чого, додатково підсилюється на 6 дБ кожним із 8 підсилювачів потужності і випромінюється у відкритий простір. До фокусу рефлектора антени сигнали підсилювачів потужності поступають синфазно, що дає можливість сформувати вихідний сигнал передавача з сумарною потужністю близько 80 Вт, що значно покращує показники електроспоживання. Зображення окремого опромінювача (рупора) показано на рис. 5. На кінці кожного рупора, для зменшення бокового випромінювання, є замикаюче чвертьхвильове кільце.

Основними вимогами, що ставляться до форми ДС опромінювача антени типу АДЕ, є її осьова симетрія і мінімальний витік енергії поза сектором випромінювання малого дзеркала (круті спади ДС опромінювача).

Багатоелементний опромінювач складається із восьми рупорів розташованих на восьми пелюстковій пластині, які виготовлені по еліптичному закону. Разом ці елементи імітують друге еліптичне дзеркало. При цьому відбувається підвищення надійності системи, оскільки навіть після виходу з ладу одного з рупорів зв'язок буде збережений.



Рисунок 5 – Рупор антенної решітки

Крім цього з'являється можливість створення хвилі кругової поляризації, а також можливість керування ДС.

З метою перевірки адекватності запропонованих антенних систем та можливості їх використання на реальних засобах тропосферного зв'язку проведено ряд випробувань у коліimatorній камері. Результати випробувань наведені на графіках рис. 6-9.

На рисунку 6 представлено графік залежності коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) від робочої частоти антенного пристрою. Як видно з графіку у діапазоні робочих частот (4,5-4,7 ГГц) рівень КСХ складає $\leq 1,2$ для лінійного опромінювача (суцільна лінія) і $\leq 1,25$ для багаторупорного (штрихова лінія), що є достатнім для одержання режиму рухомої хвилі.

На рисунку 7 представлено залежність коефіцієнту підсилення (КП) антени від робочої частоти антенного пристрою. Як видно з графіку у діапазоні робочих частот антени (4,5-4,7 ГГц) рівень КП дорівнює 32 дБ для лінійного опромінювача (суцільна лінія) і 33 дБ для багаторупорного (штрихова лінія).

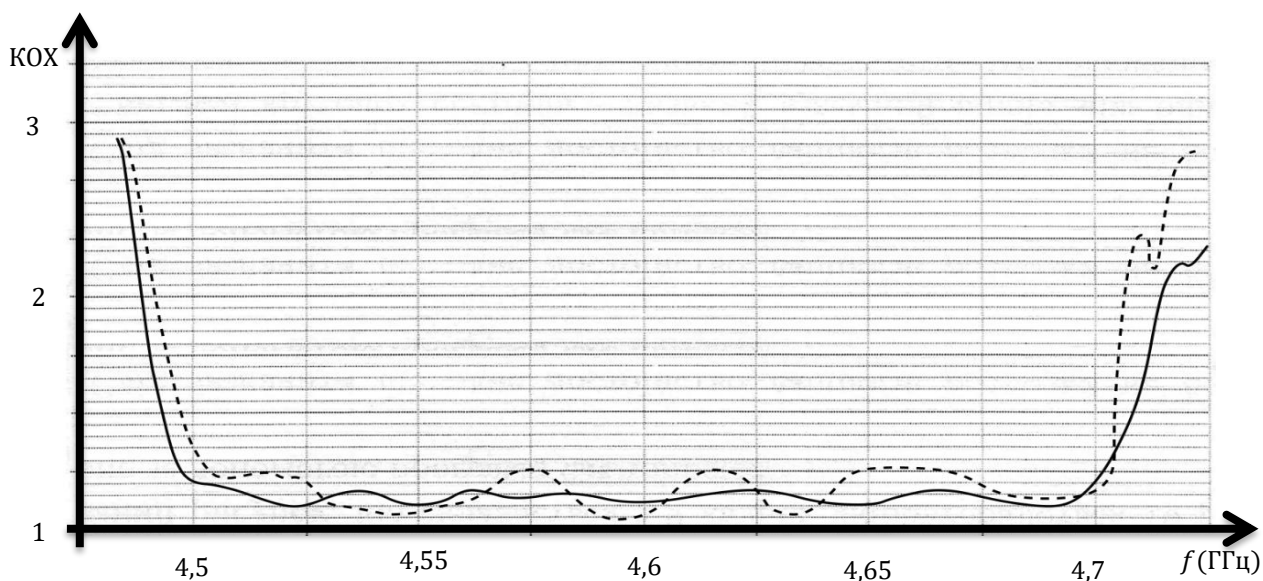


Рисунок 6 – Вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі

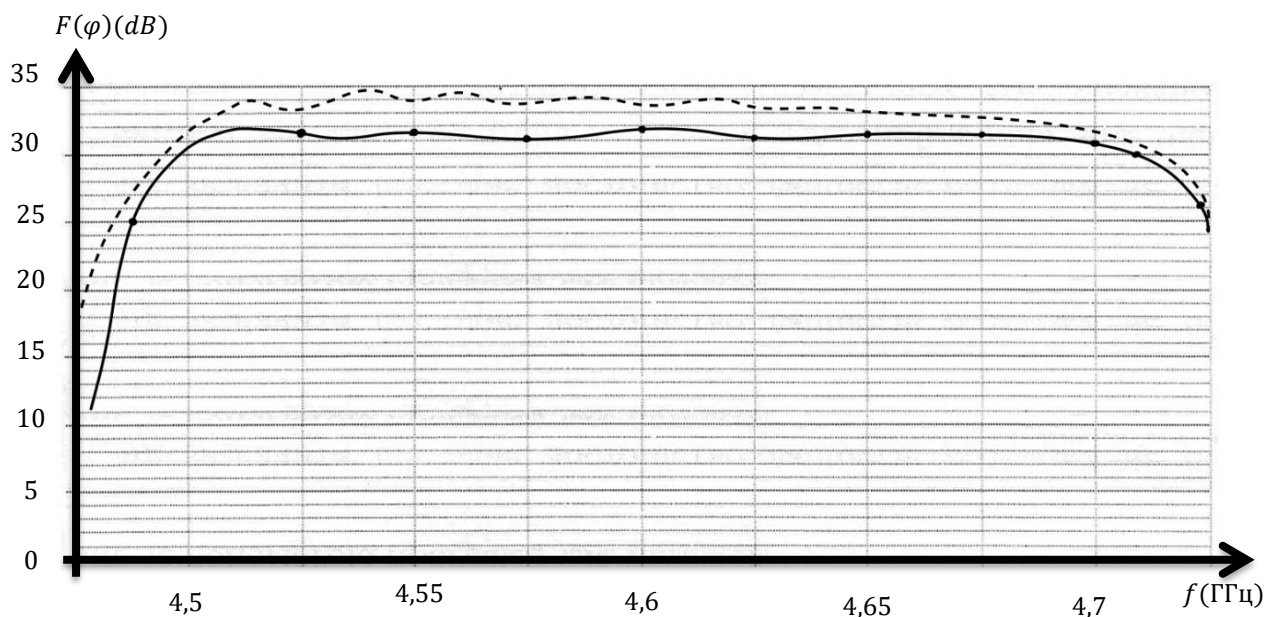


Рисунок 7 – Вимірювання коефіцієнта підсилення

На рис. 8-9 представлені графіки залежності ДС лінійного (рис. 8) та багаторупорного (рис. 9) опромінювачів в площині вектора E $F(\theta)$ (суцільна лінія) та в площині вектора H $F(\varphi)$ (штрихова лінія). Аналіз графіків показав, що ДС запропонованих антенних систем у площинах векторів E та H по половині потужності складає $\leq 3^\circ$.

Підтвердження отриманих результатів у коліматорній камері було перевірено на натурних випробуваннях. Сумісне використання запропонованих опромінювачів для передавача потужністю 80 Вт на інтервалі довжиною 155 км дозволило забезпечити необхідну енергетику тропосферної лінії в робочому діапазоні частот 4,5-4,7 ГГц.

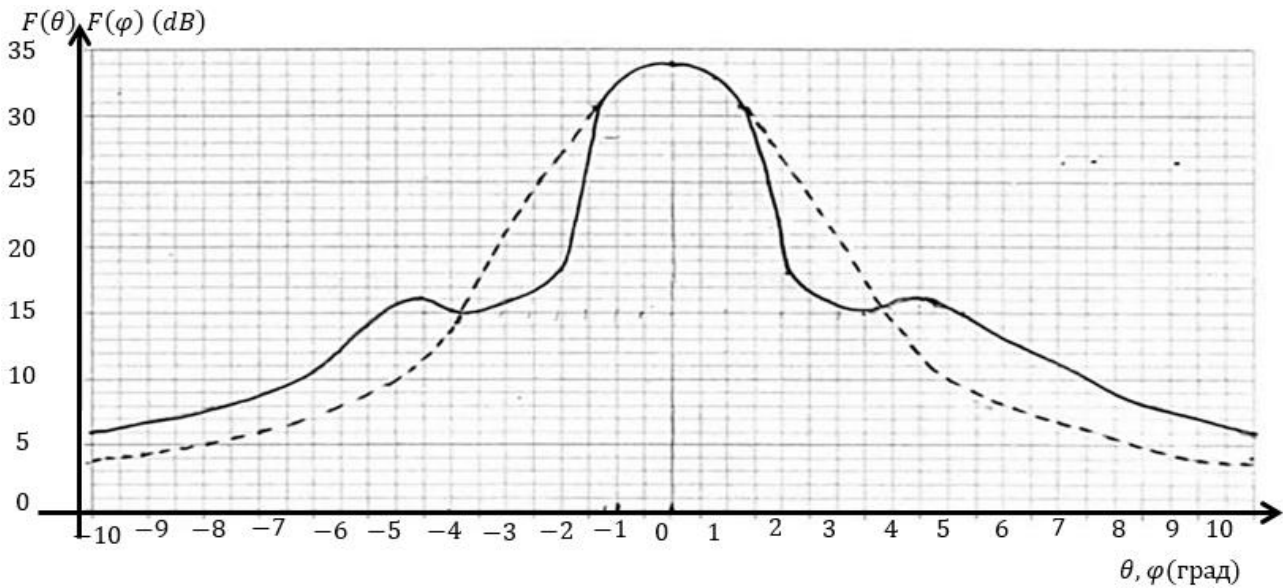


Рисунок 8 – Вимірювання ДС лінійного опромінювача в Е- та Н-площинах

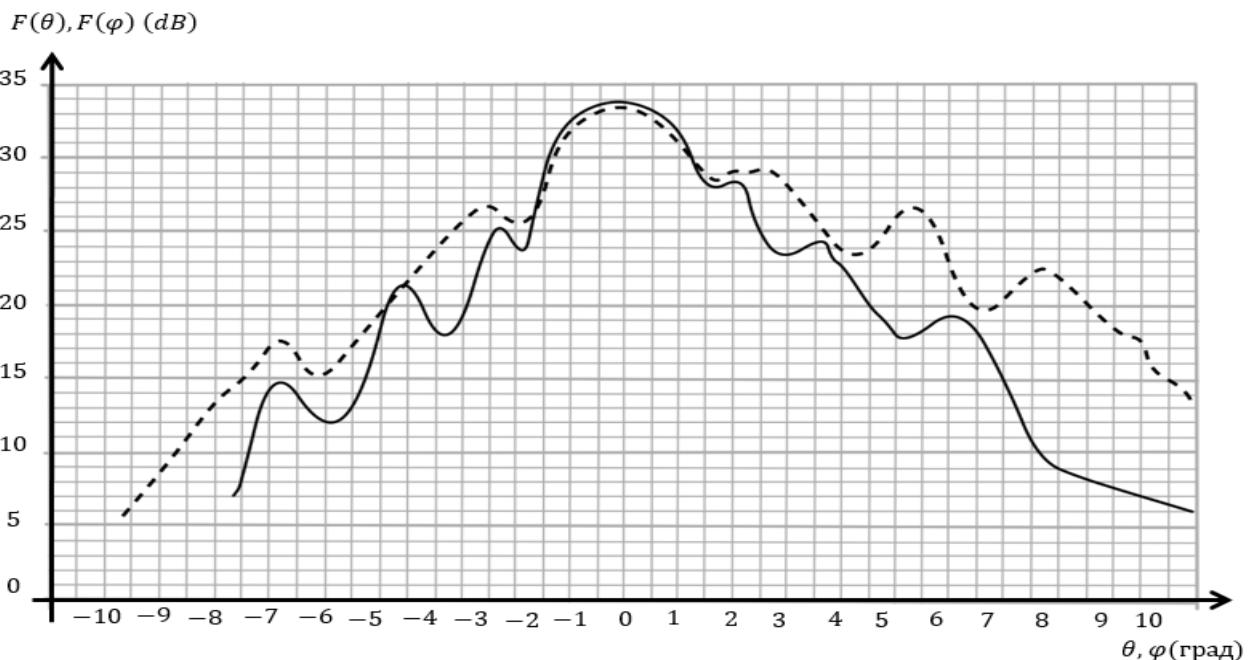


Рисунок 9 – Вимірювання ДС багаторупорного опромінювача в Е- та Н-площинах

Висновки. У роботі були розроблені параболічні антени з опромінювачами двох типів для станції тропосферного зв'язку, які у діапазоні частот 4,5-4,7 ГГц мають наступні електричні характеристики:

- коефіцієнт стоячої хвилі $KСХ \leq 1,25$ (рис. 6);
- коефіцієнт підсилення антенної решітки $G \leq 34$ дБ (рис. 7);
- ширина ДС в Е-площині $F(\theta) \leq 3^\circ$ (рис. 8);
- ширина ДС в Н-площині $F(\varphi) \leq 3^\circ$ (рис. 9).

Натурні випробування показали, що розроблені антенні системи дозволяють забезпечити потрібну енергетику тропосферної лінії для передачі потоку E1 на відстань більше 150 км з ймовірністю помилки менше 10^{-4} .

Разом з цим запропоновані опромінювачі параболічної антени також можуть бути використані у станціях радіорелейного зв'язку як окремі антени.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] С. В. Марченко, *Пристрої надвисоких частот*. Кам'янське, Україна: ДДТУ, 2019.
- [2] М. Д. Ільїнов та ін., *Лінії радіозв'язку та антенні пристрої*. Київ, Україна: ВІТІ, 2018.
- [3] О. І. Кушнір, К. С. Васюта, С. В. Озеров, А. В. Литвин та А. В. Северілов, "Основні тенденції та перспективи розвитку військового радіорелейного зв'язку", *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, № 4, с. 7-11, 2017.
- [4] В. Г. Шолудько, М. Ю. Єсаулов, О. В. Вакуленко, Т. Г. Гурський, та М. М. Фомін. *Організація військового зв'язку*. Київ, Україна: ВІТІ, 2017.
- [5] Т. М. Наритник, В. М. Почерняєв, та В. С. Повхліб. *Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку: навч. пос.* Одеса, Україна: ОНАЗ, 2019.
- [6] A. N. Jabbar, "A novel ultra-fast ultra-simple adaptive blind beamforming algorithm for smart antenna arrays", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 35, 2011. pp. 329-348, doi: <https://doi.org/10.2528/PIERB11091504>.
- [7] О. В. Вакуленко, та Б. А. Ніколаєнко, *Станція радіорелейна широкопasmова СРШ-5000 (станція радіорелейна Р-402)*. Київ, Україна: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.
- [8] Є. П. Нестерук, *Радіорелейна станція Р-425С3*. Харків, Україна: ХНУПС, 2015.
- [9] М. Д. Ільїнов, Т. Г. Гурський, І. В. Борисов, та К. М. Гриценко, *Лінії радіозв'язку та антенні пристрої*. Київ, Україна: ВІТІ, 2018.

Стаття надійшла до редакції 18.02.2023.

REFERENCE

- [1] S. V. Marchenko, *Devices of ultra-high frequencies*. Kamianske, Ukraine: DDTU, 2019.
- [2] M. D. Ilyinov et al., *Radio communication lines and antenna devices*. Kyiv, Ukraine: MITI, 2018.
- [3] O. I. Kushnir, K. S. Vasyuta, S. V. Ozerov, A. V. Lytvyn, and A. V. Severilov, "Main trends and prospects for the development of military radio relay communications", *Collection of scientific works of Kharkiv Air Force University*, no. 4, pp. 7-11, 2017.
- [4] V. G. Sholudko, M. Yu. Yesaulov, O. V. Vakulenko, T. G. Gursky, and M. M. Fomin, *Military Communications Organization*. Kyiv, Ukraine: MITI, 2017.
- [5] T. M. Narytnyk, V. M. Pocherniaev, and V. S. Povhlib, Digital radio relay and tropospheric communication lines. Odesa, Ukraine: ONAC, 2019.
- [6] A. N. Jabbar, "A novel ultra-fast ultra-simple adaptive blind beamforming algorithm for smart antenna arrays", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 35, 2011. pp. 329-348, doi: <https://doi.org/10.2528/PIERB11091504>.
- [7] O. V. Vakulenko, and B. A. Nikolayenko, *SRSB-5000 broadband radio relay station (R-402 radio relay station)*. Kyiv, Ukraine: ISCIP Igor Sikorskyi KPI, 2019.
- [8] E. P. Nesteruk, *Radio relay station R-425C3*. Kharkiv, Ukraine: KhNAFU, 2015.
- [9] M. D. Ilyinov, T. G. Gurskyi, I. V. Borisov, and K. M. Hrytsenok, *Radio communication lines and antenna devices*. Kyiv, Ukraine: MITI, 2018. pp. 201-218.

SERHII MAZOR,
SERHII VASYLENKO,
VITALII KUZMENKO,
YAROSLAV STEFANYSHYN,
TETYANA KHRANOVSKA

DEVELOPMENT OF ANTENNA SYSTEM OF A NEW GENERATION TROPOSPHERIC COMMUNICATION STATION

Today, means of tropospheric communication play an important role in the organization of communication at distances significantly greater than the distance of direct visibility. The peculiarities of the construction of such lines, in contrast to line-of-sight radio lines, are related to the peculiarities

of the propagation of ultrashort waves and their reflection from the inhomogeneities of the troposphere. At the same time, the use of tropospheric stations makes it possible to provide high-quality multi-channel communication at an interval of 150–250 km, while significantly reducing the time for deploying long-distance lines. Along with the advantages, tropospheric means of communication have rather bulky antenna devices and require a significant energy resource. In connection with this, the task of increasing energy efficiency due to the development of antenna systems of tropospheric communication stations that will meet the set requirements arises. In order to solve the problem, a parabolic antenna (a mirror with a diameter of 1.5 m) and two types of irradiators (a linear polarization irradiator and an array of 8 elementary circular polarization irradiators) were proposed as antenna systems for tropospheric communication stations. Verification of the adequacy of the proposed antennas and the possibility of their use on real means of tropospheric communication was carried out in a collimator chamber. In order to confirm the results of the inspection, field tests of the developed antenna system of the tropospheric station were conducted at an interval of 155 km. At the same time, the combined use of the proposed antenna systems for the 80 W transmitter allows for the necessary energy of the tropospheric communication line in the frequency range of 4.5–4.7 GHz.

Keywords: tropospheric radio communication, ultrashort waves, antenna system, parabolic antenna, irradiator, horn, directional diagram.

Мазор Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, доцент Спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0009-0003-2103-4883, mazorsk@gmail.com.

Василенко Сергій Вікторович, кандидат технічних наук, начальник науково-дослідної спеціальної лабораторії № 2 Науково-дослідного центру, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0000-0001-6779-8246, vasylenko.phd@gmail.com.

Кузменко Віталій Володимирович, начальник лабораторії Спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0009-0003-3251-3820, kuzmenko1531@gmail.com.

Стефанишин Ярослав Іванович, науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна, ORCID 0000-0002-8317-4131, yaroslavstt513@gmail.com.

Храновська Тетяна Василівна, старший викладач Спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0009-0007-7873-4919, tanyakhranovskaya@gmail.com.

Mazor Serhii, candidate of technical sciences, associate professor of the Special department No. 3, Institute of special communication and information protection of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Vasylenko Serhii, candidate of technical sciences, head of the research special laboratory No. 2 of the Research center, Institute of special communication and information protection of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Kuzmenko Vitalii, head of the laboratory of the Special department No. 3, Institute of special communication and information protection of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Stefanyshyn Yaroslav, researcher, State research institute of cyber security and information protection technologies, Kyiv, Ukraine.

Khranovska Tetyana, senior lecturer of the Special department No. 3, Institute of special communication and information protection of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.