

Марченко Андрій Олександрович (кандидат технічних наук)<sup>1</sup>  
Войтко Віталій Віталійович (кандидат технічних наук, старший дослідник)<sup>2</sup>  
Кузьменко Віталій Володимирович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет оборони України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Воєнна академія імені Євгенія Березняка, Київ, Україна

<sup>3</sup> Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗВИТКУ АНТЕННИХ СИСТЕМ ЗАСОБІВ РАДІОРЕЛЕЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ

У засобах радіорелейного зв'язку використовуються параболічні антени, що мають вузьку діаграму спрямованості, а також логоперіодичні та рефлекторні антени, які мають широкий промінь діаграми спрямованості. Але зазначені антени мають суттєвий недолік, оскільки мають лінійну поляризацію. Поширення електро-магнітних хвиль уздовж земної поверхні призводить до змінення виду поляризації внаслідок рефракції, при цьому енергетика сигналів зменшується. Тому під час передачі інформації існує проблемна ситуація, що обумовлена потребою забезпечення зв'язку в умовах поширення складної завадової обстановки. Метою статті є розроблення рекомендацій щодо розвитку антенних систем засобів радіорелейного зв'язку для усунення поляризаційної неузгодженості сигналів та антенних систем. Під час написання статті застосовано теоретичні методи, а саме аналіз досліджень і публікацій за антенною тематикою, аналіз побудови антенних систем радіорелейних станцій, їх узагальнення, пояснення виразу, що визначає дальність поширення електромагнітних хвиль у вільному просторі. Зазначений методологічний підхід дає змогу порівняти основні технічні характеристики, визначити переваги і недоліки конструкцій антен для досягнення мети статті. У роботі проведено аналіз конструктивних особливостей і технічних характеристик антенних систем засобів радіорелейного зв'язку, що формують діаграми спрямованості різної ширини та форми в заданих діапазонах робочих частот. Наведено основні переваги та недоліки цих антен. Зокрема зазначено, що загальним недоліком антенних систем засобів радіорелейного зв'язку є використання опромінювачів з лінійною поляризацією, що призводить до втрат потужності сигналів під час поширення електромагнітних хвиль уздовж земної поверхні. Для усунення такого негативного ефекту запропоновано використовувати адаптивні, за поляризацією, антенні решітки на основі поляризаційно-голографічних антен. Вплив поляризаційної неузгодженості засобів радіорелейного зв'язку розглянуто на основі аналізу залежності дальності від коефіцієнту поляризації. Крім того, показано, що для збільшення пропускну здатності цифрових радіорелейних станцій використовується технологія «Множинний вхід – множинний вихід», реалізувати яку можна за допомогою багатопланових поляризаційно-голографічних антен. Наведено основні переваги адаптивних антен. Розроблено рекомендації щодо напрямів подальшого розвитку антенних систем засобів радіорелейного зв'язку.

**Ключові слова:** радіорелейний зв'язок, антенна система, електромагнітна хвиля, діаграма спрямованості, адаптивна антенна решітка, поляризація, поляризаційно-голографічна антена.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сьогодні основу системи радіозв'язку становлять засоби радіорелейного зв'язку (далі – РРЗ) різних типів, принципом роботи яких є ретрансляція (приймання, перетворення, підсилення та передавання) сигналу через ланцюг радіорелейних станцій (далі – РРС), розташованих у зоні прямої видимості.

Важливою складовою частиною кожної РРС є антенна система (далі – АС). У сучасних РРС використовуються дзеркальні антени, що характеризуються великим коефіцієнтом підсилення, вузькою діаграмою спрямованості (далі – ДС) та, як правило, лінійною поляризацією

сигналів. Особливістю організації РРЗ є те, що електромагнітні хвилі (далі – ЕМХ) поширюються уздовж земної поверхні, водночас, поляризація випромінюваних сигналів може змінюватись, а рівень потужності прийнятих сигналів суттєво зменшуватись, що негативно впливає на стійкість та завадозахищеність зв'язку.

Разом із тим, у більшості РРС використовуються логоперіодичні та рефлекторні антени, що мають широкий промінь ДС і меншу ступінь завадозахищеності, порівняно з дзеркальними антенами, та потребують збільшення вихідної потужності передавальних систем для забезпечення потрібної дальності радіорелейного зв'язку. Таким чином, під час організації РРЗ

спостерігається проблемна ситуація, що обумовлюється потребою забезпечити стійкий та завадозахищений зв'язок в умовах сигнально-завадової обстановки, що постійно змінюється та ускладнюється, а також – швидкої зміни місця розташування РРС для забезпечення реалізації усіх вимог, які висуваються до системи управління. Отже, питання, що пов'язані із забезпеченням стійкості та завадозахищеності зв'язку, реалізацією адаптивних методів приймання та обробки сигналів в умовах функціонування засобів РРЗ є важливими та першочерговими.

Звідси постає актуальне наукове та практичне завдання щодо побудови адаптивних АС, які відповідають вимогам завадозахищеності, швидкої та своєчасної зміни напрямку передавання інформації. Разом із тим, потрібно забезпечити стійке передавання інформації вздовж земної поверхні шляхом усунення поляризаційної неузгодженості сигналів та АС засобів РРЗ.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [1] розглянуто передумови забезпечення стійкого РРЗ та основні напрями його розвитку, наведено загальні відомості про новітні цифрові засоби радіорелейного зв'язку. Проте у статті не розглядаються антено-фідерні пристрої засобу РРЗ, як складова, від якої суттєво залежить якість передачі інформації, але зазначено, що перспективним напрямом розвитку є застосування адаптивної обробки сигналів.

Основні принципи побудови цифрових радіорелейних і тропосферних ліній зв'язку, а також напрямів їх розвитку викладені в [2]. Також наведено порядок розрахунку таких ліній та енергетичні співвідношення. Показано, що на завмирання сигналів впливають ДС антен, які обумовлені варіаціями кутів виходу і приходу ЕМХ, викликаними випадковими змінами рефракції. Водночас не зазначено як цей ефект можна усунути.

Аналіз каналу зв'язку проведений у [3], де описані джерела послаблення сигналів, втрати потужності прийнятих сигналів у трактах залежно від частоти тощо, але не зазначено як на потужність сигналів впливає неузгодженість поляризації.

У статті [4] проведено розрахунки очікуваної граничної дальності зв'язку для цифрових радіорелейних засобів при різних швидкостях передачі інформації, але втрати потужності за рахунок рельєфу прийнято рівними 0.

У [5] наголошено, що застосування перспективних адаптивних АС дає змогу формувати максимум ДС антени засобів РРЗ у потрібному напрямку та придушувати сигнали в напрямку дії завад шляхом формування провалів ДС, а також швидко переналаштовувати ДС для забезпечення роботи декількох РРС. Як висновок, запропоновано для підвищення стійкості та завадозахищеності засобів РРЗ використовувати адаптивні за поляризацією АС. Такі властивості мають поляризаційно-голографічні антени (далі – ПГА), за рахунок спірофазного ефекту [6]. Використання таких адаптивних антенних решіток

дає змогу уникнути поляризаційної неузгодженості сигналів, що поширюються вздовж земної поверхні. Крім того, багат шарові поляризаційно-голографічні антени забезпечують одночасне передавання та приймання сигналів на різних робочих частотах [7].

Результати аналізу джерел свідчать, що для виконання поставленого наукового завдання постала потреба у проведенні аналізу конструкцій антенних систем РРС, порівнянні їх основних технічних характеристик, визначенні переваг і недоліків конструкцій антен, а також – розробленні рекомендацій щодо напрямів розвитку антенних систем засобів РРЗ.

**Метою статті** є розроблення рекомендацій щодо розвитку антенних систем засобів радіорелейного зв'язку на основі результатів аналізу конструктивних особливостей і тактико-технічних характеристик радіорелейних станцій для усунення поляризаційної неузгодженості сигналів та антенних систем засобів радіорелейного зв'язку.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Сьогодні для організації РРЗ застосовуються цифрові РРС різних типів, а саме: Р-414 МУ, Р-425С3, Р-450, Р-402 [1].

Антенна система РРС Р-414МУ складається з параболічної антени АНТ2 0,6 15 НР з лінійним розміром 0,6 м і двох параболічних антен АНТ2 1,2 6НРХ з лінійним розміром 1,2 м [1; 9].

Перевагою антенної системи Р-414МУ є використання гостронаправлених параболічних антен з великим коефіцієнтом підсилення, що забезпечує потрібну дальність передачі інформації при невеликих потужностях передавальних пристроїв. Недоліком АС є використання лінійно-поляризованих опромінювачів, які формують ЕМХ з вертикальною або горизонтальною поляризацією, що призводить до втрат енергетики сигналів під час їх поширення вздовж земної поверхні. Цей ефект частково усувається використанням поляризаційного селектора, який дає змогу приймати лінійно-поляризовані ЕМХ, але при цьому використовується додаткова приймально-передавальна апаратура.

Конструкція антени РРС Р-425С3 ідентична параболічній антені АНТ2 1,2 6НРХ, що використовується в РРС Р-414МУ [9].

Антенна РРС Р-450 [10] є рефлекторною логіперіодичною, що забезпечує приймання і передачу радіосигналу з вертикальною або горизонтальною поляризацією. Поляризація антени визначається по розташуванню відбивачів рефлектора. Встановлення площини поляризації здійснюється шляхом відповідного приєднання антени до щогли під час розгортання РРС.

Конструкція антени РРС Р-450 є достатньо простою, але за рахунок невеликих лінійних розмірів формує широкий промінь діаграми спрямованості, тому потрібно збільшувати потужність передавальної системи для

забезпечення впевненого приймання сигналів. Крім того, це підвищує можливості стосовно виявлення таких станцій і постановки радіозавод противником.

Антенна система РРС Р-402 складається з [8]:

гостронаправленої антени, яка призначена для концентрації радіосигналу у вузький промінь та використовується для побудови радіорелейних інтервалів довжиною до 35 км (режим роботи точка-точка).

секторної антени, що формує ДС з шириною  $\Theta_E = 90^\circ$  і використовується для побудови радіомережі з географічно-широкою зоною покриття. При цьому забезпечується робота віддалених станцій у кількості більше однієї (режим роботи точка-багаточка).

всенаправленої антени, що має кругову ДС ( $\Theta_E = 360^\circ$ ) і призначена для створення покриття простору в районі розташування станції Р-402. У такому режимі станція Р-402 виконує роль точки доступу для абонентів та може підтримувати передачу інформації за технологією множинний вхід – множинний вихід (Multiple Input – Multiple Output) (далі – МІМО).

Основним недоліком антенної системи РРС Р-402 є використання секторної та всенаправленої антени, що формують секторну та кругову ДС відповідно. У цих антенах потужність радіосигналів розподіляється в широкому промені, що також призводить до зменшення дальності зв'язку або передачі інформації в небажаному напрямку зі зниженням ступеня завадозахищеності засобу радіозв'язку.

Результати аналізу конструктивних особливостей АС свідчать, що у РРС (Р-414 МУ, Р-425СЗ, Р-402) використовуються направлені АС, побудовані на основі дзеркальних параболічних антен, які мають властивість концентрації потужності радіосигналів у вузькому промені з шириною ДС  $\Theta = 3-5^\circ$  у потрібному напрямку (режим точка-точка) [1; 8; 9].

Загальним недоліком розглянутих антенних систем РРС є використання опромінювачів з лінійною (горизонтальною та/або вертикальною) поляризацією, що визначається напрямком орієнтації вектора електричної складової ЕМХ.

Оскільки під час поширення ЕМХ уздовж нерівної поверхні землі, напрямок поляризації може суттєво змінюватись, то в таких умовах замість лінійно-поляризованих хвиль поширюються ЕМХ з довільною (невідомою) орієнтацією площини поляризації відносно горизонту, що призводить до зменшення рівня прийнятого сигналу і, як наслідок, дальність зв'язку може зменшуватися.

Такий ефект доцільно розглянути на основі аналізу виразу, що визначає дальність поширення ЕМХ у вільному просторі [11]:

$$D_p = \lambda / 4\pi \sqrt{\frac{P_a G_a G_p}{n P_{min}} \gamma_n a_p}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – робоча довжина хвилі РРС;

$P_a$  – потужність, що випромінюється РРС;

$a_p$  – коефіцієнт передачі потужності сигналу в антенно-фідерного пристрою приймальної РРС;

$G_a$  – коефіцієнт підсилення антени передавальної РРС;

$G_p$  – коефіцієнт підсилення антени приймальної РРС;

$P_{min}$  – чутливість приймального пристрою РРС;

$n$  – коефіцієнт перевищення потужності сигналу над чутливістю приймального пристрою РРС;

$\gamma_n$  – коефіцієнт узгодженості поляризації антен радіорелейних станцій. Як правило, під час розрахунків його вважають за величину 0,5 [11].

Слід зазначити, що у виразі (1) не враховано поглинання ЕМХ в атмосфері. У цьому виразі найбільший інтерес викликає вплив коефіцієнту узгодженості поляризації антен  $\gamma_n$  на дальність  $D_p$ .

Характеристики АС засобів РРЗ, що використовувались як ввідні дані для розрахунку залежностей дальності зв'язку від коефіцієнту узгодженості поляризації антен радіорелейних станцій наведений у таблиці 1.

Аналіз наведених графічних залежностей (рис. 1) свідчить, що на дальність поширення ЕМХ може суттєво впливати поляризаційні характеристики АС засобів РРЗ. Вплив поляризаційної неузгодженості засобів РРЗ на рівень сигналів доцільно зменшувати використанням гостронаправлених АС, що забезпечують приймання сигналів незалежно від напрямку вектора електричної складової ЕМХ [13].

Таблиця 1

Ввідні дані для розрахунку залежностей дальності зв'язку від коефіцієнту узгодженості

Тип РРС	Характеристика антенної системи							
	Тип антени	Поляризація	Ширина ДС, град	Коефіцієнт підсилення антени, дБі	Довжина хвилі, м	Потужність передавача, дБм	Чутливість приймача, Вт	
Р-402	Р-402.01	параболічна	лінійна	$\Theta_E = \Theta_H = 5$	28	0,052	до 29	$10 \times 10^{-13}$
	Р-402.02	секторна	лінійна	$\Theta_E = 90$ (120)	20 (16)	0,055	до 27	$10 \times 10^{-13}$
	Р-402.04	всенаправлена	лінійна	$\Theta_E = 360$	13	0,055	до 27	$10 \times 10^{-13}$
Р-414 МУ	ВО-15	параболічна Ø0,6 м	лінійна	$\Theta_E = \Theta_H \approx 3$	30	0,201	28±1	$10 \times 10^{-13}$
	ВО-6С	параболічна Ø 1,2 м	лінійна (горизонтальна та вертикальна)	$\Theta_E = \Theta_H = 3,3$	35	0,044	30	$10^{-6}$

Тип РРС	Характеристика антенної системи						
	Тип антени	Поляризація	Ширина ДС, град	Коефіцієнт підсилення антени, дБі	Довжина хвилі, м	Потужність передавача, дБм	Чутливість приймача, Вт
P-425C3	параболічна Ø 1,2 м	лінійна	$\Theta_E = \Theta_H = 3,3$	35	0,044	30	$10^{-6}$
P-450	рефлекторна логоперіодична	лінійна (вертикальна/ горизонтальна)	$\Theta_E = \Theta_H = 5$	20	0.15	35	$10 \times 10^{-13}$

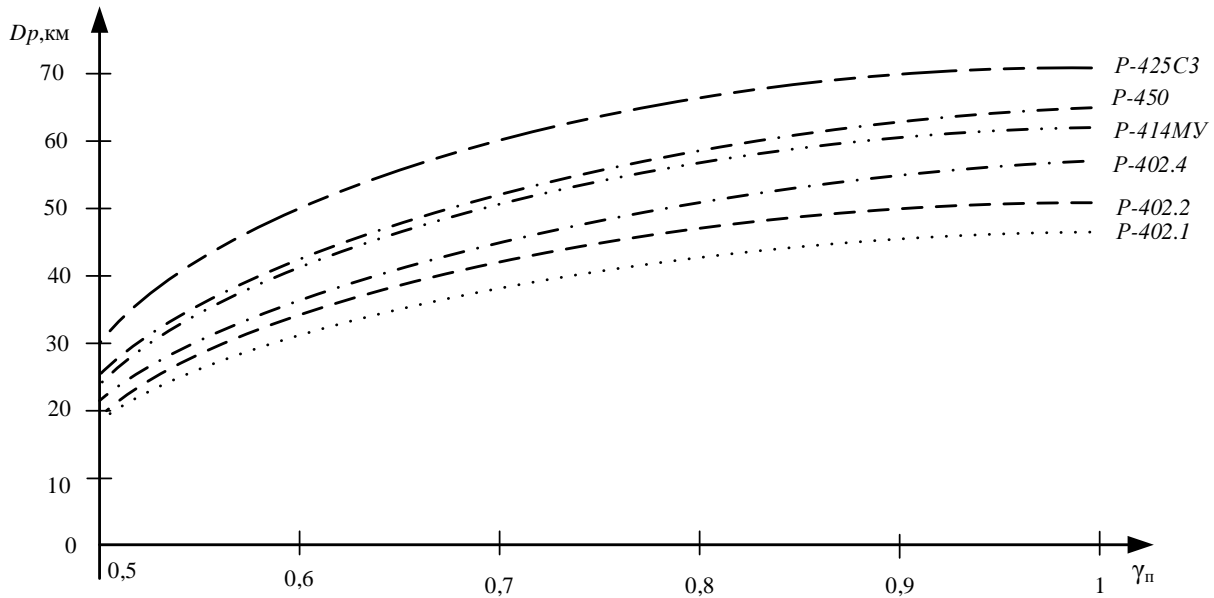


Рисунок 1 – Залежність дальності зв'язку від коефіцієнту узгодженості поляризації антен РРС

Крім того, до засобів РРС висувається ряд вимог щодо високої бойової готовності, пропускної здатності, стійкості, мобільності, доступності, завадозахищеності, а також можливості забезпечення швидкої та своєчасної зміни напрямку передачі інформації в разі втрати зв'язку з абонентом або під час зміни місця розташування

приймальної станції [1].

Сьогодні, для збільшення пропускної здатності цифрових РРС достатньо часто використовуються технологія МІМО, що реалізує передачу інформації декількома рознесеними передавальними і приймальними антенами (рис. 2) [13].

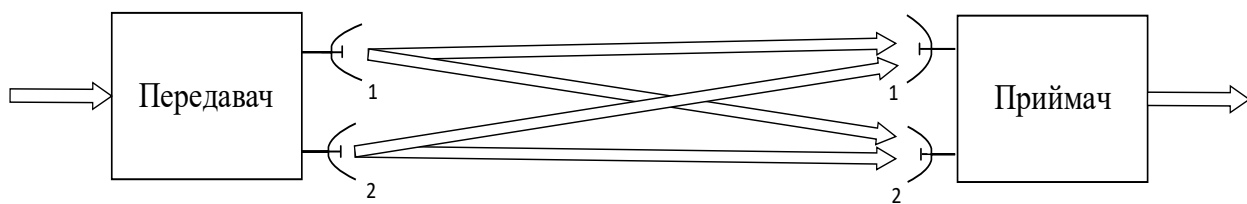


Рисунок 2 – Передача інформації за технологією МІМО

Недоліком технології МІМО є те, що для забезпечення зв'язку використовуються додаткові передавальна та приймальна антени, що, зі свого боку, призводить до збільшення кількості антен у радіорелейній лінії. Усунення наведених недоліків АС, забезпечення вимог щодо завадозахищеності засобів РРС і швидкої зміни напрямку передачі інформації, а також оптимізація кількості антен у РРС потребує нових підходів до побудови АС засобів РРС.

Перспективним напрямом розроблення нових і удосконалення існуючих РРС може бути побудова

адаптивних систем передавання (приймання) та обробки сигналів. Процес адаптації залежить від певних факторів, а саме: реалізованих методів адаптації, типу пристрою формування (обробки) сигналів, принципів побудови адаптивної антени та її елементів.

До переваг адаптивних антен слід віднести: усунення ефекту багатопроменевості, розширення зони обслуговування однієї РРС, оперативне регулювання потужністю випромінювання, збільшення кількості одночасно працюючих абонентів, підвищити пропускну здатність каналів

управління та передачі, усунути вплив внутрішніх і міжсистемних завад, що діють у смузі частот корисного сигналу, вирівнювання потужності від абонентів, розташованих на різних відстанях, розв'язання задачі визначення місцеположення тощо. Такі можливості можна реалізувати через настроювання адаптивних антенних решіток (далі – АР) на ефективне приймання корисного сигналу і придушення завад.

Крім того, в сучасних цифрових системах зв'язку для підвищення пропускної здатності та спектральної ефективності отримала розвиток технологія Massive (широкомасштабний) МІМО, яка дає змогу використовувати набагато меншу кількість терміналів користувачів, чим кількість антен. Massive МІМО реалізується використанням багатоеlementних цифрових АР, в яких адаптація здійснюється ваговою обробкою цифрових масивів напруг.

Основними рекомендованими напрямками подальшого розвитку АС для створення (проекування) нових, удосконалення (модернізації) існуючих РРС, що входять до складу мереж РРЗ чи комплексів зв'язку, слід вважати:

заміну антен з широким променем ДС (Р-450) на гостронаправлені (дзеркальні) з одночасним використанням систем автоматичного повороту (юстирування) АС за азимутом і кутом місця, що дасть змогу зменшити потужність передавальних систем під час забезпечення потрібної дальності передачі інформації;

використання плоских (планарних) АС (для РРС Р-402, Р-414МУ, Р-425 тощо), наприклад, на основі поляризаційно-голографічних антен, які дають змогу обробляти сигнали як з лінійною, так і з коловою (еліптичною) поляризацією, що забезпечує впевнене приймання при заданій дальності передачі інформації [12];

### Список бібліографічних посилань

1. Кушнір О. І., Васюта К. С., Озеров С. В., Литвин А. В., Северілов А. В. Основні тенденції та перспективи розвитку військового радіорелейного зв'язку. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків: ХНУПС, 2017. № 4. С. 7–11. 2. Наритник Т. М., Почерняєв В. М., Повхліб В. С. Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019. С. 27–32. 3. Sklar B., Harris F. J. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 3-ed ed. Chicago, USA: Pearson, 2021. 2287 p. 4. Гурський Т. Г., Степаненко Є. О., Шишацький А. В. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях. *Збірник наукових праць ВІПІ*. Київ, 2019. Вип. 1. С. 6–17. 5. Марченко А. О., Войтко В. В., Буяло О. В., Семібаламут К. М. Шляхи підвищення стійкості та заводо захищеності радіорелейного зв'язку. Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Сектор безпеки і оборони України на захисті національних інтересів: актуальні проблеми та завдання в умовах воєнного стану». (24 листопада 2022 року). Хмельницький: НАДПСУ, 2023. С. 891–893. 6. Замятин В. И., Гусак Ю. А. Поляризаационно-голографические антенны: методы расчета и возможные

розроблення (конструктивний синтез) багатополаризаційно-голографічних антен [7] для забезпечення передачі інформації за технологією МІМО;

конструктивний синтез адаптивних АР, зокрема цифрових, для побудови адаптивних мереж РРЗ [13]. Використання адаптивних АР дає змогу змінювати напрямок і потужність випромінювання сигналів, підвищити заводо захищеність засобів РРЗ та оптимізувати кількість антен цих засобів.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

Використання поляризаційно-голографічних антен, які за своїми властивостями відповідають дзеркальним антенам, дає змогу уникнути поляризаційної неузгодженості електромагнітної хвилі, що поширюється вздовж земної поверхні та приймальних антен засобів радіорелейного зв'язку. Також багатополаризаційно-голографічні транспаранти (відбивачі) можуть забезпечити передачу інформації декількома каналами на різних робочих частотах.

Застосування адаптивних антенних решіток дає змогу формувати максимум діаграми спрямованості антени засобів радіорелейного зв'язку в потрібному напрямку передачі інформації та подавляти сигнали в напрямку дії завад шляхом формування провалів у характеристиках спрямованості антен, а також здійснювати швидке переналаштування (сканування) діаграми спрямованості для забезпечення роботи декількох радіорелейних станцій.

Основними напрямками подальшого розвитку антенних систем є створення (проекування) нових, удосконалення (модернізації) існуючих антенних систем радіорелейних станцій, що входять до складу мереж (комплексів) радіорелейного зв'язку.

конструкції. *Радиоэлектроника*, 1996. № 10. С. 19–26. 7. Марченко А. О., Гусак Ю. А., Войтко В. В. Багатополаризаційно-голографічна антена: пат. 142499 Україна: Н01Q 15/24. № u 2019 11692; заявл. 06.06.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11. 8 с. 8. Вакуленко О. В., Ніколаєнко Б. А. Станція радіорелейна широкопугтова СРШ-5000 (станція радіорелейна Р-402). Навч. посіб. Київ: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 85 с. 9. Нестерук. Радіорелейна станція Р-425С3. Посібник з експлуатації. Харків: ХНУПС, 2015. 69 с. 10. Краснер Є. Ю. Станція радіорелейна Р-450. Посібник з експлуатації. Харків: ХУПС, 2007. 56 с. 11. Смирнов Ю. А. Радиотехническая разведка. Москва: Воениздат, 2001. 456 с. 12. Гусак Ю. А., Марченко А. О. Застосування поляризаційної голографії при побудові антен в системах радіозв'язку. *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ»*. Київ, 2011. Вип. 3. С. 23–27. 13. Sathish Ch. Adaptive antenna arrays: trends and applications / editor Ch. Sathish. New York: Springer-Verlag Berlin, 2004. 661 p. URL: file:///C:/Users/НДВ/Downloads/vdoc.pub\_adaptive-antenna-arrays-trends-and-applications.pdf (дата звернення: 29.05.2023).

RECOMMENDATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF ANTENNA SYSTEMS  
FOR RADIO RELAY COMMUNICATION MEANSMarchenko Andrii, (Candidate of technical sciences)<sup>1</sup>Voytko Vitalii, (Candidate of technical sciences, senior researcher)<sup>2</sup>Kuzmenko Vitalii<sup>3</sup><sup>1</sup> National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine<sup>2</sup> Yevgeny Berezhniak Military Academy, Kyiv, Ukraine<sup>3</sup> Institute of special communication and information protection National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

In radio relay communications, parabolic antennas with a narrow radiation pattern are used, as well as log-periodic and reflector antennas with a wide beam pattern. However, these antennas have a significant drawback, as they have linear polarization. The propagation of electromagnetic waves along the earth's surface leads to a change in the type of polarization due to refraction, while the energy of the signals decreases. Therefore, during the transmission of information, there is a problematic situation due to the need to ensure communication in the conditions of propagation of electromagnetic waves over the ground and to ensure the energy availability of signals in a complex interference environment. The purpose of the article is to develop recommendations for the development of antenna systems for radio relay communication to eliminate the polarization mismatch of signals and antenna systems. In writing the article, theoretical methods were used, namely, analysis of research and publications on the antenna subject, analysis of the construction of antenna systems of radio relay stations, their generalization, and explanation of the expression that determines the range of propagation of electromagnetic waves in free space. This methodological approach makes it possible to compare the main technical characteristics, determine the advantages and disadvantages of antenna designs to achieve the goal of the article. The paper analyzes the design features and technical characteristics of antenna systems of radio relay communication means that form radiation patterns of various widths and shapes in the specified operating frequency ranges. The main advantages and disadvantages of these antennas are presented. In particular, it is noted that a common disadvantage of antenna systems for radio relay communication is the use of linearly polarized irradiators, which leads to signal power losses during the propagation of electromagnetic waves along the earth's surface. To eliminate this negative effect, it is proposed to use adaptive polarization-based antenna arrays based on polarization-holographic antennas. The influence of polarization inconsistency of radio relay communication means is considered on the basis of the analysis of the dependence of the range on the polarization coefficient. In addition, it is shown that to increase the throughput of digital radio relay stations, the multiple input-multiple output technology is used, which can be realized using multilayer polarization-holographic antennas. The main advantages of adaptive antennas are presented. Recommendations on the directions of further development of antenna systems for radio relay communication are developed.

**Keywords:** radio relay communication, antenna system, electromagnetic wave, directional pattern, adaptive antenna array, polarization, polarization-holographic antenna.

## References

1. Kushnir, O. I., Vasyuta, K. S., Ozerov, S. V., Lytvyn, A. V., Severilov, A. V., (2017). The main trends and prospects for the development of military radio relay communication, *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl*. Kharkiv : KhNUPS, 4, 7–11.
2. Narytnyk, T. M., Pochernyayev, V. M., Povkhlil, V. S., (2019). Digital radio relay and tropospheric communication lines. Odesa : ONAZ im. O. S. Popova, 27–32.
3. Sklar, B., Harris, F. J., (2021). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 3-ed ed. Chicago, USA : Pearson, 2287.
4. Hurskyi, T. G., Stepanenko, E. O., Shishatskyi, A. V., (2019). Evaluation of boundary communication range of modern radio and radio relay links. *Zbirnyk naukovykh prats VIII*. Kyiv : VITI, 1, 6–17.
5. Marchenko, A. O., Voytko, V. V., Buialo, O. V., Semibalamut, K. M., (2023). Ways of increasing the stability and immunity of radio relay communication. *Tezy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Sektor bezpeky i obrony Ukrainy na zakhysti natsionalnykh interesiv: aktualni problemy ta zavdannia v umovakh voiennoho stanu»*. Khmelnytskyi : NADPSU (24 November 2022), 891–893.
6. Zamyatin, V. I. Gusak, YU. A., (1996). Polarization-holographic antennas: calculation methods and possible designs. *Radioelektronika*, 10, 19–26.
7. Marchenko, A. O. Husak, Yu. A., Voytko, V. V., (2020). Bahatosharova polyaryzatsiynoholohrafichna antena: *pat 142499* Ukraina : H01Q 15/24, № u 2019 11692, zaiavl. 06.06.2019, opubl. 10.06.2020, 11, 8.
8. Vakulenko, O. V., Nikolaienko, B. A., (2019). Broadband radio relay station SRS-5000 (radio relay station R-402). *Navch. posib*. Kyiv : ISZZI KPI im. Ihoria Sikorskoho, 85.
9. Nesteruk, (2015). Radio relay station R-425C3. *Posibnyk z ekspluatuvannia*. Kharkiv : KhNUPS, 69.
10. Krasner, E. Yu., (2007). Radio relay station R-450. *Posibnyk z ekspluatatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 56.
11. Smyrnov, Yu. A., (2001). *Radyotekhnicheskaiia razvedka*. Moskva : Voennydat, 456.
12. Husak, Yu. A., Marchenko, A. O., (2011). The use of polarization holography in the construction of antennas in radio communication systems. *Zbirnyk naukovykh prats VITI NTUU «KPI»*. Kyiv : VITI NTUU «KPI», 3, 23–27.
13. Sathish, Ch., (2004). Adaptive antenna arrays : trends and applications / editor Ch. Sathish. New York : Springer-Verlag Berlin, 661. URL: file:///C:/Users/HДB/Downloads/vdoc.pub\_adaptive-antenna-arrays-trends-and-applications.pdf (дата звернення: 29.05.2023).