

О. Л. Кузнецов¹, В. І. Васишин¹, О. В. Коломійцев², Ю. О. Болбас¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

МОЖЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ СИСТЕМ РАДІОЗВ’ЯЗКУ ТА РАДІОЛОКАЦІЇ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Анотація: Системи радіозв’язку та радіолокації функціонують в умовах впливу тропосферних неоднорідностей та підстильної поверхні, що є причиною виникнення флуктуацій фазового фронту електромагнітних хвиль. Зокрема, флуктуації фронту завадових хвиль призводять до зниження завадозахищеності даних систем. Предметом вивчення в статті є вплив флуктуацій фазового фронту хвилі активної маскувальної завади на ефективність її подавлення в системах радіозв’язку та радіолокації. Метою статті є оцінювання можливостей систем радіозв’язку та радіолокації щодо забезпечення заданої завадозахищеності в реальних умовах розповсюдження радіохвиль. Завданням є дослідження залежності ефективності подавлення активної завади від напрямку її приходу при різних розмірах та рознесеннях фазових центрів антен систем радіозв’язку та радіолокації, а також визначення пропозиції щодо її підвищення. В ході розв’язання вказаного завдання доведено перспективність використання в системах радіозв’язку та радіолокації у якості антенних систем адаптивних цифрових антенних решіток. За допомогою методів математичної статистики оцінено ступінь впливу флуктуацій фазового фронту активної завади в залежності від їх статистичних характеристик, що відповідають реальним умовам розповсюдження радіохвиль. Проаналізовано залежність коефіцієнта подавлення активної завади від ступеня впливу фазових флуктуацій в елементах приймальної апертури при фіксованих значеннях відхилень кута приходу завади від напрямку максимуму бічної діаграми спрямованості антени. Проведено оцінювання вказаного коефіцієнта від розмірів та рознесення фазових центрів основної та допоміжної антен радіотехнічної системи. Визначено умови найкращого подавлення активної завади в системах радіозв’язку та радіолокації. Перспективним напрямком подальших досліджень може бути застосування отриманих результатів стосовно забезпечення заданої завадозахищеності вказаних систем в умовах впливу комбінованих активно-пасивних завад.

Ключові слова: адаптивна цифрова антенна решітка, активна маскувальна завада, завадозахищеність, коефіцієнт подавлення, підстильна поверхня, система радіозв’язку, система радіолокації, статистичні характеристики, тропосферні неоднорідності, фазовий центр, флуктуації фазового фронту.

Вступ

Забезпечення заданої завадозахищеності є необхідною умовою функціонування сучасних систем радіозв’язку та радіолокації. Реальні умови розповсюдження електромагнітної хвилі активної маскувальної завади, зокрема, вплив тропосферних неоднорідностей та підстильної поверхні, є причиною викривлення її фазового фронту та, як слід, зниження ефективності застосування пристроїв завадозахисту.

Аналіз ефективності застосування пристроїв, що забезпечують адаптацію до зовнішньої завадової обстановці в реальних умовах виконання радіотехнічних систем (РТС) завдань за призначенням є актуальним практичним завданням.

Завади завжди присутні в прийнятому коливанні. Їх класифікують за різними ознаками – природою виникнення, способом формування, ефектом впливу, структурою та направленістю випромінювання електромагнітних хвиль.

Найбільш ефективними щодо застосування є прямошумові завади. Їх вплив є еквівалентним збільшенню інтенсивності внутрішнього шуму приймального пристрою, на відміну від якого, інтенсивність зовнішньої завади з часом змінюється відповідно до форми і закону переміщення діаграми спрямованості антени (ДСА) РТС.

У свою чергу, збільшення спектральної густини потужності суми шумових коливань призводить до зменшення відношення сигнал-шум на виході схеми

обробки і, відповідно, до зниження якості обробки інформації. При недостатньому динамічному діапазоні приймального пристрою можливе обмеження суми корисного сигналу та шумів, що призводить до ще більшого зниження відношення сигнал-шум, аж до повного приглушення корисного сигналу. Тому, активні маскувальні завади скорочують зону дії РТС та ведуть до появи секторів її ефективного подавлення.

Турбулентність тропосфери призводить до флуктуацій її показника заломлення, що у свою чергу викликає фазові спотворення завадового сигналу, що розповсюджується крізь тропосферні неоднорідності. Згідно з експериментальними та теоретичними даними, у створенні фазових флуктуацій радіосигналів найбільший внесок вносять турбулентності тропосфери із зовнішнім масштабом від сотень метрів до одиниць кілометрів.

Сучасні активні станції зв’язку, радіолокатори та джерела активних завад випромінюють у простір сигнали порівняно великої потужності. Частина цієї потужності поглинається землею (морською) поверхнею, решта сигналу відбивається від неї та взаємодіє з прямим променем. Крім того, сигнали при розповсюдженні можуть відбиватися і від різних метеоутворень. Тобто, виникає багатопріміневе розповсюдження електромагнітних хвиль, при якому поле у місці прийому створюється у результаті складання декількох сигналів з різними значеннями фази, що приводить до спотворення фазового фронту сумарної завадової електромагнітної хвилі на вході антени.

Таким чином, розповсюдження завадового сигналу крізь неоднорідності тропосфери, відбиття від шорсткої поверхні й метеоутворень, є причиною виникнення фазових флуктуацій. При цьому, аналіз таких флуктуацій може проводитися тільки з використанням статистичних методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність використання за призначенням систем зв'язку та радіолокації безпосередньо пов'язана із забезпеченням когерентності прийнятого радіосигналу [1–3]. Напрямоком розвитку вказаних систем є реалізація в них технологій цифрової обробки інформації та впровадження у якості антенних систем цифрових антенних решіток (ЦАР) [4, 5]. Однак, на якість виконання завдань комунікаційними та РТС суттєвий вплив оказує стан середовища поширення радіохвиль, зокрема тропосфери Землі [6], що визначає певні особливості їх застосування [7].

Розповсюдження радіохвиль крізь тропосферні неоднорідності супроводжується ефектом флуктуацій їх фазового фронту, статистичні характеристики яких розглянуто у [2, 8]. Дані флуктуації здатні призвести до порушення когерентності прийнятого радіосигналу та суттєвого зниження точності визначення місцезнаходження об'єктів спостереження [9, 10], що вимагає їх врахування у відповідних алгоритмах обробки сигналу в системах з антенною решіткою [11]. При цьому, окрім впливу тропосфери, на якість обробки інформації суттєвий вплив може здійснювати неоднорідності земної (морської) поверхні [12].

Висвітлена проблема у повному обсязі відноситься до питань завадозахищеності РТС. Так, у [13–15] розглянуто вплив флуктуацій фронту завадової хвилі на ефективність її подавлення кореляційними пристроями завадозахисту та надано відповідні результати математичного моделювання.

Зокрема, у [16] проведено оцінювання часу настройки даних пристроїв на подавлення в умовах флуктуацій фазового фронту хвилі активної завади.

У [17] проаналізовано вплив цих флуктуацій на якість завадозахисту при різних співвідношеннях розмірів основної та допоміжної антен РТС.

У [18] визначено граничні розміри апертури даних антени за умовою наявності вказаного впливу.

Для конкретних зразків радіолокаційної техніки різних діапазонів довжин хвиль у [19] надано результати порівняння теоретичних та експериментальних оцінок ефективності ослаблення активних завад кореляційними автокомпенсаторами (АКП) даних зразків, а потенційні можливості ослаблення зовнішньої завади визначено у [20, 21].

Таким чином, доцільно здійснити подальше дослідження вказаних питань стосовно залежності ефективності подавлення активної завади від напрямку її приходу при різних розмірах та рознесеннях фазових центрів антен систем зв'язку і радіолокації з метою визначення пропозиції щодо її підвищення. При цьому, оцінювання слід провести стосовно сантиметрового, дециметрового та метрового діапазонів довжин хвиль, які є найбільш поширеними для систем зв'язку та радіолокації.

Метою статті є оцінювання можливостей систем радіозв'язку і радіолокації щодо забезпечення заданої завадозахищеності в реальних умовах розповсюдження радіохвиль.

Основний матеріал

Сучасні РТС представляють собою системи з цифровою обробкою інформації. При цьому, перспективним напрямком їх розвитку є використання у якості антенних систем адаптивних цифрових антенних решіток (АЦАР) [5].

Під АЦАР розуміються антенні решітки, в яких цифровими методами обробки інформації здійснюється у реальному масштабі часу аналіз обстановки та забезпечується адаптивне регулювання форми та просторової орієнтації ДСА для досягнення максимальної ефективності функціонування РТС за заданими критеріями.

У задачах зв'язку (радіолокації) оптимізується зона покриття (у радіолокації – зона огляду), оперативно перенацілюються приймально-передавальні промені у залежності від територіального розподілу абонентів (у радіолокації – об'єктів радіолокаційного спостереження). Набір променів синтезується за алгоритмами дискретного перетворення Фур'є.

Технологія АЦАР істотно поліпшує якість зв'язку та радіолокації в умовах багатопробного поширення радіохвиль та підвищує завадозахищеність систем при інтенсивній радіопротидії, а також сприяє підвищенню динамічного діапазону приймальних антен [5].

Так, при синфазному складанні сигналів, середня потужність шуму зростає пропорційно кількості каналів антенної решітки, а потужність сигналу зростає пропорційно квадрату амплітуди.

Таким чином, підвищується відношення сигнал-шум та, як слід, – динамічний діапазон. При цьому, «нулі» ДСА у напрямках на джерела завад формуються без «запливань» провалів, що звичайно має місце при недостатньому динамічному діапазоні приймального модуля (рис. 1).

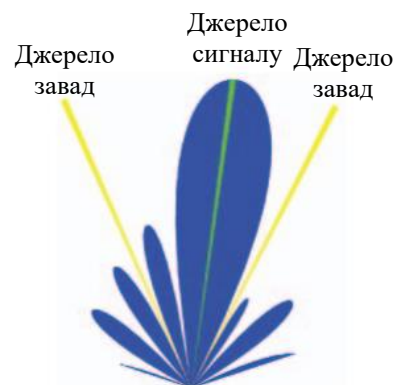


Рис. 1. Адаптивна ДСА з нулями у напрямку на джерела завад та максимумом на джерело сигналу (джерело: [5])

Результати оцінювання вказують на можливість подавлення активної шумової завади у АЦАР більш ніж на 30 дБ як за бічними, так і за головною пелюсткам ДСА в ідеальних умовах [5].

Застосування АЦАР на базових станціях зв'язку та радіолокаційних станціях дозволяють суттєво збільшити їх пропускну здатність за рахунок одночасного багатопроменового прийому сигналів в робочому секторі. При цьому, можливим є досягнення надвисокої роздільної здатності за кутовими координатами. Реальні умови розповсюдження завадової хвилі у тропосфері обумовлюють виникнення флуктуацій фази в елементах апертури антени, дисперсія σ_φ^2 та радіус кореляції ρ_φ яких визначаються виразами за наступним виглядом [14, 16]:

$$\sigma_\varphi^2 = 0,065 C_\varepsilon^2 k^2 d L_0^{5/3}, \quad (1)$$

$$\rho_\varphi = (0,27 C_\varepsilon^2 k^2 d)^{-3/5}, \quad (2)$$

де $C_\varepsilon^2 = 2 \sigma_\varepsilon^2 / L_0^{2/3}$ – структурна постійна; σ_ε^2 – дисперсія флуктуацій відносної діелектричної проникності тропосфери; L_0 – зовнішній масштаб турбулентності тропосфери; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; λ – довжина хвилі; d – шлях хвилі у тропосфері.

Для оцінки ступеня впливу флуктуацій фази радіосигналу, що обумовлені турбулентністю тропосфери Землі, на завадозахищеність РТС зручно користуватися співвідношенням, яке з урахуванням (1) та (2) має такий вигляд [14, 16]:

$$a_{\varphi n} = \frac{\sigma_\varphi^2}{\rho_\varphi} L = 32 L L_0^{3/5} \cdot \sigma_\varepsilon^{16/5} \left(d / \lambda^2 \right)^{8/5}, \quad (3)$$

де L – лінійний розмір антени.

Сигнали РТС поширюються у тропосфері, неоднорідності якої обумовлені нерегулярністю зміни відносної діелектричної проникності.

При цьому, значення дисперсії флуктуації діелектричної проникності тропосфери $\sigma_\varepsilon^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}$ є мінімальним, а $\sigma_\varepsilon^2 = 9 \cdot 10^{-12}$ – максимально можливими [18]. На рис. 2 представлені графіки залежності параметра $a_{\varphi n}$, що розраховані за виразом (3), від довжини хвилі λ за умовою: $d = 50$ км та $L_0 = 1$ км.

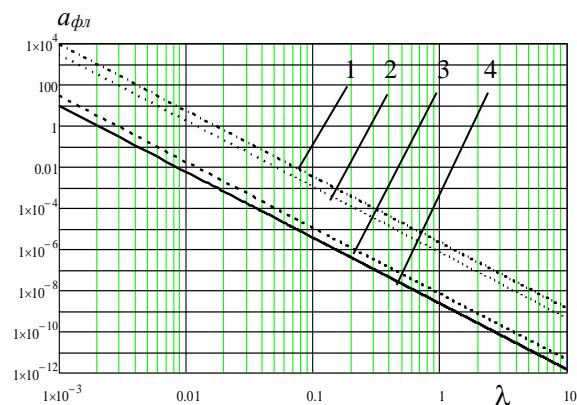


Рис. 2. Залежність параметра $a_{\varphi n}$ від довжини хвилі (джерело: [14])

Графіки отримані для наступних випадків:

$$1 - \sigma_\varepsilon^2 = 9 \cdot 10^{-12}, \quad L = 30 \text{ м};$$

$$2 - \sigma_\varepsilon^2 = 9 \cdot 10^{-12}, \quad L = 10 \text{ м};$$

$$3 - \sigma_\varepsilon^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}, \quad L = 30 \text{ м};$$

$$4 - \sigma_\varepsilon^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}, \quad L = 10 \text{ м}.$$

З графіків, що приведені на рис. 3 можливо заключити що, при фіксованій довжині хвилі, збільшення лінійного розміру антени у 3 рази, викликає зміну параметру $a_{\varphi n}$ до 10 дБ за потужністю. Тобто, близько 10 разів. У свою чергу, зміна дисперсії флуктуацій відносної діелектричної проникності тропосфери від мінімального до максимального значення призводить до зміни параметра $a_{\varphi n}$ приблизно до 30 дБ за потужністю. Тобто, близько 1000 разів. Зі зміною діапазону довжин хвиль від сантиметрового до метрового значення параметру $a_{\varphi n}$ знижується на десятки дБ за потужністю. Вказане свідчить про значно більший вплив на параметр $a_{\varphi n}$ умов поширення завад, ніж лінійного розміру антени. При цьому, зі зміною діапазону довжин хвиль від метрового до сантиметрового, значення параметру $a_{\varphi n}$ збільшується на десятки дБ за потужністю.

Таким чином, флуктуації фазового фронту хвилі завади при проходженні крізь тропосферу з випадковими неоднорідностями є більш значними, чим менше довжина хвилі РТС.

Вирішення завдання захисту РТС від активних маскувальних завад, що діють за головною та бічним пелюсткам ДСА, забезпечується застосуванням кореляційних АКП, побудованими за квадратурною або гетеродинною схемами. Вплив випадкових викривлень фазового фронту хвилі завади ускладнює роботу АКП та знижує якість завадозахисту РТС.

При застосуванні в РТС кореляційних АКП, орієнтації допоміжної компенсаційної антени РТС на джерело завади та лінійному законі убавання коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій, вираз коефіцієнта подавлення завади за [15] має наступний вигляд:

$$K_n = \frac{\sigma_{\text{вх}}^2}{\sigma_{\text{внх}}^2} = \frac{1 + a_{\varphi n} \text{ctg}^2 \psi}{a_{\varphi n}} \left[1 + \text{ctg}^2 \psi - \frac{L_1}{3L} \right]^{-1}, \quad (4)$$

де $\sigma_{\text{вх}}^2$ – дисперсія активної завади на вході АКП; $\sigma_{\text{внх}}^2$ – дисперсія активної завади на виході АКП; $\psi = bL/2$

– узагальнений кут; $b = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$ – регулярна зміна фази; θ – кут між нормаллю до основної антени РТС і напрямом на джерело випромінювання; L_1 – розмір апертури допоміжної компенсаційної антени РТС. Мірою придушення зовнішньої активної шумової завади може служити її ослаблення, як величина обернена до коефіцієнта подавлення завади таким чином:

$$\xi = 1/K_n. \quad (5)$$

Розглядається випадок $\rho_\varphi \gg L$, оскільки лише за цієї умовою можливе реальне ослаблення завади.

Найбільш сприятливими умовами ослаблення впливу зовнішньої завади є такі:

– наявність тільки одного джерела зовнішньої завади;

– сталий режим;
– радіус кореляції фазових флуктуацій значно більше розміру апертури антени.

При відмінних умовах результати компенсації завади будуть тільки гірше. Це дозволяє вважати оцінки, зроблені при прийнятих умовах граничними.

У більшості практичних випадків виконується умова $a_{\phi l} \ll 1$. При невиконанні даної умови втрачає сенс сама задача компенсації зовнішньої завади. У свою чергу, умова $a_{\phi l} \ll \psi$ виключає випадок збігу кутів приходу активної завади та корисного сигналу.

При некорельованості за часом і простором власних шумів та некорельованості за часом, але корельованості за простором зовнішньої завади, оптимальна просторова обробка зводиться до такого [13].

Просторова обробка в основному каналі узгоджена з напрямом приходу корисного сигналу. Просторова обробка в допоміжному каналі повинна бути узгоджена з напрямом приходу зовнішньої завади, але використовується нерівномірний, залежний від інтенсивності зовнішньої завади амплітудний розподіл уздовж апертури допоміжної антени. Розміри апертури основної та допоміжної антен повинні бути рівними, а їх фазові центри суміщеними. При цьому, оцінка гранично можливого ослаблення зовнішньої завади має наступний вигляд [20]:

$$\xi = \frac{a_{\phi l}}{2} \frac{1 + 2\text{ctg}^2\psi}{1 + 2a_{\phi l} \text{ctg}^2\psi}. \quad (6)$$

Найбільше ослаблення має місце для максимумів бічних пелюсток ДС основної антени ($\text{ctg}\psi = 0$). Для нульових значень такої ДС ослаблення відсутнє, оскільки відсутня сама зовнішня завада.

На рис. 3 зображено залежність коефіцієнта подавлення активної завади, отриманого згідно (5) та (6), від узагальненого параметра $a_{\phi l}$ при фіксованих значеннях відхилень $\Delta\psi$ узагальненого кута Ψ від напрямку максимуму бічної пелюстки ДСА. Криві 1, 2, і 3 відповідають $\Delta\psi = 60, 45, 30^\circ$.

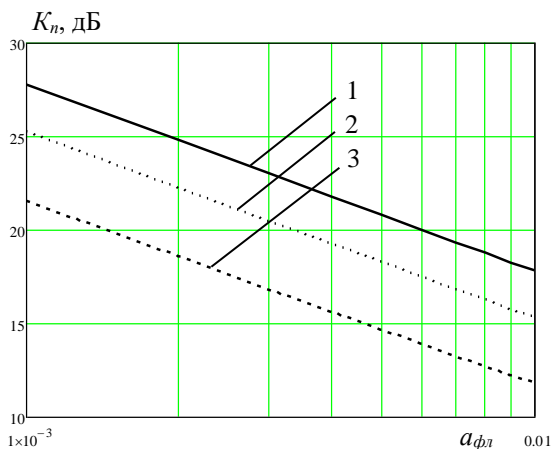


Рис. 3. Коефіцієнт подавлення завади в умовах флуктуацій фронту її хвилі (джерело: розроблено авторами)

За отриманими графіками можливо заключити, що коефіцієнт подавлення завади є практично прямо

пропорційним $a_{\phi l}$ та залежить від $\Delta\psi$. Порівняння графіків вказує на те, що при значеннях $a_{\phi l} \geq 0,01$ застосування засобів подавлення активних маскувальних завад не забезпечує необхідну завадозахищеність систем зв'язку та радіолокації.

Як доведено у [19] при переході від метрового до сантиметрового діапазону довжин хвиль, зменшення коефіцієнта подавлення активної завади може складати десятки дБ.

При цьому, тропосферні неоднорідності вносять значний вплив на зниження ефективності подавлення активної завади АКП у сантиметровому та дециметровому діапазонах довжин хвиль. У метровому діапазоні вплив тропосфери на зменшення ефективності подавлення активної завади є несуттєвим, але у цьому діапазоні довжин хвиль основний внесок у зниження коефіцієнта подавлення активної завади вносить вплив земної (морської) поверхні.

Доцільно проаналізувати наступні випадки рознесення фазових центрів ℓ основної та допоміжної антен систем радіозв'язку або радіолокації:

– апертури основної та допоміжної антен перекриваються повністю: $0 \leq \ell \leq (L - L_1)/2$;

– апертури антен перекриваються частково: $(L - L_1)/2 \leq \ell \leq (L + L_1)/2$;

– апертури антен не перекриваються: $\ell \geq (L + L_1)/2$.

Для довільного значення величини ℓ та спрямованості допоміжної антени на джерело завади коефіцієнт подавлення активної завади (4) перетворюється до наступного вигляду:

$$K_n = \frac{1 + a_{\phi l} \text{ctg}^2\psi}{a_{\phi l}} \left[1 + \text{ctg}^2\psi - \frac{L_1}{3L} + \zeta(\ell) \right]^{-1}. \quad (7)$$

Величина складової $\zeta(\ell)$ для розглянутих випадків визначається таким чином:

– $\zeta(\ell) = 0$ при $0 \leq \ell \leq (L - L_1)/2$;

– $\zeta(\ell) = \frac{L}{4L_1} \left(1 - \frac{L_1}{L} - \frac{2\ell}{L} \right)^2$ при $(L - L_1)/2 \leq \ell \leq (L + L_1)/2$;

– $\zeta(\ell) = \frac{2\ell}{L} - 1$ при $\ell \geq (L + L_1)/2$.

На рис. 4 представлені графіки залежності коефіцієнта подавлення завади від узагальненого кута Ψ , які відповідають випадкам: крива 1 – $\ell = 0$; крива 2 – $\ell = 5$; крива 3 – $\ell = 15$), за умовами: $L = L_1 = 10$ м, $a_{\phi l} = 0,01$. На рис. 5 наведено дані графіки при різних розмірах основної та допоміжної антен за умовою суміщення їх фазових центрів (крива 1 – $L = L_1$; крива 2 – $L = 2L_1$; крива 3 – $L = 10L_1$).

Крива 4 на рис. 4 та 5 відповідає оптимальній просторовій обробці згідно (5) та (6). За графіками, що наведені на рис. 4 можливо заключити, що при рознесеннях фазових центрів основної та допоміжної відбувається зменшення коефіцієнта подавлення завади.

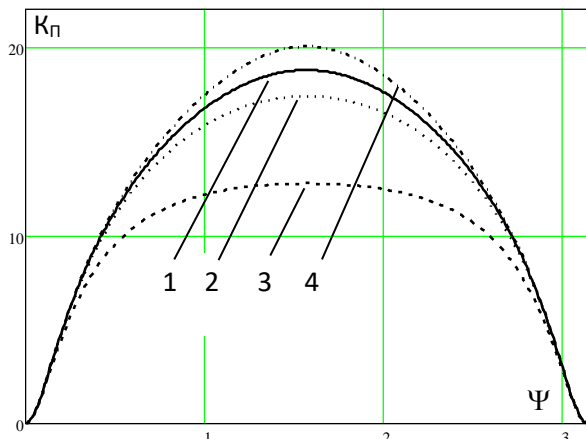


Рис. 4. Залежність коефіцієнта подавлення активної завади від узагальненого кута при різних рознесеннях фазових центрів антен (джерело: розроблено авторами)

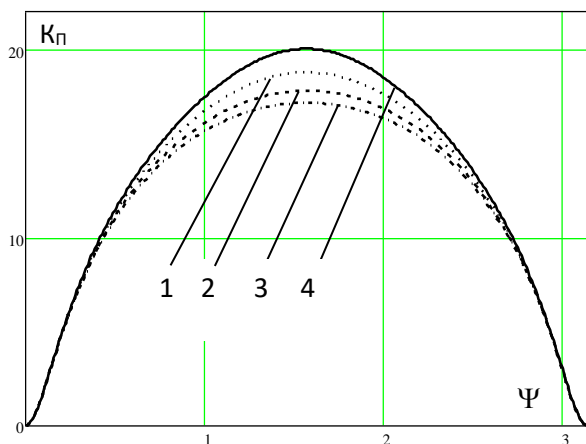


Рис. 5. Залежність коефіцієнта подавлення активної завади від узагальненого кута при різних розмірах антен (джерело: розроблено авторами)

В порівнянні з оптимальною просторовою обробкою (крива 4), відхилення обробки від оптимальної зменшує коефіцієнт подавлення на величину до 7 % (крива 1), зсув фазового центру додаткової антени на половину геометричного розміру основної антени призводить до зменшення коефіцієнта подавлення на

величину до 14 % (крива 2), а винесення фазового центру за межі антени на половину цього розміру – до 37 % (крива 3).

За графіками, що наведені на рис. 5 можливо заключити, що різниця розміру основної і додаткової антен компенсаторів впливає на коефіцієнт подавлення в меншому ступені ніж рознесення їх фазових центрів. У порівнянні з оптимальною просторовою обробкою (крива 4), при рівних розмірах антен зменшення коефіцієнта подавлення складає до 7 % (крива 1) При зменшенні розміру додаткової антени в 2 рази у порівнянні з розміром основної антени – до 11 % (крива 2). При зменшенні розміру додаткової антени у 10 разів й більше – до 15 % (крива 3).

Таким чином, для забезпечення умов найкращого подавлення активної завади розміри апертур основної та допоміжної антен систем радіозв'язку та радіолокації повинні бути рівними, а їх фазові центри – суміщеними, що дозволяє наблизити адаптивну просторову обробку до оптимальної.

Висновки

1. Розповсюдження завадової хвилі у реальних умовах є причиною виникнення флуктуацій її фазового фронту. При цьому, аналіз цих флуктуацій може проводитися тільки з використанням методів математичної статистики.

3. Тропосферні неоднорідності здатні суттєво знизити коефіцієнт подавлення активної завади для систем радіозв'язку та радіолокації сантиметрового діапазону довжин хвиль. При цьому, вони не оказують значного впливу на завадозахищеність даних систем у метровому діапазоні довжин хвиль, але у цьому діапазоні суттєвий вплив на їх завадозахищеність здійснює земна поверхня.

3. Для забезпечення умов найкращого подавлення активної завади розміри апертур основної та допоміжної антен систем зв'язку та радіолокації повинні бути рівними, а їх фазові центри – суміщеними. Просторова обробка у допоміжному каналі повинна бути узгоджена з напрямом приходу зовнішньої завади та використовуватись нерівномірний, залежний від інтенсивності зовнішньої завади амплітудний розподіл уздовж апертури допоміжної антени.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радіоелектронні системи / Ю.М. Седишев, В.І. Карпенко, Д.В. Атаманський та ін. – Х: ХУПС, 2010. – 418 с. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/117>.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. / Под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с. <https://b.twirpx.link/file/202213>.
3. Barton D.K. Radar Equations for Modern Radar / D.K. Barton. London: Artech House, 2012. 264 p. <https://www.scribd.com/document/293606437/Radar-Equations-for-Modern-Radar>.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. – К.: КВІЦ, 2000. – 430 с. <https://b.eruditor.link/file/3693220>.
5. Слюсар В.И. Smart-антенны пошли в серию. *Електроніка: наука, технологія, бізнес.* – 2004. – № 2. С. 62-65 (2004). https://ru.wikipedia.org/wiki/Smart_антенна.
6. Рекомендация МСЭ-R P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-6-200701-I/en>.
7. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах. *Системи управління навігації та зв'язку.* – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/nitps/article/view/317>.
8. Карлов В.Д., Родюков А.О., Пічугін .М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* – 2015. – Вип. 4 (21). – С. 71-74. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2015_4_19.

9. Karlov V., Kuznietsov O., Kolomiitsev O., Krasnoshapka I., Petrushenko I., Strutsinskiy O. Можливості врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти аеродинамічного об'єкта. *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2022. – Т. 3 (69). – С. 121-127. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.121>.
10. Карлов В.Д., Кузнецов О.Л., Белоусов В.В., Тузіков С.А., Олешук М.М., Петрушенко В.М. Точність вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів в умовах тропосферної рефракції. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2021. – № 1 (63). – С. 146-152. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/issue/view/74/41>.
11. Кузнецов О.Л., Коломійцев О.В., Яровий С.В., Олійник Р.М., Живець Ю.М. Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. – 2021. – Вип. 3(9) – С. 65-72. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/117>.
12. Рекомендация МСЭ-R P.1407-2. Многолучевое распространение и параметризация его характеристик. Электронный ресурс] – Режим доступа:https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1407-2-200503-S!!PDF-R.pdf.
13. Минервин Н.Н., Васюта К.С., Шумейко И.Е. Влияние флуктуаций фронта волны помехового сигнала на эффективность его подавления. *Радиотехника*. – 2004. – Вып. 136 – С. 95-101. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
14. Кузнецов О.Л., Таршин В.А., Шумейко И.С. Анализ влияния флуктуаций фронта волны активной завады на качество ее подавления корреляционным автокомпенсатором шляхом математического моделирования его работы. *Системи управління навігації та зв'язку* – 2007. – Вип. 3 – С. 132-135. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/about>.
15. Минервин Н.Н. Влияние случайных искажений в тропосфере помеховой волны на эффективность ее подавления корреляционным автокомпенсатором. *Радиотехника*. – 2006. – Вып. 147, С. 149-156. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
16. Кузнецов О.Л., Таршин В.А., Шумейко И.С. Анализ času настройки корреляционного автокомпенсатора на подавление активной завады в условиях флуктуаций фронта волны. *Системи озброєння і військова техніка*. – 2007. – Вип. 3(11) – С. 114-115. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sovit_2007_3_29.
17. Минервин М.М., Кузнецов О.Л., Шумейко И.С. Анализ влияния фазовых флуктуаций завады на эффективность работы автокомпенсаторов активных шумовых завад при использовании антенн с разными размерами. *Системи озброєння і військова техніка*. – 2006. – № 3(6) – С.36-38. <https://irbis-nbuv.gov.ua>.
18. Минервин Н.Н. Предельные размеры апертуры антенны радиолокационной станции при компенсации воздействия внешней помехи. *Прикладная радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 12. – № 4. – С. 533-535. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
19. Минервин Н.Н., Гриб Д.А., Карлов Д.В. Сопоставление теоретических оценок и экспериментальных данных эффективности ослабления внешних помех корреляционными автокомпенсаторами. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. Т. 12, № 4. С. 536-537. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
20. Kuznietsov, O., Karlov, V., Kolomiitsev, O., Sadovyi, K., & Biesova, O. (2020). The influence of statistical characteristics of the fluctuations of the radiation signal initial phases on the accuracy of the measurement aerodynamic object radial velocity. *Advanced Information Systems*, 4(2), 123–129. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.18>.
21. Kuznietsov, O., Kolomiitsev, O., Kiyko, A., Kovalchuk, A., & Sadovyi, K. (2020). Analysis of possibilities of providing of necessary exactness of measuring of spatial coordinates of air objects in the radio-location station of accompaniment with phase aerial by a grate. *Advanced Information Systems*, 4(1), 91–96. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.13>.

Received (Надійшла) 11.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.10.2024

Possibilities of ensuring the specified failure protection of radio communication and radar systems in real conditions propagation of radio waves

O. Kuznietsov, V. Vasylyshyn, O. Kolomiitsev, Y. Bolbas

Abstract. Radio communication and radar systems operate under the influence of tropospheric inhomogeneities and the substratum, which is the cause of fluctuations in the phase front of electromagnetic waves. In particular, fluctuations of the interference wave front lead to a decrease in the immunity of these systems. The subject of study in the article is the effect of fluctuations of the phase front of an active masking interference wave on the effectiveness of its suppression in radio communication and radar systems. The goal is to evaluate the capabilities of radio communication and radar systems to ensure the specified immunity in real conditions of radio wave propagation. The task is to study the dependence of the effectiveness of suppression of active interference on the direction of its arrival at different sizes and differences of phase centers of antennas of communication and radar systems, as well as to determine a proposal for its improvement. In the course of solving the specified task, the perspective of using adaptive digital antenna arrays as antenna systems in radio communication and radar systems has been proven. Using the methods of mathematical statistics, the degree of influence of the fluctuations of the phase front of the active interference was estimated, depending on their statistical characteristics, which correspond to the real conditions of radio wave propagation. The dependence of the suppression coefficient of active interference on the degree of influence of phase fluctuations in the elements of the receiving aperture at fixed values of the deviations of the angle of arrival of the interference from the direction of the maximum of the side lobe of the antenna directional diagram was analyzed. The specified coefficient was evaluated based on the size and phase difference of the main and auxiliary antennas of the radio engineering system. The conditions for the best suppression of active interference in radio communication and radar systems have been determined. A promising direction of further research may be the application of the obtained results in relation to the issues of ensuring the given interference immunity of the specified systems under the influence of combined active-passive interference.

Keywords: adaptive digital antenna array, active masking interference, interference immunity, suppression coefficient, substratum, radio communication system, radar system, statistical characteristics, tropospheric inhomogeneities, phase center, phase front fluctuations.