

АНАЛІЗ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ ДЛЯ БАГАТОАНТЕННИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

В зазначеній статті проведено аналіз впливу дестабілізуючих факторів на функціонування багатоантенних систем військового радіозв'язку. Встановлено, що на якість функціонування впливають різні дестабілізуючі чинники, а саме навмисні завади та завмирання сигналу. Проаналізовано відомі наукові результати та визначено напрямки подальших досліджень.

Калантаєвская С.В. Анализ дестабилизирующих факторов на многоантенные системы военной радиосвязи. В данной статье проведен анализ влияния дестабилизирующих факторов на функционирование многоантенных систем военной радиосвязи. Установлено, что на качество функционирования влияют различные дестабилизирующие факторы, а именно преднамеренные помехи и замирания сигнала. Проанализированы известные научные результаты и определены направления дальнейших исследований.

S. Kalantaijevska Analysis of the effect of destabilizing factors on multiple antenna systems of military radio communication systems. In this article analyzes the influence of destabilizing factors on the operation of multi-antenna systems of military radio communication. It has been established that different functioning factors contribute to the quality of functioning, namely deliberate interruptions and fading of the signal. Well-known scientific results are analyzed and directions of further researches are defined.

Ключові слова: засоби радіозв'язку, радіолінія, завадозахищеність, МІМО, навмисні завади, завмирання сигналу.

Постановка завдання

Технологія МІМО знайшла практичне застосування у багатьох сучасних телекомунікаційних системах, зокрема, у безпроводових локальних мережах стандарту IEEE 802.11n, а також в безпроводових мережах мобільного зв'язку WIMAX і LTE та ін. [1 – 5].

Суть технології МІМО подібна до методу рознесеного прийому, коли на приймальному боці створюються декілька некорельованих копій сигналу за рахунок рознесення антен у просторі, за поляризацією, рознесення сигналів за частотою або у часі.

В системах радіозв'язку з МІМО реалізується просторове мультиплексування: потік даних на передачі розбивається на два або більше підпотоків, кожний з яких передається та приймається за допомогою різних антен [1 – 10].

На завадозахищеність багатоантенних систем військового радіозв'язку впливають навмисні завади та завмирання сигналу, що виникають у ході багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.

Враховуючи стрімкий розвиток засобів радіоелектронної боротьби, недосконалість відомих методів (методик) обробки сигналів в багатоантенних системах військового радіозв'язку обумовлює постійний пошук нових наукових підходів та технічних рішень, що дозволять підвищити завадозахищеність багатоантенних систем військового радіозв'язку до необхідного рівня. Все це обумовлює актуальність обраного автором наукового завдання.

Аналіз останніх публікацій

У відомих публікаціях авторів таких як Борисова В.І., Макаренко С.І., Попова С.А., Кувшинова О.В., Слюсаря В.І., Буряченка Д.Л., Савищенко Н.В., Зайцева С.В., Лівенцева С.П., Науменка М.І., Флаксмана А.Г., Стасєва Ю.В., Гурського Т.Г., Шишацького А.В., Коляденка Ю.О. та інш. моделювався вплив завад на системи та засоби військового радіозв'язку що представлені адитивним білим гаусівським шумом [1 – 26], проте не проведено аналіз впливу інших дестабілізуючих факторів на завадозахищеність багатоантенних систем військового радіозв'язку.

З цією метою в зазначеній статті автором пропонується провести аналіз впливу адитивних та мультиплікативних завад, що описуються різноманітними законами розподілу та порядком взаємодії з корисним сигналом на завадозахищеність багатоантенних систем військового радіозв'язку.

Метою зазначеної статті є проведення аналізу дестабілізуючих факторів для багатоантенних систем військового радіозв'язку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Проведемо формалізацію роботи системи МІМО.

У загальному випадку структура системи МІМО має в своєму складі M_t передавачів (передавальних антен) і M_r приймачів (приймальних антен) (рис. 1). Передані сигнали надходять в M_r приймальних трактів [1 – 10].

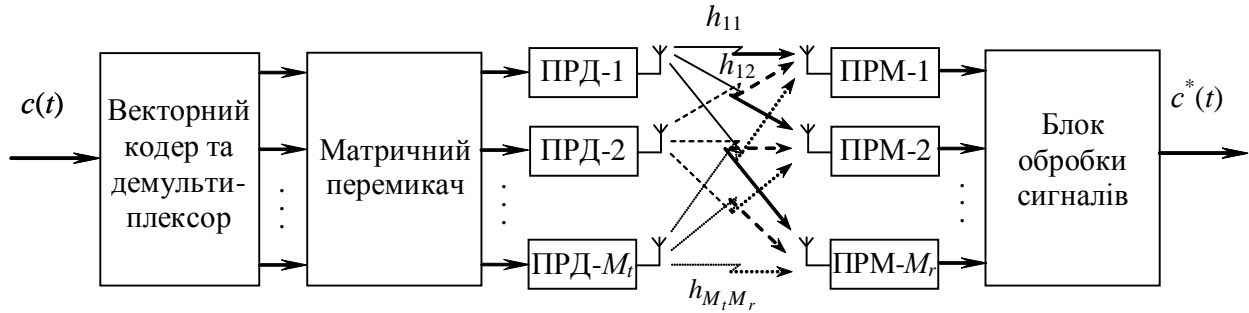


Рис. 1. Структурна схема системи МІМО

Розглянемо систему МІМО $M_t \times M_r$, зображену на рис. 1. Високошвидкісний потік даних розбивається на M_t незалежних послідовностей з швидкістю $1/M_t$, які потім передаються одночасно з декількох антен, відповідно використовуючи тільки $1/M_t$ їх первинної смуги частот.

Перетворювач потоку даних на передавальному кінці лінії зв'язку перетворює послідовний потік у паралельний, а на приймальному – виконує зворотне перетворення.

Розглянемо класифікацію завад, що використовуються для подавлення багатоантенних систем та засобів військового радіозв'язку (рис. 2) [9 – 12, 13 – 14].

Ймовірність помилкового приймання в i -му каналі системи МІМО можна визначити за виразом [2, 3, 5, 9]:

$$P_{\text{m}i} = \frac{1}{2} \left[1 - \hat{O} \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{ai}}}{G_{0i}}} \right) \right], \quad (1)$$

де E_{ai} – енергія сигналу; G_{0i} – спектральна щільність потужності шуму ($G_{\text{c}} = \frac{P_{\text{c}}}{F_{\text{n}}}$, де F_{n} –

смуга частот сигналу, P_{c} – потужність завади, $\hat{O}(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt$ – функція Крампа.

У загальному виді вплив завади $b(t)$ (або ж кількох завад $b_1(t), b_2(t), \dots, b_n(t)$) на переданий (корисний сигнал) $A(t)$ для одного каналу системи МІМО може бути виражено оператором

$$Z(t) = V(A(t), b(t)), \quad (2)$$

де $Z(t)$ – прийнятий (спотворений) сигнал.

Цей оператор можна записати у вигляді суми

$$Z(t) = A(t) + b_a(t), \quad (3)$$

завада $b_a(t)$ у виразі (3) називається адитивною.

Для одного каналу системи МІМО завада, дія якої призводить до нелінійних змін параметрів корисного сигналу $A(t)$, називається мультиплікативною завадою та може бути виражена оператором у вигляді добутку

$$Z(t) = b_m(t) \cdot A(t). \quad (4)$$

Міжсимвольні завади обумовлені потребою до підвищення швидкості передачі інформації при обмеженій смузі частот. Канал зв'язку з обмеженою смугою пропускання спотворює спектр переданого сигналу, що призводить до розтягу сигналів за часом і, отже, до накладання їх один на одного. Вплив міжсимвольних завад на демодулятор виявляється одночасно як мультиплікативний і адитивний.

При одночасному впливі адитивної і мультиплікативної завад спотворений прийнятий сигнал для одного каналу системи МІМО має вигляд

$$Z(t) = b_m(t) \cdot A(t) + b_a(t). \quad (5)$$

Реальні багатоантенні системи військового радіозв'язку описуються виразом (5).

Нижче, в зазначеній статті, буде коротко викладено основні відомості про кожен з складових виразу (5).

За природою виникнення завади поділяються на навмисні (що спеціально створюються за допомогою виділених для цієї мети технічних засобів) і ненавмисні (природні).

За способом створення розрізняють активні завади, які формуються за допомогою пристроїв, що випромінюють електромагнітну енергію, і пасивні навмисні завади. Пасивними називаються завади, що створюються за рахунок ефекту зміни напрямку поширення, перевипромінювання електромагнітних хвиль.

За способом постановки активні завади можна поділити на наземні, завади з льотно-піднімальних засобів та завади, створені передавачами одноразового використання.

Активні навмисні завади за співвідношенням спектрально-часових характеристик завад і сигналу можуть бути класифіковані на прицільні, напівприцільні і загороджувальні.

Загороджувальна завада створюється в заданій смузі частот, яка перекриває передані інформаційні сигнали за спектром і за часом, протягом усього заданого часового інтервалу. До загороджувальних завад відносяться суцільні шумові завади.

Напівприцільна завада за своїми спектрально-часовими характеристиками частково збігається зі спектрально-часовими характеристиками сигналу, що подавляється. Вона може займати смугу частот, що частково збігається зі смугою частот сигналу, або, займаючи ту ж смугу частот, що і сигнал, лише частково збігатися за часом з переданою інформацією. До напівприцільних завад відносяться імпульсні, синусоїдальні, багаточастотні, скануючі, а також різноманітні види вузькосмугових завад.

Прицільна завада цілком займає ту ж смугу частот, що і спектр сигналу, а її вплив за часом збігається з передачею інформації. Прицільні завади роблять найбільший вплив на завадостійкість приймання інформації. До них відносяться структурні, імітаційні і ретрансльовані завади.

Як показує аналіз результатів досліджень, описаних у вітчизняній і зарубіжній літературі, адитивні завади за електричною і статистичною структурою можна розділити на три основних класи: флуктуаційні, імпульсні (зосереджені за часом), вузькосмугові (зосереджені за спектром).

Флуктуаційна завада – це неперервний випадковий процес у вигляді суми нескінченно великої кількості елементарних коливань, які збуджуються нерегулярною послідовністю короткочасних імпульсів, інтервал слідування яких менше тривалості перехідних процесів у приймальному тракті.

Типовий приклад флуктуаційної завади – внутрішні шуми приймача. Причиною шумів є нерівномірність емісії електронних приладів, інжекції носіїв у напівпровідникових приладах (діодах, транзисторах, інтегральних мікросхемах), флуктуації зарядів у провідниках. Крім того, завада може проникати в приймач ззовні. Флуктуаційна завада (ФЗ) має найбільший руйнуючий вплив на корисний сигнал з таких причин:

вона завжди присутня у каналі зв'язку;

перекриває сигнал за часом та за спектром ($\Delta t_c \gg \tau_n$, $\Delta f_c \gg \Delta f_n$);

добре апроксимує суму завад від інших численних джерел;

інші завади при проходженні через селективні пристрої приймача часто одержують властивості флукуаційної завади.

Флукуаційну заваду можна записати в такому вигляді

$$B(t) = b(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \beta(t)), \quad (6)$$

де $B(t)$ – миттєве значення завади, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – кутова частота настройки загального тракту приймача, $b(t)$, $\beta(t)$ – відповідно обвідна і початкова фаза ФЗ.

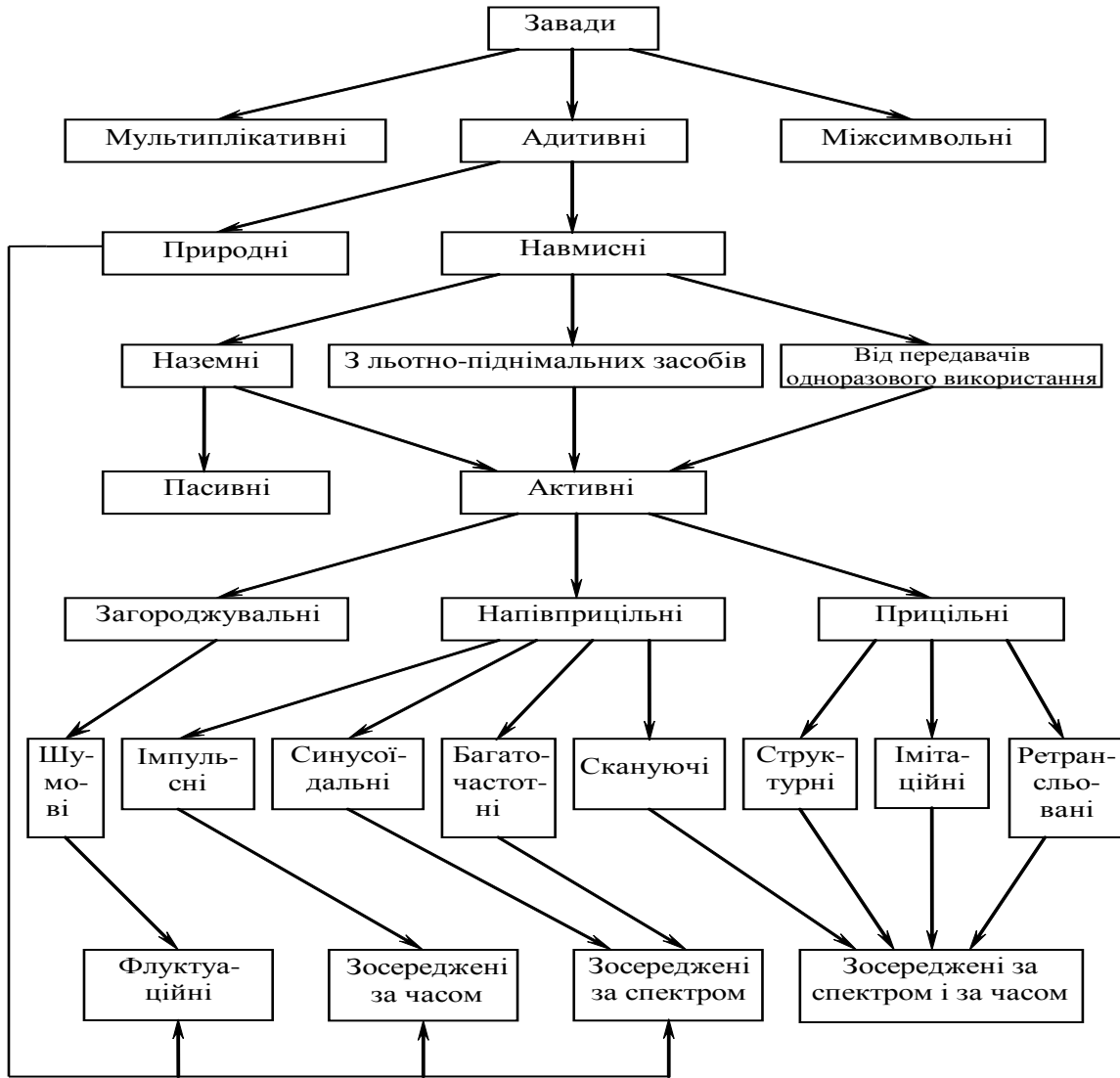


Рис. 2 Класифікація завад, що використовуються для подавлення систем та засобів військового радіозв'язку

Миттєві значення ФЗ досить точно можна описати гаусівським розподілом ймовірностей

$$p(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{B^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

де σ^2 – дисперсія завади.

Обвідна флукуаційної завади описується законом Релея

$$p(b) = \frac{b}{\sigma^2} e^{-\frac{b^2}{2\sigma^2}}. \quad (8)$$

Початкова фаза ФЗ розподілена за рівномірним законом в інтервалі $0...2\pi$.

Імпульсна завада (ІЗ) є випадковою (неперіодичною) послідовністю імпульсів, які збуджуються короткочасними ЕРС. При цьому інтервал слідування збуджуючих імпульсів більший, ніж тривалість перехідних процесів у приймальному тракті. Тривалість цих процесів менша тривалості сигналу, а ширина спектра такої завади значно більша, ніж ширина спектра корисного сигналу ($\Delta t_{\zeta} < \tau_c, \Delta f_{\zeta} \gg \Delta f_c$).

Розподіл кількості імпульсів завади за одиницю часу підпорядкований закону, близькому до закону Пуассона

$$p(n) = \frac{n_0^n e^{-n_0}}{n!}, \quad (9)$$

де n_0 – середнє число імпульсів завади за одиницю часу.

У кожному конкретному випадку закон розподілу буде визначатися числом і характером джерел ІЗ та типом каналу зв'язку.

Вузькосмуговими (зосередженими за спектром) називають завади у вигляді коливань з параметрами, які змінюються повільно або є постійними в інтервалі тривалості сигналу.

Основна потужність вузькосмугових завад сконцентрована в смузі частот, сумірних з шириною спектра корисного сигналу, тобто

$$\Delta t_{\zeta} \gg \tau_c, \Delta f_{\zeta} < \Delta f_c. \quad (10)$$

З точки зору впливу зосереджених за спектром завад на приймання сигналу їх можна розділити на три види:

завади, спектр яких зосереджений у смузі частот, що цілком або частково збігається зі смугою частот сигналу;

завади, спектр яких лежить поза смугою частот сигналу;

завади, спектр яких на вході приймального пристрою лежить поза смугою частот сигналу, але в результаті нелінійних перетворень у приймальному пристрої утворюються складові, що потрапляють у ту ж смугу частот, що і сигнал.

Граничним випадком таких завад є гармонійне коливання.

Джерелами вузькосмугових завад є: сторонні радіостанції, у тому числі станції радіозавад; генератори (промислові, медичні та інші) високої частоти; взаємні (міжканалні) завади, що виникають внаслідок взаємодії електромагнітних полів радіоелектронних засобів.

Між вузькосмуговими й імпульсними завадами існує співвідношення двоїстості – представленню вузькосмугової завади в частотній області відповідає представлення імпульсної завади в часовій області і навпаки.

Проте, поряд з зазначеним видом завад використовуються завади з негаусівським розподілом, що характеризується виразом

$$W(E_{\zeta}) = \left(\frac{\beta_{\zeta}}{2}\right)^{\alpha_{\zeta}} \frac{2}{\tilde{A}(\alpha_{\zeta})} \exp\left(-\frac{\beta_{\zeta}}{2} E_{\zeta}^2\right), \quad (11)$$

де $W(E_{\zeta})$ – щільність розподілу ймовірностей завади; α_{ζ} – параметр, що враховує кількість відбитих променів завади, що характеризує глибину флуктуацій компонент завади; β_{ζ} – параметр завади, що зворотно пропорційний дисперсії, E_{ζ} – числові характеристики обвідної, $\tilde{A}(\alpha_{\zeta})$ – гаусівський розподіл параметра α_{ζ} .

Мультиплікативними складовими в виразі (5) можуть бути як навмисні завади так і завмирання сигналу.

При передачі повідомлень по багатопроменевих каналах зв'язку результуючий сигнал на вході приймача являє собою суму окремих коливань, час приходу, частота, фаза та амплітуда яких випадкові. Інтерференція цих променів і є причиною швидких флуктуацій (завмирань) параметрів сигналу. Тому швидкі завмирання називають інтерференційними завмираннями.

Сигнал на виході багатопробеневого каналу передачі можна записати у вигляді [13]:

$$y(t) = A_p \cos(2f_0 t + \Theta_p) + \sum_{i=1}^n z_i A_0 \cos[(2f_0 + \Omega_i)(t - \tau_i) + \Theta_i] = A_p(t) + A_{\delta\epsilon}(t), \quad (12)$$

де n – кількість променів; τ_i – час запізнювання (затримки) i -го променя; A_p – амплітуда регулярної складової; z_i – статистично незалежний випадковий коефіцієнт, що характеризує ефективне поперечне розсіювання (z_i^2 – частка відбитої енергії i -м розсіювачем); Θ_i – статистично незалежна фаза сигналу, що пройшов i -м шляхом.

У виразі (12) перший доданок $A_p(t) = A_p \cdot \cos(\omega_0 t + \Theta_p)$ – регулярна складова сигналу (з постійними параметрами). Вона створюється поверхневим променем або групою променів, що мають майже однакові умови відбиття.

Другий доданок в (12) флюктуюча (змінна) або завмираюча складова, створювана всіма відбитими променями.

Оскільки результуючий завмираючий сигнал $A_{\delta\epsilon}(t)$ являє собою суму досить великої кількості статистично незалежних випадкових процесів (практично число променів завжди $n > 5$), то на підставі центральної граничної теореми можна стверджувати, що результуючий сигнал $A_{\delta\epsilon}(t)$ може бути апроксимований гаусівським випадковим процесом. При цьому миттєве значення обвідної $\dot{A}_{\delta\epsilon}(t)$ флюктуючого сигналу розподілене за законом Релея [13 - 14]:

$$p(A_{\text{фл}}) = \frac{A_{\text{фл}}}{\sigma_{\text{фл}}^2} \cdot e^{-\frac{A_{\text{фл}}^2}{2\sigma_{\text{фл}}^2}}, \quad (13)$$

де $\sigma_{\delta\epsilon}^2$ – дисперсія швидкого завмирання.

Фаза завмираючого сигналу $\Theta_{\text{фл}}$ розподілена за рівномірним законом в інтервалі $[0, 2\pi]$ [13 - 14].

У каналах передачі, які характеризуються наявністю регулярної складової, статичні властивості обвідної сумарного сигналу описуються щільністю розподілу ймовірності Райса [13 - 14]:

$$p(A_{\delta\epsilon}) = \frac{A_{\delta\epsilon}}{\sigma_{\delta\epsilon}^2} \cdot a^{\frac{A_{\delta\epsilon}^2 + A_{\delta}^2}{2\sigma_{\delta\epsilon}^2}} \cdot I_0\left(\frac{A_{\delta\epsilon} A_{\delta}}{\sigma_{\delta\epsilon}^2}\right), \quad (14)$$

де A_p – амплітуда регулярної складової.

Висновки:

Проведений в статті аналіз дестабілізуючих факторів на заводозахисності багатоантенних систем військового радіозв'язку показав наступне:

1. Наявні наукові результати, що присвячені аналізу заводозахисності багатоантенних систем військового радіозв'язку обмежені тільки аналізом впливу навмисних завод, що описуються нормальним гаусівським нормальним розподілом.

2. В каналах із завмираннями параметри сигналів на вході приймача є випадковими і невідомими. Завдостійкість каналів передачі при цьому погіршується, оскільки при прийманні немає можливості використати відомості про дійсні значення параметрів сигналів. Таким чином, випадкові зміни параметрів каналу передачі являють собою мультиплікативну заводу, яка призводить до спотворень переданих сигналів у вигляді випадкової зміни їх параметрів.

3. Мультиплікативна складова виразу (5) повинна бути уточнена, а саме – необхідно удосконалити існуючі наукові підходи та враховувати мультиплікативну заваду разом з завмираннями сигналу, при цьому враховувати негаусівську складову як сигналу так і завади.

4. Найбільш істотний вплив на заводо захищеність прийому сигналів здійснюють швидкі селективні завмирання в каналі, причому ступінь цього впливу визначається співвідношенням параметрів середовища поширення і параметрів сигналу.

5. Шкідливий вплив швидких селективних завмирань на заводо захищеність багатоантенних систем військового радіозв'язку може бути ослаблено вибором певних сигналів та способів їх обробки в засобах радіозв'язку.

Подальші теоретичні дослідження автора будуть спрямовані на розробку математичної моделі впливу дестабілізуючих факторів на заводо захищеність багатоантенних систем військового радіозв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Слюсар В. Системы МИМО: принципы построения и обработка сигналов / В. Слюсар // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* – 2005. – № 8. – С. 52 – 58.

2. Кувшинов О. В. Адаптивне управління засобами заводо захисту військових систем радіозв'язку / О. В. Кувшинов // *Збірник наукових праць ВІКНУ.* – 2009. – Вип. 17. – С. 125 – 130.

3. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. – М.: Техносфера, 2011 – 904 с.

4. Ливенцев С. П. Математическая модель канала передачи сигналов стандарта IEEE 802.11 / С. П. Ливенцев, А. В. Кувшинов. – К.: Зв'язок, 2004. – № 7. – С. 24 – 26.

5. Кувшинов О. В. Аналіз характеристик систем радіодоступу з технологією МИМО / О. В. Кувшинов, Д. А. Міночкін // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка.* – Вип. № 3 – К.: ВІКНУ, 2006. – С. 51 – 56.

6. Bessai H, *MIМО Signals and Systems*, – USA, NY: Springer science and Business Media, 2005, – 206 p.

7. Шишацький А. В. Порівняльний аналіз ефективності сучасних сигнально-кодових конструкцій для систем військового радіозв'язку / А. В. Шишацький, О. Г. Жук, І. Ю Рубцов, М. В. Борознюк // *Озброєння та військова техніка: науково-технічний журнал.* К.: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2016. № 1 (9). 2016. – С. 41 – 45.

8. Жук О. Г. Методологічні основи створення адаптивних систем радіозв'язку [Текст] / О. Г. Жук, В. В. Огризько // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони* – № 1 (25) – 2016 – С.49 – 54.

9. Вишне夫斯基 В. М., Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишне夫斯基, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

10. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Склад. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

11. Ливенцев С. П. Дослідження впливу навмисних завод на відомчі системи радіозв'язку при когерентному прийомі сигналів для каналів з білим шумом / С. П. Ливенцев, С. В. Зайцев, Б. В. Горлинський // *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”.* – 2007. – Вип. 3. – С. 37 – 44.

12. Ермолаев В.Т. Уменьшение вероятности битовой ошибки при параллельной передаче информации в МИМО системе / В. Т. Ермолаев, Е. А. Маврычев, А. Г. Флакман // *Изв. Вузов. Радиофизика.* – 2003. – Т.46. – № 3. – С. 251 – 260.

13. Кувшинов О. В. Теорія електричного зв'язку. Ч. 2: Основи теорії заводостійкості, кодування та інформації. / О. В. Кувшинов, С. П. Ливенцев, О. П. Лежнюк, А. І. Міночкін, Д. І. Могилевич / *Підручник* – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2008. – 286 с.

14. Науменко М.І. Теорія сигнально-кодових конструкцій / М.І. Науменко, Ю.В.

Стасев, О.О. Кузнецов, С.П. Євсєєв //: монографіяХ.: ХУПС , 2008 – 541 с.

15. Науменко Н.И. Сферические сигнально-кодовые конструкции для каналов с памятью и фазовыми дрожаниями // Тр.П Международ., науч.-техн. конференции по радиосвязи, звуковому и телевизионному вещанию – Одесса, 1995. – С. 376 – 382.

16. Стасев Ю. В. Аналіз перешкодозахищеності систем зв'язку та управління при використанні сигнально-кодових конструкцій / Ю. В. Стасев, С. С. Виставкін, Т. О. Туленко, А. С. Фустій // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 3. – С. 43 – 47.

17. Стасев Ю. В. Метод формування псевдовипадкових послідовностей з поліпшеними автокореляційними властивостями / Ю.В. Стасев, Д.О. Медведєв, Д.О. Грабенко, Д.В. Жуйков // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил – 2017. – № 4. – С. 115 – 118.

18. Шишацький А. В. Method of hierarchical management by channel and network resources of military radio communication systems / А. В. Шишацький, Є. М. Прокопенко, О. Г. Жук, М. П. Долина // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 4. – С. 129 – 136.

19. Шишацький А.В. Методика вибору режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку / А.В. Шишацький, О.В. Кувшинов, С.П. Петрунчак // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 2. – С. 149 – 152.

20. Шишацький А. В. Методика вибору гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку / А. В. Шишацький // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2. – С. 135 – 144.<https://doi.org/10.30748/nitps.2017.27.27>.

21. Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Дерій Р.С., Довбиш Р.М. Технічні аспекти реалізації перспективних технологій МІМО. // Тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми інформатизації”, 13 – 15 листопада 2017 р. – Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава. – С. 81.

22. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б.Технология МІМО: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014 – 244 с.

23. Коляденко Ю.Ю., Коляденко А.В. Математическая модель радиоканала для МІМО-систем [Електронний ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 2 (7). – С. 91 – 109. – Режим доступу до журн.:http://pt.journal.kh.ua/2012/2/1/122_kolyadenko_mimo.pdf.

24. МІМО and Smart Antennas for 3G and 4G Wireless System: Practical Aspects and Deployment Considerations// 3G Americas. May 2010. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:http://www.4gamericas.org/en/mimo_and_smart_antennas_for_3g_and_4g_wireless_systems_May%202010%20Finalx.pdf.

25. Жук О. Г. Математична модель функціонування військової системи радіозв'язку з МІМО [Текст] / О. Г. Жук, С. М. Петрук // 17-а науково-технічна конференції „Створення та модернізація військової техніки в сучасних умовах”, 07 – 08 вересня 2017 року, – Чернігів: ДНВЦ ЗС України, – С. 155-156.

26. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Самиздат, 2013. – 166 с.