

УДК 621.391

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253458

Розробка методів та моделей підвищення заводозахищеності безпроводних каналів зв'язку

В. В. Князєв, В. І. Кравченко, Б. О. Лазуренко, О. А. Серков,
К. А. Трубчанінова, Н. Г. Панченко

Показано, що існуючі методи та моделі підвищення заводозахищеності каналів зв'язку не здатні забезпечити вимоги щодо якості інформації в рухомих інфокомунікаційних системах. Також обмеження якості інформації вносять виникаючі практичні вимоги до захисту, швидкості передачі інформації та щільності каналів доступу.

Доведено, що зниження рівня електромагнітного випромінювання є основним методом забезпечення заводозахищеності в системах безпроводного мобільного зв'язку інфокомунікаційних систем. Тому сприйнятливим щодо забезпечення усталеної беззаводової роботи є зниження рівня інформаційного сигналу на вході приймача до рівня шуму, коли відношення сигнал/шум дорівнює одиниці.

Надано результати дослідження методів та моделей з кореляційним прийомом надширококутних сигналів. Доведено, що за рівнем потенційної заводозахищеності найкращі показники має модель кодування надширококутвого інформаційного сигналу фазовою маніпуляцією, потім модель кодування протилежними чипами та модель кодування кодово-часовою маніпуляцією.

Показано, що при великій базі сигналу $B > 300$, коли інтенсивність прийнятих сигналів знаходиться нижче рівня завод, надійна передача інформації здійснюється з імовірністю похибки менш ніж 10^{-6} . Це доводить, що використання технології надширококутних сигналів дозволяє здійснити безпроводну приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання та малим значенням імовірності похибки. Так, на швидкості 1–2 Мб/с можливо прихована передача інформації з імовірністю похибки менш ніж 10^{-6} , за умов застосування великої бази сигналу $B = 500–1000$.

Ключові слова: інфокомунікаційна система, електромагнітна сумісність, надширококутний сигнал, заводостійкість, відношення сигнал/шум.

1. Вступ

Основним структурним елементом інфокомунікаційних безпроводних систем є канал. Максимальна ефективність каналу виникає тоді, коли інформаційний сигнал буде найкращим чином відповідати вимогам щодо каналу зв'язку. Оскільки заводозахищеність каналів зв'язку характеризує здатність системи забезпечити передачу повідомлень із заданою якістю в умовах дії навмисних завод, то вона також характеризує її здатність протидіяти засобам радіоелектронного придушення. Тому заводозахищеність каналів зв'язку слід розглядати як сукупність двох складових – заводостійкість та прихованість. Під прихованістю каналу розуміємо його енергетичну прихованість, включаючи здатність збері-

гати сам факт передачі інформації, структурну прихованість сигналу та способу його кодування. Під завадостійкістю розуміємо здатність технічних пристроїв безпровідної інфокомунікаційної системи функціонувати із заданою якістю в умовах впливу на неї електромагнітних завад. Ось тут і виникає питання електромагнітної сумісності (ЕМС) систем зв'язку в ракурсі здатності пристрою, обладнання чи системи задовільно функціонувати в їхній електромагнітній обстановці (ЕМО), не створюючи неприпустимих електромагнітних завад будь-чому в цій обстановці [1, 2]. Тобто забезпечення ЕМС пристроїв та системи в цілому є одним зі складових завадозахищеності інфокомунікаційної системи.

Загальним принципом забезпечення ЕМС є співставлення ЕМО, у якій здійснюється робота кожного технічного пристрою та реакція цих пристроїв на електромагнітні умови їх праці. При забезпеченні вимог ЕМС здійснюють аналіз джерел завад, шляхів їх розповсюдження та рецепторів – приймачів завад. У системному плані завдання виявляється складним не тільки за рахунок множини парних сполучень у системі, але і можливості електромагнітних впливів з різними характеристиками, а також накладенням у часі впливів декількох джерел завад. Це вимагає володіння не тільки методами прогнозування ЕМО, але і знанням властивостей елементів як рецепторів завад. Необхідність забезпечення ЕМС при визначеному і заданому складі обладнання та режимах його роботи обумовлює використання відомих і розроблення нових технічних заходів. Ці заходи будуть направлені на зменшення завад у генеруючих джерелах як при кондуктивному, так і просторовому їх розповсюдженні. При цьому розрізняють методи, необхідні як для забезпечення внутрішньосистемної, так і міжсистемної ЕМС. При реалізації вимог внутрішньосистемної ЕМС забезпечення належної роботи компонентів пов'язано з реалізацією взаємодії системи з зовнішньою ЕМО, застосовуючи відповідну комбінацію стандартних елементів [3, 4].

Особливістю реалізації вимог ЕМС у системах мобільного зв'язку є методи частотно-територіального планування, що дозволяють їх вирішити на міжсистемному рівні [5].

Однак перелік конкретних заходів з забезпечення ЕМС не буде сам по собі корисним без розуміння необхідності адаптації кожного з заходів до всієї сукупності конкретних обставин.

Таким чином, слід вважати актуальними дослідження, спрямовані на подальше удосконалення та розвиток методів підвищення завадозахищеності мобільних інфокомунікаційних систем зв'язку в рамках забезпечення ЕМС. При чому, цей розвиток повинен бути на основі адаптивних варіацій у відповідності з тим, які вимоги з'являються в кожному конкретному випадку.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існує низка методів забезпечення вимог ЕМС інфокомунікаційних безпровідних систем. Це обумовлено вимогами до високої щільності каналів зв'язку на один квадратний метр робочої зони, їх пропускної спроможності та завадостійкості в умовах дії ненавмисних та навмисних завад.

В основному всі методи базуються на розподілі між окремими засобами мобільного зв'язку таких параметрів, як частота, час, код і простір із мінімумом взаємних завад та максимальним використанням характеристик середовища передачі.

В [6] представлені принципи методу доступу з частотним розділенням каналів (Frequency Division Multiple Access, FDMA). Метод ґрунтується на тому, що кожний пристрій працює на визначеній частоті, завдяки чому декілька рухомих пристроїв мають змогу здійснювати передачу на одній території. Основним недоліком методу FDMA є недостатня ефективність використання смуги частот. Ця технологія дозволяє здійснити роботу множини пристроїв на визначеній території, однак вимагає виділення окремої смуги частот для кожного безпроводного пристрою.

В [7] розглянуто особливості методу доступу з часовим розділенням каналів (Time Division Multiple Access, TDMA), завдяки якому забезпечується розподіл каналів у часі. Кожний передавач транслює сигнал на одній і тій же смузі частот, однак у різні проміжки часу, що зазвичай циклічно повторюються. Позитивним моментом перелічених методів є уникнення взаємних завад між сусідніми щільно розташованими каналами зв'язку при використанні ортогональних сигналів у різних каналах. Основним недоліком методу з часовим ущільненням є миттєва втрата інформації при втраті синхронізації в каналі. Особливо небезпечним це явище виникає в умовах дії випадкових чи навмисних завад. Також недоліком цього методу є неможливість реалізації ефективного використання спектру частот.

В [8] розглянуто принципи методу розділенням каналів за поляризацією (PDMA). Зазначений метод використовує дві ортогональні поляризації сигналів, наприклад, вертикальну та горизонтальну, або кругові з протилежними напрямками обертання. Недоліком є те, що метод дозволяє за рахунок адаптивних методів поляризаційної обробки розділити не більше двох каналів, які у загальному випадку не є ортогональними.

Джерело [9] присвячено методу доступу з просторовим розділенням каналів (Space Division Multiple Access, SDMA), який включає до свого складу розділення зони обслуговування на низку зон, які обіймають окремі промені діаграми спрямованості антен. Зв'язок між користувачами, які працюють у різних зонах, здійснюють за рахунок міжпроменевої комутації. При цьому кожний користувач може здійснювати передачу інформації тільки у межах відповідної території, на якій будь-якому іншому користувачу передавати свої повідомлення заборонено. Метод реалізує спрямовані властивості антен та їх здатність роздільного прийому сигналів, що діють в одній смузі частот, однак надходять із різних напрямів.

У [10] розглянуто принципи методу доступу з кодovими розділенням каналів (Code Division Multiple Access, CDMA). Метод здійснює трансляцію сигналів в одних і тих же частотних, часових і просторових областях, але з різними кодами. Метод ґрунтується на модуляції з використанням широкосмугового, за яким корисна інформація розподіляється по усьому частотному діапазону, суттєво більш широкому, ніж при традиційних способах модуляції. Основним недоліком кодового ущільнення каналів є складність технічної реалізації приймачів

та необхідність забезпечення точної синхронізації передавача та приймача для гарантованого отримання інформаційного пакету.

У [11] розглянуто принципи методу стрибкоподібного переналаштування частоти (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Згідно принципам методу FHSS станція у кожний момент часу передає інформацію тільки по одному з n підканалів, регулярно перемикаючись на інший підканал. Завдяки безперервному динамічному вибору та наданню каналів зв'язку здійснюється ефективно використання радіочастотного ресурсу та забезпечуються вимоги ЕМС в системах безпроводного мобільного зв'язку. Однак, змушене часте перемикання каналів (наприклад, у США встановлена мінімальна швидкість 2,5 перемикань в секунду) приводить до збільшення накладних витрат [12].

Джерело [13] присвячено методу прямої послідовності DSSS. При реалізації методу DSSS кожен біт інформації кодується у вигляді послідовності з n біт, а всі ці n біт передаються паралельно по всім n підканалам. Алгоритм кодування індивідуальний для кожної пари «передавач-приймач», забезпечуючи, таким чином, конфіденційність передачі. Цей метод дозволяє досягати більшої пропускної здатності і, завдяки n -кратній надмірності, забезпечує більшу стійкість до вузькосмугових завад і дозволяє використовувати інформаційні сигнали дуже низької потужності, не створюючи завад звичайним радіопристроєм. Але, метод не допускає повторне використання частот, тобто відправник повинен чекати, якщо спектр зайнятий. Крім того, ця технологія не ефективно використовує смугу пропускання. Швидкість дискретизації на приймачі повинна бути приблизно в 100 разів більша за швидкість передачі даних. Удосконалення методу DSSS з метою підвищення рівня завадостійкості інфокомунікаційних безпроводних систем здійснюють шляхом застосування надширокосмугових сигналів (НШС) сигналів з нелінійною обробкою їх спектрів.

Таким чином, у зв'язку з різким збільшенням швидкості передачі даних потрібно додатковий спектр. Але проблема в тому, що радіочастотний спектр є обмеженим ресурсом, на який претендує безліч користувачів. Отже існує суперечність, коли одночасно з істотним підвищенням вимог до швидкості передачі інформації, збільшенням щільності розташування мобільних пристроїв у просторі та обсягів інформації, що передається, існує фізична обмеженість радіочастотного спектру. Остання не дозволяє забезпечити якість обміну інформацією в безпроводній мережі, особливо в умовах складної ЕМО, яку створено щільно розташованими мобільними пристроями інфокомунікаційної системи. Подолати цю суперечність можна шляхом використання саме надширокосмугових сигналів (НШС).

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого методам та моделям забезпечення ЕМС мобільних інфокомунікаційних систем саме на основі технології надширокосмугових сигналів в рамках підвищення завадозахищеності системи.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження полягає у підвищенні завадозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних систем шляхом забезпечення відповідного рівня електро-

магнітної сумісності при передачі дискретних повідомлень каналом зв'язку з адитивним гаусовим шумом. Це дозволить здійснити безпроводну приховану передачу інформації в інфокомунікаційних системах на високих швидкостях з імовірністю похибки менш, ніж 10^{-5} .

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити критерій забезпечення вимог ЕМС інфокомунікаційних безпроводних систем і вимоги його використання;
- розробити методи та моделі підвищення завадозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних систем на основі надширокосмугових інформаційних сигналів;
- провести оцінку ефективності запропонованих методів підвищенні завадозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних безпроводних систем.

4. Матеріали та методи дослідження

Використовувалися методи підвищення завадозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних безпроводних систем у ракурсі забезпечення ЕМС. Тобто методи, що направлені на прихованість передачі та можливість передавати в каналах з рівнем сигналу, меншим за рівень завади.

Таким чином, не тільки підвищується завадостійкість інформації, але і знижується імовірність його перехоплення. Це обумовлено тим, що не маючи синхронізованої копії розширюючого сигналу, він буде губитися у шумі (тобто буде непоміченим для пеленгування).

Вирішення проблеми організації якісного мобільного зв'язку та захисту інформації в безпроводній мережі полягає у зниженні рівня завадової електромагнітної обстановки (ЕМО). А це означає, що технологія надширокосмугових сигналів (НШС) є найбільш придатною для її практичного застосування [14, 15].

Методи, що представлені нижче, дають можливість роботи з невеликою потужністю сигналу, та висока його проникливість крізь перешкоди дозволяють ефективно передавати інформацію всередині приміщень та об'єктів, які мають складну архітектуру. Це також дає можливість забезпечити вимоги електромагнітної сумісності в умовах багатопроменевого розповсюдження сигналів, а значить в цілому підвищити завадозахищеність інфокомунікаційної безпроводної системи.

Але спочатку треба визначити критерій забезпечення вимог електромагнітної сумісності інфокомунікаційних безпроводних систем.

5. Результати дослідження методів та моделей підвищення завадозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних систем

5.1. Критерій забезпечення вимог електромагнітної сумісності інфокомунікаційних безпроводних систем

Згідно теорії потенціальної завадостійкості [16], гранично досяжною межею зниження рівня інформаційного сигналу для усіх, без винятку, класів приймальних систем є відношення подвійної енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму:

$$Q = 2E/N_0 = 2q_0B, \quad q_0 = \frac{E/T}{N_0W}, \quad (1)$$

де E – енергія інформаційного сигналу;

N_0 – спектральна щільність потужності шуму;

q_0 – відношення середньої потужності сигналу до потужності шуму;

W – ширина спектру сигналу;

T – тривалість сигналу;

$P_{S0}=E/T$ – середня потужність сигналу на вході приймача;

$P_{N0}=N_0W$ – потужності шуму;

$B=WT$ – база сигналу.

Для нормальної роботи приймача, нижня межа співвідношення спектральної щільності сигналу та завади зазвичай складає 7 дБ на вході приймача. Тож цей рівень відповідає співвідношенню (2).

$$\frac{N_s}{N_0} \leq 0.2, \quad (2)$$

де N_s – спектральна щільність сигналу.

Причому спектральну щільність сигналу визначають співвідношенням (3).

$$N_s = \frac{P}{W} = \frac{E}{WT}, \quad (3)$$

де P – потужність сигналу.

З урахуванням співвідношень (2), (3) критерієм виконання вимог ЕМС стає вирішення наступної нерівності:

$$\frac{E}{WTN_0} \leq 0.2. \quad (4)$$

У той час співвідношення (4) матиме наступного вигляду (5). Сам критерій визначено у термінах відношення сигнал/шум на вході приймача q та виграшу від обробки WT :

$$q^2 / WT \leq 0.4. \quad (5)$$

То ж, треба обрати таке значення виграшу від обробки сигналу, яке б гарантувало достатньо низький рівень його спектральної щільності відносно спектральної інтенсивності природного шуму на вході приймача. При цьому критерієм завадостійкості каналу мобільного цифрового зв'язку та забезпечення вимог ЕМС стає відношення сигнал/шум.

Треба зазначити, що переміщення об'єктів рухомих інфокомунікаційних систем у просторі викликає також доплерівський зсув, який призводить до таких самих наслідків. Величина доплерівського зсуву пропорційне частоті передачі та швидкості руху. Суттєві зміни параметрів сигналу виникають навіть при переміщенні на невеликі відстані, співставні з довжиною хвилі сигналу.

Об'єкти, що виникають на шляху прямого розповсюдження сигналу, обмежують пряму видимість та викликають затемнення і втрати в каналі, викликаючи зміни параметрів сигналу у часі.

Компенсація спотворень сигналу, що викликані доплерівським зсувом та багатопроблемним розповсюдженням радіохвиль, здійснюють подвійною спектральною обробкою сигналу. При цьому обробка здійснюється як на стороні приймача шляхом реалізації когерентного прийому, так і на стороні передавача за рахунок застосування часової позиційно-імпульсної модуляції.

Тож, єдино можливим шляхом підвищення рівня завадозахищеності із підтримкою якості обслуговування в безпроводних інфокомунікаційних мережах є застосування надширокосмугових сигналів з базою сигналу, вище за 2.5 та нелінійною обробкою їх спектрів [17].

5. 2. Методи та моделі підвищення завадозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних систем

Метод формування надширокосмугових інформаційних сигналів

Метод формування складного НШС інформаційного сигналу, який випромінюють до вільного простору, реалізують за допомогою моделі, схему якого наведено на рис. 1.

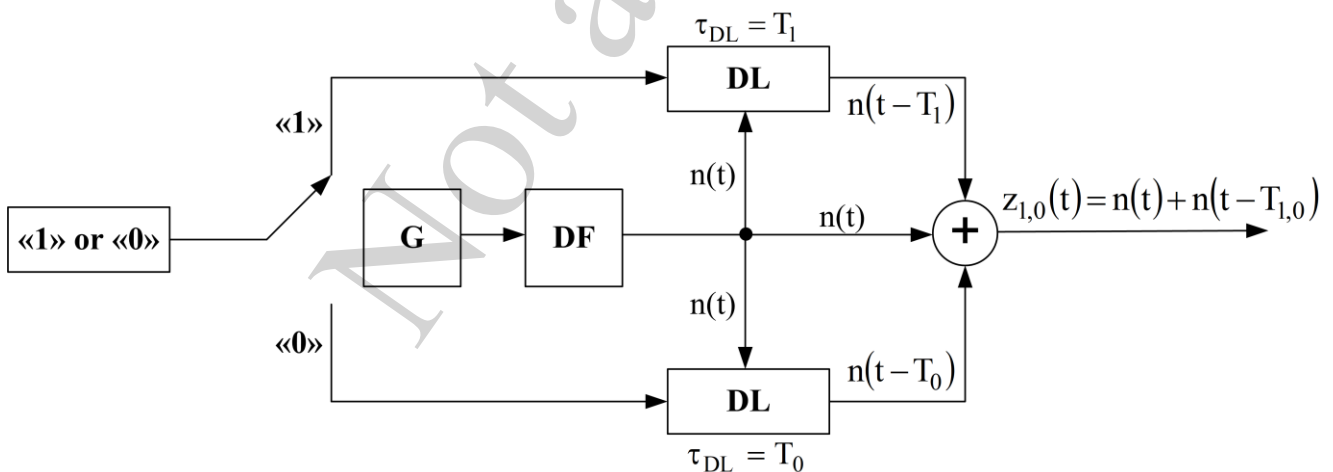


Рис. 1. Функціональна схема формування надширокосмугових інформаційних сигналів

Основною відмінністю запропонованого методу формування надширокосмугових інформаційних сигналів від існуючих систем формування сигналів є те, що в передавачі формується не один короткий імпульс, а послідовність надкоротких імпульсів – чипів, модульованих кореляційно-часовою маніпуляцією. Ця послідовність чипів з виходу схеми формування поступає на пе-

редавальну антену й ударно збуджує її, тобто антена випромінює набір чипів радіоімпульсів.

Надширокосмуговий сигнал формують у вигляді нормального випадкового процесу з нульовим середнім значенням, рівномірним спектром, смугою частот та швидкопадаючою кореляцією за малий час когерентності. Генератор (G) в автоколивальному режимі формує послідовність надкоротких імпульсів-чипів з періодом надходження, що дорівнює періоду дискретизації. Сформована послідовність подається до входу цифрового смугово – пропускаючого фільтру (DF), що формує НШС сигнал. З виходу DF надширокосмуговий сигнал надходить до входу модулятора, у якому здійснюють розподіл на інформаційний та опорний сигнали.

Швидкість передачі двійкових бітів залежить від тривалості кожного інформаційного біту. А кількість чипів у послідовності для кожного інформаційного біту визначається співвідношенням тривалості кожного інформаційного біту до періоду дискретизації. Всі реалізації випадкового сигналу в потоці інформаційних бітів є взаємно ортогональними.

Модулятор має дві лінії затримки. Опорну послідовність чипів інформаційного сигналу затримують в першій лінії на час T_1 при надходженні символу «1», чи у іншій лінії затримки на час T_0 при надходженні символу «0». Переключення ліній затримки з T_1 на T_0 виконують згідно з потоком двійкових бітів «1» чи «0» від джерела інформації (рис. 1).

В суматорі виконують складання опорного сигналу з одним із чипів імпульсів НШС сигналів, затриманих на час T_1 чи T_0 залежно від надходження символів «1» чи «0»:

$$Z_{1,0}(t) = n(t) + n(t - T_{1,0}), \quad (6)$$

де $Z_{1,0}(t) = n(t) + n(t - T_{1,0})$ – сумарний сигнал;

$n(t)$ – опорний НШС сигнал;

$n(t - T_{1,0})$ – інформаційний чип, затриманий на час $T_{1,0}$.

Складання повністю некогерентних сигналів мають місце, коли затримки T_1 та T_0 інформаційних сигналів $n(t - T_1)$ і $n(t - T_0)$ відносно опорного сигналу $n(t)$ значно перевищують час когерентності $\tau_s \approx 1/\Delta f$ НШС сигналу $n(t)$:

$$T_{1,0} \gg \tau_s \text{ чи } T_{1,0} (\Delta f) \gg 1. \quad (7)$$

Потужність сумарного НШС сигналу $Z_{1,0}(t)$ визначає його дисперсія і дорівнює подвоєній потужності початкового сигналу за умов повної некогерентності опорного і затриманих НШС сигналів. Сумарний сигнал з виходу передавача поступає до безпровідного каналу доступу з адитивним гаусовим білим шумом.

За рахунок різних шляхів розповсюдження радіохвиль, наприклад, багатопробене розповсюдження, виникає інтерференція сигналів і створюється складна електромагнітна обстановка в місці приймання сигналу. При цьому цифровий кодований інформаційний сигнал надходить у вигляді зсунутих у часі декількох копій. Все це має значний вплив на електромагнітну сумісність, а

значить і завадозахищеність каналу зв'язку в цілому. В той же час коли різниця зсуву більше за тривалість одного надкороткого кодуєчого імпульсу, то приймач синхронізується з найбільш потужною складовою прийнятого сигналу, а інші відкидаються. Тобто, використання надкоротких чипів НШС сигналів вирішують питання міжсимвольної інтерференції за рахунок того, що енергія прийнятого імпульсного сигналу практично завжди встигає розсіюватися до моменту прийому його наступної копії. Згідно закону збереження енергії потужність такого чипу НШС сигналу буде меншою за традиційні радіосигнали, тому метод також вирішує задачу забезпечення вимог електромагнітної сумісності в умовах багатопроменевого розповсюдження сигналів.

Метод кодування надширокосмугового сигналу протилежними сигналами.

Розроблений вище метод можна спростити. На відміну від розглянутого вище методу (рис. 1), метод кодування інформаційного сигналу НШС протилежними сигналами має у своєму складі тільки одну лінію затримки, що функціонально спрощує метод, а значить і зменшує у вартості. Завдяки даному методу, на відміну від попереднього, інформація кодується не зміною положення вторинного максимуму автокореляційної функції у часі, а зміною полярності цього максимуму (рис. 2).

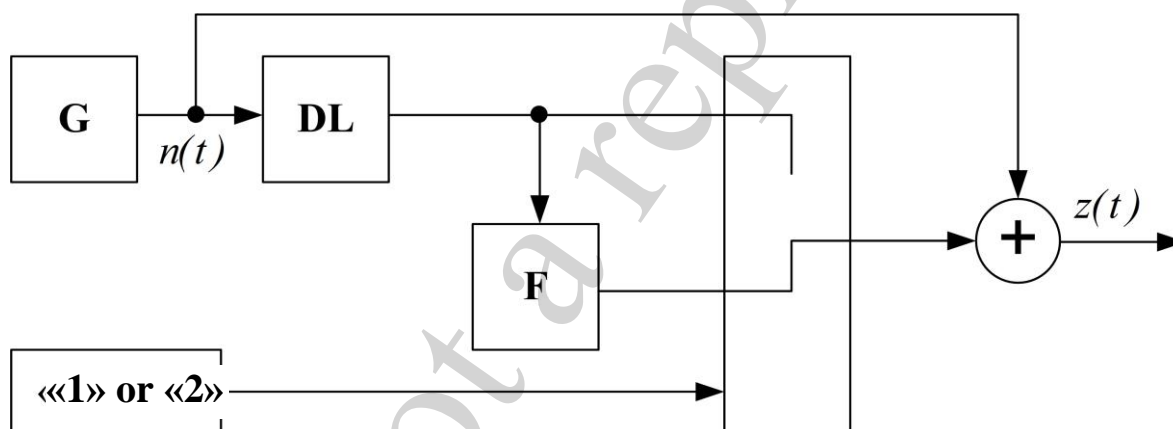


Рис. 2. Функціональна схема кодування надширокосмугового інформаційного сигналу протилежними сигналами

Переключення ліній із затриманого сигналу на інвертований виконують згідно з потоком двійкових бітів «1» чи «0» від джерела інформації. Оскільки затримка між опорним та інформаційними сигналами постійна, а зміна знаку автокореляційної функції у точці виміру закладена в структурі самого сигналу, то модель приймача НШС сигналів суттєво спрощується. Він має один автокореляційний фільтр, який налаштовано на затримку у часі T_1 . При цьому слід зазначити, що за умов фіксованої бази сигналу, імовірність бітової похибки в моделі кодування НШС сигналу з кореляційно-часовою маніпуляцією (рис. 1) суттєво менше, ніж в моделі кодування інформаційного сигналу НШС протилежними сигналами (рис. 2). Тому використання протилежних сигналів дозволяє отримати вигоду у завадостійкості.

В обох методах в каналі зв'язку одночасно передають як опорний, так і інформаційний сигнали. Ці сигнали створюють завади один для одного, які є внутрішньосистемними завадами. В результаті збільшується імовірність похибки, яка є відмінною від нуля навіть за умов повної відсутності завад в безпроводному каналі зв'язку. Тому потрібен метод для вирішення не тільки ЕМС каналів зв'язку, але і проблеми внутрішньосистемних завад.

Метод кодування надширокопasmугового сигналу з фазовою маніпуляцією.

Проблему внутрішньосистемних завад вирішує модель доступу з фазовою маніпуляцією НШС сигналу. Метод відрізняється від попередніх застосуванням часового розділення опорного та інформаційного сигналів. Функціональна схема моделі, що реалізує метод, наведено на рис. 3.

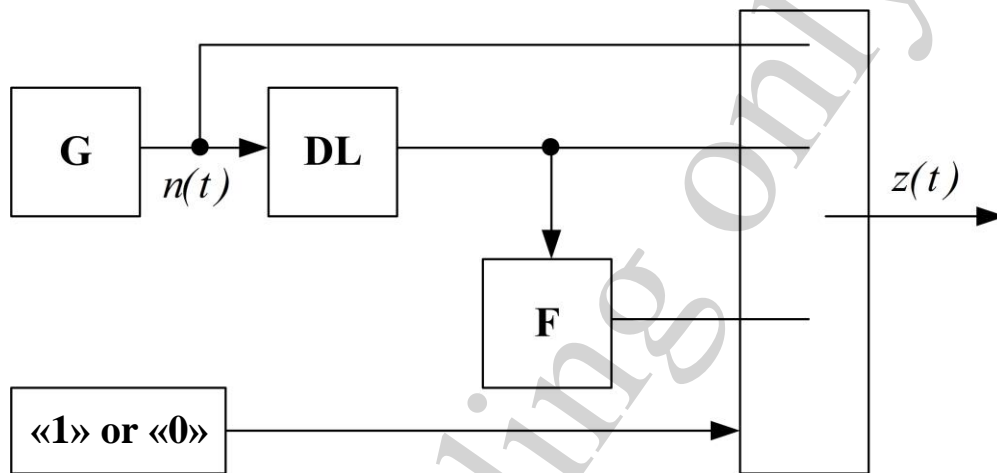


Рис. 3. Функціональна схема кодування надширокопasmугового інформаційного сигналу фазовою маніпуляцією

В схемі передавача застосовано трипозиційний комутатор, який протягом першої половини бітового інтервалу замикає вихід передавача безпосередньо на генератор НШС сигналу (G), формуючи таким чином опорний сигнал. У середині бітового інтервалу здійснюють перемикання комутатора до однієї з двох можливих позицій – з поверненням фази чи без неї в залежності від сигналу кодуючого пристрою.

Генератор (G) в автоколивальному режимі формує послідовність надкоротких імпульсів – чипів, яка подається до входу модулятора. Модулятор має лінію затримки (DL), де опорну послідовність імпульсів інформаційного сигналу затримують в лінії на час T_1 при надходженні символу «1». При цьому лінія затримки DL забезпечує затримку сигналу $x(t)$ на половину бітового інтервалу $T/2$. В результаті формується ансамбль складного сигналу, де інформаційний сигнал, відокремлений у часі від опорного. А значить вирішує проблему внутрішньосистемних завад при передачі по каналах зв'язку інфокомунікаційних систем [18].

5. 3. Результати порівняльного аналізу запропонованих методів та моделей реалізації мобільних інфокомунікаційних систем

Дослідити ефективність запропонованих методів формування та кодування надширокосмугових сигналів слід при прийманні сигналів. Тобто виявлення залежності якості отриманої двійкової інформації від параметрів НШС сигналу і доведе ефективність розроблених методів з точки зору завадостійкості.

Можливість розділення перекритих у часі сигналів пов'язана з наявністю у кореляційній функції прийнятих сигналів єдиного можливого максимуму значної амплітуди і ширини, що в свою чергу є піком спектральної щільності потужності.

Такий вигляд кореляційної функції мають відрізки шуму із смугою W і детерміновані сигнали, які після обробки в кореляційному приймачі приймають вигляд імпульсу тривалістю τ з амплітудою NS , де S – амплітуда елементарного імпульсу послідовності.

Максимальні бокові пелюстки кореляційної функції, які визначають небажаний вплив на прийом сигналу, мають амплітуди порядку \sqrt{NS} . За умов достатньо великого значення N , наприклад, понад 100, ці пелюстки значно менші за головний максимум.

При інтерференції повністю некогерентних НШС сигналів спектральна щільність модулюється гармонічною функцією в залежності від частоти f з масштабом періодичності, який дорівнює $\delta f_{10} = 1/T_{10}$.

При використанні технології розширення спектру здійснюють оптимальну обробку прийнятих сигналів із використанням когерентного опорного сигналу, який передається по каналу доступу одночасно з модульованим інформаційним сигналом.

В системах надширокосмугового безпроводного зв'язку із розподіленням та затримкою інформаційних сигналів за малий час визначають автокореляційну функцію прийнятих сигналів у вигляді суми опорного та інформаційного сигналів.

Енергія НШС сигналів, прийнятих протягом тривалості кожного біту інформації змінюється випадковим чином та не зберігається постійною в потоці бітів. Крім того, суттєвий вплив на імовірнісні характеристики системи надширокосмугового радіозв'язку мають зовнішні завади та флуктуація енергії прийнятих НШС сигналів.

Таким чином, нагальною задачею є виявлення залежності якості отриманої двійкової інформації від параметрів НШС сигналу.

Тож метод оцінки впливу завад на якість відновлення інформації полягає у наступному.

До безпроводного каналу доступу одночасно поступають як опорний сигнал $n(t)$, так і інформативні сигнали $n(t-T_1)$ чи $n(t-T_0)$ із затримкою на малі часові інтервали T_1 чи T_0 згідно потоку інформаційних бітів – одиниці чи нуля.

Спочатку визначають автокореляційний відгук прийнятих сигналів з кодовою спектральною модуляцією. За часовими зсувами кореляційних піків здійснюють однозначне відтворення переданих бітів інформації та виконують когерентний стиск НШС сигналів до полоси частот переданої інформації.

За результатами подвійної спектральної обробки обчислюється комплексна кореляційна функція прийнятого сигналу. Вона має інформаційний пік із зсу-

вом на час T_1 чи T_0 згідно потоку бітів одиниця і нуль, а також кореляційну функцію адитивних гаусових завад $R_S(\tau)$ в каналі доступу.

У подальшому обчислюють модулі кореляційних піків $R_S(\tau; T_{1,0})$ при $\tau=T_1$ та $\tau=T_0$, різницю яких порівнюють із нульовим порогом $U_{\Pi}=0$ для прийняття рішення про визначення переданого біту.

Зазначений метод дозволяє розрахувати повну імовірність похибки при передачі бітів в каналі доступу з адитивними гаусовими завадами для безпроводної інфокомунікаційної системи безпроводного зв'язку з кодовою спектральною модуляцією в передавачі.

Головним показником якості доцільно прийняти достовірність переданої інформації. Для цього зазвичай використовують коефіцієнт похибок $P_{\text{пох}}$ – імовірність похибки під час передачі одиниці інформації:

$$P_{\text{пох}} = Q\left(\sqrt{\frac{E}{N_0}}\right), \quad (8)$$

де $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ – інтеграл імовірності похибки Гауса.

Іншим показником якості є відношення сигнал/шум, що пов'язує енергію сигналу (біту) із спектральною щільністю потужності шуму.

При оцінці якості переданої інформації зазвичай застосовують обидва параметри: імовірність похибки та відношення сигнал/шум, що обумовлено їх однозначною взаємною залежністю для конкретної інфокомунікаційної системи. Потужність сигналу та смуга частот (база сигналу) є основними ресурсами, які витрачаються на передачу інформації. Тому сприйнятливим щодо забезпечення усталеної беззавадової роботи є зниження рівня інформаційного сигналу на вході приймача до рівня шуму. Це обумовлює відповідний рівень прихованості і завадостійкості безпроводних каналів зв'язку.

Розраховані залежності імовірностей похибок від співвідношення потужностей корисного сигналу та завади в каналі доступу наведені на рис. 4.

Завадостійкість, електромагнітна сумісність та прихованість безпроводної системи передачі цифрової інформації визначають залежності імовірності бітової похибки від співвідношення сигнал/шум в каналі доступу [19] (рис. 4).

Аналіз BER-характеристик доводить, що імовірність бітової похибки не прагне наблизитися до нуля навіть за відсутності завад в каналі. Оцінка параметра прихованості для цифрової системи доступу здійснюється за параметром q , який визначає відношення потужності інформаційного сигналу до потужності завад в каналі при заданій імовірності бітової похибки.

Імовірність бітової похибки залежить від бази сигналу. Так, для сигналів з великою базою, наприклад, 500, 1000, імовірність бітової похибки стає нижчою за 10^{-5} – 10^{-6} навіть при негативному значенні параметра q в інтервалі значень $-3\dots-6$ дБ.

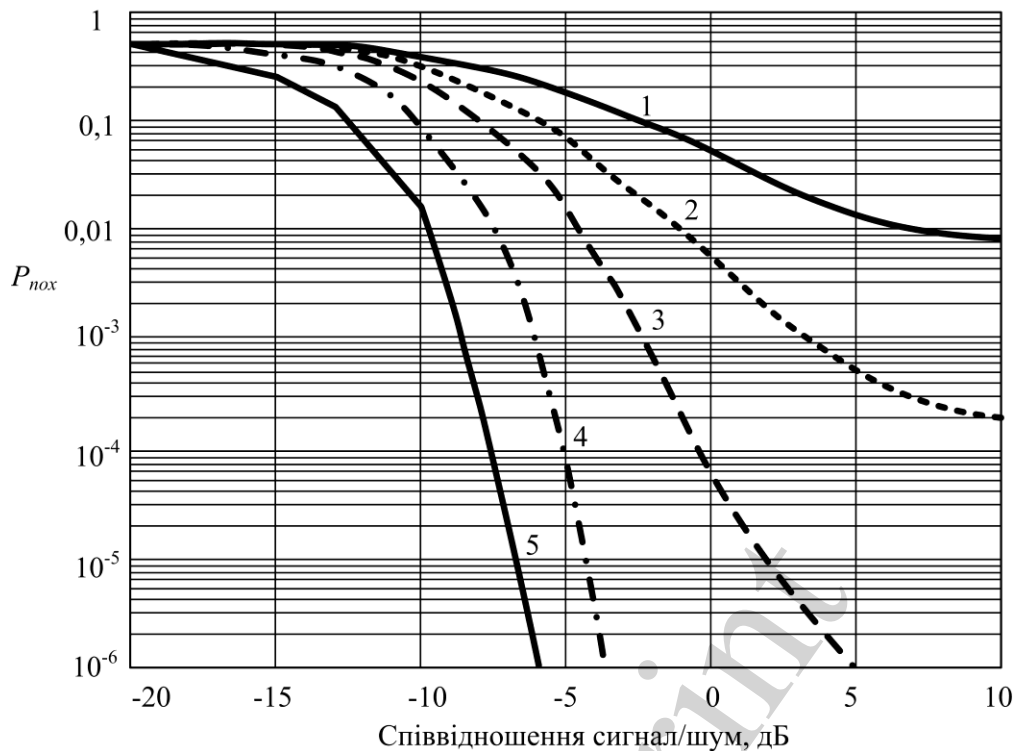


Рис. 4. Залежності імовірності похибки $P_{\text{пox}}$ від співвідношення сигнал/шум за різною базою сигналу: 1 – $B=50$; 2 – $B=100$; 3 – $B=200$; 4 – $B=500$; 5 – $B=1000$

6. Обговорення результатів моделювання процесів формування та кодування інформаційного сигналу

Порівняльний аналіз запропонованих методів та моделей з кореляційним прийомом НШС сигналів довів, що за рівнем потенційної завадостійкості найкращі показники має модель кодування НШС інформаційного сигналу фазовою маніпуляцією. Моделі кодування інформаційного сигналу протилежними чипами та із застосуванням кореляційно-часової маніпуляції мають значно гірші показники завадостійкості.

Таким чином, найкращу завадостійкість має модель кодування НШС інформаційного сигналу фазовою маніпуляцією. Перевагою цієї моделі також є спрощення структури приймального пристрою у порівнянні з моделлю кодування НШС сигналу із кореляційно-часовою маніпуляцією.

Однак, практична реалізація моделей, в яких інформація кодується зміною полярності вторинного максимуму автокореляційної функції є більш складною, оскільки передавач, в своїй структурі має ширококутний фазообертач із фіксованим зсувом фази.

Розробка такого пристрою для діапазону надвисоких частот є достатньо складним завданням. Тому для подальшої практичної розробки слід зосередитися на моделі кодування НШС сигналу із кореляційно-часовою маніпуляцією.

Причому в рамках даного дослідження умовами коректної і ефективної роботи методу повинно бути застосування у якості кодуючого сигналу похідної від моноциклу Гауса, який має надширокий спектр та є основою для кодування інформаційного біту. Крім того, завдяки використанню кореляційно-часової

маніпуляції кожен біт інформації кодується часовим зсувом гребінки чипів на чверть тривалості імпульсу відносно еталонної, в залежності від того, що кодується нуль чи одиниця. Саме ці умови і доказують ефективність запропонованих у роботі методів підвищення заводозахищеності безпроводних каналів зв'язку.

Саме системи з НШС сигналами, які використовують передачу опорного сигналу та їх кореляційний прийом, забезпечують високий рівень структурної прихованості сигналу.

Розроблені методи можуть бути використані для розгортання нових та модернізації існуючих безпроводних інфокомунікаційних систем.

В роботі розглядалися методи підвищення заводозахищеності каналів зв'язку тільки з точки зору забезпечення ЕМС та прихованої передачі сигналів. Інші методи та моделі, що здатні забезпечити високий рівень заводозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних безпроводних систем будуть досліджені у нових статтях авторів.

7. Висновки

1. Запропоновано критерій забезпечення вимог електромагнітної сумісності інфокомунікаційних безпроводних систем $q^2 / w_T \leq 0.4$ (q^2 – відношення потужності сигналу і шуму; w_T – база сигналу), виконання якого гарантовано забезпечує високий рівень заводостійкості, швидкості та захисту інформації в безпроводних каналах доступу при умові застосування надширокосмугових сигналів з великою базою сигналу, хоча б вище за 2.5.

2. На ґрунті проведеного в роботі аналізу запропоновано методи формування та моделі кодування надширокосмугових імпульсних сигналів – чипів. Ці методи дозволяють передавати інформацію безпосередньо до вільного простору гребінкою малопотужних послідовностей імпульсів. Причому передачу інформації здійснюють в широкій смузі частот з рівнем сигналу випромінювання на 3–5 дБ нижче рівня шуму у дуже широкій смузі частот без несучої частоти, причому рівень сигналу випромінювання дорівнює або нижче рівня шуму.

3. Аналіз ефективності запропонованих методів підвищенні заводозахищеності каналів зв'язку інфокомунікаційних безпроводних систем показує, що при великій базі сигналу $B > 300$, коли інтенсивність прийнятих сигналів знаходиться нижче рівня завод, включаючи власні шуми приймача, надійна передача інформації здійснюється з імовірністю похибки менш ніж 10^{-6} . Це доводить, що використання технології НШС сигналів дозволяє здійснити безпроводну приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання. Так, на швидкості 1–2 Мб/с з імовірністю похибки менш, ніж 10^{-6} , здійснюється прихована передача інформації за умов застосування великої бази сигналу $B = 500–1000$.

Подяка

Цю роботу було профінансовано в рамках виконання договору про науково-дослідну роботу «Удосконалення методів та засобів оцінки рівня несприйнятливості електронного обладнання нових зразків військової техніки до впливу

потужних електромагнітних завад» (ДР № 0121U109546, наказ НТУ «ХП» № 580 ОД від 14.12.21р.).

Література

1. Горбенко, І., Замула, О., Лик, Х. Ч. (2020). Комплексне вирішення проблеми електромагнітної сумісності сучасних інформаційно-комунікаційних систем. *Радіотехніка*, 3 (202), 106–115. doi: <https://doi.org/10.30837/rt.2020.3.202.11>
2. Kashmoola, M. A., Alsaleem, M. Y. anad, Alsaleem, N. Y. A., Moskalets, M. (2019). Model of dynamics of the grouping states of radio electronic means in the problems of ensuring electromagnetic compatibility. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (9 (102), 12–20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.188976>
3. Moskalets, M., Loshakov, V., Abdenour, D., Ageyev, D., Martynchuk, O., Sielivanov, K. (2019). Methods for Solving EMC Problems by Means of Antenna Technology in Tropospheric Communication. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). doi: <https://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061532>
4. Serkov, A., Trubchaninova, K., Yakovenko, I., Kniaziev, V. (2020). Electromagnetic Compatibility of Mobile Telecommunication Systems. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 1041–1044, doi: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252821>
5. Jaimes-Illanes, G. (2021). Planning and simulation for radio access networks on “Small Cells” technology for heterogeneous environments. *Investigacion & desarrollo*, 21 (1). doi: <https://doi.org/10.23881/idupbo.021.1-2i>
6. Faruque, S. (2019). Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy. *SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91651-4>
7. Grami, A. (2016). Introduction to Digital Communications. Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06171-6>
8. Zhu, D., Mathews, V. J., Detienne, D. H. (2015). Likelihood-based blind separation of QAM signals in time-varying dual-polarized channels. 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). doi: <https://doi.org/10.1109/eusipco.2015.7362512>
9. Ilcev, S. D. (2020). Analyses of Space Division Multiple Access (SDMA) Schemes for Global Mobile Satellite Communications (GMSC). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14 (4), 821–830. doi: <https://doi.org/10.12716/1001.14.04.05>
10. Segan, S. (2022). CDMA vs. GSM: What's the Difference? URL: <https://www.pcmag.com/news/cdma-vs-gsm-whats-the-difference>
11. Khan, M. T., Sha'ameri, A. Z., Zabidi, M. M. A., Chia, C. C. (2021). FHSS Signals Classification by Linear Discriminant in a Multi-signal Environment. *Proceedings of the International e-Conference on Intelligent Systems and Signal Processing*, 143–155. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2123-9_11

12. Родимов, А. П., Поповский, В. В. (1984). Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи. М.: Радио и связь, 272.
13. Zhang, L. (2021). The Simulation Study of Multi-User Spread-Spectrum Wireless Communication System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1815 (1), 012021. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1815/1/012021>
14. Federal Communications Commission (FCC) Decision No. FCC 02-48. URL: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf
15. Huang, T.-J. (2018). Analytical Investigation of Channel Capacity of UWB-MIMO Systems. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 11 (01), 1–8. doi: <https://doi.org/10.4236/ijcns.2018.111001>
16. Котельников, В. А. (1956). Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 151. URL: <https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Kotelnikov1956ru.pdf>
17. Serkov, A., Trubchaninova, K., Mezitis, M. (2019). Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals. *Advanced Information Systems*, 3 (4), 33–38. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04>
18. Трубочанінова, К. А. (2021). Моделі, методи та технологія багатоканального доступу та захисту інформації в рухомих комп'ютерних системах. Харків, 364.
19. Панченко, С. В., Серков, О. А., Трубочанінова, К. А., Горюшкіна, А. Є., Лазуренко, Б. О. (2020). Пат. № 145319 UA. Спосіб прийому цифрових двійкових сигналів в умовах шуму. № u202004847; заявл. 29.07.2020; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=272722>