

АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНИХ ЗАВАД В РАДІОКАНАЛАХ З OFDM

В роботі розглядаються можливі варіанти постановки імітаційних завад системам і засобам радіозв'язку. Показано шляхи підвищення ефективності функціонування засобів радіозв'язку з цифровою модуляцією в умовах активного радіоелектронного подавлення.

Ключові слова: багатопроміньовий канал зв'язку, завмирання, оцінювання каналу, імітаційні завади.

Засоби радіозв'язку, радіоелектронне подавлення, імітаційні завади. Важливе місце в забезпеченні переваги в управлінні військами та зброєю в сучасних операціях (бойових діях) посідає радіоелектронна боротьба. Провідні держави світу приділяють велику увагу питанням розвитку систем та засобів радіоелектронної боротьби [1–5].

Сучасні засоби радіоелектронного подавлення (РЕП) здатні з високою ефективністю та у короткий час подавити систему радіозв'язку, побудовану на традиційних принципах. В даний час створено значну кількість засобів РЕП, які дозволяють порушувати управління військами шляхом подавлення засобів зв'язку в різних діапазонах робочих частот з використанням всього комплексу навмисних завад.

Враховуючи це, стає досить складним завдання забезпечення стійкого радіозв'язку в умовах РЕП. Успішне його вирішення неможливо без застосування спеціальних технічних і організаційних заходів з забезпечення підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку в складній радіоелектронній обстановці.

Для подавлення систем і засобів радіозв'язку (СРЗ) можуть застосовуватися різні види організованих завад, що реалізуються у відповідних станціях завад [2, 3]. Все різноманіття варіантів подавлення радіозасобів визначається в основному шляхами, якими їх розробники прагнуть сконцентрувати обмежену потужність передавачів в певних частотних діапазонах, часових інтервалах та просторових секторах. Для подавлення засобів одного і того ж класу, але з використанням різних видів сигналів і способів їх обробки, застосовуються різні види завад.

Все різноманіття завад, за частотно-часовими характеристиками, можна звести до шести основних різновидів: шумові, імпульсні, вузькосмугові (в граничному наближенні – синусоїдальні), внутрішньосистемні, ретрансльовані, імітаційні [3, 6].

Особливу небезпеку для засобів радіозв'язку з цифровою модуляцією представляють імітаційні (дезінформуючі) завади, при впливі яких система залишається працездатною, однак, не забезпечує передачі корисної інформації. В деяких випадках дезінформуючі завади можуть призводити до введення неправдивої інформації в СРЗ, викликати хибні режими роботи за рахунок впливу на системи тактової і циклової синхронізації приймача. Так американський наземний комплекс радіоелектронної боротьби для сухопутних військ „Вулфпак” за допомогою одного або декількох малогабаритних прийомо-передавальних пристроїв може здійснювати оптимальне подавлення ліній радіозв'язку спрямованими малопотужними імітаційними завадами в результаті дії яких цифрові засоби радіозв'язку залишаються працездатними, але не забезпечують передачі корисної інформації [7].

У сучасних системах радіозв'язку широко використовується один із методів формування широкосмугових сигналів – метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [10]. Ідея OFDM полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється по множині частотних підканалів і передача ведеться паралельно у всіх цих підканалах. При цьому висока швидкість передачі досягається саме за рахунок одночасної передачі даних по всіх підканалах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути і невисокою. Нова технологія передачі в цей час розглядається як одна з найбільш перспективних для побудови широкосмугових систем цифрового радіозв'язку багатопроміньовими каналами, що забезпечує досить високу частотну

ефективність цих систем. Основними перевагами даної технології є відносно висока стійкість щодо частотно-селективних завмирань і вузькосмугових завад, а також висока спектральна ефективність.

Важливо, що хоча самі частотні підканали можуть частково перекривати один одного, ортогональність несучих сигналів гарантує частотну незалежність каналів, а, отже, і відсутність міжканальної інтерференції (рис. 1). Ортогональність між сигналами можлива тільки в тому випадку, якщо між частотами піднесучих гармонійних коливань має місце математично точне співвідношення.

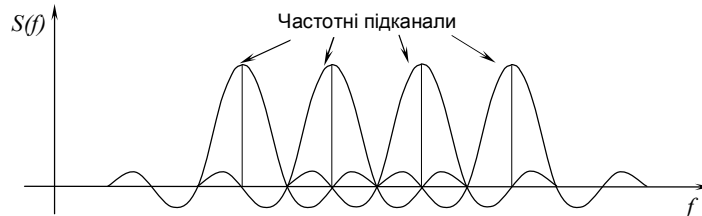


Рис. 1. Принцип ортогонального частотного розділення каналів

Тому метою роботи є аналіз можливих варіантів застосування імітаційних завад в радіоканалах та наслідки їх впливу на засоби радіозв'язку.

У сучасних умовах, з урахуванням суттєвого підвищення основних якісних характеристик радіоканалів, різко загострилася проблема забезпечення безпеки радіозв'язку, тобто проблема забезпечення секретності, конфіденційності і імітостійкості (захисту від імітаційного впливу) систем радіозв'язку.

Перші два завдання вирішуються застосуванням сучасних способів криптографії, розробки і дослідження яких мають давню історію і досить високий рівень захисту. Більш новими є завдання забезпечення імітостійкості радіоканалів. При цьому слід зауважити, що саме з впровадженням засобів автоматизації в системи радіозв'язку можливості впливу імітозавад (імітонападу) значно розширилися, і вони придбали нові більш витончені форми. Процес впливу значно змінився на каналному, сервісному та апаратному рівні.

У кожному випадку, залежно від переслідуваних цілей, існує кілька варіантів застосування імітозавад, і при всій досконалості, застосування в деяких випадках заходів забезпечення імітостійкості не гарантує захист систем радіозв'язку в цілому. У зв'язку з цим, актуальним є аналіз можливих варіантів імітонападу, необхідний для вироблення комплексних заходів імітозахисту при розробці систем і засобів радіозв'язку різного призначення.

Під імітаційною завадою розуміють активний вплив радіоелектронних засобів, реєстрований засобом радіозв'язку як корисний сигнал. Більш повно сутність і можливості імітаційних завад розкриті у визначенні імітостійкості, під якою розуміють здатність системи зв'язку протистояти введенню неправдивої інформації, несанкціонованого доступу до переданої або прийнятої інформації і нав'язування помилкових режимів засобам зв'язку [8]. Виходячи з цього визначення, можна виділити три можливі напрямки впливу імітаційних завад на системи і засоби радіозв'язку [9].

Перший – введення неправдивої інформації – визначається можливістю введення навмисно синтезованих помилкових інформаційних повідомлень з метою дезінформації кореспондентів приймальних станцій протиборчої сторони, а для відкритих систем радіозв'язку – з метою несанкціонованого користування каналами.

Другий – визначається можливістю доступу до інформаційної частини переданих повідомлень за рахунок їх перехоплення і дешифрування, якщо в системі передбачено будь-які заходи захисту.

Третій – визначається принциповою можливістю нав'язування помилкових режимів роботи засобів радіозв'язку у різні моменти їх використання. В цьому випадку імітаційні завади носять диверсійний характер.

Вплив на засоби радіозв'язку заснований на прихованому зриві роботи приймального обладнання за рахунок його блокування помилковими запусками та інших способах, визначених особливостями застосування і алгоритмом роботи засобів радіозв'язку, передбачених в радіоапаратурі конструктивно.

З урахуванням цього з усієї сукупності можна виділити завдання, які вирішуються засобами радіоспостереження і засобами активного радіоелектронного впливу (РЕВ) (рис. 2).

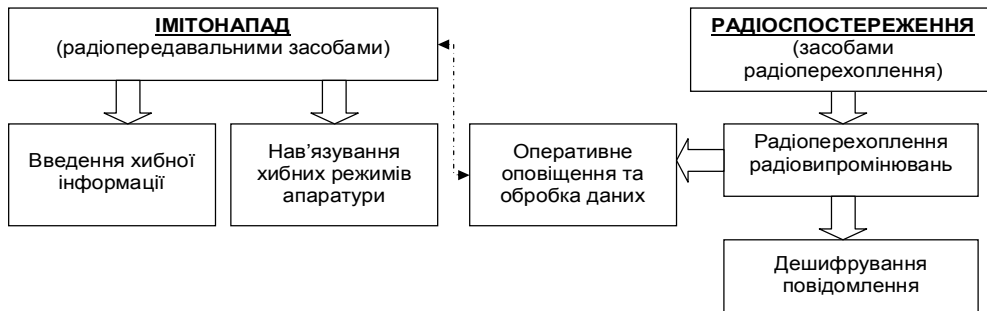


Рис. 2. Основні завдання, які вирішують імітаційні завади.

Сутність виконання завдань радіоспостереження в даному випадку полягають у безперервному перехопленні випромінювань радіоканалів з метою дешифрування повідомлень, контроль за змінами в організації застосування та використання варіативних ресурсів радіоканалу, а також для розпізнавання об'єктів зв'язку. В сучасних радіоканалах засоби захисту інформації, що застосовуються в залежності від призначення мережі, потенційно володіють достатньо високим ступенем криптографічного захисту, у зв'язку з чим даний напрямок для спостереження є малоінформативним. Основним джерелом даних в цьому випадку є інформація, отримана за рахунок контролю за змінами організації застосування радіоканалів на основі аналізу технічних параметрів радіовипромінювань.

Виконання завдань РЕВ засноване на активному застосуванні імітозавад, яке полягає в навмисному впливі спеціально синтезованих сигналів з використанням радіопередавальних засобів. За структурою і способом застосування ці завади можна розділити на два типи (рис. 3).

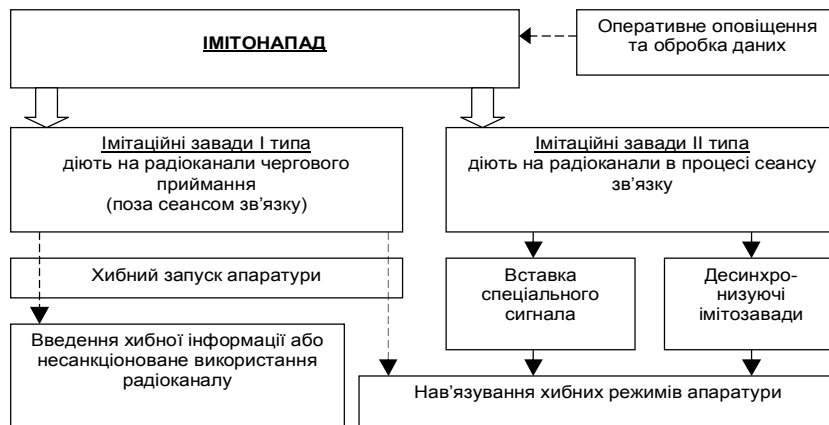


Рис. 3. Основні типи імітаційних завад

Завади першого типу діють на радіоканали чергового приймання. Основною їх метою є запуск апаратури і введення помилкової інформаційної вставки, або блокування радіоканалу перед сеансом зв'язку з метою його зриву (помилковий режим роботи технічних засобів зв'язку) [1]. Характерна особливість цих завад полягає у тому, що вплив на радіоканал здійснюється поза межами сеансу зв'язку. За характером застосування ці імітозавади найчастіше носять упереджувальний характер. Дана особливість дозволяє ефективно

використовувати загороджувальні за частотою завади. Причому, з огляду на можливість звуження діапазону частот, можливе застосування напівзагороджувальні завади з перестроюванням параметрів випромінювання по області невизначеності. Завади даного типу можуть застосовуватися, як правило, перед початком диверсійних дій різного характеру з метою прихованого блокування системи радіозв'язку на момент нанесення швидкого масованого удару. Необхідний час блокування визначається тривалістю і іншими особливостями диверсійних операцій, а також можливостями засобів виявлення і часом реакції засобів РЕП.

До другого типу відносяться завади, які діють в процесі сеансу зв'язку (варіант ретрансльованої), основна мета яких – не допустити приймання переданої інформації, і, як більш складний варіант – з метою введення неправдивої інформації. Завади цього типу порушують запуск апаратури або інших режимів її роботи за рахунок введення спеціально синтезованих сигналів, що дозволяють несанкціоновано впливати на радіоканал спільно з основним корисним сигналом [2, 3]. У процесі імітонападу спільно використовуються засоби радіоспостереження і РЕВ. Засоби радіоспостереження виконують функції виявлення і визначення вихідних даних, необхідних для забезпечення гарантованого енергетичного контакту засобів РЕВ з об'єктом ураження, а також для синхронізації засобів імітонападу. Ефективність цих завад визначається, як правило, часом виявлення об'єкта радіовипромінювання засобами радіоспостереження і інерційністю наведення засобів РЕВ.

Можливість застосування імітозавад того чи іншого типу визначається, перш за все, співвідношенням тривалості передачі сигналу з інерційністю систем радіоспостереження і РЕВ. У випадку, коли час виявлення і наведення засобів РЕВ перевищує або співпадає з тривалістю передачі сигналу, доцільніше застосовувати імітозавади першого типу, використовуючи їх як напівзагороджувальну заваду за рахунок нав'язування помилкових режимів роботи апаратури і утримуючи її в цьому стані протягом необхідного часу, тим самим знижуючи ймовірність, або повністю виключаючи приймання корисних сигналів. У цьому ж випадку за відсутності сигналів зв'язку існує можливість введення помилкових повідомлень у систему зв'язку. Причому, слід зазначити, що дія цих завад несе несильний характер. У випадку, коли тривалість передачі сигналу значно перевищує інерційність систем радіоспостереження і РЕВ, доцільніше застосовувати імітозавади другого типу, як ретрансльовані завади. У даному випадку здійснюється короткочасний вплив на радіоканал в процесі передачі сигналу.

Розглянемо приклад впливу імітаційних завад на OFDM-сигнал.

У загальному випадку вираз для OFDM-сигналу записується таким чином [10]:

$$A_{\Sigma}(t) = A e^{j2\pi f_0 t} \prod_{l=1}^L \prod_{p=1}^N c_{lp} e^{j \frac{2\pi p}{T_0} (t - T_3 - lT_c)} \quad (1)$$

де c_{lp} – символ даних у кадрі на p -й піднесучій у складі l -го символу OFDM-сигналу; l – номер символу OFDM-сигналу; p – номер піднесучої; T_3 – тривалість захисного інтервалу; T_c – тривалість OFDM-сигналу; f_0 – несуча частота; T_0 – тривалість символу (або тривалість Фур'є-перетворення) у складі OFDM сигналу (рис. 4).

Суттєвим недоліком, що обмежує застосування ортогонального частотного розділення з мультіплексуванням в системах радіозв'язку є нестійка робота в умовах впливу навмисних завад. При наявності в каналі імітаційно-дезінформуючих завад ефективність функціонування засобів радіозв'язку з OFDM значно знижується, іноді до повної втрати переданої інформації. Спектральна щільність потужності найпростіших шумових завад, навіть зосереджених по спектру, при прийманні після прямого перетворення Фур'є розмивається практично по всіх частотних підканалах, що або ускладнює, або й зовсім унеможливує приймання OFDM-сигналу.

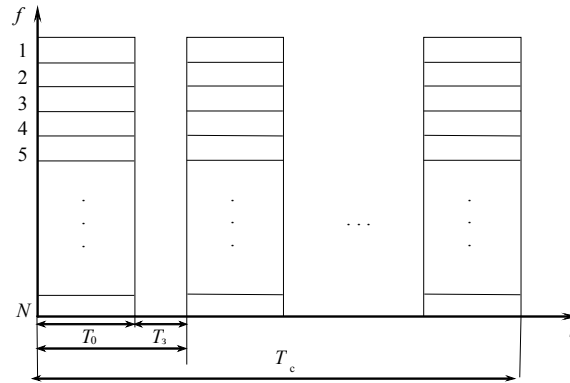


Рис. 4. Структура OFDM-сигналу

Для засобів радіозв'язку з OFDM найбільш небезпечними є імітаційні завади другого типу, які в основному можуть викликати помилкові режими роботи засобів радіозв'язку за рахунок впливу на системи синхронізації.

У результаті впливу імітаційних виникає випадковий фазовий зсув, що призводить як до однакового для всіх підканалів обертання сигнального сузір'я, так і до появи міжканальної інтерференції [12]. Слід зазначити, що компенсація першої складової вимагає оцінювати фазовий шум один раз за символ, другої – частіше одного разу.

Згідно [13], після видалення циклічного префікса та застосування швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) вхідний КАМ-сигнал на приймальній стороні можна представити наступним виразом:

$$R_{m,l} = A_{m,l} H_{m,l} I_m(l) + \sum_{k=0}^{N-1} A_{m,k} H_{m,k} I_m(l-k) + W_{m,l}, \quad (2)$$

де m – номер OFDM-символу; l – номер несучої ($l = 0, 1, \dots, N-1$); $A_{m,l}$ – КАМ-сигнал, що передається; $H_{m,k}$ – передаточна характеристика каналу;

$$I_m(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \exp(-j2\pi nk/N) \exp(j\varphi_m(k)); \quad \varphi_m(k) \text{ – фазовий шум;}$$

$$W_{m,l} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W_{m,k}^1 \exp(-j2\pi lk/N) \text{ – перетворення Фур'є від послідовності адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ) на інтервалі OFDM-символу.}$$

Перший член у виразі (2) однаково обертає корисну компоненту $A_{m,l} H_{m,l}$ кожної несучої і не залежить від підканалу l . Цей член називається груповою фазовою помилкою (*CPE – common phase error*). Другий член у виразі (2) представляє собою інтерференцію між несучими (*ICI – inter carrier interference*), викликану впливом сусідніх несучих через втрату їх ортогональності. Третій член характеризує адитивну заваду. На основі центральної граничної теореми інтерференцію між несучими можна змоделювати у вигляді гаусівського шуму.

Крім того, при передачі сигналів методом OFDM синхронізація є застосування пілот-сигналів (рис. 5). Пілот-сигнали представляють собою несучі, виділені для передачі відомої псевдовипадкової послідовності модульованих символів [11]. Розташування цих несучих в межах символу не змінюється, тому це дозволяє досить просто подавити їх навмисними завадами.

Пріоритет використання тих чи інших завад у кожному випадку визначається можливостями засобів радіоспостереження і РЕВ протидіючої сторони, технічними параметрами і організацією застосування автоматизованих радіоліній. Аналіз можливих варіантів постановки імітаційних завад дозволяє виробити необхідні заходи захисту від них. Так, вдосконалення методів формування та обробки сигналів з OFDM дозволяє підвищити ефективність функціонування

засобів радіозв'язку в умовах складної радіоелектронної обстановки. Наприклад, розширення OFDM-сигналу псевдовипадковими послідовностями дозволяє значно зменшити вплив імітаційних завад.

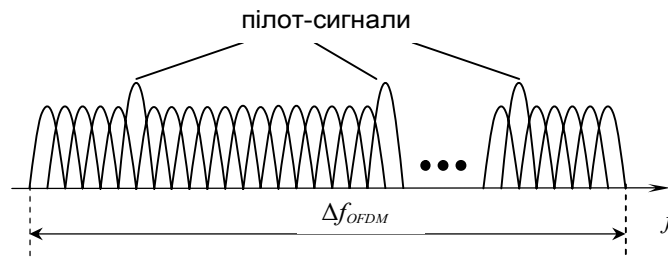


Рис. 5. Структура OFDM-сигналу в частотній області

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки.

1. Особливу небезпеку для засобів радіозв'язку з цифровою модуляцією представляють імітаційні (дезінформуючі) завади, при впливі яких система залишається працездатною, однак, не забезпечує передачі корисної інформації. В деяких випадках дезінформуючі завади можуть призводити до введення неправдивої інформації в систему радіозв'язку, викликати хибні режими роботи за рахунок впливу на системи синхронізації приймачів.

2. Успішне вирішення завдання забезпечення стійкого радіозв'язку в умовах дії імітаційних завад потребує застосування спеціальних технічних і організаційних заходів з забезпечення оперативного управління параметрами і режимами систем і засобів радіозв'язку.

Перспективним напрямком при вирішенні завдання підвищення завадозахищеності цифрових систем і засобів радіозв'язку є розробка адаптивних алгоритмів формування та обробки сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Агафонов А. А. и др., под ред. В. Г. Радзиевского. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
2. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
3. Борисов В. И., Зинчук В. М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. Изд. 2-е, исправленное / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: Радиософт, 2008. – 260 с.
4. Баушев С. В. Разработка перспективных систем связи вооруженных сил США и Объединенных вооруженных сил НАТО / С.В. Баушев, А.В. Передрий // Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. – № 7. – С. 3 – 20.
5. Кондратьев А. Перспективный комплекс РРТР и РЭВ сухопутных войск США „Профет” / Кондратьев А. // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 7. – С. 37 – 41.
6. Кувшинов О.В., Лежнюк О.П., Лівенцев С.П. Методи математичного опису сигналів і завад: Навчальний посібник. – К.: КВІУЗ, 2000. – 136 с.
7. Стрелецкий А. Американский перспективный наземный комплекс ведения радиоэлектронной войны „Вулфпак” // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 10, С. 27– 28.
8. Військовий стандарт 01.112.001. Військовий зв'язок. Терміни та визначення. – 2006.
9. Орощук И. М. Оценка влияния десинхронизирующих имитопомех на цифровые автоматизированные системы радиосвязи // Третья международная конференция: „Цифровая обработка сигналов и их применение” Российское НТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, 2000.
10. Кувшинов О. В., Гурський Т. Г. Технологія OFDM: огляд проблем та шляхів їх розв'язання // Зв'язок. – 2008. – № 1 (77). – С. 42 – 46.
11. Petrovic, Rawe W., Fettweic G. Intercarrier Interference due to Phase Noise in OFDM – Estimation and Suppression. // In Proceedings of the 60th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'04 Fall), California. – 2004.
12. Казаков Л.Н., Кукушкин Д.С. Синтез многомерной оптимальной коррекции фазы в канале OFDM // Электросвязь. – 2006. – № 10. – С. 23 – 26.
13. Шабанов А.В., Карпов С.В. Сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов компенсации фазовой ошибки в OFDM-системах // Электросвязь. – 2006. – № 10. – С. 18 – 21.

Надійшла: 21.09.2012р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В.