

15. Feuillet, V. The Discrete Boundary Resistance method for thermal analysis of solid-state circuits and devices [Text] / V. Feuillet, Y. Scudeller, Y. Jarny // International Journal of Thermal Sciences. — 2009. — Vol. 48, № 2. — P. 372–382. doi:10.1016/j.chaos.2016.07.005
16. Dumas, J. M. Long Term Degradation of GaAs Power MESFET's Induced by Surface Effects [Text] / J. M. Dumas, J. Paugam, C. LeMouellic, J. Y. Boulaire // 21st International Reliability Physics Symposium, Phoenix, Arizona, April 5-7, 1983. — New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1983. — P. 226–228.
17. Baliga, B. J. Breakdown stability of gold, aluminum, and tungsten Schottky barriers on gallium arsenide [Text] / B. J. Baliga, R. Ehle, A. Sears, P. Campbell, W. Garwacki, W. Katz // IEEE Electron Device Letters. — 1982. — Vol. 3, № 7. — P. 177–179. doi:10.1109/edl.1982.25528

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ «ПРОГНОЗ»

Разработана интеллектуальная подсистема прогнозирования надежности работы дискретных устройств. В основу работы

программного продукта положен метод прогнозирования надежности дискретных устройств на основе моделирования процесса деградации компьютерных компонентов. Описан алгоритм работы подсистемы, пошаговый механизм оценки показателей измерительных приборов и структурная схема интеллектуальной системы прогнозирования надежности Mikrosystem 1.0 «Прогноз».

Ключевые слова: надежность, дискретное устройство, интеллектуальная система прогнозирования, структурная схема.

Кравченко Ольга Віталіївна, старший викладач, кафедра інформаційних технологій проектування, Черкаський державний технологічний університет, Україна, e-mail: kravchenko_ov@ukr.net.

Кравченко Ольга Віталіївна, старший преподаватель, кафедра информационных технологий проектирования, Черкасский государственный технологический университет, Украина.

Kravchenko Olga, Cherkasy State Technological University, Ukraine, e-mail: kravchenko_ov@ukr.net

УДК 004.725

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784

Журавська І. М.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ У КІБЕР-ФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ З РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Досліджено процес передачі даних у кібер-фізичній системі (CFS) з рухомими об'єктами. Визначена залежність швидкості передачі даних між зазначеними об'єктами від відстані між ними за наявності електромагнітних перешкод. Доведено, що можливо забезпечити стабільну швидкість передачі даних за стандартом 802.11 за рахунок зменшення асиметрії каналу зв'язку між кібер-фізичними об'єктами (CFO), на борту яких знаходяться комп'ютерні компоненти — Wi-Fi модулі зв'язку.

Ключові слова: рухомі об'єкти, стабільність бездротового зв'язку, кібер-фізичні об'єкти, комп'ютерні компоненти, Wi-Fi модулі зв'язку.

1. Вступ

Останнім часом поширюється застосування кібер-фізичних систем (CFS) для реалізації різноманітних людських потреб. Найбільш вживаним для комунікації є стандарт 802.11b/g/n (Wi-Fi). Але актуальна проблема забезпечення стабільності зв'язку (тобто його безперервності у часі та постійної швидкості зі зміною відстані) або між рухомими об'єктами CFS, або між рухомим та стаціонарним наземним об'єктами CFS [1].

Найбільш актуальними є дослідження передачі даних між рухомими та рухомими/нерухомими об'єктами у міських умовах як у таких, що насичені різними перешкодами, особливо електромагнітними (трансформатори ліній електропередачі, лінії електропередачі міського електротранспорту — трамваї, тролейбуси, поїзди метро та ін.).

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження — процес передачі даних у CFS, яка утворена за Mesh-топологією, складається з ру-

хомих об'єктів, що з'єднані бездротовими каналами зв'язку, та передбачає неперіодичні зміни з'єднань між різними парами кібер-фізичних об'єктів (CFO). Такими парами у зазначеній швидкодинамічній CFS можуть бути будь-які комбінації з рухомих компонентів (модулів Wi-Fi зв'язку безпілотних апаратів та/або мобільних пристроїв), обладнання стаціонарних наземних операторів CFS, проміжних точок доступу (AP) між сегментами рухомої комп'ютерної мережі. Тому предметом дослідження є комп'ютерні компоненти CFO, сукупність технічних характеристик котрих забезпечить життєздатність такої топології CFS, що склалась під час руху об'єктів сенсорної мережі, в першу чергу, безпілотних CFO (UMV), характеристики яких не можуть бути налагоджені вручну.

Для UMV сигнал потужності передавача стандартних пристроїв Wi-Fi (не більше 20 dBm/100 mW) забезпечує відстань активності обладнання до 200 м без додаткового підсилення. Але часто рівень сигналу від Wi-Fi модуля відправника недостатньо сильний (знижується за причини перешкод), тому на лінії зв'язку між CFO можуть виникати обриви зв'язку.

В такому випадку в стаціонарних мережах зазвичай використовують додатковий пристрій — репітер (англ. *repeat* — повторювати), котрий повністю дублює радіосигнал, розширюючи радіус дії Wi-Fi мережі. Але для рухомої CFS додати до топології будь-які CFO вже під час виконання задачі просто неможливо. Для розширення зони взаємодії таких CFO потрібен сигнал більшої потужності, на використання якої в Україні потрібно отримувати дозвіл від Національної комісії з питань державного регулювання зв'язку та інформатизації (НКРЗІ України).

У наведеному дослідженні не ставиться задача передавання відеопотоку в реальному часі в HD-якості на відстані 700 м та більше через Wi-Fi, тому про використання підсилюючого обладнання, що потребує додаткового ліцензування, не йдеться.

В задачах передачі поодиноких дискретних сигналів від різних сенсорів з борту CFO, задля досягнення оптимального співвідношення ціна/якість, достатньо використання Wi-Fi модуля за стандартом 802.11g замість хоча й більш швидкісного, але також й більш енергоспоживаного стандарту 802.11n.

За необхідністю організації більш швидкісної лінії зв'язку матиме сенс перехід на стандарт 802.11ac (підтриманий багатьма виробниками бездротових чипсетів — Quantenna, Broadcom, Buffalo, Cisco тощо), який, крім високої швидкості передачі даних, характеризується також й зменшенням у 6 разів енергоспоживанням порівняно з 802.11n.

3. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є забезпечення стабільного трафіку в CFS.

Для вирішення поставленої мети необхідно:

1. Зрівняти між собою швидкості потоків *up* та *down* між CFO.
2. Оцінити зміни швидкості передачі даних від кількості ретрансляцій та відстані між CFO.

4. Аналіз літературних даних

Значним кроком вперед в організації зв'язку з безпілотними CFO-UMV була розробка моделей, які дозволили користувачеві підключатися до відеокамери та сенсорів UMV засобами Wi-Fi мережі, використовуючи смартфон, планшет або аналогічний сумісний пристрій [2]. Такий підхід представляє дві значні проблеми [3]. Одною з них є, по своїй суті, вузький діапазон Wi-Fi та, внаслідок, необхідність точної настройки на канал передачі даних у сеансі зв'язку. Другою проблемою є близькість інших частот радіоперешкод до частот управління UMV та в результаті інтерференція

між декількома частотними піддіапазами. В рухомих CFO на борту знаходяться компоненти, які забезпечують Wi-Fi зв'язок у визначеному діапазоні частот на певну відстань.

Одними з найбільш вживаними у сучасних мобільних пристроях (а також планшетах, ноутбуках тощо) є комп'ютерні компоненти від фірми Broadcom Corp. Для забезпечення Wi-Fi-зв'язку використовується модуль BCM4330 (2,4/5 ГГц). Підтримка стандарту 802.11n в однопотоковому режимі на каналі 20 МГц забезпечує швидкість передачі PHY шару до MCS7 (72 Мбіт/с). Такий модуль має хоча й обмежені, але достатні для виконання автономного та керованого завдання обчислювальні ресурси. Це вбудований процесор ARM® Cortex-M3, який здатний розрахувати стандартні функції WLAN [4].

Функціональність цієї плати представлена на рис. 1. Компоненти у приймачі (Receiver), вразливі до дії перешкод, наведені курсивом [5].

BCM4330 включає в себе інтегрований дводіапазонний бездротовий приймач ВЧ, який був оптимізований для використання у діапазонах 2,4 і 5 ГГц бездротової локальної мережі (але не обидва одночасно).

На різних CFO також можуть бути встановлені конкурентні Wi-Fi модулі RL-UM12BS-8188EUS від вендора NATER, Ralink RT3290 від MediaTek, Atheros AR9331 від Qualcomm тощо. Характеристики зазначених модулів наведені у табл. 1 [6–8].

Всі вищезазначені модулі дозволяють двом і більш Wi-Fi пристроїв спілкуватися один з одним без маршрутизаторів і хот-спотів у режимі Wi-Fi Direct (раніше відомий як Wi-Fi Peer-to-Peer).

З аналізу табл. 1 видно, що не всі з модулів повноцінно підтримують стандарт 802.11n (ESP8266, BCM4330), а лише забезпечують сумісність з іншим обладнанням цього стандарту.

До того ж, у каналі радіозв'язку між UMV та стаціонарним наземним пунктом керування мають місце явища перевідзеркалювання, розсіювання і дифракції, які разом утворюють загальну картину завмирань у каналі [9].

Експериментально доведено, що сусідні Wi-Fi мережі з рівнем сигналу 80 dBm спричиняють інтерференцію, яка призводить до втрати біля 25 % потужності сигналу вже на 25 м [10].

При цьому виникають збої, обриви зв'язку, які потребують досліджень щодо стабілізації останнього та забезпечення його певної якості.

Тобто, після обриву сеансу повинна здійснюватися повторна ініціалізація блоку синхронізації приймача (*Timing Recovery*) та компонента, що відповідає за відокремлення блоку даних від преамбули пакету (*Preamble Detector*) — рис. 1.

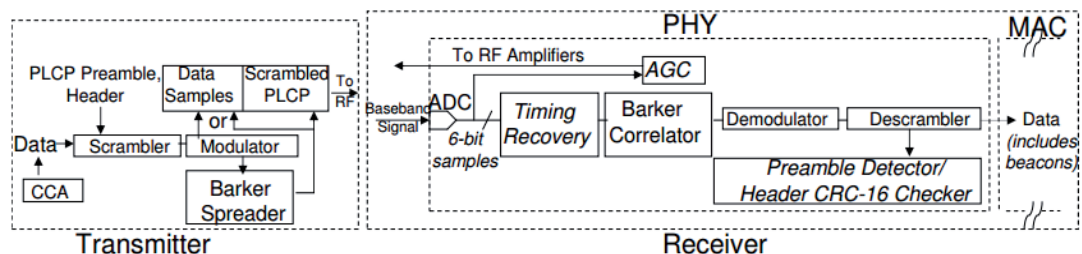


Рис. 1. Склад компонентів Wi-Fi модуля на борту об'єкта CFS

Таблица 1

Характеристики Wi-Fi модулей разных производителей

Назва мікросхеми з вбудованим Wi-Fi модулем	Наявність T/R	Потужність передавача (T), dBm (mW)	Чутливість приймача (R), dBi	Стандарт передачі даних (частота)	Максимальна швидкість передачі даних, Мбіт/с
Broadcom BCM4330	1T1R	18/...	-93/-76/-62	b/g/n	72
Nater RL-UM12BS-8188EUS (Realtek RTL8188EUS)	1T1R	18/14/13	-86/-73/-66	b/g/n 13 каналів	11/54/150
Realtek RTL8192CU	2T2R Multiple BSSID	Не визначена	Не визначена	b/g/n	144,4/300 (полоса 20/40 МГц)
Ralink RT5350F, RT3050F	1T/1R	17/14/11 (50/25/12,5)	-83/-70/-64	b/g/n (2,412 ~ 2,462 ГГц) 11 каналів	11/54/130
Ralink RT3052	2T2R	Не визначена	Не визначена	b/g/n	300
Qualcomm Atheros AR9331	1T1R	Не визначена	Не визначена	b/g/n	72/150 (20/40 МГц)
Espressif ESP8266	1T1R	25/...	Не визначена	b/g/n	10

Одним з можливих рішень для виправлення помилок у залежності від рівня завад може бути використання адаптивної системи, в якій дані представляються у вигляді залишків від ділення на розширену систему модулів та передаються за методом стрибкоподібної зміни частоти [11]. Такий метод здатний забезпечити якісний Wi-Fi зв'язок, але потребує достатньо великих обчислювальних ресурсів, тому не завжди може бути застосованим у рухомих CFS з мобільними об'єктами.

5. Матеріали та методи досліджень

В роботі запропоновано інший метод уникнення зниження швидкості через інтерференцію від нових AP, що під'єднуються до радіоэфіру, але не входять до складу CFS. У такому разі стабільність зв'язку досягається шляхом перевизначення радіоситуації в зоні дії CFS і зміною характеристик кібер-фізичних компонентів. У такий же спосіб можливо уникнути падіння швидкості передачі даних, коли рухомі об'єкти CFS входять у зони з високим рівнем електромагнітного випромінювання або оптична видимість між CFS втрачається.

Для стабільного трафіку в CFS необхідно досягнути максимальної симетрії каналу зв'язку між декількома Клієнтами (i-ї STA_i з n станцій), що підключаються до одної точки доступу (AP). Це вимагає зрівняти швидкості потоків up та down. Тоді різниця DF_i між співвідношенням сигнал-шум (SNR) AP та STA_i повинна прагнути до нуля:

$$DF_i = (SNR_{STA_i} - SNR_{AP}) \rightarrow 0. \tag{1}$$

Режим передачі даних з DF_i < 0 (асиметрія каналів зв'язку між кібер-фізичними компонентами) є критичним для CFS. У такому випадку швидкість передачі даних від STA_i до AP (up) буде повільніше ніж у зворотному напрямку (down), або зв'язок буде зовсім втраченим. Тоді безпілотний апарат (UMV) стане некерованим кібер-оператором, тому що дані телеметрії не будуть опрацьовані за адекватний час [12].

Для досягнення симетрії у каналі зв'язку між кібер-фізичними компонентами необхідно регулювати потужність AP таким чином, щоб DF_i = 0. Залежність між потужністю передатчика Rx та чутливістю приймача RxSens для кожного i-го кібер-фізичного компонента STA_i та AP:

$$SNR_{AP} = Rx_{STA_i} - RxSens_{AP}; \tag{2}$$

$$SNR_{STA_i} = Rx_{AP} - RxSens_{STA_i}.$$

Вважається, що поріг фоновому шуму нижче за порогову чутливість приймача кожного з STA_i і AP, тому що, якщо рівень фоновому шуму для STA_i і AP однаковий — це ніяк не впливає на симетрію каналу [3].

Враховуючи, що клієнтські пристрої, як правило, оснащені незмінюваними антенами, потужність передавача й чутливість приймача кожного з STA_i вказується відразу з врахуванням антени. Тоді асиметрія каналу становить:

$$DF_i = (Tx_{AP} - Tx_{STA_i}) - (RxSens_{STA_i} - RxSens_{AP}). \tag{3}$$

З рівнянь (1)–(3) видно, що асиметрія каналу не залежить від типу антени на кожному з STA_i і AP (якщо не використовується багатопотокова технологія MIMO), а залежить від різниці між потужностями передавачів й чутливостями приймачів кібер-фізичних компонентів. В залежності від рівня падіння потужності через перешкоди підвищується частка ретрансляції даних, що передаються (рис. 2). При цьому час затримки у передачі даних зростає аж до повної втрати сигналу.

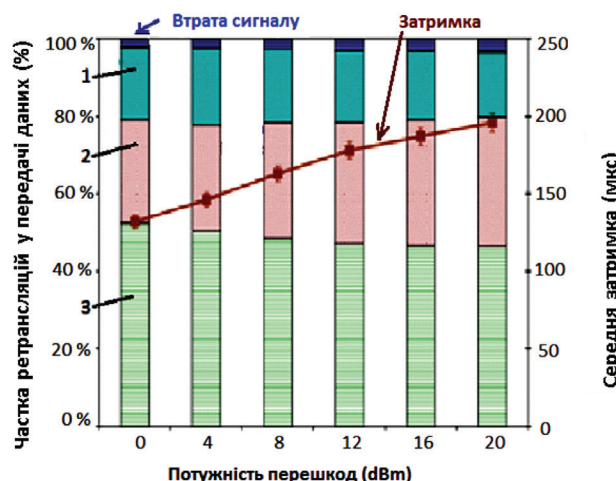


Рис. 2. Зростання затримки у часі передачі даних від кількості ретрансляцій: 1 — багаторазова ретрансляція; 2 — одноразова ретрансляція; 3 — без ретрансляцій

Для організації процесу ретрансляції необхідно по два бездротових мережевих інтерфейси на кожному CFO. Тоді у кожному випадку необхідної ретрансляції один бездротовий інтерфейс працює у режимі Отримувача даних від Клієнта, а другий — у якості Відправника даних Отримувачу (у разі наявності одного ретранслятора у mesh-топології) або іншому ретранслятору, якщо їх декілька на шляху між Адресантом та Отримувачем.

Треба зазначити, що у разі використання в якості Wi-Fi ретранслятора смартфона з ОС Android, остання повинна бути не нижче версії Android 4+.

Крім того, необхідно враховувати, що на підтримку 2-х лінків потрібні подвійні витрати електроенергії — тобто, час життєвого циклу UMV теж пропорційно скоротиться. Таким чином, ретранслятор погіршує енергетику лінків, для яких є пряма видимість, і призначений виключно для вирішення питання прямої видимості.

Якщо у топології сенсорної мережі роль CFO виконує кібер-оператор з ноутбуком, на якому, як правило, встановлений один вбудований Wi-Fi модуль, то для того, щоб зробити ретранслятор, необхідно додатково встановити Wi-Fi адаптер на USB-порт.

На борту UMV в такому разі доцільно встановлювати компоненти (мікросхеми), до яких вбудовано відразу по 2 передавача та приймача (2T2R), нп., на базі мікросхеми Realtek RTL8192CU або Ralink (MediaTek) RT3052 (табл. 1). Використання зазначених компонентів в обладнанні наземного CFO дозволить останньому виступати у якості AP відразу для декількох SSID — від 8 до 16 разом на 256 Клієнтів [6, 8].

За проведенням експериментом у міській місцевості швидкість сигналу, що передається, зменшується із збільшенням перешкод (дерева, рухомі перешкоди — живі істоти, авто- та ін.) та відстанню між Адресантом та Відправником інформації. З рис. 3 видно, що швидкість падає майже на порядок при досягненні максимально можливої за техпаспортом Wi-Fi модулів відстані у 200 м між об'єктами.

V, Мбіт/с

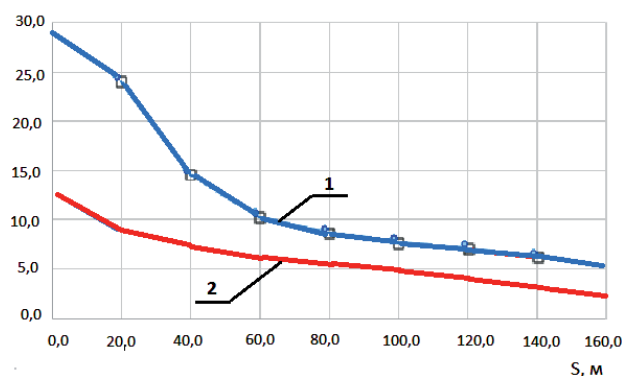


Рис. 3. Падіння швидкості передачі даних (V) від збільшення перешкод за відстанню (S): 1 — без додаткових електромагнітних перешкод; 2 — з додатковими електромагнітними перешкодами

Оскільки йдеться про малогабаритні швидкодинамічні сенсорні мережі, то можливість встановлення додаткових антен для збільшення дальності передачі даних не розглядається. Крім того, наявність електромагнітної перешкоди (лінія 2 на рис. 3) у вигляді трамвайної лінії електропередачі (600 В постійного струму) негативним чином впливає на пропускну здатність Wi-Fi каналу.

6. Результати досліджень

Спочатку в налаштуваннях Wi-Fi адаптера Ralink RT3290 802.11b/g/n був обраний режим з каналами # 1-13, які відповідають смузі частот 2,4 ГГц (рис. 4).

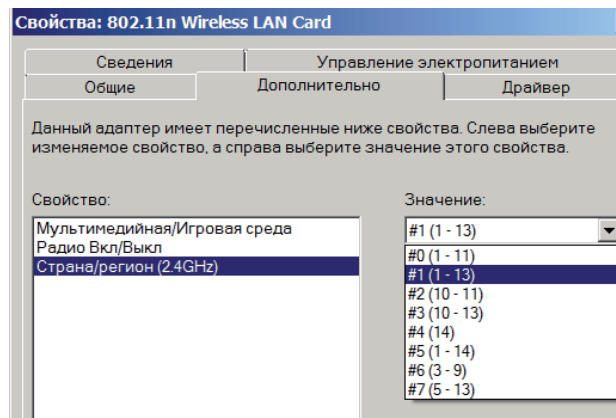


Рис. 4. Вибір між каналами # 1-13 у полісі 2,4 ГГц

За допомогою програми InSSIDer 4 [13] була проаналізована радіоситуація на обраних каналах (рис. 5), виконане тестування якості зв'язку в межах цільової мережі Wi-Fi, яка має SSID «u_r_not_prepared» (рис. 5, 6).

Результат показав незадовільні характеристики каналу зв'язку, коли відгук луна-пакету становив близько 2 секунд. Такі характеристики не дозволяють переглядати і обробляти переданий потік відеоданих в реальному часі.

Для поліпшення якості зв'язку було прийняте рішення звузити смугу пропускання каналу зв'язку. Як правило, це робиться шляхом використання у діапазоні 2,4 ГГц каналів # 1, 6, 11, які не перетинаються.

Але, з каналів діапазону 2,4 ГГц, які не перетинаються, найбільш вживаним є канал # 6. Цей канал встановлюється за замовченням у більшості комутаційного Wi-Fi обладнання. На рис. 5 також показано, що наявні 5 мереж, у яких потужність сигналу наближена до рівня сигналу цільової мережі з SSID «u_r_not_prepared»; ці 5 мереж відображаються в частково наведеній моніторинговій області програми InSSIDer. Таким чином, конфігурувати об'єкти CFS на цьому каналі # 6 не має сенсу.

Зважаючи на те, що у більшості UMV модулі Wi-Fi конфігуровані на граничні канали # 11-13 діапазону 2,4 ГГц [10], наступний експеримент з аналізу радіоситуації був виконаний з використанням програми-аналізатора InSSIDer 4 для ширини смуги пропускання, яка обмежується радіоканалами # 10-13 (рис. 4).

Встановлено, що цільова мережа з SSID «u_r_not_prepared» (рис. 7) має найбільшу потужність (мінус 69 dBm) в обраному каналі # 13 у порівнянні з наявними всього двома менш потужними сусідніми мережами (мінус 96 dBm), які працюють в цьому каналі.

Однак, така позитивна радіоситуація і відсутність шуму в каналі зв'язку між об'єктами CFS незначно поліпшили якість зв'язку (рис. 8). Замість 2-х секунд в попередньому експерименті, з новими налаштуваннями конфігурації кібер-фізичних компонентів час відгуку луна-пакету зменшився всього у два рази і склав близько 1-ї секунди. Такої швидкості зв'язку недостатньо для швидкодинамічних процесів.

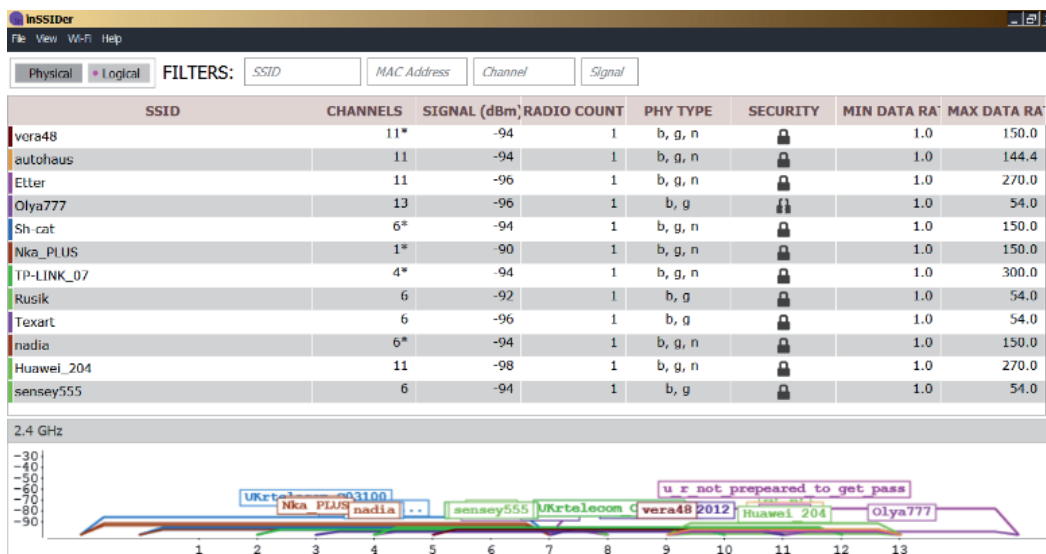


Рис. 5. Шумове забруднення навколишнього радіосередовища на каналах # 1-13 в полісі частот 2,4 ГГц

```
C:\>ping 192.168.0.22

Обмен пакетами с 192.168.0.22 по с 32 байтами данных:
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=1849мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=1мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=1849мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=1мс TTL=128

Статистика Ping для 192.168.0.22:
  Пакетов: отправлено = 4, получено = 4, потеряно = 0
  (0% потерь)
  Приблизительное время приема-передачи в мс:
  Минимальное = 1 мс, Максимальное = 1849 мс, Среднее = 925 мс
```

Рис. 6. Відповідь на ехо-пакети на каналах # 1-13 в полісі 2,4 ГГц

```
C:\>ping 192.168.0.22

Обмен пакетами с 192.168.0.22 по с 32 байтами данных:
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=984мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=1мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=987мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=1мс TTL=128

Статистика Ping для 192.168.0.22:
  Пакетов: отправлено = 4, получено = 4, потеряно = 0
  (0% потерь)
  Приблизительное время приема-передачи в мс:
  Минимальное = 1мсек, Максимальное = 987 мс, Среднее = 493 мс
```

Рис. 8. Відповідь на ехо-пакети на каналах # 10-13 в полісі 2,4 ГГц

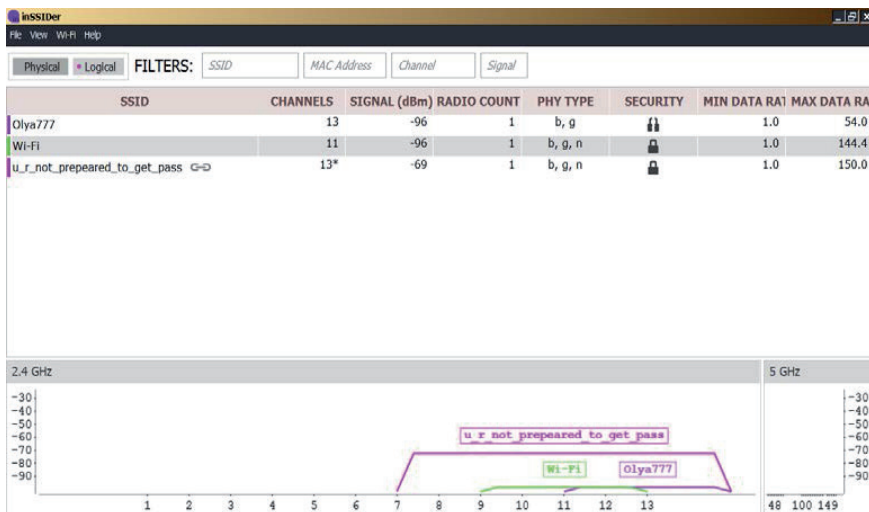


Рис. 7. Работа целевой сети с SSID «u_r_not_prepared» на незашумленных каналах # 10-13 у полісі частот 2,4 ГГц

Для поліпшення якості каналу зв'язку дослідимо симетрію каналу зв'язку між парою AP – Клієнт. Перевіримо попередні налаштування потужності сигналу передавача outdoor точки доступу D-Link DAP-3310 (рис. 9). Видно, що AP має в експерименті максимальну потужність передаваного сигналу (*Transmit Power*).

Перевіримо пінг між досліджуваними кібер-фізичними компонентами, коли потужність передавача виставлена у веб-інтерфейсі AP D-Link DAP-3310 на рівень 50 %. Можна побачити, що час відгуку луна-пакету знизився майже на порядок (рис. 10). У результаті останнього експерименту визначені умови значного поліпшення якості зв'язку в бездротовому каналі. Теоретична швидкість, що заявлена на рівні 54 Мбіт/с, в реальних умовах падає до 12 Мбіт/с на відстані 50 м (рис. 11, лінія 1). Це так через досить складну радіоситуацію на частоті 2,4 ГГц, тому що цей діапазон належить до неліцензійного ISM-діапазону. Також причиною зниження швидкості є інтерференція сигналів від інших мереж, які працюють на тому ж стандарті. Швидкість передачі даних може впасти до 1–2 Мбіт/с на тій же відстані для рухомих об'єктів. Відповідно, швидкість 54 Мбіт/с може бути забезпечена при чутливості приймача мінус 74 dBm ± 2. Якщо чутливість приймача становить мінус 90 dBm, швидкість падає до 2–5 Мбіт/с.

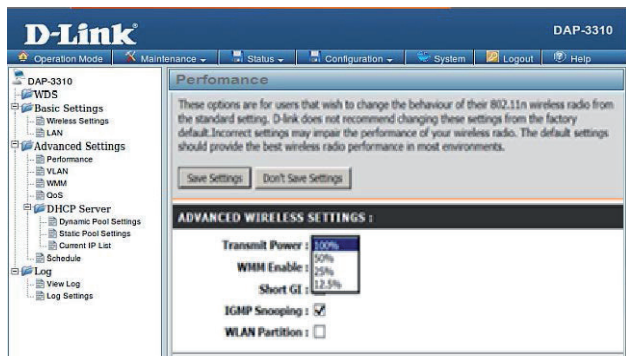


Рис. 9. Веб-інтерфейс налаштувань потужності сигналу на AP D-Link DAP-3310

```
C:\Users\IRA>ping 192.168.0.22
```

```
Обмен пакетами с 192.168.0.22 по с 32 байтами данных:
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=103мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=25мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=47мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.22: число байт=32 время=70мс TTL=128
```

Статистика Ping для 192.168.0.22:

Пакетов: отправлено = 4, получено = 4, потеряно = 0
(0% потерь)

Приблизительное время приема-передачи в мс:

Минимальное = 25мс, Максимальное = 103 мс, Среднее = 61 мс

Рис. 10. Відповідь на ехо-пакети на 50 % потужності сигналу DAP-3310

За інформацією компанії Cisco, передача даних за стандартом 802.11a/b/g може бути забезпечена з більш високим рівнем швидкості (рис. 11, лінія 3) на обладнанні Cisco Aironet Series 1130 AG [14]. Однак, ступенева зміна швидкості передачі даних у різних зонах CFS призведе до нерівномірного навантаження процесорів обчислювальних плат і, як наслідок, до перегріву і можливого «зависання» пристроїв кібер-операторів з подальшою втратою даних від фізичних компонентів (сенсори, відеокамери й т. п.).

Швидкість передачі даних в залежності від відстані у метрах показана на рис. 11, лінія 2. Ця залежність була отримана в результаті експерименту, описаного в цьому розділі статті.

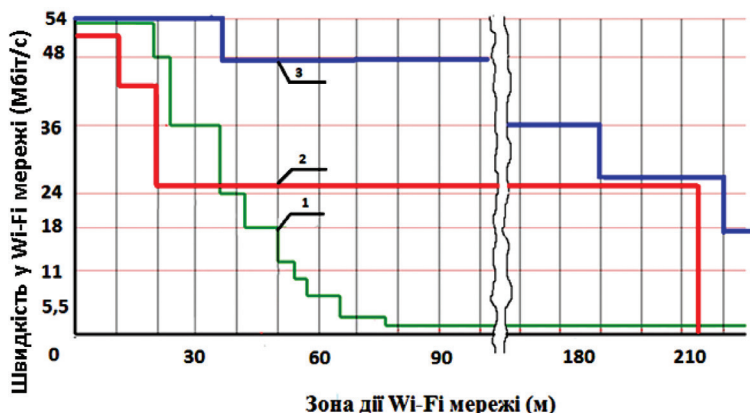


Рис. 11. Залежність швидкості стандарту 802.11g від відстані між бездротовими об'єктами: 1 — найпоширеніший варіант швидкості падіння нижче теоретичного рівня в реальних умовах; 2 — залежність у вищеписаних умовах стабілізації трафіку; 3 — залежність для обладнання Cisco

Швидкість передачі даних стабілізувалася на значенні 24 Мбіт/с по всій площині CFS (до 200 м) для поточної топології бездротової мережі.

Область експерименту була обмежена за причини значних перешкод від лінії електропередачі (ЛЕП) високої напруги. Ці шуми викликали різке падіння швидкості передачі даних і повне переривання каналу зв'язку між CFO, коли відстань між ними перевищила 200 м (лінії 1-3 за розривом на рис. 11), які є обмеженням у характеристиках зони дії вбудованих у CFO Wi-Fi модулів.

Для розширення дальності дії Wi-Fi мережі до 366 м можна при конструюванні UMV використати модуль Espressif ESP8266.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

В результаті проведеного дослідження взаємозалежностей характеристик та режимів роботи Wi-Fi модулів для забезпечення стабільного трафіку в CFS був запропонований адаптивний метод уникнення зниження швидкості через інтерференцію від точок доступу (Wi-Fi мереж), які не є вузлами mesh-топології CFS, але знаходяться у радіусі дії останньої. Застосування розробленого алгоритму перевизначення енергетичних та частотних характеристик кібер-фізичних компонентів в залежності від ефірної ситуації дозволило суттєво підвищити стабільність зв'язку між CFO. Виконана експериментальна верифікація розроблених методу та алгоритму, а також проведений порівняльний аналіз їх результатів з результатами ненормованого формування топології та бездротових каналів зв'язку CFS, доведені переваги запропонованого підходу.

Особливістю запропонованого адаптивного методу забезпечення стабільного бездротового зв'язку між рухомими об'єктами є те, що результати залежать від початкового ефірного стану у зоні дії CFS, заданої системи наявних перешкод, незалежних від характеристик CFO, а також від кількості запусків алгоритму адаптивного методу для одних і тих же вхідних даних (характеристик вузлів у топології CFS) з метою покращення зв'язку, що ускладнює повну автоматизацію процесу стабілізації швидкості.

Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку збільшення граничної відстані між вузлами бездротової CFS та розширення зони дії останньої за допомогою додаткових спеціальних конфігурацій антен з різними коефіцієнтами підсилення, а також за допомогою управління потужністю сигналу на кібер-фізичний компонентах всіх рівнів CFS.

Складнощі у впровадженні отриманих результатів дослідження пов'язані з двома основними чинниками. Перший з них — технологічна політика компаній-виробників комп'ютерних компонентів, яка обмежує характеристики вироблених модулів не теоретичними можливостями стандартів зв'язку, а ціновим фактором виробів. Другий фактор — форс-мажорні обставини при використанні CFS (погодні умови, застосування засобів радіоелектронної боротьби з рухомими CFO, електромагнітне випромінювання промислових об'єктів тощо). Тому, при

довгостроковому прогнозуванні вкладених коштів, необхідно враховувати тренди ринку новітніх матеріалів для конструювання UMV, які здатні посприяти покращенню розглянутих показників та суттєво змінити напрямок досліджень означених проблем.

8. Висновки

1. Запропоновано адаптивний метод покращення стабільності бездротового зв'язку між кібер-фізичними об'єктами шляхом перевизначення інтегрованих характеристик частоти та потужності Wi-Fi модулів комп'ютерних компонентів CFO в залежності від радіоситуації. Показано, що при певній сукупності вихідних параметрів, зниження максимальної потужності Wi-Fi модулю на 50 % покращує якість зв'язку майже у 8 разів. Проведені дослідження дозволили досягнути максимальної симетрії каналу зв'язку між об'єктами CFS та зрівняти між собою швидкості потоків up та down між CFO.

2. Виконане оцінювання зміни швидкості передачі даних від кількості ретрансляцій. Шляхом перескоку лінії зв'язку в інший частотний діапазон з меншим рівнем перешкод та впровадження функції ретрансляції сигналу засобами наявних CFO, що є вузлами mesh-топології CFS, покращені показники стабільності швидкості передачі даних на рівні 90 % замість 47 %, зазначених у пов'язаних літературних джерелах [14].

Література

- Melnyk, A. Cyber-Physical Systems Multilayer Platform and Research Framework [Text] / A. Melnyk // *Advanced of Cyber-Physical Systems*. — 2016. — Vol. 1, № 1. — P. 1–6.
- Musiyenko, M. The Principles of the Cyber-Physical Components' Organization Based on the Methods of the Multi-Agent Interaction of the Moving Objects [Text] / M. Musiyenko, I. Zhuravska, I. Burlachenko, O. Denysov // *Advanced of Cyber-Physical Systems*. — 2016. — Vol. 1, № 1. — P. 51–60.
- Friese, L. Emerging Unmanned Threats: The use of commercially-available UAVs by armed non-state actors [Text]: Special Report № 2 / L. Friese, N. R. Jenzen-Jones, M. Smallwood. — Perth, Australia: Armament Research Services (ARES), 2016. — 66 p. — ISBN 978-0-9924624-7-5.
- Single Chip IEEE 802.11a/b/g/n MAC/Baseband/ Radio with Integrated Bluetooth® 4.0 + HS and FM Transceiver [Electronic resource]: Preliminary Data Sheet BCM4330. — Available at: <http://linux-sunxi.org/images/0/05/4330-DS206-R.pdf>. — 15.09.2016.
- Gummadi, R. Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks [Text] / R. Gummadi, D. Wetherall, B. Greenstein, S. Seshan // *Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications — SIGCOMM '07*. — Association for Computing Machinery (ACM), 2007. — P. 385–396. doi:10.1145/1282380.1282424
- RTL8192CU [Electronic resource] // Realtek. — Available at: <http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Conn=4&Langid=1&Level=5&PFid=48&ProdID=277>. — 15.09.2016.
- Espressif ESP8266, Qualcomm Atheros AR9331 [Electronic resource] // Datasheet4u. — Available at: http://www.datasheet4u.com/share_search.php?sWord=ESP8266. — 15.09.2016.

- Ralink RT3290...RT5350 [Electronic resource] // Fast Data-sheets. — Available at: <http://datasheet-pdf.com/PDF/>. — 15.09.2016.
- Яцків, В. В. Теоретичні основи створення і структурна організація компонентів безпроводних сенсорних мереж підвищеної ефективності [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.05 / В. В. Яцків; НУ «Львівська політехніка». — Львів, 2016. — 40 с.
- Mahanti, A. Ambient Interference Effects in Wi-Fi Networks [Text] / A. Mahanti, N. Carlsson, C. Williamson, M. Arlitt // *NETWORKING 2010*. — Springer Science + Business Media, 2010. — P. 160–173. doi:10.1007/978-3-642-12963-6_13
- Полынкин, А. В. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами [Текст] / А. В. Полынкин, Х. Т. Ле // *Известия ТулГУ. Технические науки*. — 2013. — Вып. 7, Ч. 2. — С. 98–107.
- Musiyenko, M. P. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors [Text] / M. P. Musiyenko, I. M. Zhuravska, I. V. Kulakovska, A. V. Kulakovska // *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. — Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016. — P. 382–387. doi:10.1109/elnano.2016.7493090
- Troubleshoot Your Wi-Fi with InSSIDer [Electronic resource] // MetaGeek. — Available at: <http://www.inssider.com/>. — 15.09.2016.
- Cisco Aironet 1130AG IEEE 802.11a/b/g. Access Point [Electronic resource]: Data Sheet. — Available at: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1130-ag-series/product_data_sheet0900aecd801b9058.pdf. — 15.09.2016.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ В КИБЕР-ФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Исследован процесс передачи данных в кибер-физической системе (CFS) с подвижными объектами. Определена зависимость скорости передачи данных между указанными объектами от расстояния между ними при наличии электромагнитных помех. Доказано, что возможно обеспечить стабильную скорость передачи данных по стандарту 802.11 за счёт уменьшения асимметрии канала связи между киберфизическими объектами (CFO), на борту которых находятся компьютерные компоненты — Wi-Fi модули связи.

Ключевые слова: движущиеся объекты, стабильность беспроводной связи, кибер-физические объекты, компьютерные компоненты, Wi-Fi модули связи.

Журавська Ірина Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: dzhin@meta.ua.

Журавская Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра компьютерной инженерии, Черноморский национальный университет им. Петра Могилы, Николаев, Украина.

Zhuravska Iryna, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: dzhin@meta.ua