

Інь Ченлянь
Лазебний В.С., к.т.н.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕАЛЬНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

КПІ ім. Ігоря Сікорського

254771778@qq.com

volodsl54@gmail.com

Вступ

Безпроводові мережі стандарту 802.11 набули значного поширення для передавання головним чином мультимедійної інформації.

В мережах стандарту 802.11 всіх специфікацій основним способом доступу до радіоканалу є конкурентний доступ. У більш нових специфікаціях, зокрема в специфікаціях 802.11n та 802.11ac застосовано удосконалений механізм доступу для зменшення негативних наслідків від виникнення колізій, проте, небезпека колізій все ж залишається.

Для збільшення пропускної здатності безпроводової мережі у нових специфікаціях передбачено застосовувати кілька просторових каналів, об'єднання кількох частотних смуг стандартної ширини 20 МГц у смуги 40, 80, 160 МГц, здійснювати агрегування інформаційних пакетів.

Зручність користування безпроводовими з'єднаннями обумовила те, що всі сучасні комп'ютери та засоби мобільної комунікації обладнані адаптерами мереж стандарту 802.11.

Взаємний вплив безпроводових мереж призводить до деградації експлуатаційних показників. і

Окреслення проблеми

Удосконалення технології функціонування безпроводових мереж забезпечило дуже великі швидкості передавання сигнальних потоків за ідеальних

умов. Проте на практиці швидкості передавання інформаційних потоків значно відрізняються від розрахункової системної швидкості навіть за сприятливих умов функціонування мережі. Для потреб проектування та ефективної експлуатації безпроводових мереж необхідно знати реальні можливості таких мереж і причини, що їх обумовлюють.

Метою досліджень, наведених в даній статті є оцінити співвідношення реальної і розрахункової пропускної здатності безпроводових мереж та з'ясувати зовнішні чинники, що їх обумовлюють.

Результати експериментальних досліджень безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11

У процесі практичного застосування безпроводових мереж 802.11 різних специфікацій було з'ясовано, що реальна пропускна здатність радіоканалу мережі на багато менше ніж максимальна розрахункова сигнальна швидкість задекларована у відповідній специфікації [1-3].

Системні параметри безпроводових мереж різних специфікацій наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри безпроводових мереж різних специфікацій стандарту IEEE 802

Версія стандарту	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
Рік ратифікації	1997	1999	1999	2003	2009	2014	2017-2019
Робоча частота, ГГц	2,4/IR	2,4	5	2,4	2,4/5	5	2,4/5
Ширина смуги каналу зв'язку, МГц	20	20	20	20	20/40	20/40/80/160	20/40/80/160
Пікова фізична швидкість (PHY), Мбіт/с	2	11	54	54	600	6933	9608
Макс. кількість SU-потоків (SU-Streams)	1	1	1	1	4	8	8
Макс. кількість MU-потоків (MU-Streams)	–	–	–	–	–	4	8
Технологія передавання даних	DSSS, FHSS	DSSS, CCK	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Тип модуляції, швидкість кодування	DQPS KD	CCK	64-QAM, 3/4	64-QAM, 3/4	64-QAM, 5/6	256-QAM, 5/6	1024-QAM, 5/6
Макс. кількість носійних OFDM	–	–	64	64	13	512	2048
Рознесення носійних, кГц	–	–	312,5	312,5	312,5	312,5	78,125

Для оцінювання реальної пропускної здатності мережі 802.11 проаналізуємо результати оприлюднених досліджень.

У роботі [1] автором наведено результати вимірювання пропускної здатності радіоканалу безпроводових мереж, що функціонують за специфікаціями 802.11n та 802.11ac у разі застосування протоколів транспортного рівня UDP та TCP. В даному експерименті кожен мережу налаштовано на максимально можливу ширину частотного каналу, яку дозволяло обладнання – це 20 МГц для 802.11n у діапазоні 2,4 ГГц, ширина каналу 40 МГц для 802.11n у діапазоні 5

ГГц, і ширина каналу 80 МГц для 802.11ac (функціонує тільки у діапазоні 5 ГГц).

Схему досліджуваної мережі наведено на рис.1.

Схема складається з двох комп'ютерів (конфігурація: Intel Core i5 Quad Core 760 з частотою процесора 2.8 ГГц, 8 Гб оперативної пам'яті DDR3, жорсткий диск на 500 Гб (Western Digital), ОС Windows 7 SP1 64 біт).

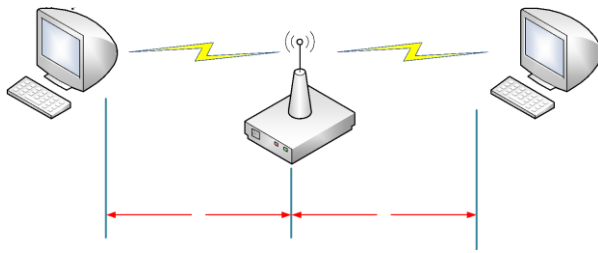


Рис.1. Схема безпроводової мережі 802.11 n/ас для визначення основних експлуатаційних параметрів [1]

На ПК встановлено безпроводовий дводіапазонний адаптер ASUS PCE-AC66 802.11ac, точка доступу, використана в експерименті – Linksys EA6500, що є також дводіапазонним мережним пристроєм. Для генерації дослідного інформаційного потоку використано програмний пакет Distributed Internet Traffic Generator (D-ITG) – безкоштовне програмне забезпечення з відкритим початковим кодом, сумісний з Windows 7. Також працює під Linux-похідними ОС (Ubuntu, Debian та ін.) I FreeBSD. D-ITG добре зарекомендував себе в тестуванні трафіка безпроводових локальних мереж [1].

Під час експериментів вимірювання характеристик мережі здійснено для однорідних потоків, сформованих із пакетів різної довжини, від 128 до 524288 байтів (точні значення: 128, 512, 2048, 8192, 32768, 131072, 524288 байтів). У першому експерименті вимірювали пропускну здатність TCP та UDP трафіка. У другому – вимірювали джитер (jitter) TCP та UDP трафіка. У третьому – затримку передавання пакетів. Результати вимірювань наведено на рис.2-3.

На графіках застосовано такі позначення AC v4 – графік, відповідний режиму 802.11ac (діапазон 5ГГц) й використанню пакетів згідно з протоколом IPv4; позначення N2,4 v6 – графік, відповідний режиму 802.11N у діапазоні 2,4ГГц з використанням пакетів згідно з протоколом IPv6.

Наведені на графіках значення пропускну здатності каналу значно відрізняються від тих, що наведено у специфікаціях стандарту 802.11, табл. 1.

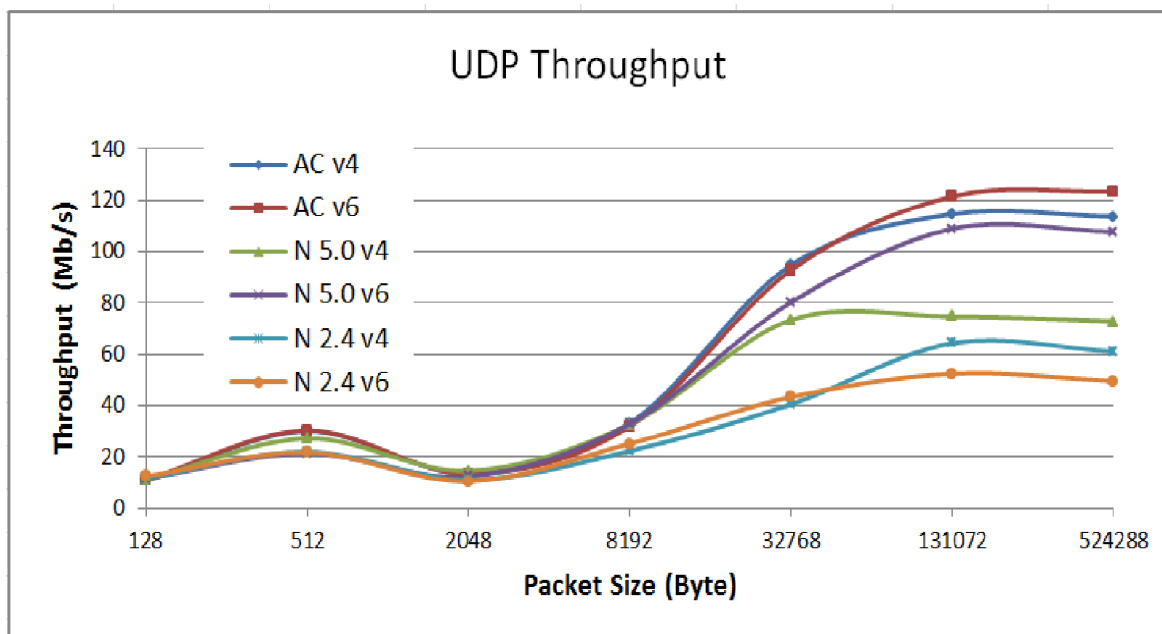


Рис.2. Пропускна здатність безпроводового каналу в разі передавання інформаційного потоку за протоколом UDP [1]

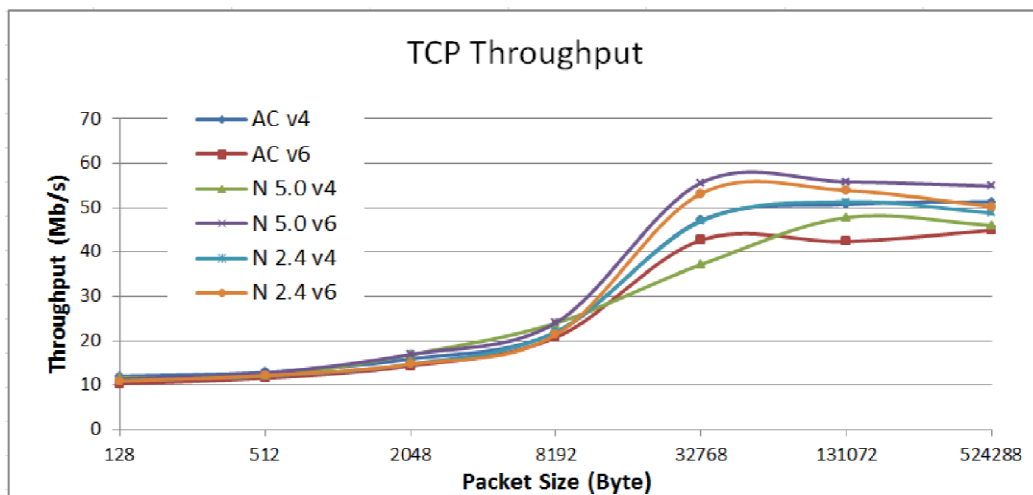


Рис.3. Пропускна здатність безпроводового каналу в разі передавання інформаційного потоку за протоколом TCP [1]

Отримані значення пропускної здатності каналу [1] доволі малі і автори досліджень не навели кількох важливих чинників, що характеризують умови проведення експериментів. Не вказано чи врахували автори той факт, що у наведеній схемі експерименту одночасно канал використовують дві станції: комп'ютер, з якого здійснюють передавання інформаційного потоку та точка доступу. Це дві станції, що конкурують за канал. І, якщо реальну швидкість вимірювали за швидкістю надходження інформації на другий комп'ютер (приймач), для визначення пропускної швидкості каналу треба наведену на графіках пропускну здатність збільшити у два рази. Але і в цьому разі пропускна здатність каналу особливо для кадрів з корисним навантаженням 128 – 2048 байтів значно менше задекларованої у специфікаціях.

У роботі не наведено результатів моніторингу електромагнітної обстановки під час проведення експериментів. Оскільки точка доступу, використана в експерименті, забезпечує адаптацію ширини частотної смуги з урахуванням рівня завад у каналі, то ймовірно усі експерименти було проведено з радіоканалом з шириною частотної смуги 20 МГц. Але навіть з урахуванням усіх зроблених зауважень отримані в експериментах значення пропускної здатності радіока-

налу дуже відрізняються від задекларованих у стандарті IEEE 802.11, табл.1.

Розглянемо результати досліджень реальної пропускної здатності радіоканалу мереж IEEE 802.11n/ас наведених у роботі [2]. Результати досліджень пропускної здатності безпроводового каналу мереж IEEE 802.11n/ас наведено залежно від відстані між абонентами мережі. Дослідження зроблено за ідеальних умов: відкритий майданчик, сигнал між антенами розповсюджується у просторі, обмеженому першою зоною Френеля, відсутні завади інших радіосистем у використаному радіоканалі. Експериментальні інформаційні потоки були сформовані для двох типів транспортних протоколів UDP та TCP. Розмір корисного навантаження одного кадру становив 1470 байтів.

У дослідженні використано антенний комплекс зовнішньої точки доступу MMJ344LV та модуль WPJ344, що забезпечує формування двох просторових потоків за специфікацією 802.11n та 802.11ac, та відповідне програмне забезпечення. Коефіцієнт підсилення антенного комплексу MMJ344LV становить 5 – 11 dBi (у роботі не наведено). Для передавання в експериментах використано два просторових потоки з шириною радіочастотного каналу 40 МГц для мережі 802.11n і 80 МГц для мережі 802.11ac. Результати досліджень наведено нижче.

Порівняльні графіки пропускної здатності безпроводової мережі у разі застосування протоколів транспортного рівня TCP та UDP, рис. 4 - 5.

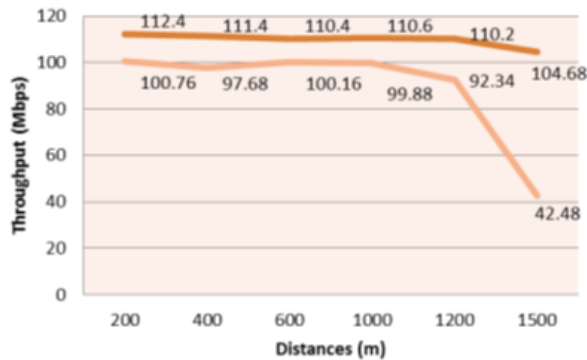


Рис. 4. Графіки залежності пропускної здатності каналу мережі 802.11 залежно від відстані між вузлами мережі для TCP трафіка [2]

Верхній графік на рис.4 отримано для лінії зв'язку 802.11ac, а нижній графік - для лінії за стандартом 802.11n.

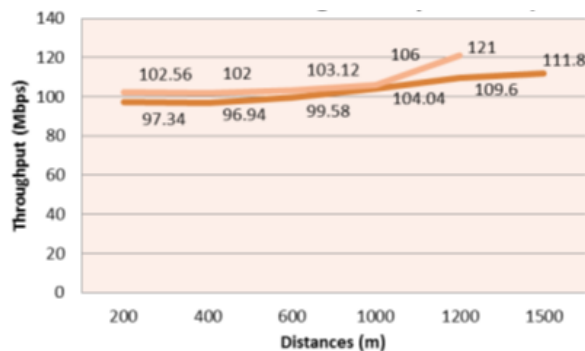


Рис. 5. Графіки залежності пропускної здатності каналу мережі 802.11 залежно від відстані між вузлами мережі для UDP трафіка [2]

Верхній графік на рис. 5 отримано для лінії зв'язку 802.11n, а нижній графік - для лінії за стандартом 802.11ac.

Як впливає з наведених графіків пропускна здатність радіоканалу мережі IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac у разі використання двох просторових каналів з розширеними частотними смугами становить приблизно 100-110 Мбіт/с. З урахуванням того, що подвоєння кількості просторових каналів призводить до подвоєння пропускної здатності, і розширення частотної смуги в два рази теж призводить до подвоєння пропускної здатності, пропускна здатність каналу

завширшки 20 МГц в разі використання транспортних протоколів UDP та TCP і інформаційних пакетів з корисним навантаженням 1470 байтів становить приблизно 25 - 30 Мбіт/с. Такі результати добре корелюють з результатами, отриманими в роботі [1].

Результати ще одного дослідження наведено у роботі [3]. Для оцінювання пропускної здатності безпроводового каналу використовували чотири типи різних смартфонів. Смартфон Nexus S працює тільки в діапазоні 2,4 ГГц. Інші три телефони працюють в обох діапазонах (у випадку мережі 802.11n), але вони забезпечують підтримку режиму об'єднання частотних смуг (ОЧС) тільки в діапазоні 5 ГГц. Для дослідження сформовано інформаційні потоки з UDP пакетів обсягом по 1470 байтів. Дослідження зроблено для двох частотних смуг 20 та 40 МГц та для різних схем модуляції та кодування (MCS). Результати досліджень пропускної здатності безпроводового каналу 802.11n наведено на рис. 6 - 7 [3].

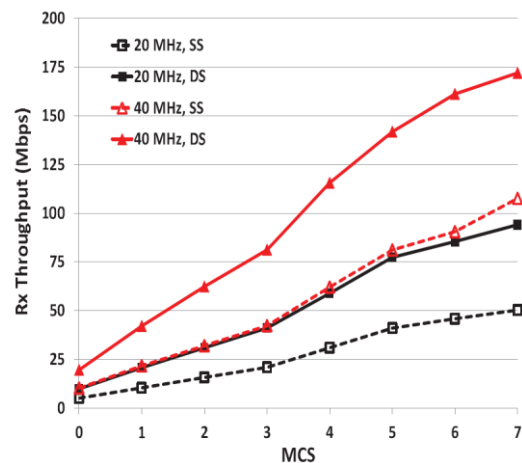


Рис. 6. Пропускна здатність каналу 802.11n для низхідного потоку

Результати досліджень пропускної здатності безпроводового каналу 802.11ac наведено на рис. 8.

Як впливає із наведених графіків пропускна здатність каналів мереж 802.11n та 802.11ac значно менше пропускної здатності задекларованої у відповідних специфікаціях стандарту [4, 5]. Отримана на практиці пропускна здат-

ність для потоків, складених із пакетів 1470 байтів (розмір близький до обмеження Ethernet), не перевищує 30% від максимальної розрахункової сигнальної швидкості.

З додатковими дослідженнями авторів цієї статті щодо пропускної здатності мереж 802.11 можна ознайомитись в [6].

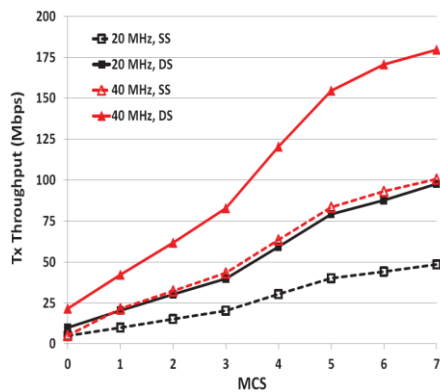


Рис. 7. Пропускна здатність каналу 802.11n для висхідного потоку

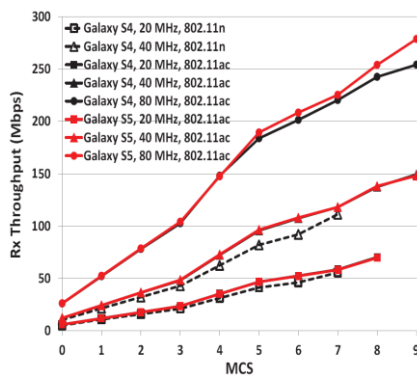


Рис. 8. Пропускна здатність каналу 802.11ac для низхідного потоку

Аналіз проблем широкого застосування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11

З виходом нових стандартів Wi-Fi, а також у зв'язку із загальним поширенням гаджетів, які функціонують в неліцензованому діапазоні частот, користувачі все частіше звертають увагу на те, що якість Wi-Fi мереж погіршується навіть за умови появи нових удосконалених специфікацій цього стандарту. Згідно зі статистикою, в усьому світі сьогодні використовують 6,4 мільярда безпроводових пристроїв. До 2020 року очікують, що кількість безпроводових пристроїв становитиме в середньому 2,8 на одну людину. Але причина деградації експлуатаційних параметрів Wi-Fi мереж обумовлена не тільки в збільшенні кількості пристроїв [6, 7].

На цю ситуацію впливає ще кілька причин.

По-перше, в кожному багатоповерховому житловому будинку або офісній споруді вже встановлено велику кількість безпроводових маршрутизаторів. Приклад наведено на рис. 9. На скріншоті наведено результати вимірювання завантаження частотного діапазону 2,4 ГГц, на п'ятому поверсі студентського гуртожитку протягом 5 хв. У період 20 год 37 хв – 20 год 42 хв.

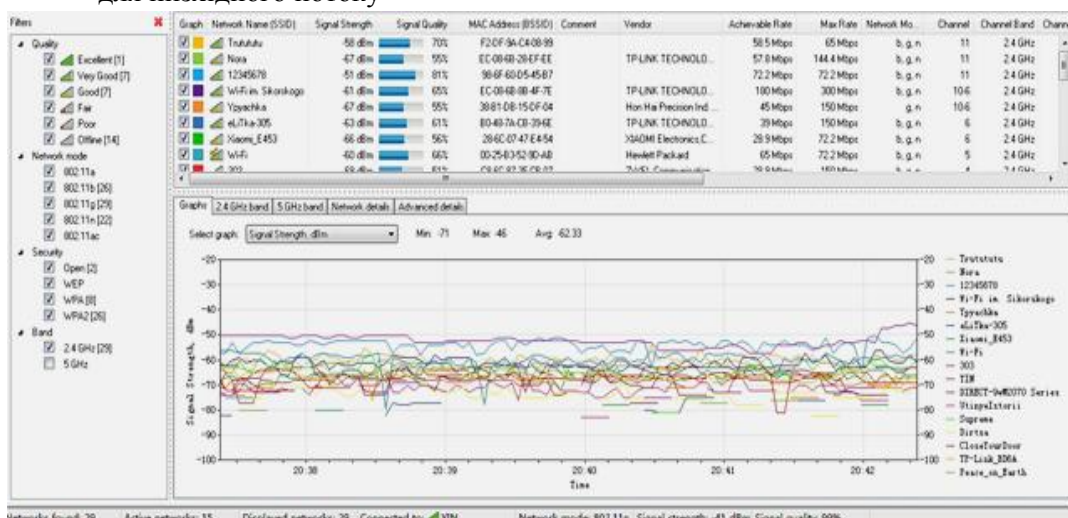


Рис.9. Результати вимірювання рівнів сигналів у частотному діапазоні 2,4 ГГц, на п'ятому поверсі гуртожитку №6 КПІ ім. Ігоря Сікорського

Наведені графічні залежності характеризують рівень потужності створюваний різними мережними засобами у точці вимірювання. Наведено лише частину джерел випромінювання та їх характеристики. Із наведених на рис.10 даних випливає, що всі мережі створюють одна одній доволі потужні завади оскільки частотні смуги каналів перекриваються (задіяні канали 11,10, 6, 5, 4 решту не відображено).

По-друге, попит на швидкісне передавання даних неухильно зростає, а це означає, що потрібно збільшувати частотні смуги радіоканалів, і як наслідок це веде до того, що каналів буде менше, але з досить широкими смугами. І третій, важливий чинник – стільникові оператори "скидають" трафік з мобільних мереж у Wi-Fi мережі (Wi-Fi Offloading).

Аналіз особливостей функціонування безпроводових мереж у нелицензованих діапазонах

Для використання технології Wi-Fi користувачі повинні дотримуватись певних технічних вимог, обумовлених частотними регуляторами, наприклад, у вигляді обмеження потужності. Домашні Wi-Fi-мережі функціонують в діапазонах 2,4 і 5 ГГц.

З фізичних причин у діапазоні 2,4 ГГц мережі функціонують краще: радіосигнали цього діапазону краще поширюються крізь стіни і на більші відстані порівняно з сигналами діапазону 5 ГГц (за однакового рівня потужності).

У різних країнах дозволено використовувати різну кількість каналів. Наприклад, в Україні, як і в Європі, використовують 13 каналів, а в Японії – 14, що дозволяє їм використовувати чотири канали, що не перекриваються, рис.10.

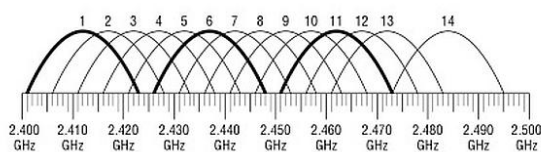


Рис. 10. Схема розподілу частотних каналів 22 МГц у діапазоні 2,4 ГГц [30]

У не ліцензованому діапазоні 2,4 ГГц, кожен радіоканал може бути завширшки 22 мегагерци, тому тільки деякі з усіх каналів можна використовувати одночасно так, щоб вони не заважали один одному. Як правило, це 1, 6 і 11 канали, рис.10.

Зсув частоти радіосмуги кожного наступного каналу становить 5 МГц. Тому, якщо на одній території функціонує більше трьох маршрутизаторів у діапазоні 2,4 ГГц, то вони однозначно створюють один одному завади.

Сигнали у смузі 5 ГГц мають меншу дальність поширення всередині приміщень, але ця смуга (діапазон від 5,80 до 5,825 ГГц) має 24 канали, що не перекриваються, завширшки 20 МГц в США. На п'ять менше в Європі та Японії. Це досить велика кількість додаткових каналів для безпроводового зв'язку, яка могла б вирішити проблему їх зайнятості обладнанням. Але приблизно половину цих каналів виділено для первинного використання метеорологічними і військовими радарми. Тому більшість користувацьких маршрутизаторів не використовують всі смуги [7].

У багатьох регіонах (особливо в мегаполісах) надмірне навантаження доступних каналів досягло такого рівня, що смугу 2,4 ГГц майже не можливо використовувати для передавання даних з високою швидкістю. Зарубіжний досвід такий, що деякі провайдери широкосмугових послуг (наприклад, AT & T, British Telecom, Comcast тощо) більше не використовують 2,4 ГГц для передавання відео або голосу. Майже всі виробники смартфонів, разом з Apple, більше не рекомендують використовувати свої смартфони на частоті 2,4 ГГц. Останній і найшвидший варіант Wi-Fi, IEEE 802.11ac, забезпечує роботу тільки в діапазоні 5 ГГц, хоча більшість обладнання Wi-Fi підтримує обидві смуги (в основному для підтримки старих мобільних пристроїв) [7].

Зміни умов функціонування мереж у діапазоні 5ГГц

Перенесення Wi-Fi-комунікацій з частот 2,4 ГГц у діапазон 5 ГГц на якийсь час вирішило проблему з надмірним навантаженням каналів, але від цього постраждав радіус дії мереж, тому багато споживачів звернулися до простих рішень для збільшення зони охоплення (наприклад, до різних підсилювачів і ретрансляторів). Популярності набули і mesh-мережі, які стали використовувати для отримання рівномірного Wi-Fi покриття у всіх частинах будівлі.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що мобільні оператори зв'язку вичерпали велику частину свого ексклюзивного спектра і планують протягом наступних трьох років переносити передавання мобільних даних на 60% в неліцензійний спектр, який використовують для Wi-Fi мереж. Технологія для цього рішення називається LTE-Unlicensed (LTE-U). Її використовують 4G LTE-базові станції для відправлення та приймання даних через ті ж частотні смуги 5 ГГц діапазону, що і Wi-Fi. Деякі організації, такі як Cable Television Laboratories, Google і Microsoft, відзначають, що LTE-U буде в цілому погіршувати роботу Wi-Fi мереж. У США Verizon і T-Mobile почали пробні розгортання LTE-U, щоб визначити його вплив на Wi-Fi. Оператори в Європі і Азії також планують подібні випробування [7].

Теоретично специфікація IEEE 802.11ac може забезпечити високу пропускну здатність безпроводового каналу, що дозволяє передавати відео високої якості. Ця специфікація Wi-Fi забезпечує гігабітні швидкості з'єднання. Але щоб можна було передавати дані з вказаною швидкістю, в 802.11ac передбачено об'єднання каналів. У разі реалізації найбільш високопродуктивної конфігурації IEEE 802.11ac Wave 3 передбачено об'єднувати весь доступний спектр Wi-Fi у два канали завширшки по 160 МГц. Це злиття означає, що тільки дві пари пристроїв можуть взаємодіяти із засто-

суванням найширшого каналу одночасно без взаємних завад. Тому, якщо у певному просторовому сегменті вже є дві точки доступу 802.11ac, то поява третьої призведе до значного зменшення швидкості передавання даних для всіх користувачів. В результаті ситуації, що склалася, всі ті додаткові переваги, які надавав діапазон 5 ГГц в порівнянні з 2,4 ГГц – зникли.

До певного поліпшення ситуації може призвести застосування технології динамічного вибору частоти (Dynamic Frequency Selection – DFS), яка полягає у використанні частотних каналів діапазону 5 ГГц, виділених для метеорологічних та військових радарів там де вони відсутні або в ті інтервали часу, коли радари не функціонують.

Висновки

1. Одночасне функціонування мереж IEEE 802.11 в обмежених частотних діапазонах призводить до значного зменшення пропускну здатності кожної з них.

2. Реальна пропускну здатність радіоканалів безпроводових мереж набагато менше максимальної розрахункової сигнальної швидкості, передбаченої у специфікаціях стандарту IEEE 802.11.

3. Велика кількість абонентського обладнання і обмежені частотні ресурси, виділені для організації безпроводових мереж IEEE 802.11 призвели до значного рівня завад у безпроводових каналах мереж, розгорнутих у густонаселених регіонах, що обумовило складнощі передавання потокової інформації (аудіо та відео) засобами безпроводових мереж.

4. Для більш ефективного використання можливостей безпроводового каналу потрібно удосконалювати систему адаптації режиму функціонування мережі до характеристик мережі і навколишнього середовища. За можливості (в установах і організаціях) треба розгортати безпроводові мережі з узгодженим

використанням частотного ресурсу і роумінгом.

Список літератури

1. Денисов Д. Тестирование TCP, UDP-трафика в сети Wi-Fi 802.11n/ac / Д. Денисов // WIRELESS UKRAINE. – 2012. – URL: [1.http://www.wireless.ua/1641-testirovanie-tcp-udp-trafika-v-seti-wi-fi-80211nac.html](http://www.wireless.ua/1641-testirovanie-tcp-udp-trafika-v-seti-wi-fi-80211nac.html).
2. Investigation of IEEE 802.11ac signal strength performance in Wi-Fi communication system / [R. K. Mardeni, A. R. Anuar, M. G. Salamat та ін.]. // Proceedings of Research World International Conference, Osaka, Japan. – 2016. – №3. – С. 16–20.
3. Saha S. Power-throughput tradeoffs of 802.11n/ac in smartphones / S. Saha, P. Deshpande, P. Inamdar. // INFOCOM IEEE. – 2015. – С. 100–108.
4. Шахнович И. Стандарт IEEE 802.11n – уж скоро / И. Шахнович. // Примирение непримиримых. – 2006. – №1. – С. 52–58.
5. Основные особенности стандарта 802.11ac. // CBS Компания. – 2016. – URL: <https://habr.com/ru/company/cbs/blog/2417/>.
6. Лазебний В.С. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації IEEE 802.11n/ Лазебний В.С., Ін Ченлян, Омелянець О.О. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського Серія: Технічні науки.- Том 29 (68). № 5 Частина 1, 2018. - С. 155-160.
7. Денисов Д. В Wi-Fi «закончилися» частоты. Решение - DFS / Д. Денисов // Nag.ru. – 2017. – URL: <https://nag.ru/articles/article/32561/v-wi-fi-zakonchilis-chastoty-reshenie-dfs.html>.

Інь Ченлян,
Лазебний В.С., к.т.н.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕАЛЬНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

У роботі зроблено узагальнення результатів експериментальних досліджень пропускної здатності безпроводових мереж IEEE 802.11n/ac. Проаналізовано результати передавання інформаційних потоків, що складаються з пакетів різного розміру, із застосуванням транспортних протоколів TCP та UDP. Розглянуто мережі складені з настільних ПК та мережі з мобільними пристроями. Проаналізовано проблеми з подальшим використанням неліцензованих смуг 2,4 ГГц та 5 ГГц. У мережах IEEE 802.11 всіх специфікацій конкурентний доступ є основним способом доступу до радіоканалу. Нові специфікації, зокрема специфікації 802.11n та 802.11ac, мають удосконалений механізм доступу для зменшення негативних наслідків колізій, однак ризик колізій залишається. Результати, отримані дослідниками, були проаналізовані щодо пропускної здатності безпроводових мереж, що працюють згідно зі специфікаціями 802.11n та 802.11ac у випадку протоколів транспортного рівня UDP та TCP. У цих експериментах кожна мережа була налаштована на максимальну смугу частот, дозволена обладнанням – 20 МГц для 802.11n в діапазоні 2,4 ГГц, 40 МГц для 802.11n в діапазоні 5 ГГц і 80 МГц для 802.11ac. Однорідні досліджувані потоки інформації було складено з пакетів різного розміру від 128 до 524288 байт. Досліджено потоки, складені за протоколами IPv4 та IPv6. Отримана пропускна здатність мережі не перевищувала 40 Мбіт/с під час передавання потоків, що складаються з пакетів від 128 до 8192 байт. На нашу думку, дослідники не правильно оцінили результати, і ми зробили відповідні пояснення. Були також проаналізовані результати інших авторів, які досліджували пропускну здатність мереж IEEE 802.11n/ac для мобільних телефонів різних типів. Дослідження здійсне-

но за ідеальних умов для потоків складених з пакетів по 1470 байтів. Пропускна здатність, отримана для таких потоків (близько до обмеження Ethernet), не перевищує 30% від максимальної розрахункової швидкості передавання. Ми пояснили ці результати та обґрунтували необхідність додаткових досліджень для створення вдосконаленої моделі каналу IEEE 802.11.

Ключові слова: безпроводова мережа, неліцензований діапазон, пропускна здатність, просторовий потік, транспортний протокол, рівень завад.

**Yin Chenglian,
Lazebny V.S.**

ANALYSIS OF THE RESEARCH OF REAL BANDWIDTH IN STANDARD IEEE 802.11 WIRELESS NETWORKS

The paper summarizes the results of experimental studies of the bandwidth of 802.11 wireless networks of the most common specifications n and ac. The results of transmission of information flows consisting of packets of different sizes using TCP and UDP transport protocols are analyzed. Considered are networks composed of desktops and networks with mobile users. Problems with the continued use of unlicensed 2.4 GHz and 5 GHz bands are analyzed. In the 802.11 networks of all specifications, competitive access is the main way to access the radio channel. The newer specifications, in particular the 802.11n and 802.11ac specifications, have an improved access mechanism to reduce the adverse effects of collisions, however, the risk of collisions remains. The results obtained by the researchers was analyzed for the bandwidth of wireless networks operating according to the specifications of 802.11n and 802.11ac in the case of UDP and TCP transport layer protocols. In these experiments, each network was tuned to the maximum frequency bandwidth allowed by the equipment - 20 MHz for 802.11n in the 2.4 GHz band, 40 MHz for 802.11n in the 5 GHz band, and 80 MHz for 802.11ac (only works in 5 GHz band). Homogeneous information flows investigated was made up of packets of various sizes from 128 to 524288 bytes. The streams compiled according to IPv4 and IPv6 protocols are investigated. The network bandwidth received did not exceed 40 Mbps when transmitting streams consisting of packets of 128 to 8192 bytes. In our opinion, the authors did not correctly evaluate the results and we made the appropriate explanations. The results of other authors who have investigated the bandwidth of IEEE 802.11n / ac networks in the case of different types of mobile phones have also been analyzed. The studies were made under ideal conditions for streams consisting of packets of 1470 bytes. The bandwidth received for streams composed of packets of 1470 bytes (near the Ethernet limit) does not exceed 30% of the maximum estimated signal rate. We have explained these results and justified the need for additional research to create an advanced model for the operation of the IEEE 802.11 wireless channel.

Key words: wireless network, unlicensed bandwidth, throughput, spatial flow, transport protocol, interference level