

Гніденко М.П., к.т.н.; Кобижча Б.В.;  
Кичигін А.В.; Шкапа Ю.В.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМЕНУ КОЛІЗІЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ БЕЗПРОДОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

**Hnidenko N.P., Kobyzhcha B.V., Kychyhin A.V., Shkapa Y.V. Investigation of the influence of the collision domain on the efficiency of the wireless communication.**

The data channel in the wireless network is essentially a collision domain of the 802.11 standard. In networks with a very high density of VHD subscribers, one of the best strategies to increase the total airtime is to achieve spatial reuse. Spatial reuse of a radio frequency resource is extremely difficult to achieve in practice in very high density zones due co-channel interference CCI and adjacent-channel interference ACI. To understand how to mitigate the effects of interference, the mechanisms by which they impair system performance should be explored. The investigation shows that there is a significant impact on reducing the performance of high-density wireless networks due to suboptimal radio frequency resource planning, which leads to an increase in the impact of co-channel interference CCI and adjacent-channel interference ACI as the number of subscribers increases. The transmissions rate can be reduced by increasing the number of clients to 100. At the same time, there is the potential to increase the performance of a high-density VHD wireless network through good frequency resource design and best configuration practices combined with cell size reduction to limit co-channel interference CCI and adjacent-channel interference ACI.

**Keywords:** Wireless network of very high density VHD, collision domain, co-channel interference CCI, adjacent-channel interference ACI, clear channel assessment CCA, energy detection ED threshold, preamble detection PD threshold.

**Гніденко М.П., Кобижча Б.В., Кичигін А.В., Шкапа Ю.В. Дослідження впливу домену колізій на ефективність безпроводового зв'язку.**

Проведене дослідження показує, що існує значний вплив на зменшення продуктивності безпроводових мереж з дуже високою щільністю абонентів завдяки неоптимальному плануванню радіочастотного ресурсу по мірі збільшення кількості абонентів. В той же час існує можливість підвищення продуктивності безпроводової мережі з дуже високою щільністю VHD завдяки хорошему дизайну частотного ресурсу та використанню найкращих практик конфігурації у поєднанні з функцією зменшення розміру комірки.

**Ключові слова:** Безпроводова мережа дуже високої щільності VHD, домен колізій, міжканальна інтерференція CCI, інтерференції сусіднього каналу ACI, механізм визначення незайнятості каналу CCA, поріг виявлення енергії ED, поріг виявлення преамбули PD.

**Гніденко Н.П., Кобыжча Б.В., Кичигин А.В., Шкапа Ю.В. Исследование влияния домена коллизий на эффективность беспроводной связи.**

Проведенное исследование показывает, что существует значительное влияние на уменьшение производительности беспроводных сетей с очень высокой плотностью абонентов благодаря неоптимальному планированию радиочастотного ресурса по мере увеличения количества абонентов. В то же время существует возможность повышения производительности беспроводной сети с очень высокой плотностью VHD благодаря хорошему дизайну частотного ресурса и использования лучших практик конфигурации в сочетании с функцией уменьшения размера ячейки.

**Ключевые слова:** Беспроводная сеть очень высокой плотности VHD, домен коллизий, межканальная интерференция CCI, интерференция соседнего канала ACI, механизм определения незанятости канала CCA, порог обнаружения энергии ED, порог обнаружения преамбулы PD.

### Вступ

Канал передачі даних у безпроводовій мережі за своєю сутністю представляє собою домен колізій стандарту 802.11. В радіосистемах може виникати інтерференція один з одним, якщо два передавачі намагаються здійснити передачу одночасно на одній і тій же частоті.

В [1] було визначено фізичний «край» домену колізій як точку, коли відношення сигнал/шум (signal-to-interference-plus-noise ratio - SINR) прийнятого сигналу опускається нижче порогу 4 дБ. Швидкість передачі даних залежить безпосередньо від відношення сигнал/шум (SINR), що вимірюється на приймачі. «Край» домену колізій є SINR, необхідний для декодування сигнального поля (Signal field - L-SIG) застарілої преамбули Legacy Preamble, яка повинна бути надіслана за допомогою модуляції BPSK (Binary Phase Shift Keying). BPSK вимагає SINR 4 дБ. Преамбули, які опускаються нижче цієї величини, стають шумом. Отже, фізичний край будь-якого домену колізій завжди визначається як відстань, на якому SINR дорівнює 4 дБ. В [1] також було проаналізовано розуміння та використання ефірного часу та як працюють канали Wi-Fi під великим навантаженням для забезпечення високої пропускної здатності.

Після максимальної ефективності використання ефірного часу наступною найкращою стратегією збільшення загального ефірного часу є досягнення просторового повторного використання. Якщо два або три пристрої можуть одночасно використовувати один і той же радіочастотний спектр, можна збільшити доступний ефірний час у два-три рази. Це збільшення, в свою чергу, призводить до еквівалентного збільшення загальної пропускної здатності системи.

Основне питання, на яке необхідно відповісти, полягає в наступному: які вимоги до ізоляції для створення справді незалежних доменів колізій? Для досягнення просторового повторного використання радіочастотного ресурсу домен колізій повинен бути незалежним за часом, незалежним від виявлення преамбули та незалежним від виявлення енергії. Просторового повторного використання радіочастотного ресурсу надзвичайно важко досягти на практиці в зонах з дуже високою щільністю (very high-density - VHD) через перешкоди міжканальної інтерференції (co-channel interference - CCI). Щоб зрозуміти, як пом'якшити CCI та інтерференцію сусіднього каналу (adjacent-channel interference - ACI), слід дослідити механізми, за допомогою яких вони погіршують продуктивність системи.

### **1. Вплив міжканальної інтерференції на зменшення продуктивності безпроводової локальної мережі.**

Коли станція стандарту 802.11 має дані для відправки та починає процес арбітражу, вона спочатку використовує механізм визначення незайнятості каналу (clear channel assessment - CCA), щоб визначити, що канал в даний час не працює.

На відміну від Ethernet, де колізії можна фізично виявити, коли два або більше кадрів стикаються в ефірі, в даному випадку подібне зробити неможливо. 802.11 використовує двокомпонентне рішення цієї проблеми. Контроль віртуальної несучої та контроль фізичної несучої повинні повідомляти про непрацюючий канал, перш ніж станція 802.11 ініціює процес конкурентного вікна Enhanced Distributed Channel Access (EDCA).

Контроль фізичної несучої: щоб канал не працював, радіо повинно повідомити, що енергія не виявляється вище визначеного порогу. Це означає, що неможливо виявити жодної передачі радіо, Wi-Fi чи не Wi-Fi. Відповідно до стандарту 802.11ас поріг виявлення енергії (energy detection - ED) становить -62 дБм для ширини каналу 20 МГц. Цей поріг збільшується на 3 дБ для кожного подвоєння ширини каналу до 80 МГц.

Контроль віртуальної несучої: щоб канал не працював, вектор розподілу мережі (Network Allocation Vector - NAV) повинен бути нульовим. По суті, NAV - це таймер, який завжди здійснює відлік. Поки NAV більше нуля, контроль віртуального несучої знає, що середовище передачі зайнято. Коли будь-яка станція Wi-Fi декодує кадр із дійсним полем тривалості рівня 1 або рівня 2, вона встановлює для цього значення NAV.

Відповідно до стандарту 802.11 нижній поріг виявлення для передач 802.11ас вказаний в табл. 1.

Однак, хоча стандарт вимагає лише -82 дБм у первинному каналі для виявлення преамбули (preamble detection – PD), на практиці сучасні радіосигнали мають значно кращі показники. Наприклад, економічний 802.11ас Aruba AP-205 має чутливість прийому для

застарілого OFDM BPSK -93 дБм. Враховуючи, що кожні 6 дБ потужності відповідають подвоєнню відстані у вільному просторі, це вдосконалення на 11 дБ дорівнює майже 4-кратному збільшенню радіуса інтерференції PD порівняно з -82 дБм, що вимагається стандартом.

Таблиця 1

Смуга пропускання	Поріг виявлення преамбули (основний канал)	Поріг виявлення преамбули (резервний канал)	Поріг виявлення енергії
20 МГц	-82 дБм	-72 дБм	-62 дБм
40 МГц	-79 дБм	-72 дБм	-59 дБм
80 МГц	-76 дБм	-69 дБм	-56 дБм
160 МГц	-73 дБм	n/a	n/a

Коли станції Wi-Fi проходять процес EDCA для відліку випадкового значення відмови, яке вони вибрали для арбітражу, вони постійно опитують ССА, щоб перевірити, чи канал все ще не працює. Якщо ССА повідомляє, що канал зайнятий, станція змушена зупинити свій арбітраж, поки ССА не повідомить, що канал знову вільний.

Міжканальна інтерференція (co-channel interference - CCI) має величезний негативний вплив на загальну ефективність у зонах VHD. Вплив великий навіть тоді, коли канали не використовуються повторно всередині самої зони VHD, оскільки ті самі канали, як правило, повторно використовуються поблизу точками доступу зовні. Стіни та підлоги можуть забезпечити певну ізоляцію, але навіть дуже ослаблені застарілі преамбули 802.11 часто можуть бути декодовані все більш чутливими радіостанціями в сучасних мережевих адаптерах.

Важливою концепцією CCI є те, що будь-якому пристрою Wi-Fi, який виявляє преамбулу 802.11, забороняється передавати або приймати будь-яку іншу передачу до закінчення цього кадру. Не має значення, якщо навіть передаюча та приймальна станції є частиною одного базового набору послуг (Basic Service Set - BSS). Поки вони знаходяться на одному каналі і можуть декодувати застарілі преамбули, що передують кадрам, це обмеження існує. Також не має значення, пошкоджено корисне навантаження кадру чи ні, до тих пір, поки поле L-SIG у преамбулі може бути успішно відновлено.

Якщо два пристрої, які хочуть передавати одночасно, достатньо ізольовані один від одного, щоб вони не могли декодувати застарілі преамбули один одного, тоді вони можуть передавати. На рис. 1 показано як ситуації, так і наслідки, що впливають на загальну потужність.

Цей ефект дуже легко виміряти і це чудовий проект простої лабораторії для будь-якого архітектора WLAN. Необхідно налаштувати дві точки доступу на одному каналі, кожен з одним клієнтом. Виконується тест швидкості на одній AP. Потім запускаються обидві точки доступу разом. Можна побачити, що загальна пропускна здатність комбінованого тесту приблизно така ж, як і окремих тестів, але була розділена між двома точками доступу.

## 2. Вплив інтерференції сусіднього каналу на зменшення продуктивності безпроводової локальної мережі.

Спектральна маска передачі 802.11 у частотній області дозволяє отримувати значну енергію за межами смуги пропускання основного каналу. Маска показана на рис. 2. Хоча можна спроектувати радіостанції з більш точними фільтрами, внаслідок цього збільшення вартості та фізичний розмір радіоприймача будуть непомірними для типових продуктів Wi-Fi.

Енергія поза номінальною огинаючою може безпосередньо блокувати канали по обидві сторони, якщо вона досить сильна, або просто викликати шум і збільшити похибки. У більшості корпоративних розгортань інтерференції сусіднього каналу ACI не є фактором, оскільки точки доступу на сусідніх каналах розділені принаймні на 20 м. Очікувані втрати

вільного простору на цій відстані становлять щонайменше 80 дБ в діапазоні 5 ГГц, що забезпечує адекватну ізоляцію, щоб мінімізувати або уникнути впливу АСІ на продуктивність.

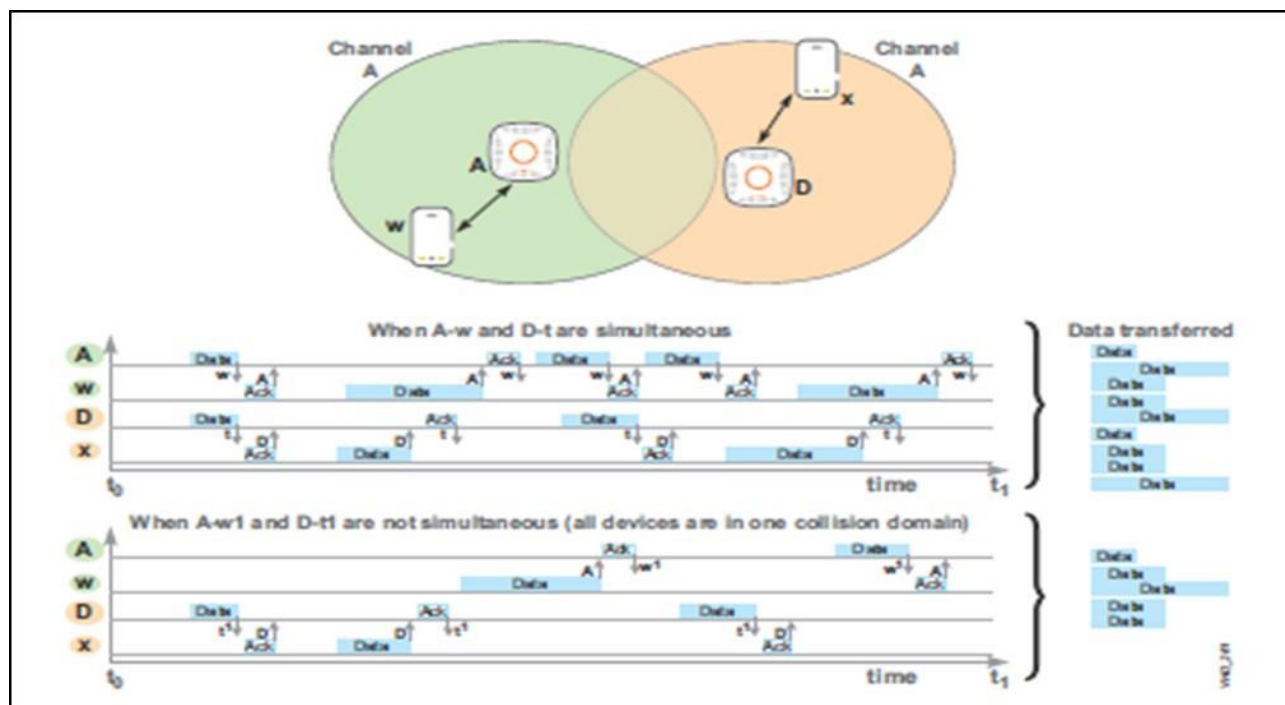


Рисунок 1. Поведінка двох пристроїв Wi-Fi із CCI та без неї

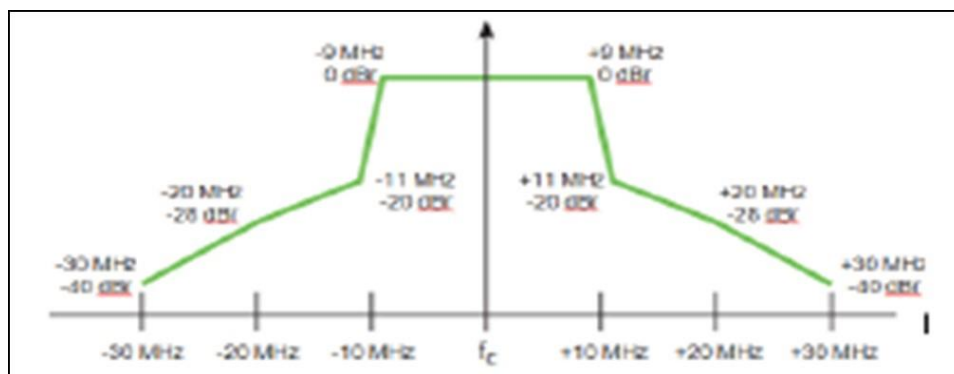


Рисунок 2. Спектральна маска 802.11 для ширини каналу 20 МГц

Однак у безпроводовій локальній мережі VHD з безліччю суміжних точок доступу AP та користувацьких пристроїв, розташованих близько один до одного, сигнали Wi-Fi можуть прийматися на досить високих рівнях потужності, щоб механізм виявлення енергії ED приводив до того, що механізм визначення незайнятості каналу CCA вважав канал зайнятим. У цій ситуації сусідні канали фактично стали частиною одного і того ж домену зіткнення. Ця проблема є ще більш значущою для сусідніх клієнтів, які ще численніші та щільніше упаковані, ніж точки доступу. Отже, при щільності, необхідній для безпроводових мереж HD, так звані канали 5 ГГц «що не перекриваються» насправді можуть перекриватися.

Розглянемо безпроводову локальну мережу VHD на рис. 3, яка має три пари точки доступу та клієнтів, кожен з яких знаходиться на сусідньому 20-МГц каналі. Пари 1 і 3 передають важкий циклічний трафік, такий як відеопотік. Усі шість станцій налаштовані на використання максимально еквівалентної ізотропної потужності випромінювання (EIRP).

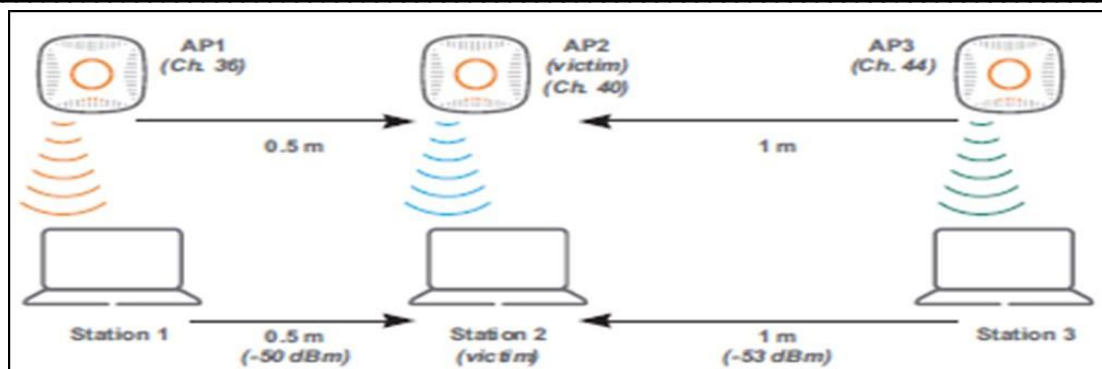


Рисунок 3. Приклад роботи АСІ з точками доступу та клієнтами на невеликій відстані

AP2 і станція 2 на каналі 40 тепер хочуть передавати і виконують ССА. Пара 1 знаходиться лише на відстані 0,5 метра, тому їх передачі приймаються на рівні -50 дБм, але сигнали від пари 2 знаходяться на відстані 1 метру та приймаються на рівні -53 дБм. Ані AP2, ані станція 2 не можуть передавати, оскільки виявлена енергія перевищує поріг ССА, навіть якщо ніхто інший не використовує канал 40.

На рисунку 4 показано перекриття спектральних масок передачі. Особливо всередині приміщень VHD з високими умовами багато променевості, з мінімальними втратами вільного простору між станціями, край спектральної маски може легко становити -70 дБм або вище.

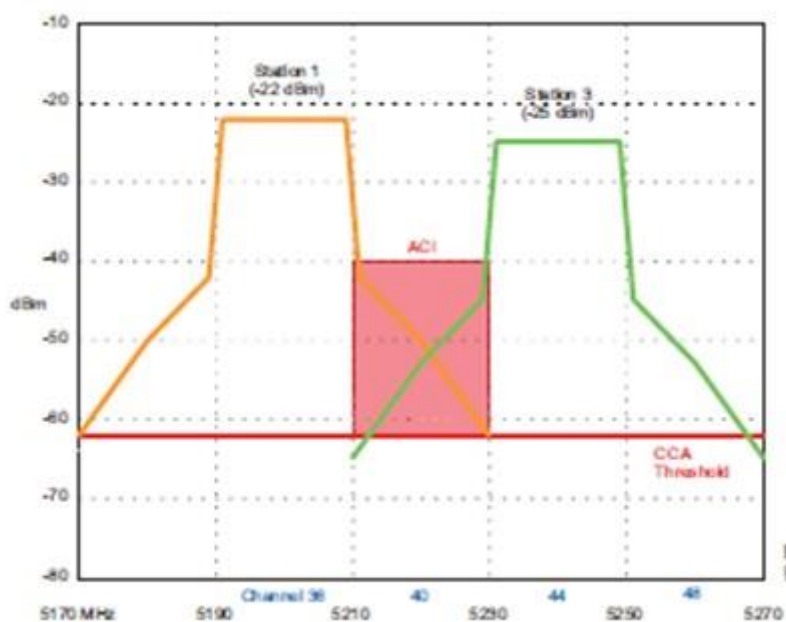


Рисунок 4. Ілюстрація АСІ на короткій відстані

Щоб кількісно оцінити цей ефект була протестована АСІ у лабораторії VHD. Групу із 100 станцій Wi-Fi було поділено на квадранти по 25 пристроїв у кожній. Чотири точки доступу AP-225 були налаштовані на сусідні канали (100, 104, 108 і 112). Точки доступу знаходились на стелі приблизно на відстані 3 метрів. Було використано максимум EIRP +23 дБм.

Для кожного типу клієнтських пристроїв (смартфон 1SS, ноутбук 2SS та ноутбук 3SS) був протестований кожен квадрант окремо та були підсумовані результати. Після цього всі чотири квадранти були запущені одночасно. Результати для смартфонів показано на рис. 5 та результати для ноутбуків показано на рис. 6.

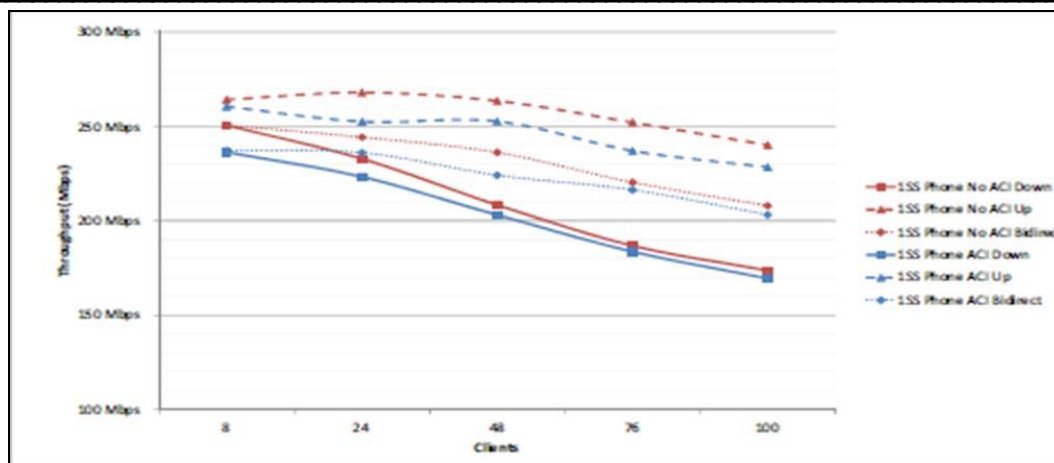


Рисунок 5. Результати тесту АСІ для смартфонів 1SS 802.11ac (AP-225, канал 80 МГц)

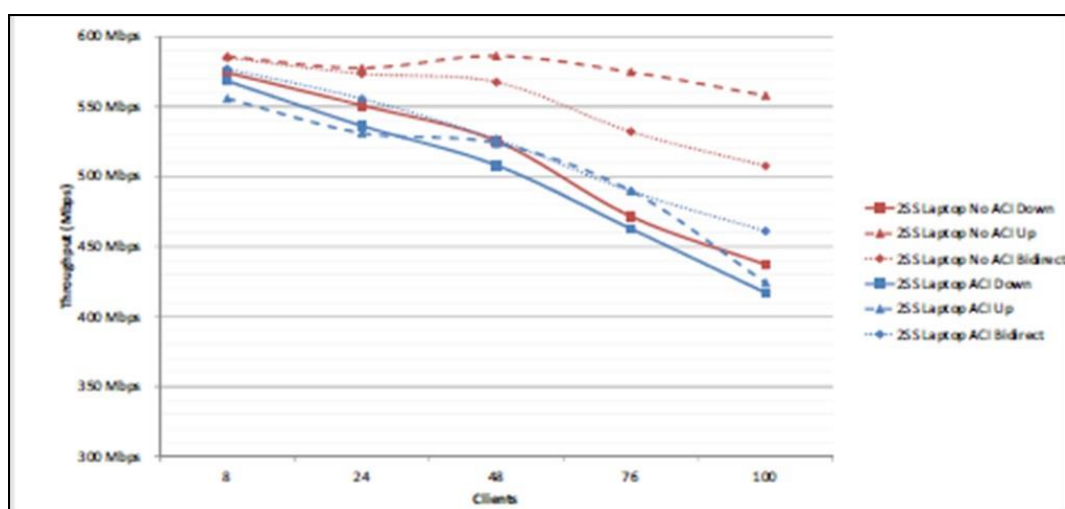


Рисунок 6. Результати тесту АСІ для ноутбуків 2SS 802.11ac (AP-225, канал 80 МГц)

Погіршення АСІ для телефонів 1SS та ноутбуків 2SS цілком реальне. Погіршення спостерігалось у всіх тестах, в діапазоні від 2% до 10%. Деградація при збільшенні кількості клієнтів була найбільш вираженою і свідчила про те, що окремі квадранти блокували один одного на рівні пристрою. Це має сенс, оскільки клієнтські пристрої набагато щільніше упаковані, ніж точки доступу.

### 3. Радіус інтерференції виявлення енергії ED та виявлення преамбули PD.

Максимальний радіус інтерференції до порога виявлення енергії значно відрізняється від такої для вектору розподілу мережі NAV. Треба розуміти цю відмінність, коли здійснюється планування зони VHD з кількома точками доступу на одному каналі. Хоча ED, по суті, є явищем короткої дії, а PD - явищем дуже далекого дії.

У застарілій преамбулі використовується модуляція BPSK 6 Мбіт/с, для декодування якої потрібно лише 4 дБ SINR (рис. 7). Поле тривалості рівня 1 міститься в полі L-SIG у цій преамбулі. Як результат, його можна декодувати на надзвичайно далеку відстань і навіть решта корисного навантаження кадру використовує набагато більшу швидкість передачі даних. Наприклад, преамбула, яка досягає -86 дБм, призводить до того, що CCA стверджує, що вона зайнята шумом в -90 дБм.

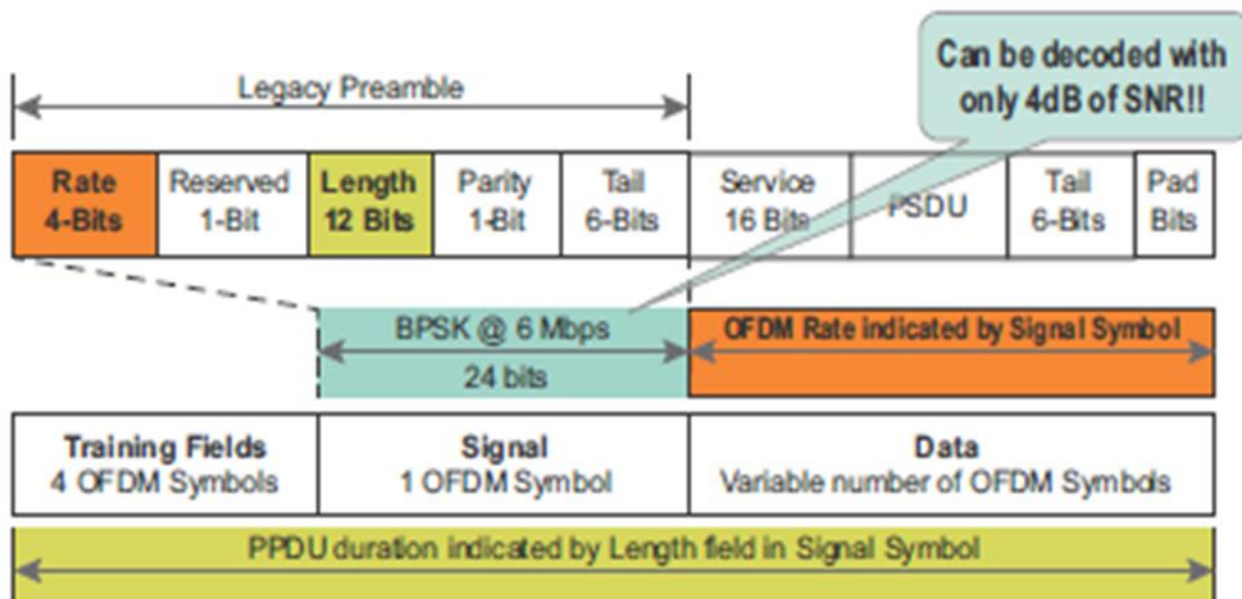


Рисунок 7. У преамбулі та навантаженні використовуються різні швидкості передачі даних

Набагато конкретнішим і вагомішим способом думати про інтерференцію CCI на основі PD є її визначення з точки зору RSSI краю комірки. Широко поширеною практикою є проектування країв комірок 802.11 на рівні  $-65$  дБм, що відповідає SINR 25 дБ з мінімальним шумом  $-90$  дБм.

З правила 6 дБ відомо, що відстань подвоюється за кожні 6 дБ збільшення потужності. Застосовуючи це правило, можна бачити на рис. 8, що будь-яка комірка, призначена для критеріїв краю комірки  $-65$  дБм, матиме NAV радіус інтерференції більше 250 м у вільному просторі!

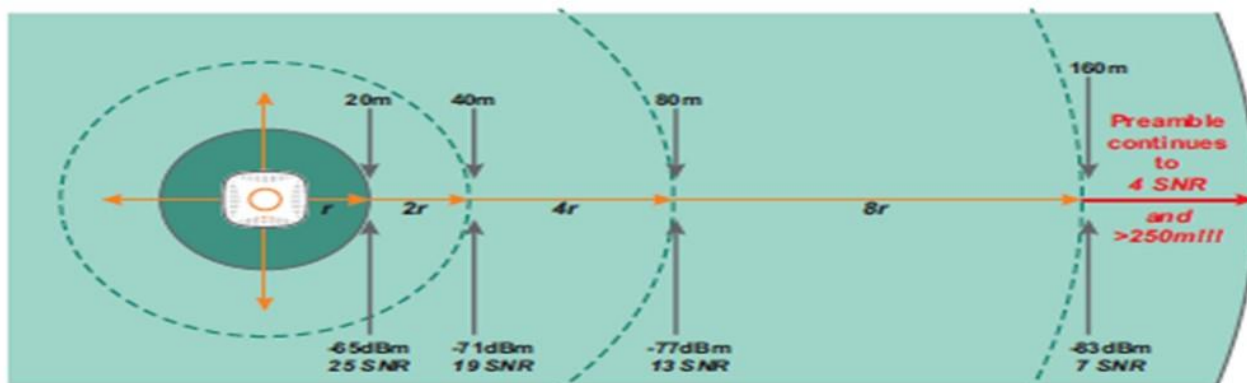


Рисунок 8. Радіус інтерференції PD щодо краю комірки AP (припускаючи, що  $-90$  дБм NF)

Існує різниця у відстані інтерференції PD та радіусом інтерференції порогу ED. За формулою втрат вільного простору можна підрахувати, що максимальний діапазон інтерференції ED становить близько 4 метри в діапазоні 5 ГГц і 8 метрів в діапазоні 2,4 ГГц.

Одним з найбільших міфів, що повторюється інженерами в галузі Wi-Fi, є те, що розмір комірки можна «зменшити», виключивши низькі швидкості передачі даних із встановленої швидкості передачі BSS. Це неправда, принаймні з точки зору втручання PD.

Видалення швидкості передачі даних 6, 12 і навіть 18 Мбіт/с із BSS не впливає на швидкість застарілої преамбули, яка завжди повинна використовувати BPSK. Отже, усунення низьких швидкостей передачі даних не впливає на радіус інтерференції PD/NAV.

Справжньою метою усунення низьких швидкостей є:

примусити мобільних клієнтів рухатися більше, ніж вони могли б, шляхом видалення параметрів з їх алгоритму адаптації швидкості.

зменшити споживання ефірного часу кадру управління 802.11, примушуючи станції в BSS використовувати більш високу мінімальну швидкість.

#### **4. Вимоги для просторового повторного використання та управління CCI.**

Просторове повторне використання дуже складно досягти на практиці за допомогою Wi-Fi. Конструкція механізму 802.11 CCA навмисно використовує надійну модуляцію, щоб забезпечити, щоб найбільша кількість станцій декодувала кожну передачу. Однак цей факт глибоко закладений у стандарт і більшість інженерів Wi-Fi ніколи цього не знали.

Тим не менш, просторове повторне використання є реальним і може бути досягнуте в конкретних типах об'єктів та умовах великої та щільної кількості абонентів. Хороше розуміння справжніх технічних проблем - це перший крок.

Другий крок - це хороший дизайн частотного ресурсу, який відповідає таким принципам: використання якомога більше каналів, включаючи канали DFS, щоб зменшити загальний обсяг необхідного повторного використання каналу та збільшити відстань між точками доступу одного і того ж самого каналу;

вибір стратегії покриття, яка мінімізує CCI з інших точок доступу поблизу зони VHD;

переконатися, що об'єкт відповідає мінімальним вимогам щодо просторового повторного використання: великий фізичний обсяг (принаймні 10000 клієнтів); підходящі місця для кріплення точок доступу та зовнішніх антен; опитування сайту для підтвердження можливості просторового повторного використання за участі великої кількості клієнтів; залучення системного інженера Aruba або досвідченого інтегратора, який має підготовку та інструменти для правильного проектування.

Третій крок - використання найкращих практик конфігурації VHD у поєднанні з функцією зменшення розміру комірки в ArubaOS для обмеження впливу CCI.

Основним методом управління ACI є забезпечення максимально можливого фізичного розділення сусідніх точок доступу AP. Ця вимога є причиною того, що рекомендується рівномірно розподіляти точки доступу по всій зоні покриття, а також забезпечити добре розподілений план каналів.

Наступним рішенням може бути використання мінімального рівня потужності передачі, необхідної для розміру області VHD. Однак набагато більш імовірно, що зменшення потужності призводить до зниження коефіцієнта SINR, що, в свою чергу, знижує швидкість передачі даних для багатьох клієнтів. Цей результат гірший, ніж отримання штрафу ACI. Крім того, критично важливо працювати на радіостанціях 5 ГГц, які на +6 дБ або +9 дБ вище, ніж діапазон 2,4 ГГц, для поліпшення самокерування. Ця вимога ще більше обмежує гнучкість, щоб грати з потужністю в точці доступу.

Що стосується клієнта, сумна істина полягає в тому, що більшість основних операційних систем на сьогоднішньому ринку не поважають повідомлення про обмеження живлення TRP 802.11h. Саме тому Aruba не рекомендує вмикати її. Практично нічого не можна зробити з передачею EIRP на стороні клієнта.

#### **Висновки**

Проведене дослідження показує, що існує значний вплив на зменшення продуктивності безпроводових мереж з високою щільністю абонентів завдяки неоптимальному плануванню радіочастотного ресурсу. Причиною цього є збільшення впливу міжканальної інтерференції та інтерференції сусіднього каналу по мірі збільшення кількості абонентів. Швидкість передачі може зменшитися вдвічі вже при збільшенні кількості клієнтів до 100. В той же час існує можливість підвищення продуктивності безпроводової мережі з високою щільністю завдяки хорошему дизайну частотного ресурсу та використанню найкращих практик конфігурації у поєднанні з функцією зменшення розміру комірки для обмеження впливу міжканальної інтерференції.



**Список використаної літератури**

1. Гніденко М.П., Ільїн О.О., Серих С.О., Прокопов С.В., Бондарчук А.П. Дослідження особливостей роботи безпроводових мереж з високою щільністю під великим навантаженням. Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, – 2019, №3. – с. 29-38.
2. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
3. Pejman Roshan, Jonathan Leary. 802.11 Wireless Local-Area Network Fundamentals. Publisher: Cisco Press. Pub Date: December 23, 2003. Pages: 312.
4. Chuck Lukaszewski. Very High Density 802.11ac Networks Validated Reference Design. 1344 Crossman Avenue, California. Aruba Networks, Inc., 2015. P. 110.

***Автори статті***

**Гніденко Микола Петрович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Кобишча Борис Володимирович** - Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, Україна.

**Кичигін Антон Віталійович** - Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Шкапа Юрій Володимирович** - Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

***Authors of the article***

**Hnidenko Mykola Petrovych** - Candidate of Sciences (technical), associate professor of the Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Kobyzhcha Borys Volodymyrovych** - O.S.Popov Odesa National Academy of Telecommunications, Odesa, Ukraine.

**Kychyhin Anton Vitaliiiovych** - State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Shkapa Yurii Volodymyrovych** - State University of Telecommunications, Kyiv.

Дата надходження в редакцію: 21.06.2020 р.      Рецензент: д.т.н., с.н.с. М.П. Трембовецький