

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.7:654.195.6

Інь ЧенлянНаціональний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лазебний В.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 НА ПІДГРУНТІ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛЬНОГО КОНКУРЕНТНОГО ВІКНА

У статті наведено обґрунтування розрахункових співвідношень для визначення експлуатаційних характеристик безпроводової мережі передавання даних стандарту IEEE 802.11, що функціонує в режимі конкурентного доступу до середовища передавання. Розрахункові співвідношення отримано на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, що є альтернативою концепції часового слоту. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна дало змогу пов'язати системні параметри, експлуатаційні характеристики та показники якості безпроводової мережі. Наведено співвідношення для визначення ймовірності колізій та успішного передавання кадрів даних, для визначення кількості колізій та кількості вільних часових слотів залежно від кількості активних станцій, що конкурують за доступ до каналу, а також співвідношення для визначення середньої затримки передавання кадру та нерівномірності затримки. Отримані співвідношення дадуть змогу більш точно оцінювати та прогнозувати експлуатаційні показники на етапі проектування та експлуатації безпроводових мереж стандарту 802.11.

Ключові слова: безпроводова мережа, затримка передавання, колізія, конкурентний доступ, насичений режим, пропускна спроможність.

Постановка проблеми. Базовою технологією доступу до радіоканалу в мережах усіх специфікацій стандарту 802.11 є технологія конкурентного доступу, яку реалізовано із застосуванням розподіленої функції координації (DCF) безпосередньо або з використанням алгоритму RTS/CTS, за якого кожен вузол мережі перед тим як надіслати дані «в ефір», спочатку надсилає спеціальне коротке повідомлення, яке називається RTS (Ready To Send) і означає готовність цього вузла до відправлення даних. У відповідь станція-адресат надсилає відповідь готовності прийняти кадр – CTS (Clear To Send), а всі інші станції, що «чули» кадри RTS та CTS, утримуються від передавання на час, зазначений у цих кадрах.

Алгоритм RTS/CTS був істотно вдосконалений для використання в мережах, що функціонують за специфікаціями 802.11n та 802.11ac, але основний принцип під час передавання кадру RTS – принцип конкурентного доступу до середовища – залишився [1, с. 341; 2, с. 3].

Хоча у пізніх версіях стандарту 802.11 застосовано додаткові механізми для зменшення ймовірності колізій у мережі з великою кількістю активних станцій, але загроза виникнення колізій залишається, а за умови значного поширення безпроводових мереж є неминучою.

Поширені розрахункові співвідношення, що ґрунтуються на концепції часового слоту, дають змогу адекватно визначити експлуатаційні характеристики безпроводової мережі тільки у разі малої ймовірності виникнення колізій у каналі передавання [3, с. 5]. У сучасних мережах здебільшого одночасно функціонує багато станцій, що призводить до збільшення ймовірності колізій та їхнього впливу на експлуатаційні характеристики. Для потреб проектування безпроводових мереж IEEE 802.11 і прогнозування характеристик наявних мереж є необхідність у комплексі розрахункових співвідношень, що дають можливість зробити відповідні розрахунки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробленню моделей каналу присвячено багато робіт, зокрема в роботах [2, с. 7; 3, с. 5; 4, с. 124] запропоновано моделі, в яких ураховано базові принципи функціонування мереж стандарту 802.11. Як правило, їх адаптовано до певних умов функціонування мережі. Класичним підходом до аналізу мереж стандарту 802.11 вважають підхід, запропонований Джузеппе Біанкі [3, с. 5] і підтриманий іншими дослідниками, який полягає у використанні поняття «насиченої пропускної здатності» та «насиченого навантаження» станції та мережі у цілому [4, с. 121]. Розрахунки всіх параметрів здійснюють на підґрунті концепції часового слота.

Постановка завдання. Мета дослідження – отримати розрахункові співвідношення для визначення пропускної здатності безпроводової мережі та інших експлуатаційних характеристик мережі із застосуванням концепції віртуального конкурентного вікна з урахуванням кількості активних станцій мережі з насиченим навантаженням.

Виклад основного матеріалу дослідження. У мережах стандарту IEEE 802.11 конкурентний доступ реалізовано із застосуванням технології CDMA/CA [1, с. 328; 6, с. 851]. Для здійснення доступу до каналу кожна станція завантажує в лічильник зворотного відліку число з початкової множини $\{0, 1, 2, \dots, CW_{\min}\}$. Станції прослуховують спільне середовище передавання і, якщо воно вільне, здійснюють декремент лічильника через кожен вільний системний інтервал – часовий слот (σ). Та станція, у якої в результаті декременту в лічильнику зворотного відліку виникає значення «0», починає передавати кадр даних або керування. За описаного алгоритму доступу кілька станцій можуть почати передавати свої кадри одночасно, що призведе до колізії й унеможливить приймання цих кадрів. У режимі конкурентного доступу керування мережею здійснюється із застосуванням розподіленої функції координації – DCF. Щоб не втратити багато часу через колізії, застосовують режим із попереднім обміном короткими кадрами керування – RTS/CTS. У такому разі колізія може мати місце тільки під час передавання кадру RTS. Подібна ситуація виникає у сегменті безпроводової мережі 802.11ac, коли станція, що готується до передавання, надсилає повідомлення з нульовим пакетом даних (NDPA – Null Data Packet Announcement), що містить адреси необхідних вузлів, щоб ініціювати підготовку спільного середовища до передавання кадру [2, с. 6].

Ймовірність колізії для окремої станції в безпроводовій мережі. Ймовірність колізій у безпро-

водовій мережі з конкурентним доступом є одним із найважливіших параметрів для визначення пропускної здатності та інших характеристик. Для окремої активної станції в мережі її можна визначити із застосуванням співвідношення [7, с. 32]:

$$p_c = 1 - (1 - p_{cl})^{N-1}, \quad (1)$$

де $p_{cl} = 1/CW_{\min}$ – ймовірність колізії даної станції з однією з активних станцій безпроводової мережі;

N – кількість активних станцій у мережі;

$CW_{\min}$ – початкове значення конкурентного вікна (у більшості специфікацій IEEE 802.11 $CW_{\min} = 15$).

У разі виникнення колізії станції здійснюють спробу повторного передавання, але для цього завантажують у лічильник зворотного відліку число з удвічі більшої множини $\{0, 1, 2, \dots, (2 \cdot CW_{\min} + 1)\}$. Така процедура призводить до зменшення кількості станцій, що одночасно конкурують за канал.

Розглянемо сценарій, за якого всі N станцій починають одночасно конкурувати за канал, тоді протягом першого часового інтервалу, що дорівнює тривалості мінімального конкурентного вікна, кількість станцій, які беруть участь у конкуренції за канал, становитиме $N_1 = N$, а ймовірність колізії – $p_c^{(1)}$.

Під час другого часового інтервалу для станцій, які потрапили в колізію, конкурентне вікно збільшиться вдвічі, і частина станцій вибере число з першої половини цього збільшеного інтервалу, а інша частина – з другої. Оскільки вибір будь-якого числа зі збільшеного набору чисел для завантаження лічильника зворотного відліку є однаково ймовірним, то в середньому число станцій, які вибрали число з першої половини конкурентного вікна та з другої половини, буде однаковим. На другій стадії кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу, та ймовірність колізії можна визначити співвідношеннями:

$$N_2 = N_1 - 0,5p_c^{(1)}N_1, \quad (2)$$

$$p_c^{(2)} = 1 - (1 - p_{cl})^{N^{(2)}-1}. \quad (3)$$

Деяка кількість станцій (ті станції, що завантажили в лічильники числа з другої половини збільшеного конкурентного вікна), а саме $0,5p_c^{(1)}N_1$, не братиме участі в конкуренції за доступ до каналу на другій стадії.

На третій стадії кількість станцій і ймовірність колізії будуть визначатися співвідношеннями:

$$N_3 = N_2 - 0,5p_c^{(2)}N_2 + 0,5p_c^{(1)}N_1, \quad (4)$$

$$p_c^{(3)} = 1 - (1 - p_{cl})^{N^{(3)}-1}. \quad (5)$$

Другий доданок у (4) враховує станції, що після колізії на першій стадії завантажили в лічильники числа з другої половини збільшеної множини.

Оскільки ймовірність потрапити в колізію кілька разів поспіль набагато менше, ніж одноразова колізія, і з урахуванням того, що після успішного передавання кадру даних станція повертається в стан першої стадії, для четвертої та наступних стадій можна застосувати співвідношення, аналогічні (4) і (5), для визначення кількості станцій, що конкурують за доступ до каналу, та ймовірності виникнення колізії. Нижче наведено графіки зміни кількості станцій мережі, що конкурують за доступ до каналу (рис. 1), та ймовірності колізій (рис. 2) залежно від того, на якій стадії перебуває безпроводова мережа і скільки активних абонентів (N) є в мережі.

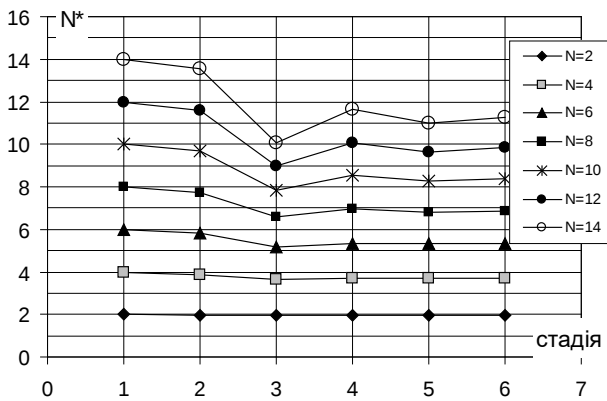


Рис. 1. Зміна кількості станцій, що конкурують за канал, у процесі встановлення квазістаціонарного режиму

Як видно з наведених графіків, через виникнення колізій число станцій, які конкурують за доступ до радіоканалу, менше загального числа активних станцій у мережі, і після початку функціонування мережі це число стає постійним уже після кількох умовних стадій доступу до каналу. Кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу N^* , залежить від мінімального значення конкурентного вікна $CW_{\min}$ і кількості активних станцій N .

Графік зміни кількості станцій N^* , що одночасно конкурують за доступ до каналу в безпроводовій мережі з N активними станціями в насиченому режимі, наведено на рис. 3.

Графіки на рис. 1 та рис. 2 ілюструють процес установаження квазістаціонарного режиму в безпроводовій мережі з насиченим навантаженням у разі тривалої активності N станцій.

Якщо час функціонування насиченої мережі перевищує час, необхідний для реалізації шести стадій доступу, то кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу, і ймовірність колізії набувають постійного значення. Такий резуль-

тат можна пояснити тим, що кожна станція після успішного передавання кадру даних починає нову спробу від початкового значення конкурентного вікна $CW_{\min}$.

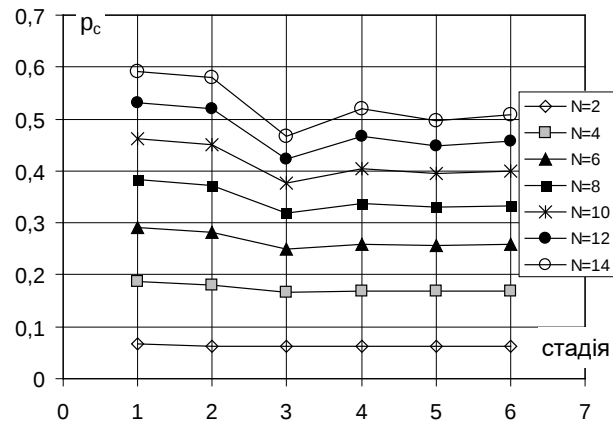


Рис. 2. Графіки зміни ймовірності колізій у процесі встановлення квазістаціонарного режиму

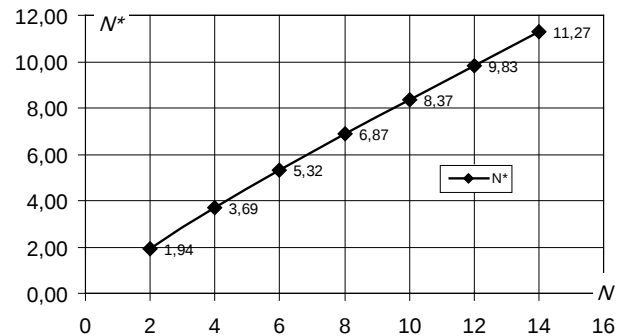


Рис. 3. Залежність кількості конкуруючих станцій N^* від загальної кількості активних станцій N у безпроводовій мережі

Отже, якщо початкове число активних станцій у безпроводовій мережі ($N = 14$) приблизно дорівнює числовому значенню конкурентного вікна

($CW_{\min} = 15$), то в мережі з насиченим навантаженням фактична кількість активних станцій, що конкурують за доступ до каналу, буде приблизно на 19,5% менше загальної кількості станцій ($N^* = 11,27$) через застосування двійкового експоненціального закону для зміни конкурентного вікна. Якщо початкове число активних станцій становитиме лише 25% ($N = 4$) від значення мінімального конкурентного вікна, ефективна кількість активних станцій буде на 7,75% менше загальної кількості станцій ($N^* = 3,69$).

Ймовірність успішного передавання кадру даних у безпроводовій мережі з конкурентним доступом. Розглянемо ймовірність успішного передавання кадру, яка зумовлена тільки процедурою конкурентного доступу до каналу без

урахування можливості анулювання кадру через тривале очікування доступу до каналу. Оскільки в разі виникнення колізії станція буде здійснювати повторну спробу (всього R спроб) із використанням збільшеного конкурентного вікна, будемо шукати ймовірність успішного передавання p_s як суму ймовірностей успішного передавання під час усіх можливих послідовних спроб. Урахуємо, що ймовірність колізії p_c на всіх стадіях доступу в насиченій мережі є величиною постійною.

Під час першої спроби ймовірність успішно передати кадр даних становить $(1 - p_c)$. Якщо під час першої спроби сталася колізія, тоді ймовірність того, що кадр буде успішно переданий під час другої спроби, становить $p_c(1 - p_c)$, під час третьої – $p_c^2(1 - p_c)$. Ймовірність успішного передавання кадру даних знайдемо як повну ймовірність передавання його протягом R спроб:

$$\begin{aligned} P_s &= (1 - p_c) + p_c(1 - p_c) + p_c^2(1 - p_c) \\ &+ p_c^3(1 - p_c) + \dots + p_c^{R-1}(1 - p_c) = \\ &= (1 - p_c)(1 + p_c + p_c^2 + \dots \\ &+ p_c^{R-1} + \dots + p_c^{R-1}) = 1 - p_c^R \end{aligned} \quad (6)$$

Графіки зміни ймовірності успішного передавання кадру даних у безпроводовій мережі наведено на рис. 4. Із графіка випливає, що навіть у разі, коли кількість активних станцій становить $(CW_{\min} - 1)$, унаслідок застосування механізму повторного передавання ймовірність успішного передавання кадру становить не менше 99%.

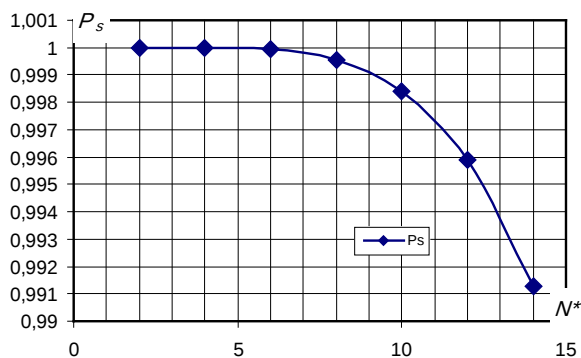


Рис. 4. Залежність ймовірності успішного передавання кадру від кількості станцій із насиченим навантаженням, $CW_{\min} = 15$

Ймовірність виникнення колізії у безпроводовій мережі 802.11 за наявності в ній N активних станцій із насиченим навантаженням. Ймовірність виникнення колізії у безпроводовій мережі 802.11 за наявності N активних станцій є важливою характеристикою, яка дає змогу оцінити затримку передавання кадру та нерівномірність цієї затримки, але у попередніх дослідженнях

процесів у безпроводових мережах цю характеристику обходили увагою.

Оцінимо загальну ймовірність виникнення колізії в насиченій мережі 802.11 з конкурентним доступом до радіоканалу. У даному разі йдеться про колізії між будь-якими станціями мережі.

Розглянемо уявний сценарій, за якого всі активні станції мережі знаходяться на першій стадії доступу до радіоканалу і використовують для завантаження лічильника зворотного відліку число з множини $\{0, 1, 2, \dots, W\}$. Тобто в нашому разі мінімальне значення конкурентного вікна $CW_{\min} = W$. Кількість активних станцій дорівнює N .

Колізія виникне, якщо дві або більше станцій будуть містити у своїх лічильниках зворотного відліку однакові числа. Для формування розрахункового співвідношення для визначення ймовірності колізії скористаємося загальним підходом теорії ймовірностей. Тобто будемо визначати цю ймовірність як відношення кількості сприятливих подій до кількості всіх можливих подій. Зазначені величини можна визначити із застосуванням формул комбінаторики. Комбінацію всіх чисел, що знаходяться в лічильниках зворотного відліку N станцій, можна розглядати як розміщення із W по N .

Кількість сприятливих подій (що призводять до колізії) знайдемо як різницю кількості розміщень із W по N із повторами і кількості розміщень без повторів. Загальну ймовірність колізії P_c знайдемо як відношення цієї різниці до кількості розміщень із W по N із повторами, оскільки саме кількість розміщень із повторами визначає загальну кількість подій. На підставі наведених міркувань можна записати [5, с. 51]:

$$P_c = \frac{\tilde{A}_W^N - A_W^N}{\tilde{A}_W^N} = 1 - \frac{W!}{(W - N)! W^N}, \quad (7)$$

де $\tilde{A}_W^N = W^N$ – кількість розміщень із W по N із повтореннями;

$A_W^N = \frac{W!}{(W - N)!}$ – кількість розміщень із W по N без повторень.

Графік залежності (7) наведено на рис. 5. Цей графік наглядно ілюструє загрозу виникнення колізій у сегменті безпроводової мережі з N станціями в насиченому режимі.

Як випливає з наведеного графіка, якщо кількість активних станцій більша за 25% від значення конкурентного вікна W , ймовірність колізії перевищує 0,33 ($CW_{\min} = 15$) і 0,5 ($CW_{\min} = 31$). Визначена згідно з (7) ймовірність колізій має місце протягом кожного часового слота, коли станції можуть отримати доступ до радіоканалу. Таким чином, за час, поки всі станції передадуть у середньому по одному кадру, у мережі станеться кілька колізій.

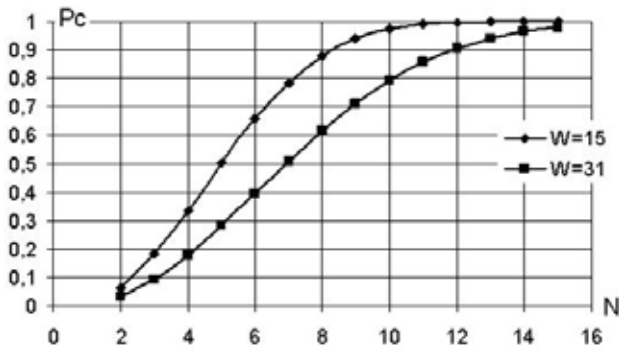


Рис. 5. Графік залежності ймовірності колізії P_c у безпроводовій мережі з N активними станціями

Характеристики віртуального конкурентного вікна. Згідно з [8, с. 8], віртуальне конкурентне вікно – це деяке усереднене число, що дорівнює кількості вільних часових слотів, відрахованих кожною активною станцією в проміжках між передаванням двох послідовних кадрів у режимі насиченого навантаження.

Знайдемо величину віртуального конкурентного вікна VCW як значення математичного сподівання для випадку двійкового показникового закону збільшення конкурентного вікна CW у разі виникнення колізії.

Розглянемо сценарій, за якого станція з насиченим навантаженням безперервно передає кадри даних протягом тривалого часу. За таких умов певні кадри буде передано з першої спроби, якщо колізії не виникне, з другої спроби, якщо під час першої спроби виникне колізія, а також з усіх інших можливих спроб, якщо послідовно буде виникати кілька колізій. Якщо б не було колізій, з урахуванням того, що всі числа для завантаження в лічильник зворотного відліку є однаково ймовірними, станція передавала б кадри даних у середньому через $\frac{CW_1}{2}$ часових слотів. Ймовірність того, що станція передасть кадр під час першої спроби, за наявності колізій у мережі, дорівнює $(1 - p_c)$. Аналогічно, якщо станція під час передавання кадру буде потрапляти один раз у колізію, ймовірність чого p_c , вона буде в середньому передавати через $\frac{2CW_1}{2}$ часових слотів. З урахуванням того, що кількість спроб передати кадр даних у разі виникнення колізій становить R , значення віртуального конкурентного вікна можна визначити як математичне сподівання:

$$\begin{aligned} VCW &= \frac{CW_1}{2} (1 - p_c) + \frac{2CW_1}{2} (1 - p_c) p_c + \\ &+ \frac{4CW_1}{2} (1 - p_c) p_c^2 + \dots + \frac{2^R CW_1}{2} (1 - p_c) p_c^R = \\ &= \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 6 наведено графік зміни величини віртуального конкурентного вікна залежно від кількості активних станцій із насиченим навантаженням.

Графік на рис. 6 отримано з урахуванням залежності, наведеної на рис. 2. Кількість вільних часових слотів, які кожній станції в середньому доводиться відраховувати перед передаванням кадру, збільшується нелінійно зі збільшенням кількості активних станцій. Із застосуванням співвідношення (8) можна безпосередньо визначити кількість вільних часових слотів n_{idle} , що наявні в інтервалі часу реалізації віртуального конкурентного вікна, тобто:

$$n_{idle} = VCW. \quad (9)$$

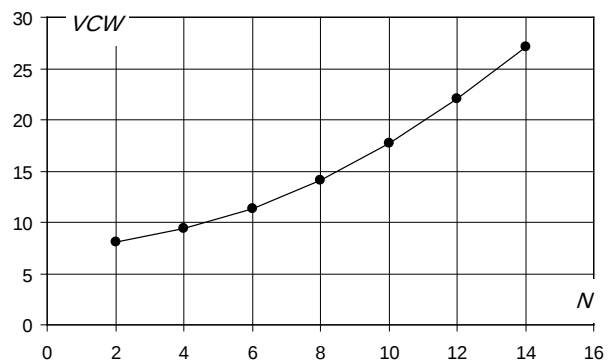


Рис. 6. Графік залежності віртуального конкурентного вікна VCW від кількості активних станцій N для випадку $CW_{min} = 15$

Важливою характеристикою мережі, що впливає на всі якісні показники, є кількість колізій, що відбувається під час передавання кадру даних.

У межах віртуального конкурентного вікна кожна станція мережі передає N кадрів, тобто в середньому кожна із N станцій передає по одному кадру. На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна можна визначити кількість колізій N_c , що відбувається в середньому під час передавання N кадрів даних.

Зробимо оцінювання кількості колізій із припущення, що в кожній колізії бере участь дві станції, оскільки така колізія є найбільш імовірною. Отримана оцінка буде верхньою межею кількості колізій, що може мати місце в насиченій мережі за час реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кожна станція мережі може потрапити в колізію з імовірністю p_c . Але якщо одна станція потрапила в колізію, то це означає, що ще одна станція потрапила в колізію. Тобто в колізії бере участь колізійна пара. Оскільки в колізії бере участь N станцій, то на підставі припущення, що в колізії бере участь тільки дві станції, кількість колізійних пар буде дорівнювати $N/2$. Протягом

реалізації конкурентного вікна будуть мати місце колізії, що відбуваються на першій, другій і всіх інших можливих R стадіях доступу до каналу. Знайдемо число N_c як математичне сподівання числа колізій під час реалізації віртуального конкурентного вікна:

$$N_c = \frac{N}{2} p_c + \frac{N}{2} p_c^2 + \frac{N}{2} p_c^3 + \dots + \frac{N}{2} p_c^R = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{R+1}}{1 - p_c} \quad (10)$$

Графік залежності (10) наведено на рис. 7 для мережі, в якій за початковим налаштуванням застосовано $CW_{\min} = 15$, що має місце для більшості специфікацій IEEE 802.11.

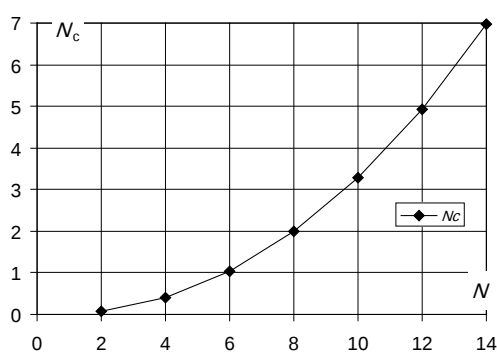


Рис. 7. Графік зміни кількості колізій N_c залежно від кількості активних станцій із насиченим навантаженням N

Як і слід очікувати з фізичних міркувань, за наявності малої кількості станцій у мережі колізії будуть виникати рідко й їхня кількість значно менше кількості переданих кадрів. За наявності шести станцій у мережі буде мати місце одна колізія на шість переданих кадрів. Зі збільшенням кількості активних станцій кількість колізій нелінійно зростає, і за наявності чотирнадцяти активних станцій у мережі на чотирнадцять переданих кадрів буде відбуватися сім колізій. Тобто на кожен два передані кадри буде відбуватися в середньому одна колізія.

Часові характеристики процесу передавання. До часових характеристик процесу передавання кадрів віднесено середню затримку передавання та нерівномірність середньої затримки.

Середню затримку $\bar{\tau}$ визначають як усереднене значення всіх затримок, що виникли під час передавання усіх блоків даних даного трафіка:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} \tau_i, \quad (11)$$

де $N^{(b)}$ – загальна кількість доставлених блоків даних;

τ_i – час затримки i -пакета.

Середня затримка передавання пакета даних через безпроводовий канал τ , згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, буде дорівнювати тривалості реалізації цього вікна. Такий взаємозв'язок впливає безпосередньо з визначення віртуального конкурентного вікна. Для середньої затримки можна записати:

$$\bar{\tau} = T_{VCW}. \quad (12)$$

Час реалізації віртуального конкурентного вікна можна визначити за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma, \quad (13)$$

де N – кількість активних станцій у мережі;

$\bar{T}_{PL}$ – тривалість усередненого часового інтервалу, протягом якого відбувається безпосереднє передавання кадру даних з урахуванням усіх допоміжних сигналів та інтервалів;

$\bar{T}_c$ – тривалість усередненого часового інтервалу колізії;

σ – тривалість елементарного часового слота.

Перший доданок у правій частині (12) визначає час, витрачений усіма станціями на успішне передавання в середньому по одному кадру на кожен станцію. Другий доданок визначає час, витрачений на колізію всіма станціями. Третій доданок визначає час, протягом якого в межах віртуального конкурентного вікна всі станції знаходилися у стані декременту своїх лічильників і не передавали кадри даних (канал був вільним).

Значення нерівномірності затримки – джитера знайдемо за загальною формулою:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)}, \quad (14)$$

де $\tau^{(max)} = \bar{\tau} + \sqrt{D(\tau)}$, $\tau^{(min)} = \bar{\tau} - \sqrt{D(\tau)}$.

Для визначення дисперсії скористаємося загальною формулою:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} (\tau_i - \bar{\tau})^2, \quad (15)$$

де $N^{(b)}$ – загальна кількість переданих кадрів даних;

τ_i – затримка передавання окремого кадру даних.

На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна для визначення дисперсії скористаємося максимальними значеннями затримки передавання під час кожної із можливих спроб. У такому разі вираз (14) набуде іншого вигляду, а саме:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (16)$$

де N_j та τ_j^* – відповідно кількість кадрів даних та максимальна затримка передавання кадру даних через канал під час j -ої спроби, $j \in \{1, 2, \dots, R\}$.

Оскільки в квазістаціонарному режимі протягом часу реалізації віртуального конкурент-

ного вікна успішно буде передано певну частину кадрів із першої спроби, певну частину – з другої і певну частину – з кожної іншої можливої спроби, для розрахунку джитера можна обмежитися інтервалом реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кількість кадрів, переданих під час j -ої спроби, можна визначити зі співвідношення:

$$N_j = N \cdot p_c^{j-1} \cdot (1 - p_c). \quad (17)$$

Максимальну затримку кадру даних у насиченій мережі у разі його успішного передавання під час j -ої спроби доступу до каналу можна визначити за співвідношенням:

$$\tau_j^* = (N \cdot P_s \cdot \bar{T}_{PL} + n_c \cdot \bar{T}_c) \cdot \frac{2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1)}{VCW} + \sigma \cdot 2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1). \quad (18)$$

Згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, вважаємо, що процеси передавання кадрів, колізії та вільні часові слоти розподілені в часі рівномірно. Коефіцієнтом $\frac{1}{VCW}$ враховуємо, скільки актів передавання кадрів і колізії припадає в середньому на один вільний часовий слот, що має місце під час реалізації віртуального конкурентного вікна з відомим значенням $CW_{\min}$ та кількістю активних станцій у мережі N .

Таким чином, першим доданком у правій частині (18) враховано максимальний час очікування, поки в межах інтервалу реалізації віртуального вікна успішно передають усі станції мережі. Другим доданком враховано безпосередньо час очікування, зумовлений декрементом лічильника зворотного відліку за наявності вільних часових слотів.

Пропускна здатність безпроводового каналу.

Максимальну пропускну здатність каналу будемо розраховувати як деяке граничне значення без урахування шумів, електромагнітних завад і перешкод на фізичному рівні і без урахування колізій. Тобто це такі умови, коли кадри передає одна станція з насиченим навантаженням. За таких умов максимальну пропускну здатність можна визначити із застосуванням співвідношення [3]:

$$S_{\max} = \frac{E[PL_1]}{E[T_s] + \sigma \cdot CW_{\min} / 2}, \quad (19)$$

де $E[PL_1]$ і $E[T_s]$ – усереднені значення корисного навантаження і часу передавання одного кадру даних;

σ – тривалість часового слота, $\sigma \cdot CW_{\min} / 2$ – усереднене числове значення відстрочки між актами передавання двох послідовних кадрів даних, подане в одиницях часових слотів.

Пропускну здатність безпроводового каналу з N активними станціями з урахуванням колізій, але

без урахування завад та перешкод, згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, треба визначати як:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}. \quad (20)$$

За наявності завад у каналі будуть виникати спотворені кадри (erroneous frame). Кількість таких кадрів зручно характеризувати загальноприйнятим коефіцієнтом помилкових пакетів PER (Packet Error Ratio). У разі виникнення спотвореного кадру буде здійснене повторне передавання із застосуванням механізму подолання колізій. Тому для врахування впливу завад у всіх отриманих вище співвідношеннях замість ймовірності колізій треба використати ймовірність спотворення кадру:

$$p_{ef} = p_c + PER - p_c \cdot PER. \quad (21)$$

Значення коефіцієнта помилкових пакетів PER можна визначити або безпосереднім вимірюванням у зоні розгортання безпроводової мережі або на етапі проектування мережі шляхом моделювання процесів у безпроводовому каналі із застосуванням спеціалізованих програмних засобів. Наприклад, із застосуванням програмного комплексу ADS (Advanced Design System).

У разі визначення пропускну здатності безпроводової мережі з урахуванням впливу завад треба враховувати, що завади можуть призводити до спотворення як кадрів даних, так і кадрів керування.

Для каналу, в якому реалізовано безпосередній конкурентний доступ, час реалізації віртуального конкурентного вікна слід обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot T_{PL} + n_c T_c + \sigma \cdot VCW. \quad (22)$$

Для каналу, що функціонує в режимі RTS/CTS, час реалізації віртуального конкурентного вікна слід обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot (T_{PL} + T_{RTS}) + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (23)$$

де T_{RTS} – витрати часу на передавання кадру RTS у мережі, що функціонує в режимі RTS/CTS.

Висновки. Концепція віртуального конкурентного вікна дає змогу отримати аналітичні співвідношення між системними параметрами безпроводової мережі (мінімальне значення конкурентного вікна, тривалість часового слота, часові інтервали передавання службових кадрів, кількість активних станцій у мережі) та її експлуатаційними характеристиками (пропускну здатність каналу, затримка передавання, нерівномірність затримки, ймовірність втрати кадру) в усьому можливому діапазоні зміни параметрів.

Список літератури:

1. Вишне夫斯基 В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. Москва : Техносфера, 2005. 592 с.
2. Performance analysis of IEEE 802.11ac wireless backhaul networks in saturated conditions / R. Liao et. al. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2013. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/1687-1499-2013-226>.
3. Giuseppe B. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18. № 3. P. 1055–1067.
4. Emerging Technologies in Wireless LANs. Theory, Design, and Deployment. Edited by BENNY BING. Georgia Institute of Technology, Cambridge University Press, 2008. 897 p.
5. Lazebnyi V.S., Yin C. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2017. № 5. С. 47–53.
6. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification – 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE Std 802.11, 2007. 1232 с. (2007 Edition).
7. Инь Ч., Лазебный В.С. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для прогнозування пропускної здатності сегмента безпроводової мережі Wi-Fi. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. Т. 4. № 60. С. 30–38.
8. Lazebnyy A.V., Lazebnyy V.S. The Details of Virtual Contention Window Concept for 802.11 IBSS Wireless Local Area Network Mathematic Modeling. *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*. 2013. Vol. 1. № 1. P. 7–13. URL: <http://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11 НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО КОНКУРЕНТНОГО ОКНА

В статье приведено обоснование расчетных соотношений для определения эксплуатационных характеристик беспроводной сети передачи данных стандарта IEEE 802.11, которая функционирует в режиме конкурентного доступа к среде передачи. Расчетные соотношения получены на основе концепции виртуального конкурентного окна, которая является альтернативой концепции временного слота. Применение концепции виртуального конкурентного окна позволило связать системные параметры, эксплуатационные характеристики и показатели качества беспроводной сети. Приведены соотношения для определения вероятности коллизий и успешной передачи кадров данных, для определения количества коллизий и количества свободных временных слотов в зависимости от количества активных станций, конкурирующих за доступ к каналу, а также соотношения для определения средней задержки передачи кадра и неравномерности задержки. Полученные соотношения позволяют более точно оценивать и прогнозировать эксплуатационные характеристики на этапе проектирования и эксплуатации беспроводных сетей стандарта 802.11.

Ключевые слова: беспроводная сеть, задержка передачи, коллизия, конкурентный доступ, насыщенный режим, пропускная способность.

DETERMINATION OF THE WIRELESS NETWORK CHARACTERISTICS OF IEEE 802.11 STANDARD ON THE BASICS OF THE VIRTUAL CONTENTION WINDOW CONCEPT

The article gives a justification of the calculation relations for determining the operational characteristics of the wireless data transmission network of the IEEE 802.11 standard, which operates in a mode of competitive access to the medium of transmission. The equations obtained on the basis of the concept of a virtual competitive window, which is an alternative to the concept of a time slot. The application of the concept of a virtual competing window has made it possible to link system parameters, performance and wireless network quality metrics. The article presents the equations to determine the likelihood of collisions and the successful transmission of data frames, to determine the number of collisions and the number of free time slots depending on the number of active stations competing for access to the channel, as well as the equations for determining the average frame delay and uneven delay. The obtained equations will allow to more accurately estimating and predicting the performance at the stage of design and operation of 802.11 wireless networks.

Key words: competitive access, collision, saturated mode, throughput, transmission delay, wireless network.