

УДК 004.7:654.195.6(045)

**В.С. Лазебний**, канд.техн.наук, **Б.Ф. Кауас**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

## Оцінювання процесів у безпроводовій мережі з конкурентним доступом до телекомунікаційного каналу

Розглянуто процес передавання даних у безпроводовій мережі, що функціонує із застосуванням функції розподіленої координації (DCF). Запропоновано розрахункові співвідношення для обчислення пропускної здатності безпроводового каналу з урахуванням реальних умов функціонування на підґрунті уточнених співвідношень для ймовірності виникнення колізій та ймовірності успішного передавання кадру даних. Бібл. 4, рис. 2.

**Ключові слова:** безпроводова мережа, кадр даних, пропускна здатність, каналний рівень, ймовірність колізії, функція розподіленої координації.

### Вступ

Безпроводові телекомунікаційні мережі передавання даних знайшли широке розповсюдження у сучасному суспільстві як для задоволення інформаційних потреб окремих приватних користувачів, так і для організації корпоративного інформаційного середовища. Обсяги інформаційних потоків зростають і головним чином внаслідок зростання частки мультимедійної інформації. За такої ситуації безпроводові мережі не завжди можуть забезпечити потрібну якість телекомунікаційних послуг. Фахівці весь час працюють над удосконаленням безпроводових мереж з метою збільшити ємність та надійність функціонування безпроводового каналу. Одним із важливих напрямів досліджень є моделювання процесів передавання інформації у безпроводових мережах з метою отримати достовірні оцінки впливу окремих чинників на функціонування мережі в цілому і на окремі експлуатаційні параметри зокрема. На тепер найбільш поширеними технологіями локальних безпроводових мереж є технології стандарту 802.11. Розробці моделей каналу присвячено багато робіт, в яких враховано базові принципи функціонування мереж зазначеного стандарту. Класичним підходом для аналізу граничних можливостей мереж стандарту 802.11 вважають підхід, запропонований Джузеппе Біанкі і підтриманий іншими дослідниками, який полягає у використанні поняття «насиченої пропускної здатності» та «насиченого навантаження» станції та мережі в цілому

[4, 2]. Цей підхід застосовано для аналізу мереж з конкурентним доступом до каналу, в яких реалізовано функцію розподіленої координації (DCF). У результаті запропоновано моделі каналів, в яких імовірність успішного передавання кадру даних є величиною, що не перевищує 10% навіть за сприятливих умов функціонування каналу. Так, у ґрунтовній роботі [2] наведено модель, в якій ймовірність успішного передавання  $\tau$  визначається співвідношенням

$$\tau = \frac{2(1-2p_c)(1-p_c^{R+1})}{(1-2p_c)(1-p_c^{R+1}) + W(1-p_c)[1-(2p_c)^{R+1}]}, \quad (1)$$

а в роботі [3]

$$\tau_{max} = \frac{\sqrt{1+2(\bar{T}_c-1)\frac{(N-1)}{N}}-1}{(N-1)(\bar{T}_c-1)} \approx \frac{1}{N\sqrt{\bar{T}_c/2}}. \quad (2)$$

У наведених формулах  $N$  – число активних станцій мережі,  $W$  – величина конкурентного вікна ( $W \geq 15$ ),  $\bar{T}_c$  – відносна усереднена тривалість колізії, виражена в одиницях часових слотів ( $\bar{T}_c > 1$ ),  $R$  – максимальна кількість повторних спроб передати кадр даних у разі виникнення колізії.

З безпосереднього аналізу співвідношення (1) випливає, що у випадку, коли колізія є малоімовірною ( $p_c \ll 1$ , тобто  $p_c \approx 0$ ), а величина  $W \geq 15$ , ймовірність успішного передавання складатиме менше  $\tau < 0,1$ . З другого рівняння випливає, що за умови функціонування в мережі 10 активних станцій також буде мати місце  $\tau_{max} < 0,1$ . Отримані із застосуванням співвідношень (1) та (2) значення ймовірності успішного передавання кадру даних у безпроводових мережах не співпадають з результатами практичних вимірювань і тому потребують уточнень.

Метою даної статті є проаналізувати особливості реалізації механізму конкурентного доступу до каналу станціями безпроводової мережі за стандартом 802.11 та уточнити аналітичні співвідношення для аналізу функціонування зазначених безпроводових мереж не залежно від специфікації.

Такий аналіз передбачає оцінити вплив конкретних параметрів налаштування мережі, зокрема максимальної кількості повторних спроб ( $R$ ), початкового значення величини конкурентного вікна  $CW_{min}$ , яке станції використовують для вибору випадкового числа для лічильника затримки, а також кількості активних станцій мережі  $N$  на ймовірність успішного передавання кадру даних станцією безпроводової мережі  $P_s$  й пропускну здатність безпроводового каналу  $S$ .

### Визначення ймовірності успішного передавання кадру даних

Розглянемо сценарій, за якого усі станції безпроводової мережі здійснюють формування конкурентного вікна на загальних засадах згідно правил функції розподіленої координації (DCF), тобто, з використанням двійкового показникового механізму. Відповідно до цього механізму, після виникнення колізії під час передавання кадру даною станцією множина чисел (конкурентне вікно), з якого обирають значення для повторного завантаження лічильника відстрочки цієї станції, збільшується вдвічі.

Таким чином, зазначена станція матиме доступ до каналу через інтервали часу, які залежать від кількості уже здійснених невдалих спроб передати даний інформаційний кадр. Періодичність спроб буде мати ймовірнісний характер, але залежатиме від значень конкурентного вікна  $CW$ .

Характеристики кожної іншої конкуруючої станцій мережі також визначатимуться за правилами показникового механізму формування відстрочки  $i$ , таким чином, можуть значно відрізнятися значеннями конкурентного вікна ( $CW_i$ ), залежно від кількості спроб передати свій кадр. За умови насиченого навантаження усі станції постійно здійснюватимуть спробу отримати доступ до каналу й здійснити успішне передавання кадру даних. У цілому процес функціонування безпроводового каналу за таких обставин можна розглядати, як квазістаціонарний випадковий процес.

Розглянемо ймовірність успішного передавання кадру даних довільною станцією. Вплив усіх інших станцій можна розглядати як деякий інтегральний випадковий процес без деталізації на внески кожної окремої станції.

Проаналізуємо правила отримання доступу до безпроводового каналу у разі застосування розподіленої функції координації мережі стандарту 802.11, що є однаковою для усіх чинних на сьогодні специфікацій цього стандарту. Доступ до звільненого безпроводового каналу

починається зі стану відстрочки. У цьому стані для запису у лічильник відстрочки буде з однаковою ймовірністю обрано число із множини цілих чисел  $\{0, \dots, CW1\}$ . Для першої спроби  $CW1$  має мінімальне значення  $CW1 = CW_{min}$ , передбачене відповідною специфікацією стандарту. Якщо перша спроба передати кадр була невдалою через виникнення колізії, тоді повторне завантаження лічильника відстрочки даної станції буде здійснюватись цілим числом із множини  $\{0, \dots, CW2\}$  тощо. Для режиму DCF відповідно до стандарту IEEE 802.11 визначено, що максимальна величина конкурентного вікна  $CW_{max} = [2m \times (CW_{min} + 1) - 1]$ , де  $m$  – параметр, що залежить від специфікації фізичного рівня. Крім того, припустима кількість спроб передати поспіль той самий кадр обмежена числом  $R$ , після чого кадр має бути анульовано, а цикл доступу до каналу почнеться з використанням значення  $CW1$ .

Таким чином, першій спробі передати інформаційний кадр буде передувати інтервал відстрочки з номером  $i = 1$ , що визначається початковим значенням лічильника відстрочки, другій спробі – інтервал відстрочки з номером  $i = 2$ , обумовлений колізією під час першої спроби, останньою спробою буде спроба з номером  $i = R$ , якій передувало  $R$  відстрочок і  $(R - 1)$  колізій.

Для визначення ймовірності успішного передавання кадру даних конкретною станцією будемо використовувати такі характеристики каналу: - ймовірність доступу до каналу  $\tau$ ; ймовірність колізії для даної станції  $p_c$ ; кількість активних станцій в мережі  $N$ .

Визначимо ймовірність успішного передавання кадру даних станцією з насиченим навантаженням  $P_s$ . Відповідно до розглянутої раніше процедури під час першої спроби передати кадр після того, як безпроводовий канал звільниться, ймовірність успішного передавання буде визначатись співвідношенням

$$p_1 = \tau_1(1 - p_c), \quad (3)$$

де  $\tau_1$  – ймовірність доступу до каналу під час першої спроби.

Під час першої спроби станція не має ніяких обмежень щодо доступу до каналу, тому можна вважати, що  $\tau_1 = 1$ . У разі виникнення колізії під час першої і наступних спроб передати кадр даною станцією буде здійснювати повторні спроби, доки не здійснить  $R$  спроб. Ймовірність успішного передавання кадру даних під час кожної наступної спроби можна визначити, як умовну ймовірність. Тобто, її можна обчислити як добу-

ток ймовірності того, що всі попередні спроби були не вдалим, і ймовірності успішного передавання під час поточної спроби. Внаслідок припущення, що ймовірність колізії в режимі насиченого навантаження радіоканалу є величиною постійною, загальний вираз для ймовірності успішного передавання під час  $i$ -спроби набуде вигляду  $p_i = p_c^{i-1} \tau_i (1 - p_c)$ . Множник  $p_c^{i-1}$  є ймовірністю того, що протягом попередніх  $(i - 1)$  спроб успішне передавання даного пакету не відбулось. За умови двійкового показникового закону зміни величини конкурентного вікна у разі виникнення колізії, ймовірність доступу до каналу  $\tau$  для станції, для якої виникла колізія, зменшується в  $\frac{1}{2^{i-1}}$  разів, оскільки умовний інтервал, протягом якого вона отримує можливість доступу збільшується в  $2^{i-1}$  разів. Таким чином, ймовірність успішного передавання під час  $i$ -спроби буде визначатись співвідношенням

$$p_i = p_c^{i-1} \frac{1}{2^{i-1}} (1 - p_c). \quad (4)$$

Безумовну ймовірність того, що пакет даних буде успішно передано через радіоканал за умови обмеження максимального числа спроб числом  $R$ , знайдемо, як суму ймовірностей успішного передавання протягом усіх можливих спроб:

$$P_s = \sum_{i=1}^R p_c^{i-1} \frac{1}{2^{i-1}} (1 - p_c) = (1 - p_c) \sum_{i=1}^R \left(\frac{p_c}{2}\right)^{i-1} = \frac{(1 - p_c) [1 - (\frac{p_c}{2})^{R+1}]}{1 - \frac{p_c}{2}}. \quad (5)$$

Як впливає з (5) визначальною величиною для визначення ймовірності успішного передавання кадру інформації конкретною станцією є величина ймовірності виникнення колізій під час передавання цією станцією. Слід також відзначити, що має місце слабка залежність  $P_s$  від максимальної кількості повторних спроб передавання кадру у разі виникнення колізії  $R$ . Для отримання кінцевого розрахункового співвідношення будемо вважати, що колізія відбувається тільки між двома станціями, оскільки ймовірність участі у колізії трьох і більше станцій є дуже малою (принаймні на порядок менше ніж для двох станцій). Станцію, для якої ми здійснюємо оцінювання ймовірності успішного передавання кадру інформації назвемо обраною, а станцію, що створила з нею колізію – інша станція. Інших станцій в мережі буде  $(N - 1)$ . Для кожної із цих станцій ймовірність того, що вона буде

здійснювати спробу передати кадр протягом того ж часового слоту, що й обрана станція, буде визначатись конкурентним вікном кожної станції  $CW_{in}$ . Індеси позначають, що має місце  $i$ -та реалізація конкурентного вікна для  $n$ -ої станції. Ймовірність того, що будь-яка  $n$ -на станція призведе до колізії з обраною (позначена номером 1) станцією буде визначатись ймовірністю вибору такого числа для завантаження в лічильник зворотного відліку, що призведе до одночасного початку передавання з першою станцією протягом конкретного часового слоту. Але в межах конкурентного вікна такий збіг може статись протягом будь-якого часового слоту. Тому, для двох станцій ймовірність виникнення колізії можна визначити співвідношенням

$$p_{c1n} = \frac{1}{CW_{j1}} \cdot \frac{1}{CW_{in}} \cdot CW_s \quad (6)$$

де  $CW_s$  – усереднене значення конкурентного вікна для даної мережі з урахуванням повторних передавань кадрів.

Оскільки згідно правил доступу до каналу після успішного передавання кадру даних кожна станція починає процедуру наступного доступу до каналу з використанням мінімального значення конкурентного вікна незалежно від того, з якої спроби було здійснено успішне передавання, більшість станцій буде використовувати мінімальне значення конкурентного вікна  $CW_1$ . Крім того, можна взяти до уваги, що у мережі з насиченим навантаженням усереднене значення затримки перед передаванням кадру виражене в одиницях часових слотів складає  $CW_s / 2$ .

За таких умов для випадку, коли  $N < CW_1/2$  хорошим наближенням для усередненої величини конкурентного вікна є  $CW_s \approx CW_1$ , що відтворює найгірший (з огляду на можливість виникнення колізії) сценарій функціонування безпроводового каналу.

На підставі такого припущення визначимо ймовірність колізій, що може мати місце під час передавання кадру обраної станції. З урахуванням того, що будь-яка із  $(N - 1)$  станцій може утворити колізійну пару з обраною станцією, а також того, що ці випадкові події є незалежними, для ймовірності виникнення колізії з урахуванням (6) можна записати

$$p_c = CW_1 \sum_{n=2}^N p_{c1n} = \sum_{n=2}^N \frac{1}{CW_1^2} = \frac{N-1}{CW_1}. \quad (7)$$

На підставі результатів наведених в [1] можна зробити висновок про те, що для випадку  $N < CW_1/2$  величину  $p_c$  можна вважати постійною не залежно від числа спроб здійснити

успішне передавання. Таким чином, (7) є наближеним розрахунковим співвідношенням для визначення ймовірності виникнення колізії  $p_c$ . Графіки залежності ймовірності  $p_c$  від величини конкурентного вікна  $CW1$  наведено на рис. 1 для різної кількості активних станцій в мережі.

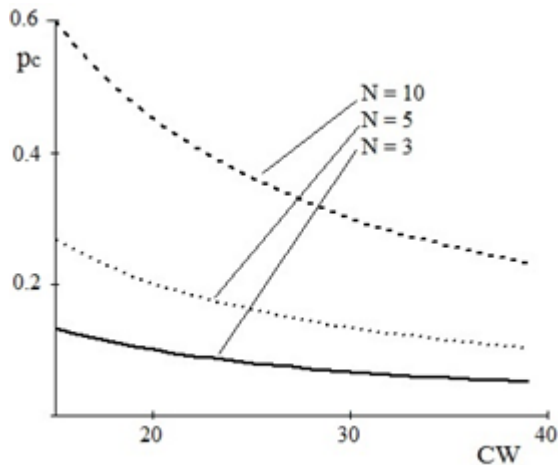


Рис. 1. Графік ймовірності колізії для однієї станції безпроводової мережі

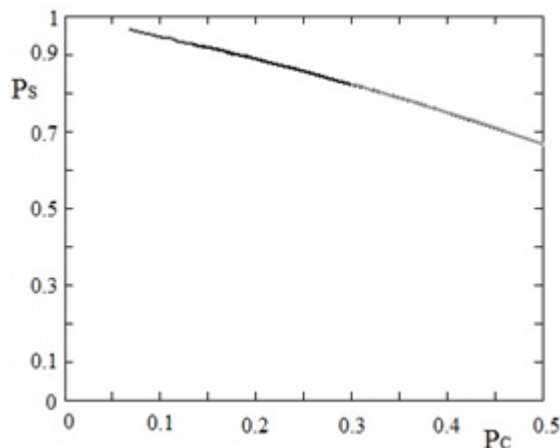


Рис. 2. Графік ймовірності успішного передавання кадру даних

На рис. 2 наведено графік залежності ймовірності успішного передавання кадру даних у каналі з показниковим законом зміни конкурентного вікна у разі виникнення колізії (5) й числом повторних спроб  $R = 6$ .

#### Визначення пропускної здатності безпроводового каналу

Для розрахунку максимальної пропускної здатності каналу без урахування колізій, повторного передавання й втрат пакетів, а також ін-

тервалів очікування застосовують співвідношення [2]:

$$S_{\max} = \frac{E[PL]}{T_s}, \quad (8)$$

де  $E[PL]$  – усереднене значення корисного навантаження в одному кадрі даних;  $T_s$  – системний інтервал часу необхідний для передавання пакету даних (MPDU), який для режиму DCF визначається співвідношенням

$$T_s = T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS, \quad (9)$$

де  $T_{MPDU}$  – інтервал часу на передавання безпосередньо кадру даних;  $SIFS$  – тривалість короткого між кадрового інтервалу;  $T_{ASC}$  – тривалість кадру підтвердження;  $DIFS$  – міжкадровий проміжок DCF, а для режиму RTS/CTS визначається співвідношенням

$$T_s = T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS, \quad (10)$$

де  $T_{RTS}$  – тривалість кадру запиту на передавання;  $T_{CTS}$  – тривалість кадру дозволу на передавання.

Під час роботи реального каналу пропускна здатність зменшується за рахунок наявності інтервалів очікування, коли жодна станція мережі не передає інформацію, повторних циклів передавання кадрів даних через виникнення колізій або через пошкодження кадрів внаслідок зменшення відношення сигнал/шум в каналі за наявності зовнішніх шумів та завад. З урахуванням зазначених чинників співвідношення для визначення пропускної здатності реального каналу набуде вигляду

$$S = \frac{E[PL]}{E[RSS]} = \frac{E[PL] \cdot P_s}{T_s + T_c \cdot (FER + p_c) + E[T_{idle}]}, \quad (11)$$

де  $E[RSS]$  – тривалість реального системного інтервалу, необхідного для передавання одного кадру даних;  $FER$  – коефіцієнт помилкових кадрів, обумовлений впливом зовнішнього середовища на роботу безпроводового каналу;  $T_c$  – середньостатистична тривалість інтервалу колізії;  $E[T_{idle}]$  – усереднені витрати часу на інтервали очікування, витрачені для передавання одного інформаційного кадру.

Значення коефіцієнта помилкових кадрів  $FER$  може бути визначено шляхом тестових вимірювань у реальній мережі або шляхом імітаційного моделювання з максимальним урахуванням чинників, що впливають на роботу безпроводового каналу, коли безперервне передавання здійснює лише одна станція.

**Висновки**

1. У результаті зроблених досліджень уточнено розрахункові співвідношення для визначення ймовірності успішного передавання кадру даних у безпроводовій мережі з конкурентним доступом до каналу. З'ясовано, що має місце слабка залежність  $P_s$  від максимальної кількості повторних спроб передавання кадру у разі виникнення колізії  $R$ .

2. Запропоновано співвідношення для визначення пропускної здатності безпроводового каналу з урахуванням реальних умов його функціонування.

3. За результатами розрахунків ймовірності виникнення колізії  $p_c$  та ймовірності успішного передавання кадру  $P_s$  можна зробити висновок, що для забезпечення високої пропускної здатності алгоритм подолання колізії слід доповнити процедурою автоматичного налаштування початкового значення конкурентного вікна  $CW_1$  залежно від кількості активних станцій в мережі.

**Список використаних джерел**

1. Anton V. Lazebnyy. The Details of Virtual Contention Window Concept for 802.11 IBSS Wireless Local Area Network Mathematic Modeling / A. V. Lazebnyy, V. S. Lazebnyy // International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing. – Vol. 1, – No. 1, May 2013 – p.7 – 13.
2. Giuseppe Bianchi, Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function/ Giuseppe Bianchi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – vol. 18 – №. 3. – p.1055 – 1067.
3. Emerging Technologies in Wireless LANs: Theory, Design and Deployment, Cambridge University Press, 2008 – с.73.
4. Широкополосные беспроводные сети передачи информации/[В.М. Вишнеvский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович]. – Москва: Техносфера, 2005 – 592 с.

*Поступила в редакцию 20 декабря 2013 г.*

УДК 004.7:654.195.6(045)

**В.С. Лазебный**, канд.техн.наук, **Б.Ф. Кауас**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

## **Оценка процессов в беспроводной сети с конкурентным доступом к телекоммуникационному каналу**

*Рассмотрен процесс передачи данных в беспроводной сети, функционирующей с применением распределенной функции координации (DCF). Предложены расчетные соотношения для вычисления пропускной способности беспроводного канала с учетом реальных условий функционирования на основе уточненных соотношений для вероятности возникновения коллизий и вероятности успешной передачи кадра данных. Библ.4, рис.2.*

**Ключевые слова:** беспроводная сеть, кадр данных, пропускная способность, каналный уровень, вероятность коллизии, функция распределенной координации.

UDC 004.7:654.195.6(045)

**V.S. Lazebny**, Ph.D., **B.A. Kawas**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Str. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

## **The evaluation of processes in wireless networks with competitive access to the telecommunication channel**

*The process of data transferring in a wireless networks operate using the distributed coordination function (DCF) is considered in this paper. As a result it was proposed a formula for the calculation of the capacity of the wireless channel functioning on actual operating conditions by using of the revised ratios for*

*the probability of collisions and the probability of successful transmission of the data frame. References 4, figures 2.*

**Keywords:** *wireless network, information frame, network throughput, medium access control, probability of collision, Distributed Coordination Function.*

### References

1. *Lazebnyy A.V., Lazebnyy V.S. (2013), "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. Vol. 1, no.1, pp.7–13.*
2. *Bianchi G. (2000), "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function". IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. no.3, pp.1055–1067.*
3. *Wu H. (2002), "Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LANs: Analysis and Enhancement". Emerging Technologies in Wireless LANs: Theory, Design and Deployment, Cambridge University Press. P.73.*
4. *Vishnevsky V.M., Liakhov A.I., Portnoy S.L., Shahnovich I.V. (2005), Broadband wireless networks transmit information. Moscow: Technosphere. Pp.298-305 (Rus)*