

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ БЛОЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ФРЕЙМІВ
У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ IEEE 802.1**

Анотація. Проаналізовано механізм блочної передачі фреймів у бездротових комп'ютерних мережах IEEE 802.11 DCF з інфраструктурною топологією. У захищеному режимі визначено залежність пропускну здатності мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці. Показано, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі, особливо в діапазоні високих швидкостей передачі. При помітному збільшенні інтенсивності завад передача блоків ускладнюється. Вже при $BER=10^{-6}$ і кількості фреймів понад 10 у ряді випадків виникає необхідність здійснення по вторних передач викривлених у блоці фреймів, а при $BER=10^{-5}$ повторних передач стає багато і результуюча пропускну здатність мережі стає незначною.

Ключові слова: бездротові комп'ютерні мережі IEEE 802.11, блочна передача фреймів, пропускну здатність, інтенсивність завад.

Вступ. В інфраструктурних схемах бездротових комп'ютерних мереж WLANs, які базуються на використанні функції DSF (distributed coordination function) і механізму CSMA/CA, станція STA (STAtion) посилає фрейм у випадку звільнення каналу передачі після очікування закінчення DIFS (distributed inter-frame space) інтервалу і роботи механізму вибору слоту для передачі (backoff mechanism). Якщо цей фрейм є коректно прийнятим точка доступу AP (Access Point) відсилає зворотно квитанцію ACK (ACKnowledgment) після короткого міжфреймового інтервалу SIFS (short inter-frame space). Цей інтервал є необхідним фізичному рівню (PHY) AP для переходу від стану прийому у стан передачі повідомлення. Усі інші станції WLAN відтермінують боротьбу за доступ до каналу до завершення передачі ACK повідомлення. Після цього усі STAs очікують закінчення інтервалу DIFS та анулюють backoff – лічильники для початку наступного раунду передачі фрейму.

У випадку колізій чи пошкодження фрейму завадами AP не може декодувати фрейм і не посилає зворотно станції ACK. Станція-відправник STA очікує одержання потенційного ACK до закінчення відповідного таймауту, і у разі

одержання починає процедуру backoff перед передачею. Тривалість слоту, що використовується в процесі backoff, залежить від швидкості роботи техніки фізичного рівня.

Постановка задачі. На основі аналізу механізму блочної передачі фреймів у захищеному режимі визначити залежність пропускної здатності бездротової мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці. Розглянути вплив інтенсивності завад у каналі передачі на величину пропускної здатності.

Основна частина. В ідеальному випадку, коли в каналі відсутні помилки і не трапляються колізії в будь-якому циклі передачі, активною є тільки одна СТА, яка завжди має відкладений (backlogged) фрейм для передачі. Цей відкладений фрейм знаходиться в черзі між MAC і його сусіднім вищим рівнем очікуючи відправлення. Середня тривалість процесу backoff дорівнює:

$$T_{CW} = \frac{\sigma \cdot (CW_{\min} - 1)}{2}, \quad (1)$$

де σ позначає тривалість вільного слоту, CW_{\min} – мінімальна довжина конкурентного вікна. При цьому ідеальна пропускна здатність каналу може бути визначена як

$$S_{ideal}^{DCF} = S_1 = \frac{L_{data}}{T_{DIFS} + T_{CW} + T_{PHYhdr} + \frac{L_{data}}{R} + T_{SIFS} + T_{ACK} + 2\delta}, \quad (2)$$

де L_{data} – довжина поля даних фрейму, T_{PHYhdr} – довжина заголовку фізичного рівня фрейму, R – фізична швидкість передачі даних, δ – час передачі сигналу по каналу зв'язку.

Для зменшення накладних витрат був запропонований механізм передачі з використанням блоків фреймів [1, 2]. Цей механізм передбачає, що блок фреймів, призначених одному одержувачу, може бути відправлений без підтвердження факту коректного прийому точкою доступу AP кожного фрейму окремо. Після відправлення блоку відправник (STA) формує і відправляє до AP Block ACK Request (BAR) фрейм із запитом номерів фреймів у блоці, які успішно прийняті. Після цього AP відповідає Block ACK (BA) фреймом.

Блочна передача в захищеному режимі передбачає наступне. Відправник (STA) змагається за доступ до каналу для першого фрейму блока. Якщо він виграв змагання за доступ, починається передача першого фрейму, і після одержання підтвердження ACK на нього і короткого роздільного інтервалу SIFS, станція STA передає цілий блок фреймів, який супроводжується службовим

фреймом BAR. Після цього передача припиняється до одержання BA фрейму від AP. Після одержання BA фрейму, підтверджуючого коректний прийом усього блоку чи його частини, відправник починає новий етап змагання за доступ до каналу. Схема блочної передачі фреймів показана на рис. 1.

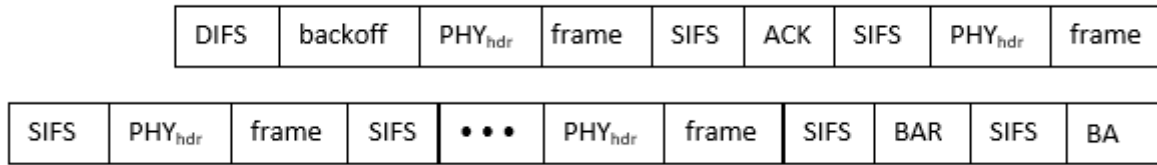


Рисунок 1 – Схема передачі блоку фреймів

Якщо захисний механізм не використовується, то навіть у випадку, коли головний фрейм блоку знаходиться у колізії з фреймами, які передаються іншими станціями, ці станції будуть продовжувати передачу фреймів у блоках і колізії будуть тривати, поки не буде визначений сам факт колізії. Це може бути причиною суттєвого зменшення продуктивності передачі даних [2].

Припустимо, що інфраструктурний домен WLAN містить N станцій, які використовують однакові швидкості передачі фреймів. Усі вони генерують трафік однакового пріоритету і, таким чином, мають рівні імовірності виграти змагання за доступ до каналу. Ми також припустимо, що станції працюють в умовах насичення, тобто блок є завжди доступним в черзі для передачі. Слід зауважити, що при передачі станції стикаються з однаковими канальними умовами, тобто параметр шуму BER (Bit Error Rate) у каналі є однаковим для усіх.

У випадку незначного шуму пропускну здатність мережі при використанні механізму блочної передачі (рис. 1) можна виразити наступним чином:

$$S_k = \frac{(k + 1) \cdot L_{data}}{T_{DIFS} + T_{CW} + T_{ACK} + T_{SIFS} + (k + 1)T_F + T_{BAR} + T_{SIFS} + T_{BA} + 2\delta}, \quad (3)$$

де k – це кількість фреймів у блоці, $T_F = T_{PHYhdr} + \frac{L_{data}}{R} + T_{SIFS}$.

Для оцінки значень S_k використовувались наступні дані, наведені в [1, 3] для технологій IEEE 802.11n,ac: $SIFS = 16 \mu s$, тривалість часового слоту – $9 \mu s$, $DIFS = 34 \mu s$, $PHYhdr = 20 \mu s$, $CW_{min}=16$, $2\delta=0,7 \mu s$, $T_{BAR} = 21,8 \mu s$, $T_{BA} = 31 \mu s$. Графіки залежностей $S_1(R)$ і $S_k(k, R)$ наведені на рис. 2.

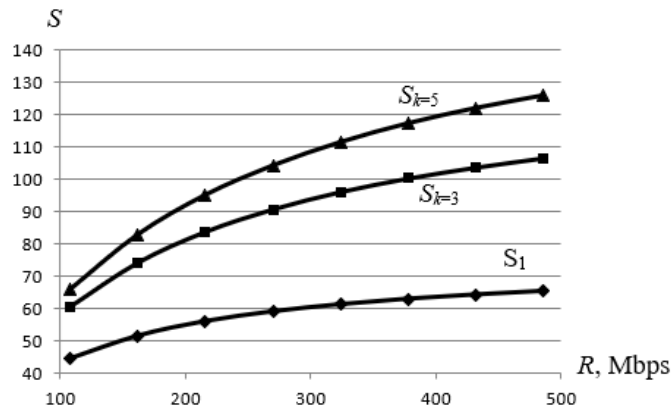


Рисунок 2 – Залежність пропускної здатності мережі S від швидкості R при передачі окремими фреймами $S_1(R)$ і блоками з трьох $S_{k=3}(R)$ і п'яти $S_{k=5}(R)$ фреймів в захищеному режимі

Із графіків видно, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі. Цей ефект посилюється при більш високих швидкостях передачі.

Для більш детального визначення впливу параметру k на пропускну здатність мережі побудовані залежності для трьох швидкостей передачі $R = 108, 270, 432$ Mbps (рис. 3).

Із графіків видно, що на початкових етапах спостерігається суттєве зростання пропускної здатності мережі S із збільшенням кількості фреймів k у передаваному блоці. Але далі графіки стають більш пологими, тобто спостерігається їх входження в режим насичення. Граничне значення S при $k \rightarrow \infty$ дорівнює

$$S_{k \rightarrow \infty} = \frac{L_{data}}{T_{PHYhdr} + \frac{L_{data}}{R} + T_{SIFS}}, \quad (4)$$

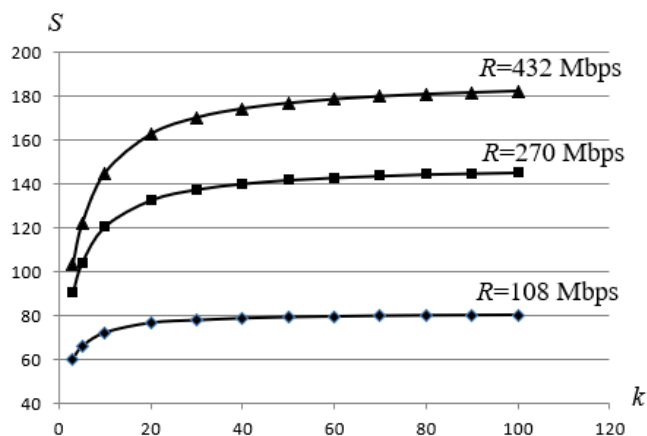


Рисунок 3 – Залежності пропускної здатності мережі S при блочній передачі від кількості k фреймів у блоці і швидкості R передачі

Збільшення інтенсивності завад в оточуючому середовищі бездротової мережі приводить до того, що частка пошкоджених при передачі фреймів стає помітною. При цьому збільшення довжини передаваного масиву даних приводить до збільшення імовірності їх пошкодження.

Імовірність успішної (безпомилкової) передачі блоку даних Block Frames Error Rate (BFER) з високим ступенем достовірності можна визначити наступним чином [4, 5]:

$$P_s = (1 - P_c)(1 - P_b)^L = (1 - P_c)(1 - P_b)^L, \quad (5)$$

де P_c – це імовірність колізії в ідеальному каналі; P_b – імовірність викривлення даних блоку завадами при передачі (BFER); P_b – імовірність викривлення одного біту даних, чи, інакше, BER [6]; L – загальна довжина масиву даних блоку в бітах.

Проаналізуємо вплив інтенсивності зовнішніх завад, чи, інакше кажучи, рівня помилок у каналі зв'язку, на імовірність успішної передачі блоку фреймів. Оскільки, відповідно до (5), вплив імовірностей колізій P_c і зовнішніх завад P_b здійснюється на P_s окремо [7], то можна не втрачаючи достовірності аналізу прирівняти P_c до нуля.

У табл. 1 наведено значення імовірності безпомилкової передачі блоку фреймів P_s при різних значеннях k для трьох рівней $P_b = \text{BER} = 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}$. Як видно з наведених в таблиці даних, передача блоку вже при $\text{BER} = 10^{-6}$ і $k > 8$ у ряді випадків призводить до необхідності здійснення повторних передач викривлених у блоці фреймів, а при $\text{BER} = 10^{-5}$ і $k > 3$ взагалі має мало сенсу, бо результуюча пропускна здатність буде малою. Тому у випадку значної інтенсивності завад доцільно формувати блоки з невеликою кількістю фреймів, враховуючи також природу залежностей, представлених на рис. 3.

Висновки. Проаналізовано механізм блочної передачі фреймів в бездротових комп'ютерних мережах IEEE 802.11 з інфраструктурною топологією, які базуються на використанні функції DCF у рамках механізму CSMA/CA. У захищеному режимі визначені залежності пропускної здатності мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці в умовах незначної інтенсивності шуму. Показано, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі. Цей ефект посилюється з підвищенням швидкості передачі.

При збільшенні кількості фреймів у блоці за межі 20-40 фреймів, в залежності від швидкості передачі, зростання пропускної здатності

уповільнюється і в подальшому переходить у режим насичення.

Одержані результати показують, що при збільшенні інтенсивності завад передача блоків ускладнюється. Вже при $BER=10^{-6}$ і $k > 8$ у ряді випадків виникає необхідність здійснення повторних передач викривлених в блоці фреймів, а при $BER=10^{-5}$ і $k > 3$ повторних передач стає багато і результуюча пропускна здатність мережі буде невеликою. Тому у випадку значної інтенсивності завад доцільно формувати блоки з невеликою кількістю фреймів, враховуючи характер залежностей $S(R, k)$.

Таблиця 1

Залежності P_S від k при різній інтенсивності завад P_b

BER= $P_b=10^{-7}$											
P_S	0,999	0,998	0,996	0,995	0,994	0,993	0,990	0,988	0,982	0,976	0,965
k	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
BER= $P_b=10^{-6}$											
P_S	0,988	0,976	0,965	0,953	0,942	0,931	0,908	0,887	0,835	0,787	0,697
k	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
BER= $P_b=10^{-5}$											
P_S	0,887	0,787	0,697	0,619	0,549	0,487	0,383	0,301	0,165	0,09	0,03
k	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30

ЛІТЕРАТУРА

1. Li T. Performance analysis of the IEEE 802e block ACK scheme in a noisy channel / T. Li, Q. Ni, T. Turletti, Y. Xiao // Proc. IEEE Broadnet 2005.-Vol.1.-Oct. 2005.- P.511-517.
2. Li H. Throughput and delay analysis of IEEE 802.11e Block ACK with channel errors / H. Lee, I. Tinnirello, Y. Yu, S. Choi // Proc. 2nd Int. Conf. on Communication Systems Software and Middleware. – Jan. 2007. – P. 406-418.
3. Chang Z. Performance analysis of IEEE 802.11ac DCF with hidden nodes / Z. Chang, O. Alanen, T.Huovinen, T. Nihtila, E.H. Ong, J. Kneckt and T. Ristaniemi //IEEE 978-1-4673-0990-5/12/2012. – 5 p.
4. Khandetskyi V.S. Modeling of IEEE 802.11 computer networks at increased interference intensity / V.S. Khandetskyi, N.V. Karpenko // Radio Electronics, Computer Sciences, Control. – 2022. – No.2. – P.132-139.

5. Khandetskyi V.S. Optimizing the action of IEEE 802.11 computer networks at significant level of bit error rate / V.S. Khandetskyi // System Technologies. – 2023. – No.1 (144). – P.36-43.
6. Ouyang M. Optimal interference range for minimum Bayes risk in binomial and Poisson wireless networks / M. Ouyang, W. Shi, R. Zhang, W. Liu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2019:247. – 12 p.
7. Bozkurt A. Optimal delay analysis for real-time traffics over IEEE 802.11 wireless LANs / A. Bozrurt // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016:19. – 11 p.

REFERENCES

1. Li T. Performance analysis of the IEEE 802e block ACK scheme in a noisy channel / T. Li, Q. Ni, T. Turletti, Y. Xiao // Proc. IEEE Broadnet 2005.-Vol.1.-Oct. 2005.- P.511-517.
2. Li H. Throughput and delay analysis of IEEE 802.11e Block ACK with channel errors / H. Lee, I. Tinnirello, Y. Yu, S. Choi // Proc. 2nd Int. Conf. on Communication Systems Software and Middleware. – Jan. 2007. – P. 406-418.
3. Chang Z. Performance analysis of IEEE 802.11ac DCF with hidden nodes / Z. Chang, O. Alanen, T. Huovinen, T. Nihtila, E.H. Ong, J. Kneckt and T. Ristaniemi //IEEE 978-1-4673-0990-5/12/2012. – 5 p.
4. Khandetskyi V.S. Modeling of IEEE 802.11 computer networks at increased interference intensity / V.S. Khandetskyi, N.V. Karpenko // Radio Electronics, Computer Sciences, Control. – 2022. – No.2. – P.132-139.
5. Khandetskyi V.S. Optimizing the action of IEEE 802.11 computer networks at significant level of bit error rate / V.S. Khandetskyi // System Technologies. – 2023. – No.1 (144). – P.36-43.
6. Ouyang M. Optimal interference range for minimum Bayes risk in binomial and Poisson wireless networks / M. Ouyang, W. Shi, R. Zhang, W. Liu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2019:247. – 12 p.
- Bozkurt A. Optimal delay analysis for real-time traffics over IEEE 802.11 wireless LANs / A. Bozrurt // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016:19. – 11 p.

Received 12.02.2024.

Accepted 16.02.2024.

Analysis of the efficiency of block frame transmission in IEEE 802.11 computer networks

In infrastructure schemes of WLANs wireless computer networks, which are based on the use of the DSF (distributed coordination function) function and the CSMA/CA

mechanism, the station STA (STation) sends a frame if the transmission channel is released after waiting for the end of the DIFS (distributed interframe space) interval and operation of the slot selection mechanism for transmission (backoff mechanism).

In case of collisions or damage to the frame by interference, the AP cannot decode the frame and does not send it back to the ACS station. The sending station STA waits for the receipt of a potential ACK before the expiration of the corresponding timeout, and in case of receipt, starts the backoff procedure before transmission. The duration of the slot used in the backoff process depends on the speed of the physical layer technology.

To reduce overhead, a transmission mechanism using frame blocks was proposed. This mechanism assumes that a block of frames intended for one recipient can be sent without confirming the fact of correct reception by the AP access point of each frame separately. In this case, the sender (STA) competes for access to the channel for the first frame of the block. If it wins the access competition, the transmission of the first frame begins, and after receiving the ACK acknowledgment for it and a short SIFS separation interval, the STA transmits a whole block of frames, which is accompanied by a BAR service frame.

The mechanism of frames block transmission in wireless computer networks IEEE 802.11 DCF with infrastructure topology has been analyzed. In protected mode, the dependencies of network throughput on data transmission rate and the number of frames in a block are determined. It is shown that the mechanism of block transmission significantly increases the network throughput, especially in the range of higher transmission rates. With a marked increase in the intensity of interference the transmission of blocks becomes more complicated. Already with $BER=10^{-6}$ and the frames number of the order of 10 and more, in some cases there is a need to retransmit distorted in a block frames, and at $BER=10^{-5}$ there are many retransmissions, so the resulting network throughput becomes small.

Хандецький Володимир Сергійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Карпенко Надія Валеріївна, к.ф.-м.н., доцент кафедри ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Khandetskyi Volodymyr – Doctor of Sciences, Professor, Head of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

Karpenko Nadiia Ph.D in Physics and Mathematical Sciences, Associate Professor, Computer Engineering Department, Oles Honchar Dnipro National University.