

В.С. ЛАЗЕБНИЙ, канд. техн. наук, О.О. ОМЕЛЬЯНЕЦЬ

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ГОЛОСОВОГО ТРАФІКА ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ IEEE 802.11AC

Вступ

Останнім часом значного поширення набула технологія передавання голосового трафіка через IP мережі (VoIP) [1]. Здебільшого використовують IP телефони, з'єднані з IP мережею за технологією Ethernet. Проте, все частіше використовують і безпроводове з'єднання засобами мережі Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11) [2]. Перестороги щодо більш широкого використання Wi-Fi виникають у користувачів через нестабільність показників якості (QoS) безпроводових мереж. Технології безпроводових мереж постійно зазнають удосконалення, з метою поліпшити їх якісні показники і розширити сферу їх застосування [3]. Найбільш розповсюдженими натеper є безпроводові мережі стандарту IEEE 802.11 специфікацій IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac. Специфікацію IEEE 802.11n призначено для використання як у частотному діапазоні 2,4 ГГц, так і в діапазоні 5 ГГц, а специфікацію IEEE 802.11ac, яку можна вважати удосконаленою версією специфікації IEEE 802.11n, – призначеною для використання тільки в діапазоні 5 ГГц. У 2005 році прийнято специфікацію IEEE 802.11e, яку розроблено для підвищення якості надання телекомунікаційних послуг Wi-Fi мережами шляхом пріоритизації мережного трафіка [4]. В деяких специфікаціях, що стосуються безпосередньо каналного і фізичного рівнів, IEEE 802.11e передбачено використовувати опційно, а в специфікації IEEE 802.11ac передбачено використовувати її обов'язково [5]. Проте, не можна сказати, що процес пошуку найкращих режимів застосування механізмів якості обслуговування IEEE 802.11e вже завершено [6], тому дослідження в цьому напрямі є актуальними.

Для організації послуги IP-телефонії треба забезпечити невелику затримку передавання голосових кадрів і невелику нерівномірність цієї затримки. В мережах IEEE 802.11 внаслідок спільного використання середовища передавання і конкурентного доступу до каналу за наявності великої кількості активних користувачів можуть виникати колізії, що призводить до зменшення пропускної здатності і погіршення інших показників якості.

Відомі компанії-виробники мережного обладнання приділяють велику увагу удосконаленню технології VoIP. Так, компанія Cisco в постійно оновлюваних рекомендаціях щодо організації мереж з послугою VoIP [7] зазначає, що під час планування таких мереж треба надавати перевагу мережним технологіям, що призначені для використання в діапазоні 5 ГГц. Для забезпечення високої якості надання послуги VoIP треба забезпечити умови, за яких наскрізна затримка передавання голосового кадру не буде перевищувати 150 мс, а нерівномірність затримки (джитер) буде в межах 100 мс. Також зазначено, що треба забезпечити відношення сигнал-шум в точці приймання не менше 25 дБ, а навантаження мережі має не перевищувати 50%.

У роботі [8] наведено рекомендації, що ґрунтуються на наявному досвіді і теоретичних дослідженнях. Серед цих рекомендацій можна відзначити таке: для кадрів VoIP треба використовувати пріоритизацію з гарантованим доступом до каналу, а також застосовувати протокол реального часу (RTP).

У роботі [9] крім згаданих вище засобів підвищення якості обслуговування рекомендовано здійснювати керування пропускною здатністю каналу і уникати надмірного навантаження.

Наведені вище рекомендації сприяють поліпшенню якості послуги IP-телефонії, але не надають кількісної оцінки впливу окремих чинників. Наприклад, говорити про ефективну пропускну здатність безпроводової мережі неможливо без прив'язки до розмірів кадрів даних. Потребує уточнення питання стосовно розподілу пропускної здатності мережі між

трафіком з різними пріоритетами, а також питання щодо кількості активних станцій, які можуть одночасно функціонувати в зоні обслуговування точки доступу.

Метою дослідження є з'ясувати особливості передавання голосового трафіка для організації послуги IP-телефонії в офісних приміщеннях засобами мережі IEEE 802.11ac, щоб забезпечити якісне надання зазначеної послуги для достатньо великої кількості користувачів, навіть за умови інтенсивного передавання змішаного трафіка.

Кодеки і особливості їх застосування

Перш ніж перейти до розгляду процесів у безпроводовій мережі IEEE 802.11ac, необхідно з'ясувати параметри й характеристики голосового трафіка, який треба передавати мережею. У цифрових системах для передавання голосового трафіка застосовують стиснення сигнального потоку з метою зменшити його інтенсивність для передавання цифровими мережами. Голосовий потік після стиснення подають кадрами однакової величини і однакової тривалості. Існує велика кількість голосових кодеків, що використовують у системах цифрового голосового зв'язку [10]. У табл. 1 за матеріалами [11] наведено параметри кількох кодеків, що мають застосування в IP-телефонії.

Кодек G.711 – один із перших голосових кодеків, що був призначений для застосування в каналах ISDN. Його часто використовують і в Інтернет-телефонії (VoIP).

Таблиця 1

Параметри кодеків голосових сигналів

Параметри	G.711	G.729	G.722	iLBC
Тип	вузькосмуговий	вузькосмуговий	широкосмуговий	вузькосмуговий
Звукові частоти, Гц	300-3400	300-3400	50-7000	300-3400
Частота дискретизації, Гц	8000	8000	16000	8000
Розрядність	8	16	14	16
Потік, кбіт/с	64	8	48, 56, 64	13,33 – 15,2
Навантаження	160 байтів/20мс 240 байтів/30мс	20 байтів/20мс	160 байтів/20мс	38 байтів/20мс 50 байтів/30мс
Метрика MOS	4,1	3,9	4,3 (64 кбіт/с)	4,1 (15,2 кбіт/с)

G.729 – це кодек із малою інтенсивністю сигнального потоку і малим обсягом блоків даних корисного навантаження. Зниження якості відтвореного голосу є незначним, у порівнянні з кодеком G.711. У кодеку використано алгоритм стиснення з втратами. Цей кодек використовують у мережах з обмеженою пропускну здатністю, таких як WAN. Як і G.711, це один із найпоширеніших кодеків у сфері VoIP.

Кодек G.722 є широкосмуговим і забезпечує більш природне звучання голосу, в порівнянні з G.711 і G.729.

iLBC (Internet Low Bitrate Codec) – Інтернет-кодек з малою інтенсивністю сигнального потоку, що забезпечує чудову якість передавання голосу. В ньому передбачено деяку компенсацію втрачених голосових кадрів, що може статися внаслідок втрати або затримки IP-пакетів. Необхідне навантаження на процесор подібне до G.729. Кодек призначено для використання в Інтернеті в рамках протоколу WebRTC (real-time communications) для організації голосового і відеозв'язку.

Розрахунок часу передавання за різних режимів модуляції і кодування

Для дослідження особливостей передавання голосового трафіка в мережах IEEE 802.11ac скористаємось параметрами кодеку G.711 як одного із поширених кодеків для IP-телефонії і такого, що формує кадри даних з великим навантаженням (табл. 1).

Визначимо час передавання одного кадру голосового трафіка, сформованого кодеком G.711. Розглянемо час передавання в каналі IEEE 802.11ac з частотною смугою 20 МГц у режимі з одним просторовим потоком, в разі застосування різних схем модуляції і кодування (MCS). Розглянемо два режими функціонування кодеку G.711: з тривалістю вибірки

20 мс і з тривалістю вибірки 30 мс. Для розрахунку часу передавання голосового кадру скористаємось розподілом часових інтервалів, наведених на рис. 1.

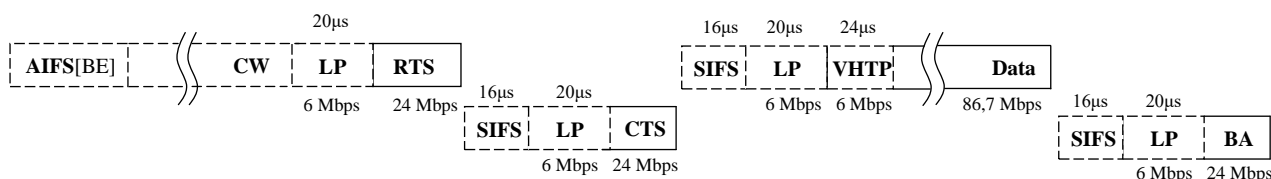


Рис. 1. Розподіл часових інтервалів під час доступу до безпроводового каналу 802.11ac [12]

Тривалість інтервалу передавання голосового кадру $E[T_{PL1}]$ визначимо за очевидним співвідношенням, що впливає безпосередньо з розподілу часових інтервалів, рис. 1:

$$E[T_{PL1}] = AIFS[BE] + CW + T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK}, \quad (1)$$

де $AIFS[BE]$ – міжкадровий арбітражний інтервал, CW – тривалість затримки, обумовленої лічильником зворотного відліку, T_{RST} – кадр запиту на передавання, $SIFS$ – короткий міжкадровий інтервал, T_{CST} – кадр підтвердження готовності прийняти кадр, T_{MPDU} – тривалість кадру даних, яким передають блок голосової інформації разом зі службовою інформацією протоколів верхніх рівнів моделі OSI, рис. 2 [13], T_{ACK} – кадр підтвердження прийнятого кадру даних.

IP 20 байтів	UDP 8 байтів	RTP 12 байтів	Голосові дані n байтів	FCS 4 байти
-----------------	-----------------	------------------	-----------------------------	----------------

Рис. 2. Структура даних в кадрі корисного навантаження (Data)

Для аналізу особливостей передавання голосового трафіка розглянемо кілька режимів доступу до середовища передавання. Розглянемо режим передавання голосового трафіка в мережі DCF без пріоритизації і режим передавання голосового трафіка з пріоритизацією в мережі EDCF. Ці режими вибрано для досліджень, оскільки різні виробники мережного обладнання пропонують по-різному реалізовувати послугу передавання голосового трафіка [14].

Для кращої надійності приймання службової інформації і кращої електромагнітної сумісності близько розташованих мереж стандарту IEEE802.11 преамбули кадрів на каналному рівні передають з малою кратністю модуляції і з найменшою швидкістю завадозахисного коду ($R=1/2$). В результаті швидкість передавання преамбул становить 6 МГц/с. Визначимо тривалості часових інтервалів, наведених на рис. 1. В інтерфейсі безпроводового каналу IEEE 802.11ac застосовано систему багаточастотної модуляції й кодування OFDM. Дані передають символами OFDM, які складаються з угруповання ортогональних частот. Угруповання, яке передбачено застосовувати в каналі з частотною смугою 20 МГц, містить 56 частот, 52 із яких передбачено для передавання даних, а 4 – для передавання пілот-сигналів. Тривалість символу OFDM згідно зі специфікацією 802.11ac може бути 4 мкс (захисний інтервал 0,8 мкс) або 3,6 мкс (захисний інтервал 0,4 мкс). Тривалість символу 4 мкс використовують завжди для передавання кадрів службової інформації, частини преамбули кадрів даних і для передавання кадрів даних в мережах з абонентськими станціями різних поколінь. Тривалість символу 3,6 мкс використовують для передавання частини преамбули дуже швидкісного режиму (VHT) і даних в однорідних мережах, що підтримують режим VHT [4]. Надалі будемо вважати, що для передавання голосового трафіка використовуємо символи OFDM тривалістю 4 мкс. Важливі системні параметри режимів DCF і EDCF наведено в табл. 2 [15].

Таблиця 2

Системні параметри для різних класів корисного навантаження

Параметри EDCA за початковим налаштуванням для кожного класу доступу			
Клас доступу	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN
Фоновий (AC_BK)	15	1023	7
Краща спроба (AC_BE)	15	1023	3
Відео (AC_VI)	7	15	2
Голос (AC_VO)	3	7	2
Успадкований DCF	15	1023	2
*AIFSN – число (N) для визначення тривалості арбітражного інтервалу (AIFS).			

Тривалості міжкадрових інтервалів, протягом яких станції мережі не здійснюють дій для доступу до каналу, мають такі значення: SIFS = 16 мкс (короткий міжкадровий інтервал), DIFS = 34 мкс, AIFS[AC_BE] = SIFS+3·ST = 16+3·9 = 43 мкс, AIFS[AC_VO] = -SIFS+2·ST = 16+2·9 = 34 мкс, AIFS[AC_BK] = SIFS+7·ST = 16+7·9 = 79 мкс [16].

У мережі DCF та у мережі EDCF для класів доступу BE і BK значення конкурентного вікна однакові та знаходяться в межах від $CW_{\min} = 15$ до $CW_{\max} = 1023$. Кожна станція перед початком доступу до мережі завантажує в свій лічильник зворотного відліку число із множини $\{0, 1, 2, \dots, CW_{\min}\}$. Вибір числа відбувається випадковим чином і вибір будь-якого числа є однаково ймовірним. Якщо середовище передавання вільне станція здійснює декремент лічильника зворотного відліку через інтервали часу, що мають назву часові слоти, $ST = 9$ мкс. Коли значення лічильника зворотного відліку досягає значення «нуль», станція здійснює передавання кадру. У разі виникнення колізії, станція збільшує множину чисел, із яких буде вибрано число для завантаження лічильника зворотного відліку, за формулою $CW := 2(CW + 1) - 1$ [5]. Якщо одна активна станція мережі буде тривалий час передавати голосовий трафік у мережі DCF, тоді в середньому затримка зворотного відліку становитиме $CW = CW_{\min}/2 = 7,5$ (часових слотів).

Тривалість кадру RTS визначимо для швидкості передавання 24 Мбіт/с (найбільша передбачена у стандарті IEEE 802.11 швидкість для кадрів RTS і CTS). Стандартом передбачено передавати кадри RTS і CTS з високою надійністю. Можливі швидкості передавання блоку даних цих кадрів становлять 6, 12 і 24 Мбіт/с. Преамбулу цих кадрів завжди передають зі швидкістю 6 Мбіт/с, і тривалість преамбули становить 20 мкс, рис. 1. Блок даних RTS становить 20 байтів. Швидкість 24 Мбіт/с є успадкованою від 802.11a. В режимі передавання з такою швидкістю застосовують модуляцію носійних частот 16-QAM і згорткове кодування зі швидкістю $R=1/2$. Кількість бітів блоку даних кадру RTS з урахуванням завадозахисного кодування становитиме $20 \cdot 8 \cdot 2 = 320$. Один символ OFDM містить 52 носійні частоти, кожна з яких передає 4 біти даних. Одним символом можна передати 208 бітів. Для передавання блоку даних кадру RTS треба $320:208=1,54 \rightarrow 2$ символи. Таким чином, загальна тривалість кадру RTS становить $20 \text{ мкс} + 4 \text{ мкс} \cdot 2 = 28 \text{ мкс}$.

Аналогічно визначимо тривалість інтервалу передавання кадру CTS. Обсяг даних цього кадру становить 14 байтів або 112 бітів. З урахуванням завадозахисного кодування, блок даних для передавання становитиме 224 біти. Кількість символів становить $224:208 = 1,077 \rightarrow 2$ символи. Тобто тривалість кадру CTS становить також 28 мкс.

Визначимо тепер тривалість інтервалу передавання блоку даних, сформованого кодеком G.711, рис. 2.

Інтенсивність потоку на виході кодека становить 64 кбіт/с, табл. 1. Інформаційними IP-мережами передають інформаційні пакети цього кодека двох типів: пакети з вибіркою 20 мс голосового сигналу і пакети з вибіркою 30 мс. Кодек G.711 формує сигнал за методом ІКМ (імпульсно-кодової модуляції) з частотою вибірки 8 кГц, розрядністю оцифрованої вибірки 8 біт/відлік і можливістю компандування сигналу. Під час оброблення звукового

сигналу тривалістю 20 мс кодек сформує блок даних, що містить 160 вибірок. Окрім безпосередньо голосових даних блок даних містить 20 байтів заголовку IP, 8 байтів заголовку UDP і 12 байтів заголовку RTP, тобто разом іще 40 байтів даних, рис. 2. Сумарно блок даних має обсяг $160+40 = 200$ байтів, що дорівнює 1600 бітів.

Відстань, на якій можна здійснювати передавання даних між абонентською станцією і точкою доступу залежить від потужності передавача і схеми модуляції і кодування радіочастотних сигналів. Найбільшу швидкість передавання в режимі MCS8 можна реалізувати на найменшій відстані від точки доступу. Користувачі можуть знаходитись на значній відстані від точки доступу, і тому режим передавання даних буде повільнішим ніж у разі застосування MCS8. Крім відстані на режим передавання впливають різні перешкоди, що знаходяться на шляху розповсюдження електромагнітних хвиль [17]. В офісних приміщеннях це можуть бути перегородки із різноманітних матеріалів, стелажі, інші співробітники тощо. Для оцінювання того, наскільки зміняться умови передавання голосового трафіка в разі використання меншої швидкості для передавання даних, визначимо час передавання голосового кадру в разі застосування різних схем модуляції і кодування (MCS3 – MCS8). Для прикладу наводимо розрахунок для режиму MCS8 – найбільш швидкісного режиму для каналу 20 МГц мережі 802.11 ас з одним просторовим потоком.

У режимі з MCS8 застосовують модуляцію 256-QAM і швидкість завадозахисного коду $R=3/4$. Після завадозахисного кодування обсяг даних зростає до $1600 \cdot 4/3 = 2134$ бітів. Одним OFDM символом можна передати $8 \text{ бітів} \cdot 52 = 416$ бітів. Для передавання всього блоку даних знадобиться $2134/416 = 5,13 \rightarrow 6$ символів або 24 мс. Час передавання кадру даних з урахуванням преамбули (44 мкс) становитиме $44+24 = 68$ (мкс).

Згідно з (1), загальна тривалість циклу доступу до каналу для передавання блоку голосової інформації тривалістю 20 мс в мережі DCF складе:

$$E[T_{PL1}] = 34 + 7,5 \cdot 9 + 28 + 16 + 28 + 16 + 68 + 16 + 32 = 305,5 \text{ мкс.}$$

Результати розрахунків тривалості циклу доступу до каналу для передавання одного голосового кадру, в разі застосування різних режимів, наведено на рис. 3.

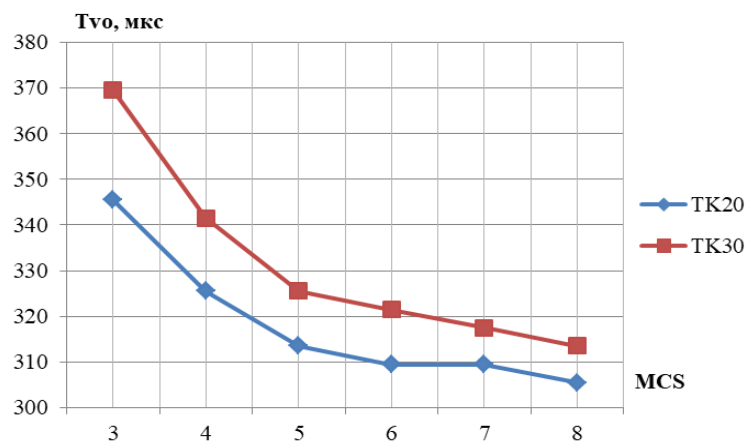


Рис. 3. Залежність тривалості T_{VO} передавання голосового кадру від режиму модуляції і кодування MCS

На рис. 3 наведено також результати розрахунків часу передавання голосових кадрів з вибіркою 30 мс.

Якщо тільки одна станція в мережі передає голосовий трафік без агрегування, то вона рівномірно передаватиме 50 кадрів за секунду, в разі опрацювання звукових фрагментів тривалістю 20 мс і 33,3(3) кадри – в разі опрацювання фрагментів тривалістю 30 мс.

Якщо порівняти час формування звукового кадру і тривалість інтервалу доступу до каналу для його передавання, то очевидно, що час передавання складає незначну частку від часу формування звукового кадру. Так, в разі передавання кадру з вибіркою 20 мс, час передавання становить $1,72 \div 1,53 \%$, а для кадру з вибіркою 30 мс – $1,23 \div 1,04 \%$.

Із отриманих результатів (рис. 3) випливає, що час передавання кадру даних, що містить голосову інформацію мало залежить від режиму модуляції й кодування. Тобто, умови передавання голосового трафіка для станцій, що знаходяться на різній відстані від точки доступу, будуть майже однаковими.

Можна визначити теоретичну межу кількості активних станцій, які могли б функціонувати в зоні обслуговування однієї точки доступу. За ідеального узгодження активних станцій в часі у мережі 802.11ac з каналом 20 МГц одночасно могли б функціонувати без взаємних завад 57 станцій, в яких кодеки працюють з вибірками 20 мс або 86 станцій, що формують звукові кадри з вибірками по 30 мс.

Передавання голосового трафіка в мережах зі змішаним навантаженням

За реальних умов голосовий трафік передають в мережах, в яких за доступ до середовища передавання конкурують різні станції, які можуть передавати як голосові кадри, так і кадри, що передають іншу інформацію.

Розглянемо особливості функціонування мережі, в якій є кілька станцій з насиченим навантаженням (буфер даних постійно заповнений), що передають дані з низьким пріоритетом, і кілька станцій, що передають голосову інформацію.

Розглянемо режим, коли в мережі є M станцій, що передають голосові дані, і N станцій з насиченим навантаженням. Режим насиченого навантаження використовуємо для визначення граничних можливостей мережі [18].

Проаналізуємо сценарій, за якого насичене навантаження віднесено до класу AC_BK (низький пріоритет), а голосові дані мають пріоритет AC_VO, табл. 1. Розподіл часових інтервалів в безпроводовому каналі буде таким, як наведено на рис. 4.

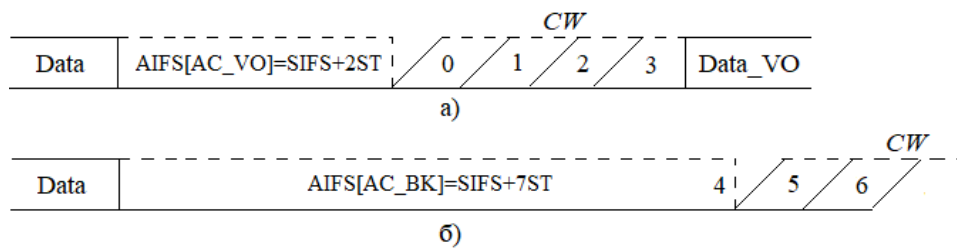


Рис. 4. Розподіл часових інтервалів у мережі з гібридним пріоритизованим навантаженням

Після звільнення радіочастотного каналу (завершення інтервалу Data) станції VO витримують паузу, обумовлену арбітражним міжкадровим інтервалом $SIFS+2ST$, а станції BK – $SIFS+7ST$. Тобто, станції VO мають інтервал тривалістю п'ять часових слотів (ST), щоб передати свої кадри без конкуренції з кадрами BK. П'ятий інтервал може бути використаний, в разі виникнення колізії між станціями VO.

Також треба взяти до уваги, що в лічильник зворотного відліку станція VO завантажить число із множини $\{0, 1, 2, 3\}$. Тобто, передавання VO кадру почнеться ще до того, як закінчиться арбітражний інтервал для BK станції.

Особливістю передавання голосового трафіка є те, що він не створює насиченого навантаження. Станція передає стислу звукову інформацію з періодичністю 20 мс, якщо не застосовано механізм агрегування кадрів, а в разі агрегування – через більші проміжки часу, кратні 20 мс.

Тепер треба оцінити, скільки буде міжкадрових інтервалів, протягом яких станції VO мають можливість передавати кадри без конкуренції BK. Зробимо розрахунок для випадку, коли кадри BK мають навантаження 1500 байтів, що характерно для великих кадрів даних, які надходять через мережу Ethernet. Саме такі кадри характерні для локальних мереж як «великі кадри» [12]. Розглядаємо великі кадри, оскільки вони потребують для передавання більше часу і створюють гірші умови для передавання голосового трафіка.

Якщо кадри даних з пріоритетом BK міститимуть по 1500 байтів корисної інформації, то за умови передавання даних у режимі MCS3 (16-QAM, $R=3/4$) і з урахуванням тривалості

арбітражного інтервалу (79 мкс), тривалість циклу доступу до каналу для передавання цих кадрів становитиме 606,5 мкс. У режимі MCS5 тривалість циклу становитиме 530,5 мкс, а в режимі MCS8 – 410,5 мкс.

Протягом 20 мкс у разі передавання низькопріоритетного насиченого трафіка виникне щонайменше 32 арбітражних інтервали (у разі застосування MCS3), в кожному з яких кадри з голосовими даними можуть конкурувати тільки між собою.

Розглянемо, як буде передано голосові кадри, якщо в мережі M станцій, що передають голосовий трафік.

Всі M станцій є незалежними, і кожна намагається отримати доступ до мережі під час випадково обраного арбітражного інтервалу після відліку випадкового числа лічильником.

Якщо врахувати 32 арбітражні інтервали, наявні протягом 20 мкс, і в кожному інтервалі по 4 часові слоти, які випадковим чином може обрати станція, то для початку циклу передавання M голосових кадрів є 128 можливих реалізацій. Позначимо літерою K загальну кількість можливих реалізацій, коли станції VO можуть розпочати передавання. Це моменти часу, під час яких конкурувати за доступ до каналу будуть тільки станції VO.

Оцінімо ймовірність виникнення колізій між M станціями VO, що конкурують за доступ до каналу протягом 20 мкс. Подібне завдання було вирішене в [19] і запропоновано співвідношення для визначення ймовірності виникнення колізії. З урахуванням зроблених вище позначень, це співвідношення набуде вигляду

$$P_c = \frac{\tilde{A}_K^M - A_K^M}{\tilde{A}_K^M} = 1 - \frac{K!}{(K-M)!K^M}, \quad (2)$$

де $\tilde{A}_K^M = K^M$ – кількості розміщень із K по M з повторами, $A_K^M = \frac{K!}{(K-M)!}$ – кількості розміщень із K по M без повторів.

Результати розрахунку ймовірності виникнення колізій наведено на рис. 5. Розраховано ймовірність колізій для трьох режимів передавання низькопріоритетного трафіка: для режиму MCS3 ($K=32$), для режиму MCS5 ($K=37$), для режиму MCS8 ($K=48$).

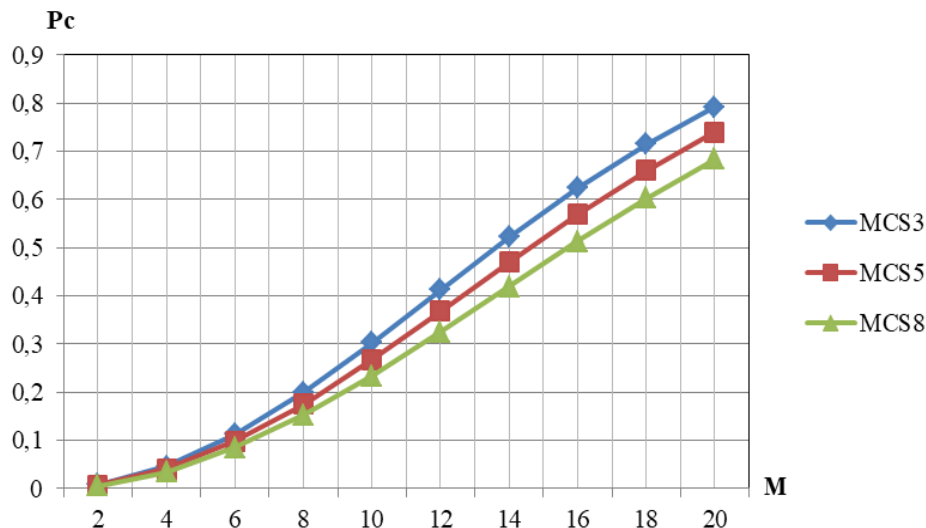


Рис. 5. Ймовірність виникнення колізій в мережі IEEE 802.11ac з M станціями AC_VO і насиченим трафіком AC_BK

Обговорення результатів

Безпосередньо із графіка, наведеного на рис. 5, випливає, що за наявності в мережі IEEE 802.11ac станцій, що передають низькопріоритетний трафік класу AC_BK, навіть за умови насиченого навантаження можливе одночасне функціонування великої кількості станцій, що

передають голосовий трафік. Так, за наявності в мережі одночасно активних 10-и станцій з голосовим трафіком, ймовірність виникнення колізій для таких станцій становить не більше 0,3. Це означає, що колізія між станціями AC_VO буде виникати в середньому один раз на три цикли по 20 мкс. У разі наявності 15-и активних станцій AC_VO, ймовірність колізії становить приблизно 0,5, і колізія буде в середньому виникати один раз на два цикли по 20 мкс. Станції, що потрапили в колізію, швидко її подолають із застосуванням стандартного механізму, оскільки всі інші станції успішно передадуть свої голосові кадри і не будуть створювати конкуренції.

У разі зменшення часу передавання кадрів низькопріоритетного трафіка, ймовірність виникнення колізій для станцій AC_VO зменшується, внаслідок збільшення кількості арбітражних інтервалів і збільшення кількості інтервалів, коли голосові кадри передають без конкуренції з низькопріоритетним трафіком. У нашому дослідженні розглянуто сценарій, за якого для низькопріоритетного трафіка використано великі кадри даних (1500 байтів), але в реальних офісних мережах трафік складається із кадрів даних різного розміру [12], що сприяє поліпшенню умов для передавання трафіка класу AC_VO. Також можна відзначити, що виникнення колізій між станціями з низькопріоритетним трафіком практично не призводить до збільшення затримки передавання і нерівномірності затримки голосових кадрів, оскільки колізії відбуваються в інтервалах передавання кадрів RTS і CTS. Тобто, станції з кадрами AC_VO отримують доступ до середовища передавання одразу після колізійного інтервалу.

Затримка передавання голосового кадру в розглянутій мережі IEEE 802.11ac становить приблизно 20 мкс, а нерівномірність не перевищує кількох мілісекунд, що обумовлено технологією доступу до каналу (зворотний відлік часових слотів) і часом подолання колізії, в разі її виникнення (можливе виникнення паузи під час передавання кадру низькопріоритетного трафіка).

Окремо треба зауважити, що для зони обслуговування однієї точки доступу мережі IEEE 802.11ac наявність одночасно активних 15-20 станцій, що передають голосовий трафік, є доволі малою ймовірною, оскільки ці мережі призначено для використання в приміщеннях, і радіус зони обслуговування є відносно невеликим (до кількох десятків метрів [12]). Тому, застосування безпроводової мережі IEEE 802.11ac для організації IP-телефонії в офісних і подібних приміщеннях може бути ефективним технічним рішенням. Для обслуговування великих приміщень і забезпечення мобільності співробітників треба застосовувати безшовний роумінг між зонами обслуговування окремих точок доступу.

Висновки

У результаті дослідження особливостей передавання голосового трафіка для організації послуги IP-телефонії в офісних приміщеннях засобами мережі IEEE 802.11ac з'ясовано, що в разі застосування пріоритизації мережного трафіка можна забезпечити якісне надання зазначеної послуги для достатньо великої кількості користувачів, навіть за умови інтенсивного передавання змішаного трафіка.

Кодеки голосових сигналів забезпечують ефективне стиснення, що обумовлює малу тривалість циклу доступу до безпроводового каналу для передавання голосового кадру, навіть за умови великої частки непродуктивних витрат часу. За наявності в зоні обслуговування точки доступу 15 – 20 активних клієнтів, що передають голосовий трафік, затримка передавання трохи більша за тривалість інтервалу вибірки. Результати отримано, з урахуванням характеристик кодека G.711, що формує великий блок цифрових даних на виході, водночас їх можна розповсюдити на інші мережі, в яких застосовані інші голосові кодеки з такими ж або меншими блоками цифрових даних на виході.

Отримані результати можна розповсюдити і на безпроводові мережі, в яких голосові дані передають шляхом агрегування кількох голосових кадрів.

Наведені вище висновки стосуються мереж, в яких для надання послуг IP-телефонії здійснено пріоритизацію згідно зі специфікацією IEEE 802.11e з наданням голосовому трафіку пріоритету AC_VO, а іншим даним, які передають тією ж мережею – AC_BK. Для інших сценаріїв функціонування мереж IEEE 802.11ac доцільно зробити окремі дослідження.

Список літератури:

1. Cameron Johnson . What Is VoIP? The Newbie's Guide to Voice over IP. URL: <https://www.nextiva.com/blog/what-is-voip.html>
2. Josh Epstein. 5 Ways to Troubleshoot WiFi Issues with VoIP. URL: <https://telzio.com/blog/5-ways-troubleshoot-wifi-voip>
3. How to optimize your Wi-Fi network for VoIP. URL: <https://info.teledynamics.com/blog/how-to-optimize-your-wi-fi-network-for-voip>
4. 802.11 QoS Tutorial. URL: <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2008/avb-gs-802-11-qos-tutorial-1108.pdf>
5. Matthew S. Gast. 802.11ac: A Survival Guide. *O'Reilly Media*, 136 p., USA, 2015. URL: <https://freecomputerbooks.com/802.11ac-A-Survival-Guide.html>
6. Why and How To Implement Wi-Fi QoS? URL: <https://community.fs.com/article/why-and-how-to-implement-wifi-qos.html>
7. Wireless VoIP QoS Best Practices. (Last updated Aug 24, 2023). URL: https://documentation.meraki.com/Architectures_and_Best_Practices/Cisco_Meraki_Best_Practice_Design/Best_Practice_Design_-_MR_Wireless/Wireless_VoIP_QoS_Best_Practices
8. Joe Manna. What Is VoIP QoS & How Does It Improve Call Quality? November 2, 2023. URL: <https://www.nextiva.com/blog/voip-qos.html>
9. Howard. Why and How To Implement Wi-Fi QoS? December 21, 2023 – URL: <https://community.fs.com/article/why-and-how-to-implement-wifi-qos.html>
10. Voice Codecs. URL: <https://www.gl.com/voice-codecs.html>
11. The wonderful world of voice codecs. URL: <https://info.teledynamics.com/blog/the-wonderful-world-of-voice-codecs>
12. Chuck Lukaszewski, Liang Li. Very High-Density 802.11ac Networks Theory Guide // *Aruba Networks*, 62 p. URL: https://howwirelessworks.com/wp-content/uploads/Aruba_VHD_VRD_Theory_Guide.pdf
13. IP Protocol Header Fundamentals Explained with Diagrams. URL: <https://www.thegeekstuff.com/2012/03/ip-protocol-header/>
14. Daniel Andrews. VoIP vs. VoWiFi: Comparing Benefits & Highlighting Differences. URL: <https://www.calilio.com/blogs/voip-vs-voifi-comparison-differences>
15. White Paper of Home Wi-Fi Networks with Optimal User Experience. URL: <https://carrier.huawei.com/~media/CNMG/Downloads/Technical%20Topics/Fixed%20Network/White%20Paper%20of%20Home%20Wi-Fi%20-en.pdf>
16. Interframe Space (RIFS, SIFS, PIFS, DIFS, AIFS, EIFS). URL: <https://wifisharks.com/2020/11/14/interframe-space/>
17. Wi-Fi Signal Attenuation. URL: <https://blog.wavlink.com/en-us/article/TechnicalNews/92442c2444eaa02541dd27fe90bed782.html>
18. Lazebnyi V.S., Yin Ch., Omelyanets O.O. Doslidzhennya realnoyi propusknoyi zdatnosti bezdrotovoyi informatsiyanoi merezhi spetsyifikatsiyi 802. [Study of the real bandwidth of the wireless information network of the 802.11n specification.] // Scientific notes of the Tavria National University named after V. I. Vernadsky Series: Technical Sciences. 2018. № 5. Part 1. Vol. 29 (68). P. 155–160.
19. Lazebnyi V.S., Yin Ch. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard // *Microsystems, electronics and acoustics*. 2017. № 5. P. 47–53. URL: https://www.researchgate.net/publication/322016385_Estimation_of_probabilistic_processes_in_wireless_networks_of_80211_standard

Надійшла до редколегії 12.02.2024

Відомості про авторів:

Лазебний Володимир Семенович – канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", канд. техн. наук, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем; Україна; e-mail: lvs50469-ames@iit.kpi.ua; ORCID: [0000-0002-5702-2775](https://orcid.org/0000-0002-5702-2775)

Омельянець Олександра Олександрівна – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", асистент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем; Україна; e-mail: omelyanets2011@gmail.com; ORCID: [0009-0006-6549-201X](https://orcid.org/0009-0006-6549-201X)