

УДК 004.7:654.195.6

Лазебний В.С.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Інь Ченлянь**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ 802.11n**

У статті наведено результати досліджень експлуатаційних характеристик безпроводової мережі IEEE 802.11n, що функціонує у змішаному режимі з використанням одного просторового каналу в частотній смузі 20 МГц. Проаналізовано вимоги щодо параметрів передавання аудіовізуальної інформації в IP мережі. У статті наведено результати розрахунків пропускної здатності мережі, ймовірності виникнення колізій та ймовірності успішного передавання кадру даних в насиченій мережі, отримано значення середнього часу та нерівномірності затримки передавання пакетів. Розрахункові співвідношення розроблено на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна. За результатами розрахунків отримано оцінки щодо ефективності застосування мережі IEEE 802.11n для передавання аудіовізуальної інформації.

Ключові слова: аудіовізуальна інформація, безпроводова мережа, віртуальне конкурентне вікно, колізія, конкурентний доступ, корисне навантаження, режим RST/CST.

Окреслення проблеми. Безпроводові локальні мережі широко використовують як приватні користувачі, так і корпоративні користувачі. Поширюються мережі 802.11 (Wi-Fi) загального користування для доступу до інформаційних ресурсів в місцях скупчення та активної діяльності великих груп людей (вокзали, аеропорти, супермаркети, центральні зони міст тощо). Абонентськими станціями, приєднаними до мереж, є сучасні мобільні телефони, планшети, портативні комп'ютери, які обладнані однією антеною Wi-Fi.

Значну частину інформації, яку прагнуть отримати користувачі, складає аудіовізуальна інформація. Безпроводові мережі стандарту 802.11 є зручним і доступним (дешевим) засобом для отримання і передавання відео (відеоконференції, перегляд кінофільмів, телевізійних програм, спортивних подій, відеоконтенту із соціальних мереж) та звукової (IP-телефонія, доступ до пісень та концертних фонограм тощо) інформації, яка є потоковою інформацією. Такі інформаційні потоки створюють велике навантаження на телекомунікаційну мережу, що призводить до погіршення якісних показників мережі та унеможливає забезпечення якісних інформаційних послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням прогнозування експлуатаційних харак-

теристик мереж присвячено багато наукових досліджень [1–3], проте через складність завдання дослідники здебільшого спираються на попередній досвід розгортання та експлуатації безпроводових мереж стандарту 802.11. Теоретичні розрахунки пропускної здатності безпроводової мережі ґрунтуються на аналізі мережі з насиченим навантаженням, запропонованому Джузеппе Б'янкі [4]. Зазначений підхід поширили для аналізу мереж 802.11 всіх специфікацій, однак отримані результати мають суттєві відмінності від вимірюваних на практиці параметрів. З вищенаведеного випливає, що теоретичне дослідження процесів, які мають місце під час функціонування безпроводових мереж стандарту 802.11, і розроблення розрахункових співвідношень, що дозволяють оцінити можливість безпроводової мережі щодо передавання аудіовізуальних інформаційних потоків, є актуальним завданням.

Метою дослідження є оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводової мережі 802.11n. Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано вимоги до характеристик безпроводової мережі для забезпечення гарантованої якості обслуговування, досліджено характеристики мережі з урахуванням алгоритму її функціонування. За результатами порівняння необхідних

**Розрахункові значення швидкості передавання даних
в одному просторовому каналі мережі IEEE 802.11n**

Індекс MCS	Кількість просторових потоків	Тип модуляції та швидкість коду	Швидкість передавання даних (GI=0,8 мкс), Мб/с, Δf = 20 МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,4 мкс), Мб/с, Δf = 20 МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,8 мкс), Мб/с, Δf = 40 МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,4 мкс), Мб/с, Δf = 40 МГц
0	1	BPSK 1/2	6,5	7,2	13,5	15
1	1	QPSK 1/2	13	14,4	27	30
2	1	QPSK 3/4	19,5	21,7	40,5	45
3	1	16-QAM 1/2	26	28,9	54	60
4	1	16-QAM 3/4	39	43,3	81	90
5	1	64-QAM 2/3	52	57,8	108	120
6	1	64-QAM 3/4	58,5	65	121,5	135
7	1	64-QAM 5/6	65	72,2	135	150

показників якості та прогнозних характеристик зроблено оцінювання ефективності мережі.

Згідно із загальноприйнятим значенням поняття ефективності [5] будемо розглядати ефективність як показник успішності функціонування системи для досягнення установлених цілей. Тобто оцінимо, як співвідносяться граничні показники швидкості передавання даних та системні показники безпроводової мережі з реальною пропускною здатністю мережі й експлуатаційними показниками у разі передавання аудіовізуальної інформації.

Зауважимо, що технологія за специфікацією 802.11n є удосконаленою технологією 802.11a, в якій додатково передбачено можливість розширення частотної смуги радіоканалу з 20 МГц до 40 МГц, агрегування пакетів одного інформаційного потоку та можливість одночасного передавання кількох інформаційних потоків за технологією MIMO (з кількох виходів передавача інформаційні потоки передають одночасно на кілька входів приймача). А технологія 802.11ac є удосконаленою технологією 802.11n, в якій подальше збільшення пропускної здатності мережі досягнуто головним чином розширенням діапазону використовуваних параметрів. На підставі зазначеного дослідження стосовно особливостей передавання аудіовізуальної інформації доцільно зробити для мереж 802.11n.

Коротка характеристика мережі за специфікацією 802.11n. Мережа 802.11n може функціонувати в діапазоні 2,4 ГГц і використовувати радіоканал з шириною частотної смуги 20 МГц (так само, як це передбачено специфікаціями 802.11g/b) або 40 МГц (два об'єднаних суміжних

канали по 20 МГц) чи в діапазоні 5 ГГц (як це передбачено специфікацією 802.11a) з використанням частотних каналів 20 та 40 МГц.

Специфікацією передбачено застосовувати для передавання інформації систему модуляції та кодування OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Основні параметри системи OFDM, передбачені в специфікації 802.11n, такі: тривалість корисної частини символу OFDM 3,2 мкс, тривалість захисного інтервалу 0,8 або 0,4 мкс; кількість носійних частот для каналу з частотною смугою 20 МГц становить 52, кількість частот для передавання пілот-сигналів 4; кількість носійних частот для каналу з частотною смугою 40 МГц становить 112, кількість частот для передавання пілот-сигналів 6. Максимальна величина агрегованих кадрів становить: A-MPDU – 4095 (зазвичай обмежують 2346) байтів, A-MSDU – 4065 (зазвичай обмежують 2304) байтів. Для модуляції і кодування носійних OFDM символу передбачено велику кількість схем (всього 77 схем з урахуванням можливих режимів MIMO – Multiple Input Multiple Output). Кожну схему позначають відповідним індексом MCS (Modulation and Coding Scheme). Значення швидкості передавання даних в межах кадру фізичного рівня наведено в табл. 1.

У специфікації 802.11n регламентовано три режими роботи мережі:

1. High Throughput (HT) або Greenfield Mode – режим з великою пропускною здатністю, в якому можуть функціонувати тільки мережні станції (клієнти), що підтримують стандарт 802.11n.

2. Non-HT (Legacy) Mode – успадкований режим, всі кадри, відправлені станціями мережі в якому, сформовані відповідно до специфікації

Характеристики потоків даних, сформованих звуковими кодексами

Характеристики звукового кодека				Розрахунок інтенсивності інформаційного потоку			
Кодек & Бітова швидкість (кб/с)	Розмір вибірки кодека (байтів)	Інтервал вибірки кодека (мс)	Усереднена суб'єктивна оцінка (MOS*)	Розмір голосових даних (байтів)	Тривалість голосових даних (мс)	Кількість пакетів за секунду (PPS)	Пропускна здатність Ethernet (кб/с)
G 711 (64 кб/с)	80	10	4.1	160	20	50	87.2
G 729 (8 кб/с)	10	10	3.92	20	20	50	31.2
G 723.1 (6.3 кб/с)	24	30	3.9	24	30	33.3	21.9
G 723.1 (5.3 кб/с)	20	30	3.8	20	30	33.3	20.8
G.726 (32 кб/с)	20	5	3.85	80	20	50	55.2
G.726 (24 кб/с)	15	5		60	20	50	47.2
G 728 (16 кб/с)	10	5	3.61	60	30	33.3	31.5
G722_64k (64 кб/с)	80	10	4.13	160	20	50	87.2
ilbc_mode_20 (15.2 кб/с)	38	20	NA	38	20	50	38.4
ilbc_mode_30 (13.33 кб/с)	50	30	NA	50	30	33.3	28.8

*Примітка: Mean Opinion Score (MOS) – усереднена суб'єктивна оцінка

стандартів 802.11a/g (допустима ширина частотної смуги каналу тільки 20 МГц).

3. HT Mixed Mode – змішаний режим, за якого є можливість використати переваги режиму з високою пропускною здатністю спільно з механізмом, який реалізує можливість роботи з обладнанням, відповідним стандартам 802.11a/g. Преамбула старого формату надає можливість клієнтам, що функціонують за протоколами 802.11a/g передавати і приймати дані від точки доступу IEEE 802.11n.

Основною технологією доступу до радіоканалу є технологія конкурентного доступу із застосуванням кадрів RTS та CTS (Request To Send/Clear To Send). Передавання кадрів RTS відбувається в режимі конкурентного доступу за алгоритмом DCF. Режим передавання буде залежати від кількості антен передавальної та приймальної станції. Тобто режим із застосуванням кількох просторових каналів передавання (MIMO) може бути реалізовано у форматі: 2x2, 3x3, 4x4, 2x3, 3x2, 2x1, 1x2. Останні два формати: 2x1 – дві передавальні антени і одна приймальна (SIMO – single input, multiple output) та 1x2 – одна передавальна антена і дві приймальних (MISO – multiple input, single output) забезпечують таку ж максимальну пропускну здатність, що й система 1x1 (SISO – single input, single output), але із більшою надійністю. Тобто можуть забезпечити максимальну пропускну здатність за умови наявності більшого рівня радіозавад в каналі порівняно з системою SISO.

Характеристики аудіовізуальних інформаційних потоків. Щоб оцінити ефективність застосування мережі 802.11n для передавання аудіовізуальної інформації, треба з'ясувати, які характеристики процесу передавання є найбільш критичними для якісного забезпечення відповідних інформаційних послуг. Згідно з рекомендацією ITU-T Y1541 найбільш впливовими характеристиками є середня затримка, нерівномірність (джитер) часу передавання та ймовірність втрати пакету.

Проаналізуємо, які розміри мають пакети даних, що передають звукову та відео інформацію. Характеристики потоків даних, сформованих найбільш поширеними звуковими кодексами, наведено у табл. 2 [6].

Розглянемо окремо характеристики інформаційного потоку одного з найбільш популярних кодеків G 711. Цей кодек генерує 50 пакетів за секунду (періодичність генерування пакетів 20 мс), кожен пакет містить 160 байтів корисного навантаження, загальна величина одного пакета з урахуванням заголовків протоколів різних рівнів IP мережі становить 218 байтів, що обумовлює інтенсивність інформаційного потоку 87,2 кб/с.

Розглянемо тепер характеристики відеопотоку. Найбільшого поширення для передавання відео в IP мережах набула технологія, за якої кілька пакетів транспортного потоку MPEG2 TS вставляють (інкапсулюють) в IP пакет. На рис. 1 наведено структуру такого пакета.

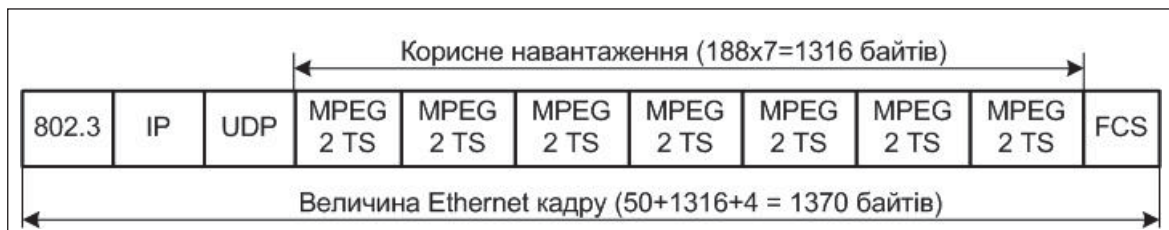


Рис. 1. Структура IP пакета відеопотоку в мережі Ethernet

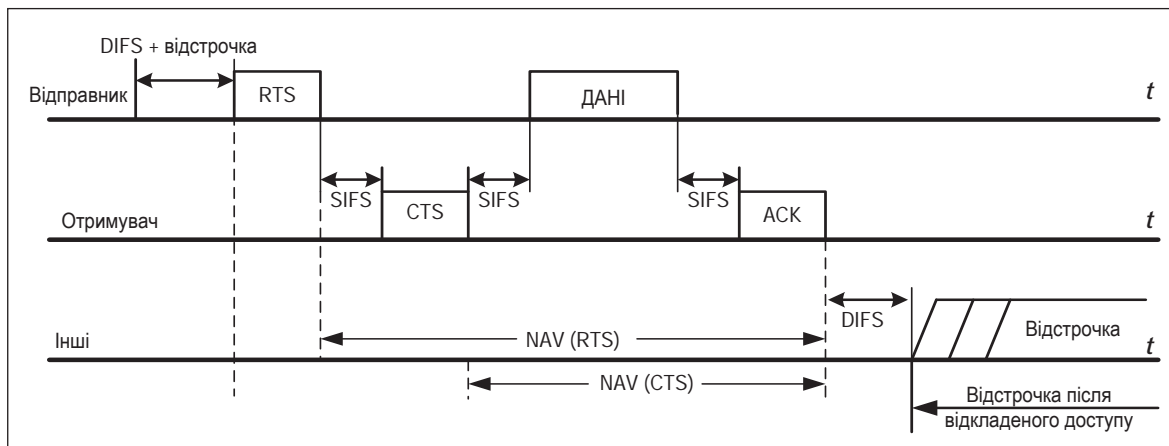


Рис. 2. Часова діаграма функціонування безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11 в режимі RTS/CTS

У наведеній на рисунку схемі спільний заголовок додав до корисного навантаження 54 байти: Ethernet/IP/UDP/FCS – 22/20/8/4 (байтів).

Сумарне корисне навантаження одного IP пакета для передавання відеоінформації в даному прикладі становить 1 316 байтів (сім пакетів MPEG2 TS по 188 байтів). Один IP пакет переносить сім пакетів MPEG-2 TS. Це поширена пропорція. Збільшення числа MPEG пакетів в одному IP пакеті, з одного боку, призводить до більш ефективного використання транспортного ресурсу, але з іншого – збільшує джитер (нерівномірність надходження пакетів у точку призначення). Тому вибирають компромісний варіант [7]. Для послуги IP TV або перегляду відео із мережі YouTube зі стандартною роздільною здатністю необхідна швидкість відеопотоку 4–5 Мб/с, а для перегляду відео у форматі високої роздільної здатності (FullHD) – 15 Мб/с [8].

Для оцінювання рівня параметрів відеопотоку розглянемо сценарій, в якому джерело генерує відеопотік SPTS (Single Program Transport Stream – один програмний транспортний потік) з інтенсивністю 4 Мб/с (інтенсивність надходження корисного навантаження). У разі транспортування такого потоку користувачу мережею Ethernet величина одного пакета і обсяг корисного навантаження будуть такі, як наведено на рис. 1. З ура-

хуванням обсягу додаткової інформації в IP пакеті, що надходить користувачу, інтенсивність відеопотоку в мережі Ethernet становитиме 4,164 МГб/с. Швидкість передавання кадрів Ethernet має становити 379, 93 кадрів/с, а періодичність надходження за ідеальних умов – 0,00263 с. Тобто нерівномірність затримки часу передавання має не перевищувати зазначеного періоду.

Оцінювання реальної швидкості передавання інформації у безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.11n. Оцінимо швидкість передавання інформації в мережі в разі використання одного просторового каналу. Наведені в табл.1 швидкості характеризують процес передавання блоку даних, що міститься безпосередньо в кадрі фізичного рівня. Під час обчислення цих швидкостей не враховано додаткових витрат часу, що мають місце у процесі обміну кадрами даних. На рис. 2 наведено часові діаграми, що характеризують процес передавання кадру даних.

На рис. 2 використано стандартні позначення: DIFS – міжкадровий інтервал режиму DCF, SIFS – короткий міжкадровий інтервал, ACK – кадр підтвердження вдало прийнятого кадру.

Визначимо максимальну пропускну здатність каналу мережі IEEE 802.11n, що має місце за ідеальних умов у разі передавання одного кадру



Рис. 3. Структура преамбули кадру фізичного рівня у змішаному режимі

даних. Під час розрахунку не враховуємо вплив навколишнього середовища, час очікування, обумовлений лічильником зворотного відліку, та втрати часу через колізії, що можуть мати місце під час конкуренції кількох станцій за доступ до каналу. Пропускна здатність визначимо із застосуванням співвідношення:

$$S_{\max_1} = \frac{PL}{T_{acc}}, \quad (1)$$

де PL – обсяг корисного навантаження одного кадру даних, T_{acc} – час доступу до каналу для передавання одного кадру даних.

Розрахунок зробимо для змішаного режиму для діапазону 5 ГГц. У цьому режимі в мережі можуть одночасно функціонувати станції IEEE 802.11a та IEEE 802.11n. Преамбула кадру даних містить преамбулу спадкового режиму (20 мкс) та преамбулу режиму швидкісного передавання (HT), рис. 3 [1].

Поля преамбули HT-LTF (довге навчальне поле) передають для кожної антени точки доступу, тобто у разі наявності у точки доступу двох антен у преамбулі буде два таких поля, а тривалість преамбули HT режиму становитиме 28 мкс.

Для розрахунку використано такі стандартні значення часових інтервалів: SIFS = 16 мкс (діапазон 5 ГГц) – короткий міжкадровий інтервал, DIFS = SIFS + 2σ = 16+18 = 34 мкс – міжкадровий інтервал розподіленої функції координації, σ = 9 мкс – часовий слот очікування, RTS = 20 + 26 = 46 мкс, CTS = 20 + 18 = 38 мкс, ACK = 20 + 24 = 44 мкс – кадр підтвердження успішного приймання кадру даних. Тривалість інтервалу, протягом якого здійснюють безпосередньо передавання блоку даних, визначимо окремо для конкретного значення навантаження (PL).

Зробимо розрахунок для навантаження обсягом 64 байти, 1 500 байтів та агрегованого пакета 4 095 байтів за умови використання схеми модуляції й кодування MCS7 (табл.1) із використанням частотного каналу 20 МГц.

У цьому режимі для передавання кодованих даних передбачено 52 носійні коливання OFDM символу, тривалість захисного інтервалу 0,4 мкс або 0,8 мкс, тривалість корисного інтервалу 3,2 мкс. Швидкість завадостійкого коду 5/6, спосіб модуляції носійних – QAM-64 (6 бітів кодової інформації на символ).

Визначимо час передавання кадру з корисним навантаженням PL = 64 байти. Крім безпосередньо даних, кадр містить преамбулу, заголовки протоколів різного рівня та контрольну суму. В разі застосування для передавання пакета, що надійшов на точку доступу протоколів Ethernet/UDP/IP, додатковий обсяг інформації складе 54 байти. Сумарне навантаження кадру становитиме 60+54 = 114 байтів. Кількість кодованих бітів, які треба передати, становить PL=114x8x6/5=1095. Кількість OFDM символів, які потрібні для передавання такої кількості інформації становить $m = 1095/6/52=3,5 \rightarrow 4$ символи. Час передавання чотирьох символів становить $T_{sym} = (0,4+3,2) \times 4 = 14,4$ (мкс). З урахуванням преамбули (48 мкс) час передавання кадру становитиме 48+14,4 = 62,4 мкс.

Час доступу до каналу для передавання одного кадру даних з PL = 64 байти становить:

$$T_{acc} = \bar{T}_{PL} = DIFS + T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + \dots + SIFS + T_{ACK} = 34+46+16+38+16+62,4+16+44 = 272,4 \text{ (мкс)}. \quad (2)$$

Пропускна здатність безпроводового каналу з одним просторовим потоком у разі передавання пакета аудіовізуальних даних з корисним навантаженням PL=64 байти (512 бітів) становитиме $S_{\max_1} = 512 \text{ (бітів)}/272,4 \text{ (мкс)} = 1,88 \text{ Мб/с}$.

У разі передавання кадру даних з корисним навантаженням 1 500 байтів (14 919 кодованих бітів, 48 OFDM символів) за тих самих умов швидкість передавання аудіовізуальної інформації становить $S_{\max_1} = 28,382 \text{ Мб/с}$. Якщо корисне

навантаження агрегованого пакета становить 4 095 байтів (39 312 кодованих бітів, 128 OFDM символів), тоді $S_{\max_1} = 48,837$ Мб/с.

Із отриманих результатів можна заключити, що навіть за ідеальних умов, пропускна здатність каналу дуже сильно залежить від величини корисного навантаження, що міститься в пакеті даних.

Для режиму, для якого здійснено розрахунки, швидкість передавання даних у межах кадру фізичного рівня становить 72,2 Мб/с, але розрахункова швидкість передавання корисної інформації безпроводовим каналом становить 1,88 Мб/с (PL = 64 байти), або 28,382 Мб/с (PL=1500 байтів), або 48,837 Мб/с (PL=4095 байтів).

Але реальна швидкість передавання в мережі, в якій одночасно за доступ до каналу конкурують кілька (або багато) станцій, буде ще меншою, оскільки в наведеному розрахунку не враховано час очікування доступу до каналу, обумовлений лічильником випадкової затримки, та втрати часу, обумовлені колізіями, які можуть виникати під час спроби передати кадри RTS.

Для оцінювання реальної пропускної здатності каналу з урахуванням впливу колізій зробимо розрахунки експлуатаційних параметрів мережі із застосуванням концепції віртуального конкурентного вікна [9].

Концепція віртуального конкурентного вікна ґрунтується на загальноприйнятому підході до оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводової мережі в насиченому режимі. Згідно з цією концепцією процес передавання кадрів у насиченій мережі розглядають як квазі-стаціонарний процес.

Віртуальне конкурентне вікно VCW – це стохастичний параметр безпроводової мережі стандарту 802.11, який чисельно дорівнює усередненій кількості елементарних часових слотів, протягом яких лічильник зворотного відліку здійснює відлік інтервалу відстрочки після завершення передавання попереднього кадру до початку передавання наступного кадру даних.

Раніше нами були запропоновані співвідношення для розрахунку експлуатаційних параметрів мережі за специфікацією IEEE 802.11a [10]. Співвідношення, що наведені нижче, можна застосувати і для оцінювання експлуатаційних параметрів мережі IEEE 802.11n. У наведених співвідношеннях використано такі позначення: CW_{\min} – мінімальне значення конкурентного вікна, N – кількість активних станцій в мережі,

R – кількість можливих повторних спроб передати кадр даних у разі виникнення колізії або пошкодження кадру під час передавання.

Ймовірності колізії для окремої станції за наявності N активних станцій з насиченим навантаженням буде дорівнювати:

$$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}, \quad (3)$$

де $p_{c1} = 1/CW_{\min}$ – ймовірність колізії даної станції з однією з активних станцій безпроводової мережі; N – кількість активних станцій в мережі, що одночасно конкурують за доступ до каналу передавання даних; CW_{\min} – початкове значення конкурентного вікна (у специфікації 802.11n $CW_{\min} = 15$).

Величину віртуального конкурентного вікна (VCW) знайдемо із співвідношення:

$$VCW = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{m-1} (2p_c)^{i-1}. \quad (4)$$

Кількість вільних від передавання кадрів даних часових слотів під час реалізації віртуального конкурентного вікна буде дорівнювати значенню конкурентного вікна:

$$n_{id} = VCW. \quad (5)$$

Кількість колізій за час реалізації віртуального конкурентного вікна можна визначити із застосуванням співвідношення:

$$n_c = p_c \cdot \frac{N^*}{2} \cdot \frac{1 - p_c^m}{1 - p_c}, \quad (6)$$

де N^* – кількість активних станцій, що беруть участь в конкуренції за канал в квазістаціонарному режимі. Ітераційне співвідношення для визначення N^* наведено в [10].

Пропускна здатність безпроводової мережі в насиченому режимі з урахуванням колізій слід визначати з використанням співвідношення:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}, \quad (7)$$

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + n_c \cdot \bar{T}_c + VCW \cdot \sigma \quad (8)$$

де T_{VCW} – тривалість часового інтервалу, відповідного віртуальному конкурентному вікну; \bar{T}_{PL} – тривалість усередненого часового інтервалу, протягом якого відбувається безпосередня передача кадру даних з урахуванням усіх допоміжних сигналів і інтервалів, \bar{T}_c – тривалість усередненого часового інтервалу колізії, P_s – повна ймовірність успішного передавання кадру даних.

Ймовірність успішного передавання із використанням R спроб можна знайти як:

$$P_s = 1 - p_c^R. \quad (9)$$

Графік цієї залежності для випадку $R = 6$ наведено на рис. 4.

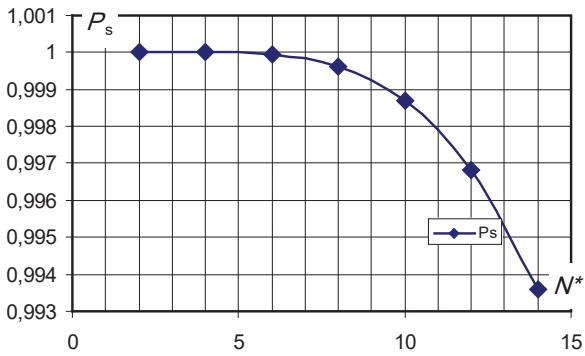


Рис. 4. Графік залежності ймовірності успішного передавання від кількості активних станцій у безпроводовій мережі

Графік залежності кількості станцій N^* , що безпосередньо беруть участь у конкуренції за доступ до каналу в безпроводовій мережі з N активними станціями в насиченому режимі з урахуванням процедури подолання колізій наведено на рис. 5.

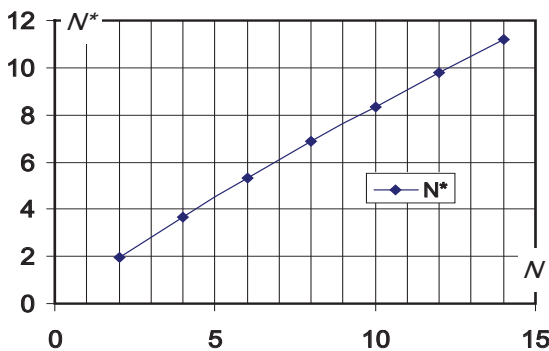


Рис. 5. Залежність кількості конкуруючих станцій N^* від загального числа активних станцій N в безпроводовій мережі

Залежність кількості колізій, що мають місце в безпроводовій мережі за час реалізації конкурентного вікна VCW , за наявності різної кількості активних станцій в мережі наведено на рис. 6.

Графік зміни величини віртуального конкурентного вікна VCW залежно від кількості активних станцій N в насиченій мережі IEEE 802.11n наведено на рис. 7.

Нижче наведено результати розрахунку пропускної здатності та інших експлуатаційних параметрів безпроводової мережі, що функціонує за специфікацією IEEE 802.11n у змішаному режимі з одним просторовим каналом.

На рис. 8 подано графік залежності (суцільна лінія) максимальної пропускної здатності S мережі за специфікацією IEEE 802.11n за ідеальних умов (без урахування взаємного впливу активних станцій та зовнішнього середовища) від величини корис-

ного навантаження PL в кадрі фізичного рівня. У розрахунку враховано максимальну швидкість передавання даних 72,2 Мб/с. Для порівняння наведено також графік залежності пропускної здатності (пунктирна лінія) мережі за специфікацією IEEE 802.11a, яка функціонує з максимальною швидкістю передавання даних у 54 Мб/с.

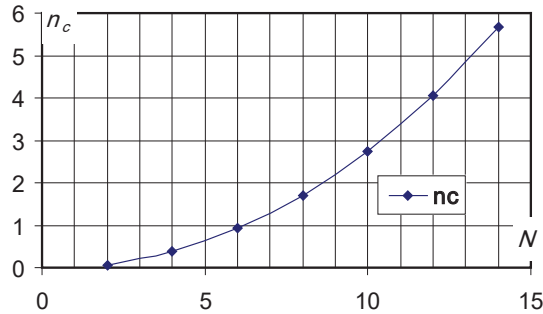


Рис. 6. Залежність кількості колізій n_c за час реалізації конкурентного вікна VCW від кількості активних станцій N

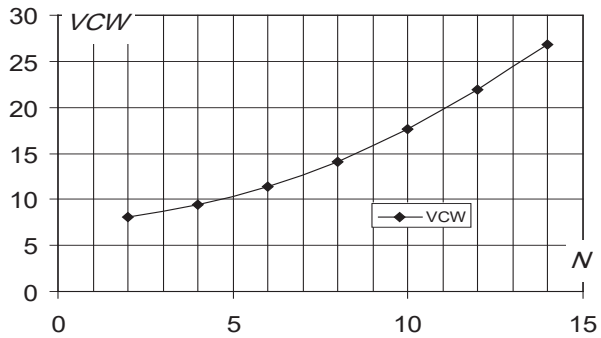


Рис. 7. Залежність величини віртуального конкурентного VCW вікна від кількості активних станцій N

На рис. 9 наведено графіки залежності пропускної здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n від кількості активних станцій в мережі з урахуванням колізій та часу очікування, обумовленого лічильниками зворотного відліку станцій.

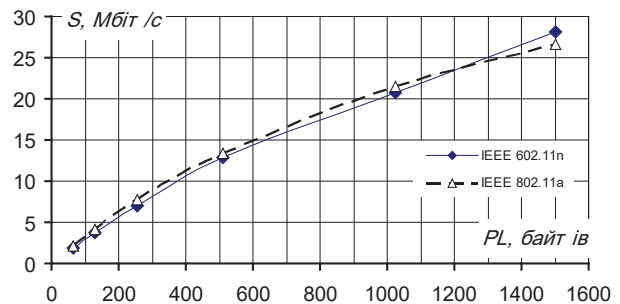


Рис. 8. Залежність максимальної розрахункової пропускної здатності мережі S від величини корисного навантаження PL

Розрахунок з використанням співвідношення (3) зроблено для трьох величин корисного навантаження: 64, 512 та 1500 байтів.

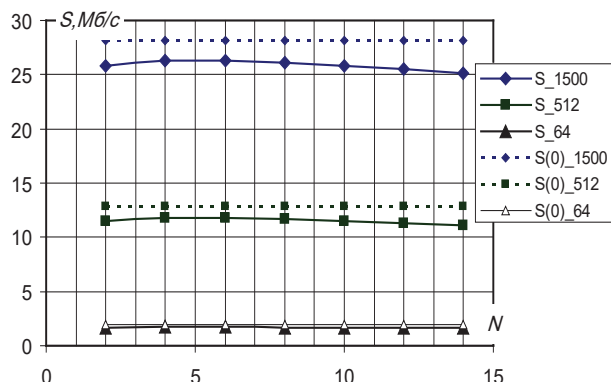


Рис. 9. Залежність пропускної здатності мережі S від кількості активних станцій N

Пунктирними лініями показано рівень максимальної розрахункової пропускної здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n у разі передавання кадрів з однаковим корисним навантаженням; суцільними лініями – розрахунок пропускну здатність з урахуванням колізій та інтервалів очікування.

Графіки залежності пропускної здатності, що припадає на одну активну станцію безпроводової мережі з насиченим навантаженням, від кількості активних станцій N наведено на рис. 10.

Середній час затримки передавання кадру даних у безпроводовій мережі IEEE 802.11n з насиченим навантаженням дорівнює часу реалізації віртуального конкурентного вікна T_{VCW} .

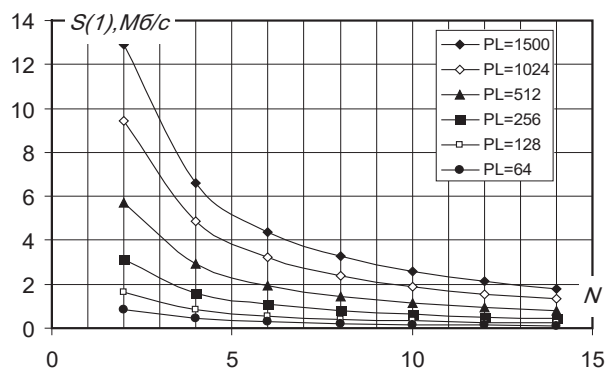


Рис. 10. Залежність пропускної здатності $S(1)$, що припадає на одну активну станцію, від кількості активних станцій N

Цей час визначено за співвідношенням (8). Графік залежності середньої затримки T_s від кількості активних станцій у мережі N наведено на рис. 11.

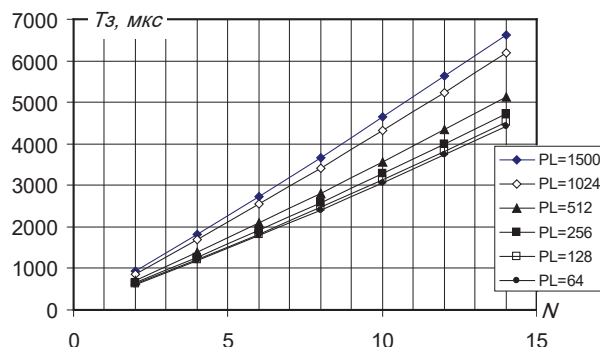


Рис. 11. Залежність середньої затримки передавання кадрів від кількості активних станцій

Значення джитера знайдемо за загальною формулою:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)}, \quad (10)$$

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

Для визначення джитера $\sigma^{(\tau)}$ скористаємось співвідношенням для дисперсії часу затримки передавання кадрів даних:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} (\tau_i - \bar{\tau})^2, \quad (11)$$

де $N^{(b)}$ – загальна кількість переданих кадрів даних, τ_i – затримка передавання окремого кадру даних.

З урахуванням алгоритму подолання колізій вираз (11) набуде іншого вигляду, а саме:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (12)$$

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

$$N_j = N \cdot p_c^{j-1} \cdot (1 - p_c), \quad (13)$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2} N^* \cdot (1 - p_c) \cdot \bar{T}_{PL} + \frac{1}{2} n_c \cdot \bar{T}_c + \sigma \cdot \frac{CW_1}{2}, \quad (14)$$

$$\tau_j^* = \tau_1^* \cdot 2^{j-1}, \quad (15)$$

Розраховані значення джитера для двох величин (64 та 1 500 байтів) корисного навантаження в кадрах даних, якими обмінюються станції мережі, наведено на рис. 12.

Мінімальні та максимальні значення джитера для графіків, наведених на рис. 12, такі: у разі корисного навантаження кожного кадру мережі 64 байти, $\sigma_{min}^{(\tau)}(64) = 371,39$ мкс, $\sigma_{max}^{(\tau)}(64) = 21214,22$ мкс, а в разі корисного навантаження 1500 байтів, $\sigma_{min}^{(\tau)}(1500) = 561,36$ мкс, $\sigma_{max}^{(\tau)}(1500) = 32022,69$ мкс.

Значення ймовірності втрати пакета можна визначити безпосередньо з використанням значення успішного передавання пакета, тобто:

$$P^{(rs)} = 1 - P_s. \quad (16)$$

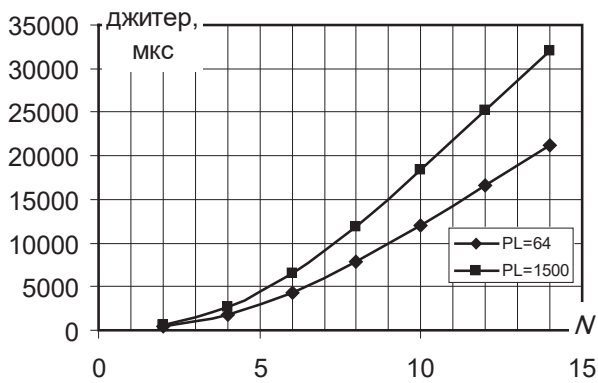


Рис. 12. Залежність нерівномірності затримки передавання кадрів (джитера) від кількості активних станцій N в мережі

У разі наявності в безпроводовій мережі до 14 активних станцій ймовірність втрати пакета протягом одного повного циклу доступу до безпроводового каналу (шість спроб передати кадр даних у разі спотворення даних під час передавання, $R = 6$) не перевищує значення 0,00641. Для зменшення ймовірності втрати пакета під час передавання безпроводовим каналом провідні компанії, зокрема Cisco, використовували більшу кількість повторних спроб (до 64).

Висновки:

1. Пропускна здатність одного просторового каналу безпроводової мережі за специфікацією IEEE

802.11n набагато менше швидкості передавання даних в межах кадру фізичного рівня, що обумовлено колізіями, інтервалами очікування та непродуктивними витратами часу, пов'язаними з передаванням заголовків мережних протоколів різних рівнів та службовою інформацією безпроводової мережі.

2. Використання одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі може забезпечити одночасно до 14 голосових з'єднань з високою якістю надання послуги, оскільки значення якісних показників мережі задовольняють вимоги щодо передавання звукового трафіка (частка пропускної здатності, що припадає на одну станцію, середня затримка та нерівномірність передавання).

3. За ідеальних умов один просторовий канал безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі може забезпечити одночасне передавання до трьох відеопотоків інтенсивністю 4–5 Мб/с.

4. Найбільш імовірним сценарієм передавання аудіовізуальної інформації в мережі 802.11 є сценарій з використанням одного просторового каналу, що обумовлено наявністю лише однієї антени у абонентських пристроїв.

5. У подальших дослідженнях доцільно оцінити ефективність пріоритизації трафіка в безпроводових мережах з великою кількістю користувачів.

Список літератури:

1. Impact of Legacy Devices on 802.11n Networks. Whitepaper, AirMagnet, Inc., 2008, 15 p.
2. Timo Vanhatupa. Wi-Fi Capacity Analysis for 802.11ac and 802.11n: Theory & Practice Ekahau, Inc., 2015, 21 p.
3. Raja Karmakar, Samiran Chattopadhyay, Sandip Chakraborty. Impact of IEEE 802.11n/ac PHY/MAC High Throughput Enhancements over Transport/Application Layer Protocols – A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 19, Issue: 4, Fourthquarter 2017), Page(s): 2050–2091.
4. Emerging Technologies in Wireless LANs. Theory, Design, and Deployment/ Edited by BENNY BING. – Georgia Institute of Technology, Cambridge University Press 2008. 897p.
5. Визначення змісту понять: «ефект», «ефективність» та «результативність». WEB-ресурс научно-практичних конференцій. URL: http://www.confcontact.com/20121221/3_gupalo.htm (дата звернення 10.05.2018]
6. VoIP – потребление полосы пропускания в расчете на вызов. URL: https://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/106/1068/1068305_bwidth_consume.html (дата звернення 10.05.2018].
7. Анна Бителева. Цифровое кабельное ТВ / Теле-Спутник №10(144) Октябрь 2007 г. С.112–119.
8. Барг А.И., Колгатин С.Ю., Колпаков И.А. IP-телевидение. Главные станции / T-Comm №1-2(2007). С. 37–43.
9. Lazebnyy A.V. The Details of Virtual Contention Window Concept for 802.11 IBSS Wireless Local Area Network Mathematic Modeling /A.V. Lazebnyy and V. S. Lazebnyy//International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing vol. 1. №1. с. 7–13. URL: <http://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12>
10. Ін Ченлян, В. С. Лазебний. Застосування концепції віртуального конку-рентного вікна для прогнозування пропускної здатності сегмента безпроводової мережі Wi-Fi. Том 4, № 60 (2017). С. 30–38

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ АУДИОВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ СРЕДСТВАМИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ 802.11N

В статье приведены результаты исследований эксплуатационных характеристик беспроводной сети IEEE 802.11n, работающей в смешанном режиме с использованием одного пространственного канала в частотной полосе 20 МГц. Проанализированы требования относительно параметров передачи аудиовизуальной информации в IP сети. В статье приведены результаты расчетов пропускной способности, вероятности возникновения коллизий и вероятности успешной передачи кадра данных в насыщенной сети, получены значения среднего времени задержки и неравномерности передачи пакетов. Расчетные соотношения разработаны на основе концепции виртуального конкурентного окна. По результатам расчетов сделаны оценки относительно эффективности применения сети IEEE 802.11n для передачи аудиовизуальной информации.

Ключевые слова: аудиовизуальная информация, беспроводная сеть, виртуальное конкурентное окно, коллизия, конкурентный доступ, полезная нагрузка, режим RST / CST.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF TRANSMISSION OF AUDIOVISUAL INFORMATION BY MEANS OF 802.11N WIRELESS NETWORK

The results of characteristics research of the wireless network of IEEE 802.11n, which operates in a mixed mode using a single spatial channel in a 20 MHz frequency band, are described in this paper. The requirements for the parameters of audiovisual information transmission in IP networks are analyzed. The paper presents the results of calculations of the network throughput, the probability of occurrence of collisions and the probability of successful transfer of the data frame in the saturated network, obtained a mean delay time and uneven transmission of packets. The calculation equations are based on the concept of a virtual contention window. Based on the results of the calculations, estimates were made regarding the efficiency of the application of the network in accordance with the IEEE 802.11n for the transmission of audio-visual information.

Key words: audiovisual information, wireless network, virtual contention window, collision, competitive access, payload, RST/CST mode.