

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»**Омельянець О.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАЛЬНОЇ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ
БЕЗПРОВОДОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ
СПЕЦИФІКАЦІЇ IEEE 802.11n**

У статті наведено результати досліджень реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації IEEE 802.11n для режимів функціонування з радіоканалами 20 МГц та 40 МГц. Експериментально досліджено пропускну здатність мережі з 2, 4 та 6 активними станціями, що функціонують у насиченому режимі. Проаналізовано вплив інших безпроводових мереж Wi-Fi, зона покриття яких перекривається зоною покриття досліджуваної мережі. Для зазначеного аналізу зроблено моделювання процесу функціонування безпроводового каналу засобами програмного комплексу ADS. Наведено графіки деградації пропускної здатності, обумовленої завадами в радіоканалі. Зазначено особливі умови користування каналом безпроводової мережі поблизу межі зон покриття двох безпроводових мереж IEEE 802.11.

Ключові слова: безпроводовий канал, інформаційна мережа, насичений режим, пропускна спроможність, радіозавади, Wi-Fi.

Постановка проблеми. Безпроводові локальні інформаційні мережі стандарту IEEE 802.11 знайшли широке застосування. Wi-Fi Alliance протягом тривалого часу здійснював удосконалення технології функціонування таких мереж, що призвело до значного поліпшення параметрів і характеристик мереж, у порівнянні з першою версією стандарту [1; 2]. У користувачів є велика кількість обладнання, що функціонує за застарілими специфікаціями 802.11b/a/g. Натепер найбільш поширеним є обладнання специфікацій 802.11n/ac. Для забезпечення якісного надання мультимедійних послуг (телефонія, відеоконференції, IP-телебачення) у багатьох точках доступу реалізовано процедуру пріоритизації трафіка, згідно зі специфікацією 802.11e.

Теоретично швидкість передавання даних у безпроводових мережах зросла від 11 Мб/с (специфікація 802.11b) до 6 Гб/с (специфікація 802.11ac), проте реальна швидкість передавання суттєво відривається від наведених вище значень.

Це зумовлено кількома чинниками. Перш за все, наведені в специфікаціях граничні значення

пропускної здатності характеризують процес передавання інформації за ідеальних умов, під час передавання інформаційного блоку без урахування непродуктивних витрат часу для передавання службової інформації. Іншим чинником, що призводить до зменшення пропускної здатності безпроводової мережі, є наявність у радіоканалі шумів та завад від інших мереж і технічних засобів. Крім того, варто враховувати, що всі абоненти безпроводової мережі користуються одним радіоканалом. Оскільки основною технологією доступу до радіоканалу є технологія конкурентного доступу, це призводить до додаткового зменшення пропускної здатності, через виникнення колізій та повторне передавання окремих кадрів. У разі застосування централізованої функції координації, значне зменшення пропускної здатності безпроводового каналу має місце з причини непродуктивних витрат часу на службову інформацію та технологічні затримки часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За оцінками дослідників реальної пропускної здатності, вона не перевищує половини задекларова-

ного в специфікації максимального значення, а здебільшого навіть за сприятливих умов – набагато менше [3; 4].

Нами обґрунтовано розрахункові співвідношення для оцінювання пропускної здатності каналу передавання даних безпроводової інформаційної мережі [5; 6], але правильність цих співвідношень необхідно перевірити експериментально.

Постановка завдання. Метою досліджень, наведених у цій статті, є практично перевірити реальну пропускну здатність каналу передавання даних безпроводової мережі стандарту 802.11n та оцінити вплив радіозавад на пропускну здатність каналу.

Виклад основного матеріалу дослідження. В експериментах використано від двох до шести абонентських станцій, а саме: використано 2 стаціонарних комп'ютери з Wi-Fi адаптерами стандарту IEEE802.11n та 4 ноутбуки, два з яких обладнані двома вбудованими антенами і два – однією. Для з'ясування пропускної здатності мережі в насиченому режимі здійснювали передавання великих файлів від однієї станції мережі до іншої. Для цього на трьох станціях мережі створили мережні теки загального доступу.

Схему здійснення експериментів наведено на рис. 1.

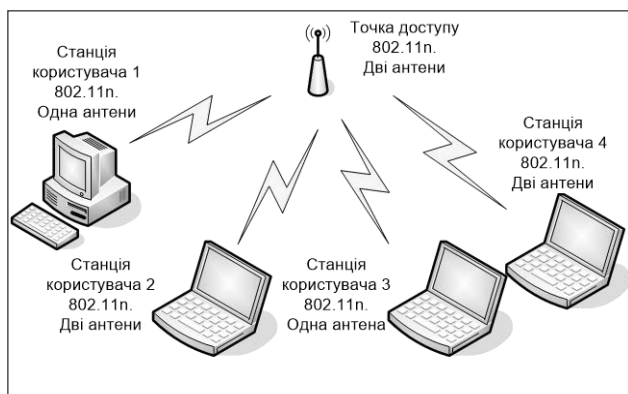


Рис. 1. Схема експериментальної безпроводової мережі IEEE802.11n

Пропускну здатність мережі оцінювали за часом передавання корисної інформації (файлів великого розміру: 120,851 МБ, 256,9 МБ, 836,567 МБ) від однієї станції до іншої. Наявне для експерименту обладнання дало змогу визначити швидкість передавання корисної інформації для режимів:

- 1) ширина смуги радіоканалу 20 МГц, один просторовий потік, швидкість з'єднання 72 Мб/с;
- 2) ширина смуги радіоканалу 20 МГц, два просторових канали, швидкість з'єднання 144 Мб/с;
- 3) ширина смуги радіоканалу 40 МГц, один просторовий канал, швидкість з'єднання 150 Мб/с.

Для експерименту підготовлено файли archive.zip розміром 120,851 МБ, файл concert_1.mp4 (256,9 МБ) та файл concert_2.mp4 (836,567 МБ).

Під час перевірки пропускної здатності мережі, за умови наявності двох насичених станцій, здійснювали передавання файлів різної величини між двома станціями безпроводової мережі у різних комбінаціях. Під час такого передавання канал розподіляється між двома процесами – передавання від джерела інформації до точки доступу і передавання від точки доступу до адресата. Обидва процеси безперервно передають кадри даних з однаковою інтенсивністю.

Час передавання певного із зазначених вище кадрів у кожному окремому експерименті відрізнявся. Так, під час десяти актів передавання файлу concert_1.mp4 у режимі з'єднання зі швидкістю 150 Мб/с (ширина частотної смуги 40 МГц), тривалість інтервалу передавання змінювалась від 37,3 с до 44 с. Більшість інтервалів знаходилась у межах 37,3–37,6 с. Розбіжність тривалості інтервалів зумовлена конкурентним доступом до каналу та випадковими чинниками. Усереднене значення пропускної здатності становить 54,805 Мб/с.

Під час десяти актів передавання файлу concert_2.mp4 у тому ж режимі тривалість інтервалу передавання змінювалась від 118 до 130 с. Переважна тривалість інтервалів була у межах від 118 до 123 с. Усереднене значення пропускної здатності становить 54,856 Мб/с.

Усереднене значення пропускної здатності під час передавання файлу archive.zip розміром 120,851 МБ становило 54,442 Мб/с.

Перевірку пропускної здатності для режиму зі швидкістю з'єднання 150 Мб/с, в разі наявності в мережі чотирьох насичених станцій здійснювали за схемою, в якій дві станції одночасно передають однакові файли кожна своєму абоненту мережі. У процесі експериментів інтервал передавання файлу кожної станції був відмінний від іншої станції. Розрахунок здійснювали за часом найменшого інтервалу, який знадобився першій станції, що завершила передавання файлу. Обсяги інформації, передані іншими станціями, враховували фіксацією частки переданого файлу на момент завершення передавання першою станцією. Максимальне значення пропускної здатності безпроводової мережі з чотирма насиченими станціями, якого вдалось досягти під час експерименту, становило 53,34 Мб/с. Варто зазначити, що через наявність колізій у каналі, а також через вплив завад від суміжних каналів (інших мереж) точка доступу переходить на інший режим передавання, що призводить

до зменшення пропускної здатності каналу. Так, під час експериментів пропускна здатність мережі з адаптивним вибором частотної смуги й чотирма насиченими станціями, за умови наявності в зоні експерименту інших безпроводових мереж, змінювалась від 9,1 Мб/с до 53,34 Мб/с. Найбільш часто під час експериментів пропускна здатність мережі набувала значень у межах від 22,218 Мб/с до 33,338 Мб/с. Такі значення пропускної здатності свідчать про те, що основним режимом функціонування мережі є режим з одним просторовим каналом і шириною частотної смуги радіоканалу 20 МГц.

Під час визначення пропускної здатності мережі з шістьма насиченими станціями із застосуванням файлу concert_2.mp4 (836,567 МБ) найменший час передавання становив 3 хв. 34 с, а найбільший – 17 хв. 55 с. Пропускна здатність мережі за цих умов змінювалась, відповідно, від 50,676 Мб/с до 10,478 Мб/с.

Для оцінювання отриманих результатів можна скористатись теоретичними розрахунками, наведеними в роботі Ін Ченляна, В.С. Лазебного [6]. Графіки розрахункової пропускної здатності безпроводової мережі, з урахуванням колізій і кількості насичених станцій, наведено на рис.2. Під час аналізу експериментальних даних та прогнозованих значень пропускної здатності треба також враховувати, що величина корисного навантаження в одному кадрі становила 1404 байти. Порівняння отриманих значень пропускної здатності з прогнозованими значеннями, рис. 2–3, свідчить про їх хорошу відповідність. Це, своєю чергою, свідчить про те, що запропонована методика і розрахункові співвідношення для оцінювання пропускної здатності безпроводової мережі з конкурентним режимом доступу [5; 6] враховує процеси в реальній мережі і дає хороший збіг розрахункових та експериментальних значень. Пунктиром на рис. 3 наведено максимально можливі значення пропускної здатності без урахування колізій і повторного передавання окремих пакетів.

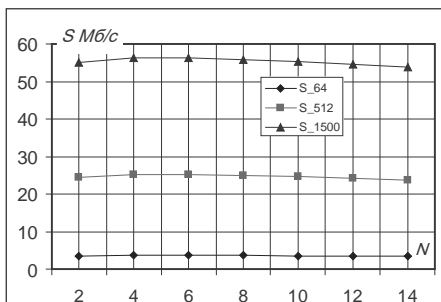


Рис. 2. Графік прогнозованої пропускної здатності мережі 802.11n в режимі зі швидкістю з'єднання 150 Мб/с у частотній смузі 40 МГц

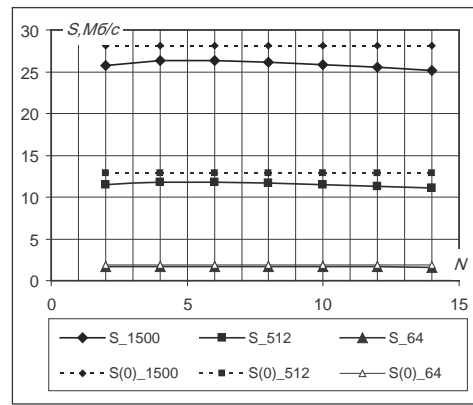


Рис. 3. Графік прогнозованої пропускної здатності мережі 802.11n в режимі зі швидкістю з'єднання 72 Мб/с у частотній смузі 20 МГц [6]

Для характеристики пропускної здатності безпроводової мережі доцільно застосувати коефіцієнт корисного навантаження (ккн).

Цей коефіцієнт можна визначити як відношення інтенсивності передавання корисної інформації до системної швидкості з'єднання. Так, за результатами здійснених досліджень за сприятливих умов для режиму 40 МГц, 150 Мб/с $k_{кн} = 0,366$, а для режиму 20 МГц, 72 Мб/с $k_{кн} = 0,308$.

Розглянемо тепер вплив інших мереж Wi-Fi на роботу цієї мережі. Як відомо, у діапазоні 2,4 ГГц для технології Wi-Fi на території європейських країн передбачено використовувати 13 радіоканалів (1–13 канали) завширшки 22 МГц. Розподіл спектра і значення граничних частот наведено на рис. 2 та в табл. 1 [7].

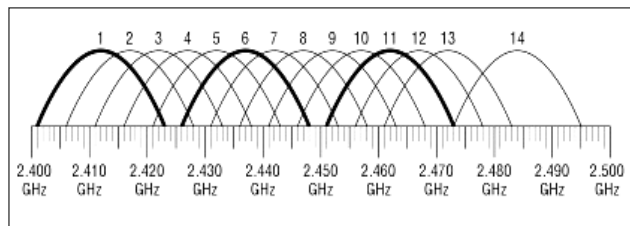


Рис. 2. Розподіл спектра діапазону 2,4 ГГц для системи Wi-Fi

Для визначення впливу сусідніх мереж визначимо вплив завад на виникнення спотворених кадрів даних у каналі передавання і проаналізуємо рівень завад, який створюють мережі з робочими частотними смугами, що перекриваються зі смугою цієї мережі.

Вплив завад на процес передавання інформаційного потоку проаналізовано засобами моделювання системи ADS (Advanced Design System).

Таблиця 1
**Параметри частотних смуг Wi-Fi
 в діапазоні 2,4 ГГц**

Канал Wi-Fi	Нижня частота	Центральна частота	Верхня частота
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

Моделювання зроблено для режиму передавання з MCS 7, тобто модуляція 64-QAM, швидкість завадостійкого коду $R=5/6$, для кадрів із корисним навантаженням $PL=1500$. Результати моделювання наведено на рис. 3.

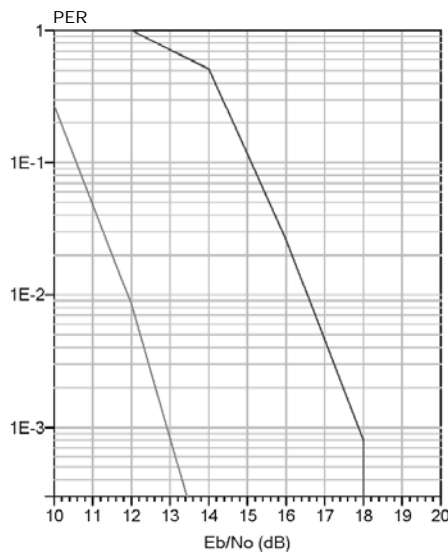


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта помилкових пакетів від відношення сигнал-шум

Ліва крива на графіку характеризує процес передавання в режимі MCS 3 (16-QAM, $R=1/2$), права крива – в режимі MCS 7 (64-QAM, $R=5/6$). Дві криві наведено для порівняння впливу завад, залежно від способу модуляції та кодування.

Оцінімо, як впливають втрачені через завади пакети на пропускну здатність каналу. Зауважимо, що в разі втрати пакета відбувається його повторне передавання із застосуванням механізму подолання колізії для станції, пакет якої був спо-

творений у каналі. Сам коефіцієнт спотворених пакетів PER, згідно зі способом його визначення, можна розглядати як ймовірність виникнення спотвореного кадру даних у каналі передавання через наявність завад.

Таким чином, для визначення пропускну здатності каналу із завадами і оцінювання впливу завад на пропуску здатність, можна застосувати раніше запропоновані співвідношення [6] зі заміною ймовірності колізій (p_c) на ймовірність спотворення кадру, внаслідок колізії або впливу завад:

$$p_{ef} = p_c + PER, \quad (1)$$

Саму пропуску здатність можна обчислити за формулою [6]:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}, \quad (2)$$

де N – кількість активних станцій у безпроводовій мережі, $E[PL_1]$ – усереднене корисне навантаження одного кадру, P_s – ймовірність успішного передавання кадру даних, T_{VCW} – тривалість реалізації віртуального конкурентного вікна.

Величину T_{VCW} з урахуванням завад треба обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot (T_{PL} + T_c) + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (3)$$

де T_{PL} – час безпосереднього передавання кадру даних, T_c – тривалість інтервалу колізії, що має місце під час передавання кадру RTS, n_c – кількість колізій за час реалізації конкурентного вікна, σ – тривалість системного часового слота, VCW – числове значення віртуального конкурентного вікна.

Результати розрахунків пропускну здатності S1 безпроводового каналу мережі 802.11n за наявності завад наведено на рис. 4.

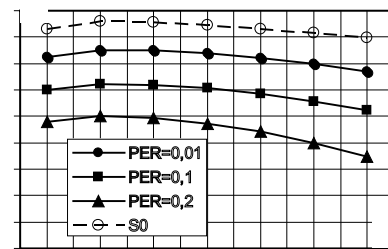


Рис. 4. Графіки залежності пропускну здатності безпроводового каналу IEEE802.11n

На рис. 4 зображено графіки пропускну здатності, що відповідають графіку помилкових бітів, наведеному на рис. 3. Перший графік характеризує пропуску здатність мережі, коли відношення сигнал-шум $E_b / N_0 = 16,5$ дБ ($PER=0,01$), другий графік – $E_b / N_0 = 15$ ($PER=0,1$), третій графік –

$E_b / N_0 = 14,6$ ($PER=0,2$). У разі, коли $E_b / N_0 < 14$ дБ, передавання сигналу в режимі з MCS 7 взагалі стає неможливим, але можлива надійна робота в режимі з MCS 3 із максимальною швидкістю передавання до 33 Мб/с.

Проаналізуємо тепер питання стосовно того, за яких умов варто очікувати рівень сигнал-шум, розглянутий вище. Для цього розглянемо сюжет, за якого на певній відстані (кілька десятків метрів) від цієї точки доступу, ТД1, знаходиться інша точка доступу (ТД), що функціонує в тому самому частотному діапазоні 2,4 ГГц. Нехай ТД1 функціонує в частотному каналі 1 (рис. 2), а ТД2 функціонує в частотному каналі 3. Згідно з наведеною на рис. 2 діаграмою, частотні смуги каналів 1 і 3 перекриваються на половину частотної смуги. З урахуванням того, що модуляція OFDM формує шумоподібний спектр із квазірівномірним спектральним розподілом, у разі однакової випромінюваної потужності та ізотропного випромінювання антенами обох точок доступу на однаковій відстані від цих точок доступу, для станції першої мережі відношення сигнал шум становитиме 3 дБ і, навпаки.

Визначимо, на скільки треба зменшитись у бік ТД1, щоб відношення сигнал-завада було більше за 14–17 дБ, і можна було користуватись мережею з високою швидкістю передавання сигналу. Для вирішення цього питання без урахування додаткових перешкод (будівельні конструкції, меблі, люди тощо) можна скористатись загальновідомим співвідношенням для визначення загасання електромагнітних хвиль у вільному просторі, а саме:

$$L, \text{ дБ} = 20 \lg(4\pi df/c), \quad (4)$$

де d – відстань, яку долає хвиля (м), f – частота (2,4–109 Гц), c – швидкість світла (м/с).

Щоб досягти різниці рівнів сигналів від двох точок доступу в 17 дБ (з урахуванням 3 дБ ослаблення завади, за рахунок зміщення частотних смуг), за їх однакової потужності випромінювання, необхідно, щоб різниця ходу електромагнітних хвиль становила 25 см. Тобто, за умов наявності іншої точки доступу, робоча частотна смуга якої частково перекривається з частотною смугою точки доступу основної безпроводової

мережі, для станції, що знаходиться приблизно на однаковій відстані від точок доступу різних мереж, виникають умови, за яких навіть за незначного переміщення пропускна здатність безпроводового каналу може змінюватись від максимальної до повної її відсутності.

Під час планування безпроводової мережі треба враховувати, що для забезпечення певного рівня пропускної здатності каналу треба забезпечити певний мінімальний рівень сигналу на вході приймача. Для максимальної швидкості передавання у мережі 802.11n треба, щоб потужність на вході приймача була не менше «мінус»64 дБм.

Висновки.

1. Максимальна пропускна здатність інформаційного каналу безпроводової мережі IEEE802.11n в режимі функціонування зі швидкістю з'єднання 150 Мб/с не перевищує 57 Мб/с. Коефіцієнт корисного навантаження ккн для мережі з одним просторовим каналом знаходиться в межах 0,3–0,37.

2. За наявності кількох активних станцій у безпроводової мережі, пропускна здатність залежить від взаємного розташування абонентських станцій та точки доступу. В разі насиченого навантаження активних станцій, найменша сумарна пропускна здатність має місце, коли станції розташовані приблизно в одному напрямі щодо точки доступу (мале кутове рознесення місць розташування станцій).

3. За наявності в мережі чотирьох і більше станцій, що функціонують у насиченому режимі, мережа 802.11n переходить на режим із пониженою швидкістю завадостійкого кодування і не можна реалізувати найбільш швидкісні режими передавання даних.

4. У разі наявності поблизу безпроводової мережі іншої мережі стандарту 802.11 для робочої станції, що знаходиться на сумірній відстані від обох точок доступу, виникають умови, за яких навіть незначне переміщення робочої станції може призвести до значної зміни пропускної здатності.

5. У разі передавання відеопотоку в мережі IEEE802.11n наявність у мережі ще двох станцій із насиченим навантаженням призводить до порушення безперервності передавання відеопотоку.

Список літератури:

1. Wi-Fi (Wireless Fidelity) стандарт беспроводной связи. URL: <https://www.tadviser.ru> (дата звернення 10.09.2018).
2. Emerging Technologies in Wireless LANs. Theory, Design, and Deployment / Edited by BENNY BING. Georgia Institute of Technology, Cambridge University Press 2008. 897 p.
3. Impact of Legacy Devices on 802.11n Networks. Whitepaper, AirMagnet, Inc., 2008, 15 p.

4. Денисов Д. Тестирование TCP, UDP-трафика в сети Wi-Fi 802.11n/ac. URL: <https://http://www.wireless.ua/1641-testirovanie-tcp-udp-trafika-v-seti-wi-fi-80211nac.html> (дата звернення 10.09.2018).
5. Инь Ченлян, Лазебный В.С. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для прогнозування пропускної здатності сегмента безпроводової мережі Wi-Fi. Проблеми інформатизації та управління. 2017. Том 4. № 60. С. 30–38.
6. Инь Ченлян, Лазебный В.С. Оцінювання ефективності передавання аудіо-візуальної інформації засобами безпроводової мережі 802.11n. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Том 30 (69). № 4. С. 73–82.
7. Частотные полосы и каналы Wi-Fi. URL: <https://http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frequency-bands-and-channels> (дата звернення 10.09.2018).

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ БЕСПРОВОДНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ СПЕЦИФИКАЦИИ IEEE 802.11N

В статье приведены результаты исследований реальной пропускной способности беспроводной информационной сети спецификации IEEE 802.11n для режимов функционирования с радиоканалами 20 МГц и 40 МГц. Экспериментально исследована пропускная способность сети с 2, 4 и 6 активными станциями, функционирующими в насыщенном режиме. Проанализировано влияние других беспроводных сетей Wi-Fi, зона покрытия которых перекрывается зоной покрытия исследуемой сети. Для указанного анализа сделано моделирование процесса функционирования беспроводного канала средствами программного комплекса ADS. Приведены графики деградации пропускной способности, обусловленной помехами в радиоканале. Приведены особые условия пользования каналом беспроводной сети вблизи границы зон покрытия двух беспроводных сетей IEEE 802.11.

Ключевые слова: беспроводной канал, информационная сеть, насыщенный режим, пропускная способность, радиопомехи, Wi-Fi.

INVESTIGATION OF REAL THROUGHPUT OF THE IEEE 802.11N WIRELESS INFORMATION NETWORK

The article presents the results of research on the real bandwidth of the wireless information network of the IEEE 802.11n specification for operating modes with 20 MHz and 40 MHz radio channels. The throughput of the network with 2, 4 and 6 active stations operating in saturated mode has been experimentally investigated. The influence of other wireless Wi-Fi networks, whose coverage area overlaps with the coverage area of the investigated network, is analyzed. For the given analysis the simulation of the operation of the wireless channel by means of the software complex ADS is made. Graphs of throughput degradation, caused by interferences in the radio channel are presented. Specific terms for using the wireless network channel which located near the boundaries of coverage zones of two wireless IEEE 802.11 networks was considered.

Key words: wireless channel, information network, saturated mode, throughput, radio interferences, Wi-Fi.