

УДК 621.39

ЛАЗЕБНИЙ В. С., ОМЕЛЬЯНЕЦЬ О. О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ IEEE 802.11AC

Мета. Метою цих досліджень є проаналізувати параметри зони обслуговування точки доступу мережі стандарту IEEE 802.11ac, залежно від параметрів модуляції й кодування, а також взаємний вплив суміжних мереж цієї специфікації на стабільність їх функціонування.

Методика. На підґрунті нормованих параметрів потужності випромінювання точки доступу і мінімально необхідного рівня прийнятого сигналу зроблено розрахунок максимальної відстані від точки доступу до абонентської станції, на якій можна забезпечити приймання кадрів даних у локальній мережі IEEE 802.11ac, за певного режиму модуляції й кодування (MCS). Отримані результати застосовано для оцінювання рівня електромагнітної сумісності суміжних безпроводових мереж специфікації IEEE 802.11ac.

Результати. Встановлено, що за умови обмеження випромінюваної потужності точки доступу на рівні 100 мВт високошвидкісні режими передавання даних у безпроводовій мережі IEEE 802.11ac, можна реалізувати за відсутності перешкод на шляху розповсюдження радіохвиль в радіусі $10 \div 15$ м від точки доступу. Розмір зони обслуговування залежить від застосованого в мережі режиму модуляції й кодування, і радіус зони може змінюватись до десяти разів. Цей розмір залежить також від ширини частотної смуги радіоканалу і зменшується вдвічі, у разі збільшення частотної смуги в чотири рази. У разі зменшення випромінюваної потужності точки доступу до 60 мВт, радіус зони обслуговування зменшується на 25%. За результатами аналізу застосованих в мережах IEEE 802.11 механізмів оцінювання зайнятості частотного каналу, зроблено висновок про те, що в локаціях зі щільним розташуванням локальних мереж значний взаємний вплив може бути, як внаслідок виникнення співканальних завад, так і внаслідок міжмережесих завад суміжних частотних каналів.

Наукова новизна. Узагальнено чинники, що впливають на функціонування суміжних безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 на фізичному рівні та визначено числові дані, що характеризують залежність зони обслуговування мережевої точки доступу специфікації IEEE 802.11ac від режиму передавання користувацьких даних.

Практична значимість. Результати можуть бути використані під час проектування, планування та обслуговування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11, зі змогою сформулювати прогнозну оцінку швидкості передавання даних, залежно від місця розташування користувацької станції в зоні обслуговування точки доступу та наявних перешкод на шляху розповсюдження OFDM сигналу і від наявності інших, близько розташованих мереж IEEE 802.11.

Ключові слова: точка доступу; енергетичний поріг; EMC; IEEE 802.11; MCS; RSSI; SNR.

Вступ. Безпроводові мережі стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) широко застосовують у різноманітних сферах людської діяльності як зручний засіб для створення локальних мереж обміну даними і швидкого доступу до інформаційних ресурсів через мережу Інтернет. Ці мережі почали активно використовувати для реалізації технології IP-телефонії (VoIP) [1], організації відеоконференцій [2] тощо. Для реалізації таких технологій важливими чинниками є малі затримки передавання, невелика нерівномірність затримок і достатня пропускна здатність. Деякі фахівці не рекомендують використовувати мережі Wi-Fi для організації офісних локальних мереж саме через нестабільний характер параметрів з'єднання [3]. Затримки та їх нерівномірність можуть сягати великих значень [4], що суттєво зменшує якість наданих послуг. Узагальнено можна окреслити два основних чинники, що впливають на поточні показники мережі: внутрішньо мережева конкуренція між абонентами мережі та вплив електромагнітної обстановки, створеної близько розташованими безпроводовими

мережами IEEE 802.11. Іще одним чинником є перешкоди, розташовані на шляху розповсюдження електромагнітної хвилі. Такими перешкодами можуть бути цегляні й бетонні стіни і перегородки, металеві та скляні двері, тіло людини тощо [5–7]. Деякі перешкоди можуть притлумлювати сигнал на кілька десятків децибелів, чим значно скорочувати зону обслуговування.

У діапазоні 2,4 ГГц сигнали Wi-Fi мереж розповсюджуються на більшу відстань, ніж в діапазоні 5 ГГц, але наявність великої кількості джерел випромінювання і міжмережових завад спонукає розробників пропонувати користувачам надавати перевагу діапазону 5 ГГц [8], в якому можна організувати більше частотних каналів без перекриття частотних смуг. Проте, в діапазоні 5 ГГц ефективні характеристики мереж суттєво відрізняються від задекларованих [9].

Стандарт IEEE 802.11 призначено для організації безпроводових мереж на фізичному і канальному рівнях моделі OSI. Питанням щодо функціонування мереж IEEE 802.11 на канальному рівні присвячено багато досліджень, а питання функціонування мережі на фізичному рівні залишається здебільшого поза увагою фахівців. Водночас процеси, що мають місце на фізичному рівні, суттєво впливають на характеристики мережі, їх врахування може забезпечувати кращі експлуатаційні показники мережі в цілому, що й визначило актуальність здійснення додаткових досліджень.

Постановка завдання. Метою цих досліджень є проаналізувати параметри зони обслуговування точки доступу мережі стандарту IEEE 802.11ac, залежно від параметрів модуляції й кодування, а також взаємний вплив суміжних мереж цієї специфікації на стабільність їх функціонування.

Особливості зони обслуговування точки доступу безпроводової мережі. У радіоінтерфейсі мережі IEEE 802.11ac використано систему багаточастотної модуляції й кодування OFDM. Основні параметри OFDM сигналів для мереж IEEE 802.11n і IEEE 802.11ac [10], у разі використання одного, двох і трьох просторових потоків, наведено у табл. 1.

Хоча стандартом IEEE 802.11ac передбачено можливість використовувати до восьми просторових потоків, проте, до окремого користувача точка доступу може спрямовувати один, два або три потоки, залежно від кількості приймальних антен в абонентському пристрої. У першому стовпчику табл.1 наведено нумерацію режимів модуляції й кодування (MCS) для мереж специфікації IEEE 802.11n (HT_MCS), у другому – для мереж специфікації IEEE 802.11ac (VHT_MCS).

У табл. 1, окрім безпосередньо параметрів сигналів, наведено передбачені у стандарті мінімальні значення відношення сигнал-шум (SNR) та мінімальні значення потужності на вході приймача (RSSI), необхідні для приймання сигналів з певними параметрами модуляції й кодування (MCS) [11]. RSSI іще називають чутливістю приймача. Із застосуванням цих параметрів можна зробити оцінювання розмірів зони обслуговування точки доступу, залежно від застосованої швидкості передавання й випромінюваної потужності. Слід зауважити, що перехід на більшу або меншу швидкість передавання, здійснюваний точкою доступу (ТД) автоматично, може бути обумовлений, наприклад, появою або відсутністю помилкових кадрів під час передавання, внаслідок зміни електромагнітної обстановки.

Спочатку розглянемо межі зони обслуговування за ідеальних умов розповсюдження сигналу. Тобто, коли на шляху розповсюдження сигналу нема перешкод, і присутні тільки теплові шуми.

За цього визначимо, на якій відстані від точки доступу буде досягнуто мінімально необхідної потужності прийнятого сигналу для різних значень MCS.

Таблиця 1

Параметри сигналів OFDM мережі IEEE802.11ac (VHT MCS)

HT MCS	VHT MCS	Модуляція	Код.	20 МГц				40 МГц				80 МГц				160 МГц			
				S, Мб/с		Min. SNR	RSSI	S, Мб/с		Min. SNR	RSSI	S, Мб/с		Min. SNR	RSSI	S, Мб/с		Min. SNR	RSSI
				800нс	400нс			800нс	400нс			800нс	400нс			800нс	400нс		
Один просторовий потік																			
0	0	BPSK	1/2	6,5	7,2	2	-82	13,5	15	5	-79	29,3	32,5	8	-76	58,5	65	11	-73
1	1	QPSK	1/2	13	14,4	5	-79	27	30	8	-76	58,5	65	11	-73	117	130	14	-70
2	2	QPSK	3/4	19,5	21,7	9	-77	40,5	45	12	-74	87,8	97,5	15	-71	175,5	195	18	-68
3	3	16-QAM	1/2	26	28,9	11	-74	54	60	14	-71	117	130	17	-68	234	260	20	-65
4	4	16-QAM	3/4	39	43,3	15	-70	81	90	18	-67	175,5	195	21	-64	351	390	24	-61
5	5	64-QAM	2/3	52	57,8	18	-66	108	120	21	-63	234	260	24	-60	468	520	27	-57
6	6	64-QAM	3/4	58,5	65	20	-65	121,5	135	23	-62	263,3	292,5	26	-59	526,5	585	29	-56
7	7	64-QAM	5/6	65	72,2	25	-64	135	150	28	-61	292,5	325	31	-58	585	650	34	-55
-	8	256-QAM	3/4	78	86,7	29	-59	162	180	32	-56	351	390	35	-53	702	780	38	-50
-	9	256-QAM	5/6	-	-	31	-57	180	200	34	-54	390	433,3	37	-51	780	866,7	40	-48
Два просторових потоки																			
8	0	BPSK	1/2	13	14,4	2	-82	27	30	5	-79	58,5	65	8	-76	117	130	11	-73
9	1	QPSK	1/2	26	28,9	5	-79	54	60	8	-76	117	130	11	-73	234	260	14	-70
10	2	QPSK	3/4	39	43,3	9	-77	81	90	12	-74	175,5	195	15	-71	351	390	18	-68
11	3	16-QAM	1/2	52	57,8	11	-74	108	120	14	-71	234	260	17	-68	468	520	20	-65
12	4	16-QAM	3/4	78	86,7	15	-70	162	180	18	-67	351	390	21	-64	702	780	24	-61
13	5	64-QAM	2/3	104	115,6	18	-66	216	240	21	-63	468	520	24	-60	936	1040	27	-57
14	6	64-QAM	3/4	117	130,3	20	-65	243	270	23	-62	526,5	585	26	-59	1053	1170	29	-56
15	7	64-QAM	5/6	130	144,4	25	-64	270	300	28	-61	585	650	31	-58	1170	1300	34	-55
-	8	256-QAM	3/4	156	173,3	29	-59	324	360	32	-56	702	780	35	-53	1404	1560	38	-50
-	9	256-QAM	5/6	-	-	31	-57	360	400	34	-54	780	866,7	37	-51	1560	1733	40	-48
Три просторових потоки																			
16	0	BPSK	1/2	19,5	21,7	2	-82	40,5	45	5	-79	87,8	97,5	8	-76	175,5	195	11	-73
17	1	QPSK	1/2	39	43,3	5	-79	81	90	8	-76	175,5	195	11	-73	351	390	14	-70
18	2	QPSK	3/4	58,5	65	9	-77	121,5	135	12	-74	263,3	292,5	15	-71	526,5	585	18	-68
19	3	16-QAM	1/2	78	86,7	11	-74	162	180	14	-71	351	390	17	-68	702	780	20	-65
20	4	16-QAM	3/4	117	130	15	-70	243	270	18	-67	526,5	585	21	-64	1053	1170	24	-61
21	5	64-QAM	2/3	156	173,3	18	-66	324	360	21	-63	702	780	24	-60	1404	1560	27	-57
22	6	64-QAM	3/4	175,5	195	20	-65	364,5	405	23	-62	-	-	26	-59	1580	1755	29	-56
23	7	64-QAM	5/6	195	216,7	25	-64	405	450	28	-61	877,5	975	31	-58	1755	1950	34	-55
-	8	256-QAM	3/4	234	260	29	-59	486	540	32	-56	1053	1170	35	-53	2106	2340	38	-50
-	9	256-QAM	5/6	260	288,9	31	-57	540	600	34	-54	1170	1300	37	-51	-	-	40	-48

Примітка. HT MCS – швидкісний режим за специфікацією IEEE 802.11n; VHT MCS – дуже швидкісний режим за специфікацією IEEE 802.11ac; S – швидкість передавання блоку даних; SNR – відношення сигнал/шум; RSSI (Received Signal Strength Indication) – мінімальне значення потужності на вході приймача.

Максимальну потужність випромінювання радіоелектронних засобів (РЕЗ) безпроводових мереж стандарту IEEE802.11 в частотній смузі 5150–5850 МГц в Україні регламентовано постановою Кабінету Міністрів України № 801 від 15 липня 2022 р. Зокрема в ній визначено, що «експлуатація радіообладнання стандартів IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac і IEEE 802.11ax здійснюється виключно всередині приміщень відповідно до Б01 за умови використання в РЕЗ інтегрованих (конструктивних) неспрямованих антен із коефіцієнтом

підсилення до 9 дБ¹ та обмеження максимальної еквівалентної ізотропної випромінювальної потужності до 100 мВт» [12].

Частотні смуги можливих радіоканалів мереж IEEE 802.11ac наведено на рис. 1 [13].

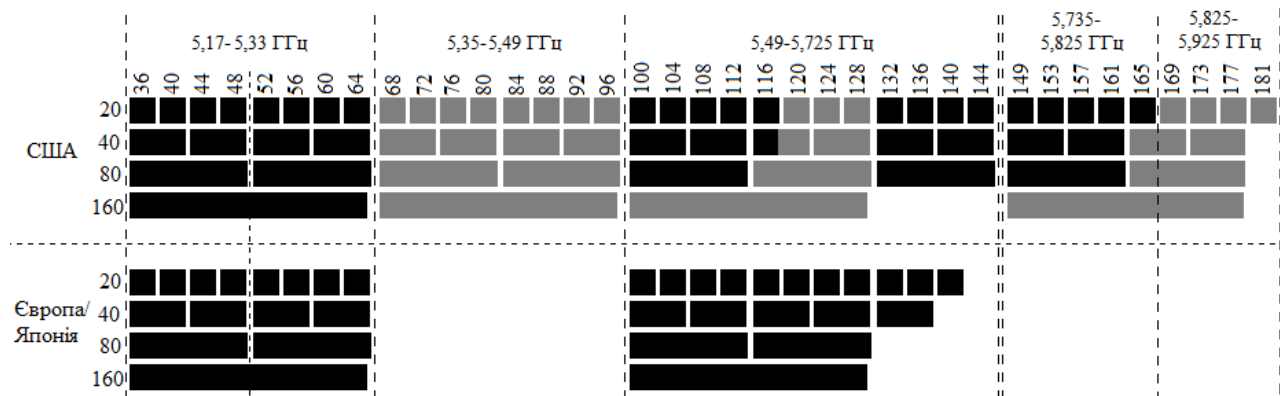


Рис. 1. Розподіл частотних смуг неліцензованого діапазону 5 ГГц

На рис. 1 наведено частотні смуги, що не перекриваються на рівні -20 дБ напруженості електромагнітного поля, створюваного в межах основної смуги частот. Спектральну маску для каналу мережі IEEE 802.11 з частотною смугою 20 МГц наведено на рис. 2.

Визначимо зону покриття точки доступу з максимально можливою випромінюваною потужністю $P_{AP} = 100$ мВт (20 дБм)². Зробимо узагальнений розрахунок для частоти 5,4 ГГц із застосуванням формули загасання у вільному просторі [14].

$$L = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right)^2, \quad (1)$$

де d – відстань від точки доступу до точки приймання, м;
 f – частота радіосигналу, Гц;
 c – швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Із співвідношення (1) знаходимо:

$$d = \frac{c \cdot \sqrt{L}}{4 \cdot \pi \cdot f} = 0,00442 \cdot \sqrt{L}. \quad (2)$$

Величину загасання сигналу L до межі зони обслуговування для різних значень MCS в термінах стандарту IEEE 802.11 можна визначити через випромінювану потужність точки доступу (P_{AP}) і мінімальну потужність на вході приймача радіосигналу необхідну для приймання сигналу $RSSI$:

$$L, \text{дБ} = P_{AP} - RSSI. \quad (3)$$

Отримані згідно з (3) значення загасання і розраховані згідно з (2) відстані до межі зони обслуговування наведено в табл. 2.

¹ дБі – децибел відносно рівня ізотропного випромінювача. Характеризує коефіцієнт підсилення антени спрямованої дії відносно коефіцієнта ізотропного випромінювача.

² дБм – абсолютний рівень потужності в децибелах (dB) відносно 1 мВт (тобто, опорним рівнем є потужність 1 мВт).

Таблиця 2

Загасання сигналу і радіус зони обслуговування

20 МГц	MCS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	L , дБ	102	99	97	94	90	86	85	84	79	77
	d , м	556,45	393,93	312,91	221,52	139,77	88,19	78,60	70,05	39,39	31,29
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	2	5	9	11	15	18	20	25	29	31
40 МГц	L , дБ	99	96	94	91	87	83	82	81	76	74
	d , м	393,93	278,88	221,52	156,83	98,95	62,43	55,64	49,59	27,89	22,15
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	5	8	12	14	18	21	23	28	32	34
80 МГц	L , дБ	96	93	91	88	84	80	79	78	73	71
	d , м	278,88	197,43	156,83	111,03	70,05	44,20	39,39	35,11	19,74	15,68
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	8	11	15	17	21	24	26	31	35	37
160 МГц	L , дБ	93	90	98	85	81	77	76	75	70	68
	d , м	197,43	139,77	111,03	78,60	49,59	31,29	27,89	24,86	13,98	11,10
	SNR^* , дБ	18,849	21,849	23,849	26,849	30,849	34,849	35,849	36,849	41,849	43,849
	SNR , дБ	11	14	18	20	24	27	29	34	38	40

У табл. 2 наведено також значення відношення сигнал-шум (SNR^*) для сигналів на межі зони обслуговування для перевірки умови їх надійного приймання. Рівень відношення сигнал-шум (SNR^*), розрахований з урахуванням мінімально необхідної потужності на вході приймача, перевищує мінімально необхідні значення відношення сигнал-шум (SNR) для всіх режимів, наведених у табл. 1.

Відношення сигнал-шум на вході приймача абонентської станції визначено за співвідношенням [15]:

$$SNR^* = \frac{RSSI}{k \cdot T \cdot B} \text{ або } SNR, \text{ дБ} = 10 \lg \frac{RSSI}{k \cdot T \cdot B}, \quad (4)$$

де $RSSI$ – мінімальне значення потужності на вході приймача, необхідне для приймання сигналу;

k – стала Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютна температура середовища, К;

B – ширина частотної смуги радіоканалу, Гц.

За результатами, наведеними в табл. 2, можна з'ясувати залежність розмірів зони обслуговування мережевої точки від режиму модуляції й кодування і від ширини частотного каналу. Так, зі зміною модуляції від QPSK (MCS1) до 256-QAM (MCS8) в каналі з частотною смугою 20 МГц радіус зони обслуговування у вільному просторі змінюється від 394 м до 39 м. Тобто, залежно від способу модуляції і швидкості завадозахисного коду, радіус зони обслуговування може змінюватись в 10 разів. Ця залежність має місце і в мережах з іншою шириною частотної смуги каналу. В каналі з частотною смугою 160 МГц радіус зони обслуговування змінюється від 140 м (MCS1) до 11 м (MCS9). Перехід на більш захищений спосіб модуляції й кодування (менша швидкість передавання даних) відбувається, у разі збільшення рівня завад і додаткового загасання сигналу в каналі, що призводить до втрати кадрів даних або керування.

Залежність радіусу зони обслуговування від ширини частотної смуги радіочастотного каналу обумовлена обмеженням випромінюваної потужності передавачів мережевих станцій. За цього, в разі подвоєння частотної смуги в 2 рази, радіус зони обслуговування зменшується приблизно в 1,4 рази (розрахункове значення 1,4125). Так, у разі використання частотного каналу 20 МГц і режиму модуляції й кодування MCS1, радіус зони обслуговування становитиме 394 м, а в разі використання такого ж режиму в мережі з частотним каналом 40 МГц – 279 м. У разі збільшення ширини частотної смуги каналу в 4 рази радіус зони обслуговування зменшується у 2 рази. Зазначена залежність радіусу зони обслуговування від ширини частотного каналу має місце для всіх режимів модуляції й кодування.

Взаємний вплив суміжних мереж на параметри фізичного рівня. За реальних умов, безпроводова мережа IEEE 802.11 межує з іншими подібними мережами, які можуть використовувати такі самі або суміжні частотні смуги радіоканалів. Такий сценарій характерний для офісних приміщень, навчальних закладів, багатоквартирних будинків тощо.

Взаємний вплив електронних пристроїв і систем характеризують рівнем електромагнітної сумісності (ЕМС) і рівнем несприйнятливості.

Рівень електромагнітної сумісності (electromagnetic compatibility level) – це установлений рівень електромагнітного збурення, який застосовують, як опорний рівень для координації у регулюванні рівнів емісії та несприйнятливості. Рівень несприйнятливості (immunity level) – максимальний рівень електромагнітного збурення, що діє на конкретний прилад, обладнання чи систему, за якого вони зберігають необхідні робочі характеристики [14].

Аби з'ясувати умови найкращої електромагнітної сумісності близько розташованих мереж, що функціонують в одному частотному діапазоні, треба проаналізувати отримані вище результати, а також врахувати вплив додаткових чинників.

У табл. 2 привертає увагу режим MCS0 у каналі з шириною частотної смуги 20 МГц, сигнали якого абонентська станція може прийняти на дуже великій відстані (більше 550 м), у порівнянні зі швидкісними режимами. Наприклад, якщо порівнювати з режимом MCS9 у каналі 160 МГц з двома просторовими потоками (11÷15 м). Справа в тому, що режим MCS0 використовують всі станції специфікації IEEE 802.11ac для надійного передавання преамбули кадрів, призначеної для взаємодії з мережевими пристроями попередніх специфікацій. Тобто, в разі функціонування двох просторово рознесених мереж у діапазоні 5 ГГц, що використовують однакові частотні смуги, сигнали «старої» преамбули віддаленої мережі можуть суттєво впливати на пропускну здатність даної безпроводової мережі.

Цей вплив обумовлений механізмом оцінювання зайнятості каналу. Точка доступу одночасно використовує два методи: виявлення сигналу Wi-Fi і визначення рівня радіочастотної енергії в каналі. Згідно з першим методом, приймач починає декодувати сигнал, що надходить від інших мереж IEEE 802.11, а згідно з другим – приймач оцінює рівень радіочастотного сигналу довільного походження в частотній смузі каналу.

Порогові значення рівнів сигналів, що визначають зайнятість каналу, наведено в табл. 3 [15].

Таблиця 3

Порогові значення для виявлення вільного каналу

Ширина каналу, МГц	Сигнальний поріг, дБм (основний канал)	Сигнальний поріг, дБм (неосновний канал)	Енергетичний поріг, дБм
20	-82	-72	-62
40	-79	-72	-59
80	-76	-69	-56
160	-73	не визначено	не визначено

Так, точка доступу, що знаходиться на відстані 50 м, за умови застосування нею ЕІВП³ 20 дБм в напрямку даної ТД або абонентської станції, сформує сигнал «мінус» 61,065 дБм, що може призвести до оцінки зайнятості каналу за двома згаданими вище ознаками.

Окрім співканальних завад, тобто завад, створених мережами, що функціонують в каналах з однаковими частотними смугами, для забезпечення електромагнітної сумісності близько розташованих мереж треба брати до уваги мережі, в яких використані суміжні частотні смуги. Спектральну маску радіочастотного каналу 20 МГц наведено на рис. 2. Обвідна позасмугового випромінювання реального спектру радіосигналу проходить нижче контуру маски, але має доволі високий рівень, як це наведено на рис. 2 [17].

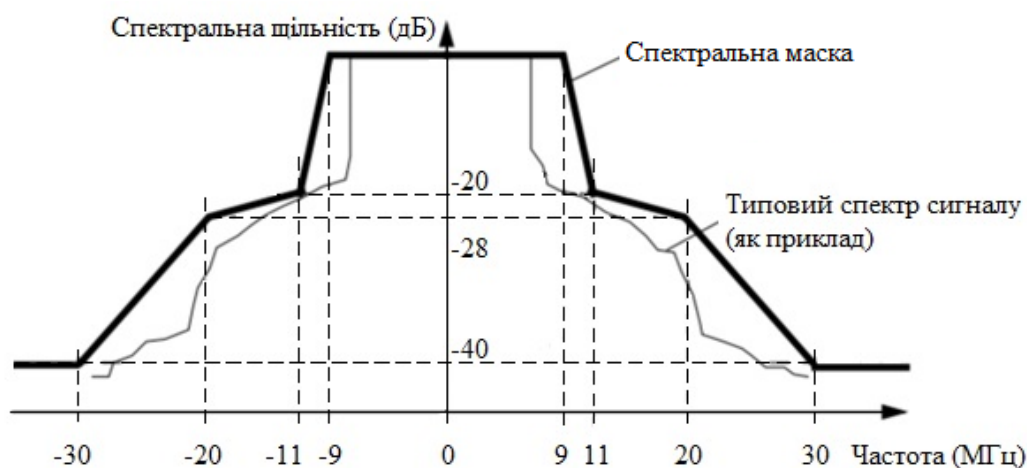


Рис. 2. Спектральна маска мережі IEEE 802.11 для каналу з частотною смугою 20 МГц

Найбільші складнощі можуть виникнути, якщо інші близько розташовані мережі використовують частотні смуги, суміжні з даною мережею з обох боків. У такому разі суміжні мережі можуть спільно створювати достатньо великі завади частотній смузі даного каналу, які перевищують енергетичний поріг і обумовлюють оцінку зайнятості каналу. Найбільш ймовірно джерелом завад можуть бути абонентські станції іншої мережі, що знаходяться поблизу межі зони обслуговування досліджуваної мережі.

Щоб забезпечити електромагнітну сумісність мереж, що функціонують в діапазоні 5 ГГц, можна застосувати два підходи. Можна використовувати секторні антени і розташовувати їх з урахуванням загасання радіосигналу при проходженні через перешкоди (стіни, перекриття тощо), але такий підхід не завжди можна реалізувати через випадковий характер розташування безпроводових мереж у незалежних користувачів. Інший підхід полягає у зменшенні випромінюваної потужності точкою доступу та абонентськими пристроями. Цей підхід дає змогу зменшити рівень міжмережових завад, але водночас призводить до зменшення зони обслуговування ТД і зменшення пропускної здатності безпроводового каналу.

На практиці в діапазоні 5 ГГц для забезпечення ЕМС безпроводових мереж часто налаштовують ТД на максимальну випромінювану потужність в межах 60–75 мВт [9]. У разі використання потужності передавача 60 мВт, замість 100 мВт, радіус зони обслуговування зменшується на 25%, у порівнянні з відстанями, наведеними в табл. 2.

Для забезпечення високих якісних показників функціонування мережі на значних територіях внутрішніх приміщень у діапазоні 5 ГГц доцільно використовувати стільниковий

³ ЕІВП – еквівалентна ізотропно випромінювана потужність.

принцип організації мереж із забезпеченням надійного роумінгу між стільниками. Частотні смуги для суміжних стільників локальних мереж треба вибирати так, щоб їхні частотні смуги не були суміжними.

Висновки. Високошвидкісні режими передавання даних у безпроводовій мережі IEEE 802.11ac, з причини обмеження максимального значення випромінюваної потужності (EIRP) на рівні 100 мВт, можна реалізувати за відсутності перешкод на шляху розповсюдження радіохвиль в радіусі 10÷15 м від точки доступу.

Розмір зони обслуговування залежить від застосованого в мережі режиму модуляції й кодування, і радіус зони може змінюватись до десяти разів. Цей розмір залежить також від ширини частотної смуги радіоканалу і зменшується вдвічі, у разі збільшення частотної смуги в чотири рази.

Хоча в діапазоні 5 ГГц сигнали частотних смуг окремих каналів на рівні -20 дБ майже не перекриваються, внаслідок відносно великої інтенсивності позасмугового випромінювання, у суміжних частотних каналах можуть виникати помітні взаємні завади, що зменшує ефективність використання каналного ресурсу.

Співканальні завади можуть надходити від мереж, що знаходяться на відстані в кілька десятків метрів, внаслідок передавання преамбули кадрів даних для взаємодії з абонентськими пристроями більш ранніх специфікацій, що може призвести до формування оцінки зайнятості каналу і переходу пристроїв мережі в режим очікування.

Якщо в обмеженому просторі розгорнуто кілька мереж за специфікацією IEEE 802.11ac, слід очікувати, що через обмежену електромагнітну сумісність цих мереж не можна досягти максимальних значень експлуатаційних показників.

Для найбільш ефективного використання можливостей безпроводових мереж специфікації IEEE 802.11ac, під час їх планування треба враховувати чинники фізичного рівня, що впливають на електромагнітну сумісність мереж.

Для забезпечення високих якісних показників функціонування мережі на значних територіях внутрішніх приміщень у діапазоні 5 ГГц доцільно використовувати стільниковий принцип організації мереж із забезпеченням надійного роумінгу між стільниками. Частотні смуги для суміжних стільників локальних мереж треба вибирати так, щоб їхні частотні смуги не були дотичними.

References

1. VoIP vs. VoWiFi: Comparing Benefits & Highlighting Differences. URL: <https://www.calilio.com/blogs/voip-vs-vowifi-comparison-differences>.
2. The Impact of Network Latency on Video Streaming Quality. URL: <https://utilitiesone.com/the-impact-of-network-latency-on-video-streaming-quality>.
3. Voice Over Wi-Fi (VoWiFi): Technology Overview, Opportunities, and Challenges. *Lumenci team*, April 10, 2023. URL: <https://www.lumenci.com/research-articles/voice-over-wi-fi>.
4. Salama, R. S. (2020). Quality of Service in IEEE 802.11ac and 802.11n Wireless Protocols with Applications in Medical Environments. *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*, P. 1345–1358, DOI:10.1007/978-3-030-57745-2_111.

Література

1. VoIP vs. VoWiFi: Comparing Benefits & Highlighting Differences. URL: <https://www.calilio.com/blogs/voip-vs-vowifi-comparison-differences>.
2. The Impact of Network Latency on Video Streaming Quality. URL: <https://utilitiesone.com/the-impact-of-network-latency-on-video-streaming-quality>.
3. Voice Over Wi-Fi (VoWiFi): Technology Overview, Opportunities, and Challenges. *Lumenci team*, April 10, 2023. URL: <https://www.lumenci.com/research-articles/voice-over-wi-fi>.
4. Salama, R. S. Quality of Service in IEEE 802.11ac and 802.11n Wireless Protocols with Applications in Medical Environments. *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*. 2020. P. 1345–1358. DOI:10.1007/978-3-030-57745-2_111.

5. Which Building Materials Can Block Wi-Fi Signals? URL: <https://eyenetworks.no/en/wifi-signal-loss-by-material/>
6. Wi-Fi Signal Attenuation. URL: <https://blog.wavlink.com/en-us/article/TechnicalNews/92442c2444eaa02541dd27fe90bed782.html>
7. Mi, P., Wang, X. (2012). Improved channel assignment for WLANs by exploiting partially overlapped channels with novel CIR-based user number estimation. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, June, P. 6591–6595.
8. 2.4 GHz vs. 5 GHz (Which One Is Better?). URL: <https://www.meter.com/business-internet/2-4-ghz-vs-5-ghz>.
9. Lukaszewski, C., Li, L. 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.
10. MCS table and how to use it. URL: <https://wlanprofessionals.com/mcs-table-and-how-to-use-it/>
11. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper. URL: http://euro.ecom.cmu.edu/resources/elibrary/auto/5th_gen_Wi-Fi.pdf
12. Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2005 р. № 1208 і від 9 червня 2006 р. № 815: Постанова Кабінету Міністрів України від 15 липня 2022 р. № 801 [On Amendments to Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1208 of December 15, 2005 and No. 815 of June 9, 2006: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated July 15, 2022 No. 801]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/801-2022-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
13. Matthew, S. (2015). Gast. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media, USA, 136 p. URL: <https://freecomputerbooks.com/802.11ac-A-Survival-Guide.html>.
14. Lazebnyi, V. S., Pilinskyi, V. V., Shvaichenko, V. B. (2023). Elektromahnitna sumisnist elektronnykh prystroiv: navchalnyi posibnyk [Electromagnetic compatibility of electronic devices: study guide]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 343 p. [in Ukrainian].
15. SNR calculation with Noise Spectral Density. URL: <https://dsp.stackexchange.com/questions/13127/snr-calculation-with-noise-spectral-density>.
16. Why WiFi is Complicated: WiFi Signal Issues. URL: <https://www.accoladewireless.com/wlan-wifi-signal-issues/>
17. Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements. URL: <https://>
5. Which Building Materials Can Block Wi-Fi Signals? URL: <https://eyenetworks.no/en/wifi-signal-loss-by-material/>
6. Wi-Fi Signal Attenuation. URL: <https://blog.wavlink.com/en-us/article/TechnicalNews/92442c2444eaa02541dd27fe90bed782.html>
7. Mi P., Wang X. Improved channel assignment for WLANs by exploiting partially overlapped channels with novel CIR-based user number estimation. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, June. P. 6591–6595.
8. 2.4 GHz vs. 5 GHz (Which One Is Better?). URL: <https://www.meter.com/business-internet/2-4-ghz-vs-5-ghz>.
9. Lukaszewski C., Li L. 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.
10. MCS table and how to use it. URL: <https://wlanprofessionals.com/mcs-table-and-how-to-use-it/>
11. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper. URL: http://euro.ecom.cmu.edu/resources/elibrary/auto/5th_gen_Wi-Fi.pdf.
12. Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2005 р. № 1208 і від 9 червня 2006 р. № 815: Постанова Кабінету Міністрів України від 15 липня 2022 р. № 801. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/801-2022-%D0%BF#Text>.
13. Matthew S. Gast. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media, USA, 2015. 136 p. URL: <https://freecomputerbooks.com/802.11ac-A-Survival-Guide.html>.
14. Лазебний В. С., Пілінський В. В., Швайченко В. Б. Електромагнітна сумісність електронних пристроїв: навчальний посібник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 343 р.
15. SNR calculation with Noise Spectral Density. URL: <https://dsp.stackexchange.com/questions/13127/snr-calculation-with-noise-spectral-density>.
16. Why WiFi is Complicated: WiFi Signal Issues. URL: <https://www.accoladewireless.com/wlan-wifi-signal-issues/>
17. Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements. URL: <https://>

www.tek.com/en/documents/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements.

www.tek.com/en/documents/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements.

LAZEBNYI VOLODYMYR

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Acoustic and Multimedia Electronic
Systems, National Technical University of Ukraine "Igor
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5702-2775>

Scopus Author ID: 55225593900

ResearcherID: J-7229-2017

E-mail: ivs50469-ames@iitl.kpi.ua

OMELIANETS OLEKSANDRA

PhD, Department of Acoustic and Multimedia Electronic
Systems, National Technical University of Ukraine "Igor
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-6549-201X>

E-mail: omelyanets2011@gmail.com

LAZEBNYI V. S., OMELIANETS O. O.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF WIRELESS NETWORKS IEEE 802.11AC

Purpose. The purpose of these studies is to analyze the service area parameters of the access point of IEEE 802.11ac network, depending on the modulation and coding parameters, as well as the mutual influence of adjacent networks of this specification on the stability of their operation.

Methodology. Based on the standardized parameters of the access point radiation power and the minimum required level of the received signal, the calculation of the maximum distance from the access point to the subscriber station of IEEE 802.11ac standard local network, at which it is possible to receive of data frames, under a certain mode of modulation and coding (MCS), was made. The obtained results were used to evaluate the level of electromagnetic compatibility of adjacent wireless networks of the IEEE 802.11ac specification.

Findings. It has been established that under the conditions of limiting the radiated power of the access point at the level of 100 mW, high-speed data transmission modes in the IEEE 802.11ac wireless network can be realized within a radius of 10÷15 m from the access point when the interference in the path of radio wave propagation are absent. The size of the service area depends on the modulation and coding mode used in the network, and the radius of the area can vary up to ten times. The size also depends on the width of the frequency band of the radio channel and decreases by half, by increasing of the frequency band by four times. When the radiated power of the access point is reduced to 60 mW, the radius of the service area is reduced by 25%. Based on the results of the analysis of frequency channel occupancy assessment mechanisms used in IEEE 802.11 networks, it was concluded that in locations with a dense location of local networks, there can be a significant mutual influence, both due to influence of co-channel interference and due to inter-network interferences of adjacent frequency channels.

Originality. Factors affecting the operation of adjacent wireless networks of the IEEE 802.11 standard at the physical level are summarized and numerical data characterizing the dependence of parameters of the service area of the IEEE 802.11ac access point by the data transmission mode is determined.

Practical value. The results can be used during the design, planning and maintenance of IEEE 802.11 wireless standard networks to form a predictive estimate of the data transfer rate depending on the location of the user station in the service area of the access point and the presence of obstacles on the path of the OFDM signal propagation and by taking into account of others located nearby networks IEEE 802.11.

Keywords: access point; energy threshold; EMC; IEEE 802.11; MCS; RSSI; SNR.