

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/06>

**Бугайов М.В.**

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

### АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РАДІОСИГНАЛІВ OFDM-МОДЕМІВ КОРОТКОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ В ІНТЕРЕСАХ РАДІОМОНІТОРИНГУ

*У статті показано, що в сучасних бездротових стандартах передавання інформації досить часто зустрічається використання OFDM технології, зокрема для організації радіозв'язку в короткохвильовому діапазоні. OFDM сигнали в порівнянні з іншими технологіями мають такі характерні особливості: наявність преамбули, циклічного префікса, частотних каналів і пілотних несучих, що забезпечує необхідну частотну й часову синхронізацію та стійкість до багатопроменевого поширення. Проведено аналіз особливостей радіосигналів OFDM-модемів короткохвильового діапазону цивільного й військового призначення, зокрема сімейства CIS, HFDVL, різних протоколів STANAG, Marconi Selenia, PRC-16, Q-MAC, WINDRM51, DRM, MT63, Robust PACKET. Показано, що для кожного стандарту кількість частотних каналів і схема розміщення пілотних несучих, а також структура преамбули й тривалість циклічного префікса суттєво відрізняються. Зважаючи на різноманітність структур OFDM сигналів і значень їхніх параметрів, для систем радіомоніторингу їхніми характерними й стійкими ознаками на етапі виявлення можна вважати структурні особливості автокореляційної функції та спектра. На автокореляційній функції спостерігаються сплески зі значними амплітудами в процесі суттєвої кореляції суміжних тактових інтервалів (через наявність циклічного префікса й пілотних несучих). Використання таких ознак також дозволить досить точно визначити тривалість інтервалу ортогональності й схему розміщення пілотних несучих. Під час глибоких завмирань, що характерно для короткохвильових каналів, форма спектру OFDM сигналу може суттєво відрізнитися від прямокутної, що ускладнює їхню ідентифікацію. Тому як характерну ознаку таких сигналів доцільно використовувати їхню гребінчасту форму спектру. Використання таких ознак у процесі розроблення автоматичних алгоритмів для систем радіомоніторингу може забезпечити надійне виявлення сигналів OFDM модемів під час швидкого сканування широких смуг частот.*

**Ключові слова:** OFDM-модем, структура сигналу, циклічний префікс, частотні канали, пілотні несучі, модуляція.

**Постановка проблеми.** У сучасних бездротових стандартах передавання інформації все частіше зустрічається використання OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) технології. Крім цивільних радіосистем, OFDM-модеми використовують також у військовій сфері для організації радіозв'язку в короткохвильовому (далі – КХ) діапазоні [1; 2]. Це пов'язано з ефективним використанням радіочастотного спектра й стійкістю таких сигналів у разі поширення через канали із частотно-селективним завмиранням. Для забезпечення таких переваг OFDM сигнали в порівнянні з іншими технологіями мають такі характерні особливості: наявність преамбули, циклічного префікса, частотних каналів і пілотних несучих, що забезпечує необхідну частотну

й часову синхронізацію та стійкість до багатопроменевого поширення. Проте для кожного стандарту кількість і схеми розміщення частотних каналів і пілотних несучих, а також структура преамбули й тривалість циклічного префікса суттєво відрізняються. Тому для розроблення алгоритмів автоматичного виявлення, оцінювання параметрів і розпізнавання типу модуляції радіосигналів вказаних OFDM-модемів необхідно провести детальний аналіз їхніх особливостей для виділення характерних і стійких ознак.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Складність структури сигналів OFDM-модемів суттєво ускладнює розв'язання завдань радіомоніторингу в КХ діапазоні. Питання аналізу особливостей таких сигналів розглядалися в роботах [3–7].

У [3] показано, що інформативними ознаками OFDM сигналів є наявність і знак циклічного префікса, пілотні несучі, синхронувальна послідовність, кількість несучих частот. Запропоновано загальні підходи до ідентифікації структури OFDM сигналів. У [4] як характерні ознаки OFDM визначено циклічний префікс. Для виявлення таких сигналів запропоновано розраховувати циклічну автокореляційну функцію (далі – АКФ). У [5] аналіз сигналів OFDM ґрунтується на виявленні періодичних властивостей пілотних несучих і визначенні їхнього частотного рознесення. Водночас ураховуються такі особливості несучих: частотне рознесення між ними є постійним і більшим за смугу когерентності, пілотні несучі розташовані на однакових позиціях кожного символу з однаковими фазами, а їхня потужність приблизно на 2,5 дБ вища, ніж інформаційних. У [6] за характерні ознаки було запропоновано використовувати кепстральні оцінки, які для OFDM мають 1–2 виражені піки. У [7, с. 133] показано, що перед початком OFDM фрейма передаються нульові символи (без передачі потужності) для оцінювання рівнів шуму й інтерференції та грубої синхронізації за часом. За нульовими символами прямують опорні сигнали, в результаті оброблення яких досягається точна синхронізація.

Стислий аналіз публікацій за напрямком дослідження вказує на необхідність проведення детальнішого аналізу радіосигналів OFDM-модемів КХ діапазону й подальшого узагальнення його результатів.

**Постановка завдання.** Метою статті є проведення аналізу радіосигналів OFDM-модемів КХ діапазону, виділення їхніх характерних і стійких ознак і формування рекомендацій для розроблення автоматичних алгоритмів оброблення таких сигналів у сучасних системах радіомоніторингу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** OFDM є схемою модуляції, яка використовує велику кількість близько розташованих ортогональних несучих. Кожна несуча модулюється за звичайною схемою на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і у звичайних системах на одній несучій у тій же смузі пропускання. Амплітуда й початкова фаза кожного модульованого коливання залежить від значень інформаційних бітів, які воно переносить. Для часової та частотної синхронізації та боротьби з інтерференцією між несучими використовується циклічний префікс. Через його наявність у процесі спектрального аналізу OFDM сигналів виникає можливість визначити кількість несучих та їхнє рознесення. Чим довшим є такий префікс,

тим краще проглядаються частотні канали. Спектр OFDM сигналу без циклічного префікса має практично рівний шумоподібний спектр.

Пілотні несучі застосовуються для захвату фази й вирівнювання каналу. Часто вони мають модуляцію BPSK, а бінарні дані утворені псевдо-випадковою послідовністю. Для боротьби з ефектом Доплера в кожному символі OFDM кілька несучих не модулюються, а сусідні несучі залишають нулями для легшого виділення пілотних несучих. Потужність і кількість пілотних несучих – компроміс між якістю оцінки стану каналу й втратами в значенні відношення сигнал-шум (далі – ВСШ). Потужність пілотних несучих, як правило, вища за потужність інформаційних.

Перед OFDM пакетом завжди розміщується преамбула для виявлення початку пакету, автоматичного регулювання підсилення, часової синхронізації, оцінювання частоти та якості каналу. У преамбулі також передаються значення швидкості кодування, довжини пакету й типу модуляції.

Деякі характеристики сигналів OFDM-модемів КХ діапазону цивільного й військового призначення наведено у [8–9]. У процесі подальшого викладення матеріалу використано узагальнення цих даних, а також результати аналізу записів відповідних радіосигналів.

Сімейство російських модемів CIS OFDM HDR (High Data Rate) працюють у п'яти режимах CIS-45, CIS-60, CIS-93, CIS-112 і CIS-128, де цифри відповідають кількості несучих OFDM у сигналі. Немодульована пілотна несуча зміщена від крайньої верхньої несучої OFDM на 2 канали для CIS-45, на 3 канали для CIS-60 і на 4 канали для CIS-93. Сигнал модема CIS-112 має преамбулу з 7 тонів у каналах із номерами 1, 7, 33, 49, 65, 81, 97 (крок складає 16 каналів або 410,25 Гц), що передаються на тривалості 19 символів OFDM (рис. 1а). Після цієї частини преамбули розташовані 56 несучих на непарних каналах (рознос складає 51,28 Гц) тривалістю 11 символів. Немодульована несуча зміщена від крайньої верхньої несучої OFDM на 4 канали й має на 6 дБ більшу потужність, ніж перші 7 несучих преамбули, й на 12 дБ більшу, ніж у разі передачі даних на 112 каналах із даними. У сигналі модема CIS-128 використано 128 каналів з однією подавленою несучою в центрі спектра таким чином, що спектр сигналу поділено на дві частини по 64 канали.

Модем HFDV (High Frequency Data and Voice Link) (Іспанія) призначений для використання у військовій сфері відповідно до STANAG 5066. Преамбула складається з 3 частин. Перша

частина містить одну немодульовану несучу тривалістю 19 або 13 символів (рис. 1б). Друга частина складається з двох символів із відомими даними. Третя частина містить 1 символ на парних несучих і 3 символи на непарних несучих. Загальна кількість несучих 73, з них 13 – пілотні. На 73-му каналі передається немодульована пілотна несуча. Інші 12 пілотних несучих передаються в непарних каналах за трьома різними схемами, які змінюються кожного символу.

Протоколи передачі OFDM-модема за STANAG 4197 визначаються MIL-STD-188-110B [10]. Кількість частотних каналів становить 39, а 40-й використовує немодульовану несучу для корекції частотних зсувів, потужність якої на 6 дБ вища за будь-яку іншу несучу. Преамбула містить три частини. Перша має тривалість 14 символів і містить 4 немодульовані несучі (рис. 2а). Друга частина тривалістю 8 символів має 3 модульовані несучі, причому на межі символів фаза зміню-

ється на  $180^\circ$ . Третя частина має тривалість 1 символ і містить 39 несучих і немодульовану несучу. Потужність сигналу в преамбулі приблизно така ж як і під час передачі даних. При низьких значеннях ВЧШ існує можливість обрати розширену преамбулу, в якій тривалість першої, другої та третьої частин складає 58, 27 і 18 символів відповідно.

Модем Marconi Selenia 25-Tone використовує 12 несучих у нижній частині спектра й 13 у верхній, розділених нульовою несучою (рис. 2б). Преамбула тривалістю 510 мс має дві частини. Перша частина (260 мс) містить 1 немодульовану несучу й 2 несучі з модуляцією FSK. У другій частині преамбули передаються службові дані на всіх несучих.

Китайський модем PRC-16 під час передачі даних використовує формат, подібний до MIL-STD-188-110 App.A 16-tone OFDM. Немодульована несуча повторюється кожні 720 мс. Дані передаються пакетами тривалістю 1150 мс кожен

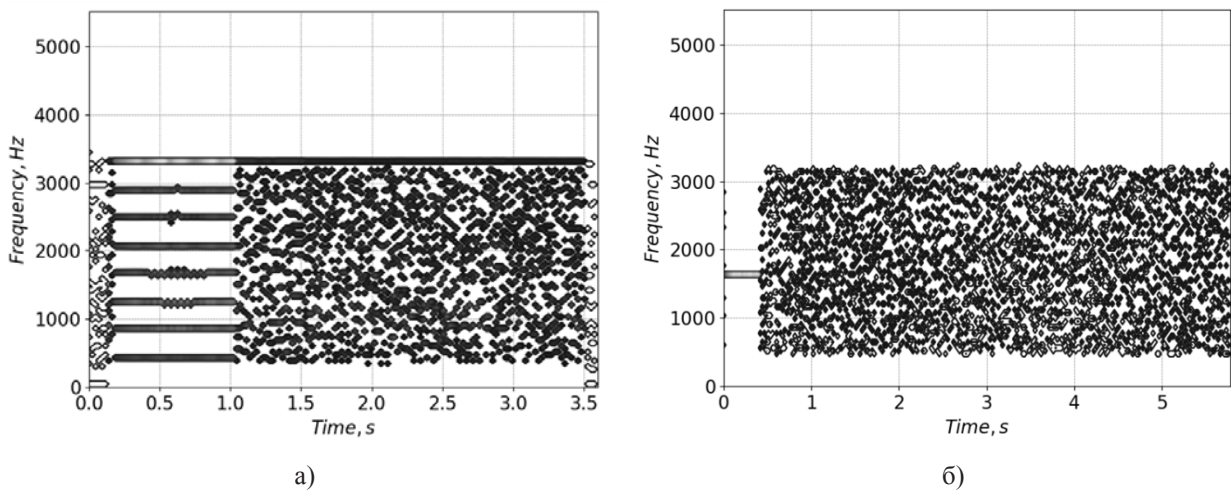


Рис. 1. Спектрограма сигналу модемів CIS-112 (а) й HFDVL (б)

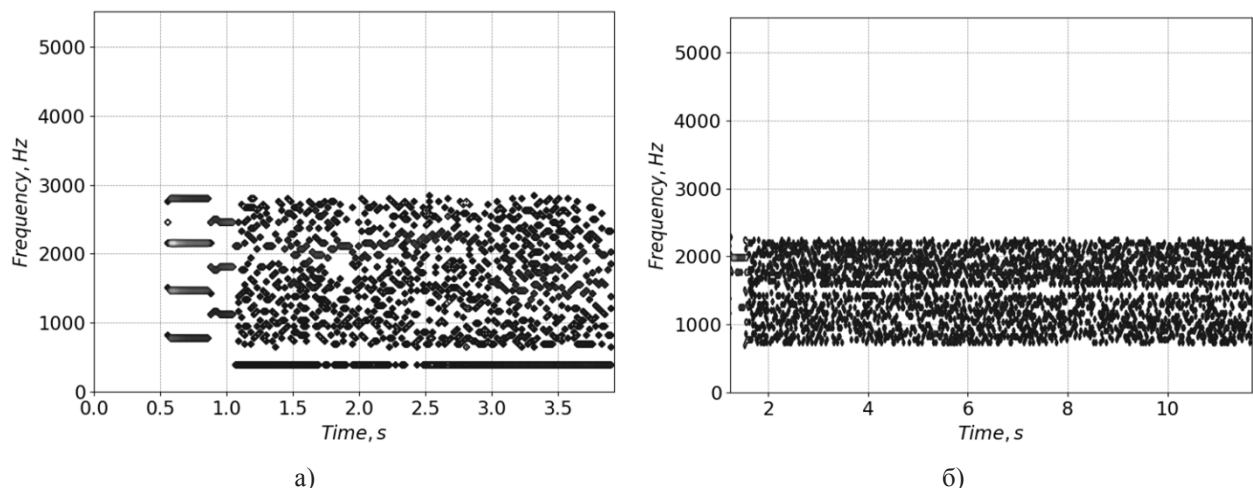


Рис. 2. Спектрограма сигналу модемів MIL-STD-188-110B (а) й Marconi Selenia (б)



(600 мс для преамбули й 550 мс для передачі даних) (рис. 3а).

Модем Q-MAC має в нижній частині спектру 20 несучих з модуляцією DQPSK, через 200 Гц передається несуча синхронізації з BPSK, а ще через 190 Гц – 10 несучих із модуляцією DQPSK (рис. 3б).

Сигнал модема STANAG4197 подібний до MIL-STD-188-110B, проте в ньому відсутня пілотна несуча на частоті 393,7 Гц, а передачі даних на 39 несучих передеує заголовок на 16 несучих.

Британський модем UK GOV MIL WINDRM51 є частинним випадком OFDM, що використовує лише один із кожних двох символів.

Стандарт цифрового радіо Digital Radio Mondiale (DRM) є цифровою альтернативою КХ радіо з амплітудною модуляцією. DRM використовує COFDM і модуляцію QAM. Найчастіше використовується смуга частот 10 кГц. Система може працювати в чотирьох режимах залежно від умов поширення радіохвиль. У кожному режимі використовується різна кількість несучих, рознесення між ними, ширина смуги, тривалість символу й захисного інтервалу. Протокол WinDRM (відомий також як HamDRM або Digital SSTV) – аматорська адаптація DRM.

Модем MT63 було розроблено для використання під час високих рівнів шуму (для ВСШ від -8 дБ). Стійкість до перешкод забезпечується перемежуванням кожного символу, що передається, в часі й між кількома несучими. Самі дані кодуються з використанням перетворення Уолша-Адамара (128×64). Глибина перемежування може складати 8, 32 або 64 біти. Такий модем дуже чутливий до неточностей встановлення частоти дискретизації. Подібний аматорський модем

Q15X25 використовує перемежування, 4 типи перешкодостійкого кодування та ARQ.

Аматорський модем Robust PACKET є оптимізованою для КХ діапазону версією протоколу PACKET. Використовує згортковий код корекції помилок. Робоче значення ВСШ складає 7–10 дБ. Швидкість коду й символна швидкість обирається залежно від рівня шумів у каналі.

Параметри сигналів розглянутих OFDM-модемів наведено в табл. 1.

Зважаючи на різноманітність структур розглянутих OFDM сигналів і значень їхніх параметрів, для систем радіомоніторингу їхніми характеристиками й стійкими ознаками на етапі виявлення можна вважати такі:

1. Сплески АКФ зі значними амплітудами в разі суттєвої кореляції суміжних тактових інтервалів (рис. 4а) (через наявність циклічного префікса й пілотних несучих). Використання таких ознак також дозволить досить точно визначити тривалість інтервалу ортогональності й схему розміщення пілотних несучих.

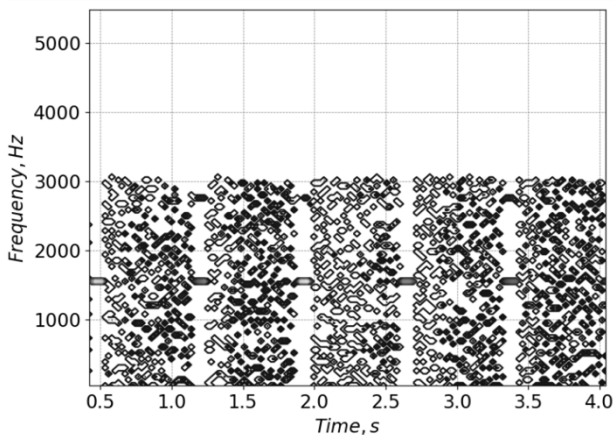
2. Під час глибоких завмирань, що характерно для КХ каналів, форма спектру OFDM сигналу може суттєво відрізнятись від прямокутної, що ускладнює їхню ідентифікацію. Тому як характерну ознаку таких сигналів доцільно використовувати їхню гребінчасту форму спектру (рис. 4б).

Використання таких ознак може забезпечити надійне виявлення сигналів OFDM модемів у разі швидкого сканування широких смуг частот.

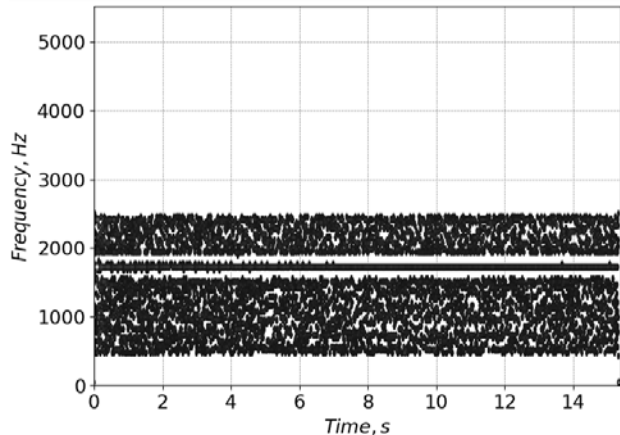
Для розпізнавання конкретного модема доцільно використовувати такі ознаки:

1. Структуру преамбули.

2. Значення основних параметрів: кількості каналів, ширини спектру, тривалостей інтервалу ортогональності, циклічного префікса.



а)



б)

Рис. 3. Спектрограма сигналу модемів PRC-16 (а) й Q-MAC (б)

Параметри сигналів OFDM-модемів

Тип модема	Значення параметра				
	Тип модуляції	Ширина смуги, кГц	Кількість несучих	Швидкість передачі даних, біт/с	Рознесення несучих, Гц
CIS-45	BPSK	2,95	45	1 800 (1 500)	62,5
CIS-60	DPSK-8	2,8	60	2 133,33	44,44
CIS-93	QPSK	3	93	2 046	31,25
CIS-112	DQPSK	2,9	112	2 488,64	25,6
CIS-128	QAM-16, PSK	3,1 (6,1)	128	2 688 (5376)	23,5 (47)
HFDVL	PSK, QAM-16, QAM-64	3	73	~8 000+	37,62
MIL-STD-188-110B	pi/4 DQPSK	2,4	39	75–2 400	56,25
Marconi Selenia 25-Tone	QPSK	1,6	25	2 400	60
PRC-16	PSK	2,2	16	1 200	110
Q-MAC	pi/4 DQPSK	2	30	2 586	54,1
STANAG 4197	QPSK	2,3	39	2 400	56
UK GOV MIL WINDRM51	QPSK, QAM	2,5	51	2 400	47,12
DRM	QAM	4,5; 5; 9; 10; 18; 20	88-460	7 100–7 2000	41,66-107,14
WinDRM	QAM-64	2,2-2,4	51	10 800	46,875
MT63	BPSK	0,5; 1; 2	64	640; 1 280; 2 560	7,81; 15,635; 31,25
Q15X25	QPSK	1,95; 2,35	15	1 000–5 000	125; 150
Robust PACKET	DBPSK, DQPSK	0,5	8	200–600	60

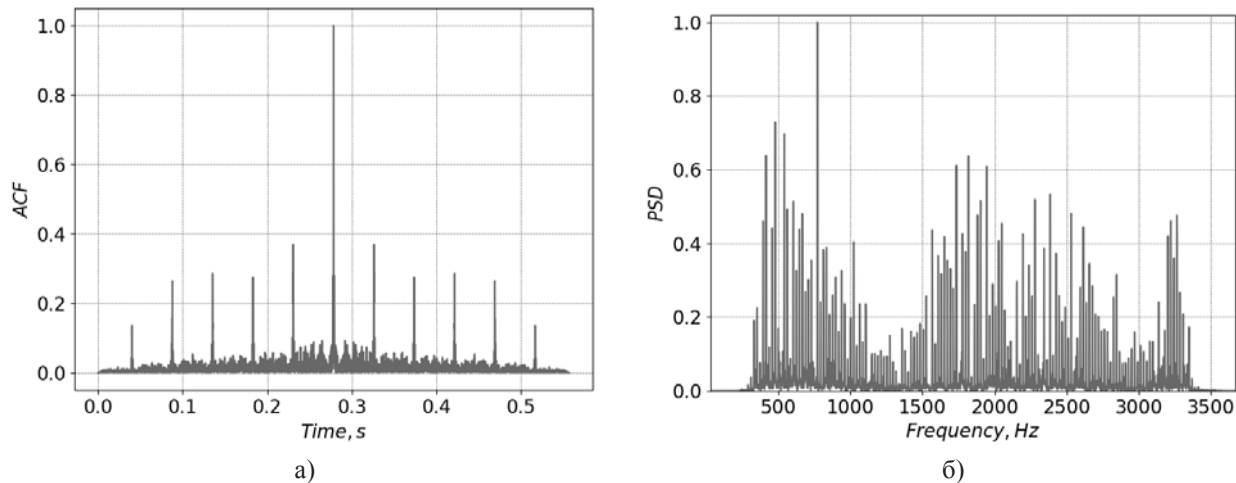


Рис. 4. Типова АКФ (а) й спектр (б) OFDM сигналу

3. Наявність і параметри немодульованої несучої.
4. Наявність нульової (віртуальної) несучої в спектрі.
5. Схему розміщення пілотних несучих.

**Висновки.** Сигнали OFDM-модемів КХ діапазону довжин хвиль суттєво відрізняються між собою за структурою преамбули, кількістю

частотних каналів, кількістю та схемою розміщення пілотних несучих, тривалістю захисного інтервалу. Під час розроблення автоматичних алгоритмів виявлення таких сигналів доцільно використовувати структурні особливості їхньої автокореляційної функції та спектральної щільності потужності.

## Список літератури:

1. Next Generation COFDM Microwave Links for Military Surveillance. Special Report. Global Business Media. 2013. 16 p.
2. Міщенко А.О., Шишацький А.В., Бондаренко Т.В., Бігун Н.В., Ляшенко Г.Т. Аналіз використання сучасних технологій радіозв'язку у збройних силах провідних країн світу. *Системи обробки інформації*. 2019. Вип. 4 (159). С. 50–57. DOI: 10.30748/soi.2019.159.06
3. Белокуров А.А., Кузниченко В.С., Рассомахин С.Г. Принципы и подходы к анализу параметров OFDM сигналов в системах автоматического радиомониторинга. *Обработка информации в складних технічних системах*. 2010. С. 55–59.
4. Vizziello A., Akyildiz I.F. et al. OFDM Signal Type Recognition and Adaptability Effects in Cognitive Radio Networks. *IEEE Globecom proc.* 2010. P. 1–5.
5. Sohn S.H., Han N., Kim J.M., Kim J.W. OFDM Signal Sensing Method Based on Cyclostationary Detection. *IEEE Xplore*. 2009. P. 1–6.
6. Liedtke F., Albers U. Evaluation of features for the automatic recognition of OFDM signals in monitoring or cognitive receivers. *Journal of Telecom. and Inf. Techn.* 2008. P. 30–36.
7. Fazel K., Kaiser S. Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 380 p.
8. High Frequency (HF). URL: <https://www.sigidwiki.com/wiki/Category:HF> (дата звернення: 14.08.2020)
9. HF utility / milcomm and signals. URL: <https://i56578-swl.blogspot.com/search/label> (дата звернення: 10.08.2020)
10. MIL-STD-188/110B. Department of defense interface standard: interoperability and performance standards for data modems (27-APR-2000).

#### **Buhaiov M.V. ANALYSIS OF HIGH FREQUENCY OFDM MODEMS SIGNALS IN INTEREST OF RADIOMONITORING**

*The article shows that in modern wireless standards of information transmission the use of OFDM technology is quite common, in particular for the organization of radio communication in the shortwave (HF) band. OFDM signals in comparison with other technologies have the following characteristics: the presence of a preamble, cyclic prefix, frequency channels and pilot carriers, which provides the necessary frequency and time synchronization and resistance to multipath propagation. Was analyzed features of radio signals of HF OFDM modems of civil and military purpose of family CIS, HFDVL, various protocols STANAG, Marconi Selenia, PRC-16, Q-MAC, WINDRM51, DRM, MT63, Robust PACKET. It is shown that for each standard the number of frequency channels and the layout of the pilot carriers, as well as the structure of the preamble and the duration of the cyclic prefix differ significantly. Due to diversity of OFDM signal structures and the values of their parameters, for radio monitoring systems as their characteristic and stable features at the stage of detection can be considered structural features of autocorrelation function (ACF) and spectra. ACF has bursts with significant amplitudes due to correlation of adjacent clock intervals. The use of such features will also allow to determine quite accurately the duration of the orthogonality interval and the layout of the pilot carriers. With deep fading, which is characteristic of HF channels, the shape of the OFDM signal spectrum can differ significantly from the rectangular, which complicates their identification. Therefore, as a characteristic feature of such signals, it is advisable to use their comb shape of the spectrum. The use of these features in the development of automatic algorithms for radio monitoring systems can provide reliable detection of OFDM modem signals during fast scanning of wide frequency bands.*

**Key words:** OFDM modem, signal structure, cyclic prefix, frequency channels, pilot carriers, modulation.