

УДК: 621.391:519.72(045)

Л. В. Сібрук, д-р техн. наук, проф.,
Д. П. Бондаренко, канд. техн. наук НАУ

РОЗРОБЛЕННЯ НОРМ ЧАСТОТНО-ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РОЗНЕСЕННЯ ЗАСОБІВ ЦИФРОВОГО РАДІОМОВЛЕННЯ І ТЕЛЕБАЧЕННЯ СТАНДАРТУ T-DAB І DVB-T ТА МАЛОКАНАЛЬНИМИ РАДІОРЕЛЕЙНИМИ СТАНЦІЯМИ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Розглянуто проблему електромагнітної сумісності засобів цифрового радіомовлення і телебачення, що планується впровадити, у діапазонах частот 174 – 230 МГц та 470 – 862 МГц з існуючими радіорелейними станціями R-409 та R-419. Розроблено проект норм частотно-територіального рознесення між засобами цифрового радіомовлення та радіорелейними станціями R-409, R-419 за допомогою створеного програмно-алгоритмічного забезпечення.

Ключові слова: частотно-територіальне рознесення, радіорелейна станція, DVB-T, OFDM.

Вступ. «Державну програму впровадження цифрового телерадіомовлення в Україні» затверджено Постановою Кабінету Міністрів України № 1085 від 26 листопада 2008 р. Програма спрямована на реалізацію положень, прийнятих Україною на регіональній конференції радіозв'язку MCE-P у Женеві в 2006 р, що передбачає перехід від аналогового до цифрового мовлення до 2015 р.

У країні необхідно створити інфраструктуру цифрового мовлення з гарантованим покриттям усієї території у смугах частот 174 – 230 МГц (третій телевізійний діапазон), 470 – 862 МГц (четвертий і п'ятий телевізійні діапазони). У третьому діапазоні передбачено аудіомовлення стандарту T-DAB сумісно з телевізійним стандарту DVB-T. У четвертому і п'ятому телевізійних діапазонах – тільки цифрове телевізійне мовлення.

Постановка завдання. Обов'язковим етапом отримання дозволу на мовлення є позитивне рішення щодо електромагнітної сумісності засобів цифрового мовлення з іншими радіоелектронними засобами (РЕЗ), серед них радіорелейні станції (РРС) R-409M, R-419A. Ефективним інструментом частотного планування є норми частотно-територіального рознесення, розроблення яких розглядається у роботі.

Побудова математичної моделі. Стандарти DVB-T, DVB-H базуються на алгоритмі кодування аудіо- та відеоінформації MPEG-2 чи MPEG-4, чим забезпечується [1; 2]:

- звуження смуги частот цифрового телевізійного сигналу, що дозволяє в одному каналі шириною 6 – 8 МГц передавати 4 і більше телевізійні канали;
- єдиний підхід до кодування та передавання телевізійних сигналів із різною чіткістю зображень;
- інтеграцію із сигналами систем іншого призначення під час передавання;
- захист від несанкціонованого доступу.

Стандарти DVB-T, DVB-H дозволяють організовувати одночастотну синхронну мережу SFN. У одночастотній мережі має забезпечуватись синхронізація функціонування передавачів за допомогою супутникових чи наземних каналів зв'язку. Символи, що випромінюються, мають бути ідентичними.

У стандарті DVB використовується модуляція COFDM (OFDM з попереднім кодуванням). Смуга відеосигналу 8, 7, 6 МГц передається за допомогою ортогональних піднесучих, частоти яких визначаються як

$$f_n(t) = \cos[2\pi(f_0 + n/\tau)t],$$

де f_0 – нижня частота діапазону; n – номер під несучої від 1 до N ; τ – часовий інтервал передачі одного символу.

Під час модуляції потік даних пакета розбивається на N частин, які модулюють несучі з меншою швидкістю. Зсув несучих за частотою

$$\Delta f_n = \frac{1}{\tau}.$$

Для збереження ортогональності та боротьби з «міжсимвольними» завадами, які можуть виникати і внаслідок багатопроменевого поширення, перед кожним символом вводять захисний інтервал зі значенням до $0,25\tau$.

З урахуванням ширини смуги 8 МГц, яка використовується в Європі, максимальна кількість несучих $8 \times 1024 = 8192$ або $8K$. Кожна несуча модулюється 4-позиційною квадратурною фазовою маніпуляцією ($QPSK$) або 16- або 64-позиційною квадратурною амплітудною маніпуляцією (QAM). Відповідно один модуляційний символ на несучій передає від двох до шести бітів.

Відповідно до кількості рівнів квадратурної модуляції потік даних розбивається на: 2 субпотоки для $QPSK$, 4 субпотоки для 16- QAM . Тому під час демультимплексування перший біт виявляється у першому субпотокі і т. д. Зміст внутрішнього перемежування полягає у перестановці за певним окремим правилом у кожному субпотокі бітів блока довжиною 126 бітів. На паралельних виходах блока внутрішнього перемежування формується модуляційний символ з двох, чотирьох чи шести розрядів. На одній несучій передається один символ. Тому в режимі $8K$ одночасно передаються 48 груп по 126 символів, що складає 6048 несучих з корисною інформацією, або $12 \times 126 = 1512$ несучих у режимі $2K$. QAM символи поділяються в різні субканали $OFDM$ перемежування, що дозволяє поновити інформацію у разі втрати певного $OFDM$ символу.

Загальний сигнал $OFDM$ символу [3]

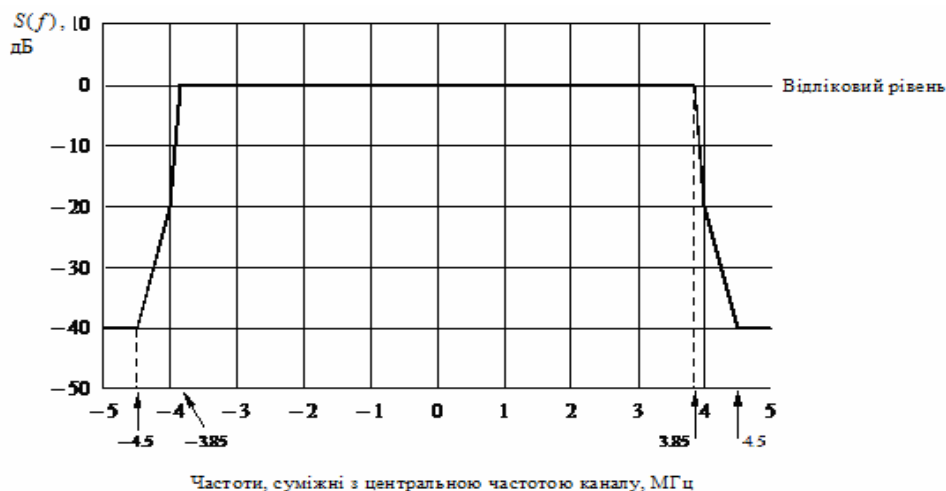
$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k(nT) e^{i2\pi k n T / n}, \quad (1)$$

де T – тривалість дискретного інтервалу часу; n – номер відліку.

Вираз (1) ідентичний оберненому перетворенню Фур'є при інтервалі дискретизації, що дорівнює відношенню тривалості передачі одного символу до кількості несучих.

Випромінений DVB -сигнал є шумоподібним з гаусівським розподілом. Спектр сигналу складається з великої кількості парціальних спектрів модульованих несучих. Тому спектр є майже суцільним.

Частотні маски радіовипромінювання $DVB-T$ показано на рисунку [4].



Частотна маска радіовипромінювання цифрового телебачення з шириною спектра 8 МГц

Типова антенна система фірми *ELTI* будується на секторних антенах *TVA 31/50* або *TVA 24/50*, які мають подібну конструкцію і відрізняються кількістю випромінювачів (відповідно 4 і 2). *TVA 24/50* може випромінювати хвилі з горизонтальною чи вертикальною поляризацією (залежно від просторового положення), має робочий діапазон 470 – 862 МГц, коефіцієнт напрямленої дії 6,8 – 9 дБ (відносно до півхвильового симетричного вібратора), ширину діаграми напрямленості в *E* та *H* площинах $2\theta_{0,5}^E = 56^\circ$, $2\theta_{0,5}^H = 49^\circ$.

У разі розміщення чотирьох антен *TVA 31/50* або *TVA 24/50* в горизонтальній площині формується діаграма напрямленості, яку можна вважати ізотропною в цій площині. Для отримання більшої напрямленості у вертикальній площині з антен *TVA 31/50* або *TVA 24/50* утворюють антенні решітки з кількістю антенних стійок від 1 до 16. Із цих антен можна утворити конструкції, що випромінюють не тільки в межах азимутального кута $\varphi = 0 \dots 360^\circ$, але і $\varphi = 0 \dots 90^\circ$, $\varphi = 0 \dots 180^\circ$, $\varphi = 0 \dots 270^\circ$.

Параметри антенних систем на основі *TVA 31/50* наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри антенних систем стандарту *DBV-T/H* на основі випромінювачів *TVA 31/50* з горизонтальною поляризацією

Параметр	Кількість антенних стійок у вертикальній площині за ненапрявленого випромінювання у горизонтальній площині				
	1	2	4	6	8
Кількість випромінювачів <i>TVA 31/50</i>	4	8	16	24	32
Максимальна вхідна потужність, кВт (аналоговий сигнал)	10	20	40	60	80
Максимальна вхідна потужність, кВт (цифровий сигнал)	8	16	32	48	64
Коефіцієнт підсилення на частоті 665 МГц відносно до півхвильового симетричного вібратора, дБ	4,87	7,88	10,89	12,65	13,9
Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою у широкому діапазоні	$\leq 1,12$	$\leq 1,12$	$\leq 1,12$	$\leq 1,12$	$\leq 1,12$
Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою у робочому каналі	$\leq 1,05$	$\leq 1,05$	$\leq 1,05$	$\leq 1,05$	$\leq 1,05$

Наведемо параметри та характеристики Р-409, Р-419, які можна знайти в мережі Інтернет [5 – 10].

Радіорелейні станції Р-409, Р-419 належать до малоканалних станцій, призначених для побудови радіорелейних ліній зв'язку та виконання деяких інших функцій. Існують такі модифікації РРС Р-419: Р-419А – з новою транспортною базою, Р-419БР – без транспортної бази, Р-419М(МС, МС1) – цифрова РРС.

Р-409 має три частотні діапазони, а Р-419 – чотири. Перехід з одного піддіапазону на інший у Р-409 реалізується шляхом заміни антен та змінних елементів приймально-передавального тракту. У Р-419 в третьому і четвертому піддіапазонах використовується одна антена.

Основні характеристики і параметри Р-409 наведено у табл. 2, а Р-419А – у табл. 3.

Таблиця 2

Основні характеристики і параметри Р-409

Показник	Значення показника
Смуга частот (випромінювання), МГц	60 – 480
Піддіапазон А: смуга частот, МГц	60 – 120
кількість фіксованих частот	601
інтервал між сусідніми фіксованими частотами, кГц	100
протяжність радіорелейної лінії при трьох ретрансляторах, км	150
тип антени	Логоперіодична
кількість телефонних каналів	3 + 1 службовий
Піддіапазон Б: смуга частот, МГц	120 – 240
кількість фіксованих частот	300
інтервал між сусідніми фіксованими частотами, кГц	400
протяжність радіорелейної лінії при 6 – 8 ретрансляторах, км	250
тип антени	Двоелементна Z-подібна з рефлектором
кількість телефонних каналів	6 + 1 службовий
Піддіапазон В: смуга частот, МГц	240 – 480
кількість фіксованих частот	300
інтервал між сусідніми фіксованими частотами, кГц	800
протяжність радіорелейної лінії при 6 – 8 ретрансляторах, км	250
тип антени	Двоелементна Z-подібна з рефлектором
кількість телефонних каналів	6 + 1 службовий

Таблиця 3

Основні характеристики і параметри Р-419А

Показник	Значення показника
Смуга частот (випромінювання), МГц	160 – 645
Піддіапазон 2: смуга частот, МГц	160 – 240
тип антени	Двоелементна Z-подібна з рефлектором
Піддіапазон 3: смуга частот, МГц	240 – 320
тип антени	Двоелементна Z-подібна з рефлектором
Піддіапазон 4: смуга частот, МГц	320 – 480
тип антени	Чотириелементна Z-подібна з рефлектором

Продовження табл. 3

Показник	Значення показника
Піддіапазон 5: смуга частот, МГц	480 – 645
тип антени	Чотириелементна Z- подібна з рефлектором
Протяжність радіорелейної лінії у діапазоні 160 – 645 МГц при 6 телефонних каналах, км	300 (6 – 8 інтервалів)
Протяжність радіорелейної лінії у діапазоні 240 – 645 МГц при 12 телефонних каналах, км	75 (2 інтервали)

Шляхом повороту антени на 90° поляризація змінюється на горизонтальну. Розподіл струму живлення в чотириелементній антені є синфазним. Тому напруженість поля випромінювання у напрямку максимального випромінювання в E - та H -площинах збільшується до двох разів порівняно з одноелементною антеною. За умови узгодження вхідного опору з фідером коефіцієнт перекриття за діапазоном досягає двох. Були збудовані обмежувальні лінії діаграм напрямленості антен РРС. Рівняння обмежувальних ліній ДС Z-подібної антени з екраном в E -площині на частоті 180 МГц наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Рівняння обмежувальних ліній діаграми напрямленості Z-подібної антени з екраном в E -площині на частоті 180 МГц

Сектор, град	Рівняння	Сектор, град.	Рівняння
0 – 15	$F(\theta) = 1$	0 – -15	$F(\theta) = 1$
15 – 35	$F(\theta) = -0,0275\theta + 1,4125$	-15 – -35	$F(\theta) = 0,0275\theta + 1,4125$
35 – 78	$F(\theta) = 0,45$	-35 – -78	$F(\theta) = 0,45$
78 – 110	$F(\theta) = -0,00895\theta + 1,148$	-78 – -110	$F(\theta) = 0,00895\theta + 1,148$
110 – 156	$F(\theta) = 0,11$	-110 – -156	$F(\theta) = 0,11$
156 – 180	$F(\theta) = 0,01 + 1,45$	-156 – -180	$F(\theta) = -0,01 + 1,45$

Докладно процедури оцінки ЕМС РЕЗ розглянуто у праці [11].

На основі даних табл. 1 – 4 було розроблено програмне забезпечення для розрахунку норм частотно-територіального рознесення. Норми частотно-територіального рознесення призначено для використання під час частотного планування мереж цифрового телевізійного мовлення стандартів $DVB-T$, $DVB-H$ та вибору місць розміщення передавачів для забезпечення електромагнітної сумісності з РРС Р-409, Р-419.

Проект норм частотно-територіального рознесення подано у вигляді таблиць, у яких містяться дані для врахування різних варіантів функціонування РЕЗ. Таблиці відповідають трьом випадкам взаємної орієнтації антен мовлення і РРС у напрямку максимумів діаграм напрямленості:

- обох антен (головна-головна);
- антени $DVB-T$ – максимум першої бічної пелюстки антени РРС (головна-перша бічна);
- у напрямі максимум діаграми напрямленості антени $DVB-T$ – максимум задньої і бічних пелюсток антени РРС (головна-задня).

У таблицях наведено значення вихідної потужності передавача, а не ефективної ізотропно випромінюваної потужності, оскільки саме вихідна потужність зазначається в технічній документації передавача. Передбачається, що вся потужність за винятком втрат у

фідері ($L_0 = -1,5$ дБ) подається на затискачі антени відповідного сектора у напрямку антени РРС.

Під час визначення норм частотно-територіального рознесення використовувалося значення коефіцієнта підсилення антени передавача $DVB-T$ $G_0 = 10,89$ дБд (відносно до півхвильового симетричного вібратора).

Коефіцієнт підсилення антени зв'язаний з коефіцієнтом напрямленої дії D через коефіцієнт корисної дії η_A : $G = D\eta_A$.

Для півхвильового симетричного вібратора $D = 1,64$. Типове значення коефіцієнта корисної дії антени в діапазоні, що розглядається, $\eta_A = 0,95$. Тоді $G_{\lambda/2} \approx 1,6$.

Приклад з проекту норм частотно-територіального рознесення наведено у табл. 5.

Таблиця 5

**Норми частотно-територіального рознесення радіорелейної станції Р-409М(МА)
та засобів цифрового телевізійного мовлення стандарту $DVB-T$**

Умови визначення норм ЧТР	Вихідна потужність передавача системи $DVB-T$, Вт											
	10		50		100		400		1200		5000	
Частота випромінювання $f =$ $= 470 - 480$ МГц	$D^{(1)}$, км	$\Delta f^{(2)}$, МГц	$D^{(1)}$, км	$\Delta f^{(2)}$, МГц	$D^{(1)}$, км	$\Delta f^{(2)}$, МГц	$D^{(1)}$, км	$\Delta f^{(2)}$, МГц	$D^{(1)}$, км	$\Delta f^{(2)}$, МГц	$D^{(1)}$, км	$\Delta f^{(2)}$, МГц
Орієнтація антен ПРМ- ПРД: головна-головна	9,5	0	16,4	0	20,6	0	28,8	0	36,6	0	48,3	0
	9,5	3,7	16,4	3,7	20,5	3,7	28,8	3,7	36,6	3,7	48,3	3,7
	8,7	3,8	15,1	3,8	19,1	3,8	27,2	3,8	34,7	3,8	46,1	3,8
Висота підвісу антени ПРД завади ($DVB-T$): 250м	6,3	3,9	10,8	3,9	13,7	3,9	21,4	3,9	28,1	3,9	38,2	3,9
	3,2	4,0	5,5	4,0	7	4,0	11,1	4,0	16,2	4,0	24,5	4,0
	0,7	4,1	1,1	4,1	1,4	4,1	2,2	4,1	3,2	4,1	5,2	4,1
	0	4,2	0	4,2	0	4,2	0,6	4,2	0,9	4,2	1,5	4,2
Висота підвісу антени ПРМ РРС: 19,5м	0	4,3	0	4,3	0	4,3	0	4,3	0,7	4,3	1,1	4,3
	0	4,4	0	4,4	0	4,4	0	4,4	0	4,4	0,7	4,4
	0	4,5	0	4,5	0	4,5	0	4,5	0	4,5	0	4,5
	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6
	0	4,7	0	4,7	0	4,7	0	4,7	0	4,7	0	4,7

У табл. 5: D – рознесення за відстанню.; Δf – рознесення за частотою; ЧТР – частотно-територіальне рознесення; ПРМ – радіоприймач; ПРД – радіопередавач.

Висновок. Отримані дані для розв'язання проблеми електромагнітної сумісності засобів цифрового радіомовлення та телебачення у діапазонах частот 174 – 230 МГц та 470 – 862 МГц з існуючими РРС Р-409 та Р-419.

Список літератури

1. Довідник з радіомоніторингу / під ред. П. В. Слободянюка. – Ніжин: ТОВ «Видавництво Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.
2. ETSI TR101 190: 2004 Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects.

3. Вишнеvский В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишнеvский, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Recommendation ITU-R BT.1206. Spectrum shaping limits for Digital Television Broadcasting.
5. www.interpolitex.rasu.ru/index.php.
6. www.radioscanner.ru/photo/antennas/relay.php
7. vkmtuci.edu.mhost.ru/textba/rrlspravka.htm
8. www.omskindustry.ru/firm.asp?skl=7579
9. www.techorg.ru/firm.asp?skl=7579
10. www.mcfobos.ru/content/protokol.html
11. Иванов В. О. Алгоритм розрахунку норм частотно-територіального рознесення радіоелектронних засобів / В. О. Іванов, М. В. Решетнік, Д. П. Бондаренко – К.: Вісник ДУІКТ. – 2007. – Т.5(3). – С. 262 – 270.

Л. В. Сибрук, Д. П. Бондаренко

Разработка норм частотно-территориального разнесения средств цифрового радиовещания и телевидения стандарта T-DAB и DVB-T с малоканальными радиорелейными станциями

Рассмотрена проблема электромагнитной совместимости средств цифрового радиовещания и телевидения, которые планируется внедрить в диапазонах частот 174 – 230 МГц и 470 – 862 МГц с существующими радиорелейными станциями Р-409 и Р-419. Разработан проект норм частотно-территориального разнесения между средствами цифрового радиовещания и радиорелейными станциями Р-409, Р-419 с помощью созданного программно-алгоритмического обеспечения.

L. V. Sibruk, D. P. Bondarenko

The development of norms of frequency-territorial separation of digital broadcasting and television of standard T-DAB and DVB-T with thin-route radio relay stations

The paper addresses the problem of electromagnetic compatibility of digital broadcasting and television, which is planned for the frequency bands 174 – 230 MHz and 470 – 862 MHz with existing radio relay stations P-409 and P-419. Drafting standards of frequency-territorial separation between the means of digital broadcasting and radio relay stations P-409, P-419 were developed with established software.