

# ЕФЕКТИВНЕ КОРИСТУВАННЯ СПЕКТРОМ ЧЕРЕЗ ІНСТРУМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ НЕЙТРАЛЬНОСТІ

Корсун В.І., Тичинський А.В.

Український державний центр радіочастот (УДЦР),  
Україна

E-mail: korsun@ucrf.gov.ua,  
tychinskij@ucrf.gov.ua

---

## Abstract

*Spectrum is a scarce resource and the major objective in using spectrum is efficiency. With each generation of mobile communications technology evolution, spectral efficiency improves. To achieve the objective of efficient use of spectrum, ideally the latest technology should be put into use as soon as it is available. Technology neutrality is widely used in frequency bands, where communication systems are evolving, but there are hard restrictions on the parameters and deployment for base stations of different technologies using adjacent channels. The purpose of conducted study is to investigate the methodology of technology neutrality with MCL method in order to determine the value of additional filtering requirements and to implement this technique in practical case. The article presents the results of obtaining and practical implementation of minimal guard band and additional filtering requirements in the adjacent channels of transmitter and receiver belonging to different technologies.*

---

Різноманітність і швидкісний розвиток сучасних мобільних технологій призвели до дефіциту ресурсу радіочастотного спектру. Ті ж самі смуги частот можуть використовуватися традиційними технологіями різних поколінь, з різною шириною каналу, потужністю випромінювання, дуплексним режимом FDD (Frequency Division Duplex) або TDD (Time Division Duplex), різними антенами, включаючи масивні MIMO та AAS (Active Antenna Systems) технології 5G. Враховуючи різні національні розподіли спектру, це призводить до значних обмежень щодо впровадження нових технологій, таких як надмірна захисна смуга частот між суміжними каналами двох різних технологій, обмеження на потужність випромінювання і розгортання базових станцій (BS) у зоні покриття та у прикордонній зоні тощо. Тому, визначені смуги частот, які підпадають під концепцію технологічної нейтральності (TN) або політики бездротового доступу для електронних комунікаційних послуг (WAPECS) [1], є узгодженими (гармонізованими) на регіональному рівні в рамках Європейської конференції поштових і телекомунікаційних адміністрацій (CEPT) шляхом розробки найменш обмежувальних технічних умов LRTC (Least Restrictive Technical Conditions). Завдяки LRTC можна подолати значну кількість обмежень у процесі еволюції технології, що відбувається в певних смугах частот. Існує декілька характеристик і параметрів, якими визначаються LRTC. Основною з них є маска краю блоку ліцензування BEM (Block Edge Mask). BEM повністю описує будь-які обмеження щодо потужності, що випромінюється антеною базової станції (BS) поза та всередині ліцензованого блоку залежно від того, яка технологія використовується в суміжному каналі. Справжня мета TN полягає в тому, щоб дозволити операторам мобільного зв'язку замінити старе обладнання в частотному діапазоні обладнанням новішого стандарту для переходу від 2G до 3G або від 3G до 4G або 5G. Цей процес також називають перетворенням (refarming) спектру. Однак у випадках суттєвих відмінностей у національних розподілах частот для більшості випадків суперечливих частотних планів для систем зв'язку в суміжних смугах частот, таких як FDD-TDD, існує потреба в узгодженні (координації) розташування BS для різних систем зв'язку в спільній зоні обслуговування. Необхідна відстань рознесення BS у таких випадках може сягати кількох кілометрів. Інший спосіб отримати сумісність базових станцій у загальній зоні – це забезпечити достатню захисну смугу частот, яка може сягати подвійної ширини широкосмугового каналу. Внаслідок цього спектр використовується неефективно. Водночас впровадження нових характеристик обладнання дозволяє розгорнути BS навіть на відстані, обмеженій

розміром загального майданчика (сайту), без узгодження між операторами, але з подальшим узгодженням просторових характеристик антен безпосередньо на майданчику для досягнення необхідної ізоляції між приймачем і передавачем відповідних BS. Основною складністю вирішення цього завдання є практична реалізація заданих для фільтрів характеристик, які є значно крутими через жорсткі вимоги до придушення перешкод. Тому метою проведеного дослідження було розробити теоретичний підхід для отримання технічних умов для додаткової фільтрації шляхом визначення значення захисної смуги частот між суміжними каналами різних технологій зв'язку за допомогою методу мінімальних втрат сполучення MCL (Minimum Coupling Loss). Визначена таким чином захисна смуга є недостатньою для необхідної ізоляції між BS, розташованими на коротких відстанях, але вже є достатньою для практичного наближення характеристик, необхідних для додаткових фільтрів. Технічні умови LRTC визначаються шляхом виконання аналізу сумісності для мереж і систем у певному діапазоні частот із використанням параметрів мереж і систем, очікуваних у діапазоні, та за відсутності перешкоди за певним критерієм сумісності. Якщо система відповідає вимогам LRTC за певним критерієм сумісності, то, незалежно від технології, вона відповідає умовам концепції TN.

Метод MCL є найвідомішою та найпоширенішою моделлю у дослідженні сумісності між різними системами з використанням параметрів сумісності, таких як коефіцієнт витоку по сусідньому каналу (ACLR) передавача та вибірковість по сусідньому каналу (ACS) приймача. Ці параметри разом визначають коефіцієнт перешкоди суміжного каналу (ACIR) і співвідносяться як [1] (у лінійних значеннях):

$$ACIR^{-1} = ACLR^{-1} + ACS^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{де: } ACIR = P_{ADJ} / P_{IALLOW}, \quad (2)$$

$P_{ADJ}$  - потужність перешкоди від суміжного каналу передавача, визначена на вході приймача;

$P_{IALLOW}$  - допустима (permissible) або «чутлива» (sensitive) потужність перешкоди на вході приймача;

$$ACLR = P_{EIRP} / P_{OOBE}, \quad (3)$$

де:  $P_{EIRP}$  - еквівалентна (ефективна) ізотропно випромінювана потужність передавача (EIRP);

$P_{OOBE}$  - потужність позасмугового випромінювання OOBE (Out of Band Emission) у суміжному каналі передавача;

$$ACS = P_{IBL} / P_{IALLOW}, \quad (4)$$

де:  $P_{IBL}$  - потужність завади блокування на вході приймача.

Значення ACIR показує необхідний ступінь ізоляції між передавачем і приймачем двох BS, що

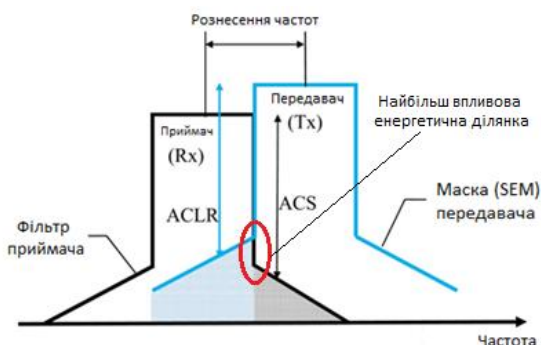


Рис.1 Фізичний зміст параметрів ACLR і ACS [3]

відносяться до різних систем і працюють в суміжних діапазонах частот, коли через недосконалу фільтрацію в каналах передавача і приймача (рис. 1) виникає можливість впливати один на одного. Основним чинником цього ефекту потужності є значення частотного рознесення або захисної смуги між каналами передавача та приймача. Саме тому завданням дослідження є визначення такої захисної смуги, щоб у подальшому дослідженні стало можливим «сполучити» або адаптувати одну систему до іншої практичним шляхом. Розрахунок необхідного ACIR виконувався за формулою (2) через стандартизовані параметри передавача Tx і приймача Rx для реального практичного випадку, що

виник при визначенні умов сумісності між зв'язку і низхідним каналом DL (downlink) діючого широкопозасмугового бездротового доступу (BWA) OFDMA навколо частоти 1980 МГц. Оскільки ефективне придушення перешкод у суміжному каналі визначається поєднанням двох параметрів ACLR і ACS, відповідно, то рівність цих параметрів можна вважати справедливою вимогою з метою встановлення однакових вимог до обладнання та відповідальності операторів обох систем. Таке припущення дозволяє визначити необхідні значення ACLR і ACS з формули (1). До-

сліджуваний приклад методу MCL стосується сценарію взаємодії BS-BS, у якому потужність передачі є високою, а відповідні антени мають високе посилення та знаходяться в радіусі дії одна одної, коли умови розповсюдження радіохвиль наближаються до умов вільного простору. Це, очевидно, стосується макростільникових BS. На початку дослідження необхідна захисна смуга не була визначена. Як і в попередніх подібних сценаріях впливу завад [1], [2] за критерій погіршення чутливості було прийнято збільшення потужності шуму  $P_N$  на 1 дБ. Значення інших параметрів BS за сценарієм перешкод визначаються за даними діючих стандартів. Результати розрахунків представлені на рис. 2 для відстаней між BS  $d = 100$  і  $30$  м.

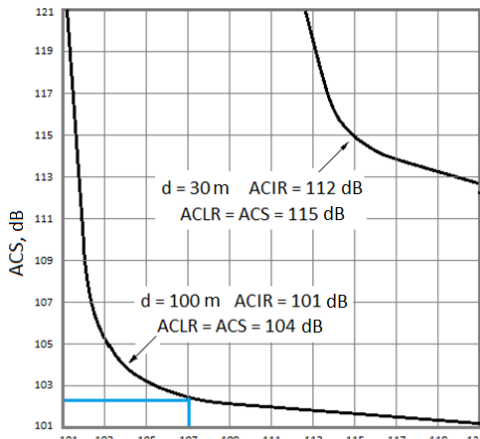


Рис. 2 Залежність ACIR від ACLR BWA і ACS UMTS

могами стандарту для BWA, а також визначити можливі технічні рішення для практичної реалізації таких вимог. Для цього необхідне значення ACIR доцільно дослідити поетапно за наступними складовими: 1. Зона перекриття (рис.1) діючої спектральної маски випромінювання SEM (Spectrum Emission Mask) передавача та частотної характеристики FR (Frequency Response) приймача з метою визначення мінімальної захисної смуги; 2. Частотні характеристики передавача і приймача, оновлені за умови мінімальної захисної смуги та мінімальної відстані рознесення між антенами BS; 3. Просторове рознесення між антенами на спільному майданчику з метою мінімізації залишків перешкод.

Межі потужності небажаного випромінювання для BS BWA оцінюються за стандартом IMT / LTE [4]. Графічне представлення лівого краю SEM для сигналу BS BWA (LTE / OFDMA) і зайнятої смуги частот  $4,2$  МГц для BS UMTS показано на рис. 3. Для оцінки впливу частотного зсуву між каналами UMTS і BWA на  $P_{\text{OoBE}}$  BWA в суміжній смузі каналу UMTS і, відповідно, значення ACLR, SEM BWA можна умовно перемістити вправо (пунктирна лінія на рис. 3) від краю каналу UMTS, а потім потрібно перерахувати  $P_{\text{OoBE}}$ . Значне зниження  $P_{\text{OoBE}}$  досягається віддаленням ділянок А і В, які забезпечують зниження рівня  $P_{\text{OoBE}}$  з максимальною крутизною, за меж і зайнятої смуги UMTS, тобто з додатковим зсувом між каналами не менше  $1$  МГц (рис. 4). Це дозволяє зробити висновок про необхідну мінімальну захисну смугу для забезпечення значного зменшення впливу  $P_{\text{OoBE}}$  та знизити вимогу до крутизни частотної характеристики додаткового фільтра передавача. З рис. 4 випливає, що мінімальна, необхідна для вирішення завдання дослідження, захисна смуга між краями зайнятих діапазонів UMTS і BWA ( $\Delta f_{T-R}$ ) становить  $2,05$  МГц.

Це та захисна смуга, яка забезпечує практично досягну крутизну частотної характеристики для додаткового фільтра для передавача BS BWA за умови пом'якшених вимог до узгодження між операторами просторових параметрів антен UMTS і BS BWA. За умови додаткового узгодження між операторами захисна смуга в діапазоні  $1,5 - 2,05$  МГц (позначена сірим фоном) також може вважатися практично придатною.

Реальні передавачі та приймачі мають власні значення ACLR та ACS, визначені гармонізованими стандартами, і не можуть бути гіршими за стандартизовані значення. Але ці ACLR і ACS визначаються вимогами міжканальної сумісності в мережах єдиної стандартної системи зв'язку. Різниця між розрахованим і стандартизованим ACLR і ACS показує, наскільки ACLR і ACS реального обладнання потребують покращення шляхом додаткової фільтрації для того, щоб зменшити перешкоди та вимоги до взаємної координації місць розташування BS. За формулою (3) отримано необхідний рівень  $P_{\text{OoBE}}$  або базовий рівень випромінювання передавача в суміжному каналі на відстані  $100$  м ( $-43$  дБм /  $5$  МГц) і  $30$  м ( $-54$  дБм /  $5$  МГц).

Отримані значення  $P_{\text{OoBE}}$  для BWA дають можливість оцінити вимоги для додаткового придушення позасмугового випромінювання порівняно з рівнем  $P_{\text{OoBE}}$ , визначеним ви-

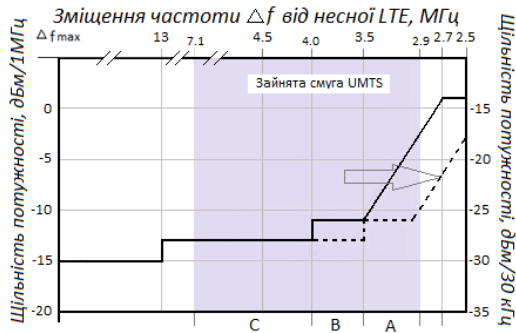


Рис.3 Лівий край SEM ( $f \leq 1980$  MHz) каналу передавача BS BWA

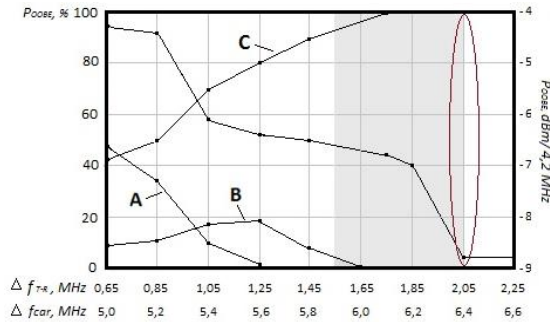


Рис.4 Залежність  $P_{OOBE}$  BS BWA всередині каналу UMTS від захисного інтервалу ( $\Delta f_{T-R}$ ) і рознесення несних ( $\Delta f_{car}$ )

Вочевидь, що для оцінки практичних вимог необхідно використовувати дані SEM, отримані від виробленого обладнання, а до самої маски повинні пред'являтися специфічні вимоги до крутизни частотної характеристики для фільтра передавача, що дозволило би реалізувати мінімальне рознесення між сусідніми каналами  $\Delta f_{T-R}$ , наприклад, 1,5 МГц (загальний захисний інтервал  $2 \times 0,75$  МГц, якщо існують однакові вимоги до захисних інтервалів 0,75 МГц в каналах UMTS і BWA), для отримання рівня  $P_{OOBE}$  не більше - 42,2 дБм ( $d = 100$  м) і - 53,2 дБм ( $d = 30$  м) у зайнятій смузі UMTS у 4,2 МГц. Практична реалізація мінімального рознесення між каналами UMTS і BWA має відбуватися в межах стандартних частотних планів для цих технологій, щоб не змінювати загальну ліцензовану смугу частот для кожної технології та можлива одночасно у двох напрямках:

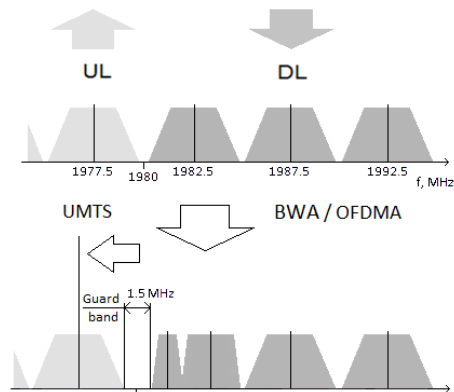


Рис. 5 Новий план для несних UMTS і гібридної технології BWA (MSR і OFDMA) для утворення захисної смуги

каналі UMTS з ліцензійного блоку шириною у 15 МГц забезпечує збільшення загального захисного інтервалу до 300 кГц. Таким чином, сумарний захисний інтервал від правого краю зайнятої смуги суміжного каналу UMTS до частоти 1980 МГц становитиме 0,7 МГц (рис. 5). Рис. 5 пояснює випадок практично реалізованих частотних планів для гібридної технології BWA зі зміною конфігурації несних BWA та UMTS для збільшення захисної смуги між каналами BWA та UMTS до 1,5 МГц. Результати вимірювання АЧХ фільтра для гібридної технології BWA BS показали, що АЧХ фільтра має загасання в контрольних точках 1974 і 1978,2 МГц, відповідно -57,93 дБ і -52,63 дБ, що задовольняє вимоги щодо просторового рознесення у 100 і 30 м і забезпечує рівень  $P_{OOBE}$  не більше - 42,2 дБм і - 53,2 дБм смузі пропускання 4,2 МГц, відповідно.

Проте, якщо ACLR визначається параметрами передавача (потужність передавача та потужність OOBE), які можна виміряти безпосередньо на передавачі, то рівень сигналу перешкод із сусіднього каналу передавача для визначення ACS неможливо виміряти, оскільки фільтрація перешкод відбувається всередині приймача. Тому стандарти 3GPP роблять припущення про високий рівень перешкод на вході приймача, наприклад, рівень блокування приймача, і відповідне погіршення чутливості приймача через такі перешкоди. Так, згідно з [5], селективність по суміжному каналу є мірою здатності приймача обробляти корисний сигнал, одночасно придушуючи сигнал сильної перешкоди в суміжному частотному каналі.

Необхідне додаткове придушення на вході приймача UMTS визначається як різниця між ACS, необхідним для придушення перешкоди від суміжного каналу на короткій відстані (30 м) і стандартним або реальним ACS. Необхідний ACS визначається за формулою (4) де потужність блокування завад на вході приймача  $P_{IBL}$  і допустима (дозволена) потужність завади на вході приймач  $P_{IALLOW}$  можуть бути визначеними, у цьому випадку, зі стандартних даних за погіршенням чутливості через вплив завади блокування та інтермодуляційної завади від передавача BWA. Необхідне додаткове придушення було визначено на рівні 55,6 і 51,1 дБ/5 МГц для завади блокування та інтермодуляційної завади, відповідно.

АЧХ модернізованого нижнього фільтра дуплекера UMTS BS представлено на рис. 6. Критичні вимоги до частотної характеристики полягали в отриманні мінімальних втрат у спектрі UMTS, коли несуча каналу віднесена на 300 кГц нижче номінального значення, що відповідає правому краю зайнятої смуги каналу UMTS 1979,3 МГц. Також необхідно було забезпечити максимальне придушення на частоті 1980,75 МГц, що відповідає лівому краю зайнятої смуги каналу BWA, при застосуванні зміни конфігурації несних частот BWA та використання мультистандартної BWA BS. Ослаблення фільтра на частотах 1979,3 і 1980,75 МГц становить -3,6 і -30 дБ, відповідно.

При спільному використанні майданчика (сайту) додаткові заходи щодо координації просторових параметрів антен можна передбачити шляхом проведення попередніх розрахунків для визначення ізоляції між антенами відповідно до схеми розташування BS та фактичного коефіцієнта підсилення антен. Відповідно до досліджень 3GPP TS RAN 25.942 V11.0.0 (i.10.1 Antenna-to-Antenna Isolation) антени BS, розміщені/плановані до розташування операторами на майданчиках/дахах будівель, можуть розташовуватися на віддалених ділянках поруч одна з одною, а ізоляцію, яка виникає між антенами, можна проаналізувати за допомогою звичайного рівняння передачі Харальда Фрііса.

У загальному випадку одночасно діють як перешкоди від позасмугового випромінювання передавача, так і перешкоди через недосконалу

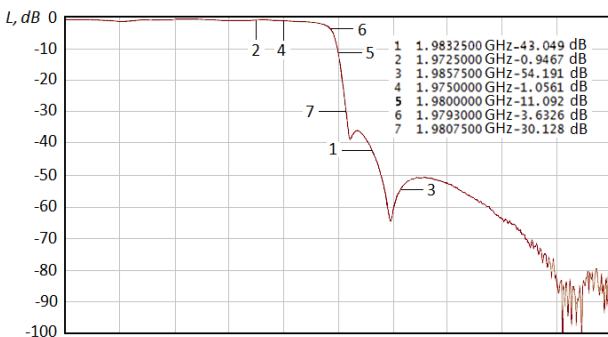


Рис.6 Частотна характеристика модернізованого нижнього фільтра дуплекера BS UMTS

вибірковість приймача, що відповідає реальній ситуації при плануванні мереж. Однак, щоб спростити теоретичну оцінку вимог до фільтрації, кожен вплив перешкод розглядається окремо. Подібним чином, коли оператори координують розташування BS для цілей розрахунку, потужність перешкод різного походження також виконується окремо, які потім підлягають сумуванню.

## Висновки

Застосування інструментів технологічної нейтральності при впровадженні нових систем для діючих частотних планів дозволяє вирішити питання ефективного користування спектром. Модель LRTC на основі методу MCL з параметрами сумісності ACIR, ACLR і ACS надають можливість розробляти вимоги до додаткової фільтрації в суміжних каналах передавача і приймача різних технологій.

Запропонована методологія підтверджує можливість пом'якшення вимог до додаткової фільтрації шляхом впровадження мінімальної захисної смуги між краями зайнятих смуг і модернізації частотних характеристик для технологій у суміжних каналах. В цілому, перевірка практичних характеристик додаткової фільтрації підтвердила можливість забезпечення сумісності між BS різних технологій із застосуванням додаткових заходів щодо просторової координації антен в межах загального сайту. Результати дослідження пропонується покласти в основу загального методу визначення нормативно-технічних умов ефективного використання спектру на основі інструментів технологічної нейтральності та можуть бути використані для отримання операторами прав на використання спектру у випадку, коли вибір систем зв'язку, що працюватимуть у суміжних смугах частот, вже зроблено, але умови сумісності ще не визначені.



## Література

1. Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to develop least restrictive technical conditions for frequency bands addressed in the context of WAPECS CEPT Report 19, October 2008, pp. 3-92. Available: [https://docdb.cept.org/document/category/CEPT\\_Reports](https://docdb.cept.org/document/category/CEPT_Reports)
2. Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to develop least restrictive technical conditions for 2 GHz bands, CEPT Report 39, June 2010, pp.2-61. Available: [https://docdb.cept.org/document/category/CEPT\\_Reports](https://docdb.cept.org/document/category/CEPT_Reports)
3. Erik Dahlman, Stefan Parkvall and Johan Sköld, “22.9.3 Adjacent Channel Leakage Ratio” in 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G (Third Edition), 2016, pp. 487-526. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/adjacent-channel-interference>
4. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception, 3GPP Technical Specification TS 36.104 version 11.2.0 Release 11, ETSI Technical Specification TS 136 104 V11.2.0, 2012-11
5. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD), 3GPP Technical Specification TS 25.104 version 8.2.0 Release 8, ETSI Technical Specification TS 125 104 V8.2.0, 2008-04