



МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЗОН ПОКРИТТЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ

Ю. Головін¹[ORCID: 0000-0002-8361-0060], І. Нестеренко²[ORCID: 0009-0003-9423-8203],
С. Василенко¹[ORCID:0000-0001-6779-8246]

¹ Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Верхньоключова, 4, Київ, 03056, Україна.

² Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, вул. Київська, 45/1, Київ, 01011, Україна.

Відповідальний за рукопис: Юрій Головін (e-mail: ygol59@ukr.net).

(Подано 02 січня 2024 р.)

Наразі триває впровадження цифрового телевізійного мовлення DVB-T2 у метровому діапазоні хвиль, у деяких регіонах України вже було проведено тестові випробування. Для оцінки ефективності проєктів особливий інтерес представляє порівняння зон радіопокриття цифрових телевізійних передавачів, що працюють у метровому та дециметровому діапазонах хвиль. Це потребує значних за обсягом розрахунків для конкретних місцевостей. Для порівняння було обрано місто Київ, де в метровому діапазоні є один мультиплекс МХ-7 (8 ТВК), а в дециметровому – з чотирьох діючих мультиплексів представлено МХ 1 (26 ТВК) та МХ 3 (49 ТВК), які працюють на найнижчій та найвищій частотах діапазону. В цій статті для прогнозування зон покриття передавачів цифрового телевізійного мовлення надано обґрунтування обраної моделі поширення радіохвиль Лонглі-Райса, яка дає змогу розрахувати послаблення радіосигналу порівняно з поширенням у вільному просторі з використанням профілів місцевості (цифрові карти висот) та електричні характеристики поверхні Землі, враховуючи основні механізми поширення радіохвиль (інтерференцію на лінії прямої радіовидимості, дифракцію на нерегулярному рельєфі місцевості, тропосферне розсіяння), є більш точнішою, а її результати наближено до даних реальних вимірювань. Для розрахунків заплановано використовувати програмне забезпечення Radio Mobile, яке базується на моделі нерегулярного рельєфу (ITM) Лонглі-Райса і використовує супутникові карти Terrain Mission SRTM із можливістю подальшого додавання картографічних даних та доріг від різних джерел. На підставі Рекомендацій ITU R, які стосуються проєктування мереж цифрового телевізійного мовлення стандарту DVB-T2, було проведено розрахунки мінімально необхідної напруженості поля для забезпечення приймання зі заданою якістю та підготовлено вихідні дані для прогнозування зон покриття телевізійних передавачів цифрового стандарту DVB-T2 на прикладі міста Київ. Запропонована методика та отримані дані дозволять розрахувати межі зон покриття телевізійних передавачів цифрового стандарту DVB T2 у метровому та дециметровому діапазонах хвиль для обраних телевізійних каналів.

Ключові слова: моделі поширення радіохвиль, модель ITM Лонглі-Райса, зона радіопокриття передавача, цифрове мовлення DVB-T2, Radio Mobile.

УДК: 621.396

1. Вступ

Протягом останніх років в Україні працює мережа цифрового телевізійного мовлення стандарту DVB-T2 у дециметровому діапазоні хвиль. Декілька цифрових пакетів (мультиплексів) покривають значну частину густонаселених районів країни. Потужність цифрових передавачів не перевищує 2 кВт, що не дає змоги забезпечити достатнім покриттям територій. З 1 червня 2023 року в Україні почалося тестове телевізійне мовлення DVB-T2 у метровому діапазоні.

Значний інтерес представляє порівняння зон радіопокриття цифрових телевізійних передавачів, що працюють у метровому та дециметровому діапазонах хвиль. Для порівняння обрано місто Київ, де в метровому діапазоні є один мультиплекс МХ-7 (8 ТВК), а в дециметровому за даними ресурсу [11] – кілька: МХ-1 (26 ТВК), МХ-2 (31 ТВК), МХ-3 (49 ТВК), МХ-5 (29 ТВК). З діючих мультиплексів для порівняння обрано працюючі на найнижчій і найвищій частотах дециметрового діапазону (МХ-1 та МХ-3).

2. Вибір моделі поширення радіохвиль та програмного забезпечення для розрахунку зон покриття

Для прогнозування зон радіопокриття, тобто території з мінімально необхідним рівнем електромагнітного поля для приймання із заданою якістю, розрізняють три основні типи моделей поширення радіохвиль:

- *емпіричні моделі*, які базуються на даних вимірювань; вони прості та використовують статистичні дані, але не дуже точні;
- *напівдетерміновані моделі*, які базуються на емпіричних даних і детермінованих аспектах;
- *детерміновані моделі*, які базуються на теорії та вимагають багато геометричної інформації про місце та рельєф, потребують дуже значних обчислювальних зусиль, але вони точніші.

Втрати в радіоканалі залежать від робочої частоти, відстані від передавача, висоти підвісу передавальної та приймальної антен, типу та характеристик території тощо. Під час проведення радіопланування мережі треба враховувати також параметри радіообладнання: вихідну потужність передавача, чутливість приймача, характеристики антен та фідерів.

Сектором радіозв'язку ІТУ був запропонований в Рекомендації ІТУ-R Р.1546 [2] метод прогнозування «точка-зона» для наземних послуг у діапазоні частот від 30 МГц до 4 ГГц. Цей метод базується на емпірично отриманих кривих напруженості поля та замінив попередню Рекомендацію ІТУ-R 370. Ці криві є функціями частоти, висоти підвісу антени, відстані та відсотка часу. Крім того, наведено різні поправки, що враховують місцевість поблизу антен, екранування при відбитті від місцевих перешкод, тропосферне розсіювання тощо. Для отримання даних із цих емпіричних кривих використовуються методи екстраполяції та інтерполяції. Напруженість поля в одиницях дБ(мкВ/м) розраховується для 1 кВт ERP (ефективної потужності, що випромінюється). Остання версія – ІТУ-R Р.1546-6, серпень 2019 р.

Наприклад, криві напруженості електричного поля для сухопутної траси до 1 км у діапазоні UHF (600 МГц) для різних висот антен передавача над рівнем рельєфу місцевості зображено на рис. 1.

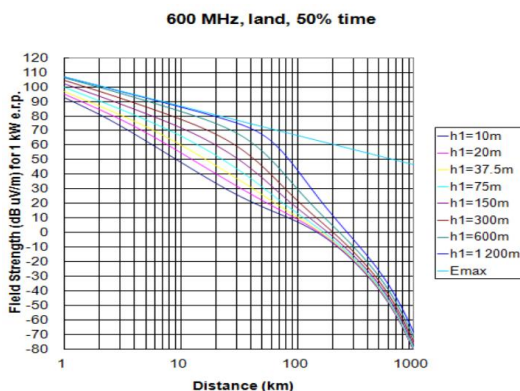


Рис. 1. Криві напруженості поля для діапазону UHF

Емпіричні формули для втрат при розповсюдженні, що були отримані зі звіту Окумура (*Okumura*) за результатами польових випробувань для міста Токіо (Японія), дали можливість виконувати різноманітні розрахунки щодо прогнозування розповсюдження в діапазонах УКХ. Втрати при розповсюдженні в міській місцевості представлено [1] у простій формі:

$$L_{Okumura} = A(f) * B(h) \lg R, \quad (1)$$

де $A(f)$ і $B(h)$ – це функції частоти (f) та висоти (h) антен; R – відстань від передавача.

Модель Окумура була побудована для трьох режимів: для міських, заміських і відкритих ділянок території, та була використана як основа для інших моделей.

Подальші дослідження в цій галузі призвели до створення моделі Ната [3], що використовує математичні рівняння, які містять висоти антен передавача та приймача, робочу частоту (від 150 МГц до 1500 МГц), відстань від базової станції (в межах від 1 км до 20 км) у міських, приміських і відкритих місцевостях. Це розширення й уточнення моделі Окумура [1].

Асоціація телекомунікаційної промисловості (ТІА) рекомендувала модифікувати модель Ната, щоб охопити ширший діапазон вхідних параметрів і відстаней. Модель відома як модель Ната-Davidson і враховує поправки для відстаней до 300 км і висот підвісу антен передавачів – до 2500 м. Це було опубліковано в TSB-88A [4]. Формули моделі Хата-Девідсона для розрахунку втрат такі:

$$L_{HD} = L_{Hata} + A(h_1, d_{[км]}) - S_1(d_{[км]}) - S_2(h_1, d_{[км]}) - S_3(f_{[МГц]}) - S_4(f_{[МГц]}, d_{[км]}), \quad (2)$$

$$\text{де } L_{Hata} = 69,55 + 26,16 \lg f_{[МГц]} - 13,82 \lg h_{[м]} - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \lg h_{[м]}) \lg d_{[км]}, \quad (3)$$

$a(h_2)$ – поправочний коефіцієнт для висоти встановлення антени абонентської станції:

$$a(h_2) = \begin{cases} (1.11 * \lg f_{[МГц]} - 0.7)h_2 - (1.56 * \lg f_{[МГц]} - 0.8) \\ 8.29(\lg(1.54h_2))^2 - 1.1 \\ 3.2(\lg(11.75h_2))^2 - 4.97 \end{cases}, \quad (4)$$

де f – несуча частота (30–1500 МГц); h_1 – висота розміщення антени базової станції над середньою місцевістю (НААТ) (20–2500 м); h_2 – висота розміщення антени абонентської станції (1–10 м); d – це відстань від передавача (1–300 км);

Перший вираз застосовують для середнього та малого міста, квазівідкритої та відкритої місцевості, другий – для великого міста та $f_c \leq 300$ МГц*, третій – для великого міста та $f_c > 300$ МГц*; * – у деяких публікаціях замість 300 МГц використовують інші номінали частот.

A і S_1 – це коефіцієнти, які розширюють максимальне значення відстані d до 300 км (табл. 1);

S_2 – це поправочний коефіцієнт, що збільшує максимальне значення висоти h_1 до 2500 м:

$$S_2(h_{[м]}, d_{[км]}) = 0.00784 \lg \left(\frac{9.98}{d} \right) (h_1 - 300) \text{ для } h_1 > 300. \quad (5)$$

S_3 і S_4 – поправочні коефіцієнти, які розширюють робочу частоту:

$$S_3(f_{[МГц]}, d_{[км]}) = \left[0.112 \lg \left(\frac{1500}{f} \right) \right] (d - 64,38) \text{ для } d > 64,38. \quad (6)$$

Напруженість поля розраховується за формулою:

$$E_{[дБмкВ/м]} = ERP_{[дБВт]} - L_{HD[дБ]} + 20 \lg f_{[МГц]} + 109.35 \quad (7)$$

де $ERP_{[дБВт]} = P_{Tx[дБВт]} + G_{ант[дБ]}$ – ефективна потужність, що випромінюється; $P_{Tx[дБВт]}$ – потужність передавача; $G_{ант[дБ]}$ – коефіцієнт підсилення антени в напрямку кореспондента.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів A і S_1

Відстань d , км	$A(h_{TMR}, d)$	$S_1(d)$
$d < 20$	0	0
$20 \leq d < 64,38$	$0,6237(d-20) \cdot [0,5+0,15 \lg(h_1/121,92)]$	0
$64,38 \leq d < 300$	$0,6237(d-20) \cdot [0,5+0,15 \lg(h_1/121,92)]$	$0,174(d-64,38)$

Значення напруженості поля не можуть бути вищими за значення у вільному просторі.

Були наведено [1] порівняння експериментальних вимірювань напруженості поля, які зроблено портативним аналізатором спектру Rohde & Schwarz FSH-3, із результатами моделювання, отриманими з використанням моделі прогнозування покриття ІТМ (*Irregular Terrain Model* – модель нерегулярного рельєфу), також відомої як модель Longley-Rice [5, 6], у поєднанні з географічними даними SRTM (*Satellite Radar Topography Mission* – цифрової моделі висот Землі з даних, отриманих спеціально модифікованою радарною системою місії супутникової радіолокаційної топографії) [7] з прогнозами поширення радіохвиль за Рекомендацією ІТУ-Р Р.1546 [2] та емпіричною моделлю Хата-Девідсона з використанням НААТ (висоти центру випромінювання антени над середньою висотою місцевості).

Криві розповсюдження в Рекомендації ІТУ-Р Р.1546-6 є дуже точними для коротких відстаней (менше ніж 50 км), але ця модель стає все більш неточною для більших відстаней, сильно занижуючи потужність отриманого сигналу [1]. Нарешті, модель Хата-Девідсона, що використовує НААТ, хоча й досить проста в реалізації та базується на аналітичних наближених рівняннях, є достатньо точною та в середньому дозволяє отримати кращі результати, ніж модель ІТУ-Р Р.1546-6.

Моделі ІТУ-Р Р.1546 і Hata-Davidson демонструють збільшення похибки на великих відстанях. Це зрозуміло, тому що межа зони покриття телевізійним мовленням знаходиться як правило за межами населених пунктів, а модель Hata-Davidson була створена насамперед для міської та приміської територій. Зокрема, результати вимірювань показують, що ІТУ-Р Р.1546 в середньому занижує напруженість поля на відстанях, довших за 50 км. Модель Лонглі-Райса, що використовує інформацію про рельєф місцевості (цифрові карти висот) та електричні характеристики поверхні (включно з рослинністю) Землі, є більш точною, а її результати наближені до даних реальних вимірювань [1].

Відповідно до рекомендації, які ґрунтуються на порівнянні експериментальних вимірювань напруженості електричного поля з різними моделями поширення радіохвиль [1], для розрахунків зон поширення цифрового ефірного мовлення була обрана модель Лонглі-Райса, яка враховує також дані стосовно рельєфу місцевості.

Метод нерегулярного рельєфу (ІТМ) Лонглі-Райса [5] використовується під час прогнозування втрат радіосигналів для ліній зв'язку в діапазоні частот від 20 МГц до 20 ГГц. Цей метод був створений для потреб частотного планування телевізійного мовлення в США в 1960-ті роки та досі використовується в цих цілях Федеральною комісією зі зв'язку. Він визначає послаблення радіосигналу порівняно з поширенням у вільному просторі з використанням профілів місцевості залежно від дальності, безпосередньо враховуючи три основні механізми поширення:

- 1) інтерференція на лінії прямої радіовидимості;
- 2) дифракція на нерегулярному рельєфі місцевості;
- 3) тропосферне розсіяння.

Втрати в радіоканалі (L) визначаються як сума втрат у вільному просторі (L_0) та додаткових втрат реальної траси поширення радіохвиль (L_{LR}), розрахованих за вказаним методом:

$$L = L_0 + L_{LR} \quad (8)$$

Втрати у вільному просторі розраховуються згідно з Рекомендаціями МСЕ-R P.525-4 (08/2019) за формулою:

$$L_0 = 32.44 + 20 \lg f_{[МГц]} + 20 \lg d_{[км]} \quad (9)$$

Прогнози втрат сигналу для трас у межах радіогоризонту, засновані на геометрооптичній теорії променів (двопроменевої теорії), використовують інтерференційні формули з урахуванням рельєфу місцевості та рефракції. Радіохвиля, що відбивається від ділянок рельєфу місцевості, може прийти в точку приймання кількома траєкторіями. Тобто в цьому випадку спостерігається багатопроменеве поширення радіохвиль. Суттєве значення мають характеристики не тільки зон, що прилегли до місць розташування антен та зон відбиття (розмір, форма та рельєф ділянки місцевості), а також їхні електричні параметри (діелектрична проникність та провідність ґрунту, наявність та тип рослинності).

Зона дифракції передавача простягається від відстані, що відповідає лінії прямої видимості, де просвіт траси становить 60 % радіуса першої зони Френеля, до відстані, що знаходиться далеко за межами горизонту передавача, де переважає механізм тропосферного розсіювання. Для трас із загальним горизонтом застосовується теорія дифракції Френеля-Кірхгофа на клиноподібній перешкоді, яка розширюється для прогнозування дифракційного загасання над ізольованими округлими перешкодами. Для трас подвійного горизонту, які лише трохи виходять за обрій, використовується модифікований метод Ван дер Поля-Бреммера для розрахунку напруженості поля в дальній дифракційній області.

Для розробки емпіричної моделі довгострокових медіанних еталонних значень втрат сигналу при тропосферному поширенні використовувалася велика вибірка радіоданих регіональних, сезонних та добових змін для декількох кліматичних регіонів і періодів часу.

Для загоризонтних трас – ділянок, що знаходяться за межами радіогоризонту, значення втрат визначаються або втратами при дифракції, або втратами при тропосферному розсіянні, залежно від того, що з них менше. Оскільки це емпірична модель, то для розрахунку послаблення радіосигналу для фактичної довжини реальної траси враховують задані користувачем відсоток часу, відсоток території, де забезпечується радіопокриття, а також відсоток ситуацій.

Застосування моделі Лонглі-Райса, яка базується на теорії електромагнітного поля (рефракція, інтерференція, дифракція), а також на емпіричних моделях, які розроблені екстраполяцією даних численних вимірювань у широкому діапазоні рельєфу та кліматичних умов, вручну обтяжливе або ненеможливе навіть для однієї радіолінії точка-точка [17]. Тому авторами [5–6] модель Лонглі-Райса була оптимізована для комп'ютерного моделювання, яка, зокрема, реалізує об'єднання результатів розрахунків втрат для різних інтервалів радіотраси різними методами.

Модель Лонглі-Райса знайшла застосування в різному програмному забезпеченні для планування радіомереж, а саме: в *Radio Mobile*, *Nautel*, *SPLAT!*, *QRadioPredict*, *Probe*, *Tower Coverage.co*, онлайн-калькуляторі *CRC-COVWEB* тощо.

Для розрахунків скористаємося доступним програмним забезпеченням (ПЗ) *Radio Mobile* [8–9], яке було створено розробником Roger Coudé для моделювання поширення радіохвиль у діапазоні частот від 20 МГц до 20 ГГц, що базується на моделі ІТМ Лонглі-Райса і використовує супутникові карти *Terrain Mission SRTM* [7] із подальшим додаванням картографічних даних та доріг від різних джерел (*Open Map*, *Google Map*, *Google Earth* тощо). Важливою особливістю даного ПЗ є те, що воно також дозволяє оцінити взаємний вплив на електромагнітну обстановку декілька різних передавачів.

Програма використовує для відображення на картах місцевості зон впевненого приймання радіосигналу такі дані та параметри:

- розташування передавача;
- характеристика місцевість та висоти рельєфу;
- вихідна потужність передавача;
- робоча частота;

- тип, поляризація, діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення антени;
- загасання в фідерному тракті, включаючи фільтри, багатоканальні розгалужувачі тощо.

Цю програму використовують і інші автори, наприклад для розрахунку зон покриття систем цифрового радіомовлення [10].

3. Визначення мінімально необхідної напруженості поля для розрахунку зони покриття

Для розрахунку мінімально необхідної напруженості поля, яка необхідна для розрахунку зони покриття, крім параметрів приймача (коефіцієнт підсилення приймальної антени, втрати у фідері, коефіцієнт шуму), необхідне визначення потрібного захисного відношення для забезпечення заданої якості приймання сигналу на визначених радіочастотах. У Рекомендації МСЕ [13] наведено методику визначення потрібного захисного відношення для телевізійного мовлення стандарту DVB-T2. Вихідними даними є модель каналу зв'язку (Гаус, Релей, Райс), тип і параметри модуляції корисного сигналу, а також відсоток території та відсоток часу, в яких забезпечується задана якість прийому. Нижче наведено дані, які необхідні для розрахунків.

Режими передавання DVB-T2

Для розрахунків були використані дані джерела [11] про деякі технічні параметри передавальних пристроїв наземного цифрового телевізійного мовлення в місті Київ, які необхідні для розрахунків мінімально потрібної напруженості поля на межі зони покриття. Ці дані зведено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні технічні характеристики сигналів DVB-T(T2)

Номери ТВ каналів	8	26	49
Цифрові пакети (мультиплекси)	MX-7	MX-1	MX-3
Центральна частоти каналів, МГц	194	514	698
Номери телевізійних діапазонів	III	IV	V
Ширина смуги частот, МГц	7	8	8
Модуляція / коефіцієнт корекції помилок	64QAM, 3/4 LDPC+VCH	64QAM, 3/4 LDPC+VCH	64QAM, 3/4 LDPC+VCH
Режим OFDM (кількість піднесієвних частот) / смуга частот / відносна довжина захисних інтервалів	32k / нормальна / 1/8	32k / розширена / 19/256	32k / розширена / 19/256
ЗНЧ, кГц / поворот сузір'я / конфігурація пілот-сигналу	0 / так / PP2	0 / так / PP4	0 / так / PP4
Стандарт компресії	MPEG-4	MPEG-4	MPEG-4
Режим роботи MIMO / тип приймання	SISO / FX	SISO / FX	SISO / FX

Параметри приймачів DVB-T2

У рекомендації МСЕ [12] визначено характеристики еталонних приймальних систем для різних систем цифрового наземного телебачення, що використовуються як основа для планування частот служб цифрового наземного телебачення в діапазонах ОВЧ/УВЧ. У табл. 3 та 4 наведено значення для типових характеристик приймальних антен та приймача, які застосовуються для цифрових наземних телевізійних систем DVB-T2 при плануванні частот.

Номінальні значення параметрів еталонної приймальної системи цифрового наземного телевізійного мовлення стандарту DVB-T2 у рекомендації ITU-R BT.2036-4 [12] визначено для чотирьох різних режимів приймання:

- режим приймання RM1 – для фіксованих антен на дахах будівель;
- режими приймання RM2a – для переносних пристроїв та RM2b – для мобільних пристроїв поза приміщеннями;
- режим приймання RM3 – для портативних пристроїв всередині приміщень.

Таблиця 3

**Типові характеристики приймальних антен систем цифрового наземного телебачення
DVB-T2 для планування частот**

Номери телевізійних діапазонів	III	IV	V
Частота, МГц	174-230	470-582	582-862
Коефіцієнт підсилення стаціонарної антени на даху будівлі, дБд	7	10 (11*)	12 (11*)
Втрати у фідері (дБ)	2	3 (4*)	5 (4*)

* Пропоновано в рекомендації МСЕ-P-2254.

Для розрахунків було обрано режим RM1, для якого висота стаціонарної антени приймача, що встановлена на даху будівлі, становить 10 м над поверхнею землі. Коефіцієнт шуму еталонного приймача дорівнює 6 дБ [12].

Захисне співвідношення C/N

На момент написання статті в авторів рекомендації МСЕ-P [13] було недостатньо даних вимірювань для експериментального визначення необхідного співвідношення C/N . Замість вимірювань у рекомендації [13] описано методику, яка може бути використана для розрахунку відношення C/N (відношення рівня корисного сигналу до шуму) на основі моделювання результатів характеристик приймача, наданих у Керівництві щодо впровадження DVB-T2 [18].

Важливо відзначити, що співвідношення C/N , яке було отримане за допомогою наступної методики, розуміємо як опис середньої поведінки приймачів, яке можна використовувати для частотного планування мережі. Вони не призначені для опису мінімальних вимог до приймача в сенсі специфікації.

Для визначення потрібного значення C/N у рекомендації [13] пропонуємо методику, яка передбачає такі основні три кроки:

- 1) вибір режиму приймання (RM1-RM3) для визначення моделі каналу (Гауса, Райса чи Релея);
- 2) початкове базове значення C/N для подальших розрахунків визначаємо на основі моделювання для гаусівського каналу (C/N_{Gauss_raw}) з урахуванням поправок для різних режимів передавання DVB-T2 із використанням запропонованих у рекомендації таблиць;

- 3) корекція визначеного значення C/N_{Gauss_raw} для реальних факторів реалізації приймача з урахуванням ідентифікованого каналу передачі та середовища приймання.

Згідно з рекомендаціями [13] обираємо режим приймання RM1, в якому для визначення відношення C/N є найбільш прийнятним щодо застосування моделі каналу Райса (використовується для планування фіксованого приймання при незначному впливі багатопроменевості).

Для передавання сигналу DVB-T2, у нашому випадку, використовуємо модуляцію 64-QAM (Code gate 3/4) та для гаусівського каналу відповідно до таблиці, яку наведено [13], значення C/N_{Gauss_raw} становить 15,1 дБ. Водночас використовують такі припущення: ідеальна оцінка каналу, ідеальна синхронізація, відсутність фазового шуму тощо.

Щоб отримати «остаточний» гаусівський канал C/N (C/N_{Gauss}), потрібно врахувати чотири поправки до C/N_{Gauss_raw} ідеального гаусівського каналу (табл. 4 та 5):

- 1) поправка $A=0,1$ дБ передбачає додаткове збільшення значення C/N для досягнення ймовірності помилки $BER=10^{-7}$ після процедури LDPC;
- 2) поправка B для врахування конфігурації пілот-сигналу;
- 3) поправка C враховує невідповідність реального каналу ідеальному гаусівському каналу;
- 4) поправка D враховує деградацію C/N , яка є наслідком фазового шуму тюнера, шуму квантування в аналого-цифрових перетворювачах тощо;

Таблиця 4

Усереднені поправки значення C/N

Поправки, дБ	Конфігурація пілот-сигналу (Pilot pattern)							
	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
A (BER 10^{-7} correction)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
B (Pilot boost correction)*	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4
C (Real channel estimation)	2,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0

* Значення округлено до одного знаку після коми.

Таблиця 5

Фактор D (деградація C/N для значень C/N від 15 до 32)

C/N , дБ	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
D, дБ	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,46	0,58	0,75	0,97	1,26	1,65	2,20	3,02	4,33	6,87

Для передавання сигналу DVB-T2 у м. Київ застосовуються такі моделі пілот-сигналів: PP2 – на 8 ТВ каналі, PP4 – на 26 та 49.

Деякі приймачі можуть на практиці працювати трохи краще або трохи гірше, ніж еталонні, причому потрібного C/N може складати 0,5-1 дБ.

Як приклад, у таблиці, яку наведено у [13], представлено оцінку збільшення потрібного співвідношення C/N для гаусового каналу з 15,1 дБ до 17,7 дБ для варіанту DVB-T2 64-QAM (Code rate $3/4$) з використанням нормальної смуги пропускання та PP2.

Підсумовуючи, процедура отримання C/N_{Gauss} – кінцевого значення C/N за Гаусом, така:

$$C/N_{Gauss} = C/N' + D, \text{ (дБ)} \quad (10)$$

$$C/N' = C/N_{Gauss_raw} + A + B + C, \text{ (дБ)} \quad (11)$$

Різниця в необхідному відношенні C/N під час порівняння каналів Гауса та Райса становить від 0,2 до 0,5 дБ [13]. Додавши цю різницю до C/N_{Gauss_raw} з табл. 4 і дотримуючись запропонованої у [13] процедури для корекції, можна отримати значення C/N для випадку Райса:

$$\frac{C}{N'}_{Rice} = \frac{C}{N}_{Gauss_raw} + \Delta_{Rice} + A + B + C, \text{ (дБ)} \quad (12)$$

$$\frac{C}{N}_{Rice} = \frac{C}{N'}_{Rice} + D, \text{ (дБ)} \quad (13)$$

Для визначення потрібного співвідношення $\frac{C}{N}$ для каналу Райса потрібно додати поправку Δ_{Rice} (дБ), яка для 64-QAM (Code rate $\frac{3}{4}$) дорівнює 0,3 дБ [13]. Водночас необхідне значення C/N для каналу Райса становить 18 дБ.

Додаткове погіршення $\frac{C}{N}$, що залежить від швидкості кодування, може становити 1,6 дБ. У таких випадках приймачу знадобиться додатковий запас сигналу до межі 1,6 дБ, залежно від затримки та величини відбиття. Найгірша ситуація може виникати в режимі синхронного мовлення (SFN). Вплив на приймання значно залежить від конфігурації пілот-сигналу та алгоритму оцінки каналу.

У Додатку 4 Рекомендації [13] порівнюються результати, що були отримані по цій методиці при обмеженій кількості приймачів DVB-T2. Ці порівняння вказують на те, що розрахункові значення $\frac{C}{N}$ не забезпечують достатню точність щодо певних режимів DVB-T2 і моделей приймання. Існує тенденція, що для гаусового каналу розраховане співвідношення $\frac{C}{N}$ приблизно на 1-2 дБ вище, ніж значення, виміряні в лабораторних і польових випробуваннях. Для каналу Райса розраховане $\frac{C}{N}$ на 0-1 дБ вище, ніж виміряні значення, а для каналу Релея – досить добре збігається з виміряним C/N .

Враховуючи нестачу даних у Рекомендації [13] по всіх режимах (модуляція, коефіцієнт корекції помилок, кількість несучих, смуга, захисний інтервал, ЗНЧ, поворот сузір'я, модель пілот-сигналу, тип спектральної маски фільтра, втрати у фільтрі) та необхідних підтверджень натурними випробуваннями можемо з високою достовірністю (з похибкою не більш ніж 0,5 дБ) при розрахунках зони покриття використати потрібне значення $\frac{C}{N}=20$ дБ. У подальшому після проведення натурних випробувань потрібне значення $\frac{C}{N}$ може бути уточнено для різних передавачів та різних типів приймальних пристроїв.

Визначення необхідного рівня сигналу

Щоб обчислити мінімальну середню густину потоку потужності або еквівалентну напруженість поля, необхідну для забезпечення досягнення мінімальних значень рівня сигналу в необхідному відсотку місць, використовуються такі формули [13, 14]:

$$\left. \begin{aligned} P_n &= F + 10 \lg(kT_0 B) \\ P_{s \min} &= \frac{S}{N} + P_n \\ A_a &= G + 10 \lg\left(\frac{1.64 \lambda^2}{4\pi}\right) \\ \varphi_{\min} &= P_{s \min} = A_a + L_f \\ E_{\min} &= \varphi_{\min} + 120 + 10 \lg(120\pi) = \varphi_{\min} + 145.8 \\ E_{med} &= E_{\min} + P_{mmn} + C_l \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

де P_n – потужність шуму на вході приймача, (дБВт); F – коефіцієнт шуму приймача, (дБ); k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \times 10^{-23}$, (Дж/К)); T_0 – абсолютна температура ($T_0 = 290$ (К)); B – шумова смуга приймача ($B = 6,66 \times 10^6$ (Гц) або $7,77 \times 10^6$ (Гц)); $P_{s \min}$ – мінімальна потужність на

вході приймача, (дБВт); $\frac{S}{N}$ – потрібне відношення сигнал/шум на РЧ вході приймача, (дБ); A_a – ефективна апертура антени, (дБм²); G – коефіцієнт підсилення антени відносно напівхвильового диполя, (дБд); λ – довжина хвилі сигналу, (м); Φ_{\min} – мінімальна щільність потоку потужності (щ.п.п.) у місці прийому, (дБВт/м²); L_f – втрати у фідері, (дБ); E_{\min} – еквівалентна мінімальна напруженість поля у місці приймання, (дБмкВ/м); E_{med} – мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля для приймання на фіксований пристрій, який встановлений на рівні даху (10 м), (дБ(мкВ/м)); P_{mmn} – допуск на шуми штучного походження: 2 дБ для III ТВ діапазону, 0 дБ для IV діапазону, (дБ) [13]; C_l – поправочний коефіцієнт місцезнаходження, (дБ).

Для розрахунку коефіцієнта корекції розташування C_l передбачається логарифмічний нормальний розподіл прийнятого сигналу. Для режиму прийому *RM*:

$$C_l = \mu + \sigma_l, \quad (15)$$

де σ_l – стандартне відхилення (для режиму приймання *RM*) ($\sigma_l = 5,5$ (дБ), (дБ)); μ – коефіцієнт розподілу: 0,52 для 70 % ситуацій, 1,28 для 90 %, 1,64 для 95 % і 2,33 для 99 %.

Таблиця 6

Результати розрахунку мінімального рівня напруженості поля системи DVB-T2

Параметри	Позначення	Розмірність	Значення		
			III	IV	V
Номери телевізійних діапазонів			III	IV	V
Центральна частота каналу	f	МГц	194	514	698
Коефіцієнт шуму приймача	F	дБ	6	6	6
Еквівалентна шумова смуга	B	МГц	6,66	7,77	7,77
Потужність шуму на вході приймача	P_n	дБВт	-129,74	-129,07	-129,07
Потрібне відношення сигнал/шум на РЧ вході приймача	S/N	дБ	20	20	20
Мінімальна потужність на вході приймача	$P_{s\ min}$	дБВт	-109,74	-109,07	-109,07
Коефіцієнт підсилення антени відносно напівхвильового диполя	G	дБд	7	11	11
Ефективна апертура антени	A_a	дБм ²	1,75	-2,52	-5,17
Втрати у фідері	L_f	дБ	2	4	4
Мінімальна щ.п.п. у місці прийому	Φ_{\min}	дБВт/м ²	-109,49	-102,56	-99,90
Еквівалентна мінімальна напруженість поля у місці приймання	E_{\min}	дБмкВ/м	36,31	43,24	45,90
Допуск на шуми штучного походження	P_{mmn}	дБ	2	0	0
Стандартне відхилення	σ_l	дБ	5,5	5,5	5,5
Для 70 % ситуацій ($C_l=0,2842$ дБ), 50 % часу та 50 % місць					
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля	E_{med}	дБ мкВ/м	41,19	46,13	48,79
Для 90 % ситуацій ($C_l=7,04$ дБ), 50% часу та 50 % місць					
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля	E_{med}	дБмкВ/м	45,35	50,28	52,94
Для 95 % ситуацій ($C_l=9,04695$ дБ), 50% часу та 50% місць					
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля	E_{med}	дБмкВ/м	47,36	52,29	54,95
Для 99 % ситуацій ($C_l=12,815$ дБ), 50 % часу та 50 % місць					
Мінімальна медіанна еквівалентна напруженість поля; 50 % часу та 50 % місць	E_{med}	дБмкВ/м	51,13	56,06	58,72

Варіації напруженості поля можна поділити на макро- та мікромасштабні [13]. Макромасштабні стосуються областей із лінійними розмірами понад 10 м і здебільшого є наслідком затінення, відбиття та розсіювання. Мікромасштабні варіації відносять до областей із розмірами порядку довжини хвилі та переважно спричинені багатопроменевим розповсюдженням радіохвиль за рахунок відбиття від сусідніх об'єктів. Ефект мікромасштабного завмирання зазвичай враховується відповідним значенням для розглянутого каналу передачі та іноді пов'язують з відсотком ситуацій.

Для наближення результатів розрахунків до даних натурних випробувань у [10] рекомендовано у подальших розрахунках враховувати дані, які були отримані для 95 % ситуацій.

Макромасштабні зміни напруженості поля дуже важливі для оцінки зони радіопокриття. Для забезпечення якісного приймання цифрового телебачення потрібно при розрахунках обирати відсоток покриття та часу понад 50 %. Крім рекомендацій ITU-R [14] програмне забезпечення *Radio Mobile* також дозволяє проводити розрахунки для інших відсотків території місць та часу приймання, які відмінні від 50 %. Водночас є можливість обирати потрібні відсотки місць, часу та ситуацій.

Отримані результати мінімально необхідної напруженості поля та необхідне співвідношення сигнал / шум можуть бути уточнені після проведення натурних випробувань.

Висновки

З метою розрахунку послаблення при поширенні радіохвиль сигналів передавачів цифрового ефірного телебачення запропоновано застосування моделі нерегулярного рельєфу (ITM) Лонглі-Райса, яка на відміну від інших використовує інформацію про рельєф місцевості (цифрові карти висот) та електричні характеристики поверхні Землі, враховує всі основні механізми поширення, є більш точнішою, а її результати наближаються до даних реальних вимірювань.

У роботі відповідно до Рекомендацій ITU-R представлено результати розрахунків мінімально необхідної напруженості поля для забезпечення приймання сигналів цифрового телевізійного мовлення стандарту DVB-T2 із заданою якістю, які можуть бути використані як вихідні дані під час розрахунку зон покриття передавачів DVB-T2 для метрового та дециметрового діапазонів хвиль для обраних телевізійних каналів, враховуючи особливості програмного забезпечення *Radio Mobile*, яке базується на моделі Лонглі-Райса і застосовує супутникові карти *Terrain Mission SRTM*, а також передбачає додавання картографічних даних від різних джерел (наприклад, *Open Map*, *Google Map*, *Google Earth* тощо).

Запропонована методика та отримані в роботі результати мають практичне значення, що дозволить суттєво знизити витрати на проектування мереж цифрового ефірного телебачення, надають зручний та доступний інструмент для проведення необхідних розрахунків із можливістю за необхідності уточнення після проведення натурних випробувань.

Список використаних літературних джерел

- [1] *Stylianos Kasampalis, Pavlos I. Lazaridis, Zaharias D. Zaharis, Aristotelis Bizopoulos, Spyridon Zettas, and John Cosmas, Senior Member IEEE / Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction. IEEE BMSB 2014, pp. 1-4.*
- [2] *Recommendation ITU-R P.1546-6 (08/2019) Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz.*
- [3] *M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT- 29, No. 3, August 1980.*
- [4] *Hata/Davidson "A Report on Technology Independent Methodology for the Modeling, Simulation and Empirical Verification of Wireless Communications System Performance in Noise and Interference Limited Systems Operating on Frequencies between 30 and 1500MHz", TIA TR8 Working Group, IEEE Vehicular Technology Society Propagation Committee, May 1997.*
- [5] *P.L. Rice, A.G. Longley, K.A. Norton, and A.P. Barsis, "Transmission loss predictions for tropospheric communications circuits", Technical Note 101, revised 1/1/1967, U.S. Dept. of Commerce NTIA-ITS.*

- [6] LONGLEY, A. G. and RICE, P. L. [1968] *Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain – A computer method*. ESSA Tech. Report ERL 79-ITS 67.
- [7] NASA, “Shuttle Radar Topography Mission data”. Available on line at <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>. [8]. Roger Coudé, *Webpage of Radio Mobile*, <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>.
- [8] Salamanca L. Murillo-Fuentes J.J. Olmos P. “Review of the Radio Mobile Software as a teaching tool for Radio planning” *IEEE Multidisciplinary Engineering Education Magazine*, Vol. 6, No. 2, June 2011.
- [9] Kovalgin Yu. *O primeneniі programmi Radio Mobile dlya rascheta zon pokritiya peredatchikov, rabotayushchikh v diapazone OVCh / Trudi uchebnikh zavedenii svyazi*. 2021. Volume: 7. No 2. pp. 24-36. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-24-36.
- [10] <https://ukrtvr.org/city/243>.
- [11] Recommendation ITU-R BT.2036-4 (06/2021) *Characteristics of a reference receiving system for frequency planning of digital terrestrial television systems*.
- [12] Recommendation ITU-R BT.2254-5 (11/2021) *Frequency and network planning aspects of DVB-T2*.
- [13] Recommendation ITU-R BT.2033-2 (01/2022) *Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands*.
- [14] Recommendation ITU-R P.527-6 (09/2021) *Electrical characteristics of the surface of the Earth*.
- [15] Recommendation ITU-R P.832-4 (07/2015). *World atlas of ground conductivities*.
- [16] ITU-R. HANDBOOK. TERRESTRIAL LAND MOBILE RADIO WAVE PROPAGATION IN THE VHF/UHF BANDS, 2009.
- [17] ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08) *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE COVERAGE AREAS OF DIGITAL TELEVISION BROADCASTING

Yuriy Golovin¹, Igor Nesterenko², Serhii Vasylenko¹

¹*Institute of Special Communications and Information Protection National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Verkhnyoklyuchova Str., 4, Kyiv, 03056, Ukraine*

²*Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes Krut, Kyivska Str., 45/1, Kyiv, 01011, Ukraine*

The introduction of DVB-T2 digital television broadcasting in the VHF waveband is currently underway, and test trials have already been conducted in some regions of Ukraine. To assess the effectiveness of the projects, it is of particular interest to compare the radio coverage areas of digital TV transmitters operating in the VHF and UHF wave bands. This requires extensive calculations for specific locations. For comparison, the city of Kyiv was chosen, where there is one multiplex MX-7 (8 TV channels) in the VHF band, and the following four multiplexes are represented in the UHF band: MX 1 (26 TV channels) and MX 3 (49 TV channels), which operate at the lowest and highest frequencies of the band. In this article, to predict the coverage areas of digital television broadcasting transmitters, the justification of the selected Longley-Rice radio wave propagation model is provided, which allows calculating the radio signal attenuation compared to free space propagation using terrain profiles (digital elevation maps) and the electrical characteristics of the Earth's surface. Taking into account the main mechanisms of radio wave propagation (interference on the line of sight, diffraction on irregular terrain, tropospheric scattering), it is more accurate and its results are closer to actual measurements. The calculations will be carried out using Radio Mobile software based on the Longley-Rice Irregular Terrain Model (ITM) and using Terrain Mission SRTM satellite maps with the possibility of further adding map data and roads from various sources. Based on the ITU R Recommendations on the design of DVB-T2 digital television broadcasting networks, the minimum required field strength to ensure reception with a given quality was calculated and the initial data for predicting the coverage areas of DVB-T2 digital television transmitters were prepared using the example of Kyiv. The proposed methodology and the data obtained will allow to calculate the boundaries of the coverage areas of DVB-T2 digital standard television transmitters in the VHF and UHF wave bands for selected television channels

Keywords: *radio wave propagation models, Longley-Rice ITM model, radio coverage area of the transmitter, DVB-T2 digital broadcasting, Radio Mobile.*