

## УДК 629.052.3

*О. В. Загора, к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0001-9042-6838)*  
*А. Б. Феценко, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)*  
*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ВРАХУВАННЯ НАПІВПРОЗОРИХ ПЕРЕПОН МОДЕЛІ РОБОЧОЇ ЗОНИ RTLS-СИСТЕМИ РАЙОНУ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ

Розроблено математичну модель основних різновидів напівпрозорих перепон різничедалекомірної системи локального позиціонування, яка у режимі реального часу дозволяє здійснювати прогнозування робочої зони системи в районі надзвичайної ситуації. Враховано характеристики напівпрозорих перепон, що визначають якість позиціонування та точнісні характеристики системи. Для спрощення моделювання прийнято ряд припущень стосовно параметрів перепон і умов розповсюдження радіохвиль, які дозволяють спростити процес прогнозування. На основі проведеного дослідження запропоновано класифікацію та методи математичного опису основних різновидів перепон, що пропонується використовувати як основу математичної моделі прогнозування. На підставі даної класифікації розроблено розрахункові алгоритми та програму оперативного прогнозування робочої зони локального позиціонування, що дозволяє врахувати вплив кількості перепон, геометрії їх розташування та властивостей шляху розповсюдження радіохвиль на форму робочої зони. У процесі моделювання враховано як геометричні, так і загальнофізичні закономірності формування поля радіонавігаційного забезпечення. Проведено дослідження роботи системи моделювання в умовах наявності кількох радіомаяків при наявності у межах робочої зони кількох будівельних перепон різної форми та з різними властивостями. Розроблена математична модель дозволяє проводити розрахунок зон позиціонування з визначенням граничних умов надійності та точності навігаційного забезпечення рятувальників. Врахування процесу прогнозування впливу форми та властивостей перепон зони надзвичайної ситуації на вид та розмір робочої зони системи позиціонування дозволяє керівнику роботами з ліквідації надзвичайної ситуації прийняти обґрунтоване управлінське рішення, забезпечити безпечні умови роботи рятувальників та оптимізувати організацію робіт щодо найшвидшої ліквідації надзвичайної ситуації.

**Ключові слова:** RTLS-система, локальне позиціонування, напівпрозора перепона, геометричний фактор, розповсюдження радіохвиль

### 1. Вступ

Завдяки системі позиціонування у режимі реального часу (RTLS-система, – від англ. Real-time Locating Systems) командир пожежної охорони може визначити, чи є у районі надзвичайної ситуації рятувальники, які опинилися в пастці або загубилися у вогні. Особливо це важливо для висотних або складних будівель (промислові об'єкти великої протяжності, кар'єри, шахти, місцевість зі складним рельєфом і т. і.) [1]. У наш час значна кількість мобільних технічних систем має в своєму складі системи позиціонування [2], які зазвичай приймають сигналів глобальної супутникової навігаційної системи GPS. Однак, в умовах, коли прийом сигналів цієї системи ускладнено, або в разі їх повної відсутності система не може виконувати свої функції. У таких умовах для визначення координат мобільних об'єктів необхідні альтернативні методи позиціонування, такі як розгортання локальної RTLS-системи, що складається зі стаціонарно розташованих маяків з відомими координатами і мобільних об'єктів, координати яких визначаються. Сучасні RTLS-системи вирішують ключові проблеми для пожежної команди, включаючи відстеження та візуалізацію внутрішнього і зовнішнього розташування рятувальників і людей у приміщеннях, а також обмін інформацією та синхронізацію між різними системами, такими як портативні термінали пожежних, системи уп-

равління центру керування і мобільні командні платформи, можуть забезпечувати управління всередині і поза приміщеннями у реальному часі, надавати картографічні послуги для аварійно-рятувальної команди під час пожежі.

Але в умовах щільної міської забудови значно погіршується якість прийому GPS-трекерами сигналів, що використовуються задля позиціонування. Суттєвий вплив на робочу зону системи навігації вносять властивості перепон, що зустрічаються на шляху розповсюдження радіосигналів.

Виходячи з цього актуальною проблемою, що вимагає вирішення є недосконалість методів прогнозування робочої зони локальної RTLS-системи з урахуванням основних різновидів напівпрозорих перепон в умовах надзвичайної ситуації.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Велика увага до систем GPS-моніторингу приділяється в європейських країнах. Так, існуюча у Республіці Польща система протипожежної служби "СМОК" [1] використовує відповідне обладнання на більш ніж 3 тисячах пожежних автомобілів, а спеціалізоване програмне забезпечення встановлено у 16 штаб-квартирах воєводських управлінь та районів.

У роботі [2] відзначено поширення саме різнице-далекомірною методу для вирішення навігаційного завдання для локальних RTLS, але вплив радіо-перепон на якість моделювання робочих зон цих систем у роботі не проводиться. Визначення позицій рятувальників може забезпечуватися застосуванням GPS-модулів цифрової мобільної радіостанції системи IP Site Connect DP4401-Ex, що є на озброєнні підрозділів ОПС ДСНС, проте відомі параметри радіостанції не дозволяють враховувати реальний вплив втрат потужності сигналу на робочу зону позиціонування.

Для математичного моделювання робочої зони позиційної системи навігації можна використати загальну методику розрахунку [3], але така методика не враховує напівпрозорі перепони шляху розповсюдження радіохвиль (РРХ). Методологічні засади моделювання робочої зони району надзвичайної ситуації (НС) при впливі факторів хімічного ураження з урахуванням впливу природних факторів на розміри робочої зони створено у [4], проте при цьому вплив таких факторів, як міські будівлі, під час досліджень не розглянуто.

Розробку математичної моделі різнице-далекомірної системи локального позиціонування, яка у режимі реального часу дозволяє здійснювати прогнозування робочої зони системи з урахуванням будівельних перепон, проведено в роботі [5], але модель, що пропонується, не враховує різноманітність властивостей радіоперепон, що суттєво впливають на роботу системи. У роботі [6] проведено огляд умов поширення радіохвиль і сучасних методів моделювання, представлені нові погляди на популярні підходи до моделювання телекомунікаційних каналів такі, як стохастичне моделювання на основі канонічного та стандартизованих підходів, прийнятих Проектом партнерства 3-го покоління (3GPP), COST, та спільноти Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ), нові підходи до моделювання поведінки дрібномасштабного поширення радіохвиль, охоплюючи шляхи поширення плоских хвиль і розподілене дифузне розсіювання. Проте, при цьому не робиться поширення методів, що пропонуються на специфіку радіонавігаційної галузі.

Систему локального позиціонування на базі технології iBeacon для пожежної команди з метою відстеження та візуалізацію розташування рятувальників і людей, що потрапили в пастку, а також обміну інформацією портативними термі-

налами рятувальників і мобільних командних платформ запропоновано у [7], а у роботі [8] для випадку пошуково-рятувальних операцій запропоновано використання поряд з сигналами GPS, Wi-Fi та Bluetooth оптичного відеокompасу. При цьому особливості робочої зони системи при роботі у приміщеннях не досліджувалися.

У роботі [9] здійснено огляд бездротових технологій внутрішнього позиціонування, що можуть бути використані для навігації під час пожежі, проте питання забезпечення роботи радіонавігаційних пристроїв при наявності будівельних перепон в роботі не розглядалися.

Ряд робіт присвячено також дослідженню властивостей будівельних та інших матеріалів з точки зору послаблення електромагнітних хвиль. Так, у роботі [10] обговорюється низка поглиначів електромагнітних хвиль, що діють у вільному просторі і порожнинах, досліджуються властивості матеріалів при впливі сигналів у вузькій чи широкій смузі частот. Це дозволяє здійснювати моделювання роботи системи радіонавігації застосовуючи, наприклад, програмне середовище Borland C++Builder [11], але робота не містить рекомендацій щодо розрахунку робочої зони системи навігації при з'явленні напівпрозорих перепон на шляху поширення сигналів.

У зв'язку із цим, невирішеною частиною проблеми є відсутність моделей розповсюдження радіохвиль та алгоритмів прогнозування робочої зони RTLS-системи у залежності від кількості і властивостей напівпрозорих радіоперепон шляху розповсюдження сигналів для умов надзвичайної ситуації.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є розробка математичної моделі розрахунку робочої зони різнице-далекомірної RTLS-системи з урахуванням основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль робочої зони локальної RTLS-системи.

Для досягнення мети роботи були поставлені завдання:

– розробити класифікацію та загальний опис основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль математичної моделі оперативного розрахунку робочої зони RTLS-системи.

– перевірити працездатність розробленої математичної моделі оперативного прогнозування робочої зони RTLS-системи за відсутності та при наявності у зоні НС основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Як предмет дослідження при розробці класифікації напівпрозорих перепон розглядалися різновиди їх властивостей, що найчастіше зустрічаються на практиці. Оскільки основним фактором шкідливого впливу перепон на роботу системи позиціонування є поглинання радіосигналів, в якості робочого параметру цього впливу розглядався ступінь послаблення сигналу внаслідок впливу однієї або кількох перепон. Розробка практичної реалізації моделі оперативного прогнозування робочої зони RTLS-системи за відсутності та при наявності у зоні НС основних різновидів напівпрозорих перепон РРХ здійснювалася за допомогою методів математичного моделювання, геометричного проектування та оптимізації обчислювального процесу. Експериментальні дослідження проводились за допомогою програми «Зона РН RTLS-системи» [4] і були спрямовані на підвищення точності

та функціональності роботи даної програми при впливі на результати прогнозування моделей будівельних перепон району НС. Практичну модель системи прогнозування робочої зони RTLS-системи отримано за допомогою математичного апарату програмного середовища Borland C++Builder [11], а в якості обчислювальних засобів використовувалися персональні ЕОМ середньої продуктивності. Під час дослідження вважалося, що рухомі об'єкти і радіонавігаційні маяки знаходяться у межах робочої зони та є радіодоступними за відсутності будівельних перепон, якість роботи системи визначається впливом перепон на розповсюдження радіохвиль, а також точністю функціонування системи, яка переважно визначається її геометрією, тобто кількістю та відносним розташуванням її окремих елементів.

### **5. Розробка математичної моделі оперативного прогнозування робочої зони RTLS-системи**

Локалізація НС вимагає від оперативно-рятувальних підрозділів визначення таких параметри навігаційного забезпечення, як кількість, координати взаємного розташування РМ, параметри сигналів, що випромінюються, властивості перепон в районі НС. На підставі цих даних можуть бути задані умови розрахунку критеріїв (1)–(3) з урахуванням напівпрозорих перепон. Після розрахунку розмірів зони навігаційного забезпечення та нанесення границь роботи RTLS-системи на карту керівник ліквідації НС приймає управлінське рішення про необхідність залучення додаткових сил або засобів.

Як показують результати моделювання, якість радіонавігаційного забезпечення району НС в умовах міста суттєво залежить від якості врахування форми та властивостей перепон у межах робочої зони, кількості РМ, що застосовуються для забезпечення району НС, та їх взаємного розташування. Отримання одного суцільного рівняння при описі сукупних процесів з різною фізичною природою є недоцільним, в той же час поетапний опис загального процесу розповсюдження сигналів при впливі будівельних конструкцій дозволяє суттєво спростити процес моделювання без прийняття грубих припущень, що не тільки не знижує точність розрахунку, але і дозволяє врахувати більшу кількість вхідних параметрів.

Задля досягнення мети дослідження напівпрозорі перепони було поділено на лінійні та площадні (рис.1). До перших можуть бути віднесені напівпрозорі щодо перепускання електромагнітних хвиль (ЕМХ) будівельні стіни, огорожі та подібні до них плоскі вертикально розташовані конструкції, які мають невелику товщину, майже не займають під себе площу на поверхні, що досліджується, але можуть суттєво послаблювати ЕМХ у випадку їх перетинання.

Площадні об'єкти-перепони можуть займати площу у десятки гектарів в межах зони НС і мати складні форми, при цьому розрізняючись у властивостях перепускання ЕМХ від майже вільного до повного їх поглинання. Для площадних об'єктів ступіть послаблення, крім властивостей середовища, суттєво залежить і від довжини перетину траси РРХ площадним об'єктом – довжини відрізка траси з інтенсивним поглинанням ЕМХ. Крайнім випадком таких об'єктів є непрозорі, які повністю поглинають (відбивають) ЕМХ (рис.1). В таких зонах, очевидно, втрачається можливість RTLS-супроводження рухомих об'єктів і мають впроваджуватися інші методи їх забезпечення.

Якщо в межах напівпрозорого об'єкту можуть перебувати рухомий об'єкт (РО), тобто це "прохідна" перепона, представляє інтерес питання повноти RTLS-telecommunications and Radio Engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-10

забезпечення у межах відповідної території, оскільки окремі (більш віддалені від РМ) ділянки можуть випробувати недостатній рівень проходження сигналів порівняно з іншими, залежно від інтенсивності та довжини траси поглинання. Непрохідні перепони не вимагають забезпечення робочої зони на відповідній ділянці, але, як і прохідні, зменшують робочу зону системи поза своїми межами і можуть вимагати відповідних методів коригування цієї зони.

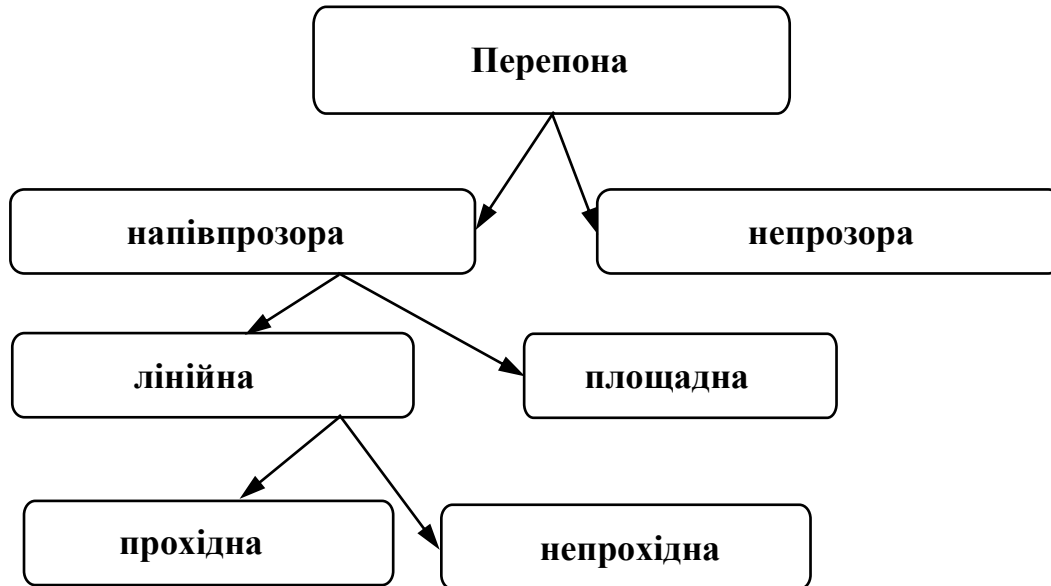


Рис. 1. Класифікація перепон розповсюдження радіохвиль моделі робочої зони RTLS-системи

Програмно площадний об'єкт може бути заданий на плоскості за допомогою геометричних фігур, форма яких добре апроксимує земну проекцію відповідного об'єкта (коло, прямокутник, трикутник та ін.), або як плоский багатокутник, контуром якого є замкнута ломана без самоперетинів, не обов'язково випуклий. Координати вершин такої ломаної дозволяють досить точно описати контур відповідної зони. Додатковим параметром зони поглинання є характеристика радіопрозорості для відповідного діапазону радіохвиль.

Для врахування наявних напівпрозорих перепон у програмній моделі [4] необхідно замінити критерій «максимальне геометричне віддалення ділянки місцевості від РМ, км» на енергетичний:

$$P_{\text{ВХ}} \geq P_{\text{МІН}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{МІН}}$  – чутливість радіонавігаційного приймача по потужності, дБ/Вт, а потужність сигналу на вході навігаційного приймача, дБ/Вт, у досить загальному випадку визначається виразом [3]:

$$P_{\text{ВХ}} = P_{\text{Т}} + G_{\text{Т}} + G_{\text{Р}} - (K_{\text{ВП}} + K_{\text{ТР}} + K_{\text{П}}) = P_{\text{const}} - 20 \lg(D) - K_{\text{П}}, \quad (2)$$

де  $P_{\text{Т}}$  – потужність передавача радіостанції, дБ/Вт;  $G_{\text{Т}}, G_{\text{Р}}$  – коефіцієнти підсилення антен передавача й приймача по потужності;  $K_{\text{ВП}} = 39,8 + 20 \lg(D) - 20 \lg(\lambda)$  – втрати потужності сигналу у вільному просторі;  $K_{\text{ТР}} \approx 0$  – втрати РРХ в атмосфері;  $K_{\text{П}}$  – втрати потужності сигналу у перепонах

шляху розповсюдження;  $P_{\text{const}} = P_T + G_T + G_R - 39,8 + 20\lg(\lambda) = \text{const}$  – енергетичний параметр, значення якого визначається параметрами навігаційних передавачів та приймачів й не залежить від властивостей траси РРХ і перепон, дБ.

Після підстановки (2) в (1) кінцево критерій радіонавігаційної доступності ділянки місцевості при наявності перепони подано у вигляді:

$$K_{\Pi} \leq P_{\text{const}} - P_{\text{MIN}} - 10\lg(D^2). \quad (3)$$

Значення параметру втрат у перепонах  $K_{\Pi}$  для лінійної перепони може бути задано типовим параметром втрат як, наприклад, у табл. 1 [3].

**Табл. 1. Ослаблення радіосигналу при проходженні скрізь перепону, дБ**

Матеріал перепони	Товщина перепони, см			
	20	40	60	80
Пінобетон	4	8	12	16
Цегла	6	12	18	24
Бетон	10	20	30	40
Залізобетон (ЗБ)	20	40	60	80

Для площадної перепони  $K_{\Pi}$  може бути визначений як добуток:

$$K_{\Pi} = k_{\text{прп}} \cdot D_{\text{прп}}, \quad (4)$$

де  $D_{\text{прп}}$  – довжини шляху РРХ у межах перепони, м;  $k_{\text{прп}}$  – питома згасання хвиль у перепоні, дБ/м (табл. 2).

**Табл. 2. Питоме загасання радіосигналу у перепонах  $k_{\text{прп}}$ , дБ/од. шл**

Матеріал перепони	Чагарник	Ліс	Будівельний майданчик	Міська забудова середньої щільності	Міська забудова високої щільності
Загасання	0,1	0,3	0,5	0,7	1

Властивості таких об'єктів можуть бути задані програмно описом межі об'єкта і параметром питомого згасання  $k_{\text{прп}}$ . Задачу моделі оперативного розрахунку робочої зони RTLS-системи, що полягає у визначенні довжини шляху РРХ у перепоні, можна вирішити за відомими геометричними співвідношеннями та розрахованими даними о координатах точок перетину лінії РРХ з межами відповідної перепони.

Зазначені методики розрахунку поля у просторі відносяться до відкритих об'єктів, що значно перевищують розміром довжину хвилі. Застосування систем УКХ радіозв'язку всередині приміщень або будівель викликають необхідність в аналізі та розрахунку поширення поля у специфічних умовах приміщень.

Поширення радіохвиль усередині будівель має специфічні риси, пов'язані із середовищем поширення. На відміну від вільного простору, неможливо для обсягу всередині будівлі визначити діелектричну або магнітну проникність середовища. Параметри середовища поширення змінюються дуже сильно на дуже невеликих відстанях, як, наприклад, при міжповерховому поширенні. В результаті, поширення радіохвиль в будівлях дуже сильно залежить від таких специфічних характеристик, як тип конструкційний матеріал будівлі, наявність в стінах будівлі металу,

кількості поверхів у будинку, щільність розміщення обладнання в будівлі і т.п.

Одним з типових варіантів напівемпіричної формули для розрахунку загасання радіохвиль у будівлі є залежність [7]:

$$P=L(d_0)+10\cdot n\cdot\log(d/d_0)+\sigma, \quad (5)$$

де  $n=2\dots3$ ,  $\sigma=5\dots10$  дБ.

Дисперсія помилки при розрахунку за формулою (5) досягає 13 дБ.

Наявність у зоні НС будівельних конструкцій призводить до з'явлення в цій зоні додаткових провалів (ділянок незабезпечення) у місцях, де умови прийому радіонавігаційних сигналів в наслідок впливу таких конструкцій стають незадовільними, або точність визначення місцеположення стає нижчою за поріг  $\sigma_{\text{ГМАХ}}$ . Основними ефектами, які можуть визивати будівельні перепони, є неможливість прийому (втрата) сигналу радіонавігаційного маяка (РМ) або суттєве скорочення робочої зони РМ внаслідок суттєвого скорочення граничної відстані РО від РМ, за якої якість прийому сигналів залишається задовільною.

## 6. Перевірка працездатності моделі оперативного прогнозування робочої зони RTLS-системи

Для урахування в алгоритмі прогнозування робочої зони RTLS-системи напівпрозорих перепон РРХ до складу алгоритму необхідно увести додатковий модуль, в якому визначається тип перепони і величина загасання сигналу, що створює відповідна перепона. Для перевірки практичної реалізації алгоритму було здійснено доопрацювання комп'ютерної програми "Зона РН RTLS-системи" [4]. Реалізацію робочої моделі було забезпечено створенням додаткових модулів, що імітують довільно розташовану у межах робочої зони НС будь-яку кількість РМ, непрозорих та напівпрозорих перепон (практично це зручно робити маніпулятором "миша"), а також забезпечено оперативну зміну параметрів  $K_{\text{ГМАХ}}$  та  $D_{\text{МАХ}}$ . Дослідження впливу перепон на форму робочої зони вимагає побудови поряд із зоною, яка визначається впливом перешкод, також контурів робочої зони, яка має місце за відсутності перепон (рис. 2).

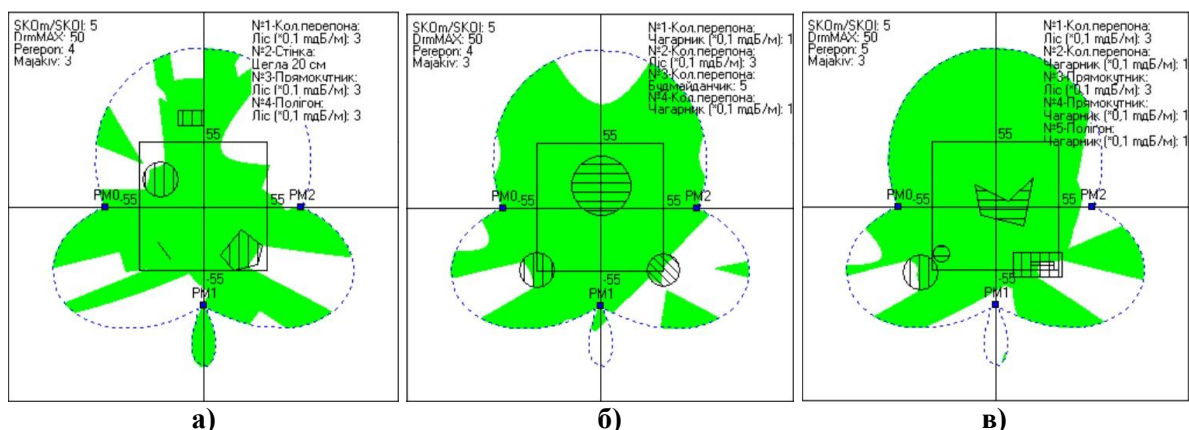


Рис. 2. Робоча зона RTLS-системи при наявності: а) 4 перепон перетину типу "коло", "стінка", "прямокутник" та "багатокутник"; б) 3 колових перепон з різних матеріалів; в) перепони складної форми

Під час експериментального дослідження алгоритму використовувалися просторові комбінації з 3–4 РМ, за наявності яких перевірявся вплив форми пере-

пони та її параметрів на форму робочої зони. Для дослідження впливу напівпрозорих перепонов на робочу зону у розрахункову зону вводилося додатково від трьох до п'яти перепонов різної форми, в тому числі досліджувалися (рис. 2, (а) – (в)): вплив на форму робочої зони перепонов з різних матеріалів, вплив на форму робочої зони перепонов різної форми, вплив на форму робочої зони форми перепонов та їх сполучення.

Отримані результати у цілому підтвердили можливість використання методів врахування напівпрозорих перепонов, що подано вище, в моделі прогнозування робочої зони RTLS-системи району НС.

## **7. Обговорення результатів моделювання наявності основних різновидів напівпрозорих перепонов розповсюдження радіохвиль**

Отримані під час моделювання результати доводять, що вплив будівельних перепонов на вигляд робочої зони в цих умовах може бути важко передбачуваним. Використання розробленої моделі розрахунку робочої зони RTLS-системи для оперативного прогнозування і корегування відповідної зони в умовах міста дозволяє оперативно вирішувати цю проблему.

Алгоритм розрахунку складається з трьох ієрархічних рівнів, зв'язаних прямими зв'язками. На першому етапі (рівні) знаходиться блоки, що забезпечують отримання та систематизацію інформації про особливості фрагмента робочої зони, що аналізується. Для проведення якісного прогнозування робочої зони RTLS-системи необхідно отримати точну інформацію про основні фізичні параметри середовища РРХ та перепонов. Також керівник ліквідації надзвичайної ситуації повинен володіти даними про технічне оснащення, що є у розпорядженні сил та засобів швидкого реагування.

На другому етапі відбувається розрахунок досяжності фрагменту, що розглядається, для засобів радіонавігаційного забезпечення. За результатами розрахунку наведених критеріїв визначається можливість забезпечення відповідної ділянки місцевості.

Для якісної оцінки впливу перепонов, ефективності уведення додаткових РМ на робочу зону, оцінки якості розміщення і геометрії системи потрібні відповідні критерії втрат або оптимізації RTLS-системи.

У зв'язку з переважно малою площею районів ліквідації НС, що виникають на практиці, модель було обмежено припущенням про розташування РО та РМ в одній площині, не враховуючи сферичний характер земної поверхні, але подальше вдосконалення моделі дозволяє усунути це обмеження. Властивості багатьох перепонов обмежують дальність РРХ лише частково, тобто мають напівпрозорий характер, тому під час досліджень вимагається більш досконале врахування властивостей перепонов, що мають часткового перепускання ЕМХ, а на випадок, якщо через умови траси РРХ робоча зона РНС є незадовільною, можуть бути передбачені технічні або організаційні методи навігаційного забезпечення, такі, як установка додаткових РМ, або зміна позицій тих, що використовуються. Розробка відповідних рекомендацій вимагає додаткових досліджень і може бути проведена з використанням створеної моделі.

## **8. Висновки**

1. Розроблено математичну модель робочої зони локальної різнице-далекомірної RTLS-системи з урахуванням основних різновидів напівпрозорих



перепон розповсюдженню радіохвиль. Враховано умови розповсюдження височастотних сигналів, що визначають якість позиціонування та точності характеристики системи, розроблено класифікацію та загальний опис основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль моделі оперативного розрахунку робочої зони RTLS-системи. Розроблено критерій та загальну методику оперативного розрахунку робочої зони локальної різнице-далекомірної RTLS-системи з урахуванням основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль, що реалізує запропоновану методику. Поетапний підхід дозволив побудувати алгоритм і програмне забезпечення моделі з урахуванням основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль. На першому етапі забезпечується отримання та систематизацію інформації про особливості фрагмента робочої зони, що аналізується. На другому відбувається розрахунок досяжності фрагменту, що розглядається, для засобів радіонавігаційного забезпечення з урахуванням властивостей шляху розповсюдження радіохвиль. На третьому етапі визначається досяжність ділянки місцевості для роботи RTLS-системи.

2. Експериментально підтверджено відповідність роботи моделі системи оперативного прогнозування робочої зони "Зона RTLS-системи" за відсутності та при наявності у зоні НС основних різновидів напівпрозорих перепон розповсюдження радіохвиль. Загальний вплив напівпрозорих перепон на форму робочої зони RTLS-системи має складнопередбачуваний характер. Реальне зменшення робочої зони під впливом кількох непрозорих перепон може досягати 90 %, якщо вплив подібних факторів не враховано. На випадок, якщо через умови траси розповсюдження радіохвиль робоча зона є незадовільною, можуть бути передбачені інші технічні або організаційні методи навігаційного забезпечення.

### Література

1. GPS monitoring system. System "SMOK" in the fire service. 2018. URL: <https://www.eltegps.com/pdf/Systems-implementations-for-Polish-State-Fire-Service.pdf>
2. Professional digital two-way radio MotoTRBO™DP4401 EX non-display portable user guide. 2015. 62 p. URL: [https://krikam.net/upload/iblock/81f/MotoTRBO\\_DP4401\\_Ex\\_instr\\_rus.pdf](https://krikam.net/upload/iblock/81f/MotoTRBO_DP4401_Ex_instr_rus.pdf)
3. Загора О. В., Фещенко А. Б., Борисова Л. В. Дальність мобільного радіозв'язку системи IP Site Connect в умовах міста. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2020. № 2(32). С. 89–99. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/14523/1/ПНС%2c%20%2832%29.pdf>
4. Загора О. В., Борисова Л. В., Фещенко А. Б., Михайлик В. О. Моделювання робочої зони локальної RTLS-системи району надзвичайної ситуації. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 2(34). С. 144–153. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/34/11.pdf>
5. Кустов М. В., Басманов О. Є., Мельниченко А. С. Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2020. № 2(32). С. 145–157. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/32/1/kustov.pdf>
6. Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond. Edited by Claude Oestges, Electrical Engineering School of Engineering – Ecole Polytechnique de Lou-

vain, Université catholique de Louvain. Louvain, Belgium. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205815000080>

7. Linjun Yu, Yalan Liu, Tianhe Chi, Lin Peng. An iBeacon-based indoor and outdoor positioning system for the fire emergency command. Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS). IEEE. 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8075148>

8. Vamsi Karthik Vadlamani, Manish Bhattarai, Meenu Ajith, Manel Martinez-Ramon. A Novel Indoor Positioning System for unprepared firefighting scenarios. Electrical and Computer Engineering. University of New Mexico. Albuquerque. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.01344>

9. Lei Niu. A Survey of Wireless Indoor Positioning Technology for Fire Emergency Routing. Lanzhou Jiaotong University. 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/263019395\\_A\\_Survey\\_of\\_Wireless\\_Indoor\\_Positioning\\_Technology\\_for\\_Fire\\_Emergency\\_Routing](https://www.researchgate.net/publication/263019395_A_Survey_of_Wireless_Indoor_Positioning_Technology_for_Fire_Emergency_Routing)

10. Costa F., Monorchio A., Manara G. Theory, design and perspectives of electromagnetic wave absorbers. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2016. № 2. Vol. 5. P. 67–74.

11. Scotts Valley. Borland C++Builder Developer's Guide. Borland Software Corporation 100 Enterprise Way. 2013. URL: [http://it.onat.edu.ua/docs/1\\_\[ENGLISH\]\\_C++\\_Borland\\_Builder\\_VCL\\_Book.pdf](http://it.onat.edu.ua/docs/1_[ENGLISH]_C++_Borland_Builder_VCL_Book.pdf)

*A. V. Zakora, PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*

*A. B. Feshchenko, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department  
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine*

#### **ACCOUNTING OF SEMI-TRANSPARENT OBSTACLES IN THE MODEL OF WORKING ZONE OF THE RTLS-SYSTEM OF THE EMERGENCY AREA**

A mathematical model of the main types of translucent barriers of the differential-range-measurement system of local positioning has been developed, which allows for real-time forecasting of the working area of the system in the vicinity of an emergency situation. The characteristics of translucent barriers, which determine the quality of positioning and the accuracy characteristics of the system, are taken into account. To simplify the modeling, a number of assumptions are made regarding the parameters of the obstacles and the conditions of radio wave propagation, which make it possible to simplify the forecasting process. On the basis of the conducted research, classification and methods of mathematical description of the main types of barriers are proposed, which is proposed to be used as the basis of a mathematical forecasting model. On the basis of this classification, calculation algorithms and a program for operational forecasting of the working zone of local positioning have been developed, which allows taking into account the influence of the number of obstacles, the geometry of their location, and the properties of the radio wave propagation path on the shape of the working zone. In the modeling process, both geometric and general physical regularities of the formation of the field of radio navigation support are taken into account. A study of the operation of the modeling system in the presence of several radio beacons, with the presence of several construction barriers of different shapes and with different properties within the working area, was conducted. The developed mathematical model allows for the calculation of positioning zones with the determination of the limit conditions of reliability and accuracy of navigation support for rescuers. Taking into account the process of forecasting the impact of the shape and properties of obstacles in the emergency zone on the type and size of the working zone of the positioning system allows the head of emergency response works to make a justified management decision, ensure safe working conditions for rescuers and optimize the organization of work for the fastest emergency response.

**Keywords:** RTLS-system, local positioning, translucent barrier, geometric factor, propagation of radio waves

## References

1. GPS monitoring system. System "SMOK" in the fire service. (2018). Available at: <https://www.eltegps.com/pdf/Systems-implementations-for-Polish-State-Fire-Service.pdf>
2. Professional digital two-way radio MotoTRBO™DP4401 EX non-display portable user guide. (2015), 62. Available at: [https://krikam.net/upload/iblock/81f/MotoTRBO\\_DP4401\\_Ex\\_instr\\_rus.pdf](https://krikam.net/upload/iblock/81f/MotoTRBO_DP4401_Ex_instr_rus.pdf)
3. Dalnist mobilnoho radiozviazku systemy IP Site Connect v umovakh mista. (2020). Problems of Emergency Situations, 2(32), 89–99. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/14523/1/PNS%2c%202%2832%29.pdf>
4. Zakora, O. V., Borysova, L. V., Feshchenko, A. B., Mykhailyk, V. O. (2021). Modeliuvannia robochoi zony lokalnoi RTLS-systemy raionu nadzvychainoi sytuatsii. Problems of Emergency Situations, 2(34), 144–153. Available at: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/34/11.pdf>
5. Kustov, M. V., Basmanov, O. Y., Melnychenko, A. S. (2020). Modeliuvannia zony khimichnoho urazhennia v umovakh lokalizatsii nadzvychainoi sytuatsii. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 2(32), 145–157. Available at: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/32/1/kustov.pdf>
6. Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond. (2021). Edited by Claude Oestges, Electrical Engineering School of Engineering - Ecole Polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain. Louvain, Belgium. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205815000080>
7. Linjun, Y., Yalan, L., Tianhe, C., Lin, P. (2017). An iBeacon-based indoor and outdoor positioning system for the fire emergency command. Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS). IEEE. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8075148>
8. Vamsi, K. V., Manish, B., Meenu, A., Manel, M.-R. (2020). A Novel Indoor Positioning System for unprepared firefighting scenarios. Electrical and Computer Engineering. University of New Mexico. Albuquerque, 14. Available at: <https://arxiv.org/abs/2008.01344>
9. Lei, N. (2014). A Survey of Wireless Indoor Positioning Technology for Fire Emergency Routing. Lanzhou Jiaotong University. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/263019395\\_A\\_Survey\\_of\\_Wireless\\_Indoor\\_Positioning\\_Technology\\_for\\_Fire\\_Emergency\\_Routing](https://www.researchgate.net/publication/263019395_A_Survey_of_Wireless_Indoor_Positioning_Technology_for_Fire_Emergency_Routing)
10. Costa, F., Monorchio, A., Manara, G. (2016). Theory, design and perspectives of electromagnetic wave absorbers. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2, 5, 67–74.
11. Scotts, V. (2013). Borland C++Builder Developers Guide. Borland Software Corporation 100 Enterprise Way. Available at: [http://it.onat.edu.ua/docs/1\\_\[ENGLISH\]\\_C++\\_Borland\\_Builder\\_VCL\\_Book.pdf](http://it.onat.edu.ua/docs/1_[ENGLISH]_C++_Borland_Builder_VCL_Book.pdf)

Надійшла до редколегії: 20.10.2022

Прийнята до друку: 17.11.2022