

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17>

УДК 621.396

**Беляков Роберт Олегович**, к.т.н., доцент, докторант

<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

**Фесенко Олексій Дмитрович**, викладач

<https://orcid.org/0000-0002-2114-5327>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

## МОДЕЛЬ МОБІЛЬНОСТІ НАЗЕМНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**Беляков Р.О., Фесенко О.Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення.**

Проведено аналіз існуючих моделей мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж типу Ad-Hoc. У статті показано, що застосування існуючих моделей мобільності для опису наземної радіомережі спеціального призначення не враховує особливості функціонування в різних географічних районах із певними особливостями рельєфу. Встановлено, що перешкоди на місцевості, непрохідні, заміновані райони, інші особливості поля бою можуть впливати на фізичну швидкість та напрям руху наземних комунікаційних вузлів, а в результаті прогнозування – оцінку метрик маршрутизації (відстаней до сусідніх вузлів, географічних координат тощо). Для врахування фізичної швидкості пропонується застосовувати розроблений коефіцієнт маневреності, а для визначення зон функціонування – ранги мобільних користувачів. Управління положенням мобільних базових станцій пропонується здійснювати у відповідності до цільових функцій управління наземною комунікаційною мережею в автоматичному режимі за децентралізованим принципом. Застосування розробленої моделі прогнозовано зменшить обсяг службової інформації про стан мережі та дозволить підвищити ефективність інформаційного обміну.

**Ключові слова:** модель мобільності, наземна комунікаційна мережа, мобільна базова станція, мобільний користувач, фізична швидкість, система управління, прогнозування.

**Bieliakov R., Fesenko O. Mobility model of a special purpose terrestrial communication network.** An analysis of the existing models of the mobility of nodes of terrestrial communication networks of the Ad-Hoc type was carried out. The article shows that the use of existing mobility models for the description of a special purpose terrestrial radio network does not take into account the peculiarities of functioning in different geographical areas with certain features of the terrain. It has been established that obstacles on the terrain, impassable, mined areas, other features of the battlefield can affect the physical speed and direction of movement of ground communication nodes, and as a result of forecasting, the estimation of routing metrics (distances to neighboring nodes, geographic coordinates, etc.). To take into account the physical speed, it is proposed to use the developed coefficient of maneuverability, and to determine the functioning zones - the ranks of mobile users. Management of the position of mobile base stations is proposed to be carried out in accordance with the target functions of managing the terrestrial communication network in automatic mode according to the decentralized principle. Application of the developed model is predicted to reduce the amount of service information about the state of the network and increase the efficiency of information exchange.

**Keywords:** mobility model, terrestrial communication network, mobile base station, mobile user, physical speed, control system, forecasting.

### Постановка наукового завдання.

При імітаційному моделюванні процесів інформаційного обміну в комунікаційних мережах класу MANET (рис. 1), одним із найважливіших етапів є вибір серед існуючих, адаптація їх до конкретних умов функціонування або розробка нових моделей мобільності (ММ).

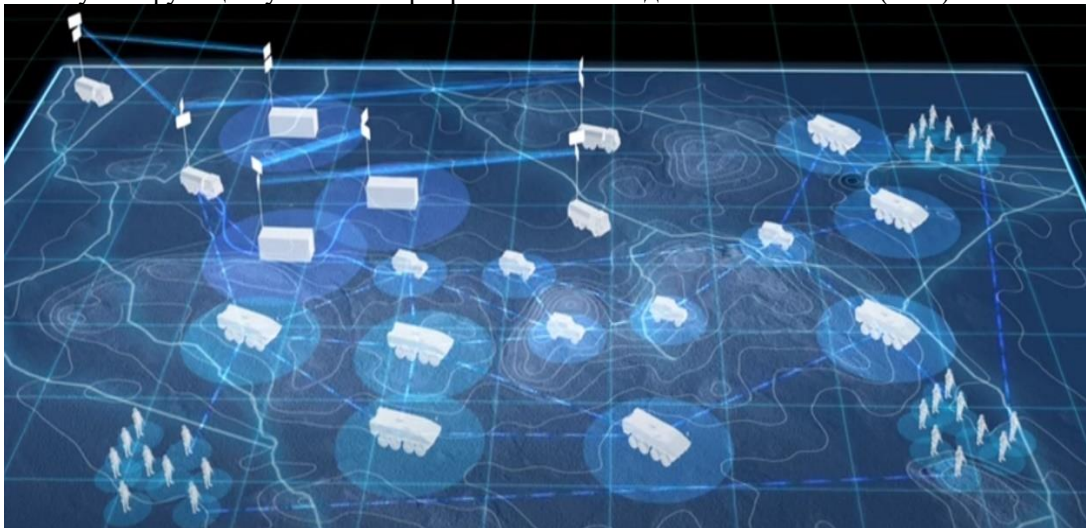


Рис. 1 – Варіант застосування Software Defined Radio в мережах класу MANET [1]

Під мобільністю вузлів Ad-Hoc мереж потрібно розуміти випадковий характер їх руху (напрямки, величини фізичної швидкості та прискорення, періодичність, зони типового переміщення), рівень автономності вузлів (переміщення самостійно або в складі групи), час зупинок тощо.

У зв'язку із тим, що першим етапом процесу управління мобільною комунікаційною мережею є збір та в подальшому оновлення інформації про місцезнаходження мобільних користувачів, для імітаційного моделювання процесів інформаційного обміну необхідно здійснити адекватне представлення ММ. Це дозволяє: по-перше, максимально точно сформулювати вихідні дані – метрики позиціонування, необхідні для дослідження процесів маршрутизації в Ad-Hoc мережах; по-друге, дозволить здійснювати прогноз якості інформаційного обміну, та управління маршрутизацією в умовах типових сценаріїв переміщення мобільних користувачів.

Таким чином, **актуальним** є завдання розробки нової моделі мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального (військового призначення) для забезпечення заданої якості інформаційного обміну з урахуванням рельєфу місцевості.

**Метою статті** є розробка моделі мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж спеціального (військового) призначення.

**Об'єктом дослідження** є процеси переміщення та інформаційного обміну в наземних комунікаційних мережах спеціального (військового призначення). Відповідно, **предметом дослідження** є моделі мобільності комунікаційних вузлів наземних комунікаційних мереж військового призначення.

Основними завданнями статті є наступні:

1. Аналіз існуючих моделей мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж типу Ad-Hoc.
2. Дослідження особливостей застосування існуючих ММ для опису наземної радіомережі спеціального призначення.
3. Формалізація запропонованої моделі мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж спеціального (військового призначення).

**Аналіз останніх публікацій.** Більшість проаналізованих наукових праць із предметної області були спрямовані на вирішення задач оновлення даних про місцезнаходження мобільних вузлів. Наприклад в мережі Personal Communication System – PCS [2], оновлення місцезнаходження повинно виконуватися кожного разу, коли мобільний користувач переходить до іншої зони мережі. Коли є необхідність передачі даних, мережа спрямовує пакети до останнього відомого місцезнаходження мобільного користувача. Проте, з урахуванням фізичного середовища інформаційного обміну, стохастичного характеру руху мобільних користувачів, необхідно забезпечити процес прогнозування для оновлення даних про місцезнаходження [3-6]. Ці роботи мають недоліки, які пояснюються наступним чином:

Зазвичай [7, 8] моделі прогнозування ґрунтуються на розподілі ймовірностей швидкості та напрямку мобільного користувача. Для збору такої інформації зазвичай застосовуються модулі Global Position System (GPS).

Більшість методів, досліджуваних у цих роботах, дуже чутливі до змін шляху мобільного користувача, що водночас знижує точність прогнозування у випадку підвищення рівня шумів каналу приймач GPS – Satellite. Ці методи не розрізняють випадковий і регулярний характер зміни даних про фактичне місцезнаходження мобільних користувачів. Загальна ідея методу [9] полягає в розрізненні регулярних і випадкових складових руху користувача.

В загальному випадку, реальні моделі мобільності користувачів для побудови Ad-hoc однорангових мереж дуже складні, і потребують детального об'єктно-орієнтованого опису. Тому виникає необхідність розробки нової моделі мобільності, яка дозволить описати множину типових станів мобільних користувачів наземних комунікаційних мереж військового призначення з урахуванням наявних ресурсів та умов функціонування.

**Постановка задачі.** Розглядається наземна комунікаційна мережа (НМ) спеціального (військового призначення) значної розмірності (десятки, сотні мобільних вузлів), які випадково розташовані на заданій території, і функціонують при відсутності будь-якої комунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен наземний комунікаційний вузол (НКВ) описується як об'єкт, що має: певний тип носія (людина – мобільний користувач (МК), транспортна платформа – мобільна базова станція (МБС)), батарея, процесор, пам'ять, прийомо-передавач, антена, система позиціонування, систему управління (СУ).

В процесі функціонування МК змінює своє місцезнаходження та здійснює інформаційний обмін заданого типу трафіка.

СУ мобільних користувачів, реалізують процес збору даних власного стану (місцезнаходження, каналної пропускної здатності, часу затримки доставки повідомлень тощо), з метою формування управляючих впливів СУ мобільних базових станцій для забезпечення функціонування НМ в динамічних умовах із заданим рівнем якості.

Існуюча система управління МБС на транспортних платформах забезпечує прогнозування стану наземної комунікаційної мережі в зоні радіозв'язності МБС та формує управляючі рішення щодо зміни місця розташування і оптимізації використання мережевих і каналних ресурсів (рис. 1), проте на сьогоднішній день відсутні механізми управління МБС з урахуванням реальної фізичної швидкості з урахуванням рельєфу.

Таким чином, виконання функцій, що класично виконуються посадовими особами центру управління мережею (ЦУМ) пропонується здійснювати в автоматичному режимі в реальному часі з урахуванням рельєфу місцевості та динамічної топології за рахунок систем управління МБС (самостійно приймати рішення по кластеризації, маршрутам переміщення, розподілу ресурсів тощо), та реалізувати принцип децентралізації управління НМ (в умовах відсутності зв'язності з наземним центром управління мережею).

*Задано:*

- площа розташування вузлів НМ –  $\Theta_{\text{НМ}}$ ; кількість вузлів мережі  $N_{\text{НМ}}$ , координати розміщення з урахуванням рельєфу  $(x_i, y_i, z_i)$   $i$ -ого вузла мережі;  $O_i^{\text{НМ}}(t)$  – об'єм інформації  $i$ -го вузла комунікаційної наземної мережі;

- технічні характеристики вузла – тип носія комунікаційних засобів, ємність батареї, витрати енергії на одиницю переміщення (для МБС на транспортних платформах) тощо;

- комунікаційні характеристики вузла НМ – параметри антенних пристроїв, прийомо-передавача, витрати енергії на біт прийому та передачі даних для обраного MAC-протоколу та типу обладнання, протокол маршрутизації каналного рівня тощо;

- характеристики мобільності – швидкість, висота, час функціонування, прискорення та ін.

*Обмеження та вимоги:*

- площа переміщення мобільних вузлів від задач підрозділу в якому реалізується процес інформаційного обміну;

- інформація про параметри стану вузлів (координати розміщення, рівень енергії батареї, об'єм даних) збирається при первинному обміні hello-пакетами, та оновлюється згідно алгоритму вибраного протоколу каналного рівня;

- наземні комунікаційні вузли мають радіозасоби з однаковим MAC-протоколом, який дозволяє змінювати швидкість передачі даних в залежності від співвідношення сигнал/шум ("дальності радіоканалу") та регулювати потужність передачі (витрати енергії на передачу) [14], наприклад, IEEE 802.11;

- значення енергії батареї вузлів НМ достатній на час моделювання.

**Необхідно:** розробити модель мобільності наземної комунікаційної мережі з урахуванням фізичної швидкості наземних вузлів, що забезпечить виконання функцій управління [10] в автоматичному режимі.

**Аналіз існуючих моделей мобільності.**

**Random Waypoint Mobility Model (RWMM)** – модель мобільності випадкового шляху точки. Така модель мобільності [9] описує випадковий характер переміщення мобільного користувача (вузла наземної комунікаційної мережі) на заданій площині (рис. 2).

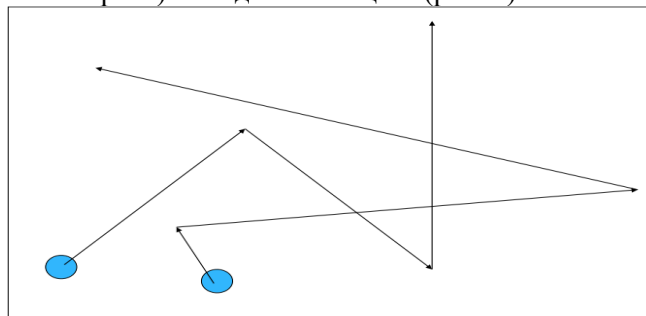


Рис. 2 – Random Waypoint Mobility Model (RWMM)

Відповідно до концепту така модель відображає переміщення вузлів обираючи напрям переміщення та швидкість, вибрану із діапазону  $[0, v_{\max}]$  для переміщення до деякої точки заданої площі – пункту призначення. Після досягнення пункту призначення вузол зупиняється на деякий час, що визначається параметром  $T_{stop}$  – час паузи. Ця процедура повторюється до завершення моделювання.

**Random Walk Model (RWK)** – модель випадкового блукання. Така модель є подібна до RWMM, але по-перше, представляє рух вузлів що змінюють свою швидкість/напрямок з інтервалом моделювання -  $T_{slot}$ . По-друге, новий напрям вектору швидкості вибирається випадковим чином між  $(0, 2\pi]$ . Крім того, швидкість оновлюється за рівномірним (Гаусовським) розподілом. Коли вузол досягає межі заданої області, повертається назад (рис. 3).

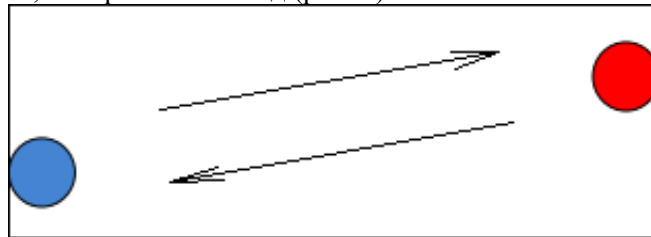


Рис. 3 – Random Walk Mobility Model (RWM)

**Reference Point Group Mobility Model (RPGM)** – модель групової мобільності контрольної точки (RPGM) [13-15]. В такій моделі (рис. 4) сусідні вузли об'єднуються в групи, а її умовний центральний або реальний центральний вузол –лідер групи, визначає напрям групового руху. Рух лідера відбувається за випадковою точкою шляху. Члени групи слідкують за напрямком і швидкістю руху лідера і пересуваються поруч із деяким відхиленням напрямку і швидкості але в межах деякого групового радіусу. Формально, вектор руху вузла  $i$  в час  $t$ ,  $V_i^t$  може бути описаний як:

$$V_i^t = V_{group}^t + RM_i^t \quad (1)$$

З рівняння (1), вектор руху  $RM_i^t$  є випадковим вектором вузла  $i$ , який відхиляється від своєї власної опорної точки. Вектор  $RM_i^t$  є незалежним, однаково розподіленим випадковим процесом, довжина якого рівномірно розподілена в інтервалі  $[0, r_{\max}]$ , де  $r_{\max}$  - це максимальна відстань від опорної точки) і чий напрямок рівномірно розподілений в інтервалі  $[0, 2\pi]$ . Така модель найчастіше застосовується для опису руху бригад рятувальників або військових підрозділів рівня відділення/взвод.

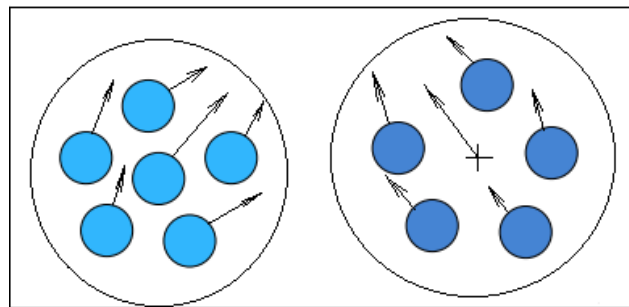


Рис. 4 – Random Walk Mobility Model (RWM)

Агентство перспективних оборонних досліджень Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) класифікувало рухову поведінку вузлів для моделювання військових операцій та дій рятувальників на три категорії на основі RPGM [9]:

1. Модель мобільності на місці: уся площа поділена на кілька суміжних районів. Кожен район займає виключно одна група. Наприклад, при штурмових діях в будинку, або у заданому квадраті.
2. Накладання груп мобільності: різні групи з різними завданнями переміщуються в одному полі накладаючись. Наприклад, дії різнорідних підрозділів в межах одного району.
3. Конвенційна модель мобільності: імітується поведінка мобільності в декількох районах, а деякі групи можуть переміщуватись між ними.

Однак модель RPGM має недоліки: По-перше, він повинен знати повну інформацію про склад групи, мету, швидкості вузлів тощо. У реальних умовах це суттєво збільшує кількість службової інформації. По-друге, місцезнаходження кожного мобільного вузла визначається своїми фізичними координатами. Враховуючи високу динаміку зміни топології мережі мобільних користувачів (високі

швидкості та прискорення, час зупинок реальних носіїв радіозасобів для виконання завдань), розрізнити шаблони руху групи вузлів стає дуже складним завданням. Тому застосування RPGM для імітаційного моделювання в реалістичних середовищах не доцільно і потребує удосконалення.

**Reference Velocity Group Mobility Model (RVGM)** – модель еталонної швидкісної групової мобільності описана в [12, 13] є розширеною моделлю RPGM, в якій запропоновано використовувати швидкість руху, як основну метрику переміщення групи мобільності та мобільних вузлів. Рух вузла виражається вектором швидкості

$$V = (V_x, V_y)^T,$$

де  $V_x$  та  $V_y$  позначають компоненти швидкості по осі  $x$  та  $y$  відповідно.

У моделі RVGM, вектор швидкості  $i$ -го вузла в  $j$ -й групі має вигляд:

$$V_{i,j}(t) = W_{i,j}(t) + U_{i,j}(t) \quad (2)$$

де  $W_{i,j}(t)$  і  $U_{i,j}(t)$  – групова швидкість і локальна швидкість векторів відхилення вузла відповідно. Модель мобільності на основі векторів швидкості усуває недоліки моделі RPGM, і спрощує адаптацію до зміни топології мережі. Це пояснюється не врахуванням географічних координат в RPGM. Натомість, в моделі RVGM, враховуються географічні координати для опису швидкості переміщення вузлів. Вона дозволяє описувати рух кожного вузла з випадковою початковою швидкістю та напрямком, але з певними обмеженнями на максимальну швидкість і мінімальний час переміщення між двома точками.

Так, RVGM не враховує ефект від рельєфу місцевості, тобто фізичну швидкість (можуть з'явитися перешкоди на місцевості, непрохідні, заміновані райони, інші особливості поля бою). На рисунку 5 зображено 3D модель рельєфу місцевості побудована у інтерактивному середовищі Wolfram розміром 3\*5 км із перепадом по висоті в 300 метрів.

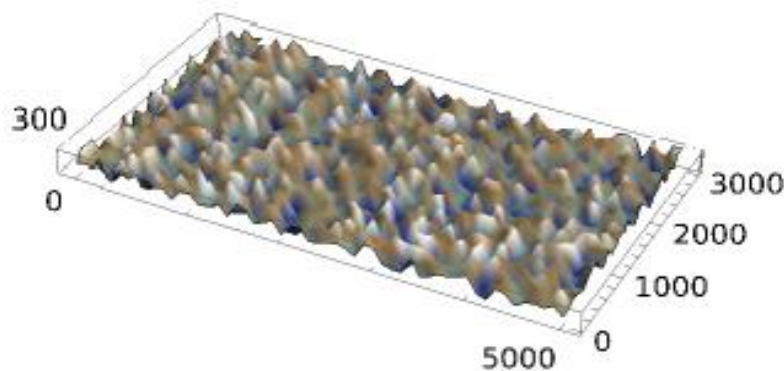


Рис. 5 – 3D-модель довільної ділянки місцевості

Разом з тим імітаційне моделювання вузлів у двовимірному просторі може суттєво впливати на процес передачі даних, через відсутність можливості правильного вибору фізичних параметрів радіопристроїв, вибору оптимального маршруту, фізичну дальність до сусідніх вузлів, відсутність прямої видимості (рис. 6) тощо.



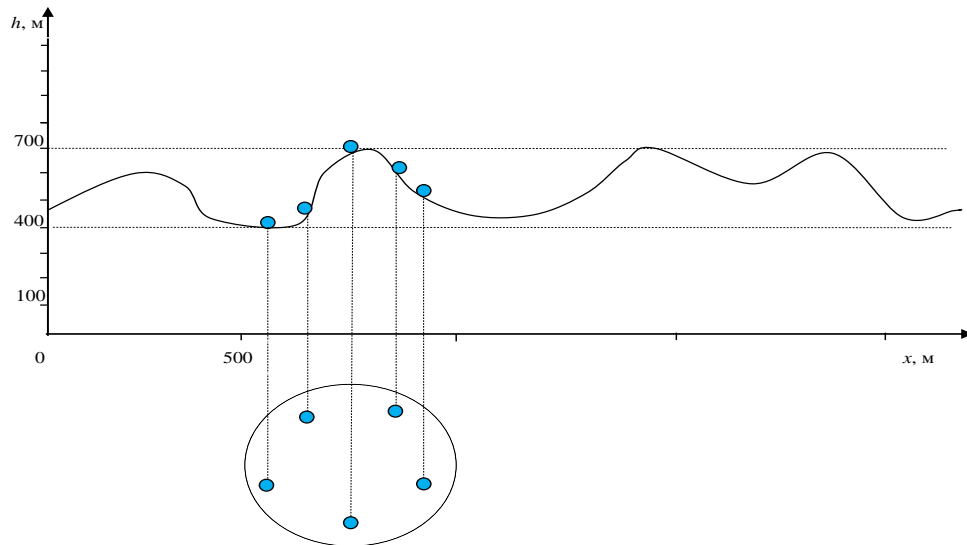


Рис. 6 – Проекція прямокутних координат вузлів (мобільних користувачів) на профіль довільного маршруту 3D ділянки місцевості

Аналіз існуючих моделей показав, що проаналізовані моделі мобільності не враховують особливості функціонування в умовах динамічної топології, а саме вплив рельєфу місцевості на мобільність вузлів (характер зміни напрямку і швидкості руху). Це може призвести до обміну хибними метриками маршрутизації (відстані до сусідніх вузлів, або помилковими координатами місцезнаходження вузлів тощо), і як наслідок, втрати пакетів.

#### Розробка моделі мобільності наземної комунікаційної мережі

Для усунення недоліків метою узагальнення залежності фізичної швидкості від фізичних перешкод на шляху мобільного користувача, і опису швидкості в 3D просторі, пропонується:

- Ввести поняття *коефіцієнта маневреності*  $K_{man}$ . Цей коефіцієнт визначає на скільки змінюється швидкість вузла в залежності від типу і розміру перешкоди. Наприклад, якщо вузол зіткнувся з горою або будівлею, його швидкість може знизитися аж до зупинки, а маршрут відхилитись на величину радіусу перешкоди, з метою її огинання.

Введення коефіцієнта маневреності  $K_{man}$  може бути реалізовано через модифікацію швидкості вузла в залежності від перешкоди. Це може бути виражено наступною формулою:

$$V_{i,j}(t + 1) = V_{i,j}(t) \cdot (1 - K_{man} \cdot E_{obstacle}),$$

де  $V_{i,j}(t + 1)$  – оновлена швидкість  $V_{i,j}(t)$   $i$ -го вузла  $j$ -ої групи після зіткнення із перешкодою,  $K_{man}$  – коефіцієнт маневреності, який визначає ступінь зменшення швидкості вузла,  $E_{obstacle}$  – функція, яка визначає вплив перешкоди на швидкість вузла. Ця функція може бути визначена в залежності від типу і розміру перешкоди, типу носія радіозасобу (мобільний користувач, мобільна базова станція).

- *Врахування швидкості в 3D просторі.* Рух наземних комунікаційних вузлів представлено як вектор швидкості  $V = (v_x, v_y, v_z)$ , де  $v_x$ ,  $v_y$  і  $v_z$  - це компоненти швидкості вздовж осей  $x$ ,  $y$  і  $z$  відповідно.

#### The Range Zone Random Velocity Point Model (RZRVP).

Наземна комунікаційна мережа спеціального (військового призначення), складається із деякої кількості  $N_{NM}$  наземних комунікаційних вузлів,  $N_{MBC}$  - кількість мобільних базових станцій,  $N_{MK}$  - кількість мобільних користувачів,  $N_{MBC}, N_{MK} \in N_{NM}$ .

**ЗОНИ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНИХ КОРИСТУВАЧІВ.  
МОДЕЛЬ МОБІЛЬНОСТІ RZRVP**

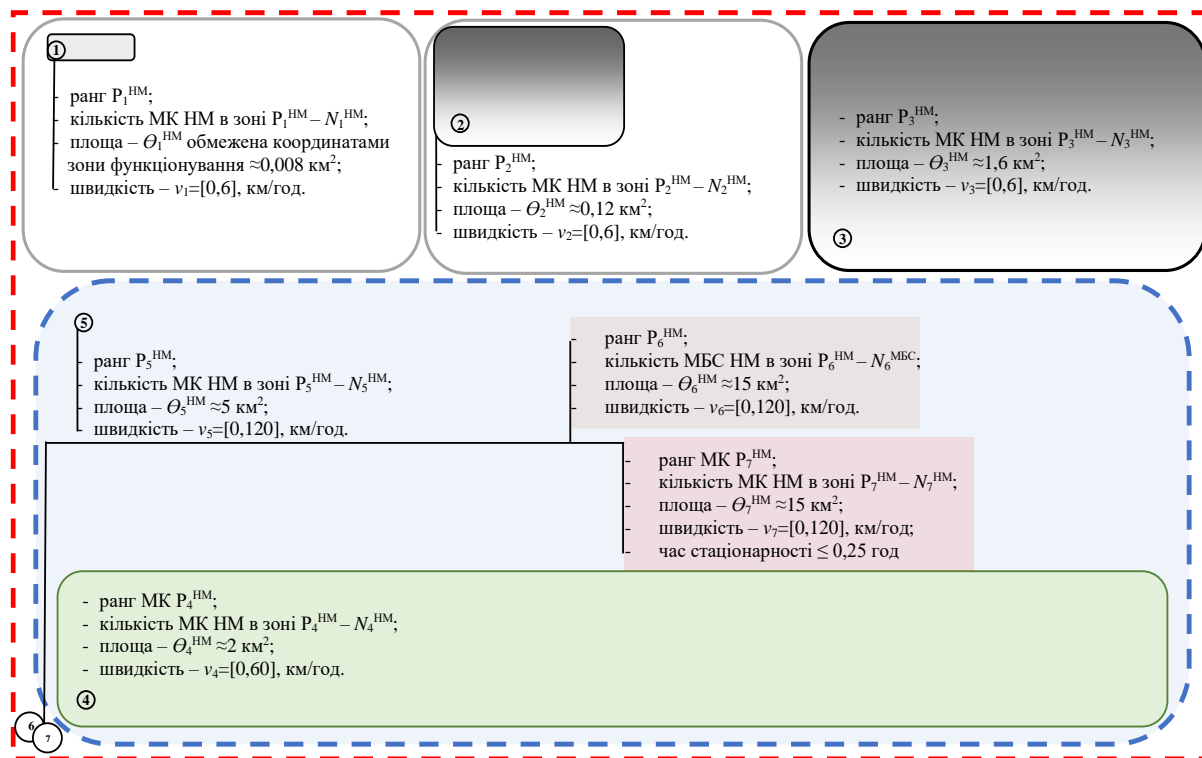


Рис. 7 – Модель мобільності Range Zone Random Velocity Point (RZRVP)

Під мобільними користувачами далі розуміємо множину мобільних вузлів із переносними радіозасобами, що виконують бойові дії та інші спеціальні завдання відповідно до умов обстановки та покладених на них завдань; під мобільними базовими станціями – апаратні, оснащені комунікаційними засобами, розміщення яких вибирається відповідно до множини управляючих впливів від системи управління (СУ) наземною мережею, для виконання вимог із забезпечення радіопокриття мобільних користувачів, пропускної здатності, часу затримки тощо.

Наземні комунікаційні вузли пропонується поділяти за рангом  $P_i^{HM}$ , для військових, наприклад  $i = \overline{1,7}$ , 1 – командири рівня відділення, 2 – взводу, 3 – роти, 4 – керівний склад підрозділів забезпечення, 5 – батальйону; 6 – мобільні базові станції; 7 – штатні/придані артилерія та/або танкові підрозділи. Наземні вузли  $N_{HKV}$  розміщені на до вільній території  $\Theta_{HM}, m^2$ , що відповідає площі виконання завдань підрозділу.

Мобільні користувачі (МК) переміщуються на обмеженій площі  $\Theta_i^{HM}$ , відповідно до функціональних обов'язків за своїм рангом, із випадковими напрямками в інтервалі  $[0, 2\pi]$ , та випадковими швидкостями із інтервалу  $[v_{min}^{HMi}, v_{max}^{HMi}]$ .

Координати визначеного географічного району місцевості – є геометричними вершинами зони функціонування, наприклад, для зони  $i$ -го рангу  $P_i^{HM}$  вершини:



Рис. 8 – Порядок визначення координат зони  $i$ -го рангу  $P_i^{HM}$

Через сферичну форму Землі таке представлення є прийнятним для ділянок не великої площі.

На рисунку 9 показано проекцію терену - синтетично згенерованої ділянки місцевості із довільним рельєфом (за допомогою шуму Перліна); зображено наземні комунікаційні вузли кожного із рангів із власними характеристиками що переміщуються по поверхні із урахуванням коефіцієнта маневреності описаного вище.

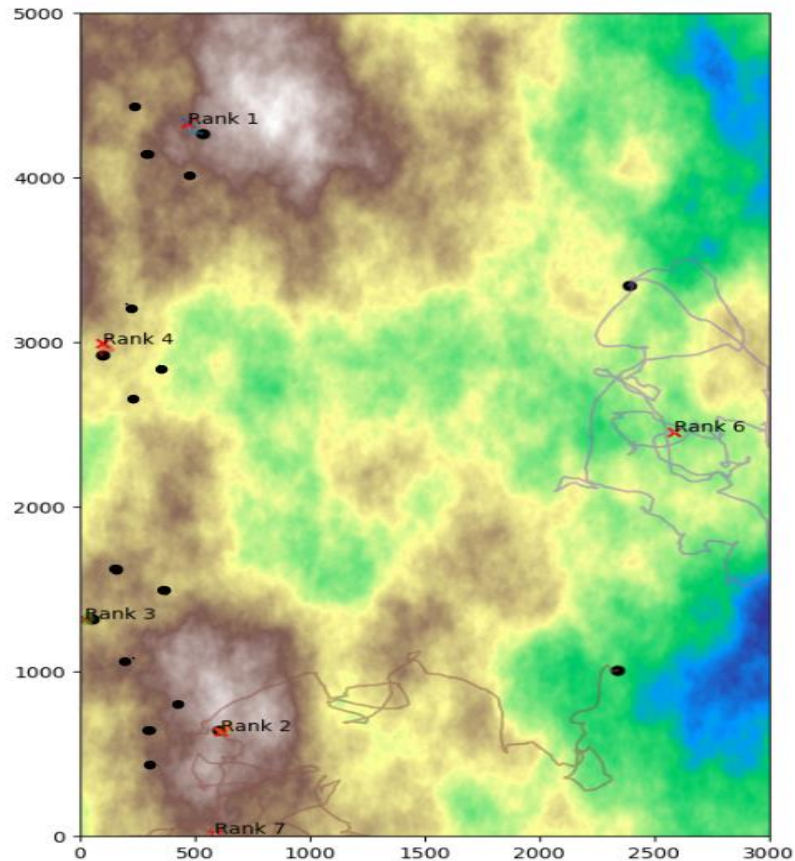


Рис. 9 – Порядок збору даних переміщення наземних комунікаційних вузлів з використанням моделі мобільності Range Zone Random Velocity Point

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** В результаті досліджень – встановлено, що завдання визначення місцезнаходження наземних комунікаційних вузлів, а саме збір та в подальшому оновлення інформації про місцезнаходження мобільних користувачів, для імітаційного моделювання процесів інформаційного обміну необхідно здійснити адекватне представлення ММ. Це дозволить забезпечити вихідні дані, необхідні для дослідження процесів маршрутизації в Ad-Нос мережах та здійснювати прогноз якості інформаційного обміну, та управління маршрутизацією в умовах типових сценаріїв переміщення мобільних користувачів.

Проаналізовані моделі мобільності не враховують особливості функціонування в умовах динамічної топології, а саме вплив рельєфу місцевості на мобільність вузлів (характер зміни напрямку і швидкості руху). Для такого врахування, по-перше пропонується розглядати умови переміщення в тримірному просторі; по-друге застосувати коефіцієнт маневреності мобільного вузла і визначає на скільки змінюється швидкість вузла в залежності від типу і розміру перешкоди, по-третє здійснювати ранжування мобільних вузлів за їх прогнозованим функціональним призначенням.

Напрямок подальшого дослідження є застосування зібраних вихідних даних переміщення для дослідження протоколів маршрутизації під час інформаційного обміну, оцінки ефективності наземної мережі за рахунок вирішення задач управління переміщенням та комунікаційною складовою рангом мобільних базових станцій в автоматичному режимі.

#### Список бібліографічного опису

1. Bittium. (2023). Bittium Tough SDR handheld. Retrieved from <https://www.bittium.com/tactical-communications/bittium-tough-sdr-handheld>
2. Akyildiz, I. F., Ho, S. M., & Lin, Y.-B. (1996). Movement-based location update and selective paging for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Network*, 4(4), pp.629–639.
3. Liang, B., & Haas, Z. (2003). Predictive distance-based mobility management for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(5), pp.718–732.
4. Kumar, C., Bhushan, B., & Gupa, S. (2012). Evaluation of MANET Performance in Presence of Obstacles. *Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 3(3), pp.37-47.
5. Jin, M.-H., Horng, J.-T., Tsai, M.-F., & Wu, E. H.-K. (2007). Location query based on moving behaviors. *Journal of Information Systems*, 32(3), pp.385-401.



6. Premchaiswadi, W., Romsaiyud, W., & Premchaiswadi, N. (2011). Navigation without GPS: Fake Location for Mobile Phone Tracking. In Proceedings of 2011 IEEE International Conference on ITS Telecommunications, pp. 195-200.
7. Alenazi, M. J. F., Abbas, S. O., Almowuena, S., & Alsabaan, M. (2020). RSSGM: Recurrent Self-Similar Gauss–Markov Mobility Model. *Electronics*, 9, p. 89.
8. Gebrie, H., Farooq, H., & Imran, A. (2019). What Machine Learning Predictor Performs Best for Mobility Prediction in Cellular Networks? In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)). Shanghai, China, pp. 1–6.
9. Romsaiyud, W., Premchaiswadi, W., & Premchaiswadi, N. (2012). An Autonomous Group Mobility Prediction Model for Simulation of Mobile Ad-hoc through Wireless Network. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 2(5), pp. 126-135. DOI: 10.5923/j.jwnc.20120205.07.
10. Romaniuk, V.A., & Bieliakov, R. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 50, pp. 125-130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.
11. Chung, S.-H., Chang, W.-H., & Lin, K.W. (2011). Hybrid Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks. *Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 2(4), pp. 79-96.
12. Tsao, C.-L., Wu, Y.T., Liao, W., & Kuo, J.-C. (2006). Link duration of the random way point model in mobile ad-hoc networks. In Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking, pp. 367-371.
13. Kumar, S., Sharman, S.C., & Suman, B. (2010). Mobility Metrics Based Classification & Analysis of Mobility Model for Tactical Network. *Journal of Next-Generation Networks*, 2(3), pp. 39-51.
14. Vipin Pal, Girdhari Singh, Rajender Prasad Yadav (2012). SCHS: Smart Cluster Head Selection Scheme for Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, 4, 273-280 <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2012.411039>.

### References

1. Bittium. (2023). Bittium Tough SDR handheld. Retrieved from <https://www.bittium.com/tactical-communications/bittium-tough-sdr-handheld>
2. Akyildiz, I. F., Ho, S. M., & Lin, Y.-B. (1996). Movement-based location update and selective paging for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Network*, 4(4), pp.629–639.
3. Liang, B., & Haas, Z. (2003). Predictive distance-based mobility management for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(5), pp.718–732.
4. Kumar, C., Bhushan, B., & Gupa, S. (2012). Evaluation of MANET Performance in Presence of Obstacles. *Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 3(3), pp.37-47.
5. Jin, M.-H., Horng, J.-T., Tsai, M.-F., & Wu, E. H.-K. (2007). Location query based on moving behaviors. *Journal of Information Systems*, 32(3), pp.385-401.
6. Premchaiswadi, W., Romsaiyud, W., & Premchaiswadi, N. (2011). Navigation without GPS: Fake Location for Mobile Phone Tracking. In Proceedings of 2011 IEEE International Conference on ITS Telecommunications, pp. 195-200.
7. Alenazi, M. J. F., Abbas, S. O., Almowuena, S., & Alsabaan, M. (2020). RSSGM: Recurrent Self-Similar Gauss–Markov Mobility Model. *Electronics*, 9, p. 89.
8. Gebrie, H., Farooq, H., & Imran, A. (2019). What Machine Learning Predictor Performs Best for Mobility Prediction in Cellular Networks? In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)). Shanghai, China, pp. 1–6.
9. Romsaiyud, W., Premchaiswadi, W., & Premchaiswadi, N. (2012). An Autonomous Group Mobility Prediction Model for Simulation of Mobile Ad-hoc through Wireless Network. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 2(5), pp. 126-135. DOI: 10.5923/j.jwnc.20120205.07.
10. Romaniuk, V.A., & Bieliakov, R. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 50, pp. 125-130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.
11. Chung, S.-H., Chang, W.-H., & Lin, K.W. (2011). Hybrid Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks. *Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 2(4), pp. 79-96.
12. Tsao, C.-L., Wu, Y.T., Liao, W., & Kuo, J.-C. (2006). Link duration of the random way point model in mobile ad-hoc networks. In Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking, pp. 367-371.
13. Kumar, S., Sharman, S.C., & Suman, B. (2010). Mobility Metrics Based Classification & Analysis of Mobility Model for Tactical Network. *Journal of Next-Generation Networks*, 2(3), pp. 39-51.
14. Vipin Pal, Girdhari Singh, Rajender Prasad Yadav (2012). SCHS: Smart Cluster Head Selection Scheme for Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, 4, 273-280 <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2012.411039>.