

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПІДРОЗДІЛІВ ШВИДКОГО РЕАГУВАННЯ ПРИКОРДОННОГО ВІДОМСТВА

### Вступ

Забезпечення прикордонної безпеки є важливою передумовою національної безпеки України [1]. На даний момент ефективного функціонування прикордонного відомства неможливе без вдосконалення форм і методів охорони кордону, використання сучасних інформаційних технологій. Відповідно до нової моделі охорони кордону та планів розвитку Державної прикордонної служби України (ДПСУ) перспективним є вдосконалення інтегрованої інформаційно-телекомунікаційної системи «Гарт», формування та забезпечення розвитку підрозділів швидкого реагування. Тактика дій цих підрозділів передбачає швидке їх висунення в заданий район з можливим використанням широкого парку транспортних засобів, які використовуються у прикордонному відомстві. Швидкісні характеристики транспортних засобів суттєво залежать від погоднокліматичних умов, властивостей елементів місцевості. З іншого боку, для ефективного використання підрозділів швидкого реагування та реалізації функцій управління ними, необхідна наявність радіозв'язку. Потреба урахування сукупності цих факторів особливим чином формує постановку завдання визначення раціональних маршрутів для пересування цих підрозділів. Пошук таких маршрутів має стати однією з функцій інформаційного забезпечення підрозділів швидкого реагування ДПСУ, що реалізується в інформаційно-телекомунікаційній системі геоінформаційного забезпечення «Гарт-17».

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням оптимальної побудови маршрутів присвячена значна кількість досліджень. В одних працях розглядається побудова маршрутів вздовж мережі доріг, які описуються зваженим графом з визначенням початкової і кінцевої вершини. Вирішення такої класичної задачі виконується, зокрема, з використанням алгоритму Дейкстри, мурашиного алгоритму [2]. Більш склад-

ною задачею є побудова маршруту на довільній місцевості [3] з урахуванням перешкод. Для її вирішення використовується хвильовий алгоритм (алгоритм Лі), алгоритм  $A^*$  з різними його модифікаціями (зокрема з пошуком по стрибковим точкам) [4]. При використанні цих підходів надзвичайно важливим є формування маски місцевості. Ця маска представляє собою показник, що використовується для опису місцевості. Елементи даного показника описують дискретні елементи місцевості і кодують доцільність прокладання через них маршруту.

Питання побудови маски місцевості при побудові маршрутів в задачах у сфері прикордонної безпеки з урахуванням багатьох факторів розглянуті в [5-8]. При визначенні маски місцевості у дослідженні [7] велика увага приділена забезпеченості радіозв'язком. Однак, для врахування перешкоджаючого впливу рельєфу місцевості, у цій роботі використаний ймовірнісний показник, отриманий на основі статистичного аналізу. Для більш точного визначення наявності радіозв'язку доцільно застосувати детерміновану геомодель, аналогічну до [9].

Іншим проблемним питанням є відсутність в сучасних дослідженнях обґрунтування точної залежності між швидкісними характеристиками транспортних засобів (ці характеристики відрізняються для різних типів місцевості за різних погоднокліматичних умов) і елементами маски. Загальноприйнятим (для хвильового алгоритму) є використання підходу, коли більшим швидкостям руху відповідають менші значення елементів маски (окрім нульового значення, яке зарезервоване для позначення непрохідних ділянок). У [8] ця залежність обрана лінійною, однак такий її вибір не був обґрунтований.

### Мета статті (постановка завдання)

З урахуванням цього, метою даної роботи є вдосконалення методики визначення раціональних маршрутів підрозділів швидкого реагування

прикордонного відомства за рахунок: визначення залежності між швидкісними характеристиками і елементами маски місцевості; використання детермінованого підходу для визначення наявності радіозв'язку.

**Виклад основного матеріалу**

Задачу побудови раціонального маршруту для підрозділів швидкого реагування на довільній місцевості в загальному випадку можна поставити як визначення множини точок на місцевості, які поєднують початкову точку маршруту *A* з кінцевою *B* (рис.1).

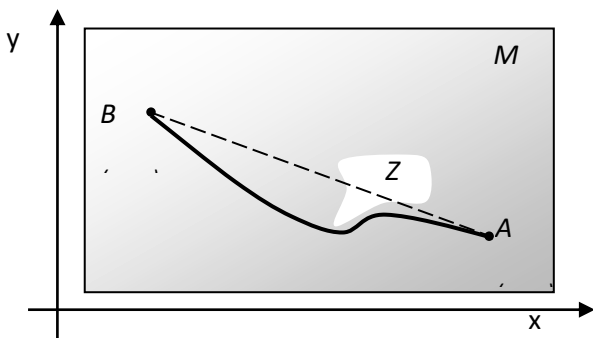


Рисунок 1 – Постановка задачі побудови маршрутів

При пошуку раціонального маршруту надзвичайно важливим є коректне визначення маски місцевості  $M = \{m_{ij}\}$ . Елементи цієї маски описують точки місцевості з точки зору раціональності прокладання через них маршруту. Традиційним є підхід, коли менші значення  $m_{ij}$  відповідають кращим для побудови маршруту точкам. На рис.1 представлений випадок, коли менші величини  $m_{ij}$  зосереджені в правій нижній частині *M*. У напрямі до протилежного кута маски місцевості значення її елементів поступово зростають. Відповідні ділянки є гіршими для прокладання маршруту. В межах маски особливим чином кодуються місця неможливі для використання (множина *Z* на рис.1). Враховуючи вищевикладене, пунктирна пряма, яка поєднує точки *A* та *B*, не буде раціональним маршрутом. Шуканий маршрут визначатиметься певною кривою, яка поєднує ці точки, не проходить через заборонену область *Z* і враховує значення *M*.

Отже, при побудові раціональних маршрутів з використанням різних алгоритмів (хвильового, *A\** та їх модифікацій) важливою є коректна побудова маски *M*, яка є основним показником, який враховується при прокладанні маршруту. У [7-8] цей показник визначений наступним чином:

$$\tilde{M}_{i,j} = \omega_1 \cdot (254 \cdot P_{36}(i, j) + 1) + \omega_2 \cdot (254 \cdot (1 - \frac{\tilde{v}_{i,j}}{v_m}) + 1), \quad (1)$$

де:  $P_{36}(i, j)$  - ймовірність відсутності ра-

діозв'язку з ділянкою  $(i, j)$ ;

$\tilde{v}_{i,j}$  - швидкість пересування транспортного засобу по ділянці  $(i, j)$  з урахуванням різних факторів;

$v_m$  - максимальна швидкість пересування транспортного засобу;

$\omega_1, \omega_2$  - вагові коефіцієнти.

В другому доданку у (1) закладено лінійну залежність показника від швидкості транспортного засобу на ділянці  $(i, j)$ . Коли ця швидкість є максимальною права частина виразу показника (1) є мінімальною і дорівнює 1. Зі зростанням швидкості, відбувається лінійне зростання (1).

Однак, дослідження роботи хвильового алгоритму, дозволяє зробити припущення, що залежність елементів маски місцевості від швидкісних характеристик має бути нелінійною.

З метою визначення залежності  $m_{ij}$  від швидкості транспортного засобу на ділянці  $(i, j)$  розроблений метод, який ґрунтується на використанні аналогії особливостей поширення хвилі у хвильовому алгоритмі з фізичним явищем заломлення світла на межі середовищ з різною швидкістю його поширення.

При використанні хвильового алгоритму (або інших аналогічних алгоритмів) у випадку коли всі елементи маски місцевості є однаковими, отриманий маршрут має відповідати відрізку прямої (пунктирний відрізок на рис.1).

Розглянемо інший випадок, коли маска місцевості поділяє досліджуваний простір на дві лінійно поділені області (рис.2). В межах кожної з цих областей визначимо фіксовані значення маски.

У нижній частині рис.2  $m_{ij}=1$ , що відповідає максимальній доцільності проведення маршруту через ці ділянки. Швидкість поширення хвилі при цьому є максимальною і дорівнює  $v_1$ . Верхня половина маски місцевості має фіксовані елементи з значенням  $n_2 > 1$ , що відповідає дещо гіршому варіанту використання відповідних точок місцевості в маршруті. Такі значення в порівнянні з  $m_{ij}=1$  відповідають меншій швидкості поширення хвилі  $v_2$  у верхній частині рис.2.

Звичайно, при таких умовах, результуючий маршрут буде відхилитись від прямої, що проходить через *A* та *B* (на рис.2 ця пряма показана пунктиром). В межах кожної частини місцевості рис.2 до розділової лінії, де умови поширення хвилі є однаковими, раціональний маршрут має бути відрізком прямої. Оскільки в нижній частині території забезпечується кращі умови пересування, відрізок прямої раціонального маршруту *AC* має бути довшим ніж *CB*. Загальний вигляд

раціонального маршруту за такого вигляду маски місцевості буде *ACB*.

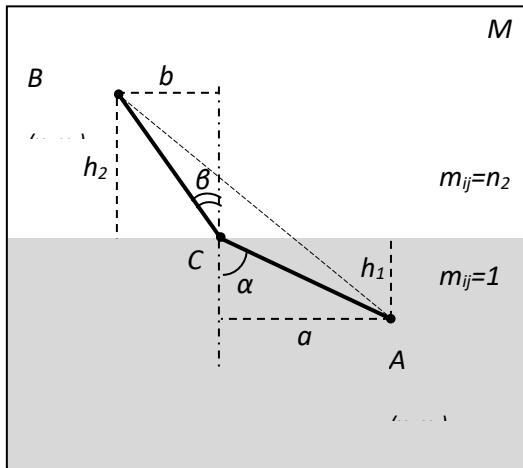


Рисунок 2 – Аналогія з заломленням світла

Така форма маршруту є аналогічною до форми променя світла на межі двох середовищ з різною швидкістю поширення. Для явища заломлення світла відношення синусу кута падіння до синусу кута заломлення дорівнює відношенню швидкостей поширення світла в середовищах. Стосовно схеми рис.2 це співвідношення можливо записати

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Оскільки з рис.2  $\sin \alpha = \frac{a}{h_1}$  і  $\sin \beta = \frac{b}{h_2}$ , то

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{a \cdot h_2}{h_1 \cdot b} \quad (2)$$

Вираз (2) дозволяє після моделювання поширення хвилі і визначення маршруту для варіанту маски рис.2, обчислити відношення швидкостей.

Результати моделювання явища заломлення з використанням модифікованого хвильового алгоритму представлені на рис.3.

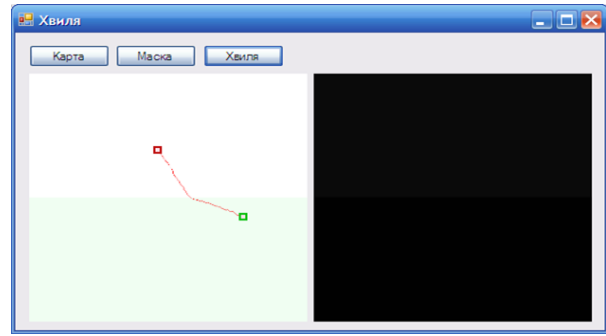


Рисунок 3 – Моделювання явища заломлення на межі середовищ з різними швидкостями поширення хвилі

У лівій частині рис.3 продемонстрований випадок, коли маска місцевості є сталою (всі її елементи рівні 1). При цьому в такому «однорідному середовищі» спостерігається прямолінійне поширення хвилі, наслідком чого є прямолінійний результуючий маршрут. Тому на лівій частині рис.3:

$$\frac{a}{h_1} = \frac{b}{h_2} \quad (\text{кут падіння дорівнює куту заломлення}).$$

З виразу (2), в цьому випадку, природно отримуємо  $v_2 = v_1$ .

У правій частині рис.3 представлений варіант з відмінними значеннями маски в нижній і верхній її половині. В нижній частині маски всі елементи дорівнюють 1. У верхній частині маски (вище межі поділу рис.2) встановлене значення  $n_2 = 10$ . При цьому отримано:  $a = 50$ ,  $b = 30$ ,  $h_1 = 53$ ,  $h_2 = 59$ .

$$\frac{v_1}{v_2} \approx 1,85. \quad \text{Тобто при збільшенні (погіршенні) значень маски місцевості в 10 разів отримане зменшення швидкості поширення хвилі лише в 1,85 разів.}$$

Аналогічне моделювання було проведене для значень маски в діапазоні [2..20] у верхній частині. Отримані результати представлені на графіку рис.4.

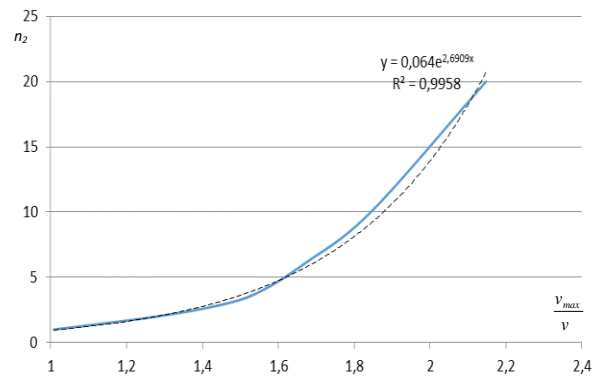


Рисунок 4 – Залежність між відношенням  $\frac{v_{max}}{v}$  та відповідним значенням маски  $n_2$

$\frac{v_{max}}{v}$  та відповідним значенням маски  $n_2$

Результати моделювання було апроксимовано з використанням експоненціальної залежності, в результаті чого отриманий емпіричний вираз (3), який для швидкості транспортного засобу

$$\frac{v_{max}}{2.15} < v < v_{max} \text{ дозволяє визначити відповідне цій}$$

швидкості значення маски  $n_2$ . Слід відмітити незначну помилку апроксимації. Показник  $R^2$  лише в третьому знаку після коми відхиляється від ідеального значення 1.

$$n_2 = 0,064 \cdot e^{2,6909 \cdot \frac{v_{max}}{v}} \quad (3)$$

Емпіричний вираз (3) дає можливість визначати маску для швидкостей в діапазоні  $\left[ \frac{v_{max}}{2.15}, v_{max} \right]$ . Для розширення даного діапазону необхідне використання описаного вище підходу для інших значень  $n_2$ . При цьому може бути доцільним графічне представлення отриманої залежності.

Таким чином, метод визначення залежності між швидкісними характеристиками і елементами маски місцевості для різних методів побудови маршрутів полягає у наступному:

1) Максимальній швидкості транспортного засобу ставиться у відповідність значення 1.

2) Для інших можливих значень маски  $n_2$  (наприклад при однобайтному кодуванні [2..255]) проводиться моделювання явища заломлення (рис.2). Елементом маски у нижній частині присвоюється значення 1 (що відповідає максимальній швидкості). У верхній частині маски встановлюється значення  $n_2$ , для якого визначається співвідношення швидкостей. В результаті моделювання визначаються параметри, що описують явище заломлення  $a, b, h_1, h_2$ . З використанням цих параметрів за (2) обчислюється  $\frac{v_{max}}{v}$ .

3) На основі знайдених  $\left( \frac{v_{max}}{v}, n_2 \right)$  з використанням апроксимації будується функціональна або графічна залежність значень маски від відношення  $\frac{v_{max}}{v}$ .

4) З використанням отриманої залежності, відповідно до визначеної для кожної точки місцевості швидкості, отримується значення маски.

Порівняння результатів використання запропонованого методу і правої частини (1) дозволяє оцінити помилку в [7-8] при визначенні маски місцевості на основі швидкісних характеристик (рис.5). Нелінійність верхнього графіку на рис.5

обумовлена представленням даних по осі абсцис у вигляді  $\frac{v_{max}}{v}$ .

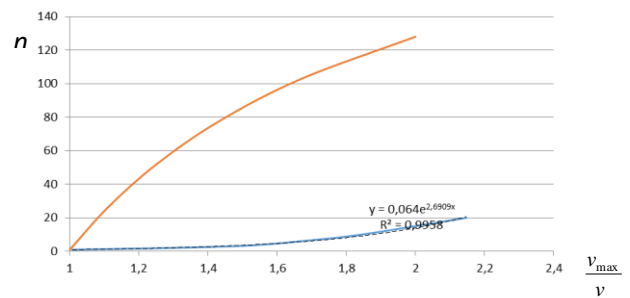


Рисунок 5 – Некоректність лінійного визначення залежності маски місцевості від швидкісних характеристик

Іншим проблемним в (1) питанням є використання статистичного підходу до визначення ймовірнісного показника відсутності радіозв'язку, який зважено входить в комплексний показник. Хоча вагові коефіцієнти (1) визначались методом експертних оцінок, такий підхід не завжди є адекватним вирішуванню завданням. Можливі випадки, коли наявність радіозв'язку для ділянок з поганою прохідністю забезпечить суттєво кращі значення показника (1) для прокладання маршруту, що не завжди є коректним. Окрім цього, використання сучасної обчислювальної техніки та адаптованих алгоритмів [9], дозволяє застосувати набагато більш точні детерміновані моделі.

З метою врахування в масці місцевості покриття радіозв'язком пропонується використати за основу геомодель для визначення областей невидимості з вежі спостереження [9]. Однак, довжини хвиль, які використовуються в апаратурі зв'язку є суттєво більшими за довжини хвиль оптичного діапазону, який розглядався при дослідженні СОЕС. Це вимагає при визначенні областей «тіні» врахувати явище дифракції, яке обумовлює можливе огинання незначних за розміром перешкод рельєфу місцевості. З цією метою в алгоритмі трасування лінії видимості (line-of-sight, LOS) при перевірці її перетину рельєфом місцевості пропонується додати допуск по висоті в межах першої зони Френеля.

Пропонується наступний, скоригований в порівнянні з [9], алгоритм обчислення значень маски місцевості для кожної точки (x,y) з урахуванням радіопокриття.

1) Визначається, чи належить точка (x,y) до території нашої держави. При невиконанні цієї умови, у відповідному елементі маски місцевості ця точка помічається як недоступна для прокла-

дання маршруту і алгоритм продовжується для інших  $(x, y)$ .

2) Визначається відстань  $R$  від  $(x, y)$  до базової станції. Якщо ця відстань більша за максимально допустиму, виходячи з забезпечення необхідного співвідношення сигнал/шум на вході приймача, точка  $(x, y)$  вважається поза радіопокриттям, точка  $(x, y)$  помічається як недоступна і алгоритм продовжується для наступної точки.

3) Якщо умова для  $(x, y)$  у попередньому кроці виконується, використовується модернізований алгоритм трасування LOS для визначення видимості цієї точки з вежі базової станції. Якщо така видимість не забезпечується, точка  $(x, y)$  вважається поза радіопокриттям, відповідному елементу маски місцевості присвоюється значення, яке відповідає неможливості його використання в маршруті (для хвильового алгоритму, звичайно, таке значення 0) і алгоритм продовжується для наступної точки.

4) Якщо радіопокриття і належність до території держави забезпечується, визначається швидкість обраного транспортного засобу для елемента місцевості  $(x, y)$  в заданих погоднокліматичних умовах на основі інформації з геоінформаційної системи ДПСУ. З використанням графічно або функціонально заданої залежності рис.4, знаходиться значення відповідного  $(x, y)$  елемента маски місцевості.

Підхід, описаний у наведеному вище алгоритму, обумовлений вимогою забезпечення радіозв'язку при русі підрозділів швидкого реагування по маршруту.

Даний алгоритм, який описує процес визначення маски місцевості з урахуванням радіовидимості окремих її ділянок, є основою вдосконаленої методики визначення раціональних маршрутів підрозділів швидкого реагування прикордонного відомства. Після розрахунку маски, ця методика передбачає використання хвильового алгоритму для знаходження маршруту. Приклад її застосування наведений на рис.6.



Рисунок 6 – Визначення раціонального маршруту

## Висновки

Запропонований у роботі метод, дозволив обґрунтувати визначення елементів маски місцевості на основі швидкісних характеристик. Використання детермінованого підходу для визначення наявності радіозв'язку, дозволило скоригувати маску місцевості, чітко визначивши заборонені для проведення маршруту області. Все це надало подальший розвиток методиці визначення раціональних маршрутів підрозділів швидкого реагування прикордонного відомства.

## Перспективи подальших досліджень

Напрямок подальших досліджень автором вбачається вдосконалення програмного забезпечення, яке реалізує наведені у роботі методики.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бірюков В. П. Прикордонна безпека як складова національної безпеки України / В. П. Бірюков // Південноукраїнський правничий часопис. – 2013. – № 2. – С. 88-92.
2. Zhang, H., J. Q. Sun, Q. J. Hui, and J. Guo. "Vehicle Route Optimization of Centrally Dynamic Route Guidance Systems." Urban Transport XIV (August 15, 2008). doi:10.2495/ut080651. (eng)
3. Шаповалова С. І. Оптимізація пошуку маршруту на топографічних картах / С. І. Шаповалова, Д. К. Радченко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – № 1(22). – С. 60–65. – Бібліогр.: 4 назви.
4. Online Graph Pruning for Pathfinding on Grid Maps [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://users.cecs.anu.edu.au/~dharabor/data/papers/harabor-grastien-aaai11.pdf>. (eng)
5. Катеринчук І.С., Рачок Р.В., Мул Д.А. Використання хвильового алгоритму для визначення раціонального маршруту руху в геоінформаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України №40. - Хмельницький : НАДПСУ, 2007. - Ч. 2. - С. 29-30.
6. Катеринчук І.С. Алгоритм для визначення раціонального маршруту руху в геоінформаційних системах / І.С. Катеринчук, Р.В. Рачок // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка №28 ; [гол. ред. Ленков С.В.]. – К. : Видавництво ВІКНУ, 2010.– С. 320–322.
7. Шпорт М. М. Визначення підходів до побудови раціональних маршрутів при розв'язанні задач осд [Електронний ресурс] / М. М. Шпорт // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2014. - № 1. - С. 155-157.
8. Шпорт М. М. Методика побудови маски хвильового алгоритму для пошуку раціональних маршрутів, необхідних для розв'язання завдань

оперативно-службової діяльності Державної прикордонної служби України. [Електронний ресурс] / М. М. Шпорт. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. - 2014. - Вип. 2. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNTUV\\_2014\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNTUV_2014_2_10).

9. **Боровик О. В.**, Рачок Р. В., Дармороз М. М. Оцінка ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 2 (41). – С. 93–99.

**Рачок Р. В.**

#### **МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПІДРОЗДІЛІВ ШВИДКОГО РЕАГУВАННЯ ПРИКОРДОННОГО ВІДОМСТВА**

*У роботі вдосконалена методика визначення раціональних маршрутів підрозділів швидкого реагування прикордонного відомства. Автором запропонований метод визначення залежності між швидкісними характеристиками транспортних засобів і значеннями елементів маски місцевості. Метод базується на аналогії з явищем заломлення світла на межі двох середовищ з різною швидкістю його поширення. Для визначення наявності радіозв'язку у роботі запропоновано замінити статистичну модель, детермінованою.*

**Ключевые слова:** раціональний маршрут; маска місцевості; хвильовий алгоритм.

**Rachok R. V.**

#### **THE METHOD FOR DETERMINATION OF RATIONAL ROUTES OF RAPID RESPONSE UNITS OF THE BORDER AGENCY**

*In the work of the improved method of definition of rational routes of rapid response units of the border Agency. The author proposed a method for determining the relationship between speed characteristics of vehicles and the values of the elements of the mask area. The method is based on analogy with the phenomenon of light refraction on the boundary between two media with different speed. To determine whether the radio communication, proposed to replace the statistical model, deterministic.*

**Keywords:** rational route; mask location; wave algorithm.

**Рачок Р. В.**

#### **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ БЫСТРОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО ВЕДОМСТВА**

*В работе усовершенствована методика определения рациональных маршрутов подразделений быстрого реагирования пограничного ведомства. Автором предложен метод определения зависимости между скоростными характеристиками транспортных средств и значениями элементов маски местности. Метод основан на аналогии с явлением преломления света на границе двух сред с разной скоростью его распространения. Для определения наличия радиосвязи в работе предложено заменить статистическую модель, детерминированной.*

**Ключевые слова:** рациональный маршрут; маска местности; волновой алгоритм.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2017 р.

Прийнято до друку 15.09.2017 р.

Рецензент – д. т. н., проф. Катеринчук І.С.