

УДК 621.396

О.М. Сотников, А.Б. Гаврилов

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ МАЛОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ ОЗБРОЄННЯ І ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ РАДІОМЕТРИЧНИМИ ГОЛОВКАМИ САМОНАВЕДЕННЯ В УМОВАХ ПРОТИДІЇ

*Наведені результати імітаційного моделювання процесу локалізації малорозмірних об'єктів радіометричними головками самонаведення в міліметровому діапазоні довжин хвиль на типових фонах в умовах ужитих заходів зі згладжування радіояркісних контрастів.*

### Постановка проблеми

У теперішній час викликають підвищений інтерес дослідження процесів, пов'язаних із захистом малорозмірних об'єктів озброєння і військової техніки (ОВТ) від систем розвідки та наведення високоточної зброї (ВТЗ) і, зокрема, оцінювання прийнятих заходів з протидії радіометричним (РМ) головкам самонаведення (ГСН) керованих засобів ураження (КЗУ).

### Аналіз літератури

У відомій літературі [1, 2] показано, що протидію РМ ГСН можна здійснювати як відомими методами радіопротидії, постановкою різного роду зав'яз (аерозолі, дими, пил), так і методами зниження РМ помітності об'єктів на навколишніх фонах.

У [2] показано, що найбільш ефективним напрямком протидії РМ ГСН є зниження РМ помітності за рахунок згладжування радіояркісних контрастів.

У [3, 4, 5] нами були отримані аналітичні оцінки імовірностей виявлення і розпізнавання малорозмірних об'єктів за умови вживання заходів зі згладжування радіояркісних контрастів.

Через відсутність можливості проведення натурних експериментів для підтвердження вірогідності отриманих оцінок пропонується скористатися методом імітаційного моделювання [6].

У ряді робіт [7, 8] опубліковані результати імітаційного моделювання з перевірки надійності функціонування алгоритмів порівняння зображень у радіометричних системах навігації. Однак використання цих моделей для підтвердження вірогідності отриманих у [3, 5] результатів не можливе через те, що моделювання виконувалося без урахування впливу на РМ системи пасивних завад, спрямованих на згладжування радіояркісних контрастів.

**Мета статті** – підтвердження вірогідності отриманих оцінок імовірності локалізації малорозмірних

об'єктів ОВТ в умовах ужитих заходів зі згладжування радіояркісних контрастів.

### Основна частина

Для дослідження імовірності локалізації малорозмірних об'єктів ОВТ РМ головками самонаведення була розроблена модель, що імітує процес виявлення і розпізнавання малорозмірних об'єктів. Виходячи з характеристик відомих бойових елементів, які самоприцілюються, що використовують радіометричний принцип наведення [9, 10], були обрані вихідні дані з роздільної здатності РМ датчиків ГСН на робочих висотах застосування цих бойових елементів. У табл. 1 наведені дані про площу «плями» елемента розділення РМ ГСН залежно від діаметра апертури антени і висот візування.

Таблиця 1

Площа „плями” елемента розподілення РМ ГСН

Висота візування, м	Діаметр апертури антени	
	0,15 м	0,20 м
300	30 м <sup>2</sup>	18 м <sup>2</sup>
200	13,3 м <sup>2</sup>	8,04 м <sup>2</sup>
150	7,5 м <sup>2</sup>	4,52 м <sup>2</sup>
100	3,33 м <sup>2</sup>	2 м <sup>2</sup>

Моделювання складалося з двох етапів. На першому етапі були отримані значення імовірностей виявлення малорозмірних цілей за умови згладжування радіояркісних контрастів з урахуванням флуктуацій радіояркісності тіл і шумів радіометричного каналу ГСН, а також змін кутів візування  $\theta = 0 \dots 80^\circ$  від вертикалі при довжинах хвиль 8,6 мм і 3,2 мм та висотах візування 300 і 600 м відповідно.

Принцип моделювання виявлення об'єкта на фоні полягав у пересуванні матриці еталонного зобра-

ження (ЕЗ) по матриці поточного зображення (ПЗ) із кроком в один елемент зліва направо з наступним зсувом по стовпцях і з обчисленням на кожному кроці міри подібності поточного зображення з еталонним за кореляційним алгоритмом, що відповідає представленню ЕЗ і ПЗ у числовій шкалі [7]. При цьому передбачалося, що:

сітки ЕЗ і ПЗ збігаються, тобто відпадає необхідність зсуву ЕЗ у межах напівширини елемента розділення ПЗ;

повернення ЕЗ відносно ПЗ відсутнє;

еталонне і поточне зображення відмасштабовані;

швидкість формування поточного зображення і швидкість руху об'єкта знаходяться у співвідношенні, при якому можна вважати, що малорозмірний об'єкт знаходиться в квазінерухомому стані.

При статистичній оцінці імовірності виявлення об'єкта імітація варіацій рівнів радіояркості елементів ПЗ, обумовлена флуктуацією радіояркості температури фону, яка викликана впливом підсвічування неба, вологості фонові поверхні і гідрометеорів, проводилася згідно з виразом

$$T_m = T_{m0} + v_m, \quad m \in \overline{1, N}, \quad (1)$$

де  $T_{m0}$  – середнє значення яркості  $m$ -го елемента розділення;

$v_m$  – рівномірно розподілена випадкова змінна з нульовим середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням  $\kappa_i$ .

Адитивна шумова складова в ПЗ, обумовлена власними шумами радіометра ГСН, імітувалася шляхом додавання до кожного значення яскравості елемента змодельованого зображення нормально розподіленої випадкової величини з нульовим середнім і дисперсією  $\sigma^2$  [7].

Пороговий рівень розв'язувальної функції, при якому приймалося рішення про наявність об'єкта, вибирався з розрахунку, що при 1 000 реалізацій порівняння за обраним алгоритмом координати виявленого об'єкта на поточному зображенні відповідали заданим, і ймовірність виявлення захищеного об'єкта знаходилася в межах 0,85...0,95 [8].

Далі здійснювалося статистичне моделювання процесу виявлення об'єкта на фоні. Радіояркостну температуру об'єкта, що захищається, після 1 000 прогонів змінювали з кроком  $T_y + 50$  °К до 3 000 °К. При багаторазовому запуску імітаційної моделі, що використовує кореляційний алгоритм виявлення для різних реалізацій поточного зображення, відбувалося порівняння координат об'єкта, отриманих при кожному запуску зі справжніми значеннями  $(x_i, y_i)$

(координатами фрагмента-автора), що були задані при моделюванні поточного зображення. При збігу координат робився висновок про виявлення об'єкта в процесі обробки даної реалізації, а оцінка імовірності виявлення об'єкта на фоні визначалася відношенням кількості правильних виявлень об'єкта до загальної кількості запусків алгоритму виявлення в серії при моделюванні.

Радіояркостні температури тіл на еталонному і поточному зображеннях при різних кутах візування розраховувалися за методикою [4]. Радіояркостна температура об'єкта відповідала середньому значенню температури підсвічування неба при наступних значеннях довжин хвиль [11]:

$$\lambda = 3,2 \text{ мм} - T_{\text{п}} = 50 \text{ К};$$

$$\lambda = 8,6 \text{ мм} - T_{\text{п}} = 30 \text{ К}.$$

Радіояркостна температура елементів поточного зображення в процесі моделювання змінювалася випадковим чином згідно з виразом (1) відносно середніх значень, параметр  $\kappa_i$  був обраний рівним 50 °К.

Моделювання власних шумів приймального тракту радіометричного приймача полягало в урахуванні флуктуацій шумової температури РМ приймача, при якому середньоквадратичне значення шуму на ПЗ розподілялося за нормальним законом і складало  $\sigma = 80$  К [7].

Виходячи з заданого значення довірчої імовірності, загальна кількість оброблюваних у серії реалізацій, використовуваних для розрахунку одного значення імовірності виявлення об'єкта  $P_0$ , складала  $N = 1\ 000$ .

Результати моделювання представлені у вигляді графіків залежності імовірності виявлення об'єкта від радіояркостної температури об'єкта і кутів візування на фонах типу бетон і трава, наведених на рис. 1 – 4.

Аналіз результатів, наведених на графіках, показує, що значення імовірності виявлення РМ ГСН

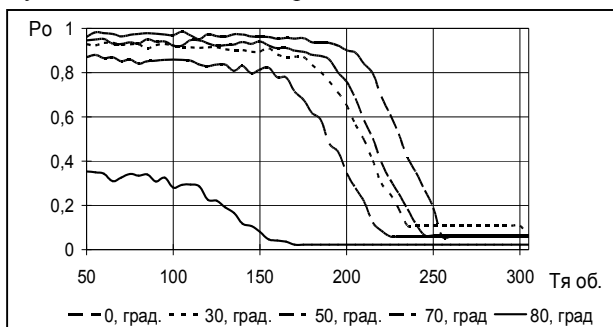


Рис. 1. Графік залежності імовірності виявлення об'єкта від кута візування і радіояркостної температури об'єкта при  $\lambda = 3,2$  мм на бетоні

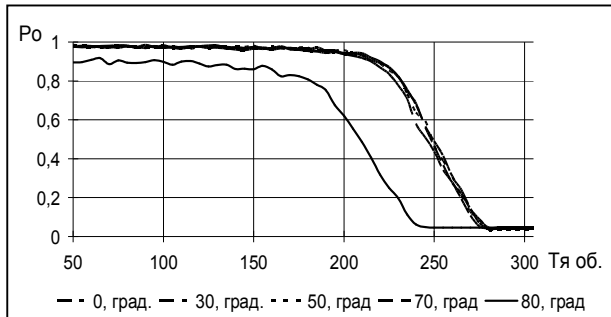


Рис. 2. Графік залежності імовірності виявлення об'єкта від кута візування і радіояркiсної температури об'єкта при  $\lambda = 3,2$  мм на траві

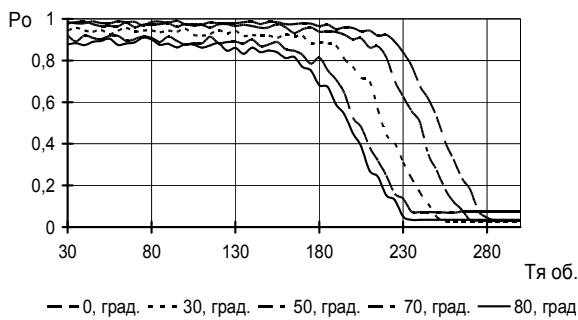


Рис. 3. Графік залежності імовірності виявлення об'єкта від кута візування і радіояркiсної температури об'єкта при  $\lambda = 8,6$  мм на бетоні

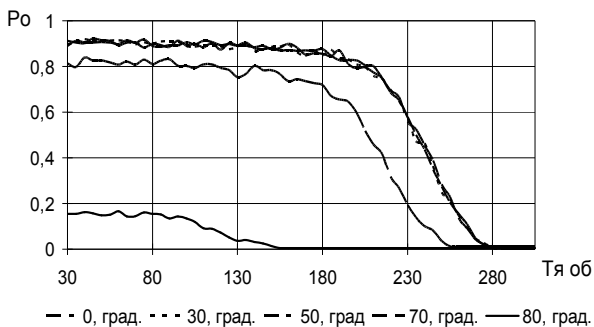


Рис. 4. Графік залежності імовірності виявлення об'єкта від кута візування і радіояркiсної температури об'єкта при  $\lambda = 8,6$  мм на траві

(при  $\lambda = 8,6$  мм і  $\lambda = 3,2$  мм) малорозмірних об'єктів на фонах типу бетон і трава при радіояркiсному контрасті 30...50 К і діапазоні кутів візування  $\theta = 0...80^\circ$  лежать у межах 0,1...0,32. Вказані значення імовірності виявлення підтверджують наведені в [4] результати теоретичних оцінок. При цьому найбільш небезпечні кути візування РМ ГСН знаходяться в межах  $\theta = 0...70^\circ$  від вертикальних.

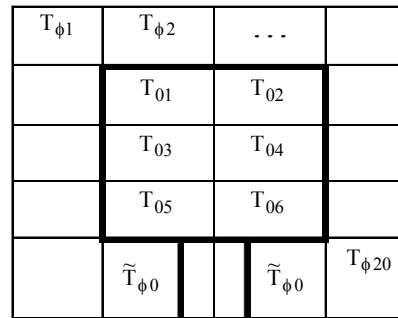


Рис. 5. Еталонне зображення об'єкта на фоні при  $H = 150$  м

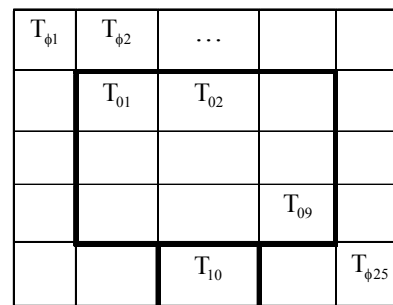


Рис. 6. Еталонне зображення об'єкта на фоні при  $H = 100$  м

На другому етапі моделювався процес розпізнавання РМ ГСН малорозмірного об'єкта при робочій довжині хвилі РМ ГСН 3,2 мм з висот 150 і 100 метрів. При цьому як поточне, так і еталонне зображення об'єкта площею порядку 20 м<sup>2</sup> складалося, для зазначених висот, відповідно з 20 і 25 елементів розділення антеною системи РМ ГСН (рис. 5, 6).

Розробка моделі розпізнавання малорозмірних об'єктів РМ ГСН була спрямована на одержання можливості порівняльної оцінки імовірності розпізнавання об'єкта з радіояркiсним контрастом, згладженим до значень 30...60 К з урахуванням флуктуацій радіояркiсності і кількості "закритих" ділянок об'єкта, що попадають в один елемент розділення РМ ГСН.

Моделювання процесу розпізнавання об'єкта РМ ГСН містило в собі:

- 1) моделювання ПЗ об'єкта на типових фонах із природним радіояркiсним контрастом і згладженим, що спостерігається РМ ГСН з висот  $H_1 \cong 150$  і  $H_2 \cong 100$  м;
- 2) моделювання флуктуацій радіояркiсних температур елементів ПЗ;
- 3) моделювання ЕЗ об'єкта на різних фонах, відповідних висотам (дальностям) візування  $H_1 \cong 150$  і  $H_2 \cong 100$  м;

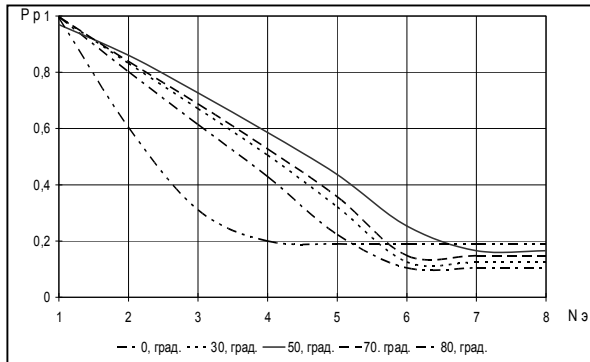


Рис. 7. Графік залежності імовірності розпізнавання об'єкта від кута візування кількості елементів площі об'єкта, які закриваються, на бетоні

4) моделювання процесу порівняння ПЗ і ЕЗ з використанням класичного кореляційного алгоритму;

5) статистичну оцінку імовірності розпізнавання об'єкта з природним радіояркисним контрастом і згладженим з урахуванням площі об'єкта, що закривається.

Принцип моделювання процесу розпізнавання об'єкта на фоні полягав у поелементному порівнянні поточного і еталонного зображень з наступним обчисленням міри їх подібності (коефіцієнта кореляції). При цьому прийняті ті ж допущення, що і при моделюванні процесу виявлення об'єкта РМ ГСН.

Оцінка імовірності розпізнавання об'єкта визначалася відношенням суми коефіцієнтів кореляції, одержуваних у результаті порівняння ПЗ з ЕЗ до загальної кількості запусків ( $N = 1\ 000$ ) алгоритму порівняння.

Графіки залежності імовірності розпізнавання об'єкта на типових фонах від кількості закритих (захищених) елементів розділення і кутів візування наведені на рис. 7 – 10.

Аналіз наведених залежностей показує, що при кутах візування  $\theta = 0...50^\circ$  від вертикальних, імовірність розпізнавання об'єкта знижується пропорційно кількості елементів розділення, які закриваються, (площі об'єкта) і досягає мінімальних значень при закритті  $S = 80...90\%$  площі об'єкта як при висоті візування 150 м, так і при висоті 100 м.

Максимальний розкид імовірності виявлення залежно від кутів візування знаходиться в межах 0,1...0,35 на бетоні та 0,25...0,3 – на траві.

Враховуючи, що одним з основних показників, що характеризують ефективність застосування РМ ГСН, є імовірність правильної локалізації об'єкта, проведемо оцінювання цього параметра.

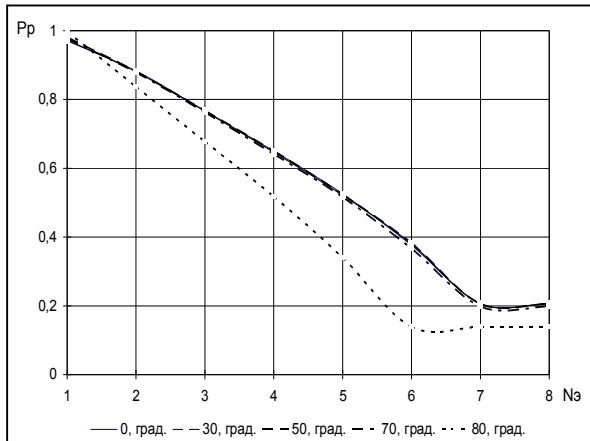


Рис. 8. Графік залежності імовірності розпізнавання об'єкта на траві від кута візування і кількості елементів площі об'єкта, які закриваються

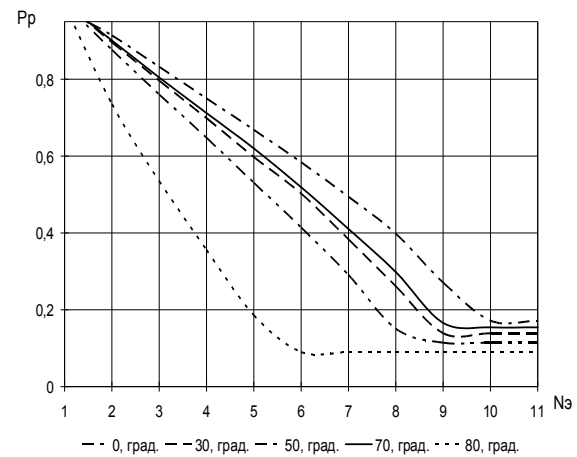


Рис. 9. Графік залежності імовірності розпізнавання об'єкта на бетоні від кута візування і кількості елементів площі об'єкта, які закриваються

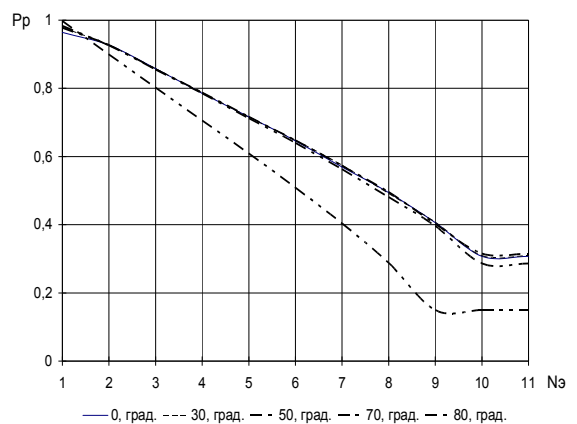


Рис. 10. Графік залежності імовірності розпізнавання об'єкта на траві від кута візування і кількості елементів площі об'єкта, які закриваються

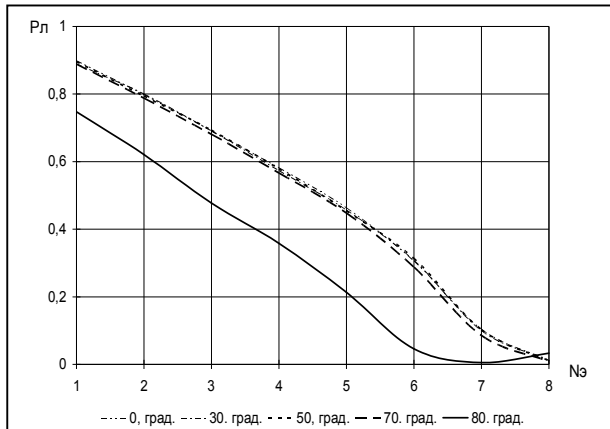


Рис. 11. Залежність імовірності локалізації об'єкта РМ ГСН на траві від кута візування і кількості площі об'єкта, яка закривається

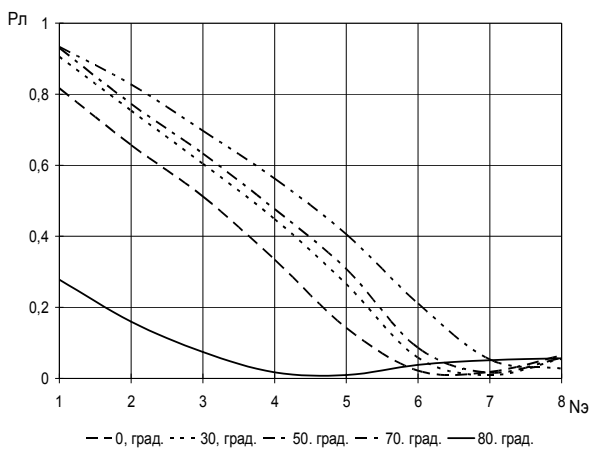


Рис. 12. Залежність імовірності локалізації об'єкта РМ ГСН на бетоні від кута візування і кількості площі об'єкта, яка закривається

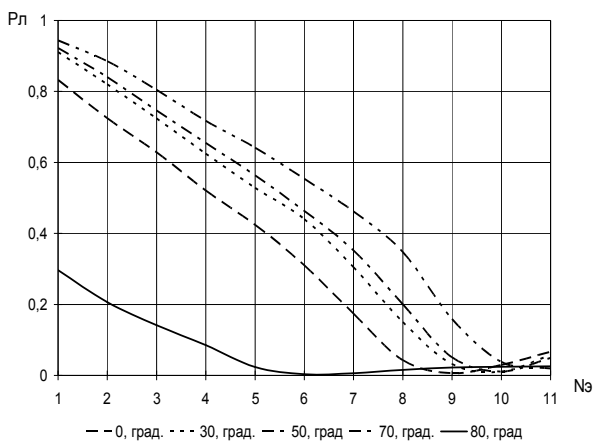


Рис. 13. Залежність імовірності локалізації об'єкта РМ ГСН на бетоні від кута візування і кількості площі об'єкта, яка закривається

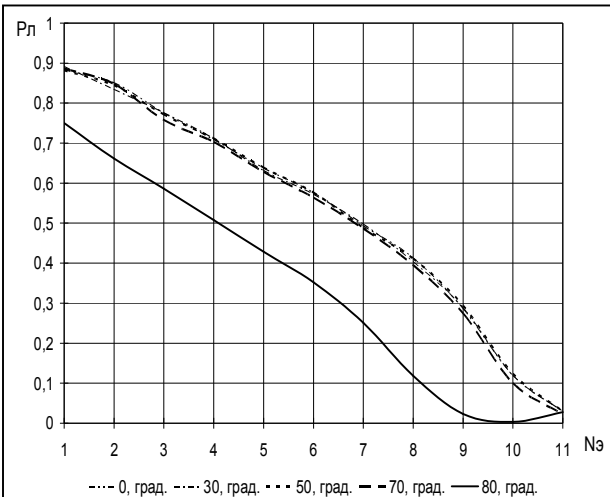


Рис. 14. Залежність імовірності локалізації об'єкта РМ ГСН на траві від кута візування і кількості площі об'єкта, яка закривається

Виходячи з того, що імовірність локалізації об'єкта РМ ГСН визначається виразом  $P_{ло} = P_{обн} P_{рас}$  [2], а імовірність розпізнавання об'єкта залежить від площі об'єкта  $S_n$ , яка закривається захисним покриттям, визначимо, як залежить імовірність локалізації об'єкта на типових фонах від кутів візування і кількості площі об'єкта, яка закривається.

Для цього радіояркісну температуру об'єкта при моделюванні процесу виявлення розрахуємо відповідно до виразу

$$T_{яо} = S_n T_{ян} + T_{яз} (1 - S_n),$$

де  $T_{ян}$  – радіояркісна температура незахищеного об'єкта;

$T_{яз}$  – радіояркісна температура захисного покриття;

$S_n$  – відношення незахищеної площі об'єкта до захищеної.

Графіки залежності імовірності локалізації об'єкта від кутів візування і площі, що закривається, на фонах типу бетон і трава наведені на рис. 11 – 14.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 11 – 14, показує, що згладжування радіояркісних контрастів шляхом забезпечення радіояркісної температури об'єкта, що захищається, у межах 270...275 К та закритті захисним покриттям 80...90 % площі об'єкта дозволяє знизити імовірність локалізації об'єкта РМ ГСН на типових фонах до значень порядку 0,32...0,1.

### Висновки

Таким чином, отримані шляхом імітаційного моделювання оцінки імовірності виявлення і розпізнавання малорозмірних об'єктів ОВТ радіометричними головками самонаведення при згладжуванні меж розділу об'єкт-фон до значень радіояркісної температури порядку 15...20 К підтверджують отримані нами раніше теоретичні оцінки, що складають для  $P_0 = 0,1...0,32$ ,  $P_p = 0,25...0,35$ . Незначна відмінність отриманих результатів від теоретичних обумовлена прийнятими нами допущеннями, які відповідають найбільш жорстким умовам одержання ПЗ.

Результати імітаційного моделювання разом з опублікованими нами раніше результатами підтверджують ефективність розробленого методу захисту малорозмірних об'єктів ОВТ на основі використання електрофізичних властивостей об'єктів і тіл для згладжування радіояркісних контрастів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пустоваров В.Е., Сотников А.М., Пустоваров В.В. Противодействие радиометрическим системам навигации // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001. – Вип. 1(11). – С. 191 – 193.
2. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Модель противодействия управляемым средствам поражения с радиометрическими головками самонаведения // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 11(39). – С. 185 – 190.
3. Сотников А.М., Красношарпа И.В., Гаврилов А.Б. Метод снижения радиометрической наблюдаемости наземных малоразмерных объектов // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 1(41). – С. 169 – 172.

4. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Оценка влияния условий визирования на излучательную способность различных поверхностей и покровов // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 2(42). – С. 177 – 182.

5. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Оценка вероятности распознавания объекта радиометрической системой при постановке маскирующих помех // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – Х.: ХАИ. – 2005. – Вип. 3(11). – С. 10 – 14.

6. Исследование операций / Под ред. Дж. Моуэра, С. Элмаграби: Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР И.М. Макарова, д.т.н. И.М. Бескровного. – М.: Мир, 1981. – Т. 1. – 712 с.

7. Антюфеев В.И. Синтез устойчивых к вариациям яркости алгоритмов локализации целей // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1995. – Вип. 2. – С. 34 – 38.

8. Антюфеев В.И., Макаренко Б.И., Султанов А.С. Синтез устойчивых к вариации яркости изображений алгоритмов локализации целей в двухмерных КЭСН: Сообщение 2. Выбор эталона максимального сходства и синтез оптимальных алгоритмов // Электромагнитные волны & Электронные системы. – 1999. – Т. 2, № 6. – С. 78 – 82.

9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fas.org/man/dod101/sys/land/sadarm.htm](http://www.fas.org/man/dod101/sys/land/sadarm.htm).

10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fas.org/man/dod101/sys/land/smart.htm](http://www.fas.org/man/dod101/sys/land/smart.htm).

11. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами // Зарубежная радиоэлектроника. – 1982. – № 12. – С. 3 – 39.

Надійшла 07.10.2005

Рецензент: д-р техн. наук снс В.І. Антюфеев, Об'єднаний науково-дослідний інститут ЗС, Харків.