

**МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИЯВЛЕННЯ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ СИСТЕМОЮ РАДІОРОЗВІДКИ ПРОТИВНИКА**

**Анотація.** Запропоновано новий метод математичного моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення, розроблений на основі апарату тензорного числення з урахуванням особливостей систем радіорозвідки нового покоління. Метод призначений для розв'язання завдання оцінювання рівня радіомаскування системи радіозв'язку під час забезпечення потрібного рівня радіомаскування.

**Ключові слова:** математичне моделювання, система радіозв'язку військового призначення, радіорозвідка, радіомаскування, тензор електромагнітного поля.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Результати аналізу факторів, які впливають на системи радіозв'язку військового призначення під час боротьби з системами радіорозвідки, свідчать про існування об'єктивної суперечності. З одного боку, через потребу в забезпеченні інформаційного обміну в системі управління військами (силами) система радіозв'язку військового призначення повинна випромінювати електромагнітні хвилі. З іншого боку, ці електромагнітні хвилі використовуються системами радіорозвідки противника для викриття угруповань військ (сил), отже системи радіозв'язку військового призначення або не повинні випромінювати електромагнітні хвилі, або мають їх маскувати. Наявність цієї суперечності зумовлює актуальність досліджень, присвячених проблемам боротьби систем радіозв'язку військового призначення з системами радіорозвідки. Внаслідок стрімкого розвитку систем радіорозвідки у збройних силах країн світу з високим рівнем розвитку військових технологій, появи систем радіорозвідки нового покоління [1] та відставання України у сфері створення сучасних розвідувальних систем радіозв'язку військового призначення виникла невідповідність між наявними спроможностями систем радіозв'язку військового призначення до боротьби з системами радіорозвідки та спроможностями, потрібними для боротьби з системами радіорозвідки нового покоління, тобто не забезпечується необхідний рівень радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення. Надання рекомендацій щодо боротьби систем радіозв'язку військового призначення з системами радіорозвідки з метою забезпечення потрібного рівня радіомаскування є завданням теорії радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення. Зазначена мета досягається шляхом розв'язання низки часткових завдань, одним з яких є оцінювання рівня радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення, що потребує застосування відповідного методичного апарату.

**АНАЛІЗ ВІДОМИХ ПУБЛІКАЦІЙ**

У різні часи дослідження, пов'язані з розробленням методичного апарату оцінювання рівня радіомаскування систем (засобів) радіозв'язку військового призначення, проводили А.І. Палій, В.І. Сіфоров, Н.М. Ізюмов, В.А. Варта-несян, В.В. Цветнов, В.П. Дьомін, А.І. Купріянов, С.І. Макаренко, З.М. Каневський, В.П. Литвиненко, Г.В. Макаров та інші науковці. У відомих публікаціях цих авторів, зокрема [2–7], запропоновано понад два десятки різноманітних

показників оцінювання рівня радіомаскування системи (засобу) радіозв'язку військового призначення. Зазначені показники мають переважно ймовірнісний характер. Але ймовірнісним показникам притаманний суттєвий недолік — перевірка адекватності аналітичних співвідношень, що описують ці показники, потребує суттєвих обсягів статистичного матеріалу, які далеко не завжди є наявними. Крім того, застосування зазначених показників ускладнюється тим, що системи радіорозвідки нового покоління спроможні викривати засоби радіозв'язку майже миттєво з ймовірністю одиниця за умови їхньої розвідувальної доступності [1].

Детальний аналіз аналітичних співвідношень для зазначених показників дає змогу зробити висновок, що математичні моделі для опису систем радіорозвідки противника, застосовані авторами під час отримання аналітичних співвідношень для показників рівня радіомаскування систем (засобів) радіозв'язку військового призначення, не відповідають системам радіорозвідки нового покоління. Зокрема, не береться до уваги те, що сьогодні всі види засобів радіорозвідки, а саме космічні, стратосферні, повітряні, наземні та морські, працюють як єдина система радіорозвідки. Це дає змогу забезпечити безпрецедентну розвідувальну доступність систем радіозв'язку військового призначення. Системи радіорозвідки нового покоління характеризуються високим рівнем автоматизації та побудовані з використанням сучасної високопродуктивної розвідувальної радіоелектронної апаратури (підвищеної чутливості) і відповідного програмного забезпечення. Завдяки цьому, наприклад, для космічних засобів радіорозвідки, вдалося досягти смуги розвідки величиною 6100 км, тривалості процесу від моменту перехоплення до моменту відображення радіоелектронної обстановки на екрані близько 10 хв., для наземних засобів розширити до 20 МГц–3 ГГц діапазон частот, що розвідуються, суттєво підвищити точність визначення місцеперебування засобів радіозв'язку, збільшити кількість цифрових каналів радіозв'язку, які автоматично перехоплюються, до 30. Системи радіорозвідки нового покоління набули спроможності до виявлення і перехоплення складних (шумоподібних) радіосигналів, сигналів малої тривалості та сигналів, що передаються за протоколами маршрутизації пакетів. Реалізовано метод однопозиційного виявлення місцеперебування [1].

До того ж, у відомих аналітичних співвідношеннях для показників рівня радіомаскування не беруть до уваги координати місцеперебування засобів радіозв'язку військового призначення та засобів радіорозвідки противника (як відомі, так і передбачувані), а також наявність фальшивих радіомереж.

Таким чином, оцінювання рівня радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення за допомогою відомих аналітичних співвідношень для показників рівня радіомаскування, особливо в умовах високої динаміки обстановки на полі бою та застосування систем радіорозвідки нового покоління, не дає змоги отримати коректні оцінки. Потреба у розробленні методів математичного моделювання і моделей, спроможних відобразити та врахувати розвідувальні спроможності систем радіорозвідки нового покоління, зумовлена насамперед їхньою відсутністю у складі відомого методичного апарату оцінювання рівня радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення.

Метою статті є розроблення нового методу математичного моделювання виявлення системи радіозв'язку військового призначення системою радіорозвідки противника, який враховує розвідувальні спроможності систем радіорозвідки нового покоління, координати місцеперебування засобів радіозв'язку військового призначення та засобів радіорозвідки противника (як відомі, так і передбачувані), наявність фальшивих радіомереж. Цей метод може бути використаний для оцінювання рівня радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення під час забезпечення потрібного рівня радіомаскування.

## МЕТОД ТЕНЗОРА ПОЛЯ

Будемо вважати, що систему радіорозвідки нового покоління розгорнуто на  $Q$  засобах радіорозвідки, а систему радіозв'язку військового призначення розгорнуто на  $M$  радіостанціях. Радіостанції можна поділити на дві групи: групу радіостанцій, що не застосовують складних (шумоподібних) сигналів, та групу радіостанцій, що їх застосовують. З огляду на базові методи розширення спектрів сигналів [8, 9], група радіостанцій, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали, може працювати у таких режимах: режим бінарної фазової модуляції (БФМ) псевдовипадковою послідовністю (ПВП), режим дискретної частотної модуляції (ДЧМ) ПВП, режим частотно-фазової маніпуляції (ЧФМ) ПВП та режим псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ). Крім того, будемо вважати, що додатково розгортаються фальшиві радіомережі на  $M_{\text{фальш}}$  фальшивих радіостанціях.

В основу цього методу математичного моделювання покладено положення електродинаміки [10], згідно з яким електромагнітне поле в будь-якій точці простору подається антисиметричним 4-тензором 2 рангу, так званим тензором поля, через що цей метод отримав назву «метод тензора поля»:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & \left(\frac{\partial}{\partial t} A_1 - \frac{\partial}{\partial x} A_0\right) & \left(\frac{\partial}{\partial t} A_2 - \frac{\partial}{\partial y} A_0\right) & \left(\frac{\partial}{\partial t} A_3 - \frac{\partial}{\partial z} A_0\right) \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} A_1 - \frac{\partial}{\partial x} A_0\right) & 0 & -\left(\frac{\partial}{\partial y} A_1 - \frac{\partial}{\partial x} A_2\right) & \left(\frac{\partial}{\partial x} A_3 - \frac{\partial}{\partial z} A_0\right) \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} A_2 - \frac{\partial}{\partial y} A_0\right) & \left(\frac{\partial}{\partial y} A_1 - \frac{\partial}{\partial x} A_2\right) & 0 & -\left(\frac{\partial}{\partial z} A_2 - \frac{\partial}{\partial y} A_3\right) \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} A_3 - \frac{\partial}{\partial z} A_0\right) & -\left(\frac{\partial}{\partial x} A_3 - \frac{\partial}{\partial z} A_1\right) & \left(\frac{\partial}{\partial z} A_2 - \frac{\partial}{\partial y} A_3\right) & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{A}=(A_0, A_1, A_2, A_3)$  — векторний потенціал електромагнітного поля, створеного радіостанцією.

Зрозуміло, що в різних місцях реального (або передбачуваного) перебування засобів радіорозвідки противника потенціал електромагнітного поля буде різним (рис. 1).

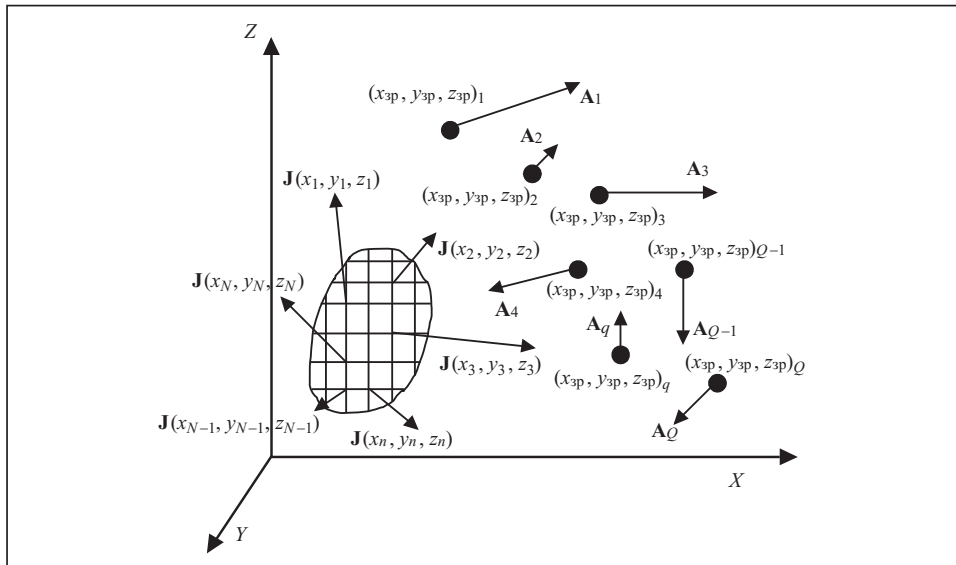


Рис. 1. Вектори електричного струму  $\mathbf{J}(x_i, y_i, z_i)$  у випромінювачах антенної решітки радіостанції та вектори потенціалів електромагнітного поля  $\mathbf{A}_j$  у місцях перебування засобів радіорозвідки противника у певний момент часу (приклад)

Спираючись на [10, 11], можна подати складові потенціалу електромагнітного поля в реальних (або передбачуваних) місцях перебування засобів радіорозвідки противника для радіостанцій з антенною решіткою, що не застосовують складних (шумоподібних) сигналів, таким чином:

$$(A_1)_{mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{n_x}} \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_x}}}) \times \quad (2)$$

$$\times \frac{\exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{зр_q} - x_{m_n})^2 + (y_{зр_q} - y_{m_n})^2 + (z_{зр_q} - z_{m_n})^2}\right)}{\sqrt{(x_{зр_q} - x_{m_n})^2 + (y_{зр_q} - y_{m_n})^2 + (z_{зр_q} - z_{m_n})^2}},$$

$$(A_2)_{mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{n_y}} \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_y}}}) \times \quad (3)$$

$$\times \frac{\exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{зр_q} - x_{m_n})^2 + (y_{зр_q} - y_{m_n})^2 + (z_{зр_q} - z_{m_n})^2}\right)}{\sqrt{(x_{зр_q} - x_{m_n})^2 + (y_{зр_q} - y_{m_n})^2 + (z_{зр_q} - z_{m_n})^2}},$$

$$(A_3)_{mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{n_z}} \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_z}}}) \times \quad (4)$$

$$\times \frac{\exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{зр_q} - x_{m_n})^2 + (y_{зр_q} - y_{m_n})^2 + (z_{зр_q} - z_{m_n})^2}\right)}{\sqrt{(x_{зр_q} - x_{m_n})^2 + (y_{зр_q} - y_{m_n})^2 + (z_{зр_q} - z_{m_n})^2}},$$

$$(A_0)_{mq} = \frac{1}{-i2\pi f_{0_m} \varepsilon\mu} \left( \frac{\partial}{\partial x_{зр_q}} (A_1)_{mq} + \frac{\partial}{\partial y_{зр_q}} (A_2)_{mq} + \frac{\partial}{\partial z_{зр_q}} (A_3)_{mq} \right), \quad (5)$$

де  $(A_0)_{mq}, (A_1)_{mq}, (A_2)_{mq}, (A_3)_{mq}$  — компоненти векторного потенціалу електромагнітного поля  $A_{mq}$ , створеного  $m$ -ю радіостанцією в реальному (або передбачуваному) місці перебування  $q$ -го засобу радіорозвідки;  $\mu$  — абсолютна магнітна проникність операційного району як середовища розповсюдження електромагнітних хвиль (Гн/м) (якщо антена радіостанції перебуває в повітрі,  $\mu \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $L_{mq}$  — функція ослаблення електромагнітної хвилі в напрямку від  $m$ -ї радіостанції на  $q$ -й засіб радіорозвідки;  $N$  — кількість випромінювачів у антенній решітці радіостанції;  $(j_{m_{n_x}}, j_{m_{n_y}}, j_{m_{n_z}})$  — проекції вектора амплітуди густини електричного струму в  $n$ -му випромінювачі антенної решітки  $m$ -ї радіостанції;  $i = \sqrt{-1}$ ;  $f_{0_m}$  — несвіна частота випромінювання  $m$ -ї радіостанції (ГГц);  $(\psi_{0_{m_{n_x}}}, \psi_{0_{m_{n_y}}}, \psi_{0_{m_{n_z}}})$  — проекції вектора початкових фаз щільності електричного струму в  $n$ -му випромінювачі антенної решітки  $m$ -ї радіостанції;  $\varepsilon$  — абсолютна діелектрична проникність операційного району як середовища розповсюдження електромагнітних хвиль (Ф/м) (якщо антена радіостанції перебуває у повітрі,  $\varepsilon \approx \frac{10^{-9}}{36\pi}$  Ф/м);  $(x_{m_n}, y_{m_n}, z_{m_n})$  — координати

$n$ -го випромінювача антенної решітки  $m$ -ї радіостанції;  $(x_{зр_q}, y_{зр_q}, z_{зр_q})$  — реальні (або передбачувані) координати  $q$ -го засобу радіорозвідки.

Відомо, що радіорозвідка наперед не знає, з яким сигналом вона матиме справу, тому наявність сигналів на вході своїх приймачів визначає за допомогою додатної різниці між потужністю коливань та потужністю власних шумів приймачів, яка формується впродовж деякого часу спостереження  $T$ . Отже, доцільно застосувати коефіцієнт електромагнітної доступності  $m$ -ї радіостанції для  $q$ -го засобу радіорозвідки, що був запропонований у [12–14] для низки часткових випадків:

$$\mathcal{E}_{mq} = \frac{\int_0^T P_{mq}(t) dt}{P_{пор_q} T},$$

де  $P_{mq}(t)$  — миттєва потужність електромагнітного поля, створеного  $m$ -ю радіостанцією в місці перебування  $q$ -го засобу радіорозвідки;  $P_{пор_q}$  — поріг для  $q$ -го засобу радіорозвідки.

Як відомо з теорії розповсюдження електромагнітних хвиль [10, 15],

$$P_{mq}(t) = \frac{E_{mq}^2(t) + H_{mq}^2(t)}{4\pi},$$

де  $E(t)$ ,  $H(t)$  — миттєві напруженості електричного та магнітного полів відповідно.

При цьому

$$\begin{aligned} E_{mq}^2(t) &= E_{mq_x}^2(t) + E_{mq_y}^2(t) + E_{mq_z}^2(t), \\ H_{mq}^2(t) &= H_{mq_x}^2(t) + H_{mq_y}^2(t) + H_{mq_z}^2(t), \end{aligned}$$

де  $(E_{mq_x}(t), E_{mq_y}(t), E_{mq_z}(t))$ ,  $(H_{mq_x}(t), H_{mq_y}(t), H_{mq_z}(t))$  — проекції миттєвих напруженостей електричного та магнітного полів (відповідно) в обраній системі координат.

Зазначені проекції є компонентами тензора електромагнітного поля (1), тому можна подати коефіцієнт електромагнітної доступності  $m$ -ї радіостанції для  $q$ -го засобу радіорозвідки у такому вигляді [12–14]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{mq} &= \frac{1}{4\pi P_{пор_q} T} \int_0^T \left[ \left( \frac{\partial}{\partial t} (A_1)_{mq} - \frac{\partial}{\partial x_{зр_q}} (A_0)_{mq} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial t} (A_2)_{mq} - \frac{\partial}{\partial y_{зр_q}} (A_0)_{mq} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{\partial}{\partial t} (A_3)_{mq} - \frac{\partial}{\partial z_{зр_q}} (A_0)_{mq} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial z_{зр_q}} (A_2)_{mq} - \frac{\partial}{\partial y_{зр_q}} (A_3)_{mq} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{\partial}{\partial x_{зр_q}} (A_3)_{mq} - \frac{\partial}{\partial z_{зр_q}} (A_1)_{mq} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial y_{зр_q}} (A_1)_{mq} - \frac{\partial}{\partial x_{зр_q}} (A_2)_{mq} \right)^2 \right] dt. \end{aligned}$$

З урахуванням (2)–(5) складові коефіцієнта електромагнітної доступності  $m$ -ї радіостанції, що не застосовує складних (шумоподібних) сигналів, для  $q$ -го засобу радіорозвідки матимуть такий вигляд (наприклад, для  $F_{mq_01}(t) = \frac{\partial}{\partial t} (A_1)_{mq} - \frac{\partial}{\partial x_{зр_q}} (A_0)_{mq}$  розрахунок решти складових здійснюється

аналогічно):

$$\frac{\partial}{\partial t} (A_1)_{mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{n_x}} i2\pi f_{0_m} \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_x}}}) \times$$

$$\exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}\right)$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}},$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} (A_0)_{mq} = \frac{1}{-i2\pi f_{0_m} \varepsilon\mu} \frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} \left( \frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} (A_1)_{mq} + \frac{\partial}{\partial y_{3p_q}} (A_2)_{mq} + \frac{\partial}{\partial z_{3p_q}} (A_3)_{mq} \right),$$

де

$$\frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} \left( \frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} (A_1)_{mq} \right) = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{n_x}} \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_x}}}) \exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \times$$

$$\times \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}\right) \left\{ 3(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right.$$

$$\left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^{5/2} + \left( 1 - 4\pi^2 f_{0_m}^2 \varepsilon\mu (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 \right) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right.$$

$$\left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^{3/2} + i6\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right.$$

$$\left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^2 - i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right.$$

$$\left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right] \left. \right\},$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} \left( \frac{\partial}{\partial y_{3p_q}} (A_2)_{mq} \right) = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{n_y}} \exp\left(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_y}}}\right) \exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \times$$

$$\times \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}\right) \times$$

$$\times \left\{ 3(x_{3p_q} - x_{m_n})(y_{3p_q} - y_{m_n}) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right.$$

$$\left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^{5/2} -$$

$$- 4\pi^2 f_{0_m}^2 \varepsilon\mu (x_{3p_q} - x_{m_n})(y_{3p_q} - y_{m_n}) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right.$$

$$\left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^{3/2} +$$

$$\begin{aligned}
& +i6\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} (x_{3p_q} - x_{m_n})(y_{3p_q} - y_{m_n}) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + \right. \\
& \left. + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^2 \Bigg\}, \\
\frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} \left( \frac{\partial}{\partial z_{3p_q}} (A_3)_{mq} \right) &= \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} j_{m_{nz}} \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{nz}}}) \exp \left( -i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \times \right. \\
& \times \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2} \Bigg) \times \\
& \times \left\{ 3(x_{3p_q} - x_{m_n})(z_{3p_q} - z_{m_n}) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^{5/2} - \right. \\
& - 4\pi^2 f_{0_m}^2 \varepsilon\mu (x_{3p_q} - x_{m_n})(z_{3p_q} - z_{m_n}) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right. \\
& \left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^{3/2} + \\
& \left. + i6\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} (x_{3p_q} - x_{m_n})(z_{3p_q} - z_{m_n}) / \left[ (x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2 \right]^2 \right\}.
\end{aligned}$$

Умови, за яких радіостанцію, що не застосовує складних (шумоподібних) сигналів, можна вважати замаскованою (розвідувально недоступною), зазвичай мають такий вигляд [4, 12]:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{mq} < 1, \\ \frac{\tau_m}{\tau_{3p_q}} < 1, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\tau_m$  — тривалість роботи на передачу  $m$ -ї радіостанції;  $\tau_{3p_q}$  — час реагування  $q$ -го засобу радіорозвідки.

Якщо умови (6) не виконуються одночасно для трьох різних засобів радіорозвідки, радіостанція вважається незамаскованою, тому виникає потреба у трьох пеленгах на радіостанцію для визначення її місцеперебування системою радіорозвідки. У певних випадках, зокрема для радіостанцій короткохвильового (КХ) діапазону та у разі наявності в системі радіорозвідки противника засобів радіорозвідки, спроможних до реалізації методу однопозиційного визначення місцеперебування, достатнім є невиконання умов (6) для одного засобу радіорозвідки.

Для радіостанцій з антенною решіткою, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали з ППРЧ, складові потенціалу електромагнітного поля в реальних (або передбачуваних) місцях перебування засобів радіорозвідки противника, спираючись на [8–11], можна подати таким чином:

$$\begin{aligned}
(A_1)_{mq} &= \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_x}} u[t - (k-1)\tau_u] \exp \left[ i2\pi(f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m)t + \psi_{k_{m_{n_x}}} \right] \times \\
&\times \frac{\exp \left( -i2\pi(f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m) \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2} \right)}{\sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}}, \\
(A_2)_{mq} &= \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_y}} u[t - (k-1)\tau_u] \exp \left[ i2\pi(f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m)t + \psi_{k_{m_{n_y}}} \right] \times \\
&\times \frac{\exp \left( -i2\pi(f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m) \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2} \right)}{\sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}}, \\
(A_3)_{mq} &= \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_z}} u[t - (k-1)\tau_u] \exp \left[ i2\pi(f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m)t + \psi_{k_{m_{n_z}}} \right] \times \\
&\times \frac{\exp \left( -i2\pi(f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m) \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2} \right)}{\sqrt{(x_{3p_q} - x_{m_n})^2 + (y_{3p_q} - y_{m_n})^2 + (z_{3p_q} - z_{m_n})^2}}, \\
(A_0)_{mq} &= \frac{\frac{\partial}{\partial x_{3p_q}} (A_1)_{mq} + \frac{\partial}{\partial y_{3p_q}} (A_2)_{mq} + \frac{\partial}{\partial z_{3p_q}} (A_3)_{mq}}{-i2\pi\varepsilon\mu \sum_{k=1}^K [f_{0_m} + (N_k - D)\Delta f_m]},
\end{aligned}$$

де  $u[t - (k-1)\tau_u] = \begin{cases} 1 & \text{при } (k-1)\tau_u \leq t \leq k\tau_u, \\ 0 & \text{при } t < (k-1)\tau_u, t > k\tau_u, \end{cases}$  — функція одиничного стрибка;  $\tau_u$  — тривалість елемента кодової послідовності;  $K$  — кількість елементів кодової послідовності на тривалість біта інформації ( $K = T_b / \tau_u$ );  $\Delta f$  — дискрет частоти;  $N_k \in \overline{1, K}$  — числова послідовність;  $D = (K + 1) / 2$ ;  $0 \leq t \leq K\tau_u$ ;  $\psi_k$  — випадкова величина з рівномірним розподілом у діапазоні  $[0, 2\pi]$ .

Для цих радіостанцій критерій замаскованості матиме вигляд

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{mq} < 1, \\ \tau_m / \tau_{3p_q} < 1, \\ f_{m_{\text{ППРЧ}}} / f_{\text{пор}_{q\text{ППРЧ}}} < 1, \end{cases} \quad (7)$$

де  $f_{m_{\text{ППРЧ}}}$  — тактова частота, з якою змінюється несівна сигналу  $m$ -ї радіостанції;  $f_{\text{пор}_{q\text{ППРЧ}}}$  — порогове значення тактової частоти, з якою змінюється несівна сигналу радіостанції, у разі перевищення якого  $q$ -й засіб радіорозвідки не спроможний виявляти роботу радіостанцій, що працюють у режимі ППРЧ.

Оцінювання рівня радіомаскування радіостанцій, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали з БФМ ПВП, ДЧМ ПВП та ЧФМ ПВП, докладно розглянуто відповідно у [12–14].



Таким чином, за допомогою критеріїв (6), (7) та критеріїв, запропонованих у [12–14], можна оцінити загальну кількість замаскованих радіостанцій у системі радіозв'язку військового призначення:

$$M_{\text{ЗМ}}^{\text{заг}} = M_{\text{ЗМ}} + M_{\text{ЗМ}}^{\text{БФМ}} + M_{\text{ЗМ}}^{\text{ДЧМ}} + M_{\text{ЗМ}}^{\text{ЧФМ}} + M_{\text{ЗМ}}^{\text{ППРЧ}},$$

де  $M_{\text{ЗМ}}$  — кількість замаскованих радіостанцій, що не застосовують складних (шумоподібних) сигналів;  $M_{\text{ЗМ}}^{\text{БФМ}}$  — кількість замаскованих радіостанцій, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали з БФМ ПВП;  $M_{\text{ЗМ}}^{\text{ДЧМ}}$  — кількість замаскованих радіостанцій, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали з ДЧМ ПВП;  $M_{\text{ЗМ}}^{\text{ЧФМ}}$  — кількість замаскованих радіостанцій, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали з ЧФМ ПВП;  $M_{\text{ЗМ}}^{\text{ППРЧ}}$  — кількість замаскованих радіостанцій, що застосовують складні (шумоподібні) сигнали з ППРЧ.

При цьому рівень радіомаскування такої системи радіозв'язку військового призначення для системи радіорозвідки противника пропонується оцінювати за показником розвідувальної доступності  $R = \frac{M_{\text{ЗМ}}^{\text{заг}} + M_{\text{фальш}}}{M} 100\%$ .

#### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропонований метод математичного моделювання дає змогу оцінити рівень радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення з урахуванням розвідувальних спроможностей систем радіорозвідки нового покоління, координат місцеперебування засобів радіозв'язку військового призначення та засобів радіорозвідки противника (як відомих, так і передбачуваних), параметрів складних (шумоподібних) сигналів з БФМ ПВП, ДЧМ ПВП, ЧФМ ПВП та ППРЧ і наявності фальшивих радіомереж. У подальших роботах доцільно зосередити зусилля на розв'язанні проблем математичного моделювання з метою дослідження стійкості радіозв'язку до радіомаскування.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Меньшаков Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок. Под. ред. М.П. Сычева. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 656 с.
2. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Санкт-Петербург: Свое изд-во, 2013. 166 с.
3. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. Москва: Вузовская книга, 2007. 356 с.
4. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиомаскировка и помехозащита. Москва: Изд-во МАИ, 1999. 240 с.
5. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба (средства и способы подавления и защиты радиоэлектронных систем). Москва: Воениздат, 1981. 320 с.
6. Варганесян В.А., Гойхман Э.Ш., Рогаткин М.И. Радиопеленгация. Москва: Воениздат, 1966. 248 с.
7. Каневский З.М., Литвиненко В.П., Макаров Г.В. Теория скрытности. Часть 1. Основы теории скрытности. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. 92 с.
8. Тузов Г.И., Сивов В.А., В.И. Прытков и др.; под. ред. Г.И.Тузова. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. Москва: Радио и связь, 1985. 264 с.
9. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Москва: Радио и связь, 1985. 384 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. Кн. 1: Механика. Электродинамика. Москва: Наука: Глав. ред. физ.-мат. лит., 1969. 271 с.

11. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. Москва: Сов. радио, 1980. 296 с.
12. Волобуев А.А., Бухал Д.А., Сергієнко А.В. Математичне моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення з шумоподібними сигналами на основі фазової модуляції псевдовипадковою послідовністю. *Збірник наукових праць ВІПІ*. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, 2017. № 3. С. 32-40.
13. Волобуев А.А., Бухал Д.А. Математичне моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення, яка застосовує шумоподібні сигнали з дискретною частотною модуляцією псевдовипадковою послідовністю. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ: Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, 2017. №2 (29). С. 9-15.
14. Волобуев А.А., Усачова О.А., Бухал Д.А. Математичне моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення, яка застосовує шумоподібні сигнали з частотно-фазовою модуляцією псевдовипадковою послідовністю. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. Харків: Харківський національний університет імені Івана Кожедуба, 2017. №3 (28.) С. 76-85.
15. Альперт Я.Л., Гинзбург В.Л., Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн. Москва: Гос. тех. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1953. 883 с.

*Надійшла до редакції 18.07.2017*

**И.Ю. Свида, А.П. Волобуев, Д.А. Бухал**  
**МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ**  
**СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ СИСТЕМОЙ РАДИОРАЗВЕДКИ ПРОТИВНИКА**

**Аннотация.** Предложен новый метод математического моделирования обнаружения системой радиоразведки противника системы радиосвязи военного назначения, разработанный на основе аппарата тензорного исчисления с учетом особенностей систем радиоразведки нового поколения. Метод предназначен для решения задачи оценивания уровня радиомаскировки системы радиосвязи в ходе обеспечения необходимого уровня радиомаскировки.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, система радиосвязи военного назначения, радиоразведка, радиомаскировка, тензор электромагнитного поля.

**I.Y. Svida, A.P. Volobuiev, D.A. Bukhal**  
**METHOD OF MATHEMATICAL MODELING OF TACTICAL RADIO FINDING**  
**BY ADVERSARY SIGNAL INTELLIGENCE**

**Abstract.** This article proposes a new method for mathematical modeling of tactical radio finding by adversary signal intelligence systems. The method was developed based on the apparatus of tensor calculus taking into account the features of the new generation of signal intelligence systems. The method is destined for evaluating the tactical radio system radiodisguise level in providing the required radiodisguise level.

**Keywords:** mathematical modeling, tactical radio, signal intelligence, radiodisguise, electromagnetic field tensor.

**Свида Іван Юрійович,**  
 доктор військ. наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України, Київ, e-mail: ipvoin@gmail.com.

**Волобуєв Анатолій Петрович,**  
 кандидат техн. наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України, Київ, e-mail: anvolobuiev@gmail.com.

**Бухал Дмитро Анатолійович,**  
 кандидат військ. наук, старший науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України, Київ, e-mail: vojn2002@ukr.net.