

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИЯВЛЕННЯ СИСТЕМОЮ РАДІОРОЗВІДКИ ПРОТИВНИКА СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ШУМОПОДІБНИМИ СИГНАЛАМИ НА ОСНОВІ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПОСЛІДОВНІСТЮ

У статті запропоновано метод математичного моделювання виявлення системою радіорозвідки систем радіозв'язку військового призначення з шумоподібними сигналами на основі фазової модуляції псевдовипадковою послідовністю. Метод розроблений на основі апарата тензорного числення з урахуванням особливостей систем радіорозвідки нового покоління і призначений для вирішення завдання оцінювання рівня радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення.

Волобуєв А.П., Бухал Д.А., Сергиєнко А.В. Математическое моделирование обнаружения системой радиоразведки противника системы радиосвязи военного назначения с шумоподобными сигналами на основе фазовой модуляции псевдослучайной последовательностью. В статье предложен метод математического моделирования обнаружения системой радиоразведки систем радиосвязи военного назначения с шумоподобных сигналов на основе фазовой модуляции псевдослучайной последовательностью. Метод разработан на основе аппарата тензорного исчисления с учетом особенностей систем радиоразведки нового поколения и предназначен для решения задачи оценки уровня радиомаскирования систем радиосвязи военного назначения.

A. Volobuyev, D. Buhal, A. Sergienko Mathematical modeling of detection by a radio-intelligence system of an enemy of a military radiocommunication system with noise-like signals based on phase modulation by a pseudorandom sequence. The article proposes a method of mathematical modeling of detection by a radio-intelligence system of military radiocommunication systems with noise-like signals based on phase modulation by a pseudorandom sequence. The method is developed on the basis of a tensor calculating device, taking into account the features of the new generation radio-intelligence systems, and is intended to solve the problem of the level of radio-masking of military radiocommunication systems.

Ключові слова: радіозв'язок, радіомаскування, апарат тензорного числення, шумоподібні сигнали з фазовою модуляцією.

Постановка проблеми у загальному вигляді. В збройних силах провідних країн світу активно розвиваються системи радіорозвідки, що обумовило появу систем радіорозвідки нового покоління [1 – 2]. В той же час Україна відстає у питаннях створення сучасних розвідзахищених систем радіозв'язку військового призначення, що викликає невідповідність між наявними спроможностями систем радіозв'язку військового призначення щодо боротьби з системами радіорозвідки та спроможностями, які потрібні для боротьби з системами радіорозвідки нового покоління. Тобто не забезпечується необхідний рівень радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення. Надання рекомендацій стосовно боротьби систем радіозв'язку військового призначення з системами радіорозвідки з метою забезпечення необхідного рівня радіомаскування є завданням теорії радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення. Означена мета досягається розв'язанням низки часткових завдань, одним з яких є оцінювання рівня радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення, що вимагає застосування відповідного методичного апарату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, пов'язані з розробленням методичного апарату оцінювання рівня радіомаскування систем (засобів) радіозв'язку військового призначення, в різні часи проводилися такими науковцями як Палій А.І., Сіфоров В.І., Ізюмов Н.М., Вартанесян В.А., Цветнов В.В., Демін В.П., Купріянов А.І., Макаренко С.І., Каневський З.М., Літвіненко В.П., Макаров Г.В. та іншими [3 – 11]. У відомих публікаціях даних авторів пропонується оцінювання рівня радіомаскування системи (засобу) радіозв'язку військового призначення здійснювати за більш ніж двадцятьма різноманітними ймовірнісними показниками, такими як ймовірність спостереження заданої кількості засобів радіозв'язку; ймовірність визначення місцеположення засобу радіозв'язку; ймовірність викриття засобу радіозв'язку за заданий час; ймовірність викриття заданої

кількості засобів радіозв'язку із заданою вірогідністю за заданий час тощо. Застосування даних показників обумовлене тим, що приймання радіосигналів систем радіозв'язку військового призначення можливе лише на фоні завад, в умовах змін параметрів операційного району, як середовища розповсюдження електромагнітних хвиль та дії інших непередбачуваних факторів. Тому виявлення радіосигналів систем радіозв'язку військового призначення є випадковим, помилки визначення параметрів радіосигналів – випадкові, а висновки та рішення, які радіорозвідка приймає на основі результатів приймання та оброблення радіосигналу, можуть бути помилковими. Але ймовірнісним показникам притаманний суттєвий недолік, а саме, перевірка адекватності аналітичних співвідношень для таких показників вимагає суттєвих обсягів статистичного матеріалу, що далеко не завжди можливо. Крім того, застосування зазначених показників ускладнюється тим фактом, що системи радіорозвідки нового покоління спроможні викривати засоби радіозв'язку майже миттєво з ймовірністю близькою до одиниці за умови їх розвідувальної доступності [1].

Отже, авторами за допомогою різноманітних методів математичного моделювання отримані відповідні аналітичні співвідношення для зазначених показників. Детальний аналіз даних співвідношень дозволяє зробити висновок, що математичні моделі систем радіорозвідки противника, які використовувалися авторами під час отримання аналітичних співвідношень для показників рівня радіомаскування систем (засобів) радіозв'язку військового призначення, не відповідають системам радіорозвідки нового покоління. Зокрема, не враховується той факт, що всі види сучасних засобів радіорозвідки, а саме космічні, стратосферні, повітряні, наземні та морські, працюють як єдина система радіорозвідки, що дозволяє забезпечити безпрецедентну розвідувальну доступність систем радіозв'язку військового призначення. Зазначеним системам притаманний також високий рівень автоматизації, використання сучасної високопродуктивної розвідувальної радіоелектронної апаратури (підвищеної чутливості) та програмного забезпечення. Системи радіорозвідки нового покоління набули спроможності щодо виявлення і перехоплення складних (шумоподібних) радіосигналів (зокрема, радіосигналів із фазовою модуляцією (ФМ) псевдовипадковою послідовністю (ПВП)), сигналів малої тривалості та сигналів, які передаються за протоколами маршрутизації пакетів. Реалізовано метод однопозиційного виявлення місцеположення. До того ж, у відомих аналітичних співвідношеннях для показників рівня радіомаскування не враховуються координати місцеположення засобів радіозв'язку військового призначення та засобів радіорозвідки противника (як відомі так і передбачувані), наявність хибних 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 дозволить отримати коректні оцінки. Насамперед, через відсутність у складі відомого методичного апарата оцінювання рівня радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення методів математичного і математичних моделей, спроможних відобразити та врахувати розвідувальні спроможності систем радіорозвідки нового покоління, що обумовлює потребу у розроблянні подібних методів і моделей.

Мета статті полягає в розроблянні методу математичного моделювання виявлення системи радіозв'язку військового призначення системою радіорозвідки противника, який враховує наявність хибних радіомереж, координати місцеположення засобів радіозв'язку військового призначення та засобів радіорозвідки противника (як відомі так і передбачувані), спроможність систем радіорозвідки нового покоління виявляти шумоподібні сигнали з ФМ ПВП і може бути використаним для вирішення завдання оцінювання рівня радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення під час забезпечення необхідного рівня радіомаскування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Будемо вважати, що система

радіорозвідки нового покоління розгорнута на Q засобах радіорозвідки, а система радіозв'язку військового призначення розгортається на M радіостанціях, що застосовують сигнали з ФМ ПВП. Крім того, додатково розгортаються хибні радіомережі на $M_{\text{хиб}}$ хибних радіостанціях. Всі види засобів радіорозвідки, а саме космічні, стратосферні, повітряні, наземні та морські, працюють як єдина система, що обумовлює необхідність оцінювання розвідувальних доступностей радіостанцій для всіх засобів радіорозвідки, спираючись на координати місць їх розміщення, відомі від своєї розвідки або передбачувані нею.

В основу методу математичного моделювання покладене положення електродинаміки [12], згідно з яким електромагнітне поле в будь-якій точці простору подається антисиметричним 4-тензором 2 рангу, так званим тензором поля:

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

де $A_0, A_1, A_2, A_3 = \mathbf{A}$ – потенціал електромагнітного поля, створеного радіостанцією.

Сигнал із ФМ ПВП на інтервалі часу $0, T$ можна подати у вигляді [13, 14]:

$$J t = \sum_{k=1}^K u[t - k - 1 \tau_u] \exp i2\pi f_0 t + \psi_k + \psi_0, \quad (2)$$

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;

f_0 – несуча частота;

τ_u – тривалість елемента кодової послідовності;

K – кількість елементів кодової послідовності на тривалість біта інформації

$$K = T_b / \tau_u ;$$

ψ_0 – початкова фаза сигналу $\psi_0 \in 0, 2\pi$;

ψ_k – фаза, що змінюється за заданим законом.

У випадку найбільш поширеної бінарної ФМ (БФМ), при якій $\psi_k = \alpha_k \pi, \alpha_k \in 0, 1$, вираз (2) прийме вигляд:

$$J t = \sum_{k=1}^K -1^{\alpha_k} u[t - k - 1 \tau_u] \exp i2\pi f_0 t + \psi_0, \quad (3)$$

де $\sum_{k=1}^L -1^{\alpha_k} u[t - k - 1 \tau_u] = p t$ – функція, що розширює спектр;

-1^{α_k} – кодова послідовність.

При передаванні одного біта інформації тривалістю T_b

$$d(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq T_b, \\ 0 & \text{при } t \notin [0, T_b], \end{cases} \quad (4)$$

за допомогою БФМ сигналу в передавачеві здійснюється множення інформаційного біта на функцію $p(t)$, що розширяє спектр. Для прямокутної форми символів інформаційної послідовності БФМ сигнал на тривалість одного біта можна подати так:

$$J(t) = J d(t) p(t) \exp(i2\pi f_0 t + \psi_0), \quad 0 \leq t \leq T_b, \quad (5)$$

де J – амплітуда сигналу ($J = \sqrt{2P}$, P – потужність сигналу).

Спираючись на [12 – 15], складові потенціалу електромагнітного поля в реальних (або передбачуваних) місцях знаходження засобів радіорозвідки противника для радіостанцій з антенною решіткою, що застосовують шумоподібні сигнали з БФМ ПВП можна подати так:

$$A_{1mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_x}}^{-1} \alpha_k u[t - k - 1 \tau_u] \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_x}}}) \times \\ \exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{z_{p_q}}^2 - x_{m_n}^2 + y_{z_{p_q}}^2 - y_{m_n}^2 + z_{z_{p_q}}^2 - z_{m_n}^2}\right) \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{x_{z_{p_q}}^2 - x_{m_n}^2 + y_{z_{p_q}}^2 - y_{m_n}^2 + z_{z_{p_q}}^2 - z_{m_n}^2}}, \quad (6)$$

$$A_{2mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_y}}^{-1} \alpha_k u[t - k - 1 \tau_u] \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_y}}}) \times \\ \exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{z_{p_q}}^2 - x_{m_n}^2 + y_{z_{p_q}}^2 - y_{m_n}^2 + z_{z_{p_q}}^2 - z_{m_n}^2}\right) \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{x_{z_{p_q}}^2 - x_{m_n}^2 + y_{z_{p_q}}^2 - y_{m_n}^2 + z_{z_{p_q}}^2 - z_{m_n}^2}}, \quad (7)$$

$$A_{3mq} = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_z}}^{-1} \alpha_k u[t - k - 1 \tau_u] \exp(i2\pi f_{0_m} t + \psi_{0_{m_{n_z}}}) \times \\ \exp\left(-i2\pi f_{0_m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{z_{p_q}}^2 - x_{m_n}^2 + y_{z_{p_q}}^2 - y_{m_n}^2 + z_{z_{p_q}}^2 - z_{m_n}^2}\right) \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{x_{z_{p_q}}^2 - x_{m_n}^2 + y_{z_{p_q}}^2 - y_{m_n}^2 + z_{z_{p_q}}^2 - z_{m_n}^2}}, \quad (8)$$

$$A_{0mq} = \frac{1}{-i2\pi f_{0_m} \varepsilon\mu} \left(\frac{\partial}{\partial x_{z_{p_q}}} A_{1mq} + \frac{\partial}{\partial y_{z_{p_q}}} A_{2mq} + \frac{\partial}{\partial z_{z_{p_q}}} A_{3mq} \right). \quad (9)$$

де $A_{0mq}, A_{1mq}, A_{2mq}, A_{3mq} = \mathbf{A}_{mq}$ – потенціал електромагнітного поля, створеного m -ю радіостанцією в реальному (або передбачуваному) місті знаходження q -го засобу радіорозвідки;

μ – абсолютна магнітна проникність операційного району, як середовища розповсюдження електромагнітних хвиль, Гн/м (якщо антена радіостанції знаходиться у

повітрі $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

L_{mq} – функція ослаблення електромагнітної хвилі в напрямку від m -ї радіостанції на q -й засіб радіорозвідки;

N – кількість випромінювачів в антенній решітці радіостанції;

$J_{m_{nx}}, J_{m_{ny}}, J_{m_{nz}}$ – проекції вектору амплітуди щільності електричного струму в n -

му випромінювачеві антенної решітки m -ї радіостанції;

$$i = \sqrt{-1};$$

f_{0m} – несуча частота випромінювання m -ї радіостанції (ГГц);

$\left(\psi_{0m_{nx}}, \psi_{0m_{ny}}, \psi_{0m_{nz}} \right)$ – проекції вектору початкових фаз щільності електричного

струму в n -му випромінювачеві антенної решітки m -ї радіостанції;

ε – абсолютна діелектрична проникність операційного району, як середовища розповсюдження електромагнітних хвиль, ф/м (якщо антена радіостанції знаходиться у

повітрі $\varepsilon = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ ф/м);

$x_{m_n}, y_{m_n}, z_{m_n}$ – координати n -го випромінювача антенної решітки m -ї радіостанції;

$x_{zpq}, y_{zpq}, z_{zpq}$ – реальні (або передбачувані) координати q -го засобу радіорозвідки.

Умови ведення радіорозвідки зазвичай такі, що засобам радіорозвідки достеменно невідомо, з яким сигналом вони будуть мати справу. Тому єдиною ознакою наявності сигналу на вході приймача засобу радіорозвідки може служити те, в якій ступені потужність цього коливання перевищує потужність власних шумів приймача. Судити про рівень потужності прийнятого коливання можна по її оцінці, сформованій за деякий час спостереження T . Для вирішення подібних задач застосовується, як відомо [13, 14, 16], приймач, оптимальний для виявлення невідомого сигналу лише по оцінці потужності (енергії) процесу, що спостерігається. Цей приймач фільтрує вхідне коливання у визначеній полосі частот, детектує квадратичним детектором та інтегрує за час спостереження T . Нормований до T результат інтегрування – є оцінкою потужності вхідного коливання. Вона порівнюється в компараторі з наперед обраним порогом. Якщо поріг перевищено, то приймається рішення про наявність на вході приймача засобу радіорозвідки корисного сигналу. Таким чином, можна ввести коефіцієнт електромагнітної доступності m -ї радіостанції для q -го засобу радіорозвідки:

$$\mathcal{E}_{mq} = \frac{\int_0^T P_{mq} t}{P_{порq} T}, \quad (10)$$

де $P_{mq} t$ – миттєва потужність електромагнітного поля, яке створює m -а радіостанція в місці знаходження q -го засобу радіорозвідки;

$P_{порq}$ – поріг для q -го засобу радіорозвідки.

Як відомо з [12]

$$P_{mq} t = \frac{E_{mq}^2(t) + H_{mq}^2 t}{4\pi}, \quad (11)$$

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

При чому

$$E_{mq}^2(t) = E_{mq_x}^2(t) + E_{mq_y}^2(t) + E_{mq_z}^2(t), \quad (12)$$

$$H_{mq}^2 t = H_{mq_x}^2 t + H_{mq_y}^2 t + H_{mq_z}^2 t, \quad (13)$$

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

Зазначені проекції є компонентами тензору електромагнітного поля (1), що дозволяє подати коефіцієнт електромагнітної доступності m -ї радіостанції для q -го засобу радіорозвідки так:

$$\mathcal{E}_{mq} = \frac{\int_0^T F_{mq01}^2 t + F_{mq02}^2 t + F_{mq03}^2 t + F_{mq32}^2 t + F_{mq13}^2 t + F_{mq21}^2 t}{4\pi P_{nopq} T}, \quad (14)$$

або через потенціал електромагнітного поля

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{mq} = & \frac{1}{4\pi P_{nopq} T} \int_0^T \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} A_{1\ mq} - \frac{\partial}{\partial x_{zpq}} A_{0\ mq} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t} A_{2\ mq} - \frac{\partial}{\partial y_{zpq}} A_{0\ mq} \right)^2 + \right. \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial t} A_{3\ mq} - \frac{\partial}{\partial z_{zpq}} A_{0\ mq} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z_{zpq}} A_{2\ mq} - \frac{\partial}{\partial y_{zpq}} A_{3\ mq} \right)^2 + \\ & \left. + \left(\frac{\partial}{\partial x_{zpq}} A_{3\ mq} - \frac{\partial}{\partial z_{zpq}} A_{1\ mq} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y_{zpq}} A_{1\ mq} - \frac{\partial}{\partial x_{zpq}} A_{2\ mq} \right)^2 \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

Враховуючи (5–9), складові коефіцієнту електромагнітної доступності m -ї радіостанції для q -го засобу радіорозвідки матимуть такий вигляд (наприклад для

$F_{mq01} t = \frac{\partial}{\partial t} A_{1\ mq} - \frac{\partial}{\partial x_{zpq}} A_{0\ mq}$, решта складових розраховується аналогічно):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} A_{1\ mq} = & \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K i2\pi f_{0m} j_{m_{n_x}} -1^{\alpha_k} u[t - k - 1 \tau_u] \exp i2\pi f_{0m} t + \psi_{0_{m_{n_x}}} \times \\ & \times \frac{\exp\left(-i2\pi f_{0m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{zpq} - x_{m_n}}^2 + y_{zpq} - y_{m_n}}^2 + z_{zpq} - z_{m_n}}^2\right)}{\sqrt{x_{zpq} - x_{m_n}}^2 + y_{zpq} - y_{m_n}}^2 + z_{zpq} - z_{m_n}}^2, \quad (16) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{zpq}} A_{0\ mq} = \frac{1}{-i2\pi f_{0m} \varepsilon\mu} \frac{\partial}{\partial x_{zpq}} \left(\frac{\partial}{\partial x_{zpq}} A_{1\ mq} + \frac{\partial}{\partial y_{zpq}} A_{2\ mq} + \frac{\partial}{\partial z_{zpq}} A_{3\ mq} \right), \quad (17)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_{3pq}} \left(\frac{\partial}{\partial x_{3pq}} A_{1\ mq} \right) &= \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_x}} -1^{\alpha_k} u[t - k - 1 \tau_u] \exp i2\pi f_{0m} t + \psi_{0m_{n_x}} \times \\ &\times \exp \left(-i2\pi f_{0m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2} \right) \times \\ &\times \left\{ \frac{3 x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^{\frac{5}{2}}} - \right. \\ &\frac{1 - 4\pi^2 f_{0m} + N_k - D \Delta f_m^2 \varepsilon\mu x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \\ &+ \frac{i6\pi \left(f_{0m} + \left(N_k - D \Delta f_m \sqrt{\varepsilon\mu} x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 \right) \right)}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^2} - \\ &\left. \frac{i2\pi f_{0m} + N_k - D \Delta f_m \sqrt{\varepsilon\mu}}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^2} \right\}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_{3pq}} \left(\frac{\partial}{\partial y_{3pq}} A_{2\ mq} \right) &= \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_y}} -1^{\alpha_k} u[t - k - 1 \tau_u] \exp \left(i2\pi f_{0m} t + \psi_{0m_{n_y}} \right) \times \\ &\times \exp \left(-i2\pi f_{0m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2} \right) \times \\ &\times \left\{ \frac{3 x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^{\frac{5}{2}}} - \right. \\ &\frac{4\pi^2 f_{0m} + N_k - D \Delta f_m^2 \varepsilon\mu x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \\ &\left. + \frac{i6\pi f_{0m} + N_k - D \Delta f_m \sqrt{\varepsilon\mu} x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2}{\left[x_{3pq}^2 - x_{m_n}^2 y_{3pq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{3pq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^2} \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{3pq}} \left(\frac{\partial}{\partial z_{3pq}} A_{3\ mq} \right) = \frac{\mu L_{mq}}{4\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K j_{m_{n_z}} -1^{\alpha_k} u[t - k - 1 \tau_u] \exp i2\pi f_{0m} t + \psi_{0m_{n_z}} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \exp \left(-i2\pi f_{0m} \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{x_{зpq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{зpq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{зpq}^2 - z_{m_n}^2} \times \right. \\ & \times \left\{ \frac{3 x_{зpq} - x_{m_n} z_{зpq} - z_{m_n}}{\left[x_{зpq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{зpq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{зpq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^{\frac{5}{2}}} - \right. \\ & \left. \frac{4\pi^2 f_{0m} + N_k - D \Delta f_m^2 \varepsilon\mu x_{зpq} - x_{m_n} z_{зpq} - z_{m_n}}{\left[x_{зpq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{зpq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{зpq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \right. \\ & \left. \left. + \frac{i6\pi f_{0m} + N_k - D \Delta f_m \sqrt{\varepsilon\mu} x_{зpq} - x_{m_n} z_{зpq} - z_{m_n}}{\left[x_{зpq}^2 - x_{m_n}^2 + y_{зpq}^2 - y_{m_n}^2 + z_{зpq}^2 - z_{m_n}^2 \right]^2} \right\} \right. \end{aligned} \quad (20)$$

Для радіостанцій, які застосовують сигнали з ФМ ПВП, доцільно прийняти такий векторний критерій замаскованості:

$$\begin{cases} \mathfrak{E}_{mq} < 1 \\ \tau_m / \tau_{зpq} < 1 \\ f_{m\delta\phi_m} / f_{порq\delta\phi_m} < 1 \end{cases}, \quad (21)$$

де τ_m – тривалість роботи на передачу m -ї радіостанції; $\tau_{зpq}$ – час реакції q -го засобу радіорозвідки; $f_{m\delta\phi_m}$ – тактова частота ПВП, яка модулює фазу сигналу m -ї радіостанції; $f_{порq\delta\phi_m}$ – порогове значення тактової частоти ПВП, яка модулює фазу сигналу радіостанції, вище якого q -й засіб радіорозвідки не спроможний виявляти роботу радіостанцій, які працюють в режимі БФМ ПВП.

Якщо умови (21) не виконуються одночасно для трьох різних засобів радіорозвідки, то радіостанція вважається незамаскованою, що пов'язано з потребою у трьох пеленгах на радіостанцію для визначення її місцеположення системою радіорозвідки. В окремих випадках, зокрема для КХ радіостанцій та наявності в системі радіорозвідки противника засобів радіорозвідки, спроможних реалізувати метод однопозиційного визначення місцеположення, достатньо невиконання умов (21) для одного засобу радіорозвідки.

Таким чином, застосовуючи запропонований критерій (21) можна оцінити кількість замаскованих радіостанцій в системі радіозв'язку військового призначення $M_{зм}$. При цьому рівень радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення для системи радіорозвідки противника пропонується оцінювати за показником розвідувальної доступності, а саме:

$$R = \frac{M_{зм} + M_{хиб}}{M} 100\%, \quad (22)$$

де $M_{хиб}$ – кількість хибних радіостанцій, які розгортаються з метою радіомаскування поза межами загальної кількості радіостанцій в системі радіозв'язку M .

Висновки з дослідження і перспективи подальших досліджень у цьому напрямку. Запропонований метод математичного моделювання, на відміну від існуючих, дозволяє

оцінити рівень радіомаскування систем радіозв'язку військового призначення з шумоподібними сигналами на основі ФМ ПВП, при цьому він враховує розвідувальні спроможності систем радіорозвідки нового покоління, координати місцеположення засобів радіозв'язку військового призначення та засобів радіорозвідки противника (як відомих так і передбачуваних), параметри шумоподібних сигналів з ФМ ПВП та наявність хибних радіомереж. В майбутніх роботах доцільно зосередити зусилля на проблемах математичного моделювання виявлення системами радіорозвідки нового покоління систем радіозв'язку військового призначення, що застосовують інші види шумоподібних сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Меньшаков Ю. К. Виды и средства иностранных технических разведок: учебное пособие [Текст] / под ред. М. П. Сычева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 656 с.
2. Оружие и технологии России: энциклопедия. XXI век в 13 т. [Текст] / под ред. зам. Пред. Прав-ва РФ – Министра обороны РФ С. Иванова. – М.: Изд. дом „Оружие и технологии”, 2006. – Т. XIII: Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. – 695 с.
3. Цветнов В. В. Радиоэлектронная борьба: радиомаскировка и помехозащита [Текст] / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 240 с.
4. Макаренко С. И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты [Текст]: монография / С. И. Макаренко, М. С. Иванов, С. А. Попов. – СПб.: Свое изд-во, 2013. – 166 с.
5. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба (средства и способы подавления и защиты радиоэлектронных систем) [Текст] / А. И. Палий. – М.: Воениздат, 1981. – 320 с.
6. Цветнов В. В. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие [Текст] / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 248 с.
7. Вартанесян В. А. Радиоэлектронная разведка [Текст] / В. А. Вартанесян. – М.: Воениздат, 1975. – 255 с.
8. Вартанесян В. А. Радиопеленгация [Текст] / В. А. Вартанесян, Э. Ш. Гойхман, М. И. Рогаткин. – М.: Воениздат, 1966. – 248 с.
9. Куприянов А. И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы [Текст] / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
10. Основы радиопротиводействия [Текст]: учебник для слушателей ВВНЗ СВ. – М.: Воен. акад. им. М. В. Фрунзе, 1962. – 268 с.
11. Каневский З. М. Теория скрытности. Часть 1. Основы теории скрытности: Учеб. пособие. [Текст] / З. М. Каневский, В. П. Литвиненко, Г. В. Макаров – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. – 92 с.
12. Ландау Л. Д. Краткий курс теоретической физики в 3 кн. – Кн. 1: Механика. Электродинамика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука: Глав. ред. физ.-мат. лит., 1969. – 271 с.
13. Тузов Г. И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами [Текст] / Г. И. Тузов, В. А. Сивов, В. И. Прытков и др. под ред. Г. И. Тузова – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
14. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью [Текст] / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев, Н. П. Мухин, Г. С. Нахмансон под ред. В. И. Борисова – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
15. Зелкин Е. Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием [Текст] / Е. Г. Зелкин, В. Г. Соколов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
16. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст] / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.