УДК 621.391.8+621.396.96
DOI: https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1(37).79-88

Л. В. БІЛОБОРОДОВА
https://orcid.org/0000-0003-0335-240X

С. Д. ЗІБІН, *кандидат технічних наук*
https://orcid.org/0000-0002-9426-2380

А. О. ПОПОВ, *кандидат технічних наук, доцент*
https://orcid.org/0000-0002-8560-617X

В. В. ТВЕРДОХЛІБОВ, *кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*
https://orcid.org/0000-0002-6802-9796
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З БОРТОВИМИ РАДІОЕЛЕКТРОННИМИ ЗАСОБАМИ ПРОТИКОРАБЕЛЬНОЇ РАКЕТИ

Стверджується, що для обґрунтування технічних вимог до засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) надводних кораблів слід мати моделі РЕБ з радіоелектронними засобами (РЕЗ) протикорабельних ракет (ПКР), при цьому такі моделі повинні містити: просторово-енергетичні моделі функціонування приймача сигналів супутникових радіонавігаційних систем, радіовисотоміру, а також радіолокаційної головки самонаведення ПКР в умовах радіоелектронного подавлення (РЕП) корабельними засобами РЕБ. Наводиться стислий опис моделей у табличній формі. Зазначається, що наведені моделі функціонування бортових РЕЗ ПКР в умовах РЕП є основою для обґрунтування основних технічних вимог до корабельних засобів РЕБ.

Ключові слова: *модель РЕБ, корабельний засіб РЕБ, діаграма спрямованості антени, приймач сигналів супутникових радіонавігаційних систем, радіовисотомір, радіолокаційна головка самонаведення, зона радіоелектронного подавлення, співвідношення «сигнал – шум», співвідношення «сигнал – перешкода».*

ВСТУП

В сучасних умовах розвиток та застосування озброєння та військової техніки супроводжується вирішенням завдань виявлення об'єктів ураження, передачі інформації, а також управління зброєю, насамперед, високоточною (ВТЗ). Досвід воєнних конфліктів останніх десятиріч переконливо свідчить про високу ефективність ВТЗ, яка дозволяє оперативно здійснювати ураження відповідних цілей в усіх сферах ведення воєнних дій. Зниження ефективності ВТЗ можливо за рахунок спеціально організованого впливу на інформаційні канали управління зброєю шляхом радіоелектронного подавлення (РЕП) відповідних радіоелектронних засобів (РЕЗ). Для вирішення цих завдань застосовуються засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ), які забезпечують РЕП каналів розвідки, передачі інформації та управління шляхом створення достатньо потужних перешкод, спектральні характеристики яких повинні бути оптимальними для конкретних сигналів РЕЗ, які є цілями РЕП. В бойових діях воєнно-морських сил РЕБ проводиться в основному для РЕП систем управління кораблів, їх захисту від ураження ВТЗ та забезпечення стійкої роботи систем управління кораблями та їх з'єднаннями.

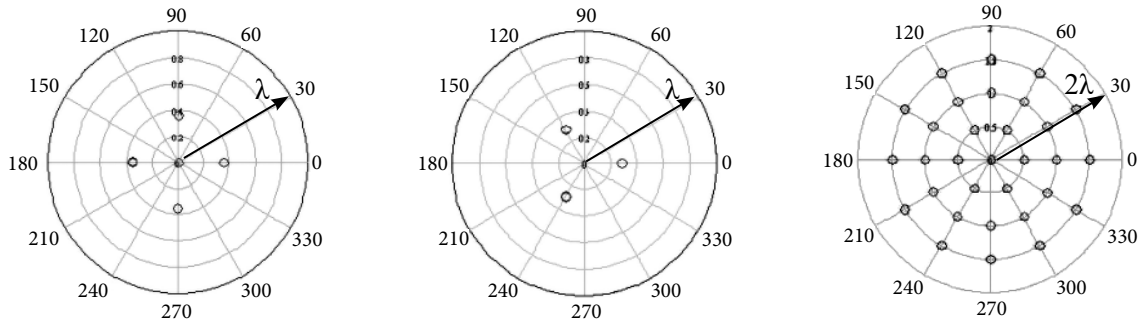
Основу сучасних засобів ураження окремих надводних кораблів та корабельних ударних груп складають ракетні комплекси наземного або морського базування, що містять функціонально поєднані між собою засоби, які за даними зовнішнього цілевказання забезпечують виявлення, розпізнавання, а також пуск та наведення протикорабельних ракет (ПКР) на цілі для їх ураження. Ефективне застосування корабельних ударних груп та окремих надводних кораблів в умовах вогневого ураження неможливе без застосування засобів РЕБ індивідуального захисту надводних кораблів. Засоби РЕБ надводних кораблів призначені в першу чергу для боротьби з ПКР, які є основним видом зброї при веденні бойових дій на морі, при цьому через складність траєкторії та малі висоти польоту ПКР, незалежності від метеоумов і малої ефективної поверхні розсіювання їх вогневе ураження значно ускладнюється.

Для обґрунтування технічних вимог до засобів РЕБ індивідуального захисту кораблів у ході їх розробки, необхідно мати моделі РЕБ з бортовими РЕЗ ПКР. Мінімально такі моделі повинні містити: просторово-енергетичні моделі функціонування приймача сигналів супутникових радіонавігаційних систем, радіовисотоміру, а також радіолокаційної головки самонаведення ПКР в умовах радіоелектронного подавлення (РЕП) корабельними засобами РЕБ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз стану розвитку засобів РЕБ морського базування та їх можливостей розглянуто в роботах [1–3]. Деякі часткові підходи до оцінки впливу спеціально організованих перешкод на функціонування РЕЗ радіолокації та навігації розглядаються в роботах [4–7]. Загальні характеристики протикорабельних ракетних комплексів зс рф наведені в роботі [8]. Загальні питання моделювання та симуляції РЕП сучасних РЕЗ радіолокації та навігації представлені в роботах [9–11]. Алгоритми функціонування РЕЗ радіолокації та навігації розглянуті в роботах [12–18]. Питанням створення моделей функціонування РЕЗ радіолокації та навігації в умовах РЕП присвячені роботи [19–20].

Метою роботи є, по-перше, постановка та вирішення завдання створення моделей функціонування РЕЗ радіолокації та навігації ПКР в умовах РЕП з боку засобів РЕБ надводного корабля з урахуванням особливостей їх антенних систем для подальшого формулювання вимог



а) б) в)

Рис. 1.1. Конфігурація антенних решіток РЕЗ ПКР: а) 5-елементна антена приймача сигналів СРНС; б) 3-елементна антена радіовисотоміра; в) 31-елементна антена РЛ ГСН

до перспективних засобів РЕБ надводного корабля, а по-друге, визначення методологічних основ для обґрунтування вимог з радіоелектронного захисту до бортових РЕЗ ПКР.

1. Розробка моделей діаграм спрямованості антен бортових радіоелектронних засобів протикорабельної ракети

Для розробки моделей РЕБ з бортовими РЕЗ ПКР слід мати моделі діаграм спрямованості антен (ДСА) бортових РЕЗ ПКР, для створення яких приймемо такі припущення. До складу бортових РЕЗ ПКР входять: приймач сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), радіовисотомір та радіолокаційна головка самонаведення (РЛ ГСН). Антени приймача сигналів СРНС, радіовисотоміра та РЛ ГСН ПКР є кільцевими антенними решітками, які складаються з 5-ти, 3-ох та 31-го елементів, конфігурація яких наведена на рис. 1.1 а, б, в відповідно.

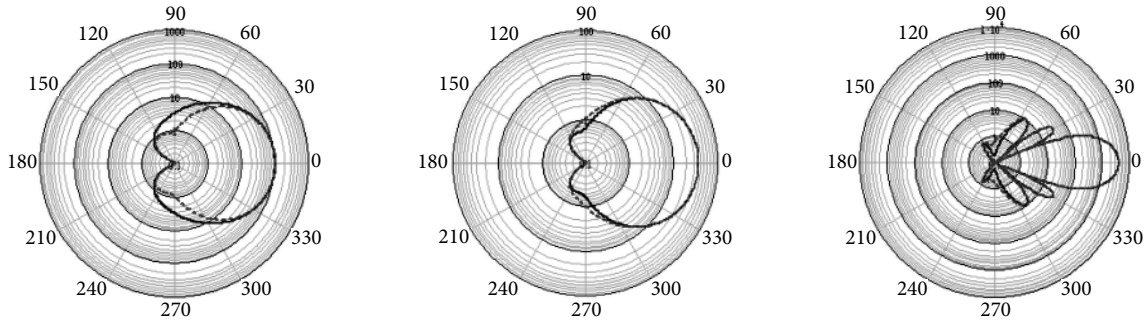
Тоді ДСА 5-елементної антени приймача сигналів СРНС, 3-елементної антени радіовисотоміра та 31-елементної антени РЛ ГСН будуть визначатись такими виразами відповідно [21]:

$$G_5(\beta,\varepsilon) = G_0(\varepsilon) + G_0(\varepsilon)\left[\sum_{i=0}^{3}\exp\left(j2\pi\frac{d_0/\lambda}{\sqrt{2}}\sin(\varepsilon)\left(\cos(\pi\cdot i/2)\cos(\beta)+\sin(\pi\cdot i/2)\sin(\beta)\right)\right)\right]; \quad (1.1)$$

$$G_3(\beta,\varepsilon) = G_0(\varepsilon)\left[\sum_{i=0}^{2}\exp\left(j2\pi\frac{d_0/\lambda}{2\cos(\pi/6)}\sin(\varepsilon)\left(\cos(2\pi\cdot i/3)\cos(\beta)+\sin(2\pi\cdot i/3)\sin(\beta)\right)\right)\right]; \quad (1.2)$$

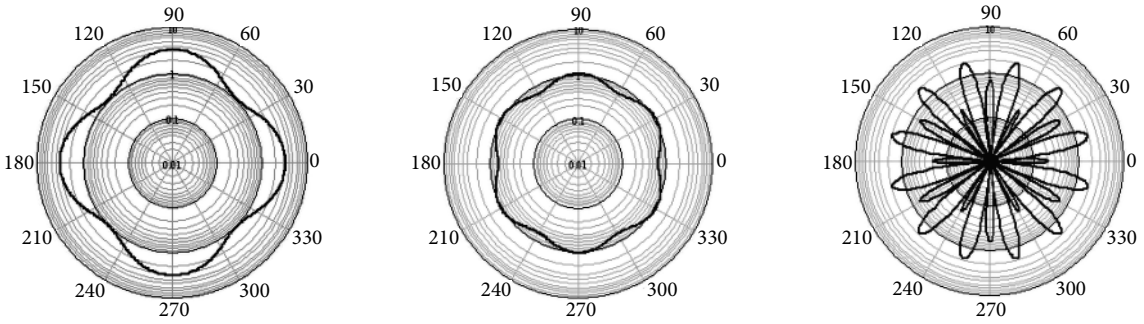
$$\begin{aligned} G_{31}(\beta,\varepsilon) = G_0(\varepsilon) + G_0(\varepsilon)[&\sum_{i=0}^{5}\exp\left(j2\pi(d_0/\lambda)\sin(\varepsilon)\left(\cos(\pi\cdot i/3)\cos(\beta)+\sin(\pi\cdot i/3)\sin(\beta)\right)\right)+\\ &+\sum_{i=0}^{11}\exp\left(j2\pi(2d_0/\lambda)\sin(\varepsilon)\left(\cos(\pi\cdot i/6)\cos(\beta)+\sin(\pi\cdot i/6)\sin(\beta)\right)\right)+\\ &+\sum_{i=0}^{11}\exp\left(j2\pi(3d_0/\lambda)\sin(\varepsilon)\left(\cos(\pi\cdot i/6)\cos(\beta)+\sin(\pi\cdot i/6)\sin(\beta)\right)\right)]; \end{aligned} \quad (1.3)$$

де d_0 – міжелементна відстань; λ – довжина хвилі; $G_0(\varepsilon) = 1+\cos(\varepsilon)$ – діаграма спрямованості окремого елементу антени; $j=\sqrt{-1}$; β,ε – кутові координати в азимутальній та кутомістній площинах, відповідно.



а) б) в)

Рис. 1.2. Перетин функцій (1.1), (1.2), (1.3) у площинах $\beta = 0;\pi/4$; $\beta = 0;\pi/6$; $\beta = 0;\pi/6$: а) 5-елементна антена приймача сигналів СРНС; б) 3-елементна антена радіовисотоміра; в) 31-елементна антена РЛ ГСН, які показані суцільною та штриховою лініями відповідно



а) б) в)

Рис. 1.3. Перетин функцій (1.1), (1.2), (1.3) у площині: а) 5-елементна антена приймача сигналів СРНС; б) 3-елементна антена радіовисотоміра; в) 31-елементна антена РЛ ГСН

Перетини функцій (1.1), (1.2), (1.3) в азимутальних та кутомістній площинах наведено на рис. 1.2 і 1.3 відповідно. Як можна бачити з рисунків, максимальні значення КНД антен дорівнюють:

$$G_5(\beta,\varepsilon)\big|_{\max} = 100;\ G_3(\beta,\varepsilon)\big|_{\max} = 36;$$
$$G_{31}(\beta,\varepsilon)\big|_{\max} = 3.6\cdot 10^3, \qquad (1.4)$$

при цьому рівень бокових пелюсток (рис. 1.3) складає:

$$G_5(\beta,\tfrac{\pi}{2})\big|_{\max} = 1...3;\ G_3(\beta,\tfrac{\pi}{2})\big|_{\max} = 0.8...1;$$
$$G_{31}(\beta,\tfrac{\pi}{2})\big|_{\max} = 0.1...2. \qquad (1.5)$$

2. Розробка просторово-енергетичної моделі функціонування бортового приймача системи супутникової навігації протикорабельної ракети в умовах радіоелектронного подавлення

Визначимо співвідношення $K = (P_n / P_s)_{\text{in}}$ потужностей перешкодового та корисного сигналів на вході приймача сигналів СРНС при впливі перешкод. Вважатимемо, що потужність корисного сигналу на вході приймача сигналів СРНС, що подавляється, знаходиться у межах [18]:

$$P_{s,in} = -160...-155 \text{ dB}. \qquad (2.1)$$

Потужність перешкод $P_{n,in}$ з рівномірним спектром шириною ΔF на вході приймача сигналів СРНС в межах смуги перепускання його лінійної частини ΔF_s (за умов, що $\Delta F > \Delta F_s$):

$$P_{n,in} = P_j \cdot G_j \cdot G_0 \cdot \nu \cdot \lambda^2 \Delta F_s / (4\pi R^2 \cdot 4\pi \cdot \Delta F), \quad (2.2)$$

де P_j – потужність передавача перешкод засобу РЕП; G_j – коефіцієнт підсилення антенної системи засобу РЕП; R – відстань між засобом РЕП та РЕЗ, що здійснює прийом інформації; G_0 – коефіцієнт підсилення антенної системи приймача сигналів СРНС у напрямку бокових пелюсток; λ – довжина хвилі; ν – коефіцієнт, що враховує розходження поляризації перешкоди та сигналу.

Підставляючи значення $P_{s,in}$, $P_{n,in}$ до формули $K = (P_n / P_s)_{\text{in}}$, отримаємо співвідношення потужності перешкоди до потужності сигналу на вході приймального пристрою РЕЗ в смузі перепускання:

$$K = \frac{P_j \cdot G_j G_0 \cdot \nu \cdot \Delta F_s \cdot \lambda^2}{P_{s,in} \cdot G \cdot \Delta F \cdot (4\pi)^2 R^2}, \quad (2.3)$$

де G – коефіцієнт підсилення антенної системи приймача сигналів СРНС у напрямку на супутник GNSS.

Якщо прирівняти K до коефіцієнта подавлення K_n, можна знайти мінімально необхідну для РЕП РЕЗ потужність передавача перешкод:

$$P_{j,\min} = K_n \frac{P_{s,in} \cdot G \cdot \Delta F \cdot (4\pi)^2 R^2}{G_j \cdot G_0 \cdot \nu \cdot \Delta F_s \cdot \lambda^2}. \qquad (2.4)$$

З аналізу зразків засобів РЕБ РФ [3] випливає, що для вирішення завдань з радіоелектронного подавлення (РЕП) приймача сигналів СРНС ПКР можуть залучатись багатофункціональні засоби та комплекси РЕБ надводних кораблів із значним енергетичним потенціалом. Враховуючи те, що сигнали СРНС використовують кругову поляризацію та відомі несучі частоти, засоби РЕБ для РЕП приймача сигналів СРНС застосовують перешкодові сигнали з лінійною поляризацією, прицільні по частоті, як правило, з частотною модуляцією в межах смуги частот корисних сигналів. В подальших розрахунках вважатимемо, що корабельні засоби РЕБ використовують для РЕП приймачів сигналів СРНС ПКР перешкодові сигнали з потужністю 100 Вт та/або 20 Вт, антенні системи з коефіцієнтом підсилення до 10 дБ для забезпечення широкого, до 90…120 градусів, сектору РЕП.

Просторово-енергетична модель функціонування приймачів сигналів СРНС ПКР в умовах РЕП, що пропонується, передбачає такі обмеження:

1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антен приймачів сигналів СРНС, які подавлюються, на лінії прямої видимості, при цьому коефіцієнт, що враховує розходження поляризації перешкоди та сигналу, дорівнює 0,5;

2) перешкода є прицільною по центральній частоті спектру корисного сигналу РЕЗ, що подавляється, тобто спектр сигналу та спектральна щільність потужності перешкоди співпадають за інтервалом частот;

3) коефіцієнт подавлення K_n береться рівним коефіцієнту стискання K_c фазо-маніпульованого сигналу (ФМС) в СРНС NAVSTAR GPS, $K_n = K_c$, який для СРНС NAVSTAR GPS дорівнює $K_c = 1024$ (30 дБ);

4) довжина хвилі у формулах (2.2)…(2.4) відповідає частоті L1=1575 МГц;

5) корабельна станція РЕБ використовує для РЕП приймача сигналів СРНС ПКР перешкодові сигнали з

потужністю 100 Вт та/ або 20 Вт, антенні системи з коефіцієнтом підсилення до 10 дБ для забезпечення широкого, до 90…120 градусів, сектору РЕП;

6) приймач сигналів СРНС ПКР не використовує технологію CPRA (controlled reception pattern antenna) для захисту від перешкод.

Стисла характеристика просторово-енергетичної моделі функціонування приймача сигналів СРНС при РЕП корабельною станцією РЕБ наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Складова моделі	Опис складової моделі
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує функціонування приймача сигналів СРНС ПКР при РЕП корабельною станцією РЕБ
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається з однієї корабельної багатофункціональної станції РЕБ, яка здійснює РЕП приймача сигналів СРНС
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується просторово-енергетичними співвідношеннями (2.1)…(2.4), які дозволяють побудувати графіки рівнів перешкодових та корисних сигналів
Можливі напрями удосконалення моделі РЕБ	Оптимізація виду перешкоди в бік використання перешкод з негаусівським законом розподілення, а також імітаційних перешкод. Удосконалення моделі для завадозахищених приймачів сигналів СРНС
Вимоги щодо сумісності з перспективними моделями РЕБ	Забезпечення візуалізації 3D-зон РЕП на основі співвідношень (2.1)…(2.4)

Для пояснення методики побудови просторово-енергетичної моделі функціонування приймача СРНС повітряного базування при постановці перешкод наземними засобами РЕП скористаємось основними енергетичними співвідношеннями між рівнями сигналів засобу РЕБ та РЕЗ СРНС на вході приймача СРНС.

На рис. 2.1 показані рівні $P(R)$ корисних сигналів та перешкод від корабельної станції РЕБ на вході приймача сигналів СРНС як функції від відстані R між ними, яка визначається виразом (2.2) та відображена в логарифмічному масштабі по обох координатах. На рисунку показані рівні корисних сигналів СРНС та сигналів перешкод від корабельної станції РЕБ на вході приймача сигналів СРНС в залежності від відстані між ними, яка відображена в логарифмічному масштабі. Залежності, показані на рис. 2.1, побудовані на основі співвідношень (2.2)…(2.4) за умов використання антен засобу РЕБ та приймача сигналів СРНС з ДСА, які наведені на рис. 1.2, та коефіцієнтами підсилення $G_j = G_j(\beta,\varepsilon)|_{\max} = 10$; $G = G(\beta,\varepsilon) = 1…100$ відповідно. Рівні перешкодових сигналів великої та малої потужності від засобу РЕБ на обох рисунках наведені штриховою та суцільною лініями відповідно. Пунктирною та штрих-пунктирною лініями на обох рисунках показано рівні корисного сигналу без

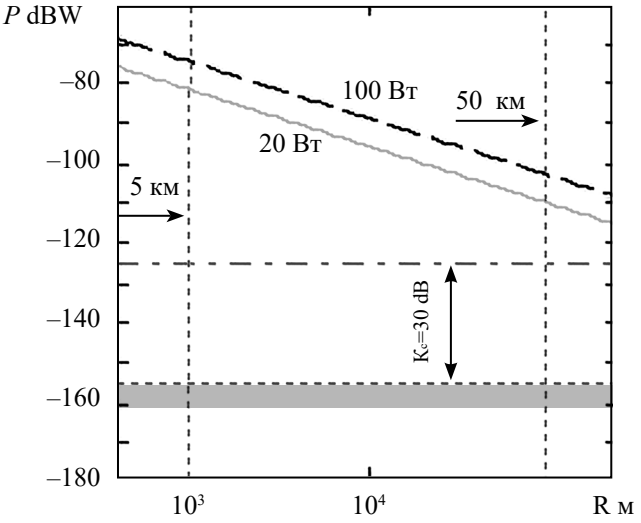


Рис. 2.1. Залежності рівнів корисних сигналів та перешкод від наземної станції РЕБ на вході приймача сигналів СРНС повітряного базування

врахування (–160…–155 дБВт) та з врахуванням обробки сигналу в приймачеві відповідно [18]. Як можна побачити з рисунку, штрих-пунктирна лінія проходить нижче ліній, які визначають рівні перешкодових сигналів на вході приймача СРНС, що свідчить про подавлення приймача СРНС засобами РЕБ.

Таким чином, просторово-енергетична модель функціонування приймача СРНС при постановці перешкод корабельними засобами РЕБ, яка розглянута вище, дозволяє, з одного боку, формулювати технічні вимоги стосовно радіоелектронного захисту приймачів СРНС, а з іншого боку, формулювати технічні вимоги до засобів РЕБ із приймачами сигналів СРНС, у тому числі й з перешкодо-захищеними.

3. Розробка просторово-енергетичної моделі функціонування радіовисотоміру ПКР в умовах радіоелектронного подавлення

Просторово-енергетична модель функціонування радіовисотоміру в умовах радіоелектронного подавлення корабельними засобами радіоелектронної боротьби визначається співвідношеннями (3.1)…(3.4) та передбачає такі обмеження:

1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антени радіовисотоміру (РВ), який подавляється;

2) перешкода є загороджувальною по відношенню до спектру корисного сигналу РВ, що подавляється, тобто спектральна щільність потужності перешкоди дещо ширше ніж спектр сигналу РВ;

3) побудова зон РЕП/зон відсутності РЕП для РВ здійснюється на основі критерію забезпечення гірших показників якості виявлення (умовних ймовірностей правильного виявлення $D(q)$ та хибної тривоги F, криві виявлення показані на рис. 2.1) ніж задані [5, 6, 17]:

– сигнал з відомими амплітудою та початковою фазою:

$$D(q) = \Phi(q - \Phi^{-1}(1-F,0,1),0,1); \qquad (3.1)$$

– сигнал із випадковими амплітудою та початковою фазою:

$$D(q) = F^{\frac{1}{1+q^2}}; \qquad (3.2)$$

де $\Phi(x,m,\sigma) = \int\limits_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(u-m)^2}{2\sigma^2}\right) du$; $q^2 = E_s / N_0$ – співвідношення «сигнал − шум»; E_s, N_0 – енергія сигналу та спектральна щільність потужності перешкоди відповідно;

4) вихідними даними для застосування просторово-енергетичної моделі функціонування РВ ПКР в умовах РЕП є: потужність передавача перешкод засобу РЕБ P_j та потужність передавача P РВ; максимально припустиме співвідношення «сигнал − перешкода» $q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max} = 10$; відстань d між засобом РЕБ та РВ; коефіцієнти підсилення G_j, G (за потужністю) антенних систем засобу РЕБ та РВ відповідно;

5) коефіцієнт розбіжності між поляризацією корисного та перешкодового сигналів обирається рівним 0,5, оскільки вважається, що здійснення РЕП відбувається із застосуванням перешкодового сигналу або з круговою, або з нахильною, або з квазіхаотичною поляризацією;

6) радіовисотомір не використовує технології захисту від перешкод.

Стисла характеристика просторово-енергетичної моделі функціонування РВ в умовах радіоелектронного подавлення наземними засобами радіоелектронної боротьби наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Складова моделі	Опис складової моделі
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує функціонування РВ в умовах РЕП корабельними засобами РЕБ
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається з однієї корабельної багатофункціональної станції РЕБ, яка здійснює РЕП РВ ПКР
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується просторово-енергетичними співвідношеннями (3.3)…(3.6), які дозволяють побудувати зони РЕП. Обмеження, що застосовуються, наведені вище
Можливі напрями удосконалення моделі РЕБ	Дослідити ефективність застосування імітаційних перешкод
Вимоги щодо сумісності з перспективними моделями РЕБ	Забезпечення візуалізації зон РЕП на основі співвідношень (3.3)…(3.6)

Для пояснення методики побудови просторово-енергетичної моделі функціонування РВ ПКР в умовах радіоелектронного подавлення корабельними засобами радіоелектронної боротьби (зон РЕП/зон відсутності РЕП) скористаємось основними геометричними співвідношеннями між засобом РЕП та РВ ПКР, які показані на рис. 3.2. Межі зон РЕП/зон відсутності РЕП визначаються тотожністю щільності потоку потужності перешкодового та корисного сигналів в точці прийому з

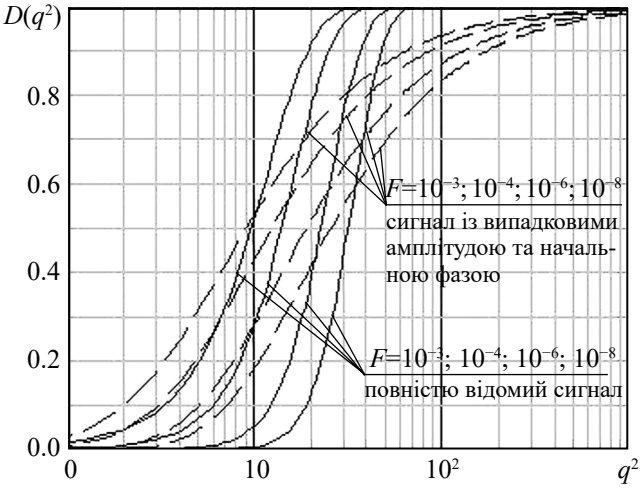


Рис. 3.1. Залежності ймовірностей правильного виявлення (3.1) та (3.2) для двох моделей сигналів відповідно

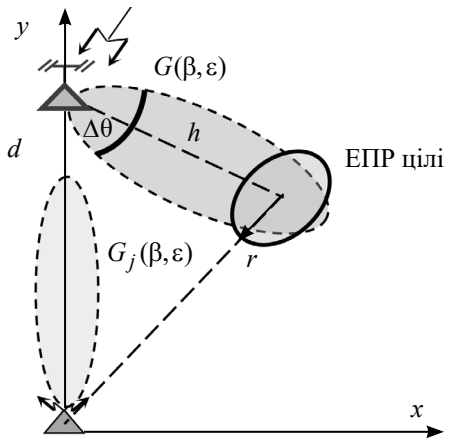


Рис. 3.2. Геометричні співвідношення між засобом РЕП та ПКР

урахуванням максимально припустимого співвідношення сигнал/перешкода $q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max}$:

$$q^2(d,r) = E_s / N_0 = q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max}; \qquad (3.3)$$

$$E_s = \frac{P \cdot G^2(\beta,\varepsilon) \cdot S \cdot \sigma \cdot \tau}{(4\pi h^2)^2}; \qquad (3.4)$$

$$N_0 = \frac{P_j \cdot G_j(\beta,\varepsilon) \cdot S \cdot \nu}{4\pi d^2 \Delta F}, \qquad (3.5)$$

де E_s – енергія сигналу в точці прийому; N_0 – спектральна потужність перешкоди; P_j – потужність передавача перешкод засобу РЕП; P – потужність передавача РВ; d – відстань між засобом РЕП та РВ; h – висота польоту ПКР над водною поверхнею; $G_j(\beta,\varepsilon)$ – діаграма спрямованості (за потужністю) антенної системи засобу РЕП в азимутальній та кутомістній площинах відповідно; $G(\beta,\varepsilon)$ – діаграма спрямованості (за потужністю) антени РВ в азимутальній та кутомістній площинах відповідно; S – площа поверхні розкриву антени РВ; $\sigma = \pi r^2$ – значення ЕПР цілі (частини водної поверхні, яка підсвічується передавачем РВ); $r = h \cdot \mathrm{tg}(\Delta\theta / 2)$; $\Delta\theta$ – ширина діаграми спрямованості антени РВ за рівнем

$\Delta\theta$

3 дБ; ΔF – ширина спектральної щільності перешкоди; ν – коефіцієнт розбіжності між поляризацією корисного та перешкодового сигналів (обирається рівним 0,5).

Зі співвідношень (3.4) та (3.5) випливає, що співвідношення «сигнал − перешкода» $q^2 = E_s / N_0$ на вході приймача РВ визначатиметься виразом:

$$q^2 = E_s / N_0 = \frac{P \cdot G^2(\beta,\varepsilon) \cdot \sigma \cdot \tau \cdot 4\pi d^2 \cdot \Delta F}{P_j \cdot G_j(\beta,\varepsilon) \cdot \nu \cdot (4\pi h^2)^2}, \quad (3.6)$$

при цьому зона РЕП визначається нерівністю:

$$q^2 \le q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max}. \quad (3.7)$$

Нагадаємо, що в разі створення прицільної перешкоди, коли ширина спектру сигналу ΔF_s дорівнює ширині спектральної щільності перешкоди ΔF: $\Delta F_s = \Delta F$, добуток $\tau \cdot \Delta F$, що фігурує у формулі (2.6), дорівнює базі сигналу:

$$\tau \cdot \Delta F = \tau \cdot \Delta F_s = B. \quad (3.8)$$

Зони РЕП, які визначаються співвідношеннями (3.6), (3.7) побудовані як функції $q^2(d, P_j, P, B)$ (рис. 3.3) від відстані між засобом РЕП та РВ d, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП; потужності передавача P РВ, які дорівнюють відповідно: P_j = 50, 100, 200 Вт; P = 1 Вт; бази сигналу B = 90 та 1; а також за умов використання спрямованих антен засобу РЕП та РВ з ДСА, які наведені на рис. 1.2, та коефіцієнтами підсилення $G_j = G_j(\beta,\varepsilon)|_{\max}$ = 100; $G = G(\beta,\varepsilon)|_{\max}$ = 36 відповідно. Зони РЕП для випадку P_j = 50; B = 90 та 1 наведені прямокутниками сірого кольору різного тону.

Як можна бачити з наведених на рисунку зон РЕП, РЕП РВ забезпечується на практично важливих відстанях d = 1…60 км лише коли в РВ використовуються сигнали без внутрішньо-імпульсної модуляції (B~1). В разі використання у РВ сигналів з великою базою ($B \ge 90$), РЕП РВ без суттєвого збільшення енергетичного потенціалу станції РЕП стає проблематичним. Таким чином, за допомогою просторово-енергетичної моделі функціонування РВ ПКР, яка визначається співвідношеннями (3.3)…(3.6), можна обґрунтувати основні енергетичні параметри як станцій перешкод, так і РВ ПКР.

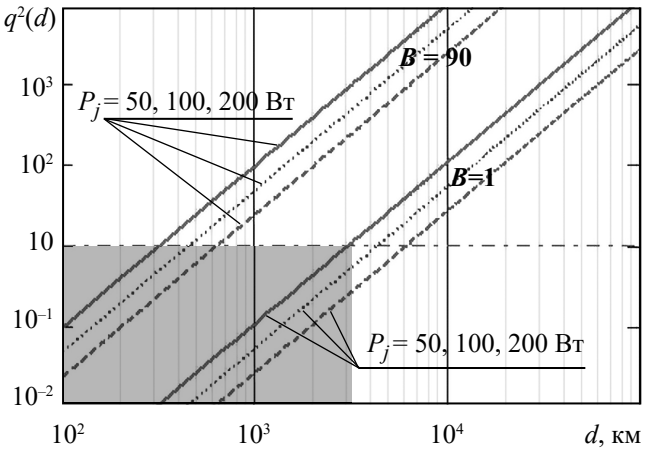


Рис. 3.3. Залежності $q^2(d, P_j, P, B)$ (3.6)

4. Розробка просторово-енергетичної моделі функціонування радіолокаційної головки самонаведення протикорабельної ракети в умовах радіоелектронного подавлення

Просторово-енергетична модель функціонування РЛ ГСН ПКР в умовах ведення радіоелектронного подавлення корабельною автоматизованою станцією перешкод індивідуального захисту, що пропонується, передбачає такі обмеження:

1) постановка перешкод здійснюється в напрямку головного пелюстка діаграми спрямованості антени РЛ ГСН ПКР, яка подавляється корабельними засобами РЕБ індивідуального захисту;

2) перешкода є загороджувальною по відношенню до спектру корисного сигналу РЕЗ, що подавляється, тобто спектр сигналу перекривається спектральною щільністю потужності перешкоди;

3) координати засобу (комплексу) РЕП ($x_{РЕП}$,$y_{РЕП}$) обираються в початку координат: (хРЕП, уРЕП) = (0, 0), а координати ($x_{РЕЗ}$, $y_{РЕЗ}$) РЕЗ, що подавляється, обираються таким чином, що $x_{РЕЗ}$ = 0, а $y_{РЕЗ} = d$, де d – відстань між засобом РЕП та РЕЗ, що подавляється;

4) візуалізація зон РЕП/зон відсутності РЕП здійснюється лише в горизонтальній площині, яка проходить через РЛ ГСН ПКР та засіб РЕП;

5) побудова зон РЕП/зон відсутності РЕП для РЛ ГСН ПКР здійснюється на основі критерію забезпечення гірших показників якості виявлення (умовних ймовірностей правильного виявлення та хибної тривоги, рис. 3.1) ніж задані;

6) вихідними даними для застосування просторово-енергетичної моделі функціонування зразків корабельних засобів та комплексів РЕБ з РЛ ГСН ПКР є: потужність передавача перешкод засобу РЕБ P_j та потужність передавача P РЛ ГСН ПКР; максимально припустиме співвідношення «сигнал − перешкода» $q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max}$ = 10; відстань d між засобом РЕБ та РЛ ГСН ПКР; коефіцієнти підсилення G_j, G (за потужністю) антенних систем засобу РЕБ та РЛ ГСН ПКР відповідно;

7) коефіцієнт розбіжності між поляризацією корисного та перешкодового сигналів обирається рівним 0,5, оскільки вважається, що здійснення РЕП відбувається із застосуванням перешкодового сигналу або з круговою, або з нахильною, або з квазіхаотичною поляризацією;

8) РЛ ГСН ПКР не використовує технології захисту від перешкод.

Стисла характеристика просторово-енергетичної моделі функціонування РЛ ГСН ПКР в умовах радіоелектронного подавлення авіаційними засобами радіоелектронної боротьби наведена в табл. 4.

Для пояснення методики побудови просторово-енергетичної моделі функціонування РЛ ГСН ПКР в умовах РЕП корабельними засобами РЕБ індивідуального захисту, а також побудови зон РЕП/зон відсутності РЕП скористаємось основними геометричними співвідношеннями між засобом РЕБ та РЛ ГСН ПКР, які показані на рис. 4.1. Межа зон РЕП/зон відсутності РЕП визначається тотожністю щільності потоку потужності перешкодового

Таблиця 4.1

Складова моделі	Опис складової моделі
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує функціонування РЛ ГСН ПКР в умовах РЕП корабельними засобами РЕБ індивідуального захисту
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається із корабельної станції активних перешкод індивідуального захисту, яка здійснює РЕП РЛ ГСН ПКР
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується просторово-енергетичними співвідношеннями (4.1)…(4.5), які дозволяють побудувати зони РЕП. Обмеження, що застосовуються, наведені вище
Можливі напрями удосконалення моделі РЕБ	Оптимізація виду перешкоди в бік використання перешкод з негаусівським законом розподілення, а також імітаційних перешкод
Вимоги щодо сумісності з перспективними моделями РЕБ	Забезпечення візуалізації зон РЕП на основі співвідношень (4.1)…(4.5)

та корисного сигналів в точці прийому з урахуванням максимально припустимого співвідношення «сигнал – перешкода» $q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max}$:

$$q^2(d,r) = E_s / N_0 \le q_0^2 = (E_s / N_0)_{\max}; \qquad (4.1)$$

$$E_s = \frac{P \cdot G^2(\beta,\varepsilon) \cdot S \cdot \sigma \cdot \tau}{(4\pi r^2(t))^2}; \qquad (4.2)$$

$$N_0 = \frac{P_j \cdot G_j(\beta,\varepsilon) \cdot G(\beta,\varepsilon) \cdot S \cdot \nu}{4\pi d^2(t) \Delta F}; \qquad (4.3)$$

$$r^2 = d^2 + R^2 - 2dR\cos(0.5\pi - t), \qquad (4.4)$$

де E_s – енергія сигналу в точці прийому; τ – тривалість сигналу; N_0 – спектральна щільність потужності перешкоди; ΔF – ширина смуги спектральної щільності потужності перешкоди; P_j – потужність передавача перешкод засобу РЕБ; P – потужність передавача РЛ ГСН; d – відстань між засобом РЕБ та РЛ ГСН ПКР; $R(t)$ – відстань між засобом РЕБ та ціллю, $R(t) = 0$; $r(t)$ – відстань між РЛ ГСН ПКР та ціллю; $G_j(\beta,\varepsilon)$ – коефіцієнт підсилення (за потужністю) антенної системи засобу РЕБ в азимутальній та кутомістній площинах відповідно; $G(\beta,\varepsilon)$ – коефіцієнт підсилення (за потужністю) антени РЛ ГСН ПКР в азимутальній та кутомістній площинах відповідно; S – площа поверхні розкриву антенної системи РЛ ГСН ПКР; ν – коефіцієнт розбіжності між поляризацією корисного та перешкодового сигналів (обирається рівним 0.5); $x(t), y(t)$ – координати цілі; t – параметр, який визначає параметричне завдання кривих.

З тотожності (4.4) випливає рішення, що визначає зону РЕП/зону відсутності РЕП, яка в параметричній формі запису має вигляд:

$$x(t) = r(t)\cos(t); \quad y(t) = r(t)\sin(t) + d, \qquad (4.5)$$

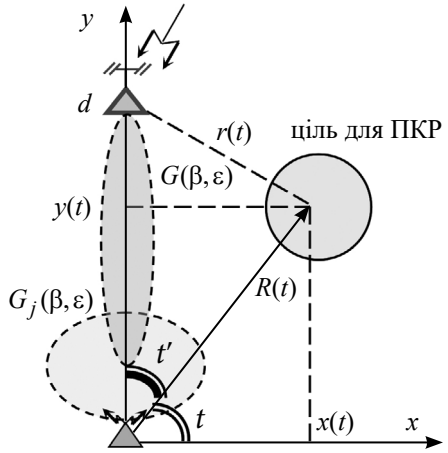


Рис. 4.1. Геометричні співвідношення між засобом РЕБ та ПКР

де $r(t) = r = \sqrt{d\sqrt{W}}$; $W = \dfrac{P \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \tau \cdot \Delta F}{4\pi \cdot P_j \cdot G \cdot G_j \cdot \nu \cdot q_0^2}$.

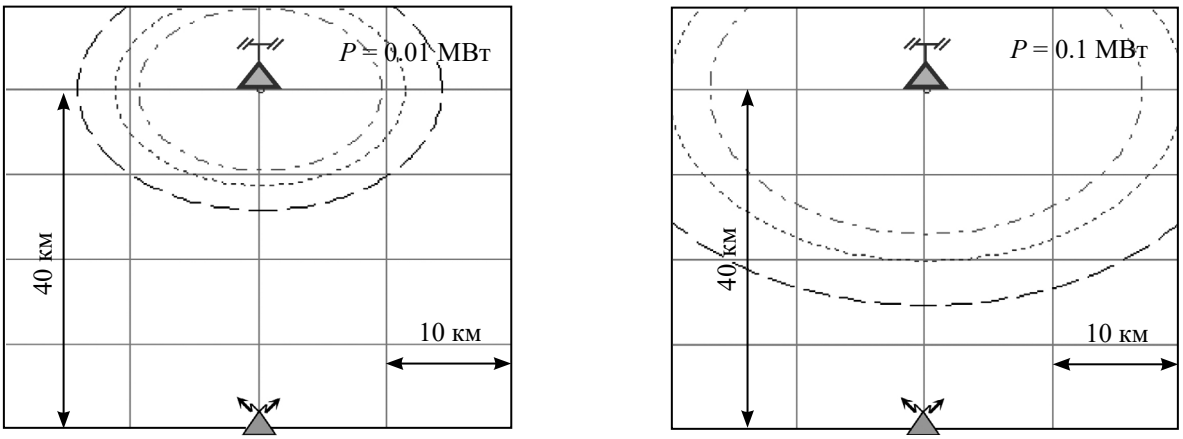
Зони РЕП/зони відсутності РЕП, які визначаються співвідношеннями (4.5), побудовані для РЛ ГСН ПКР за умов відстаней між засобом РЕП та РЛС: d = 40, 20 км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП; потужності передавача P РЛ ГСН ПКР, які дорівнюють відповідно: P_j = 200, 500, 1000 Вт; P = 0,01; 0,1 МВт; ЕПР цілі σ = 1000 м^2; тривалості сигналу РЛС τ =30 мкс; ширини спектральної щільності потужності перешкоди ΔF=30 МГц; а також за умов використання антен засобу РЕП та РЛ ГСН ПКР з ДСА, які наведені на рис. 1.2 та коефіцієнтами підсилення $G_j = G_j(\beta,\varepsilon)|_{\max}$ = 100; $G = G(\beta,\varepsilon)|_{\max} = 3.6 \cdot 10^3$ відповідно.

На рис. 4.2 а, б показані зони РЕП (зони відсутності РЕП), які визначаються співвідношеннями (4.1)…(4.5), побудовані за умов відстані між засобом РЕБ та РЛ ГСН ПКР d = 40 км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕБ та потужності передавача P РЛ ГСН ПКР, які дорівнюють відповідно: P_j = 200, 500, 1000 Вт; P = 0,01; 0,1 МВт; ЕПР цілі σ = 1000 м^2.

Межі зон РЕП показані для значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП P_j = 200, 500, 1000 Вт штриховою, пунктирною та штрих-пунктирною лініями відповідно. Якщо ціль ураження (надводний корабель) знаходиться поза межами кіл, які визначаються відповідними лініями, станція РЕБ індивідуального захисту здійснює РЕП РЛ ГСН ПКР, та навпаки, якщо ціль ураження знаходиться в межах цих кіл, РЕП РЛ ГСН ПКР не здійснюється.

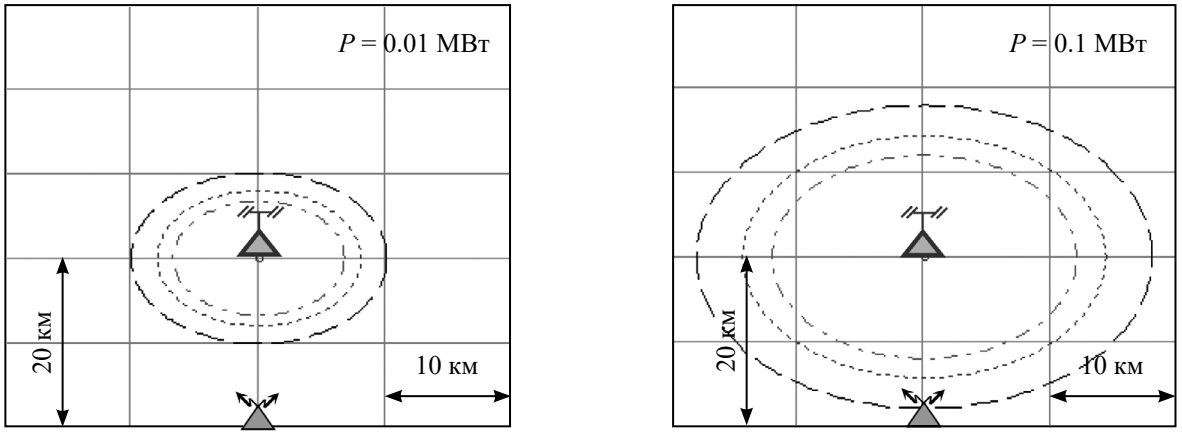
На рис. 4.3 а, б, показані зони РЕП (зони відсутності РЕП), які визначаються співвідношеннями (4.1)…(4.5), побудовані за умов відстані між засобом РЕП та РЛ ГСН ПКР d = 20 км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП; потужності передавача P РЛ ГСН ПКР, які дорівнюють відповідно: P_j = 200, 500, 1000 Вт; P = 0,01; 0,1 МВт; ЕПР цілі σ = 1000 м^2.

Межі зон РЕП показані для значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП P_j = 200, 500, 1000 Вт штриховою, пунктирною та штрих-пунктирною лініями відповідно. Якщо ціль ураження (надводний корабель)



а) б)

Рис. 4.2. Зони РЕП (зони відсутності РЕП), які побудовані за умов відстані між засобом РЕБ і ПКР d = 40 км та потужностей передавача РЛ ГСН ПКР, які дорівнюють: а) 0,01 МВт; б) 0,1 МВт



а) б)

Рис. 4.3. Зони РЕП (зони відсутності РЕП), які побудовані за умов відстані між засобом РЕБ і ПКР d = 20 км та потужностей передавача РЛ ГСН ПКР, які дорівнюють: а) 0,01 МВт; б) 0,1 МВт

знаходиться поза межами кіл, які визначаються відповідними лініями, станція РЕБ індивідуального захисту здійснює РЕП РЛ ГСН ПКР, та навпаки, якщо ціль ураження знаходиться в межах цих кіл, РЕП РЛ ГСН ПКР не здійснюється.

За допомогою просторово-енергетичної моделі функціонування РЛ ГСН ПКР в умовах ведення РЕП, яка визначається співвідношеннями (4.1)…(4.5), можна обґрунтувати основні енергетичні параметри корабельної станції РЕБ. З іншого боку, за допомогою цієї моделі можна обґрунтувати вимоги до РЛ ГСН ПКР стосовно радіоелектронного захисту.

ВИСНОВКИ

1. Отримані моделі функціонування бортових РЕЗ ПКР в умовах РЕП дозволяють: здійснювати симуляцію роботи бортових РЕЗ ПКР, що досліджуються, на ЕОМ; оцінювати ефективність роботи РЕЗ ПКР в умовах впливу перешкод; обґрунтовувати основні вимоги до РЕЗ ПКР з питань радіоелектронного захисту; обирати оптимальні види перешкод для здійснення РЕП сучасних РЕЗ ПКР.

2. Отримані просторово-енергетичні моделі функціонування бортових РЕЗ ПКР в умовах РЕП є основою для обґрунтування основних вимог до корабельних засобів РЕБ. На основі цих моделей можна побудувати моделі РЕБ з бортовими РЕЗ крилатих ракет наземного, повітряного та морського базування за умов знання основних технічних характеристик їх бортових РЕЗ.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Kiely, D.G. (1988). Naval Electronic Warfare. Brassey's Inc.
2. Electronic Warfare Handbook. The Shephard Press Ltd. 2008.
3. Оружие и технологии россии. Т. 13. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. М.: Оружие и технологии. 2006.
4. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат. 1989. 350 с.
5. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. М.: Высш. шк. 1990. 496 с.
6. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь. 1981. 416 с.
7. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Радиотехника. 2003.
8. Оружие и технологии россии. Т. 3. Вооружение Военно-морского флота. М.: Издательский дом «Оружие и технологии». 2001.

9. Welch, M. & Pywell, M. (2012). Electronic Warfare Test and Evaluation. NATO Research and Technology Organization. 314 p.
10. Adamy, D.L. (2006). Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation: Radar, Sonar and Navigation. Scitech Publishing. 242 p.
11. Park, S.R., Nam, I. & Noh, S. Modeling and simulation for investigation of radar responses to electronic attacks in Electronic Warfare environments. Hindawi Security and Communications Networks.
12. Johnson, D.H. & Dudgeon, D.E. (1992). Array Signal Processing: Concepts and Methods. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
13. Haykin, S. (1991, 1995). Advances in Spectrum Analysis and Array Processing. Vol. 1, 2, 3. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
14. Buckley, K.M., Douglass, S.C., Sayed, A.H. & Van Veen B. (1999). Digital Signal Processing Handbook. Ed. by V.K. Madisetti & D.B. Williams. CRC Press. 1690 p.
15. Monzingo, R.A. & Miller, T.W. (1980). Introduction to Adaptive Arrays. John Wiley and Sons.
16. Tuzlukov, V. (2018). Signal Processing in Radar Systems. CRC Press. 624 p.
17. Barton, D.K. (2005). Radar System Analysis and Modeling. Artech House. 564 p.
18. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Teunissen, P.J.G. & Montenbruck, O. (Eds). Springer. 2017.
19. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Розробка моделей радіоелектронної боротьби з РЛС управлінням зброєю ЗРК. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2021. № 3(31). С. 67–79.
20. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Забезпечення завадозахищеності приймачів сигналів GNSS шляхом використання алгоритмів просторової фільтрації. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2019. № 3(23). С. 37–43.
21. Modern Antenna Handbook. Ed. By Balanis C.A. Wiley. 2008.

REFERENCES

1. Kiely, D.G. (1988). Naval Electronic Warfare. Brassey's Inc.
2. Electronic Warfare Handbook. The Shephard Press Ltd. 2008.
3. "Oruzhie i tekhnologii rossii. T. 13. Systemy upravleniia sviazi i radiuoelektronnoi borby" [Weapon and Technologies of russia. Vol. 13. Control and Communication Systems, Electronic Warfare Systems], Weapon and Technologies, M. 2006.
4. Paliy, A.I. (1989). "Radioelektronnaia borba" [Electronic Warfare], M.: Voenizdat. 350 p.
5. Grishin, Yu.P., Ipatov, V.P. & Kazarinov, Yu.M. (1990). "Radiotekhnicheskie systemy" [Radioengineering systems], Vysshaia shkola, M. 496 p.
6. Shirman, Ya.D. & Manzhos, V.N. (1981). "Teoriia i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoi informatsii na fone pomekh" [Theory and technique of processing radar information in interference background], Radio i Sviaz, M. 416 p.
7. Perunov, Yu.M., Fomichev, K.I. & Yudin, L.M. (2003)."Radioelektronnoe podavlenie informatsionnykh kanalov system upravleniia oruzhiem" [Electronic jamming information channels of weapon control systems], Radiotehnika, M.
8. "Oruzhie i tekhnologii rossii. T. 3. Vooruzhenie voenno-morskogo flota" [Weapons and Technologies of russia. Vol. 3. Navy Armament], Weapons and Technologies, M. 2001.
9. Welch, M. & Pywell, M. (2012). Electronic Warfare Test and Evaluation. NATO Research and Technology Organization. 314 p.
10. Adamy, D.L. (2006). Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation: Radar, Sonar and Navigation. Scitech Publishing. 242 p.
11. Park, S.R., Nam, I. & Noh, S. Modeling and simulation for investigation of radar responses to electronic attacks in Electronic Warfare environments. Hindawi Security and Communications Networks.
12. Johnson, D.H. & Dudgeon, D.E. (1992). Array Signal Processing: Concepts and Methods. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
13. Haykin, S. (1991, 1995). Advances in Spectrum Analysis and Array Processing. Vol. 1, 2, 3. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
14. Buckley, K.M., Douglass, S.C., Sayed, A.H. & Van Veen B. (1999). Digital Signal Processing Handbook. Ed. by V.K. Madisetti & D.B. Williams. CRC Press. 1690 p.
15. Monzingo, R.A. & Miller, T.W. (1980). Introduction to Adaptive Arrays. John Wiley and Sons.
16. Tuzlukov, V. (2018). Signal Processing in Radar Systems. CRC Press. 624 p.
17. Barton, D.K. (2005). Radar System Analysis and Modeling. Artech House. 564 p.
18. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Teunissen, P.J.G. & Montenbruck, O. (Eds). Springer. 2017.
19. Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2021). "Rozrobka modelei radioelektronnoi borotby z RLS upravlinniam zbroeiu ZRK" [Modeling of electronic counter measures against fire control radar of air defense system], Weapons and Military Equipment. № 3(31). Pp. 67–79.
20. Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2019). "Zabezpechennia zavadozakhyshchenosti pryimachiv sygnaliv GNSS shliakhom vykorystannia algorytmiv prostorovoi filtratsii" [Providing interference immunity of global navigation satellite system signal receivers by employing space filtering algorithms], Weapons and Military Equipment. № 3(23). Pp. 37–43.
21. Modern Antenna Handbook. Ed. By Balanis C.A. Wiley. 2008.

Biloborodova L., Zibin S., Popov A., Tverdochlebov V.

MODELING ELECTRONIC COUNTER MEASURES AGAINST BOARD ELECTRONIC SYSTEMS OF ANTI-SHIP MISSILE

It is marked that efficient deployment of navy assault groups under conditions of anti-ship enemy warfare is impossible without exploiting navy EW self-protection systems. It is claimed that determining technical requirements for navy EW self-protection systems assumes modeling of

electronic counter measures against the board electronic systems of anti-ship missiles, so that minimally such the models must include: board electronic system antenna patterns; spatial-energetic models of missile board GNSS signals receiver, radio-altimeter, target seeker functioning of under jamming condition created by navy EW self-protection systems. The considered models are briefly described in a tabular form that contains purpose, field of model application, general characteristic of EW system, detailed characteristic of electronic counter measure model, possible directions of improving electronic counter measure model. Within these spatial-energetic models, jamming (jamming-free) zones are calculated and shown in the form of visualized image. These spatial-energetic electronic counter measure models allow determining main energetic parameters for navy EW self-protection systems. It is pointed that considered models of functioning of anti-ship missile board electronic systems form the basis for determining main technical requirements for navy EW self-protection systems.

Keywords: *Electronic Counter Measures model, navy EW self-protection system, antenna pattern, GNSS signals receiver, radio-altimeter, target seeker, jamming zone, signal-to-noise ratio, signal-to-interference ratio.*

Відомості про авторів:

Білобородова Любов Володимирівна
молодший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-0335-240X

Зібін Сергій Данилович
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9426-2380

Попов Андрій Олексійович
кандидат технічних наук, доцент
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8560-617X

Твердохлібов Володимир Віталійович
кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6802-9796

Information about the authors:

Biloborodova Lubov
Junior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-0335-240X

Zibin Sergey
Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-9426-2380

Popov Andrey
Candidate of Technical Sciences
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8560-617X

Tverdochlebov Vladimir
Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Chief of Scientific Research Management of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6802-9796

Стаття надійшла до редколегії 06.02.2023.