

УДК 621.396.96

В.В. Воїнов, Г.В. Єрмаков, І.Г. Леонов, С.М. Телюков

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТІ ВИКОНАННЯ ВОГНЕВОЇ ЗАДАЧІ ЗЕНІТНИМ АРТИЛЕРІЙСЬКИМ КОМПЛЕКСОМ БЛИЖНЬОЇ ДІЇ ПРИ ВВЕДЕННІ В ЙОГО СКЛАД БАГАТОЧАСТОТНОЇ ТРИКООРДИНАТНОЇ РЛС**

*У статті запропоновано методику оцінювання однієї з основних характеристик бойової ефективності зенітного артилерійського комплексу ближньої дії – ймовірності виконання вогневої задачі. В якості радіолокаційного засобу виявлення та цілевказання у даному комплексі розглядається багаточастотна трикоординатна радіолокаційна станція. У якості типової цілі для зенітного артилерійського комплексу ближньої дії розглядається самонавідний елемент високоточної зброї типу «протирадіолокаційна ракета, керована авіаційна ракета, керована авіабомба».*

**Ключові слова:** зенітний артилерійський комплекс ближньої дії, багаточастотна радіолокаційна станція, малорозмірна ціль, ймовірність виконання вогневої задачі.

### **Вступ**

**Загальне визначення проблеми.** За останні два десятиріччя високоточна зброя (ВТЗ) здійснила якісний стрибок у своєму розвитку, що суттєво розширює бойові можливості по подоланню та вогневому придушенню систем ППО, а також по ураженню об'єктів в будь-якому місці земної кулі, в будь-який час доби, в будь-яких кліматичних умовах. Відсуваються рубежі пуску ВТЗ, знижується можливість виявлення засобів що атакують, використовуються комбіновані системи наведення, збільшуються швидкості польоту.

Виходячи з критерію "ефективність – вартість", для боротьби з малорозмірними аеродинамічними цілями на малій дальності найбільше придатні засоби малокаліберної зенітної артилерії. При достатньо точному цілевказанні, малокаліберна зенітна артилерія здатна ставити обмежувальний вогонь такої цільності, що дозволяє зруйнувати малорозмірну ціль або схід її з курсу. Подібні засоби малокаліберної зенітної артилерії, що мають темп стрільби до 5000 пострілів за хвилину, давно використовуються для боротьби з протикорабельними ракетами на кораблях Військово-морських Сил [1].

Результат стрільби або управління вогнем визначається сумісною дією багатьох факторів, що мають різну фізичну природу. Мета оцінки ефективності стрільби та управління вогнем міститься в прогнозуванні їх результату, визначення ступеню впливу кожного фактору, відбір тих, що піддаються управлінню, тобто таких, які залежать від дій командира і бойової обслуги, в пошуку оптимальних дій та рішень інших практично важливих питань [2].

Системоутворюючою ланкою перспективного малокаліберного артилерійського зенітного комплексу ближньої дії повинно бути трьохкоординатний радіолокаційний пристрій розвідки та цілевказання. Точність вимірювання координат повітряних об'єктів цієї РЛС в режимі виявлення повинна бути достатньою для видачі цілевказання на артилерійські канали без додаткового допшуку. Для отримання високоточностних характеристик зондуючий сигнал радіолокаційної станції повинен бути достатньо ширококутовим. В якості прикладу будемо розглядати РЛС з багаточастотним просторово-часовим сигналом.

В якості основного показника бойової ефективності зенітного артилерійського комплексу ближньої дії, розглянемо ймовірність виконання цим комплексом вогневої задачі –  $P_{\text{вогн.з}}$  [3]

**Метою статті** є обґрунтування вибору методики розрахунку імовірності виконання вогневої задачі зенітним артилерійським комплексом ближньої дії при вогневому впливі по малорозмірній повітряній цілі.

### Викладення матеріалів дослідження

Імовірність виконання вогневої задачі комплексом ППО будемо розраховувати за формулою:

$$P_{\text{вогн.з}} = P_{\text{вияв}} \cdot P_{\text{вимір}} \cdot P_c \cdot R_n, \quad (1)$$

де  $P_{\text{вияв}}$  – імовірність правильного виявлення цілей СВЦ по целевказанню з КП або автономно;

$P_{\text{вимір}}$  – імовірність правильного вимірювання координат;

$P_c$  – імовірність своєчасного початку стрільби;

$R_n$  – імовірність ураження цілі на визначеній відстані.

Виявлення цілей РЛС несе імовірнісний характер. Будемо розглядати такий вид імовірності виявлення, як миттєва імовірність виявлення цілі  $P_{\text{вияв}}(t)$  Під миттєвою імовірністю виявлення  $P_{\text{вияв}}(t)$  розуміється імовірність виявлення цілі за час її опромінення при однократному обзори простору (за один оберт антени).

Миттєва імовірність виявлення визначається із співвідношення [3]:

$$P_{\text{вияв},i}(D) = e^{-0.693 \left( \frac{r}{d_{0.5}} \right)^\gamma}, \quad (2)$$

де  $d_{0.5}$  – дальність, на якій при даних умовах імовірність виявлення цілі – рівняється 0,5;  $\gamma$  – показник ступеню, що залежить від діапазону частот РЛС та режиму роботи станції, для сантиметрового діапазону при відсутності завад  $\gamma = 4$ , при наявності завад  $\gamma = 2$ ;  $r$  – дальність до цілі.

Дальність  $d_{0.5}$  дається в технічному описі кожної станції та визначається експериментально для кожного типу цілі в залежності від висоти її польоту та наявності завад.

Імовірність правильного вимірювання координат –  $P_{\text{вимір}}$  обумовлює передачу цілі після виявлення на автоматичне супроводження РЛС супроводження або безпосередньо для виконання задачі вогневим каналом та обумовлюється середньоквадратичним відхиленням вимірювання координат цілі по кутовим параметрам і по дальності, та визначається із співвідношення (3).

$$P_{\text{вимір}} = P_{\text{вимір}\theta} \cdot P_{\text{вимір}\varphi} \cdot P_{\text{вимір}r}, \quad (3)$$

Імовірність своєчасного початку стрільби  $P_c$  обумовлюється часом захвату цілі на автоматичне супроводження і часом, що витрачається на підготовку стрільби.

В загальному випадку імовірність своєчасного початку стрільби визначається із співвідношення

$$P_c = \int_0^{t_{\text{наяв}}} \int f_1(t_{\text{ac}}) f_2\left(\frac{t_{\text{rc}}}{t_{\text{ac}}}\right) dt_1 dt_2, \quad (4)$$

де  $t_{\text{наяв}}$  – наявний час на підготовку стрільби;

$f_1(t_{\text{ac}})$  – щільність розподілу часу захвату цілі на автоматичне супроводження;

$f_2(t_{\text{rc}}/t_{\text{ac}})$  – щільність розподілу точок пуску в залежності від часу захвату цілі на автоматичне супроводження;

$t_{\text{rc}}$  – упереджений час (розрахунковий час руху цілі від моменту початку стрільби до моменту зустрічі снаряду з ціллю).

При розрахунку показника бойової ефективності будемо розглядати чотири види типових цілей (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики типових цілей для ЗАК ППО СВ

	Найменування зразка ВТЗ	Довжина, м	Діаметр, м (розмах крила)	Швидкість, м/с	ЕПР на $\lambda=3\text{см}$
1	ПРР "Шрайк"	3,05	0,2 (0,9)	972	0,03 – 1,0
2	УР С-25	3,8	0,4 (1,1)	330	0,03 – 0,7
3	КР "Томагавк"	6,25	0,52 (2,6)	2365	0,2 – 2,2
4	УАБ БЛГ-1000	4,37	0,8 (1,5)	320	0,16 – 2,4

Для визначення величини імовірності ураження цілі при стрільбі  $R_n$  допустимо, що всі елементи ЗАК діють безвідмовно, противник не вживає заходів щодо протидії, імовірність ураження цілі при стрільбі будь-яким з артилерійських каналів однакова. Тоді приймемо величину імовірності ураження цілі при стрільбі по ній всіма установками малокаліберної зенітної артилерії (МЗА) за  $R_n = 0,9$ .

Розраховуємо імовірність виявлення цілей РЛС. Будемо розглядати такий випадок роботи зенітного артилерійського комплексу, який міститься в

роботі установок МЗА по целевказанню з РЛС, що має характеристики розрішення трьохкоординатної БЧ РЛС; автоматичним прийомом целевказання у вигляді кута місця, азимута та дальності цілі, а також реалізацією його шляхом розвороту стволів в упереджену точку.

Для розрахунку ймовірностей виявлення цілей розрахуємо для різних типів цілей параметр  $d_{0.5}$ . Потрібну дальність виявлення радіолокаційної станції для випадку необхідності виявлення цілі типа ПРР «Шрайк» приймемо рівною 13 км. Візьмемо це

значення за значення  $d_{0.5}$  при виявленні даного типу цілі. Користуючись формулою дальності радіолокації, аналогічно розрахуємо значення  $d_{0.5}$  для інших типів цілей і результати зведемо в табл. 2.

Таблиця 2

Значення параметру  $d_{0.5}$  (м)  
для типових цілей ЗАК ближньої дії

Тип цілі \ Тип РЛС	ПРР	УАР	КР	УАБ
БЧ РЛС ЗК	13000	13000	26000	21000

Для визначення імовірності виявлення типових цілей, визначимо дальність, на якій, передбачено, повинно бути виявлення цілей різними типами РЛС (у виразі (2) – параметр  $r$ ).

Параметр  $r$  при виявленні цілі типу ПРР приймемо, як дальню границю зони виявлення: в трьохкоординатній БЧ РЛС – 13000 м; для цілі типу УАР та КР приймемо 5000 м, як дальність початку підняття цілі на «гірку»; для цілі типа УАБ – 7000 м, як довжину гіпотенузи прямокутного рівнобедреного трикутника, в якому один катет – висота літака під час бомбометання (5000 м), а другий катет – відстань до точки стояння РЛС до проекції на площину стояння літака (5000 м), фактично – похилена дальність від РЛС до літака в момент його бомбометання. Для зручності зведемо ці данні в табл. 3.

Таблиця 3

Значення параметру  $r$  (м)  
для типових цілей ЗАК ближньої дії

Тип цілі \ Тип РЛС	ПРР	УАР	КР	УАБ
БЧ РЛС ЗК	13000	5000	5000	7000

Тепер, використовуючи вираз (2), розрахуємо значення ймовірності виявлення типових цілей багаточастотною трьохкоординатною РЛС, а результати розрахунків зведемо в таблицю.

Таблиця 4

Значення імовірності виявлення  
типових цілей РЛС ЗАК ближньої дії

Тип цілі \ Тип РЛС	ПРР	УАР	КР	УАБ
МЧ РЛС ЗК	0,5	0,94	0,98	0,97

Розрахуємо значення імовірності правильного вимірювання координат –  $P_{\text{вимір}}$  по виразу (3). Для випадку роботи зенітного артилерійського комплексу на базі багаточастотної трьохкоординатної РЛС під  $P_{\text{вимір}}$  будемо розуміти імовірність правильного визначення координат повітряної цілі при видачі цілевказання на виконавчий пристрій – установку

МЗА. Для отримання оцінки зенітного артилерійського комплексу, побудованого на базі уявленої РЛС, умовимось, що у виразі (3) значення  $P_{\text{вимір } \theta}$  і  $P_{\text{вимір } \phi}$  будуть однакові та дорівнюватись одиниці. Тоді вираз (3) приводимо до виду (5):

$$P_{\text{вимір}} = P_{\text{вимір } r} \quad (5)$$

де  $P_{\text{вимір } r}$  находимо із співвідношення (6):

$$P_{\text{вимір } r} = \int_0^{r_{\text{розр}}} \frac{1}{\sigma_r \cdot 2\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{(r-m_r)^2}{2\sigma_r^2}} \quad (6)$$

де  $\sigma_r$  – середньоквадратичне відхилення вимірювання дальності;  $m_r$  – математичне очікування вимірюваної дальності.

Вираз для середньоквадратичного відхилення вимірювання дальності має вид [1]:

$$\sigma = \frac{1}{q\Pi} \quad (7)$$

де  $q$  – співвідношення сигнал / шум на вході приймача;  $\Pi$  – ширина спектру зондуючого сигналу.

Нам невідомо абсолютне значення  $q$  на вході приймача багаточастотної РЛС, невідоме значення математичного очікування дальності що вимірюється. Але обумовивши, що закон розподілення помилок вимірювання дальності нормальний та симетричний відносно нуля, в даному випадку приймемо за нуль математичне очікування вимірюваної дальності.

Для знаходження середньоквадратичного відхилення вимірювання дальності в багаточастотній РЛС скористаємося відносними розрахунками (8), (9); взявши для порівняння характеристики однієї з відомих радіолокаційних станцій комплексу ППО СВ:

$$q_1 = \frac{\sqrt{\frac{E_1}{2N_{01}}}}{\sqrt{\frac{E_2}{2N_{02}}}} = \frac{\sqrt{\frac{P_{\text{імпл1}} \cdot \tau_{\text{імпл1}}}{2N_{01}}}}{\sqrt{\frac{P_{\text{імпл2}} \cdot \tau_{\text{імпл2}}}{2N_{02}}}} \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1}{q_1 \Pi_1} = 3,2 \quad (9)$$

В результаті проведених розрахунків отримуємо, що СКВ вимірювання дальності БЧ РЛС ЗК складається 12,5 м.

Тоді, для випадку вимірювання координат БЧ РЛС ЗК с передачею на установки МЗА для подальшої реалізації, отримуємо значення

$$P_{\text{вимір}} = 0,85.$$

Розрахуємо значення імовірності своєчасного початку стрільби по виразу (4).

Для деякого спрощення розрахунків приймемо показник  $f_2(t_{\text{тс}}/t_{\text{ас}})$  (щільність розподілення точок пуску в залежності від часу захвату цілі на автома-

тичне супроводження рівним 1, якщо ціль взята на автоматичне супроводження, та 0, якщо ціль на автоматичне супроводження не взята. Тоді імовірність своєчасного початку стрільби назвемо терміном «імовірність своєчасного початку стрільби при умові захвату цілі на автоматичне супроводження» і визначимо по формулі:

$$P_c = \int_0^{t_{\text{наєв}}} f_1(t_{\text{ас}}) dt, \quad (10)$$

де  $f_1(t_{\text{ас}})$  – щільність розподілення часу захвату цілі на автоматичне супроводження, в силу центральної предельної теореми, що підпорядковується нормального закону розподілення. Тобто:

$$f_1(t_{\text{ас}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(t-t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

де  $t_{\text{ср}}$  – середнє арифметичний час захвату цілі на автоматичне супроводження;  $\sigma$  – С.К.В. часу захвату на автоматичне супроводження.

$t_{\text{наєв}}$  розраховується для кожного виду ВТЗ окремо і визначається часом, який необхідно пройти вражаючому елементу від рубежу взяття цілі на автоматичне супроводження до рубежу відкриття зенітного вогню.

$\sigma$  – С.К.В. находимо згідно формули [В8]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3} \left( (t_1 - t_{\text{ср}})^2 + (t_2 - t_{\text{ср}})^2 + (t_3 - t_{\text{ср}})^2 \right)}, \quad (12)$$

для варіанту автоматичної передачі та реалізації целевказання на установку МЗА з командного пункту, побудованого на основі трьохкоординатної БЧ РЛС, прийємо показник  $t_{\text{ср}}=11$  с, обумовивши, що в цей час входить на взяття цілі на автоматичне супроводження, прийняття рішення на її обстріл, вироблення координат точки зустрічі снаряду з ціллю, кутів довороту артилерійської частини кожної установки, передача целевказання, та відпрацювання їх силовими приводами всіх установок. С.К.В. розраховуємо також із співвідношення (12)  $\sigma=1,8$  с.

При розрахунку параметру  $t_{\text{наєв}}$  ми виходимо з передумови, що ціль рухається прямо на РЛС з нульовим курсовим параметром.

Знаючи характеристики типового засобу МЗА:

- його середню швидкість снаряду,
- час польоту снаряду до дальньої границі зони ураження,
- максимальну довжину черги,
- швидкість стрільби одного зенітного автомата;
- характеристики багаточастотної РЛС
- характеристики типових малорозмірних повітряних цілей,

розраховуємо значення параметру  $t_{\text{наєв}}$  та зводимо в таблицю (табл. 2).

Таблиця 5

Значення наявного часу (с) РЛС ЗАК ближньої дії при роботі з типовими цілями

Тип РЛС \ Тип цілі	ППР	УАР	КР	УАБ
БЧ РЛС ЗК	8,8	7,5	12	14

Виходячи із отриманих даних, визначено імовірність своєчасного початку стрільби, підставивши вираз (11) в (10):

$$P_c = \int_0^{t_{\text{наєв}}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (13)$$

Дана задача зводиться до пошуку значення табличного інтегралу ймовірностей, детально викладено в літературі [3].

Отримані результати розрахунків зведемо в наступну таблицю:

Таблиця 6

Значення імовірності своєчасного початку стрільби при умові взяття цілі на автоматичне супроводження

Тип РЛС \ Тип цілі	ППР	УАР	КР	УАБ
БЧ РЛС ЗК	0,11	0,03	0,69	0,94

Дальше розраховуємо імовірність виконання бойової задачі зенітним артилерійським комплексом ближньої дії відповідно виразу (1) та результати зведемо в наступну таблицю:

Таблиця 7

Значення імовірності виконання вогневої задачі зенітним артилерійським комплексом ближньої дії

Тип РЛС \ Тип цілі	ППР	УАР	КР	УАБ
БЧ РЛС ЗК	0,042	0,021	0,31	0,39

## Висновки

Дані, що наведенні в таблиці (7), показують високі характеристики однієї з складових бойової ефективності зенітного артилерійського комплексу на установки МЗА, у випадку отримання і реалізації радіолокаційної інформації в автоматичному режимі, при умові прийняття рішення людиною. Крім того, при роботі ЗАК з целевказанням від звичайної (вузькосмугової) РЛС, виникає декілька проблем:

1) в існуючій системі целевказання, координати повітряної цілі на установку МЗА подаються голо-сом, у складі: азимут та дальність вказуємої цілі;

2) вузькосмугова імпульсно-доплерівська РЛС в режимі селекції рухомої цілі гарантовано втрапить ціль – елемент високоточної зброї при його польоті на ділянці дальнього наведення, так як на цьому етапі польоту цілі (наборі висоти) є постійним кутом візування, дальність до радіолокаційної станції залишається незмінною;

3) розрізняюча здатність по дальності типової вузькосмугової РЛС комплексу ППО СВ – 300 м. Тобто, дві цілі, що рухаються з одного кутового напрямку, навіть на різних висотах або на різних кутах пікірування, будуть розпізнані, як одна ціль;

4) при цілевказанні шляхом передачі цілі на установку з наступним допошуком, взяттям на автоматичне супроводження, та обстрілом, робітний час комплексу може бути більшим, чим підльотний час елементу ВТЗ.

Багаточастотна трьохкоординатна радіолокаційна станція з високою розрізняючою здатністю по дальності не будується на основі Доплерівських фільтрів, а швидкість цілі визначається по засіді відстані між двома або більше циклами обзору, з корекцією при кожному циклі, що дозволяє відійти від сліпих швидкостей. Висока розрізняюча здатність по дальності дозволяє селектувати пасивні завади стробуванням по дальності, а не селекцією рухомої цілі.

Таким чином, ціль не буде втрачена під час набору нею висоти з постійним кутом пеленгу. Висока розрізняюча здатність по куту місця, азимуту та по дальності дозволяє не тільки давати цілевказання

з високою точністю, але також здійснювати цілерозподіл всередині підрозділу по цілям, що летять з одного кутового напрямку. Все це дозволяє комплексу, що складається з командного пункту на базі БЧ РЛС, здійснювати пошук, виявлення, впізнавання, цілевказання та обстріл елементів високоточної зброї без проміжного взяття цілі на автоматичне супроводження локаторами установок МЗА. При такому варіанті організації роботи комплексу підвищується скритність його роботи і суттєво зменшується робітний час, що дозволяє ефективно боротися з елементами ВТЗ.

## Список літератури

1. Широкоград А. "Палашом" по "Томагавку" / А. Широкоград // Популярная механика. – 2007. – № 3. – С. 25-28.
2. Пушкорюс С. К. Управление огнём сил и средств войск ПВО Сухопутных войск / С.К. Пушкорюс. – М.: Военное издательство, 1990. – 104 с.
3. Пособие по изучению правил стрельбы. Ч. 3. Зенитный ракетный комплекс «Оса-АК». – М. Военное издательство, 1983. – 168 с.
4. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М. Высшая школа, 2001. – 575 с.

Надійшла до редколегії 16.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Національний політехнічний університет "ХПІ", Харків.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ОГНЕВОЙ ЗАДАЧИ ЗЕНИТНЫМ АРТИЛЛЕРИЙСКИМ КОМПЛЕКСОМ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ВВЕДЕНИИ ЕГО СОСТАВМНОГОЧАСТОТНОЙ ТРЁХКООРДИНАТНОЙ РЛС

В.В. Воинов, Г.В. Ермаков, И.Г. Леонов, С.М. Телюков

В статье предлагается методика оценивания одной из основных характеристик боевой эффективности зенитного артиллерийского комплекса ближнего действия – вероятности выполнения огневой задачи. В качестве радиолокационного средства обнаружения и целеуказания в данном комплексе рассматривается многочастотная трёхкоординатная РЛС. В качестве типовой цели для зенитного артиллерийского комплекса ближнего действия рассматривается самонаводящийся элемент высокоточного оружия типа «противорадиолокационная ракета, управляемая авиационная ракета, управляемая авиабомба».

**Ключевые слова:** зенитный артиллерийский комплекс ближнего действия, многочастотная РЛС, малоразмерная цель, вероятность выполнения огневой задачи.

### METHOD OF PROBABILITY EVALUATION OF FIRE TASK EXECUTION BY SHORT-RANGE AIR DEFENSE ARTILLERY COMPLEX WITH INTRODUCTION OF MULTIFREQUENCY THREE-COORDINATE RADAR

V.V. Voinov, G.V. Yermakov, I.G. Leonov, S.M. Telyukov

The method of evaluation of one of basic descriptions of short-range air defense artillery complex battle efficiency – probability of fire task execution is offered in the article. As a radio-location unit of discovery and targeting in this complex use a multifrequency three-co-ordinate radar. As a target model for the short-range air defense artillery complex is the self-guided element of high-precision weapon of type is «antiradar missile, guided airborne missile, guided airborne bomb».

**Keywords:** short-range air defense artillery complex, multifrequency radar, little size target, probability of fire task execution.