

## СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ ПВО БОЕВЫХ ПОРЯДКОВ ВОЙСК NETWORK-CENTRIC AIR DEFENSE OF COMBAT FORMATIONS OF TROOPS

По представлению чл.-корр. РАН В.Б. Дементьева

*И.А. Соловатов<sup>1</sup>, Н.В. Митюков<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,

<sup>2</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

*I.A. Solovатов, N.V. Mityukov*

В работе производится сравнение эффективности действия ЗРК «Тор», получающей информацию со своего штатного радиолокационного оборудования, и того же ЗРК, включенного в сетецентрическую систему ПВО. Результаты имитационного моделирования показали резкое увеличение эффективности ПВО в случае применения сетецентрического принципа ее построения. Симуляция боя ЗРК «Тор» с ударной группой БПЛА ТВ2 «Bayraktar» показала увеличение эффективности с 43 % до 94 %. Симуляция боя по отражению массированного ракетного удара показала увеличение эффективности с 54 % до 100 %.

**Ключевые слова:** зенитная ракета, моноцентрическая ПВО, сетецентрическая ПВО, боевая эффективность.

The paper compares the effectiveness of the «Tor» air defense system, which receives information from its standard radar equipment and the same air defense system included in the network-centric air defense system. The simulation results showed a sharp increase in air defense efficiency in the case of applying the network-centric principle of its construction. The simulation of the battle of the «Tor» air defense system with the TB2 «Bayraktar» UAV strike group showed an increase in efficiency from 43 % to 94 %. A simulation of a battle to repel a massive missile strike showed an increase in efficiency from 54 % to 100 %.

**Keywords:** anti-aircraft missile, monocentric air defense, network-centric air defense, combat effectiveness.

### Введение

Опыт вооруженных конфликтов последнего времени выявил возросшую роль противовоздушной обороны (ПВО). Если стационарная ПВО, базирующаяся на системе оптимально расположенных радиолокационных станций, способных практически без мертвых зон отследить все основные угрозы, достаточно эффективно справляется со своими задачами, то мобильная ПВО в боевых порядках нередко

проигрывает в противоборстве с воздушным противником.

Традиционно в литературе устойчивость ПВО в боевых порядках оценивается с помощью детерминированных моделей, например, при оптимизации системы эшелонирования, выделяя ПВО большой дальности, средней и малой [1]. Уделяется также внимание оптимизации схемы расположения ПВО в зависимости от конкретных условий и конкретной ситуации, что с успехом решается с помощью имитационного

моделирования [2]. Нашли свое применение и марковские модели, например при оценке периода приработки при эксплуатации радиоэлектронных средств ПВО [3]. Большое значение имеют также алгоритмы целераспределения, что особо актуально, например, для оптимизации ордера ПВО боевых кораблей [4]. В этой задаче большое значение имеет логико-вероятностное моделирование [5].

Цель данной работы состоит в демонстрации возможностей сетцентрического подхода к формированию ПВО боевых порядков. Для этого, по мнению авторов, наибольшей наглядностью обладает имитационная модель [6].

### Моноцентрическая ПВО

Имитационная модель для оценки боя моноцентрической ПВО производит численное интегрирование по методу Эйлера с шагом интегрирования 0,001 с. Алгоритм программы, написанной в среде Pascal, представлен на рис. 1.

Вычислительный цикл, если зенитно-ракетный комплекс (ЗРК) еще не выведен из строя, начинается с ячеек, выделенных жирным. Этот блок осуществляет опрос, не выведена ли из строя установка и способна ли она вести стрельбу и наводить ракеты. Если ЗРК боеготов, запускается вычислительная цепочка процедуры выбора. Она заключается в том, что все обнаруженные станцией цели в прямой видимости сортируются по степени опасности для обороняемого центра.

Ранее в наших работах мы пришли к выводу, что метод половинного спрямления является наилучшим при перехвате как высокоскоростной, так и маневренной цели [7]. В связи с этим, опасность цели  $D$  можно определить как:

$$D = P (\Delta r / \Delta v^2),$$

где  $\Delta r$  — расстояние от условного противника до обороняемого ЗРК центра;  $\Delta v^2$  — квадрат скорости сближения условного противника с обороняемым центром;  $P$  — ранг цели, классифицированный по ее радиолокационному портрету. При необходимости его можно уточнить, но в первом приближении можно принять для вертолета  $P = 30$ , для самолета 20, для беспилотного летательного аппарата (БПЛА) — 19, противорадиолокационной ракеты — 8, крылатой ракеты — 2.

Фактически опасность обратно пропорциональна подлетному времени. Однако результаты выбора могут быть признаны недействительными, например, если цель уже выбрана и по ней выпущены ракеты. Если результаты выбора не признаются, то победителем в выборе становится цель, победившая в предыдущем выборе.

Также на опасность влияет тип опознанной цели. В моноцентрической ПВО его определяет оператор по радиолокационному портрету. Так, например, самой опасной целью считаются вертолеты, потому что, обладая очень большим подлетным временем, они способны, скрываясь в складках местности, вести прицельную стрельбу по ЗРК. Вторыми по степени опасности идут истребители, штурмовики и тактические бомбардировщики. Третью степень опасности представляют ударно-разведывательные БПЛА, такие как MQ-9 «Reaper» и TB2 «Bayraktar». Четвертая степень — управляемые ракеты, такие как UMTAS, CIRIT, AGM-88 «HARM» и AGM-114 «Hellfire». На последнем месте стоят крылатые ракеты и барражирующие боеприпасы.

Цель, победившая в выборе, берется на сопровождение радиолучом фазированной антенной решетки (ФАР). Если победившая в выборе и сопровождаемая ФАР цель нарушает границу зоны боевого радиуса действия ЗРК, то срабатывает команда «Открыть огонь на поражение». Эта команда инициирует запуск зенитных управляемых ракет (ЗУР), расположенных в шахте антенно-пускового устройства (АПУ).

Запуск производится, начиная с первой ракеты. После каждого запуска должен пройти небольшой задаваемый интервал времени, чтобы осуществить запуск следующей ракеты и далее, пока не закончится боекомплект (для ЗРК «Тор» — 16 ракет). Если станция наведения ЗРК сопровождает 4 ракеты, запуски ЗУР далее не производятся.

Параллельно с процедурой выбора и блоком «Открыть огонь на поражение» реализуется логическая ветка, отвечающая за наведение ЗУР. В первую очередь программа запрашивает, какие ракеты уже «ожили» по команде «Открыть огонь на поражение». Во вторую — если ракета отвечает, то программа задает вопрос, выведена ли она в плоскость стрельбы.

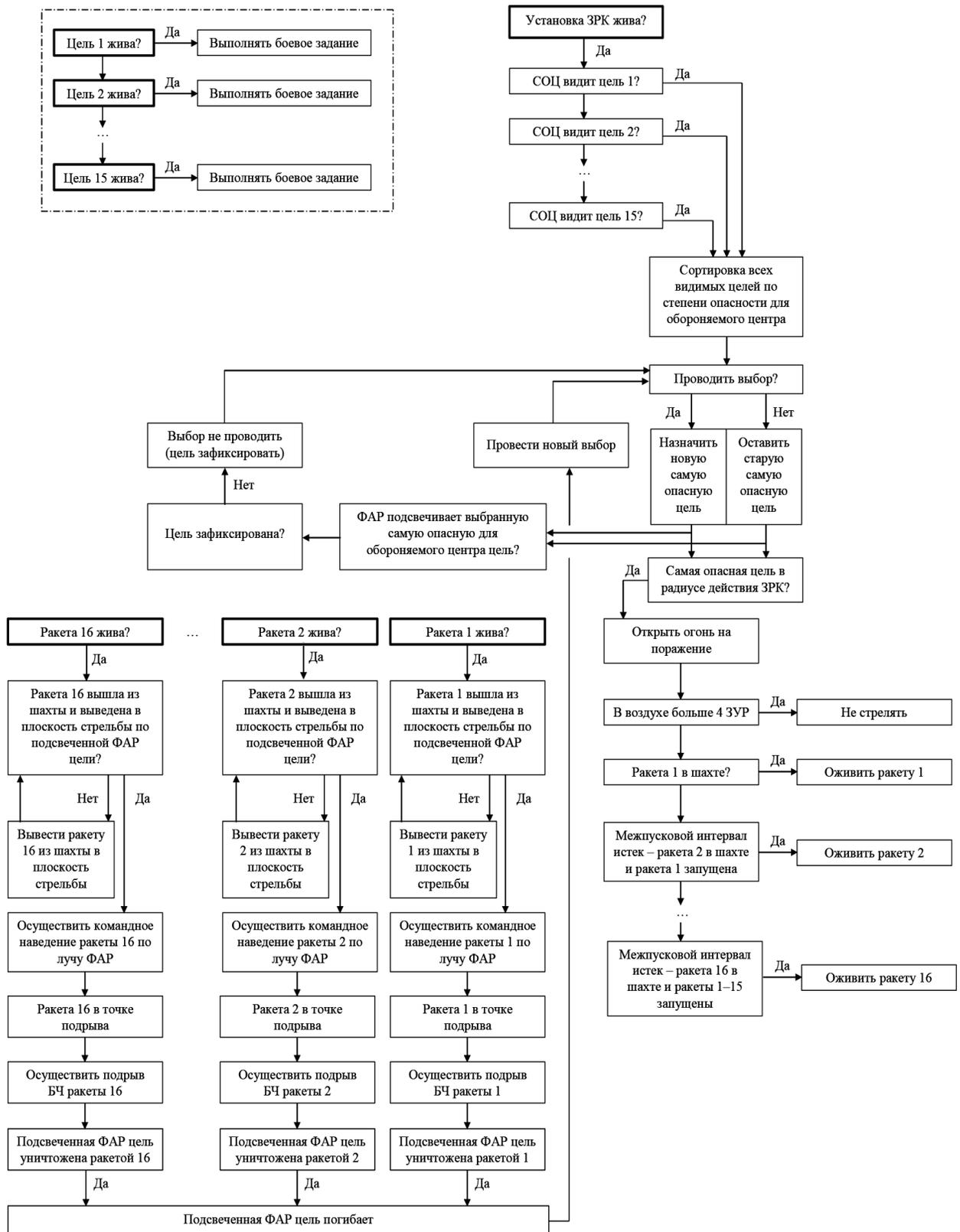


Рис. 1. Блок-схема моноцентрической ПВО

Вывод ЗУР из ракетной шахты в плоскость стрельбы является технически сложным процессом: ракета выстреливается из шахты с помощью порохового аккумулятора давления, далее происходит раскрытие хвостового оперения и передних рулей, а также выход на квазистационарный режим газогенераторов, питающих рулевые машинки и двигатели склонения. Весь этот процесс в алгоритме упрощен: в программе происходит учет некоего постоянного времени выхода в плоскость стрельбы.

Если в ответ на запрос программы выведена ли ракета на боевой курс, ракета отвечает «да», то включается тяга маршевого ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) ЗУР и производится наведение ракеты на цель методом половинного спрямления. В течение каждого цикла ракета стремится удержаться на линии стрельбы и с этой целью изменяет свой угол, курс и тангаж.

Курс ЗУР в течение одного вычислительного цикла (шага по времени  $dt = 0,001$  с) изменяется по формуле:

$$\text{Kurs} = \text{Kurs} + \text{mismatch\_kurs} \times \cos(\text{Tangazh}) \cdot \omega_{\text{пред}} \cdot dt,$$

где  $\text{mismatch\_kurs}$  — величина рассогласования текущего курса вектора скорости ракеты и линии стрельбы, на которой ЗУР должна удерживаться, чтобы наводиться по методу половинного спрямления (чем больше рассогласование, тем большее управляющее усилие нужно приложить для удержания ЗУР на требуемой для осуществления метода наведения линии стрельбы);  $\cos(\text{Tangazh})$  — косинус тангажа ЗУР (чем больше тангаж, тем меньше скорость ЗУР в горизонтальной плоскости, соответственно выше курсовая маневренность);  $\omega_{\text{пред}}$  — предельно возможная маневренность ЗУР по курсу, град/с.

$\omega_{\text{пред}}$  рассчитывается через предельно допустимые поперечные управляющие перегрузки:

$$\omega_{\text{пред}} = (a / v) (180/\pi).$$

Здесь  $a$  — предельно допустимые поперечные перегрузки,  $\text{м/с}^2$ ;  $v$  — скорость ЗУР,  $\text{м/с}$ ;  $(180/\pi)$  — константа перевода из радианов в градусы.

Тангаж ЗУР в течение одного вычислительного цикла ( $dt = 0,001$  с) изменяется следующим образом:

$$\text{Tangazh} = \text{Tangazh} + \text{mismatch\_tangazh} \times \cos(\text{Tangazh}) \cdot \omega_{\text{пред}} \cdot dt,$$

где  $\text{mismatch\_tangazh}$  — величина рассогласования текущего тангажа и линии стрельбы, на которой ЗУР должна удерживаться, чтобы наводиться по методу половинного спрямления. Чем больше рассогласование, тем большее управляющее усилие нужно приложить для удержания ЗУР на требуемой для осуществления метода наведения линии стрельбы.

После корректировки по курсу и тангажу определяются новые координаты ЗУР:

$$X\_ZUR = X\_ZUR + V\_ZUR \cdot \cos(\text{Tangazh\_ZUR}) \times \cos(\text{Kurs\_ZUR}) \cdot dt;$$

$$Y\_ZUR = Y\_ZUR + V\_ZUR \cdot \cos(\text{Tangazh\_ZUR}) \times \sin(\text{Kurs\_ZUR}) \cdot dt;$$

$$Z\_ZUR = Z\_ZUR + V\_ZUR \times \sin(\text{Tangazh\_ZUR}) \cdot dt,$$

где  $X\_ZUR$ ,  $Y\_ZUR$ ,  $Z\_ZUR$  — координаты ракеты ЗУР ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) соответственно;  $V\_ZUR$ ,  $\text{Tangazh\_ZUR}$ ,  $\text{Kurs\_ZUR}$  — скорость, тангаж и курс ЗУР соответственно.

После вычисления новых координат, ЗУР вычисляет свое местоположение относительно подсвеченной ФАР цели. Если расстояние меньше трех метров, то ЗУР осуществляет подрыв и цель считается уничтоженной. Если ракета промахивается, то она самоуничтожается. В случае «смерти» подсвечиваемой цели проходит процедура выбора, в ходе которой вновь выбирается «враг номер один» и все выпущенные ракеты перенацеливаются уже на него.

### Сетецентрическая ПВО

Имитационная модель для оценки боя сетецентрической ПВО также была реализована в среде Pascal, алгоритм программы представлен на рис. 2.

Видно, что сетецентрическая ПВО имеет как общие части алгоритма с моноцентрической ПВО,

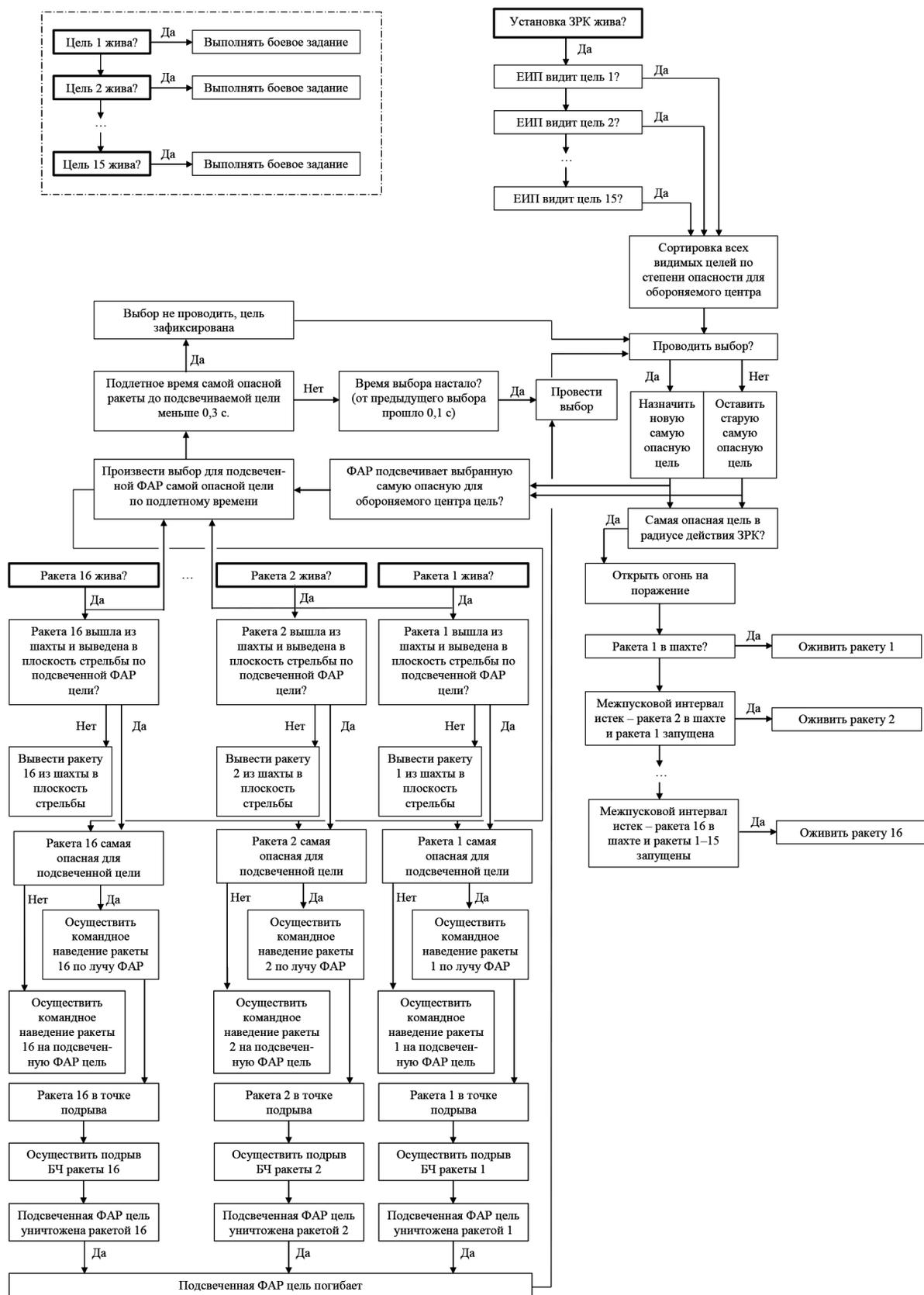


Рис. 2. Блок-схема сетецентрической ПВО.  
Цикл начинается с ячеек в жирной рамке и повторяется каждые 0,001 с.

так и отличия от нее. Он также универсален и не привязан к конкретным образцам вооружений.

Общим является, например, система оценки целей по их степени опасности. Кардинальное отличие заключается в принципе сбора информации об окружающей обстановке и схеме наведения. Сетевая ПВО проводит рекогносцировку не только со станции обнаружения целей АПУ (как в моноцентрической ПВО), но и с прикрепленных к обороняемому району РЛС, оптических визиров, БПЛА сопровождения ЗРК и т.д., образующих единое радиолокационное и информационное поле боя. Кардинально решить проблему слежения за потенциальными целями можно с помощью самолета дальнего радиолокационного обнаружения или спутника. Однако, как показал опыт специальной военной операции на Украине, это не всегда возможно (например, прорыв украинских вертолетов на сверхмалых высотах в осажденный Мариуполь). Поэтому вынесенные станции слежения могут стать хорошей альтернативой.

Намного большая насыщенность информационного потока позволяет проводить выбор «врага номер один» гораздо чаще, практически в режиме реального времени, например с интервалом в 0,1 с, в то время как в моноцентрической ПВО выбор проходит после каждого оборота ФАР. Подключение широкодиапазонных визиров наземного и воздушного базирования на БПЛА сопровождения позволяет более объективно классифицировать цели, а также находить в ИК-диапазоне точные координаты цели с очень низкой радиолокационной видимостью.

В отличие от моноцентрической ПВО, процедура выбора самой опасной цели отменяется только в том случае, если подлетное время ЗУР до этой цели меньше 0,3 с.

Другим существенным отличием является алгоритм наведения ЗУР. Он представляет собой комбинированную систему, сочетающую командное управление ракетным вооружением и полуактивное радиолокационное наведение. ЗУР, представляющая наибольшую опасность для подсвечиваемой ФАР цели, наводится с помощью полуактивной головки самонаведения. Остальные ракеты, представляющие меньшую опасность, осуществляют грубое наведение с помощью команд и директив. И если самая опасная

для подсвечиваемой цели ЗУР промахнется, то пройдет процедура выбора самой опасной цели от ближайшей к ней ракеты, и уже она перейдет от директивно-командного наведения к полуактивному наведению.

Степень опасности ЗУР для цели вычисляется как:

$$\text{Dangerous\_ZUR} = v / \Delta r + 10,$$

где  $v$  — скорость сближения ЗУР с целью, м/с;  $\Delta r$  — расстояние от ЗУР до подсвечиваемой ФАР цели, м.

### Программная реализация боя

Согласно теории игр, программная реализация боя представляет собой классическую антагонистическую игру с нулевой суммой. В ней задача противника сводится к прорыву ПВО, уничтожению ЗРК и указанной цели. Такие игры являются первым классом математической модели теории игр.

В первой игре-симуляции антагонистом моноцентрической и сетевой ПВО выступило ударное звено из пяти БПЛА ТВ2 «Bayraktar». Их боевая задача заключалась в уничтожении бортовыми ракетами с наименьшими потерями ЗРК. Удар производился противотанковыми управляемыми ракетами UMTAS с лазерным наведением. Начальное положение звена задавалось случайным образом.

Во всех 100 симуляциях моноцентрическая установка ЗРК была уничтожена противотанковыми ракетами UMTAS (табл. 1). Сетевая установка ЗРК успешно отразила все атаки звеньев ударно-разведывательных БПЛА и за все 100 боев не была ни разу уничтожена (табл. 2).

Во второй игре антагонистами ЗРК выступала «стая» крылатых ракет BGM-109 «Tomahawk», сгруппировавшаяся для нанесения концентрического прорыва противовоздушной обороны. Снова, моноцентрическая установка ЗРК задачи свои не выполнила (табл. 3), в то время как сетевая установка каждый раз уничтожала все цели (табл. 4).

Все компьютерные симуляции выполнялись в среде Pascal ABC. Вывод изображений осуществляется через модули Graph ABC, Crt.

Таблица 1

*Результаты боев моноцентрической ПВО с БПЛА*

Номер боя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сбитые цели	7	6	7	8	9	6	5	7	8	6	5	7	6	5	6	7	8	9	6	5
Номер боя	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Сбитые цели	6	7	5	7	6	8	7	6	7	8	9	5	6	7	5	8	9	7	6	5
Номер боя	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Сбитые цели	7	7	7	6	9	8	5	5	5	7	8	6	5	6	5	5	5	5	9	7
Номер боя	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Сбитые цели	6	6	6	7	7	7	7	5	6	9	7	6	5	5	7	8	7	9	6	5
Номер боя	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Сбитые цели	5	9	5	7	5	6	8	5	6	5	6	7	8	8	7	9	7	6	5	7

Таблица 2

*Результаты боев сетцентрической ПВО с БПЛА*

Номер боя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сбитые цели	15	15	14	14	15	15	15	14	14	13	15	15	15	14	14	13	12	15	14	15
Номер боя	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Сбитые цели	14	15	14	13	15	14	14	13	12	13	14	14	13	13	15	13	14	14	14	15
Номер боя	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Сбитые цели	15	15	15	14	12	13	15	12	14	13	14	13	15	15	15	14	14	15	14	14
Номер боя	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Сбитые цели	13	13	14	15	15	14	15	14	15	14	15	13	14	15	13	15	13	13	14	15
Номер боя	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Сбитые цели	15	14	14	12	13	15	14	15	15	15	15	15	14	14	13	15	15	14	15	14

*Таблица 3*

*Результаты боев моноцентрической ПВО с крылатыми ракетами*

Номер боя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сбитые цели	8	8	7	8	7	9	7	8	9	8	9	8	9	9	9	9	7	8	9	7
Номер боя	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Сбитые цели	8	9	10	9	9	8	9	9	8	7	9	9	9	9	8	8	7	8	8	9
Номер боя	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Сбитые цели	9	9	8	8	8	9	7	7	9	8	8	9	6	7	7	7	7	7	8	9
Номер боя	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Сбитые цели	9	9	9	9	8	8	8	8	9	9	9	9	9	7	6	7	9	9	7	7
Номер боя	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Сбитые цели	9	7	7	8	9	9	8	9	6	7	8	8	9	6	7	9	9	9	7	8

*Таблица 4*

*Результаты боев сетцентрической ПВО с крылатыми ракетами*

Номер боя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сбитые цели	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Номер боя	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Сбитые цели	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Номер боя	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Сбитые цели	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Номер боя	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Сбитые цели	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Номер боя	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Сбитые цели	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Критерием эффективности ПВО в данном случае может выступать отношение суммы сбитых целей к общей сумме целей. Он вычисляется по формуле:

$$K_3 = (\text{War\_score\_of\_TARGET } N) / (\sum \text{Warscore\_of\_Target}),$$

где War\_score\_of\_TARGET N — тактический военный вес цели;  $\sum \text{Warscore\_of\_Target}$  — сумма тактических военных весов всех целей.

1. Бой с ударной группой БПЛА ТВ2 «Bayraktar»:

– моноцентрическая система ПВО

$$K_3 = 656 / 1500 = 0,4373 = 43,73 \%;$$

– сетцентрическая система ПВО

$$K_3 = 1411 / 1500 = 0,9407 = 94,07 \%.$$

Применение принципов построения сетцентрической системы ПВО увеличило эффективность борьбы с ударными группировками БПЛА с 43 % до 94 %.

2. Отражение массированного ракетного удара:

– моноцентрическая система ПВО

$$K_3 = 814 / 1500 = 0,5427 = 54,27 \%;$$

– сетцентрическая система ПВО

$$K_3 = 1500 / 1500 = 1,000 = 100,00 \%.$$

Применение принципов построения сетцентрической системы ПВО увеличило эффективность отражения массированного ракетного удара с 54 % до 100 %.

### Заключение

Результаты имитационного моделирования показали резкое увеличение эффективности ПВО в случае применения сетцентрического

принципа ее построения. Симуляция боя ЗРК «Тор» с ударной группой БПЛА ТВ2 «Bayraktar» показала увеличение эффективности с 43 % до 94 %. Симуляция боя по отражению массированного ракетного удара показала увеличение эффективности ЗРК «Тор» с 54 % до 100 %.

### Литература

1. Чжан С. Метод прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия многорубежной ПВО и системы воздушного базирования на основе модели ЗРК «Пэтриот» // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10. С. 209–230.

2. Голованова А.Ю. Имитационная модель системы боевого управления комплексами ПВО // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: мат. Всеросс. научн.-практ. конф. Кемерово, 16–17 октября 2014 г. — Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2014. С. 364–365.

3. Мендуров А.А., Воскобойник А.Г. Усовершенствованная модель процесса эксплуатации РЭС ВВТ войск ПВО СВ в период приработки // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: мат. III Всеросс. научн.-практ. конф. Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2016 г. — СПб.: Изд-во ВКА им. Можайского, 2016. С. 104–107.

4. Григорьев Д.А., Масленникова Т.Н., Пифтанкин А.Н., Половинкина А.В. Математическая модель процесса управления средствами ПВО // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 15–22.

5. Рябинин И.А., Можаяев А.С., Свиринов С.К., Поленин В.И. Модель отражения системой ПВО ударов средств воздушного нападения противника // Морская радиоэлектроника. 2010. № 2 (32). С. 55–60.

6. Митюков Н.В. Имитационное моделирование в военной истории. — М.: ЛКИ, 2007. 280 с.

7. Соловатов И.А., Митюков Н.В. Выбор метода наведения для перехвата маневренных и высокоскоростных целей // Известия РАН. 2022. № 2. С. 58–66.