

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОЙ
РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ
СОЕДИНЕНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ**

Е.М. Воронов

voronov@bmstu.ru

А.Л. Репкин

alexr_bmstu@mail.ru

Ф.М. Хромов

filooloog@mail.ru

Д.А. Тимофеев

tim.disa001@mail.ru

А.Ю. Гераськин

aleks.geraskin@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены этапы логико-временной циклограммы обнаружения и обслуживания группировок управляемых объектов средствами системы противовоздушной обороны соединения надводных кораблей. Реализован алгоритм формирования массивов обнаруженных объектов с учетом импульсного объема, сектора обзора для сопровождения всех обнаруженных объектов и других конфигурационных факторов с учетом вероятностных оценок обнаружения управляемых объектов. Создана математическая модель функционирования системы противовоздушной обороны соединения надводных кораблей с учетом различных параметров активных средств, воздействующих на группировку управляемых объектов, а также с учетом стратегий стрельбы при наличии сетецентрического управления строем управляемых объектов. Рассмотрен алгоритм оценки результатов огневого противодействия сетецентрической группировки управляемых объектов со стороны системы противовоздушной обороны соединения надводных кораблей. Сформирован вариант имитационной реализации логико-временной циклограммы работы огневых каналов системы противовоздушной обороны, а также приведены примеры формирования логико-временной циклограммы для произвольного состава системы противовоздушной обороны с учетом стратегических действий активных средств соединения надводных

Ключевые слова

Соединение надводных кораблей, группировка управляемых объектов, обнаружение, импульсный объем, огневое противодействие, каналность, логико-временная циклограмма

кораблей. Перечислены дополнительные условия для встраивания разработанного варианта алгоритма логико-временной циклограммы системы противовоздушной обороны в систему имитации конфликтного взаимодействия систем

Поступила 01.10.2021

Принята 09.11.2021

© Автор(ы), 2022

Введение. При создании имитационной реализации функционирования системы противовоздушной обороны (СПВО) для анализа эффективности конфликтно-оптимального взаимодействия сетцентрических группировок управляемых объектов (ГУО) с СПВО соединения надводных кораблей (СНК) [1–4] необходимо оптимальным образом учитывать функционирование всех активных подсистем СПВО при воздействии на объекты конфликтующей системы (ГУО), которое можно представить в виде следующей последовательности действий [5, 6].

1. *Формирование конфигурации СПВО СНК.* Задание численностей групп объектов авиационной группировки, барьера и ядра СНК, конфигурации подгрупп надводных кораблей (НК), вероятностей воздействия на каждом рубеже конфликтного взаимодействия, а также параметров СПВО, которые необходимы для формирования логико-временной циклограммы. При частичной информационной осведомленности барьер СНК выставляют в строю фронта в направлении сектора движения ГУО. Размещение НК в составе барьера должно обеспечивать полное перекрытие сектора прогнозируемого воздействия со стороны ГУО [7].

2. *Обнаружение направления движения ГУО в исходную точку назначения и перестройка конфигурации СНК.* Реализация элементов движения СНК за время выдвигания ГУО на рубеж обнаружения объектов СНК.

3. *Передислокация авиационной группировки (АГ) СНК для воздействия по ГУО* (первый рубеж конфликта).

4. *Обнаружение объектов ГУО со стороны барьера СНК.* Реализация циклограммы СПВО для воздействия барьера СНК на ГУО на нескольких тактах взаимодействия (второй рубеж конфликта).

5. *Обнаружение объектов ГУО со стороны ядра СНК.* Реализация циклограммы СПВО для воздействия ядра СНК по ГУО на нескольких тактах взаимодействия (третий рубеж конфликта).

Модель циклограммы СПВО СНК должна содержать такие элементы, как [7, 8]:

– обнаружение и формирование массива УО с учетом различных факторов (импульсный объем УО, зоны поражения и пуска зенитной управляемой ракеты (ЗУР) и др.);

- логика работы огневых каналов СПВО с формированием целераспределения (ЦР) зенитного ракетного комплекса (ЗРК) СНК и учетом стратегий стрельбы;
- подавление канала активного наведения УО системой радиоэлектронного противодействия (РЭП) СНК ядра при подлете УО к НК;
- оценка результатов конфликтно-оптимального взаимодействия систем.

Воздействие СПВО СНК на ГУО проводят согласно приведенной структуре рубежей взаимодействия систем [9]:

- рубеж 1: АГ СНК (N_{takt_a} тактов);
- рубеж 2: барьер СНК (N_{takt_b} тактов);
- рубеж 3: ядро СНК (N_{takt_c} тактов).

На каждом рубеже алгоритмы сетецентрического применения огневых средств СНК идентичны, что делает алгоритм универсальным для различных по численности и составу СНК.

При описании модели циклограммы СПВО СНК используют следующие исходные параметры конфликта:

- число НК в СНК или подгруппе СНК $N_{snk} = \{N_{snk_a}; N_{snk_b}; N_{snk_c}\}$;
- число ЗРК на каждом НК $\bar{N}_{zrk} = \{\bar{N}_{zrk_i}\}_{i=1}^{N_{snk}}$;
- общее число ЗРК в СНК $N_{zrk} = \sum_{i=1}^{N_{snk}} \bar{N}_{zrk_i}$;
- предельная дальность обнаружения объектов ГУО для ЗРК каждого НК $R_{fire\ max} = \{R_{fire\ ij\ max}\}_{i=1, j=1}^{N_{snk}, \bar{N}_{zrk_i}}$;
- минимальная дальность обслуживания объектов ГУО для ЗРК каждого НК, $R_{fire\ min} = \{R_{fire\ ij\ min}\}_{i=1, j=1}^{N_{snk}, \bar{N}_{zrk_i}}$;
- канальность ЗРК $N_{kan} = \{N_{kan_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- время перезарядки ЗРК $T_{kan} = \{T_{kan_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- боезапас ЗРК $N_{zapas} = \{N_{zapas_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- интервал схода ЗУР с ЗРК $T_{shod} = \{T_{shod_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- число одновременно сопровождаемых ЗУР $N_{rls} = \{N_{rls_i}\}_{i=1}^{N_{snk}}$;
- скорость ЗУР v_{zur} , км/с;
- средняя вероятность поражения объектов ГУО со стороны ЗУР p_{zur} .

Алгоритм логико-временной циклограммы обнаружения объектов ГУО средствами РЛС СПВО и расчета вероятностных оценок обнаружения. С момента выхода УО на дальнюю границу зоны обнаружения РЛС СПВО барьера последовательно с заданным шагом Δt и периодом обзора РЛС НК проводят оценку времени наступления события «обнаружение воздушной цели» (ОВЦ) для каждого НК, оснащенного РЛС обнаружения целей.

Для каждого j -го ЗРК i -го НК формируют массив обнаруженных УО в каждый момент времени $t_k, k = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$, при выполнении условия преодоления l -м УО, $l = \overline{1, N_{uo}}$, дальней границы обнаружения $R_{uo\ l} < R_{fire\ ij\ max}$. Проверяют факт обслуживания каждого УО на текущий момент:

$$F_{zr} = \{F_{zr\ l}\}_{l=1}^{N_{uo_obn}}, F_{zr\ l} = \{0; k_{zrk}\},$$

где $k_{zrk} = \overline{1, N_{zrk}}$ — номер ЗРК, который обслуживает данный УО; для необслуживаемых УО элемент этого вектора равен нулю; N_{uo_obn} — число обнаруженных УО.

Управляемые объекты, преодолевшие зону поражения j -го ЗРК i -го НК, которая задается интервалом

$$\left[R_{fire\ ij\ min}, R_{fire\ ij\ max} \right], \quad i = \overline{1, N_{snk}}, \quad j = \overline{1, N_{zrk\ i}},$$

исключают из списка УО, обнаруженных РЛС i -го НК для j -го ЗРК.

Событие «ОВЦ» может формироваться на детерминированной или вероятностной модели обнаружения УО. В детерминированной модели обнаружения УО признак обнаружения формируется при выполнении условия

$$D_{il} \leq D_{il0}, \quad i = \overline{1, N_{snk}}, \quad l = \overline{1, N_{uo_obn}},$$

где D_{il} — расстояние между i -м НК и l -м УО; D_{il0} — дальность обнаружения l -го УО со стороны РЛС i -го НК (значение D_{il0} рассчитывают по модели РЛС или задают заранее).

Алгоритм расчета вероятности обнаружения УО включает в себя следующую последовательность действий.

1. Определение значения переменной D_1 — наклонной дальности между l -м УО и i -м НК на момент времени обнаружения, $D_1 = \sqrt{d_{il}^2 + H_l^2}$, d_{il} — горизонтальная дальность между l -м УО и i -м НК; H_l — высота полета УО.

2. Проверка выполнения условия

$$D_1 \leq [D_{il0}(H) + 3\sigma_{il}]. \quad (1)$$

Если условие (1) выполняется (дальность до УО меньше максимально возможной дальности ее обнаружения), то определяют параметры закона Рэлея и осуществляется переход к п. 3. В противном случае осуществляется выход из блока.

3. Проверка выполнения условия $D_1 < D_0$. Если условие выполняется, то осуществляется переход к п. 4, в противном случае:

- определяют значение вероятности обнаружения УО p_{obn} ;
- осуществляют генерацию случайной величины \tilde{p} ;
- полагают, что УО обнаружен, если выполняется условие

$$\tilde{p} \leq p_{obn}. \quad (2)$$

Если условие (2) выполняется, то — переход к п. 4. В противном случае осуществляется выход из блока.

4. Формирование признака обнаружения УО. Проверку условий обнаружения УО проводят для всех $i = 1, N_{snk}$, $l = 1, N_{uo_obn}$. При обнаружении l -го УО хотя бы одним НК (РЛС i -го НК) формируется признак обнаружения УО (соответствующий элемент вектора обнаружения будет равен 1):

$$F_{obn} = \{F_{obn_l}\}_{l=1}^{N_{uo_obn}}, \quad F_{obn_l} = \{0, 1\}.$$

При наступлении первого по времени события «ОВЦ» фиксируется время обнаружения УО T_{obn} , начиная с которого проводится запуск циклограммы функционирования СПВО в режиме активного воздействия на ГУО.

При организации плотного построения ГУО в пределах импульсного объема зондирующего импульса РЛС с неразрешимостью отдельных УО в ГУО расчет дальности обнаружения проводят по суммарной эффективной поверхности рассеивания ГУО, попадающей в импульсный объем. Геометрические размеры импульсного объема устанавливают в зависимости от характеристик РЛС, в котором могут находиться УО, дополнительно сведенные в пары на заданном безопасном для их движения расстоянии в зависимости от типа УО.

Группировка УО, попавшая в импульсный объем РЛС, идентифицируется как одна цель. В этом случае для барьера/ядра СНК устанавливают пороги дальности, составляющие один из основных управляющих параметров для сетцентрического управления строем ГУО по тактам взаимодействия [9]:

- такт 1: ГУО видна как один объект, дальность $8R_{takt}$ км;
- такт 2: ГУО видна как два объекта, дальность $4R_{takt}$ км;

такт 3: в ГУО различимы пары УО как один объект при условии сведения УО в импульсный объем по парам; дальность $2R_{takt}$ км;

такт 4: УО в ГУО могут становиться различимыми по отдельности, дальность R_{takt} до подгруппы СНК.

Для АГ СНК формируют два такта взаимодействия с ГУО на первом ру-беже взаимодействия по дальности: такт 1 — $[1-2]R_{takt}$; такт 2 — $[0,5-1]R_{takt}$.

Сформированный массив обнаруженных объектов ГУО используют для решения задачи ранжирования со стороны ЗРК СНК [2]. Запуск ЗУР при наличии нескольких необслуживаемых УО в текущий момент времени проводят, исходя из параметра подлетного времени УО до СНК: чем оно меньше, тем приоритетнее по обслуживанию должен быть УО.

В процессе моделирования с шагом периода обзора (задают равным T_{obzor} для заданного сектора движения УО) выполняют перерасчет импульсного объема для каждой РЛС обнаружения. При выходе любого УО за пределы импульсного объема они идентифицируются как новая цель (следующий такт взаимодействия), после чего в конце текущего периода обзора РЛС проводят соответствующее обновление массива обнаруженных объектов и перерасчет задачи распределения ЗУР по УО. При нескольких ГУО в реализации алгоритма циклограммы ЗРК СПВО необходимо предусмотреть ситуацию, когда разные ГУО могут находиться на разных тактах видимости импульсного объема сетцентрической ГУО.

Формирование массивов обнаруженных целей с учетом импульсного объема, сектора обзора для сопровождения всех обнаруженных целей, перестройки НК ядра и барьера СПВО. Формирование массивов обнаруженных целей ГУО с учетом импульсного объема при имитации взаимодействия осуществляют следующим образом.

1. Наступление события «ОВЦ» происходит при выполнении условия преодоления УО дальности обнаружения РЛС НК: $R_l < R_{obn_i}$, $i = \overline{1, N_{snk}}$, $l = \overline{1, N_{uo}}$.

2. Формирование вектора обнаруженных целей ГУО: $F_{obn} = \{F_{obn_l}\}_{l=1}^{N_{uo_obn}}$, $F_{obn_l} = \{0, 1\}$, $l = \overline{1, N_{uo_obn}}$, $N_{uo_obn} \leq N_{uo}$.

3. Задание диапазонов обслуживания каждого ЗРК СПВО:

$$\left[R_{fire\ j\ min}, R_{fire\ j\ max} \right], \quad j = \overline{1, N_{zrk}}, \quad (3)$$

где $N_{zrk} = \sum_{i=1}^{N_{snk}} N_{zrk\ i}$.

Зоны сопровождения и поражения УО принимают круговыми.

4. Для каждого ЗРК на основе (3) модифицируют вектор F_{obn} с формированием собственного вектора видимости объектов ГУО для обслуживания:

$$F_{obn_j} = \{F_{obn_jl}\}_{l=1}^{N_{uo_obn}}, \quad j = \overline{1, N_{zrk}}, \quad l = \overline{1, N_{uo_obn}}. \quad (4)$$

Массивы (4) модифицируются в каждый интервал Δt имитации взаимодействия при наступлении события поражения одного из УО путем удаления этого объекта из общего вектора F_{obn} . На основе (4) формируют циклограмму работы огневых каналов СПВО СНК N_{zrk} по заданным параметрам N_{kan} , T_{kan} , N_{zapas} , T_{shod} .

Вариант алгоритма и программной реализации логико-временной циклограммы работы огневых каналов СПВО. На основе рассмотренных требований и условий к организации логико-временной циклограммы СПВО СНК сформирован алгоритм управления огневymi каналами ЗРК в СПВО СНК, реализующий воздействие на ГУО при ее движении к ядру СНК на различных рубежах конфликта [8, 10].

Начальные данные алгоритма циклограммы задают следующими параметрами:

- общее число ЗРК в СПВО СНК N_{zrk} ;
- время перезарядки каналов ЗРК $T_{kan} = \{T_{kan_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- интервал схода ЗУР с ЗРК $T_{shod} = \{T_{shod_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- число каналов каждого ЗРК $N_{kan} = \{N_{kan_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- число каналов РЛС (одновременно сопровождаемых ЗУР) $N_{rls} = \{N_{rls_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- боезапас ЗРК по ЗУР $N_{zapas} = \{N_{zapas_i}\}_{i=1}^{N_{zrk}}$;
- число ЗУР, выпускаемых по одной УО, N_{zur_count} ;
- вероятность поражения УО со стороны ЗУР p_{zur} ;
- дискретный интервал моделирования Δt .

В одном из вариантов формирования циклограммы ГУО задают фиксированным числом объектов, для которых случайным образом устанавливают подлетное время в заданном интервале. Начальные данные:

- число ГУО N_{guo} ;
- число УО в ГУО N_{uo} ;
- интервал генерации случайного времени до взаимодействия ЗУР с УО: диапазон $t_{uo} \in [t_{uo}^{\min}; t_{uo}^{\max}]$.

Массивы данных:

– основной трехмерный массив данных — время до обслуживания объекта ГУО, задается случайным образом; если $Z_{r_{ijk}} = 0$, то данный объект не обслуживается:

$$\mathbf{Z}_{zr} = \{Z_{zr_{ji_1i_2}}\}, \quad j = \overline{1, N_{zur_count}}, \quad i_1 = \overline{1, N_{uo}}, \quad i_2 = \overline{1, N_{guo}};$$

– вспомогательный трехмерный массив данных — матрица ЦР со следующими значениями элементов: «0» — объект не обслуживается; «k» — объект обслуживается k-м ЗРК, $k = \overline{1, N_{zrk}}$; «NaN» — объект поражен:

$$\mathbf{F}_{zr} = \{Z_{r_{ji_1i_2}}\}, \quad j = \overline{1, N_{zur_count}}, \quad i_1 = \overline{1, N_{uo}}, \quad i_2 = \overline{1, N_{guo}};$$

– вектор времени перезарядки всех каналов $\mathbf{T}_{kan_all} = \{T_{kan_all_i}\}_{i=1}^{\bar{N}_{kan}}$;

$$\bar{N}_{kan} = \sum_{j=1}^{N_{zrk}} N_{kan_j};$$

– флаг-вектор нагрузки на ЗРК $\mathbf{Z}_{nagr} = \{Z_{nagr_i}\}_{i=1}^{\bar{N}_{kan}}$; $\bar{N}_{kan} = \sum_{j=1}^{N_{zrk}} N_{kan_j}$;

– диапазон каналов каждого ЗРК ($[D_{1i}; D_{2i}]$ — диапазон номеров, относящийся к последовательности расположения канала N_{kan_i} , $i = \overline{1, N_{zrk}}$, в векторе \mathbf{N}_{kan}):

$$\mathbf{D}_{kan} = \{D_{kan_ij}\}_{i=1}^{N_{zrk}}; \quad D_{kan_i1} = D_{1i}; \quad D_{kan_i2} = D_{2i};$$

– вектор текущей свободности каналов ЗРК, как «шаблон», накладываемый на переменную \mathbf{Z}_{nagr} , чтобы не возникало ситуации, что одни и те же каналы ЗРК вели запуск ЗУР сразу при освобождении;

– массивы времени для \mathbf{T}_{shod} и \mathbf{T}_{kan_all} .

Алгоритм циклограммы строят, как временной цикл по Δt при $t \in [0, t_u]$. Далее рассмотрены основные условия для последовательности работы алгоритма.

1. В начале каждого цикла выполняют операции уменьшения времени в матрице \mathbf{Z}_{zr} на интервал Δt , для каждого ЗРК уменьшается время перезарядки каналов согласно интервалу моделирования.

2. Для каждого ЗРК в диапазоне каналов проверяют все необходимые условия по всем объектам ГУО ($j = \overline{1, N_{zur_count}}, i_1 = \overline{1, N_{uo}}, i_2 = \overline{1, N_{guo}}$): обнуляются отрицательные значения в матрице \mathbf{Z}_{zr} ; определяются минимальное значение и его номер из вектора ЗУР для текущего УО. Далее проверяют условия, что есть нулевое время и запущены все ЗУР, т. е. УО необходимо обслужить. В этом случае запускают процедуру генерации вероятно-

сти поражения, которая сравнивается с заданной. Если условие поражения выполняется, то все ЗУР, запущенные по данному УО, вычитают из числа имеющихся в ЗРК, и ставится признак того, что этот УО больше не существует. Если УО не поражен достигшей ЗУР, то удаляется время для рассматриваемой ЗУР, но не сама ЗУР, с временным сохранением номера ЗРК, и если все ЗУР провзаимодействовали с текущим УО, но не уничтожили его, то УО (и каналы для него) освобождается для повторного запуска ЗУР.

3. Выполняют реализацию работы с каналами ЗРК в форме проверки условий:

- признак свободности ЗРК для схода ЗУР;
- число выпущенных ЗУР для ЗРК должно быть меньше числа каналов сопровождения РЛС;

- ЗРК еще имеет боезапас по ЗУР;
- ЗРК в принципе может запустить ЗУР.

Если все необходимые условия для пуска ЗУР выполняются, то реализуют следующие действия:

- определяется номер канала ЗРК, который запускает ЗУР;
- если такой канал ЗРК найден, то генерируется время для обслуживания соответствующего УО по диапазону $t_{uo} \in [t_{uo}^{\min}; t_{uo}^{\max}]$, далее формируется признак обслуживаемости выбранного УО еще одной ЗУР из k -го ЗРК, а затем проводится пуск ЗУР из выбранного канала;
- тайминг канала ЗРК и самого ЗРК возвращается к исходному;
- подсчитывается число ЗУР, запущенных с ЗРК, а также корректируется боезапас ЗРК.

Следовательно, для корректной работы алгоритма логико-временной циклограммы для находящихся в движении реальных УО необходимо как можно точнее определять подлетное время ЗУР до объекта ГУО при формировании массива Z_{zr} . В этом случае также требуется учитывать фактор сближения ЗУР с объектом ГУО параметром скорости ЗУР v_{zur} .

Далее приведены варианты формирования циклограммы функционирования СПВО с различным составом активных объектов.

Вариант циклограммы для одного ЗРК. Рассмотрен пример расчета циклограммы функционирования одного ЗРК с запуском одной ЗУР по каждому объекту ГУО. Исходные данные по воздействию ЗРК НК по УО:

```
n_guo = 1; % Число ГУО
n_uo_guo = 50; % Число УО в ГУО
n_zur_count = 1; % Число ЗУР, выпускаемых по одному УО
t_kanal = 10; % Время перезарядки каналов ЗРК
```

```
n_kanal = 10; % Число каналов ЗРК
n_rls = 10; % Число каналов РЛС
ta = 5; % Интервал схода ЗУР с ЗРК
n_zrk_zapas = 50; % Боезапас ЗРК по ЗУР
t_uo = [120, 150]; % Интервал генерации случайного времени
p_zur = 0.7; % Вероятность поражения УО со стороны ЗУР
```

Циклограмма работы ЗРК приведена на рис. 1: координата «х» — время моделирования воздействия ЗРК на УО (\tilde{t}), координата «у» — численности N обеих систем: показаны две дискретные кривые: верхняя — число непораженных УО, нижняя — число запущенных ЗУР.

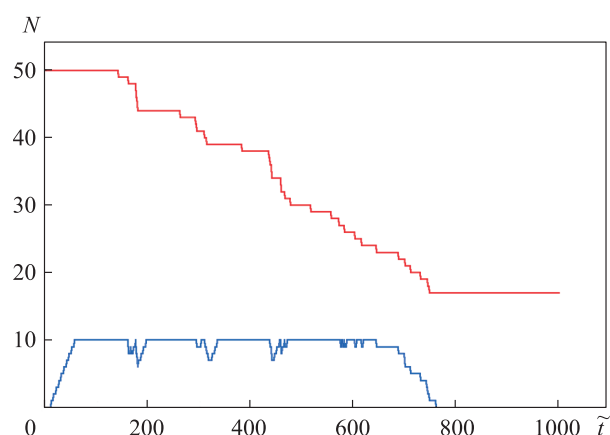


Рис. 1. Циклограмма для одного ЗРК

На начальном этапе циклограммы ЗУР запускают с ЗРК по одной через заданные интервалы времени по наиболее опасному УО на момент пуска, и через случайно сгенерированное время встречи происходит воздействие ЗУР на УО с заданной вероятностью поражения, после чего канал ЗРК освобождается и ждет команды на пуск ЗУР по следующему УО. На финальном отрезке взаимодействия показано, что заканчивается боезапас по ЗУР, поэтому число УО не изменяется.

Далее рассмотрены варианты работы алгоритма циклограммы для базового варианта при $p_{zur} = 0,7$ (см. рис. 1):

- 1) при изменении числа каналов РЛС (число одновременно сопровождаемых ЗУР) с 10 до 20 формируется циклограмма (рис. 2, а);
- 2) при изменении общего числа каналов ЗРК до 20 (рис. 2, б) по сравнению с п. 1 заметно, что число одновременно запущенных ЗУР не увеличивается и остается в рамках ограничений по числу каналов РЛС;
- 3) при изменении интервала схода ЗУР с 4 на 2 с циклограмма принимает вид, показанный на рис. 2, в, в результате чего начальный отрезок из-

менения численности ЗУР становится более крутым, а интервалы повторных пусков уменьшаются;

4) если рассмотреть изменение боезапаса ЗРК до 100 ЗУР, то ЗУР достаточно на весь цикл обслуживания объектов (рис. 2, *г*).

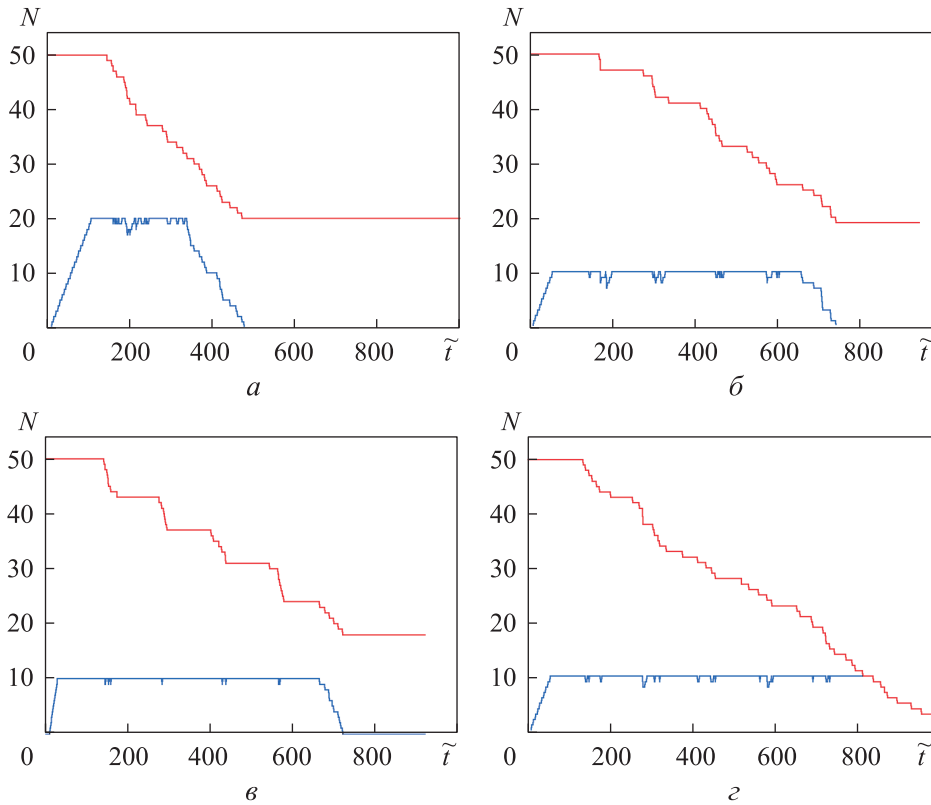


Рис. 2. Варианты циклограммы для одного ЗРК:

a — при $n_{rls} = 20$; *б* — при $n_{kanal} = 20$; *в* — при $t_a = 2$; *г* — при $n_{zrk_zapas} = 100$

Вариант циклограммы для двух ЗУР. Рассмотрен пример расчета циклограммы функционирования одного ЗРК с запуском двух ЗУР по каждому объекту ГУО. Вариант циклограммы представлен на рис. 3 для начальных данных: $n_{zur_count} = 2$; $n_{zrk_zapas} = 50$; $p_{zur} = 0.7$. В этом случае эффективность по тому же числу объектов дает немного худший результат по сравнению с одной ЗУР по одному УО (см. рис. 1), вследствие чего необходимо увеличивать боезапас ЗРК. Рассмотрены варианты алгоритма для базового варианта (см. рис. 3):

- 1) $n_{rls} = 20$; $n_{kanal} = 20$; $t_a = 5$ (рис. 4, *a*);
- 2) $n_{rls} = 30$; $n_{kanal} = 30$; $t_a = 2$ (рис. 4, *б*);
- 3) $n_{rls} = 20$; $n_{kanal} = 20$; $n_{zrk_zapas} = 100$; $p_{zur} = 0.7$ (рис. 4, *в*);
- 4) $n_{rls} = 30$; $n_{kanal} = 30$; $n_{zrk_zapas} = 100$; $p_{zur} = 0.5$ (рис. 4, *г*).

Для вариантов на рис. 4, *а* и *б* в этом случае увеличение канальности ЗРК практически не влияет на итоговый результат воздействия на объекты ГУО по числу пораженных объектов. Если увеличить число каналов одного ЗРК при существующем времени схода ЗУР до 30 каналов, то ЗРК не успевает их все задействовать (рис. 4, *г*), следовательно, более эффективно применение двух ЗРК, но с меньшей канальностью.

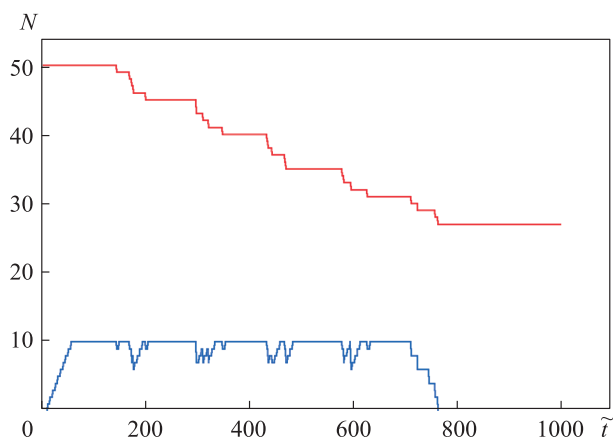


Рис. 3. Циклограмма для одного ЗРК (пуск двух ЗУР по УО)

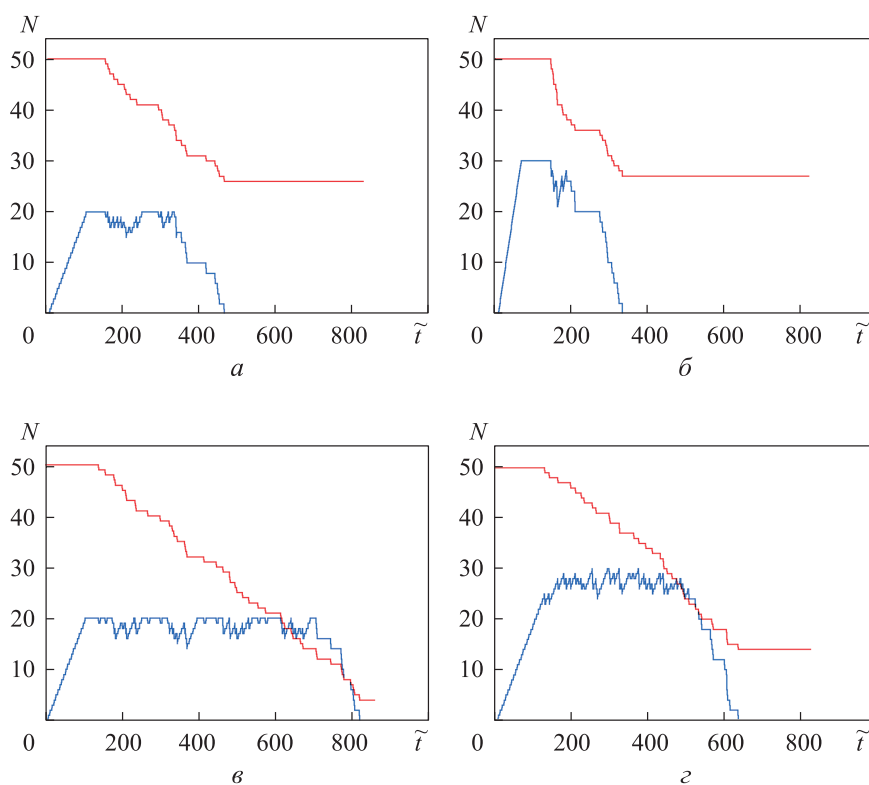


Рис. 4. Варианты циклограммы для одного ЗРК (пуск двух ЗУР по одному УО)

Вариант циклограммы для двух ЗРК. Рассмотрен пример расчета циклограммы функционирования двух ЗРК с запуском двух ЗУР по каждому объекту ГУО. Вариант циклограммы представлен на рис. 5 для следующих начальных данных:

```
n_zur_count = 2; % Число ЗУР, выпускаемых по одному УО
t_kanal = [10, 10]; % Время перезарядки каналов ЗРК
n_kanal = [10, 10]; % Число каналов ЗРК
n_rls = [10, 10]; % Число каналов РЛС
ta = [4, 4]; % Интервал схода ЗУР с ЗРК
n_zrk_zapas = [100, 100]; % Боезапас ЗРК по ЗУР
t_uo = [120, 150];
p_zur = 0.7; % Вероятность поражения УО со стороны ЗУР
```

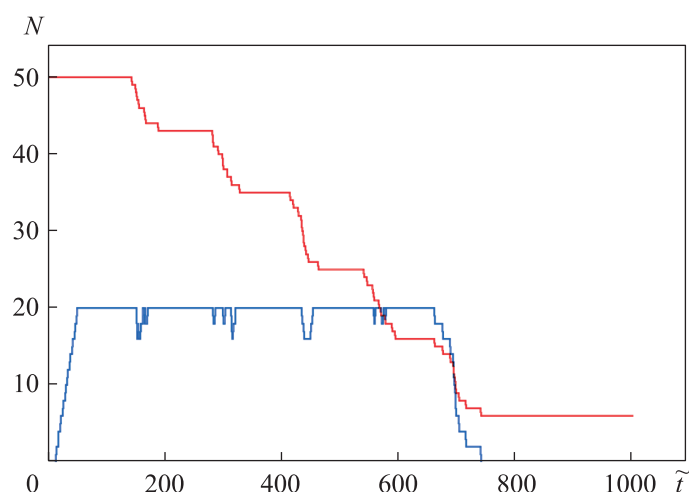


Рис. 5. Циклограмма для двух ЗРК (пуск двух ЗУР по одному УО)

Рассмотрена работа алгоритма в следующих вариантах (модификация относительно циклограммы на рис. 5):

- 1) один из двух ЗРК имеет $n_{rls} = 20$ (рис. 6, а);
- 2) оба ЗРК имеют $n_{rls} = 20$ (рис. 6, б);
- 3) $n_{kanal} = [15, 15]$; $n_{rls} = [15, 15]$; $p_{zur} = 0.5$ (рис. 6, в);
- 4) вариант п. 3 для $t_a = [2, 2]$ и $n_{zrk_zapas} = [75, 75]$ (рис. 6, г).

В этом случае при увеличении боезапаса эффективность работы двух ЗРК с канальностью 15 (см. рис. 6, в) выше по сравнению с использованием одного ЗРК с канальностью 30 (см. рис. 6, г) при том же суммарном боезапасе. Таким образом, показано, что реализованный алгоритм является универсальным, поскольку позволяет формировать логико-временную циклограмму для произвольных конфигураций СПВО СНК.

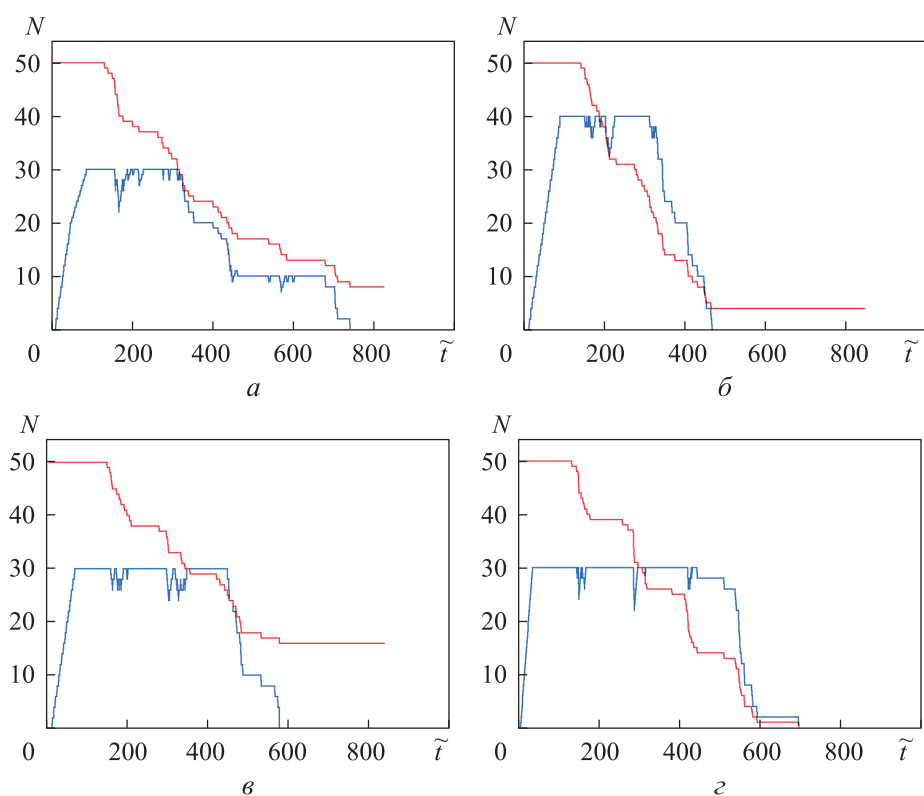


Рис. 6. Варианты циклограммы для двух ЗРК (пуск двух ЗУР по одному УО)

Циклограмма для трех ЗРК согласно следующим исходным данным конфликта приведена на рис. 7:

```
n_uo_guo=80; % Число УО в ГУО
n_zur_count = 2; % Число ЗУР, выпускаемых по одному УО
t_kanal = [10, 10, 12]; % Время перезарядки каналов ЗРК
n_kanal = [16, 16, 8]; % Число каналов ЗРК
n_rls = [10, 10, 10]; % Число каналов РЛС
ta = [4, 4, 6]; % Интервал схода ЗУР с ЗРК
n_zrk_zapas = [50, 50, 30]; % Боезапас ЗРК по ЗУР
tk = zeros(1,sum(n_kanal)); % Вектор времен перезарядки каналов
t_uo = [120, 150]; % Интервал генерации случайного времени
p_zur = 0.6; % Вероятность поражения УО со стороны ЗУР
```

При встраивании этого алгоритма циклограммы в общую программу имитации конфликтного взаимодействия систем матрица времени обслуживания Z_{zr} объектов ГУО со стороны ЗУР будет формироваться не случайно, а по массиву обнаруженных объектов ГУО в соответствии с процедурой перестройки матрицы обнаружения для СПВО СНК, исходя из движения объектов ГУО в направлении точки полетного задания.

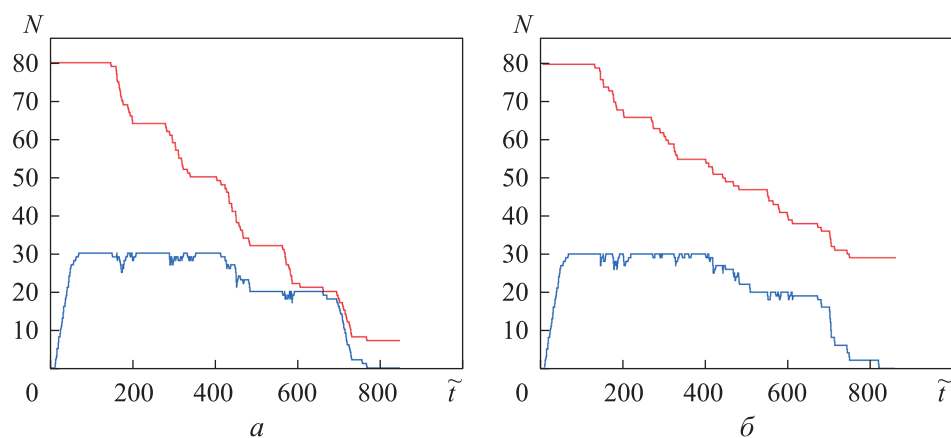


Рис. 7. Циклограммы ЗРК для трех ЗРК при пуске одной ЗУР по одному УО (а) и двух ЗУР по одному УО (б)

Алгоритм оценки результатов огневого противодействия корабельных ЗОС налетающим объектам ГУО. Алгоритм оценки противодействия ГУО со стороны ЗРК СПВО СНК формируется в виде последовательности действий, приведенной ниже [7, 8, 11, 12].

1. Проверка наличия признака обнаружения УО хотя бы одним НК. Если условие выполняется, то оценивается возможность обслуживания обнаруженного УО всеми ЗРК на тех НК, которые обнаружили этот УО. На текущий момент времени проводится оценка готовности каждого целевого канала ЗРК СНК кораблей противника к получению целеуказания и осуществлению пуска ЗУР по обнаруженным объектам ГУО. Если указанное условие не выполняется, то осуществляется переход к п. 3.

2. Если хотя бы один из рассматриваемых ЗРК НК готов к запуску ЗУР, то решается задача ранжирования всех необслуживаемых обнаруженных УО по опасности на основе фактора подлетного времени до данного НК. Далее начинается процесс моделирования полета ЗУР к выбранному УО: оценивается примерное подлетное время ЗУР до УО с учетом взаимного расположения объектов, вводимого в соответствующий массив времени обслуживания УО, который является признаком обслуживаемости этого УО (если УО не обслуживается, то элемент массива будет нулевым). На следующей временной отсечке моделирования $t + \Delta t$ этот элемент массива будет уменьшен на Δt , и при достижении нулевого значения разыгрывается случайная величина поражения УО со стороны ЗУР.

3. Если все УО поражены со стороны СПВО СНК или оставшиеся УО вышли из зон обслуживания всех ЗРК СНК, то вырабатывается признак окончания взаимодействия на данном рубеже.

Оценку результатов противодействия ЗРК СПВО и ГУО проводят на основе задания условий формирования вероятностей поражения УО со стороны ЗУР в зависимости от варианта сетецентрического строя УО и тактико-технических характеристик ЗРК.

Учет стратегий стрельбы. В зависимости от текущей обстановки налета ГУО могут быть реализованы шесть базовых стратегий действия ЗРК СНК [13, 14]:

- 1) пуск одной ЗУР — наблюдение результатов;
- 2) пуск двух ЗУР — наблюдение результатов;
- 3) пуск трех ЗУР — наблюдение результатов;
- 4) пуск одной ЗУР — наблюдение результатов — пуск одной ЗУР;
- 5) пуск одной ЗУР — наблюдение результатов — пуск двух ЗУР;
- 6) пуск двух ЗУР — наблюдение результатов — пуск двух ЗУР.

Выбор стратегии определяют характером угрозы со стороны ГУО. Обычно при высоких скоростях УО реализуются стратегии 2 или 3 (при повышенной угрозе). При наличии импульсного объема ГУО, имеющего размах по фронту, для ЗРК реализуется стратегия 6.

Алгоритм учета стратегии стрельбы при наличии сетецентрического управления строем УО реализован так, чтобы было можно комбинировать различные стратегии в ходе воздействия ЗУР на УО исходя из числа тактов взаимодействия, определение которых связано с дальностью применения конкретных ЗРК. Например, СПВО барьера СНК в ходе действий может использовать до четырех тактов воздействия на ГУО. На каждом такте рубежа взаимодействия (АГ, барьер, ядро) реализуется одна из трех первых стратегий. В этом случае для СНК применяют вектор, характеризующий тактику применения ЗРК для каждого такта в отдельности, которая устанавливается автоматически в зависимости от дальности до УО, их расположения между собой в импульсном объеме, скорости полета и др.

На каждом рубеже взаимодействия в алгоритме используют параметр числа ЗУР, направляемых на один объект ГУО N_{zur_count} , принимающий значения от 1 до максимального числа ЗУР, которое может обслуживать один УО. Число выпускаемых ЗУР с каждого ЗРК ограничено собственным боезапасом ЗРК N_{zrk} .

В случае $N_{zur_count} > 1$ реализуется следующая тактика действий СПВО: из группы обнаруженных целей выбирают наиболее важную для обслуживания и по ней запускают максимально доступное на текущий момент число ЗУР, но не превышающее значения N_{zur_count} . Если в текущий момент времени по цели запущено меньшее число ЗУР, то при осво-

бождении одного из каналов ЗРК СНК по ней осуществляют дозапуск остальных числа ЗУР, и только после этого СПВО переключается на следующую цель. Событие поражения УО проверяют для каждой ЗУР в момент подлета. Если цель поражена, то ее исключают из общего вектора обнаруженных объектов, но ЗУР, которые в этот момент еще находятся в полете до данной цели, не перенаправляются на другие цели и полагаются потерянными, при этом целевые каналы, связанные с такими ЗУР, в момент поражения УО считаются освобожденными.

При оценке показателей эффективности обслуживания УО может приниматься допущение о постоянстве вероятности поражения цели в любой точке зоны поражения: параметр p_{zur} . Модификация этой вероятности может быть осуществлена на основе учета дополнительных факторов, в частности наличия системы радиотехнической защиты со стороны УО, которая при подавлении наведения ЗУР может значительно снижать данную вероятность вплоть до двукратного ее уменьшения.

Пример циклограммы для трех ЗУР, запускаемых по каждому объекту ГУО при $N_{usp} = 50$, приведен на рис. 8 для боезапаса одного ЗРК числом 90 и 150 ЗУР с канальностью 20 и вероятностью поражения $p = 0,7$. Интервал моделирования 1000 с, подлетное время до цели (в статическом ее варианте) формируется случайным образом на интервале $[120, 150]$ с, что приводит к 6–7 тактам воздействия СПВО на ГУО.

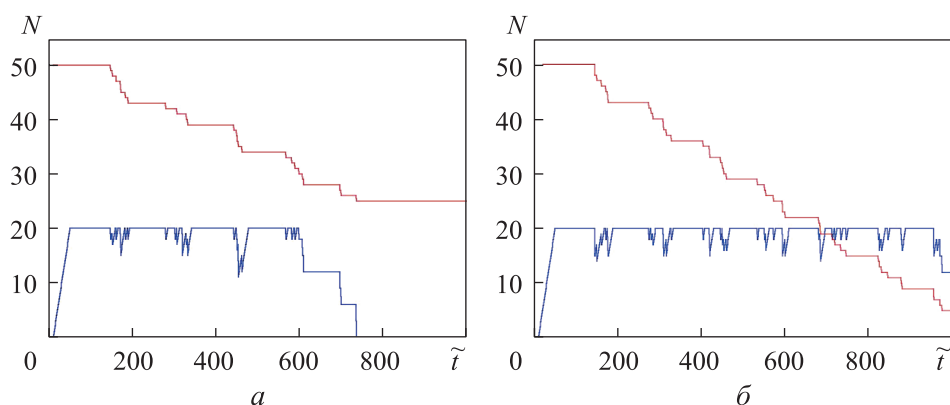


Рис. 8. Пример циклограммы для трех ЗУР, запускаемых по каждому объекту ГУО при боезапасе ЗРК 90 (а) и 150 (б) ЗУР

Заключение. При встраивании алгоритма логико-временной циклограммы в общую программу имитации конфликтного взаимодействия систем матрица времени обслуживания Z_{zr} объектов ГУО со стороны ЗУР будет формироваться не случайно, а по массиву обнаруженных объектов

согласно процедуре перестройки матрицы обнаружения для СПВО СНК исходя из движения объектов ГУО в направлении СНК. Коррекция указанного времени может проводиться по матрице коэффициентов коррекции подлетного времени активных объектов СПВО до каждого объекта ГУО. Этапы алгоритма приведены ниже.

Этап 1. На текущей временной отсечке моделирования рассчитывают дальности от каждого объекта ГУО до каждого НК в СНК, исходя из заданной конфигурации СПВО СНК для каждого рубежа конфликта.

Этап 2. Проверка условия обнаружения, согласно заданной тактике обнаружения для СПВО СНК. При выполнении этого условия в векторе обнаружения для объекта ГУО ставится признак обнаружения с перестроением матрицы обнаружения.

Этап 3. Проверка условия готовности всех целевых каналов ЗРК для обслуживания обнаруженных объектов ГУО (возможность обслуживания, свободность каналов, условия по перезарядке и пуску ЗУР).

Этап 4. Для каждого обнаруженного объекта ГУО в текущий момент времени для всех ЗРК, для которых выполнены все необходимые условия, согласно п. 3, расчет времени встречи ЗУР (если она запущена в этот момент) с объектами ГУО и его коррекция.

Этап 5. Назначение свободному ЗРК обнаруженного объекта ГУО с наименьшим временем обслуживания и осуществление пуска ЗУР по нему. Задают такие параметры, как флаг занятости канала на перезарядку; флаг задержки следующего пуска ЗРК на интервал между пусками ЗУР; флаг ЦР по обслуживанию данным каналом ЗРК объекта ГУО.

Этап 6. Проверка условия: нет ли объектов ГУО, уже обслуживаемых ЗУР в данный момент времени, которые имеют нулевое время встречи и по которым необходимо провести оценку поражения со стороны ЗУР, после чего объект либо будет уничтожен и исключен из общей матрицы объектов ГУО, либо продолжит движение и станет доступным для запуска по нему ЗУР.

Следовательно, предложенный вариант имитационной реализации логико-временной циклограммы работы огневых каналов СПВО показал эффективность на основе рассмотренных примеров формирования циклограммы для произвольного состава СПВО. Разработанный алгоритм успешно применяют в системе оптимизационно-имитационной модели конфликтного взаимодействия СПВО и ГУО [2, 9, 15].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронов Е.М., Латыпова П.А., Репкин А.Л. и др. Формирование оптимального управления ресурсами групп объектов в задаче конфликтного противодействия авиационно-ракетной группировки и системы ПВО. *УМАС-2016. IX Мультиконф. по проблемам управления*, 2016, с. 453–463.
- [2] Воронов Е.М., Микрин Е.А., Обносов Б.В., ред. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. *Современные подходы и методы*. Т. 2. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [3] Воронов Е.М., Ефремов В.А., Репкин А.Л. и др. Функциональные свойства конфликтно-оптимального прогноза в системе оптимизационно-имитационного моделирования взаимодействия группировок управляемых средств поражения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2013, № 3 (92), с. 3–27.
- [4] Томашевский В.Т., ред. Исследовательское имитационное моделирование в решении проблем развития системы морских вооружений и ее подводной составляющей. СПб., Наука, 2008.
- [5] Ефремов В.А., Сычев С.И., Хамаев Н.В. и др. Групповое построение управляемых средств поражения при залповом применении. *Радиоэлектронные технологии*, 2018, № 3, с. 66–69.
- [6] Обносов Б.В. Основы взаимодействия управляемых авиационных средств поражения с системами бортового оборудования авиационных комплексов и внешних средств разведки и целеуказания. Роль сетцентрических систем ведения боевых действий. В кн.: *Россия: Союз технологий*. М., Лига содействия оборонным предприятиям, 2013.
- [7] Каменский И.Е., Советов В.А., Субботин А.В. и др. Особенности общей постановки задачи целераспределения в системе противовоздушной обороны. *Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны*, 2018, № 2, с. 115–119.
- [8] Дворников К.А., Илларионов А.В. Применение моделирующих комплексов для оценки эффективности контура ПВО корабля. *Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования*, 2013, № 2, с. 10–21.
- [9] Воронов Е.М., Репкин А.Л., Хромов Ф.М. и др. Модель конфликтного взаимодействия группировок с сетцентрическим управлением строем управляемых объектов. *Автоматизация. Современные технологии*, 2021, т. 75, № 2, с. 82–91.
- [10] Кругликов С.В. Методика решения задачи многофакторного целераспределения в автоматизированной системе управления. *Доклады БГУИР*, 2013, № 5, с. 93–99.
- [11] Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. М., Радио и связь, 2004.
- [12] Балыко Ю.П., ред. Методологические основы создания систем и комплексов авиационного ракетного вооружения. М., Дашков и Ко., 2012.

[13] Рубинович Е.Я., ред. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М., Эдиториал УРСС, Ленанд, 2016.

[14] Неупокоев Ф.К. Противовоздушный бой. М., Воениздат, 1989.

[15] Воронов Е.М., Куся А.М., Репкин А.Л. и др. Комплексный алгоритм обнаружения, идентификации соединения надводных кораблей и целераспределения группы управляемых средств поражения с сетевым управлением. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 4 (133), с. 75–98.

DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-75-98>

Воронов Евгений Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Репкин Алексей Леонидович — канд. техн. наук, ведущий инженер НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Хромов Филипп Михайлович — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Тимофеев Денис Андреевич — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Гераськин Алексей Юрьевич — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Проблема ссылаться на эту статью следующим образом:

Воронов Е.М., Репкин А.Л., Хромов Ф.М. и др. Математическая модель для имитационной реализации функционирования системы противовоздушной обороны соединения надводных кораблей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 1 (138), с. 62–84.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-1-62-84>

**MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATION IMPLEMENTATION
OF FUNCTIONING OF AIR DEFENSE SYSTEM
OF A NAVAL SURFACE FORCE**

E.M. Voronov

voronov@bmstu.ru

A.L. Repkin

alexr_bmstu@mail.ru

Ph.M. Khromov

filooloog@mail.ru

D.A. Timofeev

tim.disa001@mail.ru

A.Yu. Geraskin

aleks.geraskin@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the stages of the logical-time cyclogram of detection and maintenance of groups of controlled objects by means of the air defense system of a naval surface force. An algorithm for forming arrays of detected objects is implemented, taking into account the impulse volume, the coverage sector to accompany all detected objects and other configuration factors, considering probabilistic estimates of the detection of controlled objects. A mathematical model of the functioning of the naval surface force air defense system has been created, taking into account various parameters of active means affecting the groups of controlled objects, as well as taking into account firing strategies in the presence of network-centric control of the order of controlled objects. An algorithm for evaluating the results of fire counteraction of a network-centric group of controlled objects on the part of the air defense system of a naval surface force has been considered. A variant of the simulation implementation of the logical-time cyclogram of the operation of air defense system fire channels has been developed, and examples of the implementation of a logical-time cyclogram for an arbitrary composition of the air defense system are given, taking into account the strategic actions of active means of a naval surface force. Additional conditions for embedding the developed version of the algorithm of the air defense system logical-time cyclogram into the system for simulating the conflict interaction of systems are listed

Keywords

Naval surface force, group of controlled objects, detection, impulse volume, fire counteraction, channeling, logical-time cyclogram

Received 01.10.2021

Accepted 09.11.2021

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Voronov E.M., Latypova P.A., Repkin A.L., et al. [Formation of optimal management resource for groups of objects in the problem of conflict counteraction between an air-missile group and an air defense system]. *UMAS-2016. IX Mul'tikonf. po problemam upravleniya* [UMAS-2016. IX Multiconf. Control Problems], 2016, pp. 453–463 (in Russ.).
- [2] Voronov E.M., Mikrin E.A., Obnosov B.V., eds. *Stabilizatsiya, navedenie, gruppovoe upravlenie i sistemnoe modelirovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Sovremennye podkhody i metody. T. 2* [Stabilization, guidance, group control and system modeling of unmanned aerial vehicles. Vol. 2]. Moscow, BMSTU Publ., 2018.
- [3] Voronov E.M., Efremov V.A., Repkin A.L., et al. Functional properties of conflict-optimum prediction in the system of optimization-imitation modeling of interaction between group of controlled means of destruction. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2013, no. 3 (92), pp. 3–27 (in Russ.).

- [4] Tomashevskiy V.T., ed. Issledovatel'skoe imitatsionnoe modelirovanie v reshenii problem razvitiya sistemy morskikh vooruzheniy i ee podvodnoy sostavlyayushchey [Research simulation modeling in solving problems of improving naval weapons system and its underwater part]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2008.
- [5] Efremov V.A., Sychev S.I., Khamaev N.V., et al. Group structure of controlled weapons for salvo use. *Radioelektronnye tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 66–69 (in Russ.).
- [6] Obnosov B.V. Osnovy vzaimodeystviya upravlyaemykh aviatsionnykh sredstv porazheniya s sistemami bortovogo oborudovaniya aviatsionnykh kompleksov i vneshnikh sredstv razvedki i tseleukazaniya. Rol' setentsentricheskikh sistem vedeniya boevykh deystviy. V kn.: Rossiya: Soyuz tekhnologiy [Fundamentals of interaction between guided aircraft weapons and onboard equipment systems of aircraft complexes and external reconnaissance and target designation equipment. The role of network-centric combat systems. In: Russia: Technology Union]. Moscow, Liga sodeystviya oboronnyim predpriyatiyam Publ., 2013.
- [7] Kamenskiy I.E., Sovetov V.A., Subbotin A.V., et al. On special aspects of the general statement of the target distribution problem in an air defense system. *Vestnik Yaroslavskogo vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoy oborony*, 2018, no. 2, pp. 115–119 (in Russ.).
- [8] Dvornikov K.A., Illarionov A.V. Application of modeling complexes to assess the effectiveness of the ship's air defense scheme. *Problemy razvitiya korabel'nogo vooruzheniya i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniya*, 2013, no. 2, pp. 10–21 (in Russ.).
- [9] Voronov E.M., Repkin A.L., Khromov F.M., et al. Model of conflict interaction of groups with network-centric control formation of controlled objects. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2021, vol. 75, no. 2, pp. 82–91 (in Russ.).
- [10] Kruglikov S.V. Technique of solving multifactorial target allocation in automated control systems. *Doklady BGUIR*, 2013, no. 5, pp. 93–99 (in Russ.).
- [11] Semenov S.S., Kharchev V.N., Ioffin A.I. Otsenka tekhnicheskogo urovnya obraztsov vooruzheniya i voennoy tekhniki [Assessment of the technical level of weapons and military equipment samples]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2004.
- [12] Balyko Yu.P., ed. Metodologicheskie osnovy sozdaniya sistem i kompleksov aviatsionnogo raketnogo vooruzheniya [Methodological foundations for developing systems and complexes of aviation missile weapons]. Moscow, Dashkov and Co Publ., 2012.
- [13] Rubinovich E.Ya., ed. Metody prinyatiya resheniy v zadachakh otsenki kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Decision-making methods in problems of assessing quality and technical level of complex technical systems]. Moscow, Editorial URSS Publ., Lenand Publ., 2016.
- [14] Neupokoev F.K. Protivovozdushnyy boy [Air defense battle]. Moscow, Voenizdat Publ., 1989.
- [15] Voronov E.M., Kuslya A.M., Repkin A.L., et al. A comprehensive algorithm for detection, identification of naval surface forces and target allocation of network-centric controlled weapons. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 4 (133), pp. 75–98 (in Russ.).
DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-75-98>

Voronov E.M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Repkin A.L. — Cand. Sc. (Eng.), Lead Engineer, Scientific and Educational Complex of Computer Science and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Khromov Ph.M. — Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Timofeev D.A. — Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Geraskin A.Yu. — Student, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Voronov E.M., Repkin A.L., Khromov Ph.M., et al. Mathematical model for simulation implementation of functioning of air defense system of a naval surface force. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 1 (138), pp. 62–84 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-1-62-84>