УДК 519.8

Методика построения графоаналитической модели позиционной динамики боя на основе вероятностно-временной синхронизации действий элементов боевых порядков воинских формирований

Бойко А. А., Иванников К. С., Кузнецов Д. А.

Постановка задачи: *сегодня решение задачи оперативной количественной оценки текущего состояния и прогнозирования исхода современного боя разнородных воинских формирований не в полной мере удовлетворяет требованиям практики. Это связано с ограничениями методов моделирования боевых действий. Известные аналитические методы не позволяют детально анализировать траектории движения элементов боевых порядков. Имитационный метод не позволяет решать оптимизационные задачи в рамках одной реализации сценария боя и требует для получения статистически значимого результата крайне ресурсоемкого повторения расчетов одного сценария даже без решения частных оптимизационных задач. Настоящая работа продолжает цикл публикаций, в которых рассматривается метод боевых эпизодов, парирующий указанные недостатки. Он предполагает разбиение боя на последовательность боевых эпизодов, в каждом из которых производится расчет соотношения боевых потенциалов сторон. Аналитическая модель боя в этом методе учитывает боевые циклы сторон и оптимизацию целераспределения элементов боевых порядков с детализацией до отдельного солдата, устройства и информационно-технического средства при их статичном размещении на поле боя. Первым этапом метода боевых эпизодов является формирование графа позиционной динамики боя на основе заданных альтернативных разноранговых траекторий движения элементов боевых порядков сторон с изменяющейся скоростью. Методики формирования такого графа в известной литературе отсутствуют.* ***Цель работы****: создание методики, позволяющей формировать граф позиционной динамики боя.* ***Используемые методы****: решение задачи основано на оригинальной комбинации метода синхронизации параллельных процессов теории распределенных алгоритмов, который применяется при организации обмена сообщениями в цифровых телекоммуникационных системах, и метода тестирования сложных технических систем, который применяется NASA для оценки надежности авионики.* ***Новизна*** *предложенного решения состоит в построении графоаналитической модели позиционной динамики боя, в которой боевые эпизоды синхронизированы по вероятностным и временным параметрам движения отдельных элементов боевых порядков сторон на поле боя.* ***Результат****: методика обеспечивает возможность перехода от анализа множества разноранговых последовательностей боевых эпизодов каждого элемента к упорядоченному по вероятности реализации множеству единых для всех элементов последовательностей боевых эпизодов. Переход осуществляется с применением вычисляемого параметра масштабирования боя, определяющего степень детализации траектории движения элемента и диапазон изменения границ синхронизируемых боевых эпизодов без их потери.* ***Практическая значимость****: решение целесообразно использовать при создании перспективных систем поддержки принятия решения.*

Ключевые слова: *моделирование боевых действий, метод боевых эпизодов, элемент боевого порядка, синхронизация, параллельные процессы, система поддержки принятия решения.*

Библиографическая ссылка на статью:
Бойко А. А., Иванников К. С., Кузнецов Д. А. Методика построения графоаналитической модели позиционной динамики боя на основе вероятностно-временной синхронизации действий элементов боевых порядков воинских формирований // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 24-48. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10202.

Reference for citation:
Boyko A. A., Ivannikov K. S., Kuznetsov D. A. Constructing graphoanalytic combat positional dynamics model based on military formations combat orders elements actions probability-temporal synchronization. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 24-48. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10202 (in Russian).

Актуальность

Современный бой – это антагонистический конфликт сложных иерархически упорядоченных организационно-технических систем (ОТС), элементы которых на каждом уровне иерархии представляют собой не менее сложные организационно-технические объекты. Он характеризуется следующими основными аспектами:

1) высоким уровнем структурной динамики ОТС, вызванным перемещением и конфликтно обусловленной деградацией их элементов;
2) высокой маневренностью элементов ОТС;
3) высокими сенсорными возможностями отдельных элементов ОТС и значительной ситуационной осведомленностью в целом;
4) большой дальностью и точностью средств огневого поражения;
5) широкой номенклатурой средств радиационного, химического, биологического, психологического и нелетального воздействия на людей;
6) широкой номенклатурой средств, нарушающих конфиденциальность, целостность и доступность информации в боевых циклах ОТС в целом и внутри их элементов;
7) широкой номенклатурой роботизированных средств, в первую очередь малогабаритных, значительно повышающих устойчивость управления ОТС, дальность применения и живучесть их элементов.

Рациональный учет этих аспектов в процессе выработки решения при планировании боя и управлении подчиненными силами и средствами в бою крайне важен. При этом, очевидно, что в таких условиях органу правления тактическим воинским формированием уровня «батальон-бригада/дивизия» без автоматизированной поддержки принятия решения не обойтись. Однако решение задачи оперативной количественной оценки текущего состояния и прогнозирования исхода современного боя разнородных воинских формирований на сегодняшний день не в полной мере удовлетворяет требованиям практики [1-3]. Это связано со следующими объективно существующими ограничениями базовых методов моделирования [4, 5]:

- **известные аналитические методы** (см., например, работы [6-22]) позволяют достаточно оперативно получать «общее» решение, но не предоставляют возможности для детального анализа траекторий одновременного перемещения множества разнородных элементов боевых порядков противоборствующих сторон;
- **имитационный метод (метод статистических испытаний, метод «Монте-Карло»)** при высокой детализации действий элементов боевых порядков вплоть до отдельного солдата не позволяет решать оптимизационные задачи в рамках одной реализации сценария боя. При этом даже без решения частных оптимизационных задач для получения статистически значимого результата он требует крайне ресурсоемкого многократного повторения расчетов одного сценария боя.

Настоящая работа продолжает цикл публикаций [23-28], в которых рассматривается новый метод моделирования боевых действий, парирующий указанные недостатки известных методов, – **метод боевых эпизодов**. Данный ме-

тод предполагает представление боя в виде последовательности боевых эпизодов, в каждом из которых производится расчет динамики соотношения боевых потенциалов сторон при статичном размещении на поле боя их элементов боевых порядков. В **методе боевых эпизодов** используется аналитическая модель боя, которая согласно классификации, приведенной в [29], относится к **классу операционных структурно-функциональных моделей**. Она учитывает боевые циклы сторон и оптимизацию целераспределения элементов боевых порядков с детализацией до отдельного солдата, устройства и информационно-технического средства.

Первым этапом **метода боевых эпизодов** является формирование графа позиционной динамики боя. В [23, 24] такой граф называется «деревом боя». Этот граф представляет собой совокупность различных альтернативных последовательностей боевых эпизодов. Каждая последовательность боевых эпизодов формируется на основе задаваемых или автоматически генерируемых альтернативных разноранговых траекторий движения элементов боевых порядков сторон, которые имеют остановки с разной продолжительностью и различную скорость на различных участках пути.

Тематика **группового управления подвижными объектами** активно рассматривается с середины прошлого века в рамках **исследования операций**. Результаты работ в этой области на рубеже 80-90-х гг. легли в основу математических моделей первых компьютерных игр жанра «war game» (например, Herzog Zwei, Dune II). По сути в этом жанре каждая новая итерация одной и той же многопользовательской игры или игры пользователя с компьютером является ничем иным, как одним из единичных сценариев в **имитационном методе** моделирования боевых действий. Дальнейшее развитие игр этого жанра позволило создать полноценную «виртуальную реальность». Как следствие, с 2010 года в США и других странах НАТО введен международный стандарт IEEE 1516 [30], регламентирующий вопросы применения аналитических и, в первую очередь, имитационных моделей в военной сфере. При этом стало широко распространяться **мнение**, что с применением имитационных моделей можно обучать «искусственный интеллект» суперкомпьютеров, которые в последствии будут едва ли не самостоятельно вести реальные боевые действия. Тем не менее, человеку, знакомому с теорией статистических испытаний очевидно, что таким способом набирается лишь статистика для боя в конкретных «машинно-обусловленных» исходных данных. Несомненно, в качестве тренажеров такие модели в военной сфере могут быть полезны. Однако в жизни, как известно, «ни один бой не повторяется дважды», и ошибки в принятии решения «интеллектом», обученным имитационным методом, могут быть очень болезненными.

Сегодня зарубежные (например, [31-37]) и отечественные (например, [38-42]) работы в области исследования проблем **группового управления подвижными объектами** ориентированы преимущественно на **синтез** множества синхронизированных во времени и пространстве процессов в сложных ОТС и, в первую очередь, на **синтез оптимальных траекторий** движения для групп автономных роботов. Некоторые из этих работ (например, [31, 35, 42]) посвящены непосредственному исследованию процессов боевого применения сил и

средств в рамках концепции сетецентрических войн. Однако вопросам **анализа траекторий**, параметры которых уже известны и которые являются асинхронными в силу своей природы, с целью их последующей синхронизации в рамках единого суперпроцесса, как того требует **метод боевых эпизодов**, в известных работах по тематике группового управления подвижными объектами внимание не уделялось. Этот факт стал для авторов побудительным мотивом к проведению настоящих исследований.

Постановка задачи

Дано:

1. Λ – пространство боя, которое образуется множеством кубических элементарных объемов со стороной, равной Δ (далее – элемобов). То есть $\Lambda = \{\lambda_{x,y,z}\}$: $x = 1\ldots N_x$, $y = 1\ldots N_y$, $z = 1\ldots N_z$. Размеры пространства боя равны $N_x\Delta \times N_y\Delta \times N_z\Delta$. $\Gamma=\{\gamma_f\}$ – множество типов элемобов. Например, γ_1="шоссе", γ_2=”грунтовая дорога”, γ_3=”пересеченная местность”, γ_4=”труднопроходимая местность, преодолеваемая только человеком”, γ_5=”непреодолеваемое заграждение”, γ_6=”воздух”, γ_7=”вода”.

2. $Q^{\text{А}}$ и $Q^{\text{Б}}$ – множество элементов боевых порядков противоборствующих воинских формирований А и Б, соответственно (или отдельных воинских формирований, которые приравниваются к элементам боевых порядков). $Q = Q^{\text{А}} \cup Q^{\text{Б}}$; $Q = \{q_i\}$: $i = 1\ldots|Q|$. Здесь и далее знаком $|\ldots|$ обозначается мощность множества, то есть количество его элементов. Элемент – это кортеж вида:

$$q_i = \left\langle a_i, \left\langle v_i(\gamma) \right\rangle \right\rangle, \quad (1)$$

где: a_i – тип i-го элемента (например, человек, сухопутное средство, морское средство, воздушное средство, стационарный объект); $v_i(\gamma)$ – скорость i-го элемента боевого порядка при движении по элемобу γ-го типа.

3. τ – шаг дискретизации времени боя.

4. $S = \{s_i\}$ – множество траекторий движения элементов боевых порядков, задаваемых или генерируемых с использованием известных методов, изложенных, например, в работах [34, 42]. Совокупность траекторий движения i-го элемента боевого порядка – это кортеж вида:

$$s_i = \left\langle O_i, \left\langle R_{i,m}, H_{i,m}, W_{i,m} \right\rangle \right\rangle : m = 1\ldots M_i, \quad (2)$$

где:

- $O_i = \{o_{i,k}\} \subset \Lambda$: $o_{i,k} = \lambda_{x,y,z}$, $k = 1\ldots|O_i|$ – множество попарно смежных через грани или ребра элемобов, которые занимает i-й элемент боевого порядка. Множество O_i в процессе боя не меняется;
- $R_{i,m} = \langle r_{i,m,c} \rangle$: $r_{i,m,c} = \lambda_{x,y,z}$, $c = 1\ldots C_i$ – кортеж последовательно расположенных и попарно смежных через грани или ребра элемобов, через которые проходит m-я траектория движения i-го элемента боевого порядка. C_i – количество элемобов, через которые перемещается i-й элемент боевого порядка на m-й траектории движения;
- M_i – количество альтернативных траекторий движения i-го элемента боевого порядка;

- $W_{i,m}$ – ранг важности m-й траектории движения i-го элемента боевого порядка на единой для всех элементов θ-бальной шкале ($\theta \in Z^+$). При этом ранг важности наиболее предпочтительной траектории движения равен θ, а остальные траектории с ней соотносятся;
- $H_{i,m} = \{h_{i,m,j}\}$: j=1…$|H_{i,m}|$, $H_{i,m} \subset R_{i,m}$ – множество точек действия на m-й траектории движения i-го элемента боевого порядка. Точка действия – это кортеж вида:

$$h_{i,m,j} = \left\langle \lambda_{x,y,z}, T_{i,m,j} \right\rangle, \quad (3)$$

где: $\lambda_{x,y,z}$ – элемоб, в котором осуществляется какое-либо действие (например, огневое воздействие на противника); $T_{i,m,j}$ – задаваемое время нахождения i-го элемента в j-й точке действия m-й траектории движения. Для элементов, которые не останавливаются в процессе их применения на поле боя, траектория движения может разбиваться на этапы (например, полет летательного аппарата в заданный район, разведка, воздействие, возвращение). На границах таких этапов создаются «виртуальные» точки действия, у которых $T_{i,m,j} = \tau$.

5. $T_{эп}$ – время расчета одного боевого эпизода.
6. $T_{доп}$ – максимальное время, отводимое на расчеты.
7. β – шаг дискретизации параметра масштабирования боя $T_м$. Параметр масштабирования боя $T_м$ равен целому числу τ и характеризует минимальное время, в течение которого элемент боевого порядка считается неподвижным, а интенсивность его работы считается неизменной.

Задача: сформировать граф позиционной динамики боя, представляющий собой множество узлов, соответствующих боевым эпизодам, синхронизированным по времени движения отдельных элементов боевых порядков противоборствующих сторон на поле боя, и множество взвешенных по вероятностям реализаций боевых эпизодов дуг между узлами, соответствующих причинно-следственным связям боевых эпизодов, для такого наибольшего количества боевых эпизодов, суммарное время проведения расчетов которых меньше выделенного для этого времени, при фиксированном шаге дискретизации времени боя, шаге дискретизации параметра масштабирования боя и времени расчета одного боевого эпизода.

Методика решения задачи

Схема методики решения задачи формирования графа позиционной динамики боя показана на рис. 1.

На **этапе 1** производится ввод исходных данных.

На **этапе 2** производится создание G *траекторных* матриц $\mathbf{\Omega}_g = (\omega_{g,i,a})$ альтернативных вариантов позиционной динамики боя, где i – порядковый номер элемента боевого порядка, g=1…G, i = 1…$|Q|$, a = 1…$s_{g\,m}$, $s_{g\,m}$ – наибольшая из всех заданных длин траекторий пути элементов боевых порядков противоборствующих воинских формирований в g-й матрице.

Рис. 1. Схема методики формирования графа позиционной динамики боя

Каждая *траекторная* матрица содержит траектории движения всех элементов боевых порядков противоборствующих сторон. При этом каждая траектория имеет некоторый заданный ранг. В реальных боевых условиях Q может включать до тысяч элементов боевых порядков. Даже для боя двух мотострелковых рот с 10 элементами (бронетехники) в каждой при количестве альтернативных траекторий для одного элемента $M = 3$ количество траекторных матриц при использовании подхода полного перебора составляет $G = 3^{20} \approx 3{,}5 \cdot 10^9$. Поэтому полный перебор всех сочетаний траекторий движения элементов реализовать практически невозможно.

Разрешить данную ситуацию позволяет тот факт, что при задании траекторий указывается приоритет их использования. Это дает возможность группировать траектории по приоритету и рассматривать каждую группу как множество траекторий с одинаковым приоритетом. Будем называть такие группы базовыми. Количество базовых групп равно наименьшему количеству заданных альтернативных траекторий. Например, если, количество заданных альтернативных траекторий для всех элементов сторон от 2 до 3, то базовых групп две, а

если от 1 до 10, то базовая группа одна. Альтернативные траектории с одинаковыми рангами к базовым группам относят произвольно. Например, пусть трем траекториям движения одного из элементов присвоены ранги 10, 8 и 8. Тогда при трех базовых группах одну из двух траекторий с рангом 8 произвольно относят ко второй группе, а другую к третьей. При двух базовых группах в этом примере только одну из двух траекторий с рангом 8, выбранную произвольно, относят ко второй группе, а третья траектория в базовые группы не попадает.

Каждая получившаяся таким образом базовая группа не учитывает траектории движения элементов в остальных базовых группах и траектории, не попавшие ни в одну базовую группу. Для учета этого аспекта для каждой базовой группы создаются ее дубликаты таким образом, что в каждой такой группе одна и только одна траектория движения некоторого элемента заменяется на другую альтернативную траекторию этого элемента. Получившееся множество групп обеспечивает квазиполный перебор всех возможных вариантов траекторий движения элементов в бою. Такой подход используется в NASA при тестировании авионики [43]. Он парирует проблему взрыва пространства тестируемых состояний сложных критически важных систем и, в отличие от весьма ресурсоемкого подхода полного перебора сочетаний всех вариантов наборов тестируемых переменных, предполагает создание только таких наборов, в которых правильными являются либо все переменные, либо все кроме одной переменной. Данный подход не позволяет исследовать все возможные варианты поведения системы. Для сложных систем это практически невозможно. Тем не менее, он дает возможность в условиях ресурсных ограничений максимально приблизиться к этой цели, оставляя без внимания редкие для практики случаи.

Поэтому будем полагать, что правильные тестируемые переменные в подходе, изложенном в [43], – это базовые группы траекторий движения элементов с одинаковым уровнем важности, а неправильные переменные – это все остальные траектории с другими рангами. Такая интерпретация, в частности, позволяет наглядно показать несостоятельность подхода, учитывающего только базовые группы, то есть когда $G = M$. При тестировании состояний сложных систем это означало бы, что проверка проводится только с правильными исходными данными, а ошибочным данным внимание не уделяется.

С учетом изложенного для создания *траекторных* матриц $\mathbf{\Omega}_g$ используются следующие правила.

Правило 1Т. Создается M^* *траекторных* матриц сценариев боя $\mathbf{\Omega}_g$, каждая из которых соответствует базовой группе траекторий. При этом M^* равно наименьшему заданному количеству альтернативных траекторий движения среди всех элементов, участвующих в бою. То есть $M^* = \min\limits_{i=1...|Q|} M_i$.

Траекторные матрицы $\mathbf{\Omega}_g$ определяются следующим образом:

$$\mathbf{\Omega}_g = (\omega_{g^*,i,a}): \omega_{g^*,i,a} = r_{i,\,g^*,a},\ g^*=1\ldots M^*. \quad (4)$$

Неиспользованные части строк матрицы $\mathbf{\Omega}_g$ заполняются нулями.

Правило 2Т. Для каждой матрицы, созданной по **Правилу 1Т**, формируется множество ее дубликатов (новых матриц), в каждом из которых одна траектория движения каждого объекта заменяется на другую его траекторию.

Матрицы, построенные с применением **Правил 1Т-2Т**, составляют множество искомых *траекторных* матриц $\mathbf{\Omega}_g = (\omega_{g,i,a})$.

Преимущество подхода, изложенного в [43], в сравнении с использованием подхода полного перебора состоит в объеме производимых вычислений. Это может быть показано следующим образом. Пусть для каждого элемента в обязательном порядке задаются M^* альтернативных траекторий движения. Тогда с учетом приведенных выше правил имеем следующее выражение для оценки количества *траекторных* матриц:

$$G = M^* \cdot \left(1 + \left(M^* - 1\right) \cdot \left|Q\right|\right). \quad (5)$$

И если для указанного выше примера боя двух мотострелковых рот $G \approx 3{,}5 \cdot 10^9$, то для подхода, изложенного в [43], $G = 123$. Если будет задано меньше, чем M^* альтернативных траекторий движения для одного элемента, то значение показателя G будет еще меньше.

На **этапе 3** производится преобразование *траекторных* матриц $\mathbf{\Omega}_g$ в *траекторно-временные* матрицы $\mathbf{\Psi}_g$.

Траекторно-временные матрицы $\mathbf{\Psi}_g$ определяются следующим образом:

$$\mathbf{\Psi}_g = (\psi_{g,i,b}), \quad (6)$$

где $b = 0, 1, 2, \ldots$ – порядковый номер шага дискретизации времени боя.

Такое преобразование необходимо для синхронизации во времени процессов движения всех элементов на поле боя следующим образом.

Для каждой ячейки $\omega_{g,i,a}$ i-й строки *траекторной* матрицы $\mathbf{\Omega}_g$ в i-ю строку *траекторно-временной* матрицы $\mathbf{\Psi}_g$ последовательно записываются $B_{g,i,a}$ ячеек, каждая из которых принимает одно из двух значений:

$$\psi_{g,i,b} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент на } b\text{-м шаге движется;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Определение численного значения $B_{g,i,a}$ осуществляется с использованием общеизвестной физической формулы следующим образом:

$$B_{g,i,a} = \left\lfloor \Delta \cdot \tau^{-1} \cdot v_i^{-1}\left(\omega_{g,i,a}\right) \right\rfloor, \quad (7)$$

где: $v_i(\omega_{g,i,a})$ – скорость движения i-го элемента в a-м элемобе *траекторной* матрицы $\mathbf{\Omega}_g$, находящемся на g-й траектории движения этого элемента; $\lfloor ... \rfloor$ – знак округления до ближайшего целого в меньшую сторону.

Конечные моменты последних боевых эпизодов всех элементов боевых порядков в *траекторно-временных* матрицах выравниваются по конечному моменту боевого эпизода, завершающегося последним. Этот момент характеризует продолжительность боя. В позициях строк, добавленных в ходе выравнивания, элементы считаются находящимися в неподвижном состоянии.

На **этапе 4** производится обновление значения параметра масштабирования боя по формуле: $T_м = T_м + \beta$. При этом изначально $T_м = 0$.

На **этапе 5** производится масштабирование *траекторно-временных* матриц $\mathbf{\Psi}_g$. Для этого каждая строка матрицы $\mathbf{\Psi}_g$ подвергается процедуре, регламентированной следующими правилами.

Правило 1М. Каждый сегмент траектории между смежными точками действия, начала и конца траектории образует новую точку действия, время остановки в которой равно времени движения элемента по сегменту. Местоположение вновь создаваемой точки – это позиция, в которой элемент находится в средний момент времени прохождения сегмента.

Правило 2М. Каждая точка действия, время остановки в которой меньше $T_м$, объединяется со смежной точкой действия с наибольшим временем остановки. При равенстве времен остановки смежных точек выбирается ближайшая к противнику точка.

На **этапе 6** производится синхронизация масштабированных *траекторно-временных* матриц $\mathbf{\Psi}_g^*$ в рамках единой для каждой отдельной матрицы последовательности боевых эпизодов. Процедура синхронизации состоит в том, что левую и правую границу частного боевого эпизода каждого элемента боевого порядка перемещают в рамках допустимого диапазона значений в целях сведения количества единой для матрицы последовательности боевых эпизодов к минимуму. В этой процедуре $T_м$ выступает в качестве меры погрешности определения временных границ единых для матрицы боевых эпизодов следующим образом. Применение **Правил 1М-2М** позволяет получить в масштабированных *траекторно-временных* матрицах $\mathbf{\Psi}_g^*$ продолжительность каждого частного боевого эпизода не менее $T_м$. Поэтому для того, чтобы боевой эпизод в каждой точке действия в результате синхронизации не перестал существовать, необходимо, чтобы варьирование его границ производилось в диапазоне:

$$\left(T_{нач} \pm \frac{T_м}{2}; T_{кон} \pm \frac{T_м}{2}\right), \quad (8)$$

где $T_{нач}$ и $T_{кон}$ – время начала и завершения боевого эпизода, соответственно.

С учетом изложенного для синхронизации масштабированных *траекторно-временных* матриц $\mathbf{\Psi}_g^*$ выполняются следующие действия.

Шаг 1. Фиксируется начало очередного единого для матрицы эпизода.

Шаг 2. Производится копирование ячеек *n*-го столбца очередного единого боевого эпизода на место предшествующих столбцов этого эпизода. Столбцы в едином боевом эпизоде нумеруются с 1. Порядковый номер в едином боевом эпизоде для копируемого столбца вычисляется по формуле:

$$n = \lceil 0{,}5 \cdot T_м \cdot \tau^{-1} \rceil, \quad (9)$$

где: $\lceil ... \rceil$ – знак округления до ближайшего целого в большую сторону.

Шаг 3. Производится переход к *n*-му столбцу единого боевого эпизода и в каждой строке *траекторно-временной* матрицы $\mathbf{\Psi}_g^*$ значению счетчика несовпадений Ξ присваивается ноль.

Шаг 4. Сравнивается очередной столбец масштабированной *траекторно-временной* матрицы $\mathbf{\Psi}_g^*$ с последующим столбцом.

Если содержание ячеек одной строки в очередном и последующем столбцах одинаковое, то производится переход к следующему столбцу и **шаг 4** повторяется. Если последующий столбец последний, то алгоритм завершается.

Если содержание ячеек одной строки в очередном и последующем столбцах различается, то для нее $\Xi = \Xi + \tau$ и проверяется выполнение условия:

- если $\Xi < T_м/2$, то значения ячеек в очередном и последующем столбцах меняются на «*», производится переход к следующему столбцу и **шаг 4** повторяется;
- если $\Xi \geq T_м/2$, то очередной столбец считается конечным для очередного единого боевого эпизода, счетчики Ξ у всех строк обнуляются, производится переход к следующему столбцу и выполняется **шаг 1**.

На **этапе 7** производится проверка условия:

$$K \cdot T_{эп} > T_{доп}, \quad (10)$$

где: K – максимальное количество полученных в результате выполнения **этапа 6** единых боевых эпизодов для всех *траекторно-временных* матриц $\mathbf{\Psi}_g^*$.

Если условие (10) выполняется, то производится переход к **этапу 4**. Иначе производится переход к **этапу 8**.

На **этапе 8** производится построение графа позиционной динамики боя с учетом вероятностей реализации его ветвей. Целью этой процедуры является определение вероятности реализации каждого сценария боя, характеризующегося своей собственной последовательностью единых боевых эпизодов. Для нахождения вероятности реализации g-го сценария боя используется следующая формула:

$$P_g = G^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{|Q|} \left(\frac{W_{i,g}}{\sum_{m=1}^{M_i} W_{i,m}} \right), \quad (11)$$

где: $W_{i,g}$ – ранг важности траектории пути i-го элемента в g-м сценарии; $W_{i,m}$ – ранг важности m-й траектории движения i-го элемента боевого порядка; G – количество траекторных матриц; M_i – количество траекторий движения i-го элемента боевого порядка.

После нахождения вероятности реализации каждого сценария боя строится граф позиционной динамики боя.

Пример решения задачи

Рассмотрим пример создания *траекторных* матриц альтернативных вариантов позиционной динамики боя (**этап 2** методики). Пусть в бою участвуют по три элемента с каждой стороны А и Б. Траекториям элементов боевых порядков назначены следующие ранги:

- для элемента А.1 – А.1.1 (ранг 10), А.1.2 (ранг 7) и А.1.3 (ранг 3);
- для элемента А.2 – А.2.1 (ранг 10) и А.2.2 (ранг 5);
- для элемента А.3 – А.3.1 (ранг 10), А.3.2 (ранг 8) и А.3.3 (ранг 3);
- для элемента Б.1 – Б.1.1 (ранг 10), Б.1.2 (ранг 5) и Б.1.3 (ранг 2);
- для элемента Б.2 – Б.2.1 (ранг 10), Б.2.2 (ранг 9) и Б.2.3 (ранг 9);
- для элемента Б.3 – Б.3.1 (ранг 10), Б.3.2 (ранг 10) и Б.3.3 (ранг 10).

При таких исходных данных создаются 24 *траекторные* матрицы, показанные в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты *траекторных* матриц

Строки	Столбцы		
	Матрица $\mathbf{\Omega}_1$	Матрица $\mathbf{\Omega}_2$	Матрица $\mathbf{\Omega}_3$
А.1	траектория А.1.1, ранг 10	траектория А.1.2, ранг 7	**траектория А.1.2, ранг 7**
А.2	траектория А.2.1, ранг 10	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.1, ранг 10
А.3	траектория А.3.1, ранг 10	траектория А.3.2, ранг 8	траектория А.3.1, ранг 10
Б.1	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.1.2, ранг 5	траектория Б.1.1, ранг 10
Б.2	траектория Б.2.1, ранг 10	траектория Б.2.2, ранг 9	траектория Б.2.1, ранг 10
Б.3	траектория Б.3.1, ранг 10	траектория Б.3.2, ранг 10	траектория Б.3.1, ранг 10
	Матрица $\mathbf{\Omega}_4$	Матрица $\mathbf{\Omega}_5$	Матрица $\mathbf{\Omega}_6$
А.1	**траектория А.1.3, ранг 3**	траектория А.1.1, ранг 10	траектория А.1.1, ранг 10
А.2	траектория А.2.1, ранг 10	**траектория А.2.2, ранг 5**	траектория А.2.1, ранг 10
А.3	траектория А.3.1, ранг 10	траектория А.3.1, ранг 10	**траектория А.3.2, ранг 8**
Б.1	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.1.1, ранг 10
Б.2	траектория Б.2.1, ранг 10	траектория Б.2.1, ранг 10	траектория Б.2.1, ранг 10
Б.3	траектория Б.3.1, ранг 10	траектория Б.3.1, ранг 10	траектория Б.3.1, ранг 10
	Матрица $\mathbf{\Omega}_7$	Матрица $\mathbf{\Omega}_8$	Матрица $\mathbf{\Omega}_9$
А.1	траектория А.1.1, ранг 10	траектория А.1.1, ранг 10	траектория А.1.1, ранг 10
А.2	траектория А.2.1, ранг 10	траектория А.2.1, ранг 10	траектория А.2.1, ранг 10
А.3	**траектория А.3.3, ранг 3**	траектория А.3.1, ранг 10	траектория А.3.1, ранг 10
Б.1	траектория Б.1.1, ранг 10	**траектория Б.1.2, ранг 5**	**траектория Б.1.3, ранг 2**
Б.2	траектория Б.2.1, ранг 10	траектория Б.2.1, ранг 10	траектория Б.2.1, ранг 10
Б.3	траектория Б.3.1, ранг 10	траектория Б.3.1, ранг 10	траектория Б.3.1, ранг 10
	Матрица $\mathbf{\Omega}_{10}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{11}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{12}$
А.1	траектория А.1.1, ранг 10	траектория А.1.1, ранг 10	траектория А.1.1, ранг 10
А.2	траектория А.2.1, ранг 10	траектория А.2.1, ранг 10	траектория А.2.1, ранг 10
А.3	траектория А.3.1, ранг 10	траектория А.3.1, ранг 10	траектория А.3.1, ранг 10
Б.1	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.1.1, ранг 10
Б.2	**траектория Б.2.2, ранг 9**	**траектория Б.2.3, ранг 9**	траектория Б.2.1, ранг 10
Б.3	траектория Б.3.1, ранг 10	траектория Б.3.1, ранг 10	**траектория Б.3.2, ранг 10**
	Матрица $\mathbf{\Omega}_{13}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{14}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{15}$
А.1	траектория А.1.1, ранг 10	**траектория А.1.1, ранг 10**	**траектория А.1.3, ранг 3**
А.2	траектория А.2.1, ранг 10	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.2, ранг 5
А.3	траектория А.3.1, ранг 10	траектория А.3.2, ранг 8	траектория А.3.2, ранг 8
Б.1	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.1.2, ранг 5	траектория Б.1.2, ранг 5
Б.2	траектория Б.1.1, ранг 10	траектория Б.2.2, ранг 9	траектория Б.2.2, ранг 9
Б.3	**траектория Б.3.3, ранг 10**	траектория Б.3.2, ранг 10	траектория Б.3.2, ранг 10
	Матрица $\mathbf{\Omega}_{16}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{17}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{18}$
А.1	траектория А.1.2, ранг 7	траектория А.1.2, ранг 7	траектория А.1.2, ранг 7
А.2	**траектория А.2.1, ранг 10**	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.2, ранг 5
А.3	траектория А.3.2, ранг 8	**траектория А.3.1, ранг 10**	**траектория А.3.3, ранг 3**
Б.1	траектория Б.1.2, ранг 5	траектория Б.1.2, ранг 5	траектория Б.1.2, ранг 5
Б.2	траектория Б.2.2, ранг 9	траектория Б.2.2, ранг 9	траектория Б.2.2, ранг 9
Б.3	траектория Б.3.2, ранг 10	траектория Б.3.2, ранг 10	траектория Б.3.2, ранг 10
	Матрица $\mathbf{\Omega}_{19}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{20}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{21}$
А.1	траектория А.1.2, ранг 7	траектория А.1.2, ранг 7	траектория А.1.2, ранг 7
А.2	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.2, ранг 5
А.3	траектория А.3.2, ранг 8	траектория А.3.2, ранг 8	траектория А.3.2, ранг 8
Б.1	**траектория Б.1.1, ранг 10**	**траектория Б.1.3, ранг 2**	траектория Б.1.2, ранг 5
Б.2	траектория Б.2.2, ранг 9	траектория Б.2.2, ранг 9	**траектория Б.2.1, ранг 10**
Б.3	траектория Б.3.2, ранг 10	траектория Б.3.2, ранг 10	траектория Б.3.2, ранг 10
	Матрица $\mathbf{\Omega}_{22}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{23}$	Матрица $\mathbf{\Omega}_{24}$
А.1	траектория А.1.2, ранг 7	траектория А.1.2, ранг 7	траектория А.1.2, ранг 7
А.2	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.2, ранг 5	траектория А.2.2, ранг 5
А.3	траектория А.3.2, ранг 8	траектория А.3.2, ранг 8	траектория А.3.2, ранг 8
Б.1	траектория Б.1.2, ранг 5	траектория Б.1.2, ранг 5	траектория Б.1.2, ранг 5
Б.2	**траектория Б.2.3, ранг 9**	траектория Б.2.2, ранг 9	траектория Б.2.2, ранг 9
Б.3	траектория Б.3.2, ранг 10	**траектория Б.3.1, ранг 10**	**траектория Б.3.3, ранг 10**

Рассмотрим пример масштабирования *траекторно-временных* матриц (**этап 5** методики). Пусть один элемент боевого порядка (например, пехотинец) перемещается в соответствии с особенностями местности по некоторой траектории из точки «Начало траектории» в точку «Конец траектории» и ведет огонь в движении и в точках остановки. Вариант траектории движения такого элемента боевого порядка в бою показан на рис. 2. На этом рисунке кружками с малым диаметром показаны точки действия без остановки, в которых пехотинец движется и одновременно ведет огонь, а кружками с большим диаметром показаны точки действия с остановкой, в которых пехотинец ведет огонь по противнику, находясь в неподвижном состоянии. При этом точки действия с остановкой, в которых пехотинец находится в неподвижном состоянии, являются защищенными от огня противника, что для практики естественно. Времена преодоления участков местности и нахождения пехотинца в неподвижном состоянии также показаны на рис. 2. Общее время движения пехотинца из начальной в конечную точку траектории составляет 14 мин 15 сек.

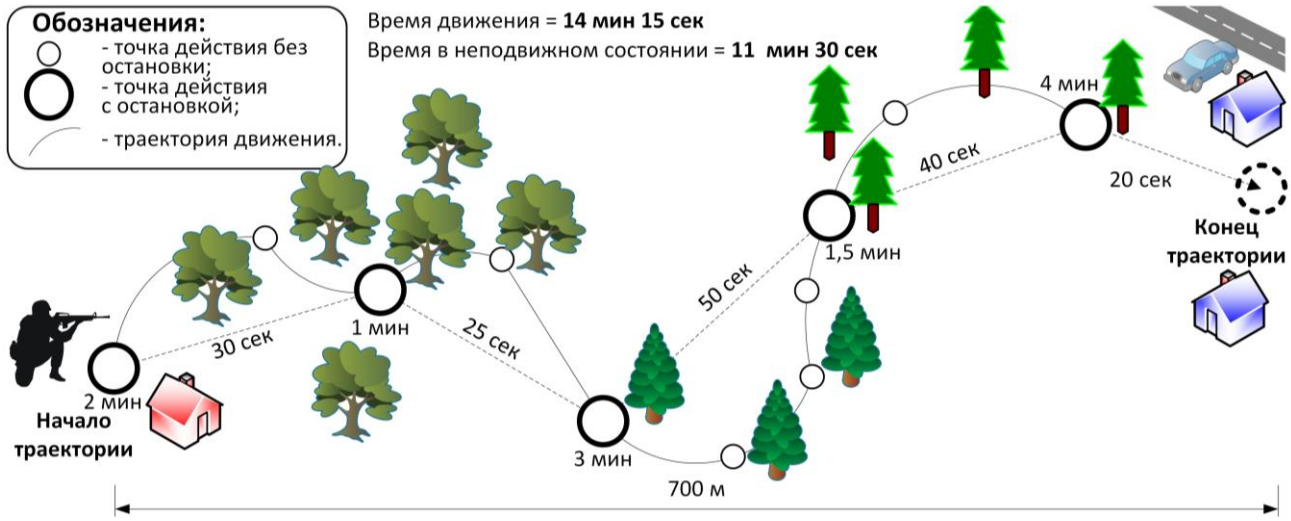

Рис. 2. Траектория движения элемента боевого порядка (вариант)

На рис. 3 показана траектория движения рассматриваемого пехотинца при начальных условиях (траектория А) и при $T_м$ =30 сек (траектория Б). На этом рисунке видно, что траектория А состоит из 10 точек действия с остановкой. При ограничении, вводимом параметром масштабирования боя, траектория Б включает 8 точек действия с остановкой. Траектории, получаемые при дискретном увеличении значения параметра масштабирования боя, показаны на рис. 4-8. На них видно, что при $T_м$ = 1 мин количество точек действия с остановкой равно 5, при $T_м$ = 1 мин 30 сек и $T_м$ = 2 мин оно равно 4, при $T_м$ = 2 мин 30 сек и $T_м$ = 3 мин оно равно 2, а при $T_м$ = 3 мин 30 сек и выше оно равно 1.

При увеличении значения $T_м$ снижается детализация траекторий движения элементов боевых порядков. Как следствие, снижается точность результатов моделирования. Эта особенность метода боевых эпизодов позволяет за счет гибкого изменения значения $T_м$ настраиваться на такую детализацию траекторий движения элементов боевых порядков, которая позволяет проводить расчеты, не выходя за рамки доступных временных ограничений на расчеты.

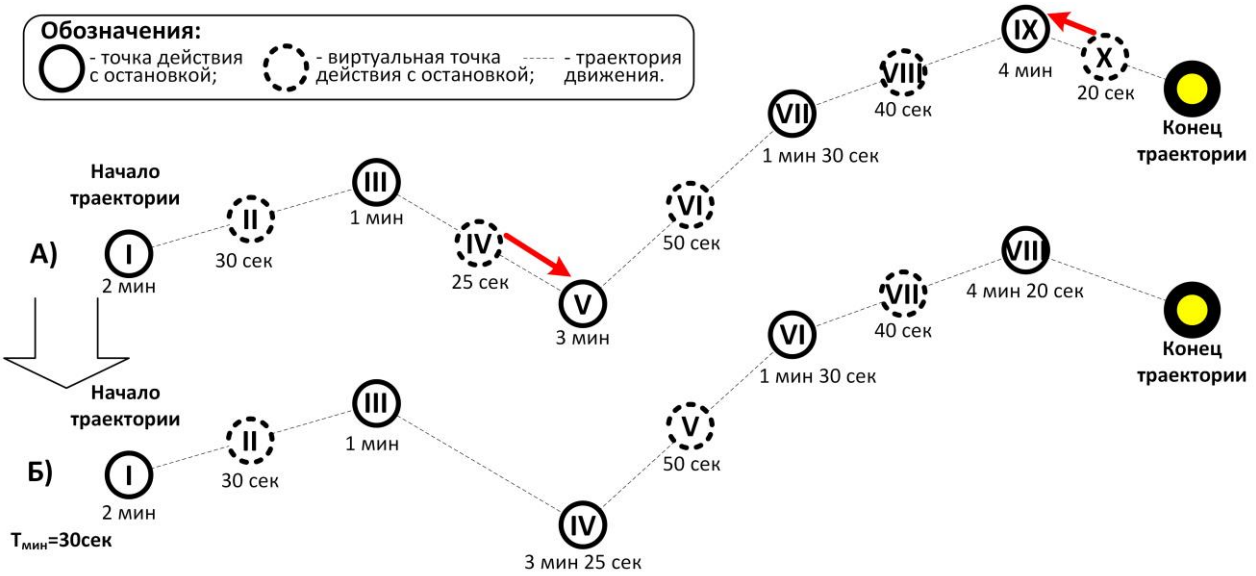

Рис. 3. Траектории движения при $T_м$ =30 сек

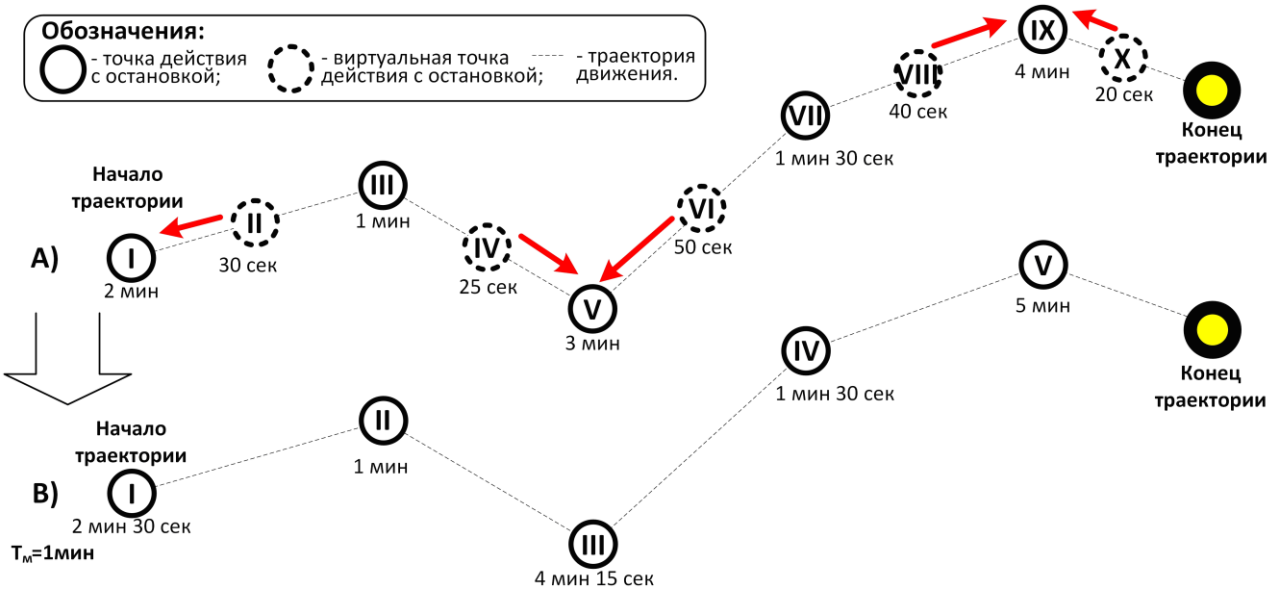

Рис. 4. Траектории движения при $T_м$ = 1 мин

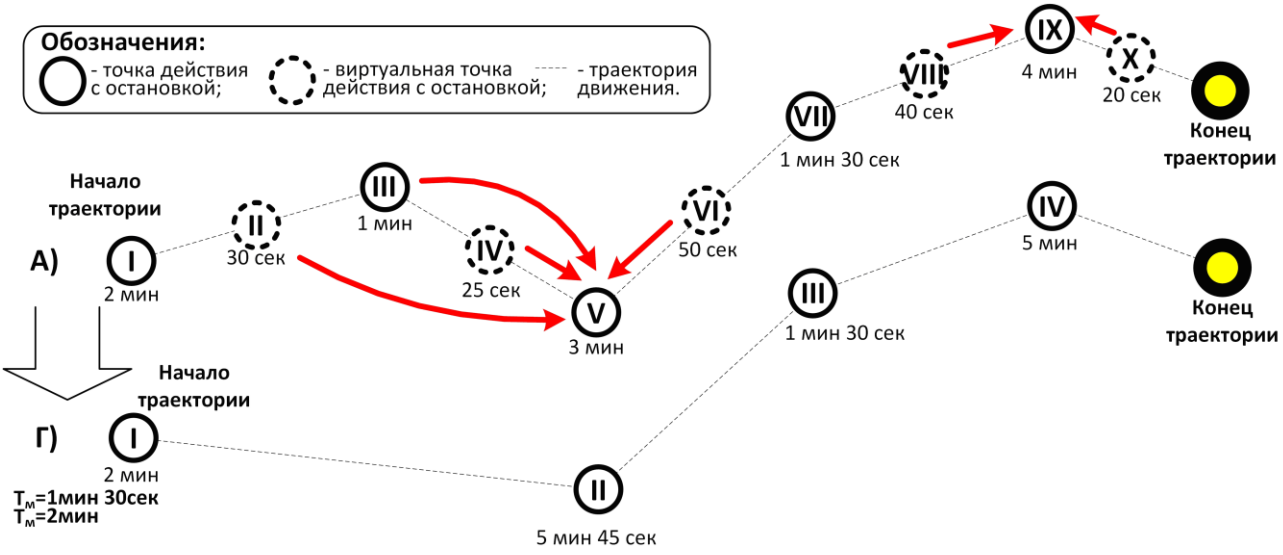

Рис. 5. Траектории движения при $T_м$ = 1 мин 30 сек, $T_м$ = 2 мин

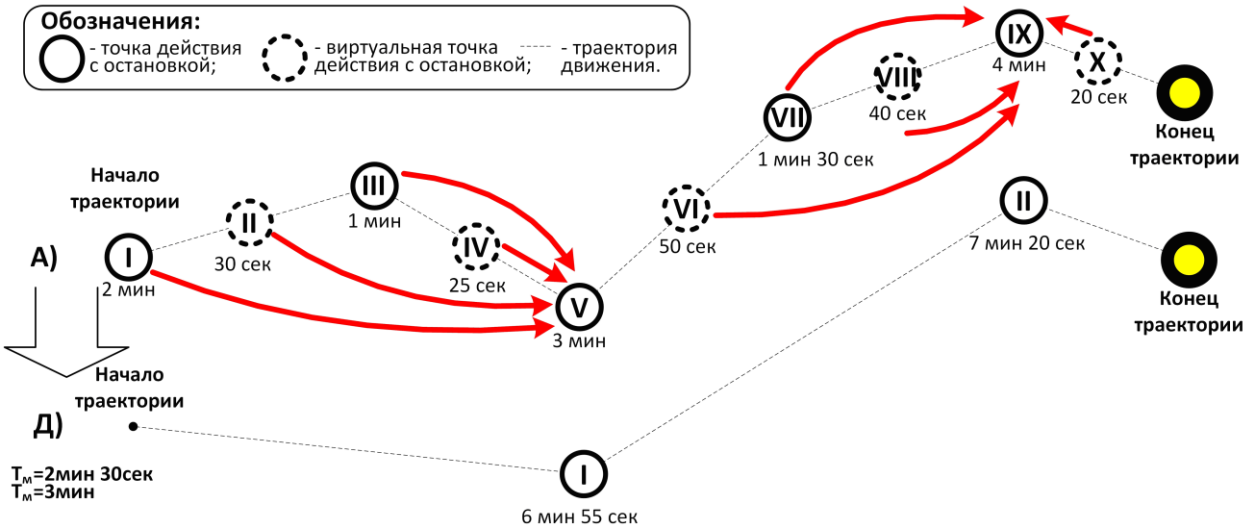

Рис. 6. Траектории движения при $T_м$ = 2 мин 30 сек, $T_м$ = 3 мин

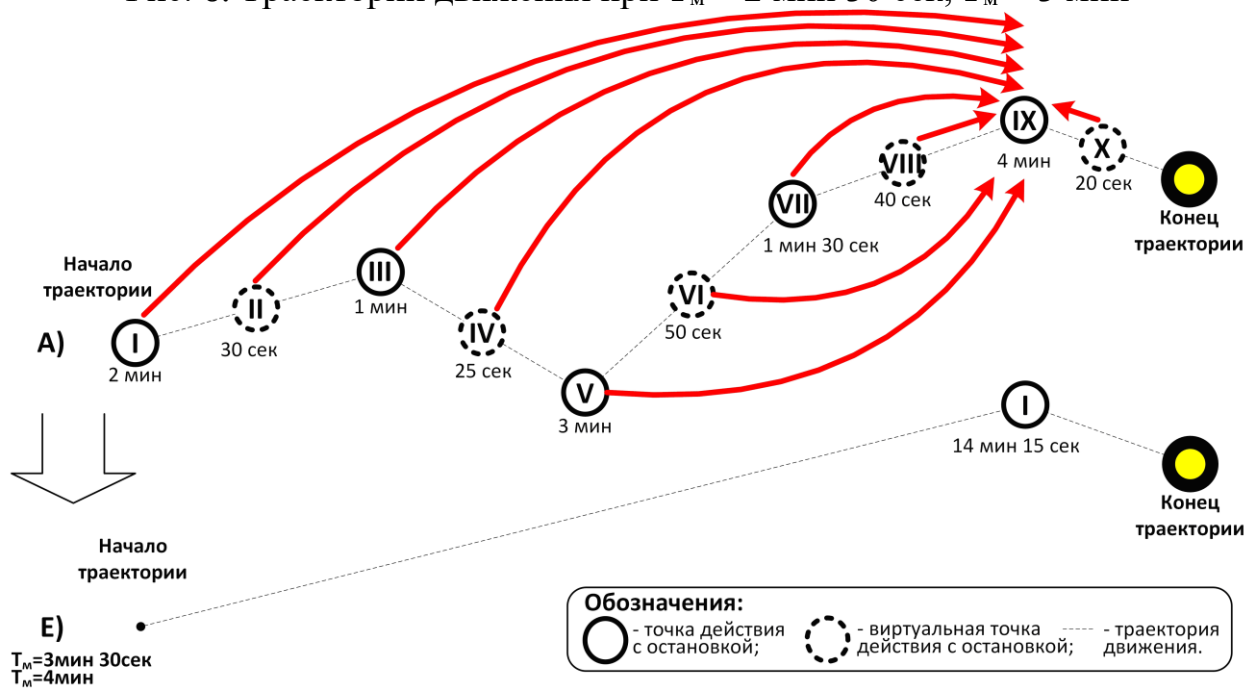

Рис. 7. Траектории движения при $T_м$ = 3 мин 30 сек, $T_м$ = 4 мин

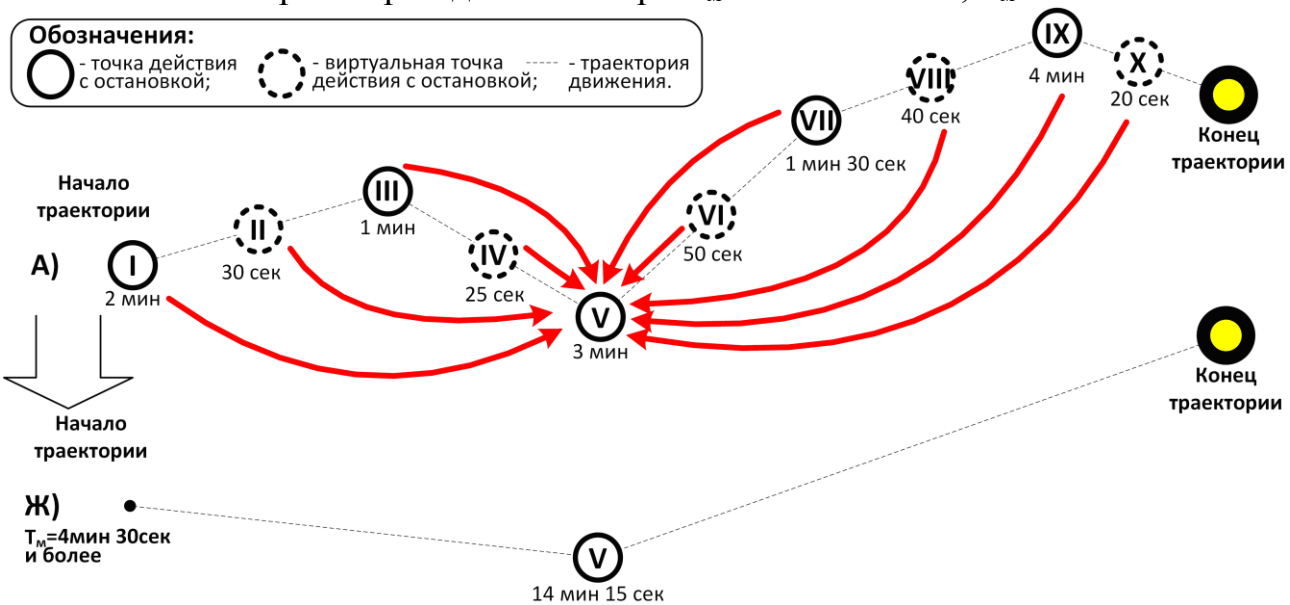

Рис. 8. Траектории движения при $T_м$ = 4 мин 30 сек и выше

Рассмотрим пример синхронизации масштабированных *траекторно-временных* матриц в рамках единой для каждой отдельной матрицы последовательности боевых эпизодов (**этап 6** методики). Для *траекторно-временной* матрицы боя, показанной на рис. 9, результат синхронизации приведен на рис. 10. Для наглядности вместо координат элемобов в ячейках матрицы показаны порядковые номера частных боевых эпизодов элементов боевых порядков.

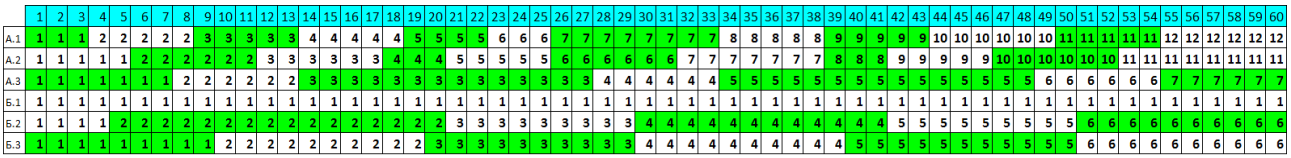

Рис. 9. Пример масштабированной *траекторно-временной* матрицы

Рис. 10. Пример результата процедуры синхронизации масштабированной *траекторно-временной* матрицы

В этом примере каждая из сторон (А и Б) имеет по три элемента боевого порядка, каждый из которых имеет одну траекторию движения. Бой разбит на интервалы с $\tau = 20$ сек. Общая продолжительность боя составляет 20 минут, $T_м = 1$ мин. Общее количество частных боевых эпизодов равно 43. После синхронизации количество глобальных боевых эпизодов составило 14. Поэтому для такого примера граф позиционной динамики боя будет состоять из 14 связанных в хронологической последовательности узлов.

Каждый самостоятельный остов графа позиционной динамики боя является последовательностью общих для всех элементов боевых порядков противоборствующих сторон боевых эпизодов, реализуемых с одинаковой вероятностью. В зависимости от исходных данных этот граф может иметь вид «куста», «дерева», «леса», «кустистого леса» или «леса деревьев». При этом некоторый остов графа будет древовидным в случае равенства одного или большего количества начальных боевых эпизодов у двух или большего количества сценариев боя, и кустовидным в случае одинаковых исходных позиций элементов боевых порядков у двух или большего количества различных сценариев боя.

Область применения результатов решения задачи

Использование программной реализации методики в сравнении с эмпирическим подходом позволяет даже для боя двух рот сократить время разработки графа позиционной динамики в 4-5 раз. Одновременно с этим точность учета в графе траекторий движения элементов боевых порядков увеличивается не менее чем в 2 раза. При рассмотрении более многочисленных воинских формирований зависимость показателя сокращения времени разработки графа от числа элементов боевых порядков приобретает экспоненциальный характер.

Программную реализацию методики целесообразно включить в состав специального программного обеспечения перспективной системы поддержки принятия решения командиров тактических воинских формирований уровня «батальон-бригада/дивизия», применяющей **метод боевых эпизодов**. Возможности метода позволяют применять его при подготовке к бою для задания альтернативных вариантов поведения своих войск (сил) и противника и оценки динамики соотношения боевых потенциалов сторон для этих вариантов, а также в ходе боя для оценки соотношения боевых потенциалов сторон в складывающихся условиях. Используемая в методе аналитическая модель боя в каждом боевом эпизоде учитывает типовые алгоритмы функционирования воинского формирования в бою. Однако даже при самых совершенных алгоритмах этот метод не имеет цели заменить командира. Он нацелен на то, чтобы помочь командиру в конкретных крайне сложных условиях боевой обстановки быстро получить ответ на вопрос: каким будет соотношение боевых потенциалов в бою, если обе стороны действуют «некоторым образом», комплексно применяя самые современные образцы вооружения и военной техники? И именно предполагаемый при планировании боя или видимый в бою «образ действий» представляет собой наиболее критичный фактор, влияющий на адекватность результатов, получаемых с использованием метода боевых эпизодов.

В процессе планирования боя источником данных для определения начальных позиций элементов боевых порядков и построения альтернативных траекторий их движения даже при поддержке самых совершенных математических методов группового управления подвижными объектами является орган управления воинского формирования, то есть командир и его штаб. Степень достоверности этих данных всецело определяется достоверностью имеющейся информации о предстоящем бое, а также уровнем боевой подготовки и боевого опыта личного состава органа управления. Очевидно, что при низкой достоверности исходных данных ценность результатов моделирования будет ничтожной. Гораздо менее весомым, но все-таки значимым является доступное для принятия решения время. Ведь траектории движения при минимальном времени на проведение расчетов «сжимаются» в один боевой эпизод, расчеты для которого будут весьма грубыми. Однако даже в таком случае полученное соотношение боевых потенциалов поможет командиру получить в складывающихся условиях ответ на ключевой вопрос: обороняться или наступать?

В процессе ведения боя результаты применения метода боевых эпизодов отличаются сравнительно более высокой точностью, поскольку в качестве исходных данных в этом случае используется реальная боевая обстановка в текущий момент времени. Тем не менее, и в этом случае, даже если информация о текущем местоположении конкретных элементов боевого порядка своего воинского формирования полностью известна, достоверность результатов вычисления динамики соотношения боевых потенциалов будет зависеть от знания местоположения и типов наиболее эффективных элементов боевого порядка противника. Хотя эта задача для современных средств видовой и параметрической разведки и их носителей не является неразрешимой.

В рамках рассматриваемого направления научных исследований дальнейшей проработки требуют следующие методики:

- выбора оптимальных траекторий движения элементов боевых порядков наступающего тактического воинского формирования с учетом зон аэрозольного противодействия, минных полей, невзрывных заграждений и возможностей средств разведки и поражения противника;
- выбора оптимальных позиций элементов боевых порядков обороняющегося воинского формирования в заданных условиях боевой обстановки.

Вероятным путем решения этих задач является комбинация известных методов теории выбора [44], математического аппарата темпоральной логики, используемого для верификации процессов функционирования сложных технических систем [45, 46], а также методов группового управления подвижными объектами, ссылки на которые даны в обзорной части настоящей статьи.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена методика формирования графа позиционной динамики боя, базирующаяся на применении оригинальной комбинации метода синхронизации параллельных процессов теории распределенных алгоритмов, который применяется при организации обмена сообщениями в цифровых телекоммуникационных системах, и метода тестирования сложных технических систем, который широко применяется для оценки надежности авионики. Новизна предложенной методики состоит в получении возможности построения графоаналитической модели позиционной динамики боя, в которой боевые эпизоды синхронизированы вероятностными и временными параметрами движения отдельных элементов боевых порядков противоборствующих сторон на поле боя.

Применение методики позволяет не менее чем в 4-5 раз ускорить подготовку исходных данных для оперативной количественной оценки состояния и прогнозирования исхода боя разнородных воинских формирований с использованием метода боевых эпизодов. Это достигается за счет перехода от анализа множества разнородных последовательностей частных боевых эпизодов каждого элемента противоборствующих воинских формирований, соответствующих заданным альтернативным разноранговым траекториям движения элементов боевых порядков сторон с изменяющейся скоростью, к единой для всех элементов последовательности боевых эпизодов. Данный переход осуществляется с применением вычисляемого параметра масштабирования боя, определяющего степень детализации траектории движения элемента и диапазон изменения границ синхронизируемых боевых эпизодов без их потери.

Программную реализацию настоящей методики предлагается использовать в составе перспективной системы поддержки принятия решения, ориентированной на планирование и ведение боя.

Литература

1. Чуркин И. П., Костров С. А., Бегларян С. Г. Имитационное моделирование вооруженного противоборства в воздушно-космической сфере // Военная Мысль. 2018. № 9. С. 41-47.

2. Крячко А. Ф., Шевалдин А. М., Шепета А. П. Формализация задачи оперативного управления воинским подразделением в боевых условиях // Военная Мысль. 2018. № 11. С. 49-56.

3. Горчица Г. И., Ищук В. А. Проблемы применения и направления развития систем моделирования в интересах сопровождения создания перспективных комплексов вооружения // Известия Российской академии ракетно-артиллерийских наук. 2018. № 4. С. 15-22.

4. Сирота А. А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.

5. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 2009. – 343 с.

6. Новиков Д. А. Иерархические модели военных действий // Управление большими системами. 2012. № 37. С. 25-61.

7. Алексеев О. Г., Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г. Марковские модели боя. – М.: МО СССР, 1985. – 85 с.

8. Арбузов И. В., Болховитинов О. В., Волочаев О. В., Вольнов И. И., Гостев А. В., Мышкин Л. В., Хабиров Р. Н., Шеховцов В. Л. Боевые авиационные комплексы и их эффективность. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.

9. Буравлев А. И., Горшков П. С. К вопросу о построении агрегированной модели противоборства группировок войск // Вооружение и экономика. 2017. № 5 (42). С. 35-48.

10. Вайнер А. Я. Тактические расчеты. – М.: Воениздат, 1982. – 176 с.

11. Захаров Л. В., Богданов С. А. О выработке единых подходов к оценке боевых потенциалов // Военная Мысль. 1992. № 8-9. С. 42-49.

12. Меркулов С. Н., Сухоруков Ю. С., Донсков Ю. Е. Проблемы автоматизации интеллектуальной поддержки принятия решений общевойсковыми командирами в тактическом звене // Военная Мысль. 2009. № 9. С.43-53.

13. Митюков Н. В. Имитационное моделирование в военной истории. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 280 с.

14. Сосюра О. В. Расчет обобщенных показателей боевых возможностей войск в операциях (боевых действиях) с учетом эффективности управления ими (потенциально-долевой метод). – М.: Военная Мысль, 1997. – 142 с.

15. Тараканов К. В. Математика и вооруженная борьба. – М.: Воениздат, 1974. – 240 с.

16. Ткаченко П. Н., Куцев Л. Н., Мещеряков Г. А., Чавкин А. М., Чебыкин А. Д. Математические модели боевых действий. – М.: Советское радио, 1969. – 240 с.

17. Фендриков Н. М., Яковлев В. И. Методы расчетов боевой эффективности вооружения. – М.: Военное издательство, 1971. – 224 с.

18. Чуев Ю. В. Исследование операций в военном деле. – М.: Воениздат, 1970. – 256 с.

19. Washburn A., Kress M. Combat Modeling. – London: Springer, 2009. – 281 p.

20. Kress, M. Caulkins J. P., Feichtinger G., Grass D., Seidl A. Lanchester model for three-way combat // European Journal of Operational Research. 2018. № 1 (264). pp. 46-54.

21. Шумов В. В., Корепанов В. О. Математические модели боевых действий и военных действий // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 1. С. 217-242. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-217-242.

22. Ivancevic V., Pourbeik P., Reid D. Tensor-Centric Warfare I: Tensor Lanchester Equations // Intelligent Control and Automation. 2018. no. 9, pp. 11-29. DOI: 10.4236/ica.2018.92003.

23. Бойко А. А. Способ аналитического моделирования боевых действий // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 1-27. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10201.

24. Бойко А. А. Метод разработки иерархических многоуровневых моделей для аналитической оценки соотношения сил воинских формирований // Военная Мысль. 2019. № 7. С. 104-113.

25. Бойко А. А., Дегтярев И. С. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 245-266.

26. Бойко А. А. Способ стратифицированного аналитического описания процесса функционирования информационно-технических средств // Информационные технологии. 2015. № 1. С. 35-42.

27. Бойко А. А. Способ аналитического моделирования процесса распространения вирусов в компьютерных сетях различной структуры // Труды СПИИРАН. 2015. № 5. С. 196-211.

28. Бойко А. А. О защищенности информации воинских формирований в современном вооруженном противоборстве // Военная Мысль. 2016. № 4. С. 38-51.

29. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.

30. IEEE 1516-2010. Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture – Framework and Rules. // IEEE [Электронный ресурс]. 18.08.2010. URL: https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html (дата обращения 01.03.2020).

31. Gage D. Command control for many-robot systems // Unmanned Systems. 1992. vol. 10. no. 4. pp. 28-34.

32. Luo D., Yang Z., Duan H., Wu Z., Shen C. Heuristic particle swarm optimization algorithm for air combat decision-making on CMTA // Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. 2006. vol. 23. no. 1. pp. 20-26.

33. Jalili M. Enhancing Synchronizability of Diffusively Coupled Dynamical Networks: A Survey // IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2013. vol. 24 (7). 14 p. DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2250998.

34. Ellery A. J., McCue S. W., Simpson M. J., Baker R. E. Modelling transport through an environment crowded by a mixture of obstacles of different shapes and sizes // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2016. vol. 449. pp. 74-84. DOI: 10.1016/j.physa.2015.12.123.

35. Ruan C., Yang H., Yu L., Kou Y. Combat Network Synchronization of UCAV Formation Based on RTBA Model // Mathematical Problems in Engineering. vol. 2016. Article ID 2630790. 11 p. DOI: 10.1155/2016/2630790.

36. Liu H., Lin Z., Cao M., Wang X., Lv J. Coordinate-free formation control of multi-agent systems using rooted graphs // Systems & Control Letters. 2018. vol. 119. no. 9. pp. 8-15. DOI: 10.1016/j.sysconle.2018.06.006.

37. Qin J., Qichao M., Yu X., Wang L. On Synchronization of Dynamical Systems over Directed Switching Topologies: An Algebraic and Geometric Perspective // IEEE Transactions on Automatic Control. 2020. 17 p. DOI: 10.1109/tac.2020.2971980.

38. Онуфриев В. А. Управление группой автономных роботов с использованием полярных координат // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. 2017. Т. 10. № 4. С. 97-106. DOI: 10.18721/JCSTCS.10409.

39. Муслимов Т. З. Алгоритмы управления строем автономных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с помощью метода векторного поля // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 187-214. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10407.

40. Юдинцев Б. С. Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 163-186. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10406.

41. Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю., Медведев М. Ю., Пшихопов В. Х., Соловьев В. В., Титов А. Е., Финаев В. И., Шаповалов И. О. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. – М.: Физматлит, 2015. – 305 с.

42. Kuznetsov A. V. A Simplified Combat Model Based on a Cellular Automation // International Journal of Computer and Systems Sciences. 2017. vol. 56. no. 3. pp. 379-409. DOI: 10.1134/S106423071703011X.

43. Hayhurst K. J., Veerhusen D. S., Chilenski J. J., Rierson L. K. A Practical Tutorial on Modified Condition / Decision Coverage. Technical Report. – Washington: NASA, 2001. – 85 p.

44. Калинин В. Н., Резников Б. А., Варакин Е. И. Теория систем и оптимального управления. Часть 2. Понятия, модели, методы и алгоритмы оптимального выбора. – М.: МО СССР, 1987. – 589 с.

45. Clarke E. M., Grumberg O., Peled D. Model Checking. – N. Y.: MIT Press, 1999. – 314 p.

46. Карпов Ю. Г. Model Checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.

References

1. Churkin I. P., Kostrov S. A., Beglarjan S. G. Imitacionnoe Modelirovanie Vooruzhennogo Protivoborstva v Vozdushno-Kosmicheskoj Sfere [Simulation modeling of an armed confrontation in the aerospace sphere]. *Military Thought*, 2018, no. 9, pp. 41-47 (in Russian).

2. Krjachko A. F., Shevaldin A. M., Shepeta A. P. Formalizacija zadachi operativnogo upravlenija voinskim podrazdeleniem v boevyh uslovijah [Formalization of the Task of Operational Management of a Military Unit in Combat Conditions]. *Military Thought*, 2018, no. 11, pp. 49-56 (in Russian).

3. Gorchica G. I., Ishhuk V. A. Problemy primenenija i napravlenija razvitija sistem modelirovanija v interesah soprovozhdenija sozdanija perspektivnyh kompleksov vooruzhenija [Application Problems and Development Directions of Modeling Systems in Order to Support the Creation of Advanced Weapons Systems]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2018, no. 4, pp. 15-22 (in Russian).

4. Sirota A. A. *Komp'juternoe modelirovanie i ocenka jeffektivnosti slozhnyh system* [Computer Modeling and Evaluation of the Effectiveness of Complex Systems]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2006. 280 p. (in Russian).

5. Sovetov B. Ja., Jakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [System Modeling]. Moscow, Vysshaja Shkola Publ., 2009. 343 p. (in Russian).

6. Novikov D. A. *Ierarkhicheskie Modeli Voennykh Deistvii* [Hierarchical Models of Military Actions]. Upravlenie Bolsimi Sistemami, 2012, no. 37, pp. 25-61 (in Russian).

7. Alekseev O. G., Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Markovskie Modeli Boia* [Markov Battle Models]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1985. 85 p. (in Russian).

8. Arbuzov I. V., Bolhovitinov O. V., Volochaev O. V., Vol'nov I. I., Gostev A. V., Myshkin L. V., Habirov R. N., SHekhovcov V. L. *Boevye aviacionnye kompleksy i ih effektivnost'* [Combat Aircraft Systems and their Effectiveness]. Moscow, VVIA im. prof. N.E. ZHukovskogo, 2008. 224 p. (in Russian).

9. Buravlev A. I., Gorshkov P. S. K Voprosu o postroenii agregirovannoi modeli protivoborstva gruppirovok voisk [On the Issue of Building an Aggregated Model of Confrontation between Groups of Troops]. *Armament and Economy*, 2017, no. 5(42), pp. 35-48 (in Russian).

10. Vajner A. Ya. *Takticheskie raschety* [Tactical Calculations]. Moscow, Voenizdat, 1982. 176 p. (in Russian).

11. Zakharov L. V., Bogdanov S. A. O virabotke edinih podhodov k ocenke boevih potencialov [On the Development of Unified Approaches to the Assessment of Combat Potentials]. *Military Thought*, 1992, no. 8-9, pp. 42-49 (in Russian).

12. Merkulov S. N., Sukhorukov Iu. S., Donskov Iu. E. Problemy Avtomatizatsii Intellektual'noi Podderzhki Priniatiia Reshenii Obshchevoiskovymi Komandirami v Takticheskom Zvene [Problems of Automation of Intellectual Decision Support by Combined-arms Commanders at the Tactical Level]. *Military Thought*, 2009, no. 9, pp. 43-53 (in Russian).

13. Mitiukov N. V. *Imitatsionnoe Modelirovanie v Voennoi Istorii* [Simulation in Military History]. Moscow, LENAND, 2018. 280 p. (in Russian).

14. Sosura O. V. *Raschet obobshennich pokazateley boevich vozmozhnostey voisk v operachiyach (boevich deistviyah) s uchetom effectivnosti upravleniya imi (potencialno-delevoy metod)* [Calculation of Generalized Indicators of the Combat Capabilities of Troops in Operations (Combat Operations), Taking into Account the Effectiveness of their Management (the Potential-share Method)]. Moscow, Military Thought Publ., 1997. 142 p. (in Russian).

15. Tarakanov K. V. *Matematika i vooruzhennaya borba* [Mathematics and Armed Struggle]. Moscow, Voenizdat Publ., 1974. 240 p. (in Russian).

16. Tkachenko P. N., Kutsev L. N., Meshcheriakov G. A., Chavkin A. M., Chebykin A. D. *Matematicheskie modeli boevykh deistvii* [Mathematical Models of Fighting]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1969. 240 p. (in Russian).

17. Fendrikov N. M., Iakovlev V. I. *Metody Raschetov Boevoi Effektivnosti Vooruzheniia* [Calculation Methods of Combat Effectiveness of Weapons]. Moscow, Voenizdat Publ., 1971. 224 p. (in Russian).

17. Chuev Iu. V. *Issledovanie Operatsii v Voennom Dele* [Operations Research in Military]. Moscow, Voenizdat Publ., 1970. 256 p. (in Russian).

19. Washburn A., Kress M. *Combat Modeling*. London, Springer, 2009. 281 p.

20. Kress M. Caulkins J. P., Feichtinger G., Grass D., Seidl A. Lanchester model for three-way combat. *European Journal of Operational Research*, 2018, no. 1 (264). pp. 46-54.

21. Shumov V. V., Korepanov V. O. Mathematical models of combat and military operations. *Computer research and modeling*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 217-242. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-217-242. (in Russian).

22. Ivancevic V., Pourbeik P., Reid D. Tensor-Centric Warfare I: Tensor Lanchester Equations. *Intelligent Control and Automation*, 2018, no. 9, pp. 11-29. DOI: 10.4236/ica.2018.92003.

23. Boyko A. A. Warfare Analytical Modelling Method. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 1-27. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10201 (in Russian).

24. Boyko A. A. The Method of Developing Hierarchic Multilevel Models for Analytical Assessment of the Correlation of Forces in Military Formations. *Military Thought*, 2019, no. 7, pp. 104-113 (in Russian).

25. Boyko A. A., Degtyarev I. S. The Weight Coefficient Estimation Method of Elements in Organizational and Technical Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 2, pp. 245-266 (in Russian).

26. Boyko A. A. Sposob stratificirovannogo analiticheskogo opisaniya processa funkcionirovaniya informacionno-technicheskih sredstv [The Stratified Analytical Description Method of the Functioning Process of Information-Technical Tools]. *Informacionnye Tehnologii*, 2015, no. 1, pp. 35-42 (in Russian).

27. Boyko A. A. The Analytical Modeling Method of the Virus Propagation Process in Computer Various Structures Networks. *SPIIRAS Proceedings*, 2015, no. 5, pp. 196-211 (in Russian).

28. Boyko A. A. O zashishennosti informacii voinskih formirovaniy v sovremennom vooruzhennom protivoborstve [About the Information Security of Military Formations in the Modern Armed Confrontation]. *Military Thought*, 2016, no. 4, pp. 38-51 (in Russian).

29. Mikoni S. V., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Qualimetry of models and polymodel complexes*. Moscow, RAS, 2018. 314 p. (in Russian).

30. IEEE 1516-2010. Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture – Framework and Rules. 18 August 2010. Available at: https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html (accessed 01 March 2020).

31. Gage D. Command control for many-robot systems. *Unmanned Systems*, 1992, vol. 10, no. 4, pp. 28-34.

32. Luo D., Yang Z., Duan H., Wu Z., Shen C. Heuristic particle swarm optimization algorithm for air combat decision-making on CMTA. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2006, vol. 23, no. 1, pp. 20-26.

33. Jalili M. Enhancing Synchronizability of Diffusively Coupled Dynamical Networks: A Survey. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2013, vol. 24(7), 14 p. DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2250998.

34. Ellery A. J., Mccue S. W., Simpson M. J., Baker R. E. Modelling Transport Through an Environment Crowded by a Mixture of Obstacles of Different Shapes and Sizes. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, vol. 449, pp. 74-84. DOI: 10.1016/j.physa.2015.12.123.

35. Ruan C., Yang H., Yu L., Kou Y. Combat Network Synchronization of UCAV Formation Based on RTBA Model. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, article ID 2630790, 11 p. DOI: 10.1155/2016/2630790.

36. Liu H., Lin Z., Cao M., Wang X., Lv J. Coordinate-free formation control of multi-agent systems using rooted graphs. *Systems & Control Letters*, 2018, vol. 119, no. 9, pp. 8-15. DOI: 10.1016/j.sysconle.2018.06.006.

37. Qin J., Qichao M., Yu X., Wang L. On Synchronization of Dynamical Systems over Directed Switching Topologies: An Algebraic and Geometric Perspective. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 17 p. DOI: 10.1109/tac.2020.2971980.

38. Onufriev V. A. Autonomous robots group control using polar coordinates. *Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 97-106. DOI: 10.18721/JCSTCS.10409. (in Russian).

39. Muslimov T. Z. Algorithms of Autonomous Fixed-wing UAVs Formation Control via Vector Field Method. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 187-214. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10407 (in Russian).

40. Yudintsev B. S. Synthesis of a neural network path planning system for a group of mobile robots. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 163-186. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10406 (in Russian).

41. Beloglazov D. A., Gajduk A. R., Kosenko E. Ju., Medvedev M. Ju., Pshihopov V. H., Solov'ev V. V., Titov A. E., Finaev V. I., Shapovalov I. O. *Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob#ektami v neopredelennyh sredah* [Group

Management of Mobile Objects in Uncertain Environments]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 305 p. (in Russian).

42. Kuznetsov A. V. A Simplified combat model based on a cellular automation. *Journal of computer and systems sciences international*, 2017, *Radiotekhnika*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 379-409. DOI: 10.1134/S106423071703011X.

43. Hayhurst K. J., Veerhusen D. S., Chilenski J. J., Rierson L. K. *A Practical Tutorial on Modified Condition / Decision Coverage*. Technical Report. Washington, NASA, 2001. 85 p.

44. Kalinin V. N., Reznikov B. A., Varakin E. I. *Teoriia sistem i optimal'nogo upravleniia. Chast' 2. Poniatiia, modeli, metody i algoritmy optimal'nogo vybora* [System Theory and Optimal Control. Part 2. Concepts, Models, Methods and Algorithms for Optimal Choice]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1987. 589 p. (in Russian).

45. Clarke E. M., Grumberg O., Peled D. *Model Checking*. New York, MIT Press, 1999, 314 p.

46. Karpov Ju. G. *Model Checking. Verification of Parallel and Distributed Software Systems*. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2010. 560 p. (in Russian).

Статья поступила 20 апреля 2020 г.

Информация об авторах

Бойко Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент. Докторант. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: защита информации, моделирование сложных систем. E-mail: albo@list.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

Иванников Кирилл Сергеевич – начальник центра разработки специального программного обеспечения. Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ММС». Область научных интересов: моделирование сложных систем. E-mail: ivannikov_ks@radar-mms.com

Адрес: 197375, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А.

Кузнецов Даниил Александрович – старший оператор научной роты. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: моделирование сложных систем. E-mail: d-5.123@yandex.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

Constructing graphoanalytic combat positional dynamics model based on military formations combat orders elements actions probability-temporal synchronization

A. A. Boyko, K. S. Ivannikov, D. A. Kuznetsov

Problem Statement. *Today the solution of the problem of rapid quantitative assessment of the current state and forecasting the outcome of modern heterogeneous military formations combat does not fully meet the practice requirements. This is due to limitations of known combat modeling and simulation methods. Known combat modelling methods does not allow detailed analysis of the military formations elements trajectories. A simulation method does not allow to solve the optimization tasks within the same combat scenario and requires to get a statistically significant result extremely expensive repeat calculations of one scenario. This work continues the series of publications that consider the combat episodes method, which parries these shortcomings. It involves dividing the combat into a sequence of episodes, in each of which calculates the warring parties' potentials ratio. The combat analytical model in combat episodes method takes into account the combat cycles of the warring parties and optimization of combat order elements' target distribution. It is detailed to the separate soldiers, devices and information and technical means when they are statically placed on the battlefield. The first stage of the combat episodes method is the formation of a combat positional dynamics graph based on the user-entered alternative multi-rank trajectories of warring parties combat orders elements movement with varying speed. There are no methods for forming such a graph in the known literature.* ***Methods.*** *The solution of the problem is based on the original combination of parallel processes synchronization method in the theory of distributed algorithms, which is used in the messaging organization in digital telecommunications systems, and the method of testing complex technical systems, which is used by NASA to assess the avionics reliability.* ***Novelty*** *of the proposed solution is the new method of constructing the combat positional dynamics graph model, in which combat scenarios are synchronized by a probabilistic and temporal parameters of the military formations separate elements' movement on the battlefield.* ***Result.*** *It makes possible to move from analyzing a set of different ranked sequences of combat episodes of each element to a set of combat episodes' sequences that are uniform for all elements ordered by the probability of sequences implementation. This is done using the combat scaling parameter, which determines each element's trajectory detail level and the change range of synchronized combat episodes borders without losing them. The combat scaling parameter is automatically determined for the specified limit on the calculation time for a known calculation time for a single combat episode in a given combat situation.* ***Practical relevance.*** *The solution can be used in the creation of perspective samples of decision support systems.*

Keywords: *combat modeling and simulation, combat episode method, combat order element, synchronization, positional dynamics.*

Information about Authors

Aleksey Aleksandrovich Boyko – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Doctoral Candidate. Zhukovsky–Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: information security, complex systems modeling. E-mail: albo@list.ru

Address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Street, 54A.

Kirill Sergeevich Ivannikov – Head of the Special Software Development Center. Joint-Stock Company «Scientific and Production Enterprise «Radar MMS». Field of research: complex systems modeling. E-mail: ivannikov_ks@radar-mms.com

Address: Russia, 197375, Saint-Petersburg, Novoselkovskaya Street, 37, lit. A.

Daniil Aleksandrovich Kuznetsov – Senior Operator of the Science Company. Zhukovsky–Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: complex systems modeling. E-mail: d-5.123@yandex.ru

Address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Street, 54A.