

УДК: 004.94

DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_50

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛОКАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ГРУППОВОГО ОБЪЕКТА

MATHEMATICAL MODEL OF DISPLACEMENT DYNAMICS OF A LOCALLY DISTRIBUTED GROUP OBJECT

Канд. техн. наук В.А. Парфиров

Ph.D. V.A. Parfirov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

На основе методов аналитической геометрии разработана модель, отражающая динамику перемещения сложного объекта, состоящего из нескольких групп объектов. Новизной разработанной модели является то, что в ней групповой объект рассматривается как отдельные локальные группы одиночных объектов, а не как точечный объект при решении множества логистических задач. Благодаря чему имеется возможность определения координат расположения каждого объекта группы и времени его нахождения в заданном районе на заданном интервале времени моделирования. Разработанная модель может быть использована как источник исходных данных для решения широкого круга прикладных задач.

Ключевые слова: сложный объект, локализованная группа, динамика перемещения, район назначения, координаты объекта, стационарное состояние, математическая модель.

Based on the methods of analytical geometry, a model has been developed that reflects the dynamics of movement of a complex object consisting of several groups of objects. The novelty of the developed model is that in it a group object is considered as separate local groups of single objects, and not as a point object when solving a variety of logistical problems. Due to this, it is possible to determine the coordinates of the location of each object of the group and the time it is in a given area at a given modeling time interval. The developed model can be used as a source of initial data for solving a wide range of applied tasks.

Keywords: complex object, localized group, movement dynamics, destination area, object coordinates, stationary state, mathematical model.

Введение

При решении широкого круга специальных прикладных задач, связанных с моделированием обстановки в географическом пространстве, требуется оценить динамику перемещений сложного объекта, образованного несколькими группами объектов, расположенных в отдель-

ных локализованных районах. При этом требуется определять будущие координаты каждого отдельного объекта локальной группы, а также время его нахождения в стационарном состоянии, при условии того что известны текущие координаты и координаты района в который должна переместиться локальная группа. Задача дополнительно усложняется, если каждая

локальная группа имеет различный состав, перемещается независимо от других локальных групп и, при этом, имеется стохастичная составляющая, влияющая на параметры перемещения, связанная с погодными условиями, сложностью рельефа местности и т.д.

Известны работы посвященные моделированию перемещений объектов [1–5].

В работе [1] рассмотрен процесс управления группировкой беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях быстроменяющейся обстановки на основе нейронной сети. Определены вопросы организации и обучения нейронной сети, но не рассматриваются задачи определения конкретных координат каждого БЛА в любой момент времени.

Работа [2] посвящена разработке алгоритма прогнозирования выдвижения подразделений силовых структур в район выполнения задач. Процедура определения схем движения автомобильных колонн подразделений силовых структур представлена в виде дискретной задачи математического программирования. В данной работе решается логистическая задача, и групповой объект — автомобильная колонна — рассматривается как точечный объект.

Релевантная работа [3] посвящена моделированию перемещения подвижных узлов связи (пунктов управления) корпоративной сети с учетом физико-географических условий и заданного уровня оборудованности местности в телекоммуникационном отношении. Однако в данной работе узлы связи рассматриваются как точечные объекты и не определяются координаты для каждого подвижного объекта, составляющего узел связи.

Работа [4] посвящена решению задачи планирования маршрутов перемещения группировок войск с учетом различных специфических факторов, влияющих на порядок перемещения. В данной работе решается логистическая задача о прокладке и оптимизации маршрутов между двумя пунктами с использованием цифровых карт, при этом количество перемещающихся объектов не рассматривается.

Работа [5] направлена на оценку и сравнение по различным критериям возможных структур транспортной сети на основе использования теории графов. Транспортная сеть представляется совокупностью (набором) вершин и ребер, но объекты перемещающиеся по данным транс-

портным сетям, и время нахождения объектов в пункте не рассматриваются.

Таким образом, задача моделирования перемещений локально распределенного группового объекта, направленная на учет состава объекта, времени нахождения объектов в определенном пункте является актуальной.

Целью данной статьи является установление зависимости времени нахождения локализованных групп объектов в стационарном состоянии и координат каждого объекта группы в новом районе на временном интервале моделирования от координат районов, в которые требуется переместиться, и известного плана-графика начала перемещений каждой локальной группы в новый район.

Постановка задачи

Пусть имеется сложный групповой объект, состоящий из нескольких групп объектов — элементов сложного объекта, каждый из которых состоит из нескольких подвижных единиц. В процессе функционирования объекта его элементы постоянно перемещаются по заданному графику в заранее определенные районы.

Требуется промоделировать динамику перемещений группового объекта за заданный интервал времени и определить:

- расстояния перемещения элементов по известным координатам района нахождения и нового района;
- координаты расположения каждого элемента объекта в новом районе;
- время нахождения элемента в заданном районе, во время которого он находится в стационарном состоянии.

Решение

Динамику перемещений элементов в данном случае можно смоделировать с помощью выражений

$$T_{\text{раб. в нов. р-не}} = T_{\text{сверт.}} + T_{\text{перемещ.}} + T_{\text{разв.}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{сверт.}}$ — время, затрачиваемое на свертывание элемента;

$T_{\text{перемещ.}}$ — время, затрачиваемое на перемещение элемента;

$T_{\text{разв.}}$ — время, затрачиваемое на развертывание элемента;

$T_{\text{раб. в нов. р-не}}$ — промежуток времени от момента начала свертывания до начала работы в новом районе.

Составляющие $T_{\text{сверт.}}$ и $T_{\text{разв.}}$ определяются нормативными документами для конкретного объекта и условий эксплуатации. Время перемещения элемента в новый район $T_{\text{перемещ.}}$ определяется через путь, затраченный на перемещение элемента по выражению:

$$T_{\text{перемещ.}} = S_{\text{перемещ.}} / (V_{\text{перемещ.}} \cdot K_{\text{п}}), \quad (2)$$

где $V_{\text{перемещ.}}$ — средняя скорость перемещения;
 $K_{\text{п}}$ — коэффициент, учитывающий погодные условия, $K_{\text{п}} = 0 \dots 1$.

В свою очередь путь перемещения можно определить через расстояние, на которое должен переместиться элемент:

$$S_{\text{перемещ.}} = L_{\text{перемещ.}} \cdot K_{\text{р}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{перемещ.}}$ — путь перемещения элемента;
 $L_{\text{перемещ.}}$ — расстояние перемещения элемента;
 $K_{\text{р}}$ — коэффициент, учитывающий сложность рельефа местности, $K_{\text{р}} \geq 1$.

Расстояние перемещения элемента $L_{\text{перемещ.}}$ определяется через координаты исходного и нового районов следующим образом.

Пусть имеется исходная область размещения элемента № 1, в ней имеется три района куда должен перемещаться элемент (рис. 1). Каждый район задан выпуклым многоугольником с произвольными координатами вершин $A_{11}(x_{1,1,1}, y_{1,1,1})$, $B_{11}(x_{1,1,2}, y_{1,1,2})$, $C_{11}(x_{1,1,3}, y_{1,1,3})$, $D_{11}(x_{1,1,4}, y_{1,1,4})$; $A_{12}(x_{1,2,1}, y_{1,2,1})$, $B_{12}(x_{1,2,2}, y_{1,2,2})$,

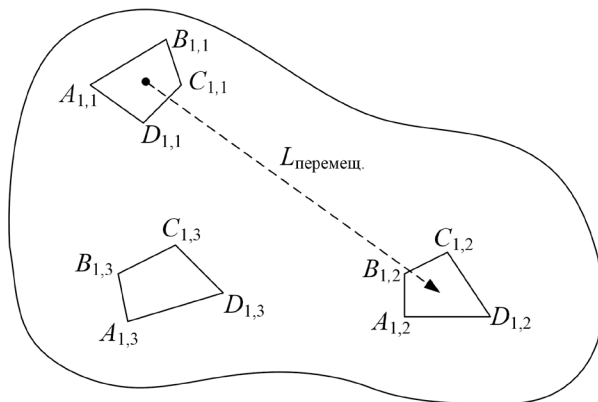


Рис. 1. Схема перемещений объекта

$C_{12}(x_{1,2,3}, y_{1,2,3})$, $D_{12}(x_{1,2,4}, y_{1,2,4})$; $A_{13}(x_{1,3,1}, y_{1,3,1})$, $B_{13}(x_{1,3,2}, y_{1,3,2})$, $C_{13}(x_{1,3,3}, y_{1,3,3})$, $D_{13}(x_{1,3,4}, y_{1,3,4})$, соответственно.

В общем виде для всех элементов группового объекта и их районов размещения координаты вершин районов размещения будут $A_{ij}(x_{i,j,1}, y_{i,j,1})$, $B_{ij}(x_{i,j,2}, y_{i,j,2})$, $C_{ij}(x_{i,j,3}, y_{i,j,3})$, $D_{ij}(x_{i,j,4}, y_{i,j,4})$; i — номер элемента группового объекта $i=1, I$, I — количество элементов в групповом объекте; j — номер района размещения i -го элемента группового объекта; $j=1, Nr_i$, Nr_i — количество районов размещения i -го элемента группового объекта.

В j -ом районе размещения i -го элемента в текущий момент времени находится количество объектов N_{ij} . Координаты расположения объектов с номерами $n=1, N_{ij}$, в районе размещения следующие:

$$(X_{i,j,n}, Y_{i,j,n}), X_{i,j,n} \in [\min x_{i,j,k}, \max x_{i,j,k}], \quad (4)$$

$$Y_{i,j,n} \in [\min y_{i,j,k}, \max y_{i,j,k}], k = \overline{1, 4}.$$

Смоделируем перемещение объектов из района размещения $A_{i1,j1}B_{i1,j1}C_{i1,j1}D_{i1,j1}$ в район $A_{i2,j2}B_{i2,j2}C_{i2,j2}D_{i2,j2}$, где в общем случае $i1 \neq i2$, $j1 \neq j2$.

Расстояние перемещения элемента $L_{\text{перемещ.}}$ определим как расстояние между геометрическими центрами четырехугольников, вычисленное по имеющимся координатам вершин четырехугольников, задающих районы размещения модулей.

Геометрический центр четырехугольника находится как точка пересечения прямых, проходящих через точки геометрических центров треугольников, полученных путем деления четырехугольника на треугольники диагоналями [6]. Геометрически это продемонстрировано на рис. 2.

Математические выражения для определения геометрического центра района размещения выглядят следующим образом [6]:

$$\Delta A_{ij} B_{ij} C_{ij} : x_{\Delta A_{ij} B_{ij} C_{ij}} = (x_{i,j,1} + x_{i,j,2} + x_{i,j,3})/3;$$

$$y_{\Delta A_{ij} B_{ij} C_{ij}} = (y_{i,j,1} + y_{i,j,2} + y_{i,j,3})/3; \quad (5)$$

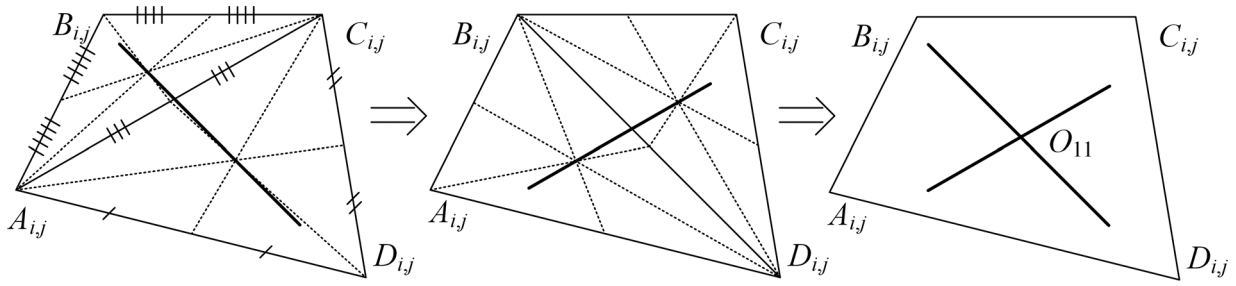


Рис. 2. Схема определения геометрического центра района размещения

$$\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij} : x_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} = (x_{ij,1} + x_{ij,3} + x_{ij,4})/3; \quad (6)$$

$$y_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} = (y_{ij,1} + y_{ij,3} + y_{ij,4})/3;$$

$$\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij} : x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}} = (x_{ij,1} + x_{ij,2} + x_{ij,4})/3; \quad (7)$$

$$y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}} = (y_{ij,1} + y_{ij,2} + y_{ij,4})/3;$$

$$\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij} : x_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} = (x_{ij,2} + x_{ij,3} + x_{ij,4})/3; \quad (8)$$

$$y_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} = (y_{ij,2} + y_{ij,3} + y_{ij,4})/3;$$

определяем уравнения прямых, проходящих через геометрические центры треугольников, в каноническом виде:

$$\begin{aligned} A_1 x + B_1 y + C_1 = & (y_2 - y_1)x + (x_1 - x_2)y + y_1(x_2 - x_1) - \\ & - x_1(y_2 - y_1) = (y_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}})x + \\ & + (x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}})y + \\ & + y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(x_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}) - \\ & - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(y_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}) = 0, \end{aligned}$$

$$A_1 = y_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}};$$

$$B_1 = x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}};$$

$$\begin{aligned} C_1 = & y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(x_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}) - \\ & - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(y_{\Delta A_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}), \end{aligned} \quad (9)$$

где (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — координаты точек, через которые проходит прямая;

$$\begin{aligned} A_2 x + B_2 y + C_2 = & (y_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}})x + \\ & + (x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}})y + \\ & + y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(x_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}) - \\ & - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(y_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}) = 0, \end{aligned}$$

$$A_2 = y_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}};$$

$$B_2 = x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}};$$

$$\begin{aligned} C_2 = & y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(x_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}) - \\ & - x_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}(y_{\Delta B_{ij} C_{ij} D_{ij}} - y_{\Delta A_{ij} B_{ij} D_{ij}}). \end{aligned} \quad (10)$$

Определяем координаты точки пересечения прямых:

$$x_{0_{i,j}} = \frac{\begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}}; \quad y_{0_{i,j}} = \frac{\begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}}. \quad (11)$$

Координаты точки пересечения прямых $(x_{0_{i,j}}, y_{0_{i,j}})$ являются геометрическим центром района размещения $A_{ij} B_{ij} C_{ij} D_{ij}$.

Тогда расстояние перемещения модуля $L_{\text{перемещ.}}$ определяется как расстояние между двумя центрами районов размещения элемента:

$$\begin{aligned} L_{\text{перемещ.}} = & \\ = & \sqrt{(x_{0_{i2,j2}} - x_{0_{i1,j1}})^2 + (y_{0_{i2,j2}} - y_{0_{i1,j1}})^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Координаты размещения объектов в новом районе размещения определяются путем параллельного переноса координат на расстояние $L_{\text{перемещ.}}$ по выражениям:

$$\begin{aligned} X_{i2,j2,n} = & X_{i1,j1,n} + (x_{0_{i2,j2}} - x_{0_{i1,j1}}); \\ Y_{i2,j2,n} = & Y_{i1,j1,n} + (y_{0_{i2,j2}} - y_{0_{i1,j1}}). \end{aligned} \quad (13)$$

Разработанная модель динамики перемещений локально распределенного группового объекта реализована алгоритмом, отражающим

динамику перемещения элементов группового объекта в течение заданного промежутка времени, представленным на рис. 3.

На вход алгоритма (блок 1) поступают следующие исходные данные:

- график начала перемещений элементов $M[t_{ij}]$, $i=1..I$, $j=1..Nr_i$;
- рельеф местности (карта местности) $K(x, y, z)$;
- зависимость погодных условий от времени на период моделирования $P(t)$;

- координаты районов размещения элементов $R[x_{ij,k}, y_{ij,k}]$, $k=1,4$;
- координаты нахождения объектов для каждого элемента группового объекта $(X_{ij,n}, Y_{ij,n})$;
- период планирования T .

Основное тело алгоритма составляют три цикла, первые два (блоки 2 и 3) устанавливают номера элементов группового объекта и номер перемещения в новый район в заданном периоде моделирования. Третий цикл (блок 4) организуется по времени от 0 до окончания



Рис. 3. Алгоритм определения перемещений группового объекта

периода планирования. Таким образом, путем изменения счетчика в первом цикле организуется расчет координат расположения объектов (блок 6) и времени начала нахождения в стационарном состоянии в новом районе (блоки 7–9) для соответствующего элемента группового объекта.

Результат работы алгоритма выводится после завершения выполнения всех циклов в виде соответствующих массивов данных, содержащих сведения о временах начала работы в соответствующем районе размещения для каждого элемента группы и координаты нахождения каждого объекта соответствующего элемента группы.

Контрольное решение

Исходные данные: групповой объект состоит из трех элементов $I = 3$, элементы содержат в своем составе $N_1 = 3$, $N_2 = 5$, $N_3 = 4$ объекта соответственно. Каждому элементу назначено три района назначения с координатами, представленными в табл. 1. Исходные координаты объектов представлены в табл. 2. График начала перемещений элементов представлен в табл. 3. $T_{\text{сверт.}} = 30$ мин; $T_{\text{разв.}} = 30$ мин; $V_{\text{перемещ.}} = 50$ км/ч; $K_{\text{п}} = 0,9$; $K_{\text{р}} = 1,7$; $T = 24$ ч.

Результаты расчета параметров перемещения заданного группового объекта, определенные по алгоритму (рис. 3), представлены в табл. 4.

Таблица 1

Исходные данные по районам назначения элементов группового объекта

№ элемента	Координаты 1 района, км		Координаты 2 района, км		Координаты 3 района, км	
	x	y	x	y	x	y
1	16	75	11	19	80	40
	20	92	19	38	81	62
	35	95	40	36	94	63
	33	76	46	15	95	39
2	5	50	60	83	46	52,5
	10	63	56	94	47,5	68
	24	64	76	95	62,5	70
	20	51	75	85	60	55
3	71	7,5	31	42	36	8
	74	26	26	52	50	36
	92,5	26	45	54	60	36
	90	10	38	36	56	10

Таблица 2

Таблица 3

Исходные данные по начальным координатам подвижных единиц элементов группового объекта

№ элемента	№ объекта	Координаты, км	
		X	Y
1	1	23	90
	2	23	92,5
	3	24	91
2	1	15	56
	2	15,5	58
	3	15	61
	4	17,5	60
	5	17,8	59
3	1	84	17
	2	82	20
	3	84	20
	4	85	18

План-график перемещений элементов группового объекта

№ элемента	Направление перемещения	Время начала перемещения, час
1	1→2	3
	2→3	15
2	1→2	8
	2→3	21
3	1→2	1
	2→3	17

Таблица 4

Результаты моделирования

№ элемента	№ района	Расстояние $L_{\text{перемещ.}}$, км	Время перемещения в район от начала свертывания, ч	Время начала работы в районе, ч	№ объекта	Координаты, км	
						X	Y
1	2	58,2	3,199	6,199	1	25,88	31,86
					2	25,88	34,36
					3	26,88	32,86
	3	63,5	3,4	18,4	1	84,47	56,43
					2	84,47	58,93
					3	85,47	57,43
2	2	61,2	3,31	11,31	1	66,79	88,55
					2	67,29	90,55
					3	66,79	93,55
					4	66,79	92,55
					5	69,59	91,55
	3	30,7	2,16	23,16	1	54,23	60,54
					2	54,73	62,54
					3	54,23	65,54
					4	54,23	64,54
					5	57,03	63,54
3	2	54,52	3,06	4,06	1	38,18	46,55
					2	36,18	49,55
					3	38,18	49,55
					4	38,18	47,55
	3	29,5	2,11	19,11	1	52,31	20,71
					2	50,31	23,71
					3	52,31	23,71
					4	52,31	21,71

Полученные результаты (табл. 4) подтверждают работоспособность алгоритма, представленного на рис. 3, и позволяют сделать вывод об адекватности модели динамики перемещений локально распределенного группового объекта для данной постановки задачи.

Заключение

Таким образом, разработана математическая модель динамики перемещений локально распределенного группового объекта, учитывающая особенности размещения на местности и динамику перемещений его элементов. Адекватность и работоспособность разработанной математической модели подтверждена путем моделирования.

Разработанная математическая модель пригодна для моделирования групповых объектов любого масштаба, что делает ее универсальной для широкого круга прикладных задач. Например, полученные с ее помощью данные о времени нахождения объектов в стационарном состоянии могут быть использованы как источник исходных данных для решения задач наблюдения за множеством источников информации [7]. А сведения о координатах перемещающихся объектов могут быть использованы в качестве исходных данных для отладки и тестирования алгоритмов пеленгования источников радиоизлучений [8].

Литература

1. Иванов С.В., Беседин С.А., Полин Р.В. Гибридная нейросетевая система адаптивного

управления группой беспилотных летательных аппаратов на основе ситуационного подхода в условиях неблагоприятных внешних воздействий // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5–6 (155–156). С. 36–45.

2. Вилков В.Б., Курилов А.В., Черных А.К., Усиков Р.Ф. Алгоритм прогнозирования выдвижения подразделений силовых структур в район выполнения задач // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5–6 (155–156). С. 98–104.

3. Иглов М.А., Стародубцев Ю.И., Иванов С.А. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665141 РФ. Программная модель перемещения подвижных узлов связи (пунктов управления) корпоративной сети с учетом физико-географических условий и заданного уровня оборудованности местности в телекоммуникационном отношении: опубл. 20.09.2021.

4. Tarapata Z. Models and methods of movement planning and simulation in simulation aided system for operational training // Proceedings of the 6th NATO Regional Conference on Military Communication and Information Systems. 06–08 October. Zegrze (Poland). 2004. Pp. 152–161.

5. Zochowska R., Soczowka P. Analysis of selected transportation network structures based on graph measures. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2018. Vol. 98. Pp. 223–233.

6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправленное. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 544 с.

7. Липатников В.А., Парфиров В.А. Модель процесса наблюдения за множеством источников информации в стохастических условиях // Информация и космос. 2022. № 1. С. 35–44.

8. Липатников В.А., Парфиров В.А. Вероятностно-временные характеристики процесса измерения координат робототехнических комплексов военного назначения по излучаемым радиосигналам // Перспективные системы и задачи управления: сборник трудов XVII Всерос. Конф. (Карачаево-Черкесская Республика, п. Домбай, 4–8 апр. 2022 г.). — Таганрог: ИП Марук М.Р. 2022. С. 214–220.

References

1. Ivanov S.V., Besedin S.A., Polin R.V. Hybrid neural network system of adaptive control of a group of unmanned aerial vehicles based on a situational approach under adverse external influences // Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism. 2021. № 5–6 (155–156). Pp. 36–45.

2. Volkov V.B., Kurilov A.V., Chernykh A.K., Usikov R.F. Algorithm for predicting the advance of units of power structures in the area of tasks // Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism. 2021. № 5–6 (155–156). Pp. 98–104.

3. Iglov M.A., Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., etc. Certificate of state registration of the computer program No. 2021665141 of the Russian Federation. Software model for moving mobile communication nodes (control points) of a corporate network, taking into account physical and geographical conditions and a given level of equipment of the area in telecommunications: publ. 09/20/2021.

4. Tarapata Z. Models and methods of movement planning and simulation in simulation aided system for operational training // Proceedings of the 6th NATO Regional Conference on Military Communication and Information Systems. 06–08 October. Zegrze (Poland). 2004. Pp. 152–161.

5. Zochowska R., Soczowka P. Analysis of selected transportation network structures based on graph measures. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2018. Vol. 98. Pp. 223–233.

6. Bronstein I. N., Semendyaev K. A. Handbook of Mathematics for engineers and students of higher education institutions. 13th ed., revised. — M.: Nauka, Gl. ed. phys.-mat. lit., 1986. 544 p.

7. Lipatnikov V.A., Parfirov V.A. Model of the process of observing multiple sources of information in stochastic conditions // Information and Cosmos. 2022. No. 1. Pp. 35–44.

8. Lipatnikov V.A., Parfirov V.A. Probabilistic-temporal characteristics of the process of measuring the coordinates of military robotic complexes by radiated radio signals // Promising management systems and tasks: Proceedings of the XVII All-Russian. Conf. (Karachay-Cherkess Republic, Dombay village, 4–8 Apr. 2022). — Taganrog: IP Maruk M.R. 2022. Pp. 214–220.