УДК 303.094.7

В.А. Васильев, П.А. Федюнин, М.П. Беляев, А.В. Васильев

ИМИТАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ

Васильев Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент, окончил факультет авиационного радиоэлектронного оборудования Рижского высшего военного авиационного инженерного училища им. Я. Алксниса. Доцент кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Специализируется в области автоматизации процессов управления авиацией. Имеет публикации, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в сфере алгоритмического и программного обеспечения комплексов средств автоматизации пунктов управления авиацией. [e-mail: vashome60@mail.ru].

Федюнин Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, окончил факультет радиосвязи Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского. Начальник кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). Специализируется в области управления связью и радиотехнического обеспечения (РТО) в ВВС. Имеет публикации, учебные пособия, изобретения, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в области управления связью и РТО в ВВС. [e-mail: fra1@yandex.ru].

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, окончил факультет радиосвязи Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского. Начальник научно-исследовательского отдела ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). Специализируется в области автоматизации процессов управления авиацией. Имеет публикации в сфере алгоритмического и программного обеспечения комплексов средств автоматизации пунктов управления авиацией. [e-mail: belyaev_mr@mail.ru].

Васильев Антон Валерьевич, окончил факультет авиационных средств связи ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). Младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Главный научный метрологический центр» Минобороны России. Специализируется в области автоматизации процессов управления авиацией. Имеет публикации, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в сфере алгоритмического и программного обеспечения комплексов средств автоматизации пунктов управления авиацией. [e-mail: voroneya@mail.ru].

Аннотация

Одной из важных задач, решаемых автоматизированной системой управления авиацией в ходе боевых действий, является доведение до экипажей ударных авиационных комплексов своевременной и достоверной информации о наземной цели. Задержка информации в каналах связи приводит к ее старению, в результате управление авиацией может осуществляться менее эффективно. Учет влияния задержки имеет комплексное решение, которое на практике реализуется различными методами и средствами. К одному из известных эффективных средств относятся экстраполяторы. В работе авторами рассматривается научно-методический подход, позволяющий проводить исследования экстраполяторов путем математического и полунатурного моделирования. Разработанные в рамках предлагаемого подхода модели имитируют движение наземной цели по реальной дороге с известными геометрическими характеристиками и дорожными условиями. Отличительной особенностью моделей является то, что в процессе их построения используются результаты обработки и анализа данных, получаемых из геоинформационных систем.

Ключевые слова: имитационное моделирование, задержка сообщений в канале связи, маневрирующая наземная цель, модель движения наземной цели.

doi:

SIMULATION OF SPATIAL-TEMPORAL MODELING OF GROUND TARGET MOVING PROCESS

Valerii Aleksandrovich Vasilev, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Avionics Equipment of Riga Air Force Engineering Academy named after Ia. Alksnis; Associate Professor of the Air Force Military Educational and Scientific Center "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh); specializes in the field of automation of aviation management processes; an author of publications, certificates of registration of computer programs in the field of algorithmic and software systems for automation of aircraft command posts. e-mail: vashome60@mail.ru.

Pavel Aleksandrovich Fediunin, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from the Radio Communication Faculty of Tambov Higher Military Aviation Engineering School named after F.E. Dzerzhinskii; Head of the Department at MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh); specializes in the field of communication management and radio technical support in the Air Force; an author of publications, manuals, inventions, certificates of registration of computer programs in the field of communication management and radio technical support in the Air Force. e-mail: fpa1@yandex.ru.

Maxim Pavlovich Beliaev, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Radio Communication Faculty of Tambov Higher Military Aviation Engineering School named after F.E. Dzerzhinskii; Head of Scientific Research Department of MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh); specializes in the field of automation of aviation management processes; an author of publications in the field of algorithmic and software systems for automation of aircraft command posts. e-mail: belyaev_mp@mail.ru.

Anton Valerevich Vasilev, graduated from the Faculty of Aviation Communications at MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh); Junior Staff Scientist at the Main Research Meteorological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; specializes in the field of automation of aviation management processes; an author of publications, certificates of registration of computer programs in the field of algorithmic and software systems of automation of aircraft command posts. e-mail: voroneya@mail.ru.

Abstract

One of the important tasks solved by the automated control system of aircraft during combat operations is to bring timely and reliable information about the ground target to the crews of attack aircraft systems. The delay of information in the communication channels leads to its aging, as a result, aviation management can be less effective. Considering the impact of delay has a comprehensive solution, which is implemented in practice by various methods and means. One of the known effective means are extrapolators. Authors consider a scientific-methodical approach allowing to research the extrapolators in the loop by mathematical modeling. The models developed in the framework of the proposed approach simulate the movement of a ground target on a real road with known geometric characteristics and road conditions. A distinctive feature of the models is that the results of processing and analysis of data obtained from geographic information systems are used in the process of their construction.

Key words: simulation modeling, message delay in the communication channel, maneuvering ground target, ground target motion model.

ВВЕДЕНИЕ

Основой зарождающейся революции в военном деле являются научно-технические достижения, способные преобразить вооруженные силы, и способы ведения ими боевых действий. Одно из важнейших проявлений текущих преобразований – это превращение информации в новую составляющую вооруженной борьбы. Действие этого явления проявляется в информационно-интеграционной области, охватывающей вопросы сопряжения информационных разведывательных, связных, навигационных и других систем с существующими боевыми средствами (БС).

Создание многоуровневых информационно-управляющих полей в результате позволит следующее:

- достичь заданных параметров слежения за объектами поражения с высокоточной выдачей целеуказаний и контролем результатов воздействия;
 - формировать единую координатно-скоростную и временную основу для согласованного применения всех элементов системы вооружения (СВ);
 - реализовать непрерывный внутрисистемный обмен всеми видами информации и многоконтурное управление, обеспечивающее требуемую периодичность доведения данных при подготовке и нанесении ударов до пунктов управления (ПУ), носителей средств поражения и БС на всех участках полета к цели [1].
- Развитие информационно-интеграционной идеи обусловлено необходимостью всемерного снижения времени полного цикла боевого функционирования ($T_{\text{ц}}$)

в существующем (классическом) контуре организации боевых действий. Под временем T_u понимается общее время от момента обнаружения цели в информационной системе до попадания средства поражения (ракеты, снаряда) в цель.

Как показал опыт боевых действий в Сирии, наибольшие сложности возникали с поражением малоразмерных маневрирующих целей, что требует наличия способности у СВ быстрого закрытия цикла боевого функционирования. Таким образом, с учетом обозначенных направлений развития дальнейшая модернизация СВ, вероятно, будет нацелена на завершение этапа создания систем высокоточного оружия и переход к новому качественному этапу создания СВ «прецизионного наведения» [1]. Подобная модернизация актуализирует потребность в решении задачи совершенствования организации информационного обеспечения целеуказания и наведения БС [2] с целью снижения T_u , в том числе в контуре управления ударными авиационными комплексами (УАК).

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ. ПОСТАНОВКА И ПОРЯДОК РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Известно, что свойствами информации в управлении определяется ее способность быть средством отражения текущей обстановки. В связи с этим возникает потребность в создании систем сбора, обработки, хранения и передачи информации, централизованного ее использования органами управления. С этой целью внедряется в войска автоматизированная система управления тактического звена (АСУ ТЗ), в которую структурно входит подсистема управления авиацией (ПУА), автоматизированная, работающая в реальном масштабе времени и позволяющая обеспечить управление средствами авиационной поддержки и функциональное взаимодействие с сопряженными структурами АСУ ТЗ на всех этапах боевых действий [3].

Дадим краткую характеристику организации информационного обеспечения при целеуказании и наведении УАК на наземные подвижные цели с ПУ ПУА.

Источники данных (D) формируют «входную информацию», которая поступает в программно-технический комплекс (ПТК) соответствующего ПУ ПУА с задержкой, зависящей от параметров источников и состояния используемых каналов связи. Моменты времени использования «выходной информации» для целей управления определяются задержками, которые зависят от качества алгоритмического, программного и технического обеспечения ПТК, а также состояния каналов связи между ПУ и экипажем УАК, между ПУ и взаимодействующими подразделениями АСУ ТЗ. Тогда суммарное время задержки, в общем случае, для m видов «выходной информации» может быть представлено системой уравнений:

$$\tau_{\Sigma}^{ij} = \tau_{\Sigma}^{D_i} + \tau_{alg}^j + \tau_{\Sigma}^{Q_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где τ_{Σ}^{ij} – суммарное время задержки информации с мо-

мента начала измерений i -м датчиком до момента использования j -й «выходной информации»;

$\tau_{\Sigma}^{D_i}$ – задержка получения информации от i -го источника (с учетом времени измерений);

τ_{alg}^j – время обработки данных для формирования j -й «выходной информации»;

$\tau_{\Sigma}^{Q_j}$ – задержка прохождения сформированной j -й «выходной информации» в системе связи АСУ ТЗ.

Уравнения (1) отражают тот факт, что каждая из возможных связей n источников данных с потребителями «выходной информации» Q_m имеет собственное время задержки. При этом величина времени $\tau_{\Sigma}^{D_i}$ имеет как детерминированную, так и случайную составляющие. Первая составляющая зависит от параметров источников информации и установленного порядка информационного взаимодействия в ПУА. Наличие случайной составляющей обусловлено воздействием на систему управления множества внутренних и внешних факторов, и в первую очередь – преднамеренных помех. В итоге задержка $\tau_{\Sigma}^{D_i}$ может привести к искаженным представлению и оценке состояния ситуации и, как следствие, к передаче авианаводчиком на УАК недостоверной информации о состоянии цели. То же проявление относительно информации Q_m (при наличии $\tau_{\Sigma}^{Q_j}$) порождает ту или иную степень дезорганизации управления УАК.

В настоящее время влияние задержек сообщений на работу системы управления рассматривают с двух позиций:

- учет влияния задержек на работу алгоритма управления;
- компенсация задержек методами прогнозирования.

В том и другом случае перед исследователем встает сложная задача оценки величин, входящих в выражение (1), с учетом их случайного характера. Далее в этой статье ставится и решается задача имитации параметров пространственного маневрирования цели, информативных для средств радио- и радиоэлектронных разведок, такого маневрирования пространственными параметрами, которое требует прогнозирования координат цели с учетом τ_{Σ}^{ij} . Необходимым условием для этого являются изменения ориентации и модуля вектора скорости цели, определяемые тактическими и техническими соображениями, а также свойствами дорожной сети в районе маневрирования. Во всяком случае, для средств разведки направления возможного перемещения цели равновероятны почти всегда, кроме, может быть, точек, лежащих на местности в непосредственной близости к дорогам.

Отметим, что ключевой задачей прогнозирования в целеуказании и наведении является выявление и изучение возможных траекторий движения цели в пространстве и времени. Каждая альтернативная траектория связывается с наличием комплекса воздействующих

факторов (тактика использования и маневренные возможности цели; факторы местности; экологические факторы; факторы, затрудняющие получение достоверной информации о параметрах движения цели, и др.). Если имеется множество возможных альтернатив для реализации пространственного маневрирования цели, прогноз дает новую информацию о ее состоянии. При этом прогноз тем достовернее, чем полнее и точнее определены воздействующие факторы.

Авторами предлагается объединить технологии прогнозирования и геоинформационных систем (ГИС) для снижения ущерба качеству информации, циркулирующей в ПУА, вызванного конечным значением τ_{Σ}^{ij} . Использование геопространственных данных (свойства местности, дорожной сети и др.), аккумулируемых в ГИС различного назначения и принадлежности, позволяет строить точные измеряемые модели дорог в любой системе координат с привязкой к моделям всей остальной информации об обстановке в районе боевых действий. На основе данных моделей возможно построение эффективных прогнозных моделей пространственно-временных параметров движения цели, снижающих неопределенность в целях и поведении противника в процессе формирования на ПУ ПУА управляющих воздействий и, соответственно, позволяющих повысить эффективность целеуказания и наведения УАК.

Задача ставилась в следующем виде. Необходимо построить имитационную модель движения одиночного автотранспортного средства (АТС) по заданному участку реальной дороги с известными геометрическими характеристиками и дорожными условиями. Основным требованием к разрабатываемой модели являлось установление для заданных условий (тип АТС, стиль вождения и др.) наиболее близкого соответствия между расчетным (модельным) и фактическим изменением пространственно-временных параметров движения

АТС. Выполнение данного требования позволит в дальнейшем использовать модель в вычислительных экспериментах при синтезе эффективных экстраполяторов.

Решение поставленной задачи осуществляется в три этапа. На первом этапе строится модель траектории движения АТС – план заданного участка дороги с рассчитанными характеристиками ее элементов (прямых и круговых кривых). В содержание второго этапа входит построение модели движения АТС по рассчитанной траектории. На третьем этапе с использованием данных моделей синтезируется собственно алгоритм расчета координат движущегося АТС в дискретные моменты времени.

2 Модель траектории движения АТС

В основе процедуры построения траектории движения АТС лежит метод «сглаживания эскизной линии трассы» [4]. Сущность метода заключается в задании координат последовательности точек, снимаемых с эскизного варианта трассы, с последующей аналитической аппроксимацией посредством алгебраических полиномов высоких степеней. Точки эскизной линии рассматриваются как приближенные, вблизи которых должна пройти трасса.

В работе вместо эскиза трассы используются данные (табл. 1) по реальному участку дороги, расположенной в Хлевенском районе Липецкой области (рис. 1). На участке предусмотрено 2 полосы для движения, по одной в каждую сторону. Качество дорожного покрытия оценивается как хорошее, однако на отдельных непродолжительных участках полотно может портиться. Уровень обслуживания участка соответствует условиям, при которых отсутствует взаимодействие между автомобилями. Водители свободны в выборе скоростей. Скорость практически не снижается с ростом интенсивности движения.

Таблица 1

Координаты выбранных точек на участке дороги

Участок дороги МВ: 6334801 МСК-48 зона 1 Липецкая область					
№ точки	x, м	y, м	№ точки	x, м	y, м
S_1	364456.1210178323	1308239.1983007828	S_{11}	366384.17700297665	1308484.523512034
S_2	364727.2871201085	1308274.8654781252	S_{12}	366532.41702986695	1308542.3515718626
S_3	364871.2581657609	1308358.0444358971	S_{13}	366891.7107339855	1308577.015541896
S_4	364949.14474945795	1308480.4862660265	S_{14}	367086.98525238596	1308584.2343327797
S_5	365077.41399355885	1308609.7285923944	S_{15}	367200.4006051058	1308491.1618404922
S_6	365387.06339510623	1308482.4681061362	S_{16}	367806.4364214856	1307900.2773871077
S_7	365788.2720506219	1308447.626096277	S_{17}	367965.8116050707	1307777.4033813095
S_8	365943.50780228246	1308314.462911372	S_{18}	368095.3594262088	1307778.7058975922
S_9	366034.39543643035	1308254.8508319214	S_{19}	368395.2823378034	1307789.73414252
S_{10}	366147.6777948877	1308302.143307997	S_{20}	368860.9050055258	1307800.7519890522

а

б

Рис. 1. Вид участка дороги на картах Google и Яндекс:
а) задание последовательности точек на участке дороги по карте Google;
б) расчетные параметры движения автомобиля по карте Яндекс

Аналитическая аппроксимация плана участка дороги, заданной последовательностью точек S_1-S_{20} (рис. 1 а), осуществлялась с использованием алгебраического полинома степени $n = 5$, имеющего общую касательную в точках сопряжения:

$$Y = Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + F, \quad (2)$$

где A, B, C, D, E, F – коэффициенты аппроксимирующих отрезков кривых, определяемых из условия приближения к фактической линии дороги по методу наименьших квадратов.

На рис. 2 представлены фактическая ломаная линия дороги (кривая 1), построенная по точкам S_0-S_{20} , и ее аналитическая аппроксимация (кривая 2). Система координат привязана к началу дороги в точке S_1 . Значения коэффициентов A, B, C, D, E, F , полученных с использованием пакета Microsoft Excel, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты полинома					
A	B	C	D	E	F
0,0	0,0	0,0	-0,1137	355,3098	-430357,906

Полученная аналитическая аппроксимация дороги еще не дает возможности контролировать законы изменения кривизны линии, а также значения радиусов кривизны в различных ее точках. Чтобы такой контроль мог быть осуществлен в заданных точках, вычисляется кривизна K , обратно пропорциональная величине радиуса, по формуле [4]:

$$K = \frac{d^2 y / dx^2}{\left[1 + (dy/dx)^2\right]^{3/2}}. \quad (3)$$

Рис. 2. Построение фактической линии дороги и ее аппроксимирующей кривой

Как видно из рисунка 2, аппроксимирующая кривая не в полной мере отражает геометрические характеристики исследуемого участка дороги. Рассчитанные в выбранных точках значения K , вследствие смещения экстремумов аппроксимирующей кривой относительно экстремумов фактической линии дороги, дают искаженное представление об ее извилистости.

Известно, что минимальное значение n определяется количеством экстремумов на аппроксимируемом промежутке и чем больше n отличается от количества экстремумов, тем выше точность аппроксимации. На фактической линии исследуемой дороги (рис. 2) можно выделить 4 экстремума. При этом, как показали расчеты, повышение степени полинома (так же, как и увеличение количества точек) с $n = 5$ до $n = 6$ не привело к какому-нибудь заметному повышению адекватности фактической линии дороги ее приближенному аналогу.

Рассмотренные обстоятельства указывают на невозможность аппроксимации всего участка дороги одним полиномиальным уравнением сколь угодно высокой степени для адекватного представления законов изменения скорости АТС на криволинейных участках дороги.

Для пояснения данного утверждения на рисунке 3 представлена зависимость расчетной скорости движения V_p в равнинной местности от радиусов кривых R , полученная на основании данных СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги» [5]. Под расчетной скоростью понимается наибольшая возможная (по условиям устойчивости и безопасности) скорость движения автомобилей (табл. 3) при нормальных условиях погоды [5].

Анализ рисунка 3 и данных таблицы 3 показывает, что на участках рассматриваемой дороги, где радиусы кривых в плане менее 150 м, водителю необходимо снижать скорость.

На основе приведенных выше рассуждений был сделан вывод о целесообразности представления аналитической аппроксимации плана дороги в виде после-

Рис. 3. Зависимость расчетной скорости движения автомобиля от радиуса кривизны

Таблица 3
Расчетные скорости движения автомобиля для различных категорий дорог [5]

Категория дороги	Расчетные скорости V_p , км/ч		
	основные	допустимые на трудных участках местности	
		пересеченной	горной
I-а	150	120	80
I-б	120	100	60
II	120	100	60
III	100	80	50
IV	80	60	40
V	60	40	30

довательности полиномиальных участков, представляющих основные элементы плана (прямолинейные участки дороги и круговые кривые) и описываемых квадратичными полиномиальными уравнениями. В таблице 4 представлен порядок разбиения дороги на характерные участки с использованием данных таблицы 1.

Таблица 4

Характеристика полиномиальных участков дороги

Границы участков	Коэффициенты аппроксимирующих полиномов			Достоверность аппроксимации	Длина участка, м
	D	E	F		
$S_1 - S_3$	0,0011	-9,9209	30716	1	521
$S_3 - S_6$	-0,0031	32,497	-75336	0,996	702
$S_6 - S_8$	-0,0014	15,405	-34273	1	617
$S_8 - S_{10}$	0,0053	-64,309	202804	1	234
$S_{10} - S_{12}$	-0,001	13,007	-34748	1	458
$S_{12} - S_{13}$	0	0,0975	7905,2	1	361
$S_{13} - S_{15}$	-0,0028	38,697	-126745	1	252
$S_{15} - S_{16}$	0	-0,975	15513	1	846
$S_{16} - S_{18}$	0,0027	-43,409	182021	1	380
$S_{18} - S_{20}$	0	0,3171	6325,4	1	765

Кривизна K в каждой точке вычислялась из выражения:

$$K = \frac{2D}{\left[1 + (2Dx + E)^2\right]^{3/2}}. \quad (4)$$

Длина дороги определялась с помощью известных формул математического анализа:

$$l(x) = \int_{x_i}^{x_{20}} \frac{dY}{dx} dx = \sum_{i=1}^{10} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{dY}{dx} dx = 5136 \text{ м}. \quad (5)$$

На рисунке 4 представлен план дороги с указанием радиусов круговых кривых $R = 1/K$.

Полученный набор данных дает полное представление об основных параметрах дороги, необходимых для построения модели движения АТС в горизонтальной плоскости.

3 Модель движения одиночного АТС

Многообразие известных моделей движения одиночных АТС [6, 7] обусловлено различием предположений и допущений, лежащих в их основе. При этом законы изменения скоростей АТС одинаковых типов при прочих равных условиях определялись в результате

экспериментальных наблюдений за режимами работы транспортного потока.

В работах исследователей отмечается, что наибольшее влияние на скорость АТС оказывают состояние покрытия, геометрические элементы трассы, загруженность транспорта. При этом 77,4% всех факторов, оказывающих влияние на скорость движения автомобильного потока на дорогах, приходится на продольный уклон, интенсивность движения, состояние покрытия и ширину проезжей части [7]. Влияние на скорость этих факторов распределяется следующим образом: на состояние покрытия приходится 45,4%, на продольный уклон – 31,0%, на ширину покрытия – 15,4%, на интенсивность движения – 8,2%.

Если на мгновенную скорость наиболее существенное влияние оказывает тип автомобиля и его техническое состояние, то на фактическую скорость движения автомобиля, выбираемую водителем для движения на маршруте, определяющее влияние оказывают факторы, связанные с типом и состоянием дороги. Причем на скорость движения грузовых автомобилей наиболее заметно влияет продольный профиль. Если скорость большинства типов автомобилей зависит от уклона более 20°, то на скорости движения тяжелых грузовых автомобилей сказываются уклоны уже в пределах 10°.

Рис. 4. План участка дороги в горизонтальной плоскости

При отсутствии на исследуемых дорогах горизонтальных кривых малого радиуса план трассы автомобильной дороги не оказывает влияния на величину расчетной скорости движения.

В теории известны два основных класса математических моделей транспортных потоков – микроскопические и макроскопические модели. Последний класс не подходит для описания движения одиночных АТС, а значит, не может быть рассмотрен для достижения цели данного исследования.

Микроскопическими называются модели, в которых явно моделируется движение каждого автомобиля [8]. Такой подход позволяет теоретически достичь более точного описания движения АТС по сравнению с макроописанием. Среди микроскопических моделей одной из самых известных и хорошо себя зарекомендовавших является модель «разумного водителя», предложенная Мартином Трайбером [9].

В представленной работе рассматривается модель движения одиночного АТС по конкретному участку дороги. Модель представляет собой модифицированную микроскопическую модель Трайберга с дискретизацией времени. Сущность модификации заключается в воспроизведении динамики не «разумного водителя», а «лидера». Смещение фокуса наблюдения не нарушает основополагающих принципов, заложенных в концепции сохранения при движении безопасной дистанции до «лидера». В данном случае под безопасной дистанцией понимается расстояние, которое проедет водитель за время, необходимое для того, чтобы выровнять скорость до безопасной скорости движения на кривой.

В дополнение к предложенной «корректировке» модели Трайбера для ее применения в самой задаче потребовалось изменить способ отображения движущегося АТС на плане дороги с двумерного (x, y) на одномерный. Решить данную проблему помогает построенная траектория движения АТС. Путем проецирования точки местоположения АТС на линию дороги можно абстрагироваться от двумерных координат и перейти к одномерной координате – смещению s относительно начала маршрута.

С учетом принятых изменений процесс движения АТС можно описать следующими чередующимися этапами:

1. Разгон на линейном участке свободной дороги (до желаемой скорости V_0) с ускорением $a_{раз}$, определяемым по формуле:

$$a_{раз} = a \left[1 - \left(\frac{ds/dt}{V_0} \right)^\delta \right]. \quad (6)$$

Калибровка параметра δ позволяет регулировать характер поведения АТС при разгоне (при $\delta = 1$ происходит экспоненциальный по времени разгон, в пределе при $\delta \rightarrow \infty$ происходит разгон с постоянным ускорением $a \sim 2 \text{ м/с}^2$ до достижения скорости V_0).

2. Свободное равномерное движение со скоростью V_0 .

3. Торможение до безопасной скорости вхождения в поворот. Ускорение $a_{тор}$ при торможении АТС определяется отношением желаемой дистанции $s_{\delta p}$ (безопасным расстоянием) к текущей дистанции s_m до начала входа в поворот:

$$a_{тор} = -a \left(s_{\delta p} / s_m \right)^2. \quad (7)$$

Величина безопасного расстояния $s_{\delta p}$ в общем случае, определяется скоростью свободного движения АТС, величиной радиусов кривизны дороги и индивидуальными профессиональными качествами водителя.

4. Устоявшееся движение по кривой с расчетной скоростью V_p , зависящей от радиуса кривизны (рис. 4).

Приведенный набор этапов является достаточным для воспроизведения процесса движения одиночного АТС на рассматриваемом участке дороги.

4 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ АТС

Для синтеза алгоритма определимся с характером движения АТС и условиями наблюдения.

1. Дорога не имеет продольных уклонов, поэтому траектория движения АТС лежит в горизонтальной плоскости.

2. АТС слабоманевренное, т. е. существует промежуток времени Δt , в течение которого оно движется прямолинейно и равномерно.

3. Дистанция $s_{\delta p}$ с которой водитель начинает тормозить перед поворотом, по результатам наблюдений за автомобильным движением на рассматриваемой дороге, составляет 70–100 метров.

4. В любой дискретный момент времени $t_i + 1 = t_i + \Delta t$ можно вычислить скорость $V_i + 1$ и смещение $s_i + 1$ АТС относительно начала маршрута.

Пусть временной шаг $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ и скорость АТС ограничена 22 м/с, тогда за один шаг АТС будет проезжать менее 3 метров, что, очевидно, согласуется с предположением о характере движения АТС.

Таким образом, выполняется следующий алгоритм.

1. В момент времени t_0 АТС пересекает начальную точку маршрута с заданными входной скоростью $V_{вх}$ и ускорением $a_{вх} = a_{раз} (a_{тор} \text{ или } 0)$.

2. На первом шаге рассчитывается выходная скорость АТС $V_{вых} = V_{вх} + a_{вх} \cdot \Delta t$.

На последующих шагах за входную скорость $V_{вх}$ принимается выходная скорость $V_{вых}$ предыдущего шага, и, при условии $V_{вх} < V_0$, рассчитываются параметры движения с ускорением согласно выражению (6).

3. Рассчитываются средняя скорость $V_{cp} = (V_{вх} + V_{вых})/2$ и смещение $s_1 = V_{cp} \Delta t$. На втором

и последующих шагах рассчитываются пройденный от начала маршрута путь $s_{i+1} = s_i + V_{cp} \Delta t$ и время в пути $t_{i+1} = t_i + \Delta t$.

4. Иницируется новый временной шаг.

5. Работа алгоритма останавливается при $s \geq l(S_{20})$.

Снижение скорости в алгоритме имитируется при следующих условиях: если АТС находится в пределах 70–100 метров от поворота и скорость движения больше расчетной V_p для данного участка кривой (рис. 4), то скорость пошагово снижается до величины V_p . После прохождения поворота также пошагово имитируется разгон до скорости V_0 . Анализ выполнения условия по достижению расчетной скорости на кривой осуществляется в точках S_4, S_8, S_{13}, S_{16} траектории (рис. 1).

Вычисленные на каждом шаге смещения s_i и соответствующие им значения времени t_i сохраняются в памяти ЭВМ в виде двумерного массива данных в форматах данных карт Google и Яндекс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из сложнейших проблем в области организации информационного обеспечения управления авиацией при непосредственной поддержке тактических воинских формирований является выполнение заданных требований по своевременности и достоверности доводимой до экипажей УАК информации о малоразмерной маневрирующей цели. В настоящий момент возможности сетевого взаимодействия при обмене данными в АСУ ТЗ ограничены, что проявляется в задержке информации на пути от источника до потребителя. При этом информация, отображающая оперативно меняющуюся обстановку и используемая для принятия решения либо выработки управляющих воздействий, за время задержки «стареет». В результате управление может осуществляться менее эффективно. В контуре управления авиацией эффект старения информации о маневрирующей наземной цели связан с невозможностью точно восстановить ее местоположение на местности после задержки, причем ошибка зависит от времени.

Учет влияния задержки имеет комплексное решение, которое на практике может быть реализовано различными методами и средствами. Одними из таких средств могут быть экстраполяторы, внедренные в специальное программное обеспечение комплексов средств автоматизации ПУ ПУА. Построение эффективных алгоритмов прогноза, минимизирующих ошибку определения местоположения цели, для рассматриваемых условий является нетривиальной задачей и требует проведения многочисленных натурных экспериментов.

В работе авторами рассматривается научно-методический подход, позволяющий проводить исследования экстраполяторов путем математического и полунатурного моделирования. Разработанные в рамках предлагаемого подхода модели имитируют движение наземной цели по реальной дороге с известными геометрическими характеристиками и дорожными услови-

ями. Отличительной особенностью моделей является то, что в процессе их построения используются результаты обработки и анализа геопространственных данных в ГИС.

Дальнейшие исследования в рассматриваемой предметной области будут направлены на уточнение моделей, в том числе для использования в сценариях боевых действий на пересеченной и в горной местности. Кроме того, требуют проработки вопросы автоматизированного построения моделей траектории движения и методик их интерактивного анализа.

В завершение исследований планируется разработка и компоновка в единый комплекс программ для ЭВМ согласованных между собой программных модулей, реализующих алгоритмы расчета пространственно-временных параметров движения цели с заданными маневренными характеристиками по выбранному маршруту на цифровой карте. Как элементы исследования в комплексе в виде отдельных модулей (с возможностью добавления/удаления) будут реализованы экстраполяторы. Планируется, что в процессе полунатурного моделирования часть входных данных для расчетов (координаты, скорость) будет поступать из приложений Google (Яндекс) для измерения погрешности прогноза при различных значениях задержки прихода данных.

В заключение отметим, что применение приложений ГИС в работе органов управления войск является новой ступенью в информационном обеспечении управления войсками и оружием, что, в свою очередь, определяет необходимость поиска новых решений по их использованию в процессах принятия решения, планирования и непосредственно в ходе боевых действий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лата В.Ф., Мальцев В.В. Система систем: Информационно-ударное оружие. // Индекс Безопасности. – 2007. – № 3 (83). – С. 101–119.
2. Научно-методический аппарат для оценки возможностей системы управления авиацией по информационному обеспечению процессов целеуказания и наведения / В.А. Васильев, П.А. Федюнин, М.А. Стафеев, А.В. Васильев // Теория и техника радиосвязи. – 2018. – № 4. – С. 5–14.
3. Модель управления вертолетным комплексом при наведении на наземную цель в условиях действия преднамеренных помех / В.А. Васильев, Д.А. Чистилин, М.А. Стафеев, М.А. Суслин // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2017. – № 3. – С. 96–104.
4. Скрыпников В.В., Чернышова Е.В., Ермоленко В.В. Концепция построения компьютерных баз по физическим эффектам // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 11. – С. 16–20.
5. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги. – М. : Госстрой России. ФГУП ЦПП с изм., 2004.
6. Великанов Д.В., Нифонтов В.Н., Плеханов И.П. Автомобильные транспортные средства / под ред. Д.В. Великанова. – М. : Транспорт, 1977. – 326 с.

7. Кац А.В., Раснянский Ю.И. Моделирование скоростей движения автомобильного потока // Науч. тр. Саратовского политехн. ин-та. – 1975. – Вып. 81. – С. 60–66.

8. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3–46.

9. Treiber M., Kesting A. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation* // Springer, 2013. – 503 pp.

REFERENCES

1. Lata V.F., Maltsev V.V. Sistema sistem: Informatsionno-udarnoe oruzhie [System of Systems. Information Strike Weapon]. *Indeks Bezopasnosti* [Security Index], 2007, no. 3 (83), pp. 101–119.

2. Vasilev V.A., Fediunin P.A., Stafeev M.A., Vasilev A.V. Nauchno-metodicheskii apparat dlia otsenki vozmozhnostei sistemy upravleniia aviatsiei po informatsionnomu obespecheniiu protsessov tseleukazaniia i navedeniia [Scientific-Methodological Apparatus for Assessing the Capabilities of the System of Aircraft Control in Providing Information to the Processes of Targeting and Guidance]. *Teoriia i tekhnika radiosvazi* [Radio Communication Theory and Technology], 2018, no. 4, pp. 5–14.

3. Vasilev V.A., Chistilin D.A., Stafeev M.A., Suslin M.A. Model upravleniia vertoletnym kompleksom pri navedenii na nazemnuiu tsel v usloviakh deistviia prednamerennykh pomekh [The Helicopter Complex Management Model at Detecting on the Ground Target in the Jamming Action

Conditions]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriia i praktika* [Aero Space Force. Theory and Practice], 2017, no. 3, pp. 96–104.

4. Skrypnikov V.V., Chernyshova E.V., Ermolenko V.V. Kontsepsiia postroeniia kompiuternykh baz po fizicheskim effektam [Concept of Computer Databases Construction on the Physical Effects]. *Avtomatizatsiia. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2016, no. 11, pp. 16–20.

5. SNiP 2.05.02-85. *Avtomobilnye dorogi* [Construction Regulation Standards Building Code. Road Traffic Routes with Amendment]. Moscow, Gosstroi Rossii. FGUP TsPP Publ., 2004.

6. Velikanov D.V., Nifontov V.N., Plekhanov I.P. *Avtomobilnye transportnye sredstva. Pod red. D.V. Velikanova* [Automobile Transport Vehicles. Edited by D.V. Velikanov]. Moscow, Transport Publ., 1977. 326 p.

7. Kats A.V., Rasnianskii Iu.I. Modelirovanie skorostei dvizheniia avtomobilnogo potoka [Velocity Simulation of Traffic Flow]. *Nauch. tr. Saratovskogo politekhn. in-ta* [Proc. of Saratov Polytechnic Institute], 1975, iss. 81, pp. 60–66.

8. Shvetsov V.I. Matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov [Mathematical Modelling of Traffic Flows]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2003, no. 11, pp. 3–46.

9. Treiber M., Kesting A. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer, 2013. 503 pp.