



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-86-95>

УДК 629.7.016+623.4.014.2+621.396.96

Имитатор фоноцелевой обстановки для отработки корабельных комплексов

А. П. Коновальчик¹, А. А. Башкатов¹, В. Г. Барский¹, М. А. Кудров², А. О. Морозов²,
А. И. Шиловский², Т. В. Хамраева², Н. Д. Карасев², А. М. Назаров²

¹ Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей»»,
Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

В данной работе рассматривается задача имитации фоноцелевой обстановки для корабельного комплекса. Математические модели, представленные в работе, позволяют моделировать работу радиолокационной станции морского базирования, а также движение целей различного типа. Для достижения высокой точности расчетов в настоящей работе учитывается множество физических факторов, влияющих на параметры фоноцелевой обстановки, состоящей из аэродинамических, надводных и баллистических целей.

Ключевые слова: радиолокационная станция, радиолокационные цели, фоноцелевая обстановка, численное моделирование, решатели, векторный способ формирования траекторий движения аэродинамических целей, дифференциальные уравнения, векторная структура пространственных данных

Для цитирования: Коновальчик А. П., Башкатов А. А., Барский В. Г., Кудров М. А., Морозов А. О., Шиловский А. И., Хамраева Т. В., Карасев Н. Д., Назаров А. М. Имитатор фоноцелевой обстановки для отработки корабельных комплексов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 3. С. 86–95. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-86-95>

For citation: Konovalchik A. P., Bashkatov A. A., Barsky V. G., Kudrov M. A., Morozov A. O., Shilovsky A. I., Khamraeva T. V., Karasev N. D., Nazarov A. M. Simulator of the target environment for shipboard weapon systems // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 3. P. 86–95. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-86-95>

Поступила 11.03.2020 Отрецензирована 10.06.2020 Одобрена 10.06.2020 Опубликована 14.10.2020

Введение

Задаче имитации фоноцелевой обстановки (ФЦО) посвящено множество работ [1–3]. В настоящий момент разработано большое количество математических моделей, которые позволяют успешно решать задачи движения различных целей. Однако все известные авторам программные продукты, во-первых, применимы только к одному типу объектов, во-вторых, моделируют ФЦО только для наземной техники, в-третьих, обладают закры-

тым исходным кодом, ввиду чего доподлинно неизвестно, какие именно математические модели и расчетные схемы лежат в основе того или иного решателя. В связи с тем что отсутствуют унифицированные программные комплексы, способные в режиме реального времени моделировать ФЦО для корабельных радиолокационных комплексов, НПО «Алмаз» инициировал разработку собственного программного обеспечения указанной направленности. Авторы рассчитывают, что активная стадия разработки будет продолжаться как минимум ближайшие 3 года, в течение которых будет проведена опытная эксплуатация и доработка программного комплекса, в том

© Коновальчик А. П., Башкатов А. А., Барский В. Г., Кудров М. А., Морозов А. О., Шиловский А. И., Хамраева Т. В., Карасев Н. Д., Назаров А. М., 2020



числе предполагается реализация для современного стандарта High Level Architecture на основе RTI.

В настоящей работе рассматривается реализация задач формирования траекторий аэродинамических, надводных и баллистических целей с учетом их возможного взаимодействия и моделирования отклика цифрового радиолокатора на цели. Для этого были разработаны и реализованы математические модели движения аэродинамических, баллистических и надводных целей, а также математическая модель работы РЛС корабельного базирования.

Постановка задачи

Задача имитации ФЦО является комплексной, вследствие чего ее решение разбивается на несколько подзадач, а именно: задача построения траекторий аэродинамических и надводных целей, проходящих через заданные контрольные точки, задача построения траекторий баллистических целей с заданными параметрами стрельбы и задача имитации работы РЛС корабельного базирования. Все задачи независимы друг от друга и могут решаться по отдельности.

При работе с программным комплексом оператору для построения траекторий аэродинамических и надводных целей необходимо указать контрольные точки и тактико-технические характеристики, на основе которых происходит вычисление траекторных параметров. Для построения траекторий баллистических целей необходимо задать параметры стрельбы и тактико-технические характеристики.

Блок расчета траекторных параметров движения надводных целей

С математической точки зрения задача поиска траектории корабля, проходящей через заданные контрольные точки, является задачей оптимизации управления движением:

$$\int dr(\alpha_r) \rightarrow \min,$$

где управлением является угол отклонения руля $\alpha_r(t)$. Управление ищется методом троичного поиска. В данной работе в качестве целевой функции используется функция расчета

длины ортодромии, которая строится между двумя точками: точки, полученной одношаговым интегрированием уравнений динамики при заданном значении параметра α_r , и следующей контрольной точкой.

Для моделирования динамики корабля используется следующая система уравнений [4, 5]:

$$\rho V(1 + k_{22})v \frac{d\beta_0}{dt} \cos \beta_0 - \rho V(1 + k_{11})v\omega \cos \beta_0 + (c_1\beta_0 + c_2\beta_0^2) \frac{\rho}{2} v^2 S_D - \mu \left[\alpha_r - \chi_{\Pi} \left(\beta_0 + \frac{\varepsilon L}{v} \omega \right) \right] \frac{\rho}{2} v^2 \varphi_1^2 S_{\Pi} = 0,$$

$$-I(1 + k_{66}) \frac{d\omega}{dt} + q_{\Pi} \frac{\rho}{2} v^2 S_D L \beta_0 - q_D \frac{\rho}{2} v S_D L^2 \omega + \mu I \left[\alpha_r - \chi_{\Pi} \left(\beta_0 + \frac{\varepsilon L}{v} \omega \right) \right] \frac{\rho}{2} v^2 \varphi_1^2 S_{\Pi} = 0,$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega,$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} - \frac{d\beta_0}{dt},$$

$$\frac{dx}{dt} = v \cos \varphi,$$

$$\frac{dy}{dt} = v \sin \varphi,$$

где β_0 – угол дрейфа; φ – угол скорости; ψ – угол курса; ω – угловая скорость вращения корабля вокруг вертикальной оси; x, y – координаты корабля в местной земной системе координат (СК); α_r – угол отклонения руля направления; V – объемное водоизмещение корабля; k_{11}, k_{22} – коэффициенты присоединенной массы (элементы матрицы присоединенных масс с индексами {1,1} и {2,2} соответственно); k_{44}, k_{66} – коэффициенты присоединенного момента инерции (элементы матрицы присоединенных масс с индексами {4,4} и {6,6} соответственно); I_x, I_z – моменты инерции корабля относительно осей x и z ; μ – угловой коэффициент подъемной силы руля; q_p – коэффициент позиционного момента; q_d – коэффициент демпфирующего момента; φ_1 – коэффициент влияния корпуса; S – приведенная площадь руля; χ_{Π} – приведенный коэффициент влияния корпуса; c_1, c_2 – коэффициенты нормальной силы (коэффициенты разложения нормальной силы по углу дрейфа (c_1 – по β ,



c_1 – по β^2); L – длина корабля по ватерлинии; l – расстояние от оси баллера руля до миделя; λ_{44} – элемент матрицы коэффициентов демпфирования; h – начальная поперечная метацентрическая высота; S_d – приведенная площадь диаметральной плоскости корабля.

Блок расчета траекторных параметров движения аэродинамических целей

Расчет траекторных параметров движения аэродинамических целей (в дальнейшем АЦ) должен проводиться с учетом ряда физических факторов. В частности, при моделировании движения АЦ учитывается максимальная нормальная перегрузка, максимальная тангенциальная перегрузка, минимальная тангенциальная перегрузка, практический потолок и максимальное число Маха. Помимо этих факторов, рассчитанная траектория движения АЦ должна проходить через контрольные точки, введенные оператором, а также достигать желаемой скорости полета, которая опционально вводится в контрольных точках.

С математической точки зрения задача расчета траектории, проходящей через заданные контрольные точки, является задачей оптимизации управления. Основой метода решения данной задачи является управление направлением вектора скорости и ее величиной. Пусть имеется инерциальная система координат с ортонормированным базисом $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, а также поточная система координат с ортонормированным базисом $(\vec{v}, \vec{\lambda}, \vec{\mu})$, где орт \vec{v} направлен вдоль вектора скорости АЦ, орт $\vec{\lambda}$ направлен перпендикулярно \vec{v} и его направление совпадает с направлением действия подъемной силы, орт $\vec{\mu}$ дополняет тройку до правой. Для того чтобы обеспечить прохождение АЦ через некоторую контрольную точку, необходимо, чтобы векторы текущего и потребного направлений оказались сонаправленными. Реализуется это с помощью поворота вектора текущего направления в сторону вектора потребного направления до их совмещения.

Выражение для потребной скорости изменения вектора \vec{v} будет выглядеть так [6]:

$$\dot{\vec{v}}_n = \frac{k_\phi \varphi (\vec{v}_n - \vec{v} \cos \varphi)}{\sin \varphi}.$$

Перегрузка, необходимая для изменения вектора \vec{v} , считается по формуле [7]:

$$\vec{n}_y \vec{\lambda} = \frac{V}{g} \dot{\vec{v}}_n + \vec{j} - (\vec{j}, \vec{v}) \vec{v},$$

где g – величина ускорения свободного падения; V – модуль скорости цели; n_y – нормальная скоростная перегрузка; \vec{j} – вертикальный орт земной системы координат; $\vec{\lambda}$ – единичный вектор, направленный вдоль направления действия подъемной силы.

Если потребная перегрузка не превышает максимальную, то поворот возможен. В противном случае решается квадратное уравнение для нахождения значения коэффициента рассогласования k_ϕ , позволяющего осуществить поворот:

$$k_\phi^2 (\vec{B}, \vec{B}) + 2k_\phi [(\vec{B}, \vec{j}) - (\vec{j}, \vec{v})(\vec{B}, \vec{v})] + 1 - (\vec{j}, \vec{v})(\vec{j}, \vec{v}) - n_y^2 \max = 0,$$

$$\text{где } \vec{B} = \frac{g\varphi(\vec{v}_n - \vec{v}\cos\varphi)}{V\sin\varphi}.$$

Блок расчета траекторных параметров движения баллистических целей

Траектория движения баллистической цели (в дальнейшем БЦ) состоит из активного участка траектории, то есть участка полета с работающей двигательной установкой, на котором осуществляется управляемый полет, и пассивного участка траектории, на котором цель движется только под действием силы тяжести и аэродинамических сил. В данной работе моделируется только пассивный участок траектории, в связи с тем что для расчета активного участка не имеется достаточного количества начальных данных (характеристик ракетных двигателей, передаточных коэффициентов системы управления, программы управления углом тангажа). Также полет на активном участке занимает значительно меньше времени относительно пассивного. Пассивный участок траектории можно разделить на два участка: безатмосферный и атмосферный. Для каждого участка, в соответствии с [8], решается система дифференциальных уравнений. Для расчета траектории движения БЦ должны быть заданы следующие начальные условия: координаты начала пассивного



участка траектории, модуль скорости, угол наклона траектории, а также угол азимута.

Данные системы уравнений решаются численно методом Рунге – Кутты 4-го порядка. Условная граница разделения – 100 километров. В настоящей работе представлена возможность моделирования БЦ с разделяющейся головной частью рассеивающего типа. Каждый боевой блок должен содержать информацию о координате, модуле скорости и углах азимута и наклона траектории в момент отделения от головной части. В соответствии с законом сохранения импульса после выпуска очередного боевого блока изменяется траектория полета головной части.

Система уравнений, описывающая движение БЦ на атмосферном участке:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{V}{r} \cos\psi \cos\theta, \\ \frac{d\lambda}{dt} &= -\frac{V \sin\psi \cos\theta}{r \cos\varphi}, \\ \frac{dr}{dt} &= V \sin\theta, \\ \frac{dV}{dt} &= -\frac{C_x q S}{m} - g \sin\theta, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{C_y q S}{mV} - \frac{g}{V} \sin\theta + \frac{V}{r} \cos\theta, \\ \frac{d\omega_y}{dt} &= \frac{C_n q S (x_t - x_d)}{J} + \frac{m_y q S l}{J}, \text{ где } J = J_{yy} = J_{zz}. \end{aligned} \right.$$

Система уравнений, описывающая движение БЦ на безатмосферном участке:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{V}{r} \cos\psi \cos\theta, \\ \frac{d\lambda}{dt} &= -\frac{V \sin\psi \cos\theta}{r \cos\varphi}, \\ \frac{dr}{dt} &= V \sin\theta, \\ \frac{dV}{dt} &= -g_r \sin\theta - g_\omega (\cos\varphi \cos\psi \cos\theta + \sin\varphi \sin\theta), \\ \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{g_r}{V} \cos\theta - \frac{g}{V} (\sin\varphi \cos\theta - \cos\varphi \cos\psi \sin\theta) + \frac{V}{r} \cos\theta - 2\omega_e \cos\varphi \sin\psi, \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{g_\omega \cos\varphi \sin\psi}{V \cos\theta} + \frac{V}{r} \operatorname{tg}\varphi \sin\psi \cos\theta + 2\omega_e (\cos\varphi \cos\psi \operatorname{tg}\theta - \sin\varphi), \\ \frac{d\omega_y}{dt} &= \left(1 - \frac{J_{xx}}{J}\right) \omega_x \omega_z, \\ \frac{d\omega_z}{dt} &= -\left(1 - \frac{J_{xx}}{J}\right) \omega_x \omega_y. \end{aligned} \right.$$

Также существует возможность проведения моделирования при отсутствии данных о движении цели вокруг центра масс. Отсутствие этих данных не влияет на траекторию на безатмосферном участке, однако на участке снижения в плотных слоях атмосферы отсутствие угловых скоростей увеличивает ошибку при расчете траектории движения.

Блок имитации выхода квадратурных каналов РЛС

Блок имитации выхода квадратурных каналов РЛС, используя траекторные параметры движения цели, а также ее эффективную площадь рассеяния (ЭПР) в качестве входных данных,

производит расчет амплитуды и набега фазы отраженного от цели сигнала. Выходные данные блока представляют собой матрицу радиолокационной информации Y , в которой записаны отсчеты комплексной огибающей принятого сигнала. Частота дискретизации сигнала f_d не превосходит ширину импульса, в частности, для прямоугольного немодулированного импульса выполняется неравенство [6]:

$$f_d \geq \frac{1}{T},$$

где T – длительность импульса.

Блок может имитировать выход от прямоугольного немодулированного импульса,



импульса с ЛЧМ (линейной частотной модуляцией) и импульса с ФКМ (фазо-кодоманипуляцией). Строки матрицы Y , которые соответствуют сигналу, отраженному от цели, находящейся на расстоянии R и движущейся с радиальной скоростью v , рассчитываются по следующей формуле [7]:

$$Y[l, n] = A \exp(j\theta) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R\right) \exp\left(j 2\pi \frac{2V}{\lambda} nT\right),$$
$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$
$$l = \left\lfloor \frac{2R}{ct} \right\rfloor,$$

где j – мнимая единица, λ – длина волны испускаемого импульса, θ – случайная начальная фаза, равномерно распределенная на полуинтервале $[0, 2\pi]$, а N – количество импульсов в пачке.

Действительный коэффициент A является амплитудой эхо-сигнала и вычисляется по следующей формуле [9]:

$$A = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma F}{(4\pi)^3 R^4}},$$

где P_t – пиковая мощность передающей антенны, σ – ЭПР цели, F – уровень диаграммы направленности антенны. К элементам матрицы Y могут быть добавлены белый шум и помехи от статических объектов.

Также учитывается влияние отражений от морских волн для низколетящих целей. Для этого соответствующие элементы матрицы Y [10] домножаются на интерференционный множитель:

$$F_{\text{инт}}(R_0) = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} R_0} - \rho_0 e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_1 + R_2)},$$

где R_0 – наклонная дальность до цели (м), λ – длина волны (м), ρ_0 – коэффициент зеркального отражения, R_1 и R_2 – длины путей отраженного луча.

Особенности программной реализации

На основе представленных математических моделей был спроектирован программный комплекс для расчета ФЦО. Программный комплекс был разработан в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования, при этом взаимодействие с внешними программными комплексами осуществляется посредством сокетов по прото-

колу TCP/IP. Задание начальных параметров осуществляется тремя способами:

- 1) передача входных данных посредством сокета по протоколу обмена;
- 2) чтение входных данных из файла;
- 3) задание входных данных посредством инструментов графического интерфейса.

Результаты работы программы можно получить либо файлом, либо по протоколу TCP/IP. Стоит отметить, что вариативность способов задания начальных параметров и получения результатов являлась одним из основных приоритетов в разработке данного программного комплекса.

Помимо реализации непосредственно расчетных классов, реализуется масштабная база данных, в которой хранятся тактико-технические характеристики моделируемых объектов. При разработке графического интерфейса пользователя использовалась свободно распространяемая библиотека Qt [11]. На рисунках 1–4 продемонстрированы элементы графического интерфейса. Основное окно интерфейса отображает карту местности, на которой можно размещать контрольные точки. В верхней панели главного окна расположены инструменты, позволяющие администрировать базу данных: создавать тактико-технические характеристики новых объектов или редактировать уже имеющиеся в базе данных, запускать расчет и просматривать результаты (рис. 1).

Для работы с векторными картами используется свободно распространяемая библиотека QGIS. На ее основе реализуется функционал по части чтения и отображения пространственной информации, заданной в векторной структуре. Другими преимуществами интерфейса QGIS, использованными в разработанном программном комплексе, являются возможность проведения редактирования векторных карт, а также создание новых.

Для корректного расчета необходимо учитывать данные о погодных условиях: температуру, влажность, среднюю высоту морских волн, количество и тип осадков и другие. Поэтому в графическом интерфейсе предусмотрена возможность задавать погодные условия. Для этого карта разбивается



на прямоугольные сектора, в каждом из которых оператор может задать погодные условия. Также существует возможность воспользоваться одним из заранее подготовленных распределений метеорологических данных (рис. 2).

В случае выбора оператором вывода результатов расчета в графический интерфейс

траектории всех целей будут отображаться на главном экране приложения в выбранной проекции, как это показано на рисунке 3.

На рисунке 4 представлена матрица «дальность–скорость», построенная по данным, полученным от имитационного комплекса.

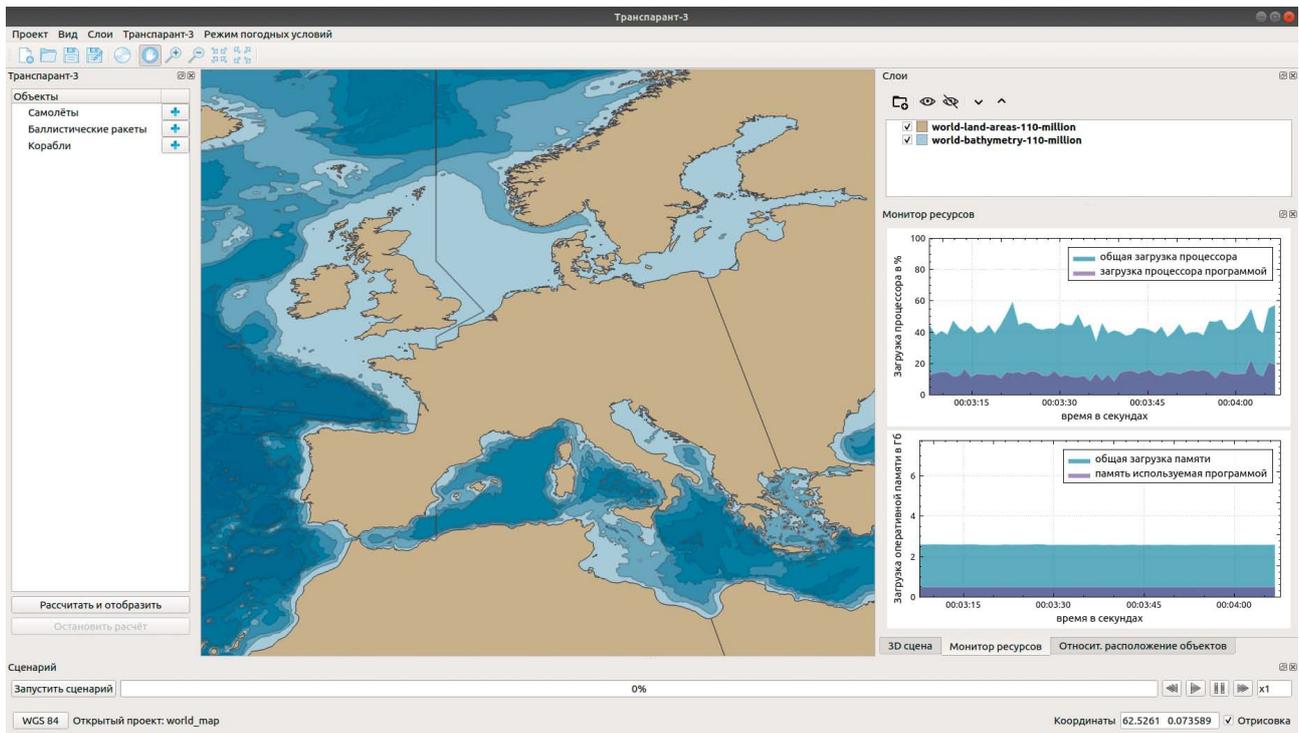


Рис. 1. Вид главного окна графического интерфейса пользователя

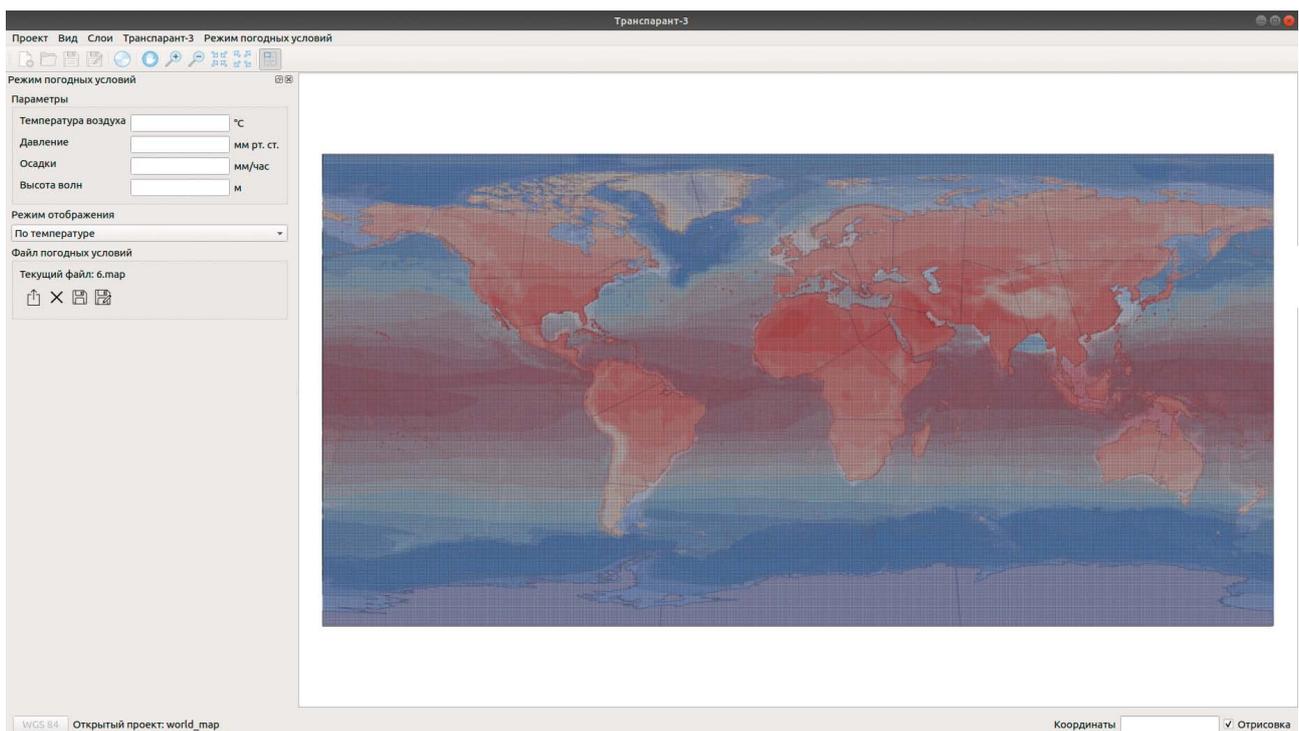


Рис. 2. Режим просмотра метеорологических данных

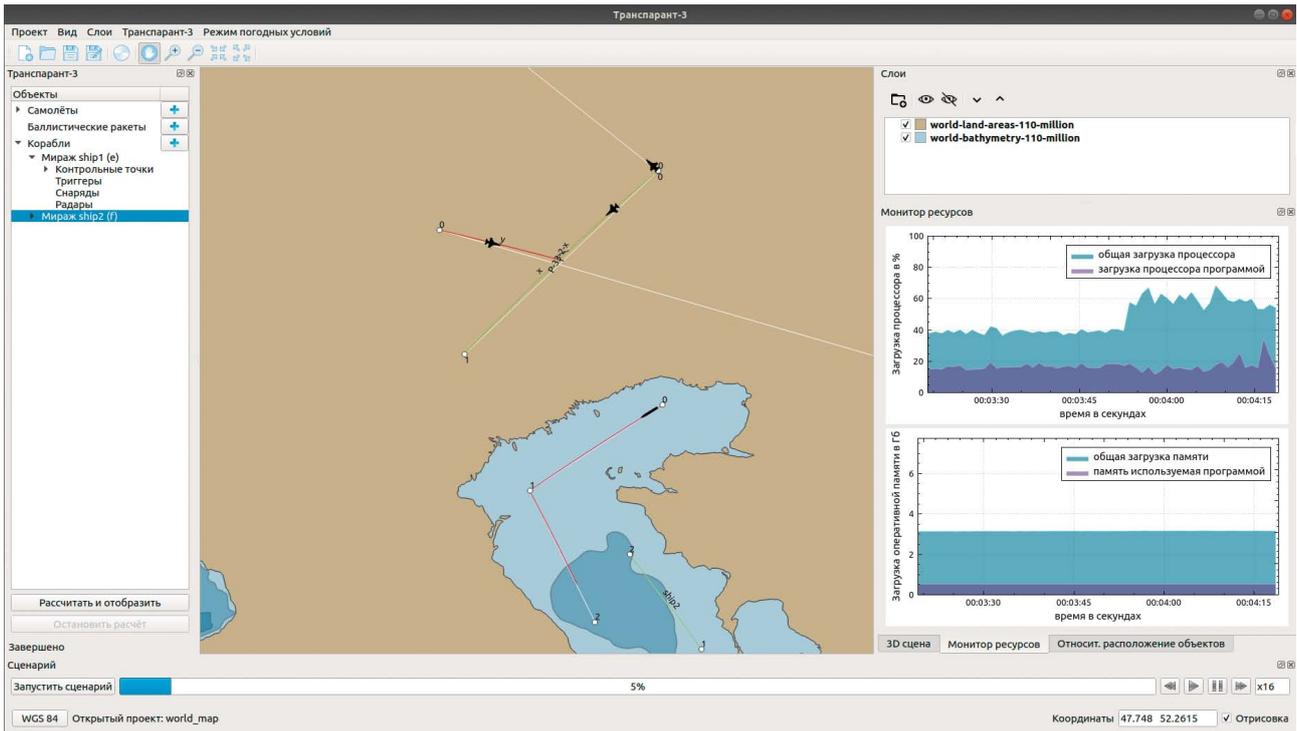


Рис. 3. Пример визуализации результатов моделирования

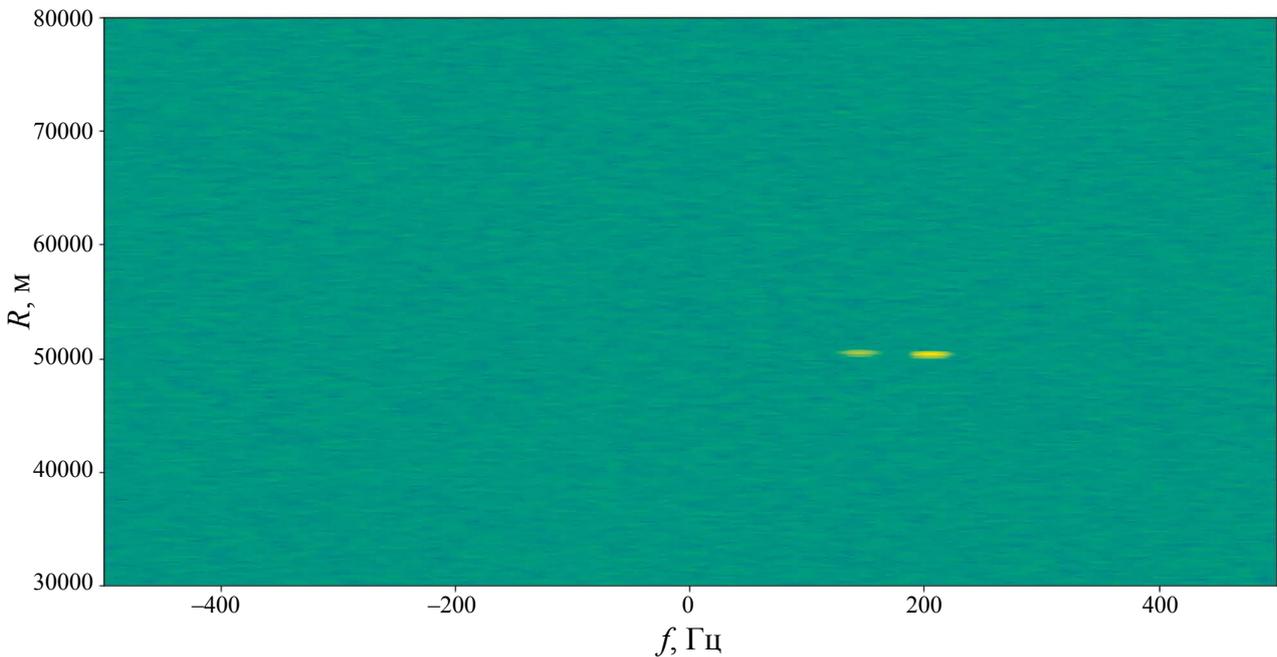


Рис. 4. Пример построенной матрицы «дальность–скорость»

Выводы

- В работе описаны основные математические модели, используемые в программном комплексе для построений траекторий аэродинамических, надводных и баллистических целей.
- Приведенная в работе модель динамики выполняет построение траекторий движения с расхождением в 7 % от траекторий,

получаемых путем решения полной системы уравнений гидродинамики [4]. В рамках данной работы такая погрешность приемлема с практической точки зрения.

- Используемый векторный метод расчета траекторных параметров аэродинамических целей с высокой точностью удовлетворяет граничным условиям и требует меньше вычислительных



ресурсов по сравнению с прямым методом (решение задачи оптимизации управления с уравнениями связей, задающих динамику цели) [7]. Следует отметить, что возникающие при использовании этого метода рассогласования являются незначительными даже при нехватке части технико-тактических характеристик цели.

- Точность расчета траекторных параметров баллистических целей по описанной математической модели зависит только от шага интегрирования и точности расчета g_r (радиальная составляющая ускорения свободного падения) и g_w (проекция ускорения свободного падения на ось, вокруг которой вращается Земля) [8]. Также существует возможность расчета траектории при ограниченном наборе данных.

- Простота реализации блока имитации выхода квадратурных каналов РЛС позволяет быстро получать отклик РЛС на цели. Полученные от блока данные можно сразу подвергнуть цифровой обработке, чтобы проверить их эффективность для разных конфигураций целей и разных параметров РЛС, чему также способствует учет низколетящих целей.

- Все описанные блоки объединены в единый программный комплекс. Приведен пример работы программы. Основная цель разработки – создать кросс-платформенный унифицированный комплекс расчета сложной фоноцелевой обстановки для отработки корабельных комплексов.

- Предложенные модели и их реализации позволяют обеспечить высокую вариативность начальных параметров фоноцелевой обстановки, кроме того, предложенная реализация позволяет проводить расчет параметров фоноцелевой обстановки в режиме, приближенном к реальному времени.

Список литературы

1. Валетов И. О., Шмигельский И. Ю. Конструктивно-технологические особенно-

сти стенда имитации фоноцелевой обстановки // *Известия вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58. № 4. С. 304–307.

2. Сюзиев В. В., Доденко И. А. Применимость высокодетализированной математической модели фоноцелевой обстановки в стендах моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия приборостроения*. 2017. № 6. С. 76–92.

3. Антонов К. А., Григорьев В. О., Сучков В. Б. и др. Вопросы реализации имитатора входных сигналов систем ближней радиолокации для полунатурного моделирования помех от подстилающей поверхности // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия приборостроения*. 2006. № 4. С. 45–59.

4. Войткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А. *Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость*. Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1960.

5. Ремез Ю. В. *Качка корабля*. Л.: Судостроение, 1983.

6. Андреева А. А., Шклярова Ю. О. Модель динамики управляемого судна // *Вестник ТГУ*. 2009. Т. 14. № 1. С. 234–241.

7. Гревцов Н. М., Мельц И. О. Формирование управления направлением движения для расчета траекторий в задачах целевого применения // *Ученые записки ЦАГИ*. 2007. Т. XXXVIII. № 3–4. С. 135–143.

8. Лебедев А. А., Герасюта Н. Ф. *Баллистика ракет*. Л.: Машиностроение, 1970.

9. Barton D. K. *Radar Equations for Modern Radar 2013 ARTECH HOUSE*.

10. Баскаков А. И., Исаков М. И., Егоров В. В. и др. Проблемы радиолокации морских льдов с буровых платформ в Арктике // *Журнал радиоэлектроники*. 2014. № 7. С. 1–27.

11. Шлее М. *Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++*. 2018.



Об авторах

Коновальчик Артем Павлович – канд. техн. наук, заместитель начальника НТЦ ВКО Акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны “Алмаз – Антей”», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в радиолокации, аэродинамике и баллистике, суперкомпьютерные технологии, трудоемкие алгоритмы.

Башкатов Алексей Александрович – канд. техн. наук, начальник конструкторского бюро специальных проектов НТЦ ВКО Акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны “Алмаз – Антей”», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в радиолокации, аэродинамике и баллистике, суперкомпьютерные технологии, трудоемкие алгоритмы.

Барский Владимир Геннадьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник НТЦ ВКО Акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны “Алмаз – Антей”», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в радиолокации, аэродинамике и баллистике, суперкомпьютерные технологии, трудоемкие алгоритмы.

Кудров Максим Александрович – канд. техн. наук, заведующий Лабораторией информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: разработка комплекса программ для компьютерного моделирования физических процессов.

Морозов Алексей Олегович – техник Лаборатории информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в аэродинамике и баллистике, объектно-ориентированное программирование.

Шиловский Алексей Иванович – техник Лаборатории информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в радиолокации, объектно-ориентированное программирование.

Хамраева Татьяна Викторовна – техник Лаборатории информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в аэродинамике, ГИС, объектно-ориентированное программирование.

Карасев Николай Дмитриевич – младший научный сотрудник Лаборатории информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в аэродинамике, ГИС, объектно-ориентированное программирование.

Назаров Артем Михайлович – инженер Лаборатории информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование в аэродинамике, объектно-ориентированное программирование.



Simulator of the target environment for shipboard weapon systems

Konovalchik A. P.¹, Bashkatov A. A.¹, Barsky V. G.¹, Kudrov M. A.², Morozov A. O.²,
Shilovsky A. I.², Khamraeva T. V.², Karasev N. D.², Nazarov A. M.²

¹ “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, JSC, Moscow, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation

In this paper, we consider the problem of simulating the target environment for shipboard weapon systems. Mathematical models presented in the paper simulate the operation of a sea-based radar station, as well as the movement of targets of various types. In order to achieve a high accuracy of calculations, numerous physical factors affecting the parameters of the target environment, including aerodynamic, surface and ballistic targets, are taken into account.

Keywords: radar station, radar targets, target environment, numerical simulation, solvers, vector method of forming trajectories of aerodynamic targets, differential equations, vector structure of spatial data.

Information about the authors

Konovalchik Artyom Pavlovich – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head, R&D Department, “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of radar systems, aerodynamics and ballistics, supercomputer technologies, time-consuming algorithms.

Bashkatov Aleksey Aleksandrovich – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Special Projects Design Bureau, R&D Department, “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of radar systems, aerodynamics and ballistics, supercomputer technologies, time-consuming algorithms.

Barsky Vladimir Gennadievich – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, R&D Department, “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of radar systems, aerodynamics and ballistics, supercomputer technologies, time-consuming algorithms.

Kudrov Maxim Aleksandrovich – Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Research interests: development of software for modelling and simulating physical processes.

Morozov Alexey Olegovich – Technician, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling in aerodynamics and ballistics, object-oriented programming.

Shilovsky Alexey Ivanovich – Technician, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of radar systems, object-oriented programming.

Khamraeva Tatyana Viktorovna – Technician, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling in aerodynamics, GIS, object-oriented programming.

Karasev Nikolay Dmitrievich – Junior Researcher, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling in aerodynamics, GIS, object-oriented programming.

Nazarov Artyom Mikhailovich – Engineer, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modeling in aerodynamics, object-oriented programming.