

**НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
Артиллерийской разведки  
(ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ)**

**NAVIGATION SYSTEMS OF ADVANCED  
ARTILLERY RECONNAISSANCE COMPLEXES  
(DIGITAL DOUBLES OF TRAFFIC ROUTES)**

*М.Б. Богданов, А.В. Прохорцов, А.Э. Соловьев, чл.-корр. РАН А.Н. Чуков*

*Тульский государственный университет*

*M.B. Bogdanov, A.V. Prohortsov, A.E. Solov'ev, A.N. Chukov*

Настоящий цикл статей посвящен вопросам создания навигационных систем для перспективных комплексов артиллерийской разведки малого и среднего радиуса действия, которые обладают рядом присущих только им особенностей. В данной статье рассматриваются цифровые двойники, имитирующие маршруты движения комплексов артиллерийской разведки, и предназначенные для отработки и виртуальных испытаний разрабатываемых систем топопривязки.

**Ключевые слова:** комплекс артиллерийской разведки, навигационная система, система топопривязки, навигационная задача, ориентация, датчик угловой скорости, акселерометр, погрешность, гирокомпасирование, маршрут движения.

This series of articles is devoted to the creation of navigation systems for promising artillery reconnaissance complexes of small and medium range, which have a number of unique features. This article discusses digital twins that simulate the routes of artillery reconnaissance complexes, and are intended for testing and virtual testing of the developed topography systems.

**Keywords:** artillery reconnaissance complex, navigation system, topography system, navigation task, orientation, angular velocity sensor, accelerometer, error, gyrocompassing, traffic route.

С целью сокращения числа натурных испытаний на этапе разработки системы топопривязки перспективных комплексов артиллерийской разведки малого и среднего радиуса [1, 7, 8], целесообразно предварительно оценить точность определения координат и углов ориентации носителя посредством математической модели системы топопривязки и цифровых двойников, имитирующие маршруты движения комплексов артиллерийской разведки. Цифровые двойники маршрутов движения должны воспроизводить тот спектр воздействий, который испытывают

чувствительные элементы и датчики, входящие в состав системы топопривязки. Поэтому, кроме непосредственно траектории движения, необходимо учесть сферичность Земли, Кориолисово ускорение, и т.д., а также место установки топопривязчика на борту носителя, конструктивные и технологические особенности изготовления блока чувствительных элементов.

В качестве модели общеземного эллипсоида (ОЗЭ) целесообразно пользоваться ОЗЭ ПЗ-90.11, параметры которого приведены в [2]. С ОЗЭ ПЗ-90.11 связана одноименная геоцен-

трическая система координат (СК) ПЗ-90.11  $O_{ПЗ} X_{ПЗ} Y_{ПЗ} Z_{ПЗ}$  (рис. 1), начало  $O_{ПЗ}$  которой находится в центре Земли, ось  $O_{ПЗ} Z_{ПЗ}$  направлена вдоль оси суточного вращения Земли к северному полюсу, ось  $O_{ПЗ} X_{ПЗ}$  лежит в плоскости экватора и направлена так, что плоскость  $X_{ПЗ} O_{ПЗ} Z_{ПЗ}$  совпадает с плоскостью Гринвичского меридиана, а ось  $O_{ПЗ} Y_{ПЗ}$  перпендикулярна осям  $O_{ПЗ} X_{ПЗ}$  и  $O_{ПЗ} Z_{ПЗ}$  и дополняет их до правой СК.

Положение носителя в СК  $O_{ПЗ} X_{ПЗ} Y_{ПЗ} Z_{ПЗ}$  задается углами долготы  $\lambda$ , географической широты  $\varphi$  и высотой  $H$  над средним уровнем моря.

За базовую систему координат, относительно которой вычисляются параметры ориентации, примем подвижную нормальную СК  $O X_g Y_g Z_g$  [3], начало  $O$  которой совмещено с центром масс носителя и движется вместе с ним, ось  $O X_g$  лежит в плоскости горизонта и направлена по касательной к меридиану на Север, ось  $O Y_g$  направлена по линии местной вертикали вверх, ось  $O Z_g$  лежит в плоскости горизонта и направлена по касательной к параллели на Восток. Проекция линейной скорости носителя на указанные оси определяется величинами  $V_N$ ,  $V_E$ ,  $V_H$  соответственно. Вращение базовой СК обусловлено как линейными скоростями носителя, так и сферичностью ОЗЭ. Соответственно проекции угловой скорости на указанную систему определяются выражениями

$$\Omega_{X_g} = \dot{\lambda} \cos \varphi, \quad \Omega_{Y_g} = \dot{\lambda} \sin \varphi, \quad \Omega_{Z_g} = -\dot{\varphi}.$$

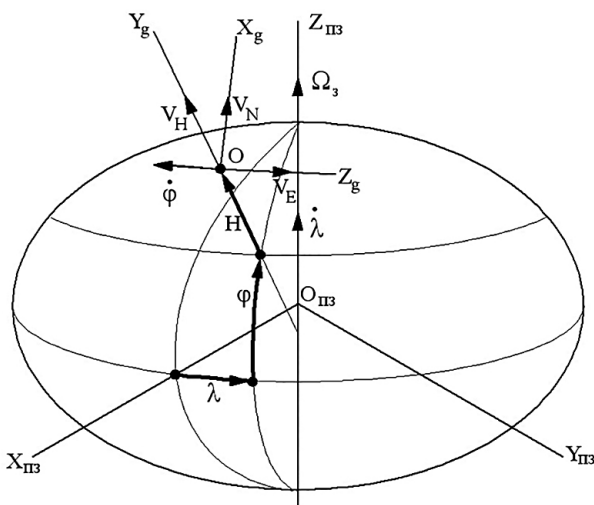


Рис. 1. Системы координат

Начало подвижной СК  $O X Y Z$ , связанной с носителем, располагается в его центре масс. Ось  $O X$  направлена по продольной оси, ось  $O Y$  — по нормальной оси, а ось  $O Z$  — перпендикулярна осям  $O X$  и  $O Y$  так, что дополняет их до правой тройки. Угловое положение носителя относительно базовой СК  $O X_g Y_g Z_g$  определяется углами рыскания  $\psi$ , тангажа  $\upsilon$  и крена  $\gamma$  (рис. 2).

Как правило, система топопривязки располагается не в центре масс носителя, относительно которого определены проекции вектора абсолютной угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}_j^a$  и проекции вектора линейного ускорения центра масс  $\mathbf{a}_j$  носителя на оси связанной СК.

Кроме того, оси чувствительных элементов системы топопривязки не совпадают с осями связанной СК. Указанные факты необходимо учитывать при построении цифровых двойников маршрутов движения комплексов артиллерийской разведки (рис. 3).

Смещение датчиков угловой скорости (ДУС) и акселерометров (АКС) относительно центра масс носителя определяется величиной  $\rho_B$ , общей для всех чувствительных элементов, а также векторами  $\bar{\rho}_{ДУСj}$  и  $\bar{\rho}_{АКСj}$  соответственно, где  $j = X, Y, Z$ , проекции которых на оси СК  $O_B X_B Y_B Z_B$  определяются величинами  $\rho_{ДУСjk}$  и  $\rho_{АКСjk}$ , где  $j = X, Y, Z$ ;  $k = X_B, Y_B, Z_B$ . Соответственно углы отклонения осей чувствительности ДУС и АКС от измерительных осей системы топопривязки определяется малыми углами  $\varepsilon_{jn}$  и  $\chi_{jn}$  соответственно, где  $j = X, Y, Z$ ;  $n = 1, 2$ .

Таким образом, при создании цифрового двойника траектории необходимо задавать параметры  $\rho_B$ ,  $\bar{\rho}_{ДУСj}$ ,  $\bar{\rho}_{АКСj}$ ,  $\varepsilon_{jn}$  и  $\chi_{jn}$ .

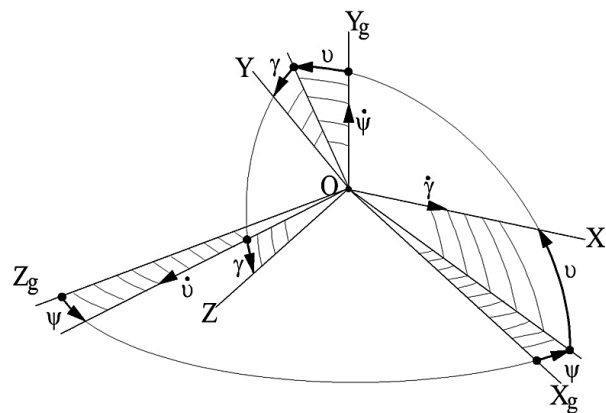


Рис. 2. Угловая ориентация носителя

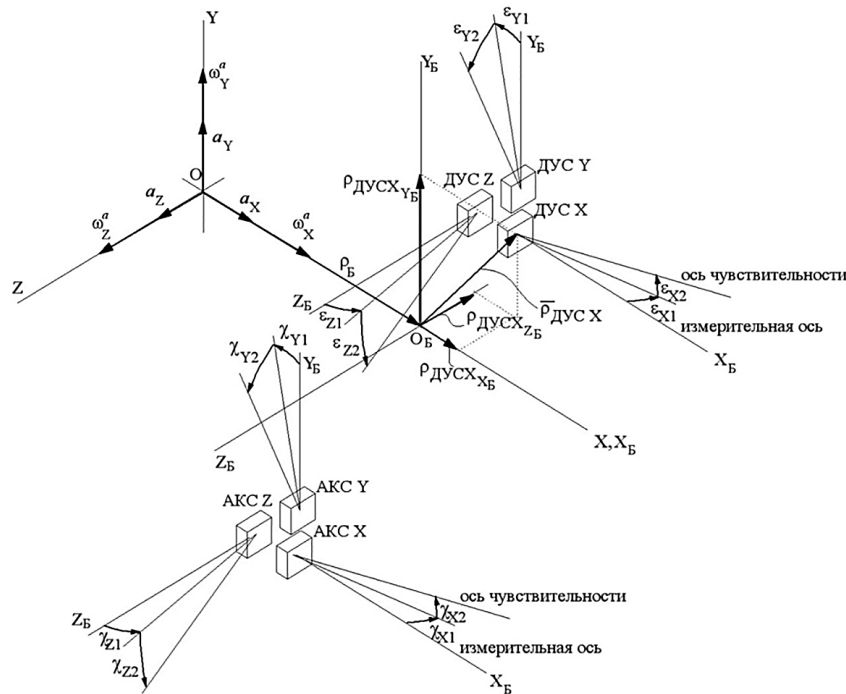


Рис. 3. Схема расположения чувствительных элементов

При проектировании цифрового двойника траектории необходимо задать перемещение центра масс носителя исходя из особенностей его движения. Причем желательно, чтобы эта траектория была замкнутой. Это позволяет, во-первых, сориентировать траекторию по меридиану, и, во-вторых, исследовать аппаратуру топопривязки как с учетом заданного непрерывного времени функционирования, так и с учетом заданных расстояний движения носителя. В качестве основных параметров траектории движения центра масс носителя целесообразно задавать: максимальную, минимальную и среднюю линейные скорости движения в горизонтальной плоскости; максимальную вертикальную скорость и перепад высот, максимальные линейные ускорения  $A_j''$  ( $j = X, Y, Z$ ), радиус и углы разворота. Конкретные значения указанных величин выбираются исходя из типа носителя. Один из возможных вариантов траектории для носителей на базе автомобилей семейства КАМАЗ приведен на рис. 4.

Также необходимо учитывать, что со стороны колесных носителей на аппаратуру топопривязки действуют нагрузки (ускорения), имеющие как случайный нерегулярный характер, так и непрерывный гармонический спектр частот [6].

Если рассматривать подвеску осей автомобиля как осциллятор с одной степенью свободы, то при действии на подвеску случайного нерегулярного воздействия с непрерывным спектром кузовов автомобиля будет совершать колебания на всех частотах данного спектра, однако на частотах, близких к собственным частотам конструктивных элементов (подвески, шины, рама, кузов и т.п.), амплитуда колебаний будет значительно выше. Собственные частоты конструктивных элементов колесного автомобиля лежат в трех диапазонах (табл. 1).

Предельные значения периодических составляющих виброускорений можно определить исходя из требований по прочности и надежности, предъявляемых к аппаратуре, устанавливаемой на колесных носителях. В соответствии с [4] аппаратура должна сохранять свою работоспособность в диапазоне частот от 1 до 500 Гц (или до 200 Гц для автомобилей массой свыше 14 тонн) с амплитудой 0,01 мм, что дает следующие предельные значения периодических составляющих виброускорений: 100 м/с<sup>2</sup> и 16 м/с<sup>2</sup> соответственно.

Эти предельные значения целесообразно разложить на несколько гармонических составляющих с учетом параметров, указанных в табл. 1. Для носителей на базе автомобилей семейства КАМАЗ (масса более 14 тонн) при

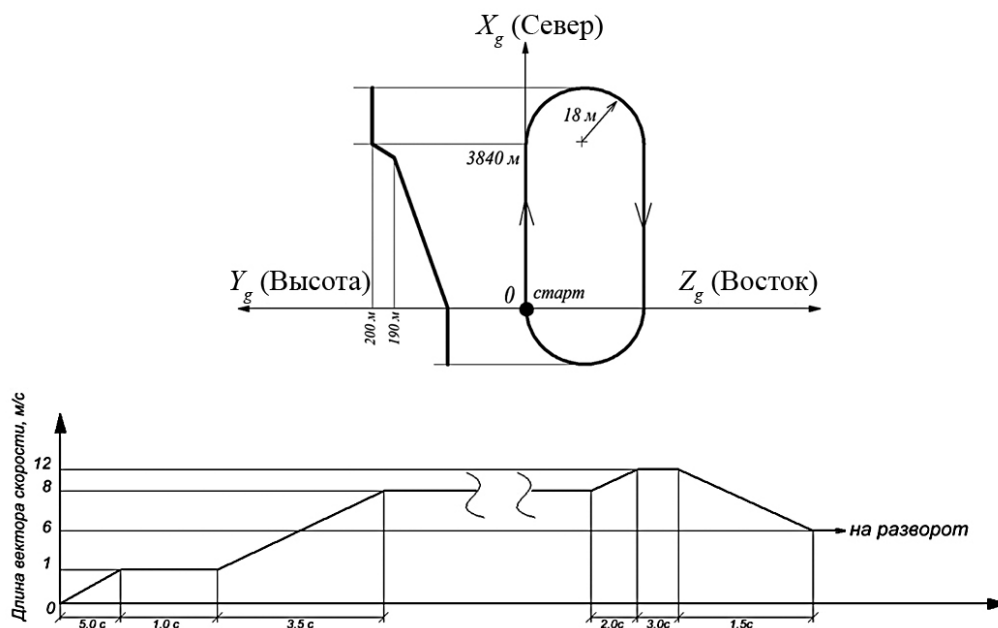


Рис. 4. Траектория движения центра масс носителя

Таблица 1

**Параметры линейной вибрации колесного носителя**

Диапазон частот, Гц	Амплитуда виброускорения, $m/c^2$	Примечания
2...5	не более 40	Собственные колебания подрессоренных масс. Максимальная амплитуда может достигать величин 180 мм
6...14		Собственные колебания на шинах неподресоренных масс. Амплитуда и частота зависит от давления воздуха в баллонах
10... сотни	не более 5	Вибрации от двигателя и резонансы рамы и кузова. Амплитуда вибраций порядка 0,01 мм

создании цифрового двойника траектории предлагается учитывать следующий спектр периодических составляющих виброускорений  $a_{j-k}^{gar}$  ( $j = X, Y, Z; k = 1...K$ ) (табл. 2).

Виброускорения, имеющие нерегулярный характер, целесообразно задать с помощью функции  $a_j^{rand} = rand(-A_{j-max}^{gar}, A_{j-max}^{gar})$ , ( $j = X, Y, Z$ ), генерирующей случайные значения в заданном диапазоне. Границы этого диапазона можно определить из максимально допустимых значений ускорений  $A_j^{TZ}$ , ( $j = X, Y, Z$ ), которые в обязательном порядке указываются в техническом задании:  $A_{j-max}^{gar} = A_j^{TZ} - \sum_{k=1}^K A_{j-k}^{gar} - A_j^{ir}$ . Значения виброскоростей и виброперемещений определяются путем интегрирования соответствующих ускорений.

Кроме линейных вибраций, необходимо учесть угловые, оказывающие влияние на показания ДУС. Угловые колебания по тангажу и крену имеют амплитуду до  $3^\circ$  и частоту 2 Гц и 6 Гц соответственно [5], что позволяет определить их скорости:  $\dot{\nu} = 0,66 \sin(4\pi t)$  и  $\dot{\gamma} = 2 \sin(12\pi t)$ .

Полученный цифровой двойник траектории (то есть воздействий, оказываемых на систему топопривязки при движении носителя) целесообразно использовать при предварительном проектировании, в том числе и для выбора чувствительных элементов и датчиков системы. Однако этот цифровой двойник является идеализированным, так как он не учитывает профиль (ямы, ухабы и т.д.) реального маршрута движения носителя. С целью моделирования такого профиля на колесном носителе были установлены:

Таблица 2

**Периодические составляющие виброускорений**

№ $k$ -й гармоники	Частота $f_k$ , Гц	Амплитуда $A_{j_k}^{gar}$ , м/с <sup>2</sup>
1	1,5	0,1
2	2,5	1,5
3	4	10,0
4	7	1,7
5	25	1,5
6	70	0,7
7	125	0,2
8	175	0,05

– спутниковая радионавигационная система ВU-353 для регистрации движения точки установки указанной системы относительно ОЗЭ, что позволило, после соответствующего пересчета исходных данных, определить широту, долготу и высоту носителя в СК ПЗ-90.11 при его движении по заданной траектории;

– бесплатформенная инерциальная навигационная система АИСТ-350, чувствительные элементы которой использовались для измерения параметров линейного и углового движения носителя, что позволило измерить угловые скорости и линейные ускорения в проекциях на оси, связанной с носителем СК.

В результате обработки экспериментальных данных путем обратного решения навигационной задачи с использованием математической модели системы топопривязки, получен цифровой двойник траектории, состоящий из двух блоков:

– блок параметров движения центра масс носителя, а именно: координаты движения в базовой СК ПЗ-90.11 (высота, Север, Восток), пройденный путь в плоскости горизонта, курс движения и наклон траектории (траекторный тангаж), а также скорости и ускорения перечисленных величин. Данный блок является одним из возможных, но более приближенных к реальности, вариантов траектории, приведенной на рис. 4;

– блок параметров движения носителя относительно центра масс, а именно: углы и угловые скорости рыскания, тангажа и крена.

Указанный цифровой двойник содержит 1680 секунд полного описания движения колесного носителя, что достаточно для целей моделирования условий работы системы топопри-

вязки, и позволяет с высокой степенью точности проводить анализ ее работы с целью выработки оптимальных конструктивных и алгоритмических решений.

**Литература**

1. Камышев В.В., Полковников С.П. АО «НИИ «Вектор» — старейшее радиотехническое предприятие России. — Ракетно-техническое и артиллерийско-техническое обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации. 2018, 2 часть. С. 139–141.

2. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11): справочный документ. — М.: Военно-топографическое управление Генерального Штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. 2014. 52 с.

3. ГОСТ 20058-80 Динамика ЛА в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Введ. 1980-12-30. — М.: Издательство стандартов, 1981. 54 с.

4. Письмо ГТК РФ от 11.08.97 № 01-15/15278 «О контроле за перемещениями картографических, топографических, аэрокосмических, геодезических и гравиметрических материалов»

5. ГОСТ РВ 20.39.304-98 Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. — М.: Стандартиформ. 2015. 54 с.

6. Ильинский В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. — М.: Радио и связь, 1982. 296 с.

7. Грязев М.В., Прохорцов А.В., Соловьев А.Э., Чуков А.Н. Навигационные системы перспективных комплексов артиллерийской разведки (Обзор существующих систем). Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2020. № 4. С. 84–89.

8. Грязев М.В., Смирнов В.А., Соловьев А.Э., Чуков А.Н. Навигационные системы перспективных комплексов артиллерийской разведки (Выбор способа гирокомпасирования и оценка его погрешности) // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1 (116). С. 94–100.