

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. А. В. Иванов^а, *, В. Ю. Шишкин^б, Д. В. Бойков^с, А. А. Иванов^д, Н. А. Лежнева^е

^аТамбовский государственный технический университет,
ул. Ленинградская, 1, Тамбов, 392036 Российская Федерация

^бГлавное управление научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) Министерства обороны Российской Федерации,
Фрунзенская набережная, 22/2, Москва, 119160 Российская Федерация

^сГлавное организационно-мобилизационное управление Генерального штаба Вооруженных сил,
Фрунзенская набережная, 22/2, Москва, 119160 Российская Федерация

^дМИРЭА – Российский технологический университет,
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация

^еПредставительство компании “Эрпорт Менеджмент Компани Лимитед”,
Аэропорт “Домодедово”, 1, Домодедово Московской обл., 142015 Российская Федерация

*E-mail: aleksandr-ivanov68@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2020 г.

После доработки 25.03.2021 г.

Принята к публикации 29.03.2021 г.

Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов синтезированы комплексные адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов на основе спутниковых радионавигационных систем. Алгоритмы позволяют выявлять аномальные измерения на выходе аппаратуры приема радиосигналов спутниковых радионавигационных систем, а также дополнительно осуществлять контроль целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем на основе использования информации от барометрического высотомера. Разработана структурная схема обработки информации в навигационном комплексе. Проведено компьютерное моделирование полученных адаптивных алгоритмов.

DOI: 10.31857/S0033849421080040

ВВЕДЕНИЕ

Бортовое оборудование современных подвижных наземных объектов для определения координат местоположения, параметров движения и пространственного положения продольных осей объекта включает навигационные комплексы (НК). В состав НК могут входить: датчик скорости движения; барометрический высотомер (БВ); гироскопическая система определения пространственного положения продольных осей объекта или инерциальная навигационная система (ИНС), которая помимо пространственного положения позволяет определять вектор скорости (ускорения) объекта; аппаратура приема сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС); доплеровский измеритель скорости; цифровой вычислитель; система отображения информации [1]. Состав навигационных комплексов может быть различным, но в любом случае он должен обеспечить решение задачи счисления координат местоположения

подвижного объекта и коррекцию результатов счисления, а также отображение информации о местоположении объекта.

Для синтеза алгоритмов обработки информации в НК широкое распространение получили статистические методы обработки информации – методы марковской теории оптимального оценивания случайных процессов, позволяющие получить оптимальные алгоритмы обработки [2–4]. При этом для создания алгоритмов комплексной оптимальной обработки информации в НК целесообразнее использовать методы марковской теории оптимального комплексирования измерителей [5]. Разработанные этими методами комплексные алгоритмы позволяют обеспечить высокую точность определения текущих координат местоположения и параметров движения объекта за счет совместной обработки информации, а также обеспечить несколько режимов работы НК, что повышает его надежность.

Для коррекции координат местоположения подвижных наземных объектов в современных НК используется аппаратура приема (АП) сигналов СРНС. Основными достоинствами СРНС являются глобальность и высокая точность определения координат местоположения и параметров движения объекта. Однако применение СРНС приводит к ряду проблем.

Первая проблема связана с тем, что в производный момент времени на точность выходных данных АП СРНС существенное влияние оказывают ошибки, возникающие при выполнении процедуры измерений. Данные ошибки обусловлены следующими причинами: возможность кратковременного отсутствия радиосигналов на входе АПСРНС из-за затенения приемной антенны; влияние канала распространения на радиосигнал (ионосферные задержки сигнала; тропосферные задержки сигнала); возникновением многолучевости распространения радиосигнала; радиопомехи. В результате измерения оказываются аномальными (искаженными).

Аномальные измерения возникают вследствие захвата следящей системой шумовых выбросов радиосигнала. Это возможно, например, в случае использования моделирующей псевдослучайной последовательности (ПСП), описываемой последовательностью импульсов прямоугольной формы, и малых отношениях сигнал/шум на входе приемного устройства.

Случай малых отношений сигнал/шум на входе приемного устройства характерен для СРНС, использующих шумоподобные сигналы. Подтверждением возможности аномальных измерений в АП СРНС является проведенное в [5] моделирование апостериорного распределения задержки ПСП, которое показало, что апостериорное распределение является многомодальным и сильно изрезанным. При этом положение точки максимума апостериорного распределения может существенно отличаться от истинного значения.

Величина ошибки определения псевдодальности до навигационного космического аппарата (НКА) следящей системой аппаратуры приема связана с длительностью импульса $\tau_{\text{и}}$ элементарной посылки псевдослучайной последовательности и лежит в пределах

$$[D_i^{\text{ист}} - c\tau_{\text{и}}, D_i^{\text{ист}} + c\tau_{\text{и}}],$$

где $D_i^{\text{ист}}$ — истинное значение псевдодальности до i -го, $i = \overline{1, 4}$, НКА рабочего созвездия, c — скорость света. Вероятность захвата шумовых выбросов распределена по равномерному закону [6], поэтому дисперсия ошибки определения псевдодальности до НКА при значении длительности импульса элементарной посылки псевдослучайной последовательности $\tau_{\text{и}} = 1 \times 10^{-6}$ с составляет

7500 м², а максимальная ошибка радиальной погрешности определения координат местоположения объекта при пересечении линий положения под углом 90° имеет значение порядка 245 м. Для исключения аномальных измерений целесообразно использовать подходы, предложенные в [7] и основанные на методе анализа вектора обновляемой последовательности или вектора невязок измерений для разработки адаптивных алгоритмов обработки информации.

Вторая проблема связана с тем, что навигационные данные, передаваемые с помощью радиосигналов СРНС, могут быть искажены под влиянием преднамеренных помех. Если АП СРНС является совмещенной и может работать по радиосигналам американской СРНС типа GPS, то существует возможность передачи ложной информации потребителям на определенных территориях о координатах НКА. Влияние преднамеренных помех или искусственный ввод неточных данных о координатах НКА приводит к существенным ошибкам определения текущих координат местоположения. Для борьбы с данным явлением необходимо использовать контроль целостности навигационных данных. Для создания автономной системы контроля целостности целесообразно ввести в состав НК дополнительно БВ [8].

Цель данной работы — методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов получить для НК подвижных наземных объектов комплексные адаптивные алгоритмы обработки информации, позволяющие выявлять аномальные измерения, а также дополнительно осуществлять контроль целостности навигационных данных СРНС.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть положение подвижного объекта в нормальной земной системе координат $OX_g Y_g Z_g$, начало которой удалено от центра Земли на величину R_0 , определяется координатами x, y, z . При этом ось OX_g направлена на север, ось OY_g — на восток, ось OZ_g — вверх по местной вертикали. В начальный момент времени t_0 объект имеет координаты x_0, y_0, z_0 .

Считаем, что на подвижном объекте установлен НК, включающий в свой состав датчик скорости (ДС) движения; ИНС и M -канальную АП сигналов СРНС, а также для контроля целостности навигационного обеспечения в состав навигационного комплекса введен БВ.

Рассмотрим определение координат и параметров движения подвижного объекта в горизонтальной плоскости $OX_g Y_g$ (горизонтальный канал) и вдоль вертикальной оси (вертикальный канал). При этом вертикальный канал дополнительно

используем для решения задачи целостности навигационного обеспечения с использованием информации от БВ.

Пусть ИНС представляет собой стабилизируемую в горизонтальной плоскости свободную в азимуте платформу, на которой установлены акселерометры. Начало инерциальной системы координат $OX_{и}Y_{и}Z_{и}$ совпадает с центром масс объекта. Начальная выставка осуществлена, при этом ось $OX_{и}$ направлена на север, оси $OY_{и}$ – на восток и $OZ_{и}$ – вверх по местной вертикали. Сигналы на выходе ИНС дискретизированы по времени и имеют следующий вид [9]:

$$\begin{aligned} a_X^{\text{ИНС}}(t_{k+1}) &= a_X(t_{k+1}) + \\ &+ \Delta_{aX}(t_{k+1}) + \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aX}(t_{k+1}); \\ a_Y^{\text{ИНС}}(t_{k+1}) &= a_Y(t_{k+1}) + \Delta_{aY}(t_{k+1}) + \\ &+ \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aY}(t_{k+1}); \\ a_Z^{\text{ИНС}}(t_{k+1}) &= a_Z(t_{k+1}) + \Delta_{aZ}(t_{k+1}) + \\ &+ g + \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aZ}(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_X^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$, $a_Y^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$ и $a_Z^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$ – измеренные значения составляющих вектора ускорения; g – ускорение свободного падения; α_a – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности, σ_a^2 – дисперсия флуктуационной погрешности; $t_{k+1} - t_k = T$ – интервал дискретизации; $n_{aX}(t_{k+1})$, $n_{aY}(t_{k+1})$, $n_{aZ}(t_{k+1})$ – взаимонезависимые выборки гауссовских процессов с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; $\Delta_{aX}(t_{k+1})$, $\Delta_{aY}(t_{k+1})$, $\Delta_{aZ}(t_{k+1})$ – постоянные составляющие погрешностей измерения ускорений

$$\begin{aligned} \Delta_{aX}(t_{k+1}) &= \Delta_{aX}(t_k), \quad \Delta_{aY}(t_{k+1}) = \Delta_{aY}(t_k), \\ \Delta_{aZ}(t_{k+1}) &= \Delta_{aZ}(t_k). \end{aligned} \quad (2)$$

Полагаем, что измерение относительной высоты при помощи БВ осуществляется относительно уровня, соответствующего точки начального движения подвижного наземного объекта. Удаление данной точки от центра Земли в геоцентрической (сферической) системе координат может быть задано значением $R_0 = R + H_p$, где R радиус-вектор геоцентрической (сферической) системы координат, H_p – высота рельефа местности в точке начального движения подвижного наземного объекта. Наблюдение на выходе БВ в непрерывном времени описано в [10], для дискретных моментов времени оно будет иметь вид

$$H_{\text{ОТН}}^{\text{БВ}}(t_{k+1}) = H_{\text{ОТН}}(t_{k+1}) + \Delta H(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}), \quad (3)$$

где $\Delta H(t_{k+1})$ и $u_{\text{БВ}}(t_{k+1})$ соответственно постоянная ошибка и флуктуационная погрешность, описываемые выражениями

$$\begin{aligned} \Delta H(t_{k+1}) &= \Delta H(t_k), \\ u_{\text{БВ}}(t_{k+1}) &= \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) u_{\text{БВ}}(t_k) + \gamma_u(t_{k+1}, t_k) n_u(t_k), \\ u_{\text{БВ}}(t_0) &= u_{\text{БВ}0}, \end{aligned} \quad (4)$$

в которых $\varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) = \exp(-\gamma_{\text{БВ}} T)$; $\gamma_u(t_{k+1}, t_k) = \sigma_{\text{БВ}} [1 - \varphi_{uu}^2(t_{k+1}, t_k)]^{0.5}$; $\gamma_{\text{БВ}}$ – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности, $\sigma_{\text{БВ}}^2$ – дисперсия флуктуационной погрешности; $n_u(t_k)$ – независимые выборки гауссовского процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Датчик скорости движения определяет земную скорость объекта вдоль продольной оси. Выходной сигнал датчика используем только для горизонтального канала. Зная пространственное положение продольной оси на основе информации от ИНС, можно определить проекции скорости на оси OX_g и OY_g . Выходные сигналы в дискретные моменты времени запишем в виде

$$\begin{aligned} V_X^{\text{ДС}}(t_{k+1}) &= V_X(t_{k+1}) + \sigma_{V_X} n_{V_X}(t_{k+1}); \\ V_Y^{\text{ДС}}(t_{k+1}) &= V_Y(t_{k+1}) + \sigma_{V_Y} n_{V_Y}(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $V_X^{\text{ДС}}(t_{k+1})$, $V_Y^{\text{ДС}}(t_{k+1})$ – измеренные значения составляющих скорости объекта; $n_{V_X}(t_{k+1})$, $n_{V_Y}(t_{k+1})$ – выборки взаимонезависимых гауссовских процессов с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; σ_{V_X} , σ_{V_Y} – среднеквадратические ошибки измерения скорости объекта.

Аппаратура приема сигналов СРНС обеспечивает прием радиосигналов СРНС ГЛОНАСС. Считаем, что преобразование выходных данных о местоположении объекта из системы координат ПЗ-90, в которой работает СРНС ГЛОНАСС, в нормальную земную систему координат выполнено.

В этом случае сигналы о координатах местоположения объекта в горизонтальной плоскости и по высоте относительно центра Земли на выходе АП в дискретные моменты времени аналогично [8] представим в виде

$$\begin{aligned} x^{\text{СРНС}}(t_{k+1}) &= x(t_{k+1}) + \sigma_x n_x(t_{k+1}); \\ y^{\text{СРНС}}(t_{k+1}) &= y(t_{k+1}) + \sigma_y n_y(t_{k+1}); \\ H^{\text{СРНС}}(t_{k+1}) &= H_{\text{ОТН}}(t_{k+1}) + R_0 + \sigma_z n_z(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $x^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $y^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ – измеренные значения координат местоположения объекта; $n_x(t_k)$, $n_y(t_k)$, $n_z(t_k)$ – выборки взаимонезависимых гауссовских процессов с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями;

$\sigma_x(t_k), \sigma_y(t_k), \sigma_z(t_k)$ – среднеквадратические ошибки измерения координат местоположения объекта.

Представление “полезного” сигнала $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ на выходе вертикального канала в АП сигналов СРНС через радиус-вектор R_0 позволяет определить относительную высоту $H_{\text{ОТН}}(t_{k+1})$ по выходным данным СРНС. Сравнение относительной высоты объекта, определенной СРНС, с данными БВ позволяет оценить постоянную ошибку определения относительной высоты БВ. Значение последней, как правило, не превышает некоторой максимально допустимой величины ΔH_{max} . В случае сбоя в работе АП сигналов СРНС или передачи неточных данных о координатах НКА значение относительной высоты, определяемой СРНС, будет значительно отличаться от относительной высоты, определяемой БВ. Если разница высот превысит максимально допустимую ошибку ΔH_{max} , то можно утверждать, что использовать информацию от данного рабочего созвездия НКА нельзя.

Задание математической модели объекта предполагает описание изменения его координат и параметров движения во времени. Изменение координат во времени можно задать системой дифференциальных уравнений вида [10]

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= V_X(t), & \frac{dy(t)}{dt} &= V_Y(t), & \frac{dH_{\text{ОТН}}(t)}{dt} &= V_Z(t); \\ \frac{dV_X(t)}{dt} &= a_X(t), & \frac{dV_Y(t)}{dt} &= a_Y(t), & \frac{dV_Z(t)}{dt} &= a_Z(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Дальнейшее задание модели требует задания модели изменения во времени ускорения объекта. Данная задача является довольно сложной, так как зависит от типа объекта, вида совершаемого им движения, и может быть решена только для отдельных случаев движения объекта, например движения с постоянным ускорением $a_X(t) = \text{const}$, $a_Y(t) = \text{const}$, $a_Z(t) = \text{const}$. Поэтому для задания модели объекта применим принцип распределения информации [10] между векторами наблюдения и управления. Согласно этому принципу значения составляющих ускорения объекта в математической модели (7) заменим на измеренные ИНС, т.е. выходные сигналы ИНС используем в качестве компонент вектора управления. В результате для дискретных моментов времени получим

$$\begin{aligned} x(t_{k+1}) &= x(t_k) + TV_X(t_k) + 0.5T^2 a_X^{\text{ИНС}}(t_k) - \\ &- 0.5T^2 \Delta_{aX}(t_k) - 0.5T^2 \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aX}(t_k); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} y(t_{k+1}) &= y(t_k) + TV_Y(t_k) + 0.5T^2 a_Y^{\text{ИНС}}(t_k) - \\ &- 0.5T^2 \Delta_{aY}(t_k) - 0.5T^2 \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aY}(t_k), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_X(t_{k+1}) &= V_X(t_k) + Ta_X^{\text{ИНС}}(t_k) - T\Delta_{aX}(t_k) - \\ &- T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aX}(t_k); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_Y(t_{k+1}) &= V_Y(t_k) + Ta_Y^{\text{ИНС}}(t_k) - \\ &- T\Delta_{aY}(t_k) - T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aY}(t_k); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{ОТН}}(t_{k+1}) &= H_{\text{ОТН}}(t_k) + TV_Z(t_k) + \\ &+ 0.5T^2 a_Z^{\text{ИНС}}(t_k) - 0.5T^2 \Delta_{aZ}(t_k) - \\ &- 0.5T^2 g - 0.5T^2 \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aZ}(t_k), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_Z(t_{k+1}) &= V_Z(t_k) + Ta_Z^{\text{ИНС}}(t_k) - T\Delta_{aZ}(t_k) - \\ &- Tg - T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5} n_{aZ}(t_k). \end{aligned} \quad (13)$$

В горизонтальном канале подлежащий оцениванию вектор состояния

$$\mathbf{X}_\Gamma(t_k) = [x(t_k), y(t_k), V_X(t_k), V_Y(t_k), \Delta_{aX}(t_k), \Delta_{aY}(t_k)]^T$$

включает шесть компонент и в соответствии с (2), (8)–(11) описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_\Gamma(t_{k+1}) &= \Phi_{\text{xx}\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_\Gamma(t_k) + \\ &+ \Psi_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_\Gamma(t_k) + \Gamma_{\text{x}\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{N}_{\text{x}\Gamma}(t_k), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\mathbf{W}_\Gamma = [a_X^{\text{ИНС}}, a_Y^{\text{ИНС}}]^T$ – известный вектор управления; $\mathbf{N}_{\text{x}\Gamma}(t_k) = [n_{aX}(t_k), n_{aY}(t_k)]^T$ – вектор формирующих стандартных гауссовских случайных величин; $\Phi_{\text{xx}\Gamma}$ – фундаментальная матрица размером (6×6) с ненулевыми элементами

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{xx}\Gamma_{11}} &= \Phi_{\text{xx}\Gamma_{22}} = \Phi_{\text{xx}\Gamma_{33}} = \Phi_{\text{xx}\Gamma_{44}} = \Phi_{\text{xx}\Gamma_{55}} = \Phi_{\text{xx}\Gamma_{66}} = 1, \\ \Phi_{\text{xx}\Gamma_{13}} &= \Phi_{\text{xx}\Gamma_{24}} = T, \\ \Phi_{\text{xx}\Gamma_{15}} &= \Phi_{\text{xx}\Gamma_{26}} = -0.5T^2, \\ \Phi_{\text{xx}\Gamma_{35}} &= \Phi_{\text{xx}\Gamma_{46}} = -T; \end{aligned}$$

Ψ_Γ – переходная матрица управления размером (6×2) с ненулевыми элементами

$$\Psi_{\Gamma_{11}} = \Psi_{\Gamma_{22}} = 0.5T^2, \quad \Psi_{\Gamma_{31}} = \Psi_{\Gamma_{42}} = T;$$

$\Gamma_{\text{x}\Gamma}$ – переходная матрица возмущения размером (6×2) с ненулевыми элементами

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{x}\Gamma_{11}} &= \gamma_{\text{x}\Gamma_{22}} = -0.5T^2 \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5}, \\ \gamma_{\text{x}\Gamma_{31}} &= \gamma_{\text{x}\Gamma_{42}} = -T \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5}. \end{aligned}$$

Вектор наблюдения для горизонтального канала

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_\Gamma(t_{k+1}) &= \\ &= [x^{\text{СРНС}}(t_{k+1}), y^{\text{СРНС}}(t_{k+1}), V_X^{\text{ДС}}(t_{k+1}), V_Y^{\text{ДС}}(t_{k+1})]^T \end{aligned}$$

включает сигналы на выходе СРНС и датчика скорости движения, и в дискретные моменты

времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, в соответствии с (5), (6) описывается выражением

$$\Xi_{\Gamma}(t_{k+1}) = \mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1})\mathbf{X}_{\Gamma}(t_{k+1}) + \mathbf{\Gamma}_{\Xi\Gamma}(t_{k+1})\mathbf{N}_{\Xi\Gamma}(t_{k+1}), \quad (15)$$

где $\mathbf{N}_{\Xi\Gamma}(t_{k+1}) = [n_x(t_{k+1}), n_y(t_{k+1}), n_{V_x}(t_{k+1}), n_{V_y}(t_{k+1})]^T$ – вектор шумов наблюдения; $\mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1})$ – матрица наблюдения размером (4×6) с ненулевыми элементами $h_{\Gamma 11} = h_{\Gamma 22} = h_{\Gamma 33} = h_{\Gamma 44} = 1$; $\mathbf{\Gamma}_{\Xi\Gamma}(t_{k+1})$ – матрица шумов наблюдения размером (4×4) с ненулевыми элементами

$$\gamma_{\Xi\Gamma 11} = \sigma_x, \quad \gamma_{\Xi\Gamma 22} = \sigma_y, \quad \gamma_{\Xi\Gamma 33} = \sigma_{V_x}, \quad \gamma_{\Xi\Gamma 44} = \sigma_{V_y}.$$

В вертикальном канале подлежащий оцениванию вектор состояния $\mathbf{X}_B(t_k) = [H_{\text{ОТН}}(t_k), V_Z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta a_Z(t_k)]^T$ включает четыре компоненты и в соответствии с (2), (4), (12), (13) описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_B(t_{k+1}) &= \mathbf{\Phi}_{\text{xxB}}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B(t_k) + \\ &+ \mathbf{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \mathbf{\Gamma}_{\text{xB}}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{N}_{\text{xB}}(t_k), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mathbf{W}_B = [a_Z^{\text{ИНС}}, g]^T$ – известный вектор управления; $\mathbf{N}_{\text{xB}}(t_k) = n_{aZ}(t_k)$ – формирующие стандартные гауссовские случайные величины; $\mathbf{\Phi}_{\text{xxB}}$ – фундаментальная матрица размером (4×4) с ненулевыми элементами $\phi_{\text{xxB}11} = \phi_{\text{xxB}22} = \phi_{\text{xxB}33} = \phi_{\text{xxB}44} = 1$, $\phi_{\text{xxB}12} = T$, $\phi_{\text{xxB}14} = -0.5T^2$, $\phi_{\text{xxB}24} = -T$; $\mathbf{\Psi}_B$ – переходная матрица управления размером (4×2) с ненулевыми элементами $\psi_{B11} = 0.5T^2$, $\psi_{B12} = -0.5T^2$, $\psi_{B21} = T$, $\psi_{B22} = -T$; и $\mathbf{\Gamma}_{\text{xB}}$ – переходной вектор возмущения размером (4×1) с ненулевыми элементами

$$\gamma_{\text{xB}11} = -0.5T^2\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5}, \quad \gamma_{\text{xB}21} = -T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0.5}.$$

Вектор наблюдения для вертикального канала $\Xi_B(t_{k+1}) = [\xi_1(t_{k+1}), \xi_2(t_{k+1})]^T$ включает наблюдения на выходе БВ $\xi_1(t_{k+1}) = H_{\text{ОТН}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$ и аппаратуры приема сигналов СРНС $\xi_2(t_{k+1}) = H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, которые в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, в соответствии с (3), (6) описываются выражениями

$$\begin{aligned} \xi_1(t_{k+1}) &= \mathbf{H}_1(t_{k+1})\mathbf{X}_B(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}); \\ \xi_2(t_{k+1}) &= \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{X}_B(t_{k+1}) + V_2 + \mathbf{\Gamma}_2(t_{k+1})\mathbf{N}_2(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (17)$$

где \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 – векторы наблюдения размером (1×4) с ненулевыми элементами $h_{11} = h_{13} = 1$, $h_{21} = 1$; $V_2 = R_0$ – известная величина; $\mathbf{\Gamma}_2 = \sigma_z$; $\mathbf{N}_2(t_{k+1}) = n_z(t_{k+1})$ – шум наблюдения.

Получим для НК подвижных наземных объектов комплексные адаптивные алгоритмы обработки информации в горизонтальном канале для

наблюдения (15) с учетом модели изменения вектора состояния (14) и в вертикальном канале для наблюдения (16) с учетом модели изменения (17). Алгоритмы должны выявлять аномальные изменения на выходе АП СРНС, а также осуществлять контроль целостности навигационных данных СРНС.

2. КОМПЛЕКСНЫЕ ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Для получения алгоритмов комплексной оптимальной обработки информации в НК используем методы марковской теории оптимального оценивания.

Для горизонтального канала, когда уравнение наблюдения (15) и модель изменения вектора состояния (14) являются линейными, оптимальная оценка определяется выражением [2–4, 10]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_{k+1}) &= \mathbf{\Phi}_{\text{xx}\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) + \mathbf{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k) + \\ &+ \mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1})[\Xi_{\Gamma}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1}) \times \\ &\times \mathbf{\Phi}_{\text{xx}\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1})\mathbf{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k)], \end{aligned} \quad (18)$$

где $\mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1})$ – матрица оптимальных коэффициентов передачи размером (6×6) определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1}) &= \mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}|t_k)\mathbf{H}_{\Gamma}^T(t_{k+1}) \times \\ &\times [\mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1})\mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}|t_k)\mathbf{H}_{\Gamma}^T(t_{k+1}) + \mathbf{\Gamma}_{\Xi\Gamma}(t_{k+1})\mathbf{\Gamma}_{\Xi\Gamma}^T(t_{k+1})]^{-1}; \\ \mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k) &= \mathbf{\Phi}_{\text{xx}\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}_{\Gamma}(t_k)\mathbf{\Phi}_{\text{xx}\Gamma}^T(t_{k+1}, t_k) + \\ &+ \mathbf{\Gamma}_{\text{x}\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{\Gamma}_{\text{x}\Gamma}^T(t_{k+1}, t_k); \\ \mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1})\mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1})]\mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k), \end{aligned} \quad (19)$$

в которых $\mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}|t_k)$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок прогнозирования размером (6×6) ; $\mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1})$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером (6×6) ; \mathbf{I} – единичная матрица размером (6×6) .

Представим матрицы, входящие в (18), в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \\ \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1}) &= [\mathbf{K}_{\Gamma 1}(t_{k+1}); \mathbf{K}_{\Gamma 2}(t_{k+1})], \\ \mathbf{\Xi}_{\Gamma}(t_{k+1}) &= [\Xi_{\Gamma 1}^T(t_{k+1}); \Xi_{\Gamma 2}^T(t_{k+1})]^T, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})$ и $\mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1})$ – матрицы размером (2×6) ; $\mathbf{K}_{\Gamma 1}(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_{\Gamma 2}(t_{k+1})$ – матрицы размером (6×2) ; $\mathbf{\Xi}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) = [x^{\text{СРНС}}(t_{k+1}), y^{\text{СРНС}}(t_{k+1})]^T$ – вектор, включающий сигналы на выходе СРНС; $\mathbf{\Xi}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) =$

$= [V_X^{DC}(t_{k+1}), V_Y^{DC}(t_{k+1})]^T$ – вектор, включающий сигналы на выходе датчика скорости движения.

С учетом представления матриц, входящих в алгоритм оценивания (18) в виде (20), алгоритм для оптимальной оценки (18) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_\Gamma^*(t_{k+1}) &= \Phi_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_\Gamma^*(t_k) + \Psi_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_\Gamma(t_k) + \\ &+ \mathbf{K}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \left[\Xi_{\Gamma 1}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \Phi_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{X}_\Gamma^*(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \Psi_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_\Gamma(t_k) \right] + \\ &+ \mathbf{K}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) \left[\Xi_{\Gamma 2}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) \Phi_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{X}_\Gamma^*(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) \Psi_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_\Gamma(t_k) \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Для выявления аномальных измерений аналогично [7] в алгоритме оценивания (19)–(21) используем критерий вида

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma^T(t_{k+1}) \boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma(t_{k+1}) &\leq \tilde{\gamma} \text{tr} \left[\mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \Phi_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{P}_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \Phi_{xx\Gamma}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_{\Gamma 1}^T(t_{k+1}) + \right. \\ &\quad \left. + \Gamma_{\Xi\Gamma 1}(t_{k+1}) \Gamma_{\Xi\Gamma 1}^T(t_{k+1}) \right], \end{aligned} \quad (22)$$

где $\tilde{\gamma}$ – весовой коэффициент, выбираемый из практических соображений; $\text{tr}[\dots]$ – обозначение следа матрицы, стоящей в квадратных скобках; $\Gamma_{\Xi\Gamma 1}(t_{k+1})$ – матрица размером (2×2) с ненулевыми элементами $\gamma_{\Xi\Gamma 11} = \sigma_x$, $\gamma_{\Xi\Gamma 22} = \sigma_y$; $\boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma(t_{k+1})$ – вектор обновляемой последовательности или вектор невязок измерений горизонтального канала

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma(t_{k+1}) &= \Xi_{\Gamma 1}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \Phi_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_\Gamma^*(t_k) - \\ &\quad - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \Psi_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_\Gamma(t_k), \end{aligned}$$

имеющий гауссовский закон распределения с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей вида

$$\begin{aligned} M[\boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma(t_{k+1}) \boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma^T(t_{k+1})] &= \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \Phi_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \\ \times \mathbf{P}_\Gamma(t_{k+1}, t_k) \Phi_{xx\Gamma}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_{\Gamma 1}^T(t_{k+1}) &+ \Gamma_{\Xi\Gamma 1}(t_{k+1}) \Gamma_{\Xi\Gamma 1}^T(t_{k+1}). \end{aligned}$$

В соответствии с критерием (22), аномальными считаются измерения, если сумма квадратов компонент вектора невязок в момент времени

$$\begin{aligned} \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) &= \left[\frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1(t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k)} \right]; \\ \mathbf{B}_{xy} &= [\Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) | \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1})]; \\ \mathbf{B}_{yy} &= \left[\frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) - \varphi_{uu}^2(t_{k+1}, t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1^T(t_{k+1})} \middle| \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1})}{\mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Gamma_{xB}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{xB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2^2(t_k)} \right]. \end{aligned}$$

Для выявления аномальных измерений в алгоритме оценивания (23), (24), аналогично, как и в горизонтальном канале, используем критерий вида

t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, превышает величину, стоящую в правой части выражения (22). Для случая взаимонезависимых компонент вектора невязок можно показать, что если необходимо обеспечить выполнение условия (22) с вероятностью 0.997, то необходимо взять весовой коэффициент равным $\tilde{\gamma} = 9$, а если с вероятностью 0.954, то необходимо взять $\tilde{\gamma} = 4$. Таким образом, величину аномального уровня можно варьировать с помощью весового коэффициента $\tilde{\gamma}$.

Для вертикального канала, когда наблюдения описываются уравнениями (17), а модель изменения вектора состояния – уравнением (16), оптимальная оценка определяется выражением [2–4, 10]:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_B^*(t_{k+1}) &= \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_B^*(t_k) + \Psi_B(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_B(t_k) + \\ &\quad + \mathbf{K}_1(t_{k+1}) [\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \xi_1(t_k) - \\ &\quad - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Psi_B(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_B(t_k) + \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \times \\ &\quad \times \mathbf{H}_1(t_k) \mathbf{X}_B^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_B^*(t_k)] + \\ &\quad + \mathbf{K}_2(t_{k+1}) [\xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Psi_B(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_B(t_k) - \\ &\quad - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_B^*(t_k)], \end{aligned} \quad (23)$$

где $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$ вектор-столбцы размером (4×1) матрицы оптимальных коэффициентов передачи

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})],$$

определяемой соотношениями

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(t_{k+1}) &= [\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) + \\ &\quad + \mathbf{B}_{xy}] [\mathbf{B}_{yy}^{-1} + \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^{-1}; \\ \mathbf{P}_B(t_{k+1}) &= \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k) - \\ &\quad - \mathbf{K}(t_{k+1}) [\mathbf{B}_{xy} + \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^T, \end{aligned} \quad (24)$$

в которых $\mathbf{P}_B(t_{k+1})$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером (4×4) ; $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$, \mathbf{B}_{xy} , \mathbf{B}_{yy} – блочные матрицы:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}^2(t_{k+1}) &\leq \tilde{\gamma} \text{tr} [\mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}_B(t_k) \times \\ &\quad \times \Phi_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2(t_{k+1}) \Gamma_2(t_{k+1})], \end{aligned} \quad (25)$$

где $\varepsilon_{B2}(t_{k+1})$ – величина обновляемой последовательности или невязка измерения в вертикальном канале

$$\varepsilon_{B2}(t_{k+1}) = \xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k), \quad (26)$$

представляющая собой гауссовскую случайную величину с нулевым математическим ожиданием и дисперсией

$$M[\varepsilon_{B2}^2(t_{k+1})] = \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}_B(t_k) \times \boldsymbol{\Phi}_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2(t_{k+1})\Gamma_2(t_{k+1}).$$

Исходя из представленного критерия (25) аномальными считаются измерения, если квадрат невязки в момент времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, превышает величину, стоящую в правой части выражения (25). Значение коэффициента $\tilde{\gamma}$ выбирается аналогично, как и в горизонтальном канале.

С учетом изложенного выше комплексные алгоритмы обработки информации в НК подвижных наземных объектов имеют различный вид.

Если выполняются совместно два условия:

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{\Gamma 1}^T(t_{k+1})\varepsilon_{\Gamma 1}(t_{k+1}) \leq \\ & \leq \tilde{\gamma} \operatorname{tr}[\mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \\ & \times \boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_{\Gamma 1}^T(t_{k+1}) + \Gamma_{\Xi\Gamma 1}(t_{k+1})\Gamma_{\Xi\Gamma 1}^T(t_{k+1})], \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{B2}^2(t_{k+1}) \leq \\ & \leq \tilde{\gamma} \operatorname{tr}[\mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}_B(t_k)\boldsymbol{\Phi}_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k) \times \\ & \times \mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2(t_{k+1})\Gamma_2(t_{k+1}) + \\ & + \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Gamma}_{xB}(t_{k+1}, t_k)\boldsymbol{\Gamma}_{xB}^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1})], \end{aligned}$$

то оценки $\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_{k+1})$ и $\mathbf{X}_B^*(t_{k+1})$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_{k+1}) = & \boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) + \boldsymbol{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k) + \\ & + \mathbf{K}_{\Gamma 1}(t_{k+1})[\boldsymbol{\Xi}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \\ & \times \mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k)] + \\ & + \mathbf{K}_{\Gamma 2}(t_{k+1})[\boldsymbol{\Xi}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \\ & \times \mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k)], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_B^*(t_{k+1}) = & \boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k) + \boldsymbol{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \\ & + \mathbf{K}_1(t_{k+1})[\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k)\xi_1(t_k) - \\ & - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \times \\ & \times \mathbf{H}_1(t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k)] + \\ & + \mathbf{K}_2(t_{k+1})[\xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) - \\ & - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k)]. \end{aligned} \quad (28)$$

Если выполняется хотя бы одно из условий:

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{\Gamma 1}^T(t_{k+1})\varepsilon_{\Gamma 1}(t_{k+1}) > \\ & > \tilde{\gamma} \operatorname{tr}[\mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k) \times \\ & \times \boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_{\Gamma 1}^T(t_{k+1}) + \Gamma_{\Xi\Gamma 1}(t_{k+1})\Gamma_{\Xi\Gamma 1}^T(t_{k+1})] \end{aligned} \quad (29)$$

или

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{B2}^2(t_{k+1}) > \tilde{\gamma} \operatorname{tr}[\mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}_B(t_k) \times \\ & \times \boldsymbol{\Phi}_{xxB}^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2(t_{k+1})\Gamma_2(t_{k+1}) + \\ & + \mathbf{H}_2(t_{k+1})\boldsymbol{\Gamma}_{xB}(t_{k+1}, t_k)\boldsymbol{\Gamma}_{xB}^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1})], \end{aligned} \quad (30)$$

то оценки $\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_{k+1})$ и $\mathbf{X}_B^*(t_{k+1})$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_{k+1}) = & \boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) + \boldsymbol{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k) + \\ & + \mathbf{K}_{\Gamma 2}(t_{k+1})[\boldsymbol{\Xi}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1}) \times \\ & \times \boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_{\Gamma}^*(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k)], \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_B^*(t_{k+1}) = & \boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k) + \\ & + \boldsymbol{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \\ & + \mathbf{K}_1(t_{k+1})[\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k)\xi_1(t_k) - \\ & - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \\ & + \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1(t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k) - \\ & - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k)]. \end{aligned} \quad (32)$$

Входящие в выражение (27), (31) матрицы $\mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})$, $\mathbf{H}_{\Gamma 2}(t_{k+1})$, $\mathbf{K}_{\Gamma 1}(t_{k+1})$, $\mathbf{K}_{\Gamma 2}(t_{k+1})$ являются составными матрицами блочных матриц $\mathbf{H}_{\Gamma}(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1})$. При этом матрица $\mathbf{K}_{\Gamma}(t_{k+1})$ определяется в соответствии с выражениями (19).

Входящие в выражение (28), (32) $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$ являются вектор-столбцами матрицы оптимальных коэффициентов передачи

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})],$$

которая определяется выражениями (24).

Алгоритмы (27)–(32) представляют собой комплексные адаптивные алгоритмы обработки информации в НК подвижных объектов и позволяют проинформировать оценивание координат местоположения и составляющих вектора скорости движения объекта при аномальных измерениях.

Для контроля целостности, аналогично [8], дополнительно предлагается использовать оценку постоянной составляющей ошибки относительной высоты ΔH^* БВ. Определение оценки постоянной составляющей ошибки относительной высоты ΔH^* , измеряемой БВ, и сравнение этого значения с максимально допустимым значением ΔH_{\max} позволяет осуществить контроль целостности навигации.

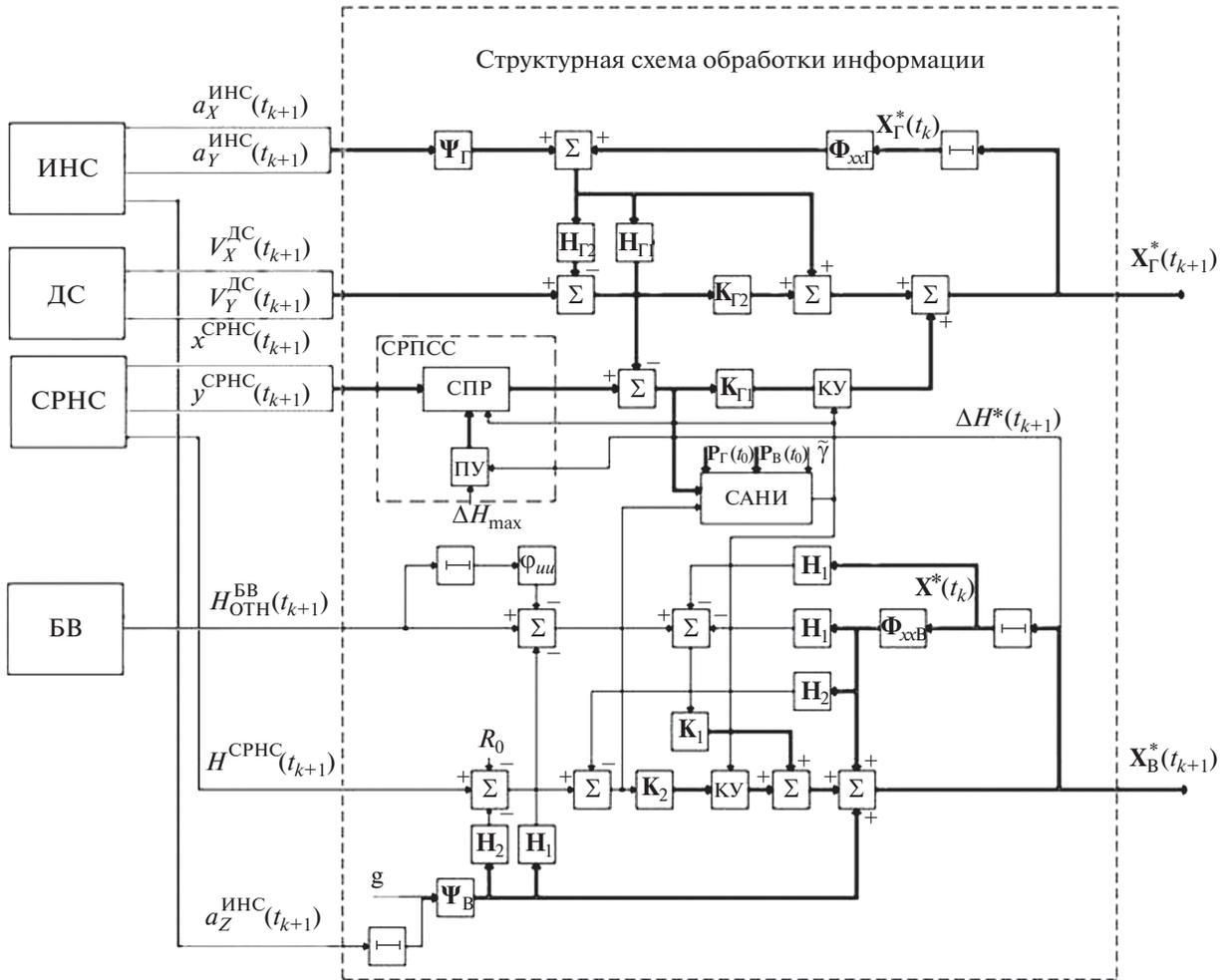


Рис. 1.

гационного обеспечения для случая медленных изменений навигационных данных.

Структурная схема обработки информации в НК подвижных объектов, синтезированная в соответствии с алгоритмом (27)–(32), представлена на рис. 1. В состав схемы входят сумматоры, усилители, ключевые устройства и линии задержки. Отличительной особенностью предложенной схемы обработки информации является возможность выявления аномальных измерений и адаптация к ним. С этой целью в состав схемы введена схема анализа невязок измерений (САНИ) СРНС и ключевые устройства (КУ), которые разрешают или запрещают прохождение сигналов СРНС. На САНИ поступают сигналы с выходов сумматоров, представляющие собой невязку измерений $\epsilon_{\Gamma}(t_{k+1})$ сигналов СРНС в горизонтальной плоскости и невязку измерений $\epsilon_{B2}(t_{k+1})$ сигналов СРНС в вертикальной плоскости. В САНИ проверяются условия (29), (30), для этого на схему также подаются значения матриц вторых цен-

тральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания $P_{\Gamma}(t_0)$ и $P_B(t_0)$ в начальный момент времени и значение коэффициента γ , определяющего уровень допустимых значений отклонений. Вычисление значений матриц вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания $P_{\Gamma}(t_k)$ и $P_B(t_k)$ в схеме осуществляется в соответствии с выражениями (19) и (24) соответственно. Сигнал с выхода САНИ поступает на ключевые устройства, которые разрешают или запрещают использование невязок измерений для корректирования оценок векторов состояния $X_{\Gamma}^*(t_{k+1})$ и $X_B^*(t_{k+1})$, а также на схему принятия решения (СПР).

Для контроля целостности медленно изменяющихся навигационных данных СРНС используется схема разрешения использования сигналов спутников (СРИСС). Схема включает в свой состав СПР и пороговое устройство (ПУ), порог которого соответствует максимально допустимому значению постоянной составляющей ошибки относи-

тельной высоты ΔH_{\max} . На вход ПУ поступает оценка постоянной составляющей ошибки относительной высоты $\Delta H^*(t_{k+1})$. ПУ выдает сигнал на СПР при превышении значения оценки постоянной составляющей ошибки относительной высоты максимально допустимого значения ΔH_{\max} . СПР запрещает прохождение выходных сигналов АП СРНС $x^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ и $y^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ для определения горизонтальных координат местоположения и параметров движения подвижного объекта только в том случае, если выполняется условие $\Delta H^*(t_{k+1}) \geq \Delta H_{\max}$ и отсутствует сигнал от САНИ.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Проверка работоспособности разработанных алгоритмов, позволяющих осуществлять контроль целостности навигационного обеспечения, проводилась путем статистического компьютерного моделирования. Рассматривалось два случая: в первом моделировались алгоритмы без использования анализа невязок измерений, во втором случае проводилось сравнение невязок измерений с заданными порогами и оценки находились в соответствии с выражениями (27)–(32).

3.1. Моделирование алгоритмов вертикального канала

Моделирование сигнала $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе АП радиосигналов СРНС, описываемого выражением (6), проводилось при значениях $R_0 = 6371110$ м; $H_{\text{ОТН}}(t_k) = 1000$ м, $k = 0, 1, 2, \dots$; $\sigma_z = 7$ м.

Моделирование сигнала $H_{\text{ОТН}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе БВ, описываемого выражениями (3), (4), осуществлялось при следующих исходных данных: $\Delta H(t_{k+1}) = 7$ м, $k = 0, 1, 2, \dots$; $T = 0.02$ с; $\gamma_{\text{БВ}} = 10$ с⁻¹ и $\sigma_{\text{БВ}} = 1$ м. Предполагалось, что объект движется на высоте, которая превышает радиус-вектор геоцентрической системы координат R на 1000 м.

Моделирование сигнала $a_z^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе ИНС, описываемого выражениями (1), (2), осуществлялось при следующих исходных данных: $\alpha_a = 50$ с⁻¹; $\sigma_a = 0.03$ м/с²; $\Delta_{az}(t_{k+1}) = 0, 2$ м/с², $k = 0, 1, 2, \dots$.

Для вычисления оценок вектора состояния $X_B(t_{k+1})$ использовали выражение (23), для вычисления матрицы оптимальных коэффициентов переда-

чи $K(t_{k+1})$ – выражение (24). Начальные значения вторых центральных моментов ошибок оценивания компонент вектора состояния вертикального канала брали следующими: $p_{11}(t_0) = 300$ м², $p_{22}(t_0) = 20$ м²/с², $p_{33}(t_0) = 625$ м², $p_{44}(t_0) = 0.01$ м²/с⁴.

Значение порога δ_B вычисляли в соответствии с правой частью выражения (25) при значении $\tilde{\gamma} = 9$, значение невязки измерений – в соответствии с выражением (26).

Был рассмотрен случай, когда на 6-й секунде произошло anomальное измерение псевдодальности до одного из НКА рабочего созвездия и значение измеренной высоты на выходе АП по данным СРНС изменилось в виде резкого скачка, став больше высоты по данным БВ на 100 м. Длительность anomальных измерений составила 10 с. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Реализация изменения во времени выходного сигнала $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, АП СРНС изображена на рис. 2а, реализации изменения во времени квадрата невязки измерений $\varepsilon_{B2}^2(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и порога δ_B – на рис. 2б.

На рис. 2в представлены реализации изменения во времени оценки относительной высоты объекта $H_{\text{ОТН}}^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, с использованием (кривая 1) и без использования (кривая 2) разработанных алгоритмов.

На рис. 2г представлены реализации изменения во времени оценки вертикальной составляющей скорости объекта $V_Z^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, с использованием (кривая 1) и без использования (кривая 2) разработанных алгоритмов.

На рис. 2д представлены реализации изменения во времени оценки постоянной составляющей ошибки относительной высоты $\Delta H^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, БВ с использованием (кривая 1) и без использования (кривая 2) разработанных алгоритмов.

Разработанные алгоритмы позволяют повысить точность оценивания относительной высоты объекта (отклонение оценки от истинного значения уменьшилось со 140 до 8 м), вертикальной составляющей скорости объекта (отклонение оценки от истинного значения уменьшилось с 50 до 2.5 м/с) и постоянной составляющей ошибки относительной высоты (отклонение оценки от истинного значения уменьшилось с 65 до 1.5 м) за счет выявления anomальных измерений выходного сигнала АП СРНС и исключения невязки измерений данного сигнала из алгоритмов обработки.

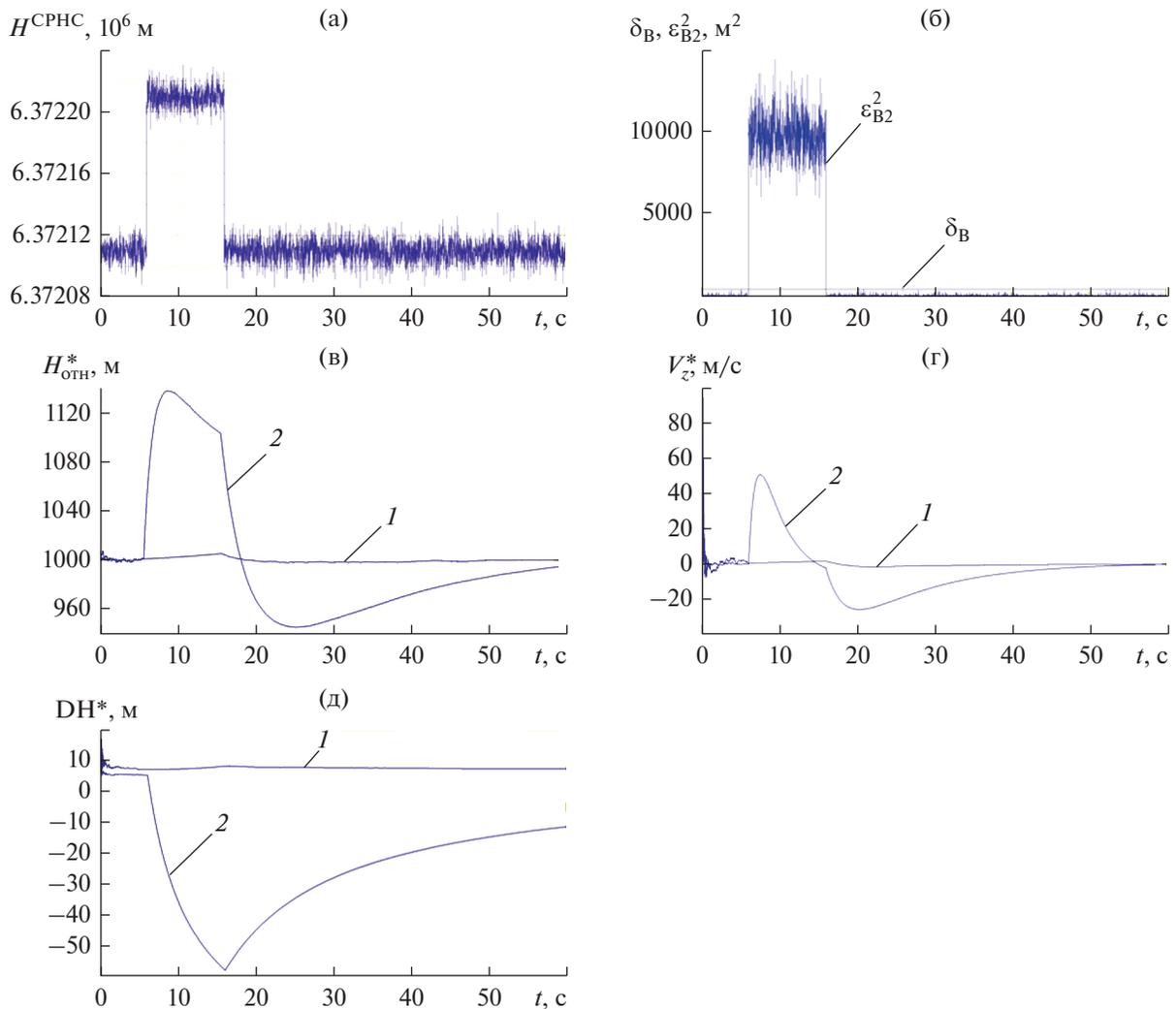


Рис. 2.

3.2. Моделирование алгоритмов горизонтального канала

Моделирование сигналов $x^{CPHC}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и $y^{CPHC}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе АП радиосигналов СРНС, описываемых выражением (6), проводилось при значениях $\sigma_x(t_k) = 5$ м, $\sigma_y(t_k) = 5$ м.

Моделирование составляющих вектора скорости объекта $V_X^{DC}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и $V_Y^{DC}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе ДС, описываемых выражениями (5), осуществлялось при следующих исходных данных: $\sigma_{V_x} = \sigma_{V_y} = 2$ м/с. Предполагалось, что объект движется с постоянной скоростью по осям OX_g и OY_g . При этом составляющие вектора скорости имеют значения $V_X(t_{k+1}) = V_Y(t_{k+1}) = 8$ м/с.

Моделирование сигналов $a_X^{ИНС}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и $a_Y^{ИНС}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе ИНС, описываемых выражениями (1) и (2), осуществлялось при следующих исходных данных: $\alpha_a = 50$ с⁻¹; $\Delta_{aX}(t_{k+1}) = \Delta_{aY}(t_{k+1}) = 0.2$ м/с², $k = 0, 1, 2, \dots$; $\sigma_a = 0,03$ м/с².

Для вычисления оценок вектора состояния $X_\Gamma(t_{k+1})$ было использовано выражение (18), для вычисления матрицы оптимальных коэффициентов передачи $K_\Gamma(t_{k+1})$ – выражение (19). Начальные значения вторых центральных моментов ошибок оценивания компонент вектора состояния горизонтального канала брали следующими: $p_{11}(t_0) = 300$ м², $p_{22}(t_0) = 300$ м², $p_{33}(t_0) = 20$ м²/с², $p_{44}(t_0) = 20$ м²/с², $p_{55}(t_0) = 0.01$ м²/с⁴, $p_{66}(t_0) = 0.01$ м²/с⁴.

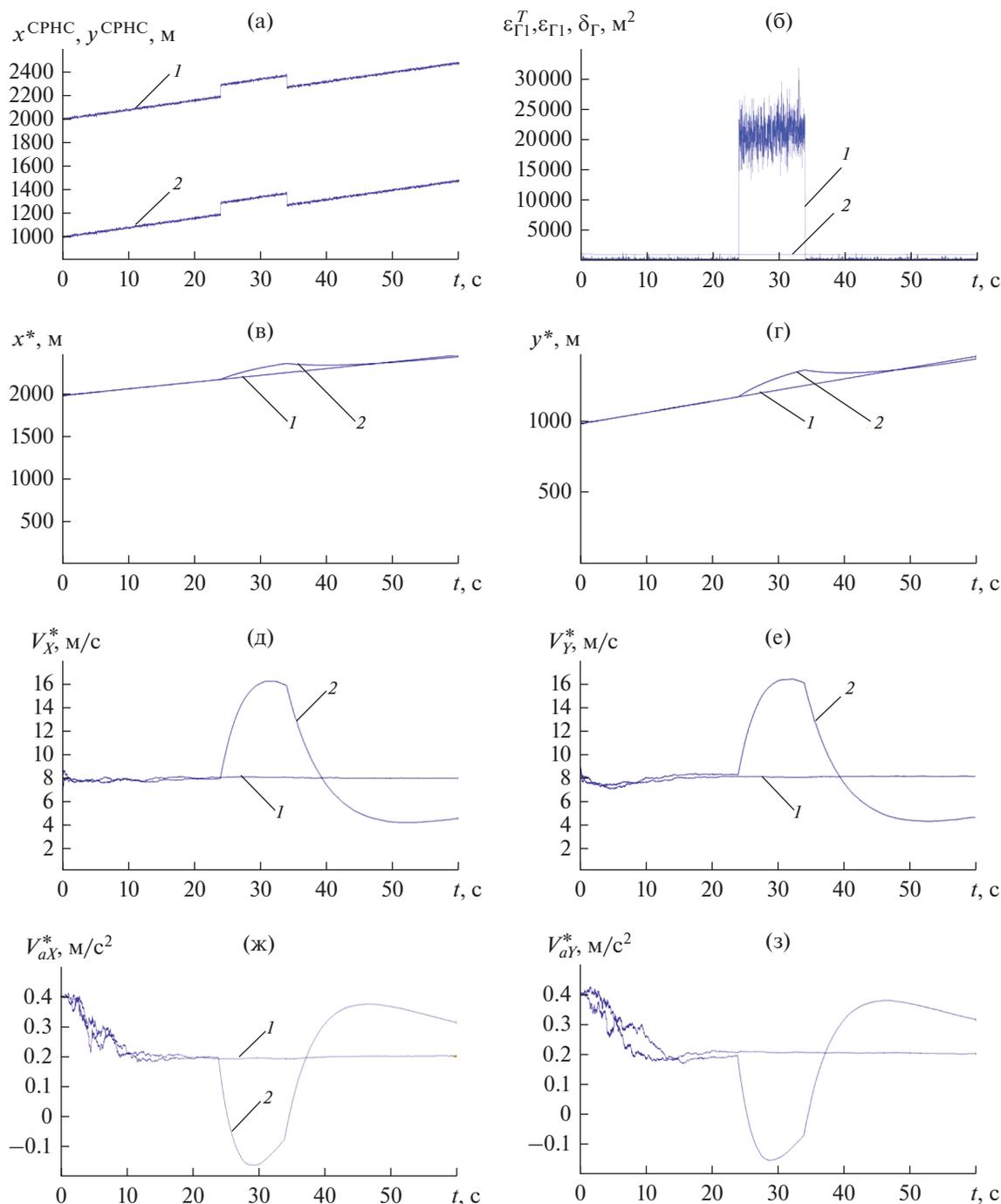


Рис. 3.

Значение порога δ_Γ вычисляли в соответствии с правой частью выражения (22) при значении $\tilde{\gamma} = 9$. Вектор невязок измерений горизонтального канала вычисляли в соответствии с выражением

$$\boldsymbol{\varepsilon}_\Gamma(t_{k+1}) = \boldsymbol{\Xi}_\Gamma(t_{k+1}) - \mathbf{H}_\Gamma(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_\Gamma^*(t_k) - \mathbf{H}_\Gamma(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_\Gamma(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_\Gamma(t_k).$$

Был рассмотрен случай, когда на 24-й секунде произошло anomalous измерение псевдодално-

сти до одного из НКА рабочего созвездия и значения измеренных координат по осям OX_g и OY_g на выходе АП по данным СРНС изменились в виде резкого скачка на 100 м. Длительность anomalous измерений составила 10 с. Результаты проведенного моделирования представлены на рис. 3.

На рис. 3а представлены реализации изменения во времени выходных сигналов $x^{\text{CPNC}}(t_{k+1})$,

$k = 0, 1, 2, \dots$ (кривая 1) и $y^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$ (кривая 2) аппаратуры приема СРНС.

На рис. 3б представлены реализации изменения во времени случайной величины $\epsilon_{\Gamma}^T(t_{k+1})\epsilon_{\Gamma}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$ (кривая 1), где $\epsilon_{\Gamma}(t_{k+1})$ вектор невязок измерений горизонтального канала, и порога δ_{Γ} (кривая 2), соответствующего правой части соотношения (22). Возникновение аномальных измерений сигнала на выходе АП СРНС в измерениях координат объекта по осям OX_g и OY_g (см. рис. 3а) в виде скачков на величину 100 м приводит к резкому изменению величины $\epsilon_{\Gamma}^T(t_{k+1})\epsilon_{\Gamma}(t_{k+1})$ и повышению ею величины порога δ_{Γ} .

На рис. 3в и 3г представлены реализации изменения во времени оценок координат местоположения объекта по оси $OX_g x^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и по оси $OY_g y^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, соответственно, с использованием (кривая 1) и без использования (кривая 2) разработанных алгоритмов.

На рис. 3д и 3е представлены реализации изменения во времени оценок скоростей передвигания объекта по оси $OX_g V_x^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и по

оси $OY_g V_y^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, соответственно, с использованием (кривая 1) и без использования (кривая 2) разработанных алгоритмов. На рис. 3ж и 3з представлены реализации изменения во времени оценок постоянных составляющих погрешностей измерения ускорения акселерометром по оси

$OX_g \Delta_{ax}^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и по оси $OY_g \Delta_{ay}^*(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, соответственно, с использованием (кривая 1) и без использования (кривая 2) разработанных алгоритмов.

Анализ зависимостей изменения оценок координат местоположения объекта, оценок скоростей передвигания объекта и оценок постоянных составляющих погрешностей измерений ускорений акселерометрами по осям OX_g и OY_g без использования разработанных алгоритмов (кривая 2) показывает, что возникновение аномальных измерений сигнала на выходе АП СРНС приводит к их изменению в сторону увеличения. Величины отклонения от истинного значения по осям OX_g и OY_g максимальны к окончанию воздействия аномального измерения и составляют: для координат местоположения объекта порядка 200 м; для скоростей передвигания объекта порядка 8 м/с; для постоянных составляющих погрешностей измерения ускорений акселерометрами порядка 0.35 м/с^2 (кривые 1 на рисунках).

Разработанные алгоритмы позволяют повысить точность оценивания за счет выявления аномальных измерений выходных сигналов АП СРНС и исключения невязок измерений данных сигналов из алгоритмов обработки (кривые 1 на рисунках). Так, например, отклонения оценок скоростей объекта по осям OX_g и OY_g от истинных значений не превышают по абсолютной величине 0.5 м/с, а отклонения оценок постоянных составляющих погрешностей измерений ускорений акселерометрами не превышают по абсолютной величине 0.01 м/с^2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов синтезированы комплексные адаптивные алгоритмы обработки информации в НК подвижных наземных объектов на основе СРНС. Синтезированные алгоритмы позволяют по анализу вектора обновляемой последовательности (вектора невязок измерений) выявлять появление аномальных измерений на выходе АП радиосигналов СРНС и исключать их из обработки информации, а также дополнительно осуществлять контроль целостности навигационных данных СРНС. Проведенное математическое моделирование синтезированных алгоритмов подтвердило их работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.В., Иванова Н.А. Навигация наземных объектов. Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2013.
2. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазилинейный прием сигналов. М.: Сов. радио, 1975.
3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
5. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993.
6. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. и др. Радиотехнические системы. М.: Высш. школа, 1990.
7. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982.
8. Иванов А.В. // Радиотехника. 2010. № 12. С. 15.
9. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991.
10. Ярлыков М.С. Статистическая теория. М.: Радио и связь, 1985.