

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПЕШЕХОДА НА МЕСТНОСТИ

А. Ю. Каплин^а, канд. техн. наук

М. Г. Степанов^а, доктор техн. наук, профессор

^аОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в настоящее время для определения координат человека на плоскости используется автономная навигационная система, куда входят трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. Недостатком данной системы является накопление со временем ошибки информации, поступающей от составляющих системы за счет неучтенных систематических погрешностей. Эту ошибку невозможно компенсировать без дополнительного внешнего источника информации. **Цель:** исследовать возможность адаптации алгоритмов обработки инерциальной системы определения координат с использованием данных от внешнего источника и разработать алгоритм комплексирования информации в целях компенсации ошибок при позиционировании человека на местности. **Результаты:** показана возможность и предложен метод комплексирования информации от автономной инерциальной навигационной системы и внешнего независимого источника информации, в качестве которой выступает информационный сигнал от биомеханической модели движения пешехода. Метод представлен в виде двух алгоритмов. Первый алгоритм реализован в виде разомкнутой схемы, при котором структура инерциальной системы не меняется; второй — в виде замкнутой схемы с обратной связью, при этом структура инерциальной системы меняется, однако она более устойчива к изменению предположений, принятых при синтезе предложенных алгоритмов. **Практическая значимость:** высокоточное определение координат человека на местности необходимо во многих ситуациях, в частности, при проведении спасательных работ сотрудниками МЧС.

Ключевые слова — автономная навигация, инерциальная навигационная система, фильтр Калмана, акселерометр, гироскоп.

Введение

Система определения координат человека на местности реализуется в виде модуля автономной навигации (МАН), который крепится на талии или торсе человека. В своей основе МАН строится как бесплатформенная инерциальная навигационная система (ИНС), реализующая счисление скорости и ее коррекцию от источника внешней информации. МАН состоит из 1) канала определения скорости и текущих координат человека и 2) угломерного азимутального канала.

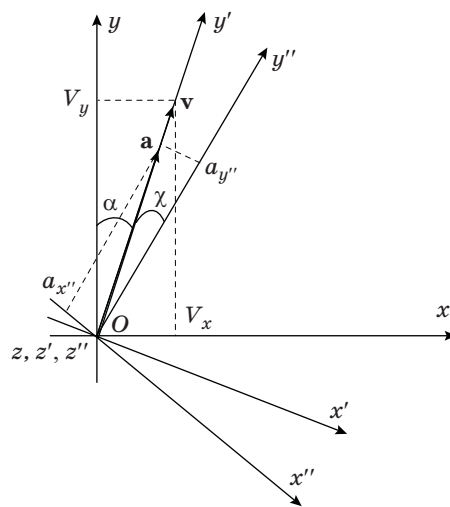
В канал скорости и текущих координат входят: инерциальная навигационная система, в составе которой имеется трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп; вычислитель, реализующий алгоритмы работы МАН; внешний источник информации — биомеханическая модель движения пешехода. В угломерном канале используется тот же трехосевой акселерометр, датчик угловой скорости и трехосевой магнитометр. В работе рассматривается канал определения скорости и текущих координат, при этом используются данные об азимуте, получаемые из угломерного канала.

Система координат МАН

В модуле автономной навигации используются три системы координат (рис. 1).

1. Система *Oxyz* — местная географическая система координат с началом в центре масс МАН. Оси *Ox* и *Oy* лежат в плоскости местного горизонта, причем ось *Ox* направлена на восток, а ось *Oy* — на север. Ось *Oz* совпадает с местной вертикалью. В этой системе координат представляется конечное решение задачи навигации человека.

2. Связанная система координат, соответствующая номинальному (горизонтальному) положению ИНС в отсутствие возмущений по азимуту α



■ Рис. 1. Системы координат модуля автономной навигации

и углам горизонтального наклона (идеальная ИНС). Ось Oy' системы совпадает с направлением движения. Данная система координат предполагает, что горизонтальное положение обеспечивается точным пересчетом (компенсацией горизонтальных углов наклона) данных акселерометра по угловым скоростям $\omega_{x'}$ и $\omega_{y'}$, измеряемым датчиком угловой скорости.

3. $Ox''y''z''$ — возмущенная по азимуту связанная система координат, положение горизонтальных осей Ox'' , Oy'' которой отличается от осей Ox' , Oy' на угол χ в силу «виляющей» походки человека, «болтания» корпуса МАН на его теле и других причин. Угол χ определяется по измерениям угловой скорости ω_z датчиком угловой скорости. Оси чувствительности акселерометра и датчика угловой скорости совпадают с соответствующими осями системы $Ox''y''z''$.

Алгоритм работы идеальной ИНС. Анализ погрешностей реальной ИНС

Рассмотрим сначала работу идеальной ИНС, которая описывается известными базовыми соотношениями. При невозмущенном по азимуту движении ($\chi = 0$) проекции кажущегося ускорения $a(t)$, фиксируемые горизонтальными осями акселерометра, равны $a_{x'}(t) = 0$, $a_{y'}(t) = a(t)$ (см. рис. 1). В дальнейшем, для сокращения записи, зависимость от времени t , где это возможно, опустим.

При возмущенном движении акселерометр фиксирует проекции $a_{x''} = a \sin \chi$, $a_{y''} = a \cos \chi$, которые при известном χ легко приводятся к a :

$$a = a_{x''} \sin \chi + a_{y''} \cos \chi. \quad (1)$$

По измеренному ускорению a путем интегрирования (первый интегратор ИНС) определяется текущая скорость в момент t

$$V(t) = \int_{t_0}^t a(r) dr, \quad (2)$$

где t_0 — начальный момент движения.

По известным скорости V и азимуту α можно вычислить географические компоненты $V_x = V \sin \alpha$, $V_y = V \cos \alpha$, повторное интегрирование которых (второй интегратор ИНС) дает искомые текущие координаты

$$x(t) = \int_{t_0}^t V_x(r) dr; \quad y(t) = \int_{t_0}^t V_y(r) dr. \quad (3)$$

В современных быстродействующих цифровых ИНС интегрирование в (2) и (3) достаточно точно выполняется суммированием дискретных данных.

В реальных ИНС прямое использование соотношений (2) и (3) без дополнительных мер по обе-

спечению приемлемой точности может привести к неудовлетворительным результатам. Это вызвано рядом причин, в частности, ростом со временем ошибок определения скорости и угловой ориентации объекта навигации из-за интегрирования составляющих измерений, обусловленных неучтенными систематическими погрешностями.

В научной литературе по инерциальной навигации и оптимальной фильтрации содержится подробный анализ погрешностей наземных и околоземных ИНС различных типов [1–3]. Применительно к рассматриваемой пешеходной ИНС анализ показывает [4], что при скорости 5–7 км/ч и продолжительности движения около 1–1,5 ч наиболее значимыми являются медленно меняющиеся погрешности δV_x , δV_y компонентов вычисляемых скоростей V_x , V_y , связанные с ошибками горизонтирования β_x , β_y (остаточными, не скомпенсированными углами горизонтальных наклонов), проекциями смещений нулей акселерометров B_x , B_y и дрейфов гироскопов ε_x , ε_y . Погрешности δV_x , δV_y также вызываются такими систематическими факторами, как неточность масштабных коэффициентов, неточный учет кориолисова ускорения, несоосность чувствительных и строительных осей инерциальных датчиков и др.

Для рассматриваемых условий к погрешностям ИНС применим метод аппроксимации погрешностей колебаниями на частоте Шулера (период колебаний 84,4 мин) [2]. При этом подходе погрешности моделируются дифференциальными уравнениями [4, 5]

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_x &= -g\beta_y + B_x; \quad \dot{\beta}_y = \frac{\delta V_x}{R} + \varepsilon_y; \\ \delta \dot{V}_y &= g\beta_x + B_y; \quad \dot{\beta}_x = -\frac{\delta V_y}{R} + \varepsilon_x, \end{aligned} \quad (4)$$

где g — ускорение силы тяжести; R — радиус Земли.

Заметим, что при сделанных допущениях горизонтальные каналы компонентов V_x , V_y и вертикальный канал (используется далее) никак не связаны, и их данные могут обрабатываться независимо и раздельно друг от друга. Ниже, для конкретности, рассматривается канал компонента V_x . Обработка данных в канале V_y ведется аналогично.

От уравнений (4) перейдем к матричному уравнению состояния (формирующего фильтра)

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{V}_x \\ \dot{\beta}_y \\ \dot{\varepsilon}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta V_x \\ \beta_y \\ \varepsilon_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_a \\ 0 \\ w_\varepsilon \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где w_a , w_ε — шумы системы (шумы инерциальных датчиков).

В выражении (5) учтено, что для пешеходных ИНС смещение нуля акселерометра B_x имеет меньшее значение, чем остальные погрешности. Поэтому без потери строгости рассмотрения вклад B_x включен в величину δV_x .

Переходя в (5) к векторно-матричной форме, получим

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t), \quad (6)$$

где $\mathbf{x}(t) = [\delta V_x(t), \beta_y(t), \varepsilon_y(t)]^T$ — вектор состояния; $\mathbf{w}(t) = [w_a(t), 0, w_\varepsilon(t)]^T$ — вектор шумов системы;

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ — матрица состояния.}$$

Дискретный аналог уравнения состояния (6) имеет вид

$$\mathbf{x}(t_k) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \mathbf{x}(t_{k-1}) + \mathbf{w}(t_{k-1}), k = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

где $\mathbf{x}(t_k) = [\delta V_x(t_k), \beta_y(t_k), \varepsilon_y(t_k)]^T$;

$$\mathbf{w}(t_k) = [w_a(t_k), 0, w_\varepsilon(t_k)]^T;$$

$$\Phi(t_k, t_{k-1}) = \begin{pmatrix} 1 & -gT_k & 0 \\ \frac{T_k}{R} & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — переходная матрица,}$$

$T_k = t_k - t_{k-1}$ — шаг во времени.

Считается, что ковариационная матрица $\mathbf{Q}(t_k) = M[\mathbf{w}(t_k) \cdot \mathbf{w}^T(t_k)]$ шумов системы (7) постоянна во времени, равна

$$\mathbf{Q}(t_k) = \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varepsilon^2 \end{pmatrix}$$

и определяется известными дисперсиями $\sigma_a^2, \sigma_\varepsilon^2$ шумовых составляющих погрешностей инерциальных датчиков. Здесь $M[\]$ — знак математического ожидания.

Итак, формируемое ИНС мгновенное значение компонента скорости V_x представляет собой сумму $V_x^{\text{ИНС}} = V_x + \delta V_x$ истинного (естественно, неизвестного) значения V_x и погрешности δV_x , являющейся первым элементом вектора состояния \mathbf{x} в (6), (7).

Аналогичное представление $V_y^{\text{ИНС}} = V_y + \delta V_y$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & g & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \Phi(t_k, t_{k-1}) = \begin{pmatrix} 1 & gT_k & 0 \\ -\frac{T_k}{R} & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

справедливо для другого компонента скорости, при этом $\mathbf{x} = [\delta V_y, \beta_x, \varepsilon_x]^T$.

Комплексирование ИНС и внешнего источника. Алгоритм расчета «виртуальной» скорости

Известно [2], что за счет «внутренних резервов» (введением каких-либо внутренних связей и дополнений) скоростные ошибки ИНС $\delta V_x, \delta V_y$ и, прежде всего, их основные составляющие, вызванные дрейфом гироскопов и ошибками начальной выставки и текущего горизонтирования, ликвидировать или хотя бы существенно уменьшить невозможно. Устранить или снизить эти ошибки можно лишь путем комплексирования с источником внешней информации по отношению к ИНС.

Рассмотрим метод комплексирования скорости пешеходной ИНС с использованием биомеханической модели движения человека, позволяющей формировать «виртуальное» измерение средней скорости на шаге.

Из числа известных моделей выберем наиболее простую и наглядную кинетическую модель бесколесного двуногого робота, совершающего движения способом поворотного маятника с длиной ноги l (длина ноги пешехода) и вертикальным перемещением центра масс h [4, 6]. Из простых геометрических построений следует, что в этом случае величина шага ΔL рассчитывается по формуле

$$\Delta L = 2\sqrt{2lh - h^2}.$$

На практике для реального пешехода коэффициент «2» перед квадратным корнем может быть заменен на постоянную «с», определяемую предварительно при калибровке. Величина h рассчитывается двойным пошаговым интегрированием ускорения a_z , измеряемого акселерометром в вертикальном канале ИНС:

$$h = \iint a_z \, drdt.$$

Для этой модели средняя скорость на k -м шаге равна отношению длины шага $\Delta L(t_k)$ к его длительности $T_k = t_k - t_{k-1}$ (в общем случае переменной), где t_k, t_{k-1} — моменты начала и конца шага:

$$\bar{V}^{\text{вн}}(t_k) = \frac{\Delta L(t_k)}{T_k}.$$

Здесь индекс «вн» означает внешний для ИНС источник информации. Необходимо подчеркнуть, что в данном случае кинетическая модель движения является не основным, а дополнительным к ИНС средством навигации.

Важной составляющей алгоритма «виртуального» измерения средней скорости является способ фиксации моментов начала и конца шага. Известны способы идентификации шага, основанные на сравнении измеряемого вертикального ускорения с установленным порогом [7, 8]. Однако подобные способы требуют большого объема индивидуальных экспериментальных данных, набора порогов для различных типов движения (ходьба, бег, подъем, спуск, ползание и др.), а также набора поверхностей, по которым движется пешеход (твердая, рыхлая, скользкая и т. п.), и носят эмпирический характер.

Наиболее предпочтительным является способ идентификации шага по величине модуля вектора ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$, определяемого по измерениям трехосевого акселерометра [9]. При этом способе начало (конец) шага определяется как момент перехода через ноль разности измеренного модуля a и ускорения силы тяжести g в данном месте. Важным преимуществом способа является независимость от ориентации пешехода (стоя, лежа, в наклонном положении).

Среднюю скорость \bar{V}^{BH} можно, как и ранее, разложить на два компонента \bar{V}_x^{BH} , \bar{V}_y^{BH} . Важным отличием \bar{V}_x^{BH} , \bar{V}_y^{BH} от компонентов V_x^{IHC} , V_y^{IHC} является то, что погрешности первых обусловлены действием большого числа независимых, различных по природе источников случайных ошибок: погрешностей модели движения, ошибок измерений акселерометра, неточностей определения моментов начала и конца шага, погрешностей расчета вертикального смещения h и др. Поэтому компоненты \bar{V}_x^{BH} , \bar{V}_y^{BH} можно рассматривать как несмещенные относительно истинных значений \bar{V}_x , \bar{V}_y (без систематических медленно меняющихся ошибок) случайные величины:

$$\bar{V}_x^{BH} = \bar{V}_x + n_x; \quad \bar{V}_y^{BH} = \bar{V}_y + n_y,$$

где n_x , n_y — некоррелированные друг с другом и с погрешностями горизонтального канала ИНС

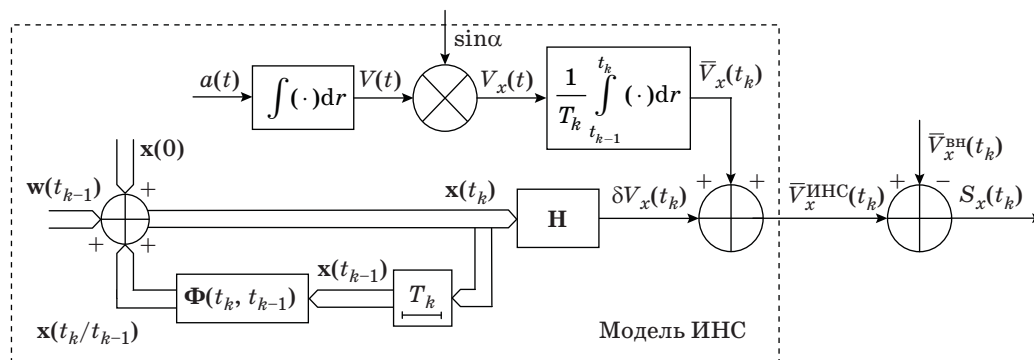
гауссовы шумы (в силу аддитивного воздействия перечисленных выше случайных факторов).

Экспериментальные данные показывают, что даже при движении пешехода с почти постоянной скоростью профиль скорости на каждом шаге имеет колебательный характер с амплитудой порядка 0,3 м/с относительно средней скорости ходьбы [4]. Поскольку мгновенное значение компонента V_x^{IHC} (аналогично V_y^{IHC}), формируемого ИНС, имеет тот же профиль, сравнивать его с \bar{V}_x^{BH} нельзя. Поэтому от V_x^{IHC} следует перейти к пошаговой средней скорости

$$\begin{aligned} \bar{V}_x^{IHC} &= \frac{1}{T_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} V_x^{IHC} dr = \\ &= \frac{1}{T_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} (V_x + \delta V_x) dr = \bar{V}_x + \delta V_x. \end{aligned}$$

Здесь учтено, что медленно меняющаяся погрешность скорости δV_x в течение шага практически постоянна.

В результате комплексирование ИНС и кинетической модели пешехода с использованием средних скоростей $\bar{V}_x^{IHC}(t_k)$, $\bar{V}_x^{BH}(t_k)$ позволяет перейти к разности (скалярной величине) $S_x(t_k) = \bar{V}_x^{IHC}(t_k) - \bar{V}_x^{BH}(t_k) = \delta V_x(t_k) + n_x(t_k)$, где $n_x(t_k)$ — гауссов шум средней скорости $\bar{V}_x^{BH}(t_k)$ с дисперсией σ_x^2 . Разность $S_x(t_k)$ при дальнейшей обработке служит входным измерением для фильтра Калмана [10], формирующего пошаговую оптимальную оценку $\delta \hat{V}_x(t_k)$ погрешности $\delta V_x(t_k)$. Эта оценка и используется при расчете сигналов коррекции ИНС (рис. 2). При этом возможны два подхода: коррекция ИНС по разомкнутой схеме, которая не затрагивает структуру ИНС, и по замкнутой схеме, с использованием отрицательной обратной связи. На рис. 2 показана последовательность изложенных алгоритмов и процедур, моделирующих ИНС с комплексированием от внешнего источника.



■ Рис. 2. Структурная схема модели ИНС

Алгоритм коррекции ИНС по разомкнутой схеме

При разомкнутой схеме коррекции фильтр Калмана имеет традиционную структуру [10], повторяющую уравнение состояния (7), описывающее динамику оцениваемого вектора состояния $\mathbf{x}(t_k) = [\delta V_x(t_k), \beta_y(t_k), \varepsilon_y(t_k)]^T$. Уравнение фильтра имеет вид

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1}) + \mathbf{K}(t_k) \times (S_x(t_k) - \mathbf{H} \cdot \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})),$$

$$\hat{\mathbf{x}}(0) \text{ — начальное условие,} \quad (8)$$

где $\mathbf{H} = [1, 0, 0]$.

Коэффициент усиления $\mathbf{K}(t_k) = [K_1(t_k), K_2(t_k), K_3(t_k)]^T$ равен

$$\mathbf{K}(t_k) = \frac{1}{\sigma_x^2} \mathbf{P}(t_k) \cdot \mathbf{H}^T = \frac{1}{\sigma_x^2} \begin{bmatrix} P_{11}(t_k) \\ P_{21}(t_k) \\ P_{31}(t_k) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $[P_{11}(t_k), P_{21}(t_k), P_{31}(t_k)]^T$ — первый столбец ковариационной матрицы $\mathbf{P}(t_k)$ ошибок калмановской оценки $\hat{\mathbf{x}}(t_k) = [\delta \hat{V}_x(t_k), \hat{\beta}_y(t_k), \hat{\varepsilon}_y(t_k)]^T$.

Матрица $\mathbf{P}(t_k)$ определяется соотношениями

$$\mathbf{P}(t_k/t_{k-1}) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \mathbf{P}(t_{k-1}) \cdot \Phi^T(t_k, t_{k-1}) + \mathbf{Q};$$

$$\mathbf{P}(t_k) = \left(\mathbf{P}^{-1}(t_k/t_{k-1}) + \frac{1}{\sigma_x^2} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \right)^{-1} =$$

$$= \left(\mathbf{P}^{-1}(t_k/t_{k-1}) + \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Здесь \mathbf{Q} — матрица дисперсий шумов инерциальных датчиков. Значение первого элемен-

та $\delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1})$ экстраполированной векторной оценки $\hat{\mathbf{x}}(t_k/t_{k-1}) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})$ подается на выход ИНС, где происходит коррекция (компенсация) ошибки $\delta V_x(t_k)$ в выходном сигнале ИНС:

$$\bar{V}_{x, \text{корр}}^{\text{ИНС}}(t_k) = \bar{V}_x^{\text{ИНС}}(t_k) - \delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1}) =$$

$$= \bar{V}_x(t_k) + (\delta V_x(t_k) - \delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1})). \quad (11)$$

Алгоритм коррекции (11) иллюстрируется структурной схемой (рис. 3). В левой части рисунка приведен фрагмент модели ИНС, представленной на рис. 2.

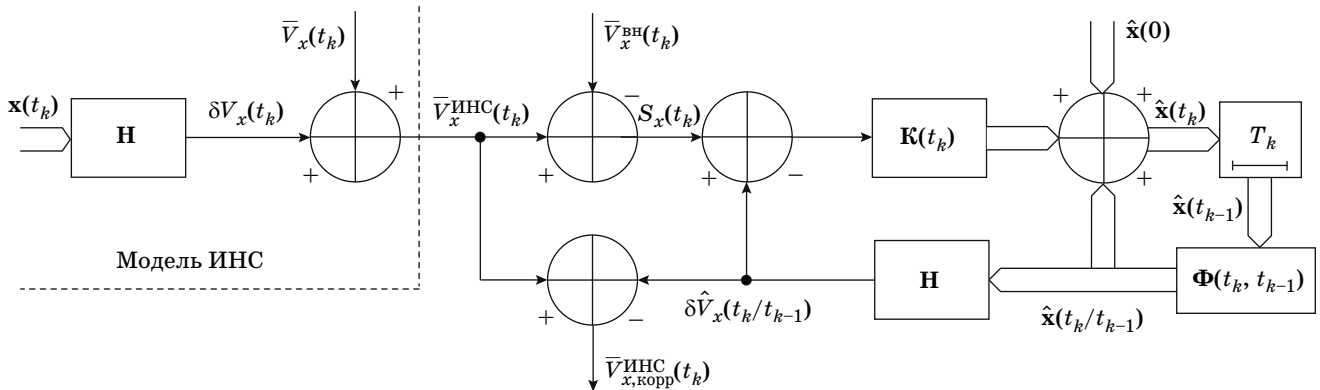
Рассмотренная разомкнутая схема коррекции не затрагивает структуру и динамику ИНС (вектор состояния $\mathbf{x}(t_k)$), а только «сбрасывает» ее ошибку на выходе. В этом случае роль ошибки ИНС играет ошибка экстраполированной оценки $\delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1})$, определяемая первым диагональным элементом ковариационной матрицы $\mathbf{P}(t_k/t_{k-1})$. В номинальном режиме работы фильтра Калмана эта ошибка существенно меньше исходной погрешности $\delta V_x(t_k)$.

Алгоритм коррекции ИНС по замкнутой схеме

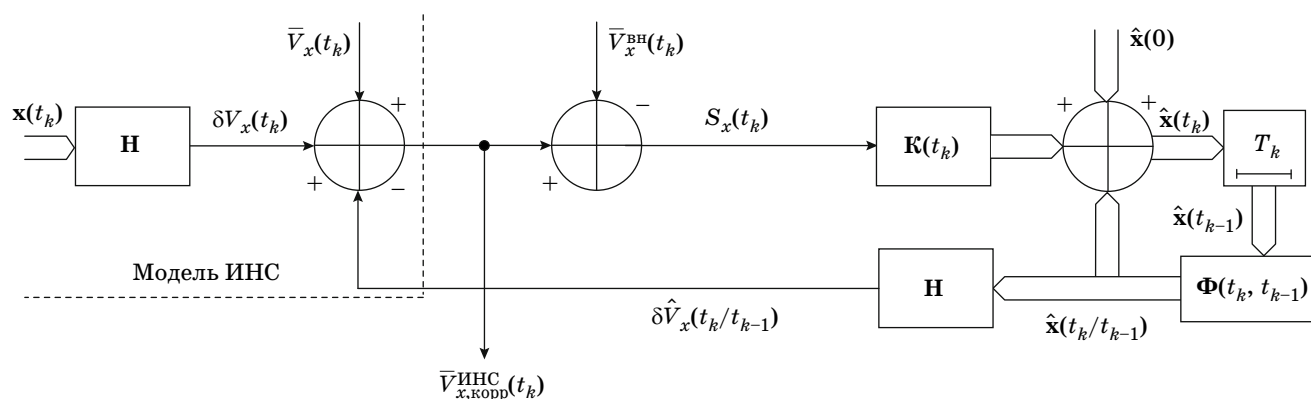
Замкнутая схема предусматривает изменение структуры ИНС за счет отрицательной обратной связи фильтра Калмана по экстраполированной оценке $\hat{\mathbf{x}}(t_k/t_{k-1})$. В этом случае коррекции подвергается исходный вектор состояния $\mathbf{x}(t_k) = [\delta V_x(t_k), \beta_y(t_k), \varepsilon_y(t_k)]^T$ т. е. формируется разность $\mathbf{x}(t_k) - \hat{\mathbf{x}}(t_k/t_{k-1})$, которая далее оценивается фильтром Калмана. Иными словами, уравнение состояния (7) трансформируется к виду

$$\mathbf{x}(t_k) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \mathbf{x}(t_{k-1}) + \mathbf{w}(t_{k-1}) - \Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1}). \quad (12)$$

Рассматривая корректирующее слагаемое $\Phi(t_k, t_{k-1}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})$ в (12) как известную детерми-



■ Рис. 3. Структурная схема алгоритма коррекции по разомкнутой схеме



■ Рис. 4. Структурная схема алгоритма коррекции по замкнутой схеме

нированную управляющую функцию [2], приходим к более простой по сравнению с (8) форме фильтра Калмана

$$\hat{x}(t_k) = K(t_k) \cdot S_x(t_k),$$

$\hat{x}(0)$ — начальное условие. (13)

Для фильтра (13) остаются справедливыми соотношения (9), (10).

Структурная схема алгоритма применительно к рассматриваемой задаче коррекции ИНС по ошибке скорости $\delta V_x(t_k)$ приведена на рис. 4. Заметим, что в этом случае входное измерение для фильтра Калмана равно $S_x(t_k) = \delta V_x(t_k) - \delta \hat{V}_x(t_k/t_{k-1}) + n_x(t_k)$.

В номинальных условиях разомкнутый и замкнутый алгоритмы коррекции по точности эквивалентны. Свидетельством этому является общность для обоих алгоритмов априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации $P(t_k)$. Однако на практике в условиях неизбежных отличий принятых моделей ИНС и внешнего источника и, как следствие, настроек фильтров от реальной динамики процесса навигации пешехода более предпочтительным является алгоритм коррекции по замкнутой схеме. Причина этого — наличие в структуре ИНС обратной связи, демпфирующей возникающие рассогласования. Немаловажно и то, что фильтр (13) более прост в реализации, чем фильтр (8).

Итоговые координаты рассчитываются по очевидным формулам

$$x(t_k) = x(t_0) + \sum_{i=1}^k \bar{v}_{x, \text{корр}}^{\text{ИНС}}(t_i) T_i;$$

$$y(t_k) = y(t_0) + \sum_{i=1}^k \bar{v}_{y, \text{корр}}^{\text{ИНС}}(t_i) T_i, \quad (14)$$

численно реализующим исходные соотношения (3). Здесь $x(t_0), y(t_0)$ — координаты пешехода в момент начала движения t_0 .

Приведенные соотношения и структурные схемы алгоритмов (см. рис. 2–4), начиная с процедур формирования средних скоростей $\bar{v}_x^{\text{ИНС}}$, $\bar{v}_y^{\text{ИНС}}$ (аналогично $\bar{v}_y^{\text{ИНС}}$, $\bar{v}_x^{\text{ИНС}}$), определяют последовательность вычислительных операций, подлежащих реализации в модуле автономной навигации.

Заключение

Описанный в статье подход позволяет осуществить комплексирование данных от различных навигационных источников информации о движении человека. Показана целесообразность использования калмановской фильтрации в пешеходных навигационных системах. Представленные результаты предоставляют необходимые алгоритмы обработки и измерительной информации инерциальных датчиков, которые могут непосредственно применяться разработчиками высокоточных автономных систем позиционирования человека на местности.

Литература

1. Красовский А. А., Лебедев А. В., Невструев В. В. Теоретические основы пилотажно-навигационных комплексов. — М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1981. — 373 с.
2. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. — М.: Машиностроение, 1982. — 216 с.
3. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. — М.: Радио и связь, 1985. — 344 с.
4. Дэвидсон П., Такала Я. Разработка алгоритмов инерциальной навигационной системы с учетом особенностей походки человека // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С. 54–86.
5. Salychev O. S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. — М.: BMSTU Press, 2004. — 306 p.

6. Jahn J., Batzer U., Seitz J., Patino-Studencka L., Boronat J. G. Comparison and Evaluation of Acceleration Based Step Length Estimators for Handheld Devices // Proc. of IEEE 2nd Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. P. 1–6.
7. Ladetto Q., Merminod B. Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation // 9th St. Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, Saint-Petersburg, 27–29 May 2002. P. 10.
8. Leppakoski H., Kappi J., Syrjarinne J., Takala J. Error Analysis of Step Length Estimation in Pedestrian Dead Reckoning // Proc. of ION GPS/GNSS. Portland, OR, 24–27 Sept. 2002. The Institute of Navigation, 2002. P. 1136–1142.
9. Matthews C., Ketema Y., Gebre-Egziabher D., Schwartz M. In-Situ Step Size Estimation Using a Kinetic Model of Human Gait // Proc. of ION GNSS, Portland, OR, 21–24 Sept. 2010. P. 511–524.
10. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана — Бьюси. — М.: Наука, 1982. — 200 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.86

Using Autonomous Navigation Systems for High-Precision Positioning of a Pedestrian on the GroundKaplina A. Y.^a, PhD, Tech., a.kaplin@list.ruStepanov M. G.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, smg099@mail.ru^aОАО «Radioavionika», 4B, Troitskii Pr., 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Currently, to determine the coordinates of a pedestrian on the ground, an autonomous navigation system is used, which includes a triaxial accelerometer and a triaxial gyroscope. A disadvantage of this system is the gradual accumulation of erroneous information from its components, due to unaccounted systematic errors. This accumulated error cannot be compensated without an additional external source of information. **Purpose:** The goal of this work is investigating the possibility to adapt the algorithms of an inertial coordinate reference system using data from an external source, and developing an algorithm to integrate the information in order to compensate for the errors in the positioning of the pedestrian. **Results:** The possibility is demonstrated and a method is suggested for integrating the information from an autonomous inertial navigation system and an external independent source of information which is an information signal from a biomechanical model of pedestrian movement. The method is represented by two algorithms. The first algorithm is implemented in the form of an open circuit in which the structure of the inertial system does not change. The second one is implemented as a closed circuit with a feedback. The structure of the inertial system changes, but it is more resistant to changes in the assumptions made during the synthesis of the proposed algorithms. **Practical relevance:** High-precision determination of the coordinates of a pedestrian on the ground is necessary in many situations, particularly when performing rescue operations.

Keywords — Autonomous Navigation, Inertial Navigation System, Kalman Filter, Accelerometer, Gyroscope.

References

1. Krasovskii A. A., Lebedev A. V., Nevstruev V. V. *Teoreticheskie osnovy pilotazhno-navigatsionnykh kompleksov* [Theoretical Basis of Flight Control and Navigation Systems]. Moscow, VVIA im. N. E. Zhukovskogo Publ., 1981. 373 p. (In Russian).
2. Kuzovkov N. T., Salychev O. S. *Inertsial'naiia navigatsiia i optimal'naiia fil'tratsiia* [Inertial Navigation and Optimal Filtering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 216 p. (In Russian).
3. Iarlykov M. S. *Statisticheskaiia teoriia radionavigatsii* [Statistical Theory Navigation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1985. 344 p. (In Russian).
4. Davidson P., Takala J. Development of Algorithms of Inertial Navigation System Based on Features of Human Gait. *Giroskopiia i navigatsiia* [Gyroscopy and Navigation], 2013, no. 1, pp. 54–86 (In Russian).
5. Salychev O. S. *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*. Moscow: BMSTU Press, 2004. 306 p.
6. Jahn J., Batzer U., Seitz J., Patino-Studencka L., Boronat J. G. Comparison and Evaluation of Acceleration Based Step Length Estimators for Handheld Devices. *Proc. of IEEE 2nd Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zurich, Switzerland, 15–17 September 2010, pp. 1–6.
7. Ladetto Q., Merminod B. Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation. *9th St. Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems*, Saint-Petersburg, 27–29 May 2002, p. 10.
8. Leppakoski H., Kappi J., Syrjarinne J., Takala J. Error Analysis of Step Length Estimation in Pedestrian Dead Reckoning. *Proc. of ION GPS/GNSS*, Portland, OR, The Institute of Navigation, 24–27 September 2002, pp. 1136–1142.
9. Matthews C., Ketema Y., Gebre-Egziabher D., Schwartz M. In-Situ Step Size Estimation Using a Kinetic Model of Human Gait. *Proc. of ION GNSS*, Portland, OR, 21–24 September 2010, pp. 511–524.
10. Brammer K., Siffing G. *Fil'tr Kalmana-B'iusi* [Kalman-Bucy-Filter]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 200 p. (In Russian).