



Интеллектуальная навигация: ГЛОНАСС и координатные модели



Станислав МАТВЕЕВ

Stanislav I. MATVEEV

Разработка теории и алгоритмов интеллектуальной навигации железнодорожного транспорта на основе глобальной спутниковой системы ГЛОНАСС и эталонных координатных моделей пути. Подобные модельные схемы могут использоваться как для мониторинга геометрии рельсовой колеи, так и навигации/управления при движении маршрутных поездов. Потоки синхронизированной измерительной инерциальной информации адаптируются к эталонной модели, а для навигационных функций акцент переносится на траектории движения, в качестве которых выступают линейные метрические графы. В статье последовательно рассматриваются структурные и поэтапные особенности модельных построений и исследовательские задачи (текущие и перспективные), связанные с развитием темы.

Ключевые слова: спутниковая навигация, интеллектуальная система, железнодорожный путь, ГЛОНАСС, GPS, эталонные координатные модели пути, теория, технологии, адаптивные алгоритмы.

Матвеев Станислав Ильич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геодезия, геоинформатика и навигация» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Основная идея предлагаемого проекта заключается в том, что железнодорожный транспорт имеет точно зафиксированную на местности траекторию движения в виде рельсовой колеи, а это даёт возможность с помощью инерциальных и спутниковых измерений создать эталонные координатные модели пути (ЭКМП). Такие модели могут использоваться как службой пути (для мониторинга геометрии рельсовой колеи), так и службой движения (для навигации и управления движением поездов).

В системах первого типа потоки синхронизированной измерительной инерциальной информации адаптируются к эталонной модели, образованной спутниковыми измерениями. В системах второго типа — навигационных — адаптация может быть выполнена с помощью навигационных функций траекторий движения, в качестве которых используют эталонные модели в виде линейных метрических графов.

Комплексированные инерциальные и спутниковые измерения поступают последовательно в режиме реального времени, в результате чего модель приобретает многогрупповую форму [7].

I.

Начнём с двухгрупповой параметрической модели вида

$$\bar{A}_1 x_1 + \bar{A}_2 x_2 = \bar{l} + \bar{v}, \quad (1)$$

в которой матрицы и вектора с верхней чертой приведены к равнозначному виду.

Применяя ортогональное проектирование на ядро N первой матрицы, исключаем из (1) первую группу неизвестных и получаем уравнение с одним неизвестным

$$P_{N(\bar{A}_1^T)} \bar{A}_2 x_2 = P_{N(\bar{A}_1^T)} \bar{l} + P_{N(\bar{A}_1^T)} \bar{v}. \quad (2)$$

Здесь через $P_{N(\bar{A}_1^T)}$ обозначен проектор на ядро матрицы $\bar{A}_1^T$, оценку которого находим с помощью взвешенной псевдообратной $\bar{A}_{2(I, P_{N(\bar{A}_1^T)}}^+$, определяемой в соответствии с известной формулой

$$\hat{x}_2 = \bar{A}_{2(I, P_{N(\bar{A}_1^T)}}^+ \bar{l}. \quad (3)$$

Подставляя $\hat{x}_2$ в (1), получим оценку x_1 по формуле

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \bar{A}_1^+ (\bar{l} - \bar{A}_2 \bar{A}_{2(I, P_{N(\bar{A}_1^T)}}^+) \bar{l}) = \\ &= \bar{A}_1^+ (I - P_{R(\bar{A}_2), N(\bar{A}_1^T)}) \bar{l} = \\ &= \bar{A}_1^+ (I - P_{R(\bar{A}_2)}) \bar{l} = \\ &= \bar{A}_1^+ P_{N(\bar{A}_1^T), R(\bar{A}_2)} \bar{l}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_{R(\bar{A}_2)}$ – проектор на образ матрицы $\bar{A}_2$; $P_{N(\bar{A}_1^T), R(\bar{A}_2)}$ – проектор, проектирующий на $N(\bar{A}_1^T)$ параллельно $R(\bar{A}_2)$.

Таким образом, от системы (1) осуществлен переход к квазитреугольной системе

$$\bar{A}_2^1 x_2 = \bar{l}^1 + \bar{v}^1 \quad (5)$$

$$\bar{A}_2^1 x_2 = \bar{l}^1 + \bar{v}^1,$$

где $\bar{A}_2^1, \bar{l}^1, \bar{v}^1$ – проекции матриц $N(\bar{A}_1^T)$ на $N(\bar{A}_1^T)$.

Естественно, что система (5) решается методом обратной подстановки.

Отметим следующие важные свойства построенных проекторов:

1. Проекторы $P_{R(\bar{A}_2)}$ и $P_{R(\bar{A}_2)}$ ортогональны.

2. Произведение проекторов на ядра не меняет вектора поправок.

$$P_{N(\bar{A}_2^T)} P_{N(\bar{A}_1^T)} \bar{v} = \bar{v}$$

Свойство 1 доказывается простым перемножением проекторов $\bar{v} \in N(\bar{A}_1^T)$.

Свойство 2 вытекает из того факта, что $\bar{v} \in N(\bar{A}_1^T)$ и $P_{N(\bar{A}_2^T)} P_{N(\bar{A}_1^T)} = I - P_{R(\bar{A}_1)} - P_{R(\bar{A}_2)}$.

Из свойства 1 следует очевидное равенство

$$P_{N(\bar{A}_2^T)} P_{N(\bar{A}_1^T)} = I - P_{R(\bar{A}_1)} - P_{R(\bar{A}_2)}, \quad (6)$$

поэтому, если процесс исключения неизвестных провести до конца, умножив (2) на $P_{N(\bar{A}_2)}$, то получим

$$P_{R(\bar{A}_1)} \bar{A}_2 = 0, \dots, P_{R(\bar{A}_2)} \bar{A}_2 = \bar{A}_2.$$

С учётом того, что $P_{R(\bar{A}_1)} \bar{A}_2 = 0, \dots, P_{R(\bar{A}_2)} \bar{A}_2 = \bar{A}_2$, из свойства 2 будем иметь

$$\bar{A}_1 x_1 + \bar{A}_2 + \dots + \bar{A}_K x_K = \bar{l} + \bar{v}.$$

Откуда окончательно

$$\bar{A}_1 x_1 + \bar{A}_2 + \dots + \bar{A}_K x_K = \bar{l} + \bar{v}. \quad (7)$$

Путём аналогичных рассуждений для случая k групп неизвестных

$$\bar{A}_1 x_1 + \bar{A}_2 + \dots + \bar{A}_K x_K = \bar{l} + \bar{v} \quad (8)$$

мы придём к блочно-треугольной системе

$$\begin{aligned} \bar{A}_2^1 x_2 + \bar{A}_3^1 x_3 + \dots + \bar{A}_K^1 x_K &= \bar{l}^1 + \bar{v}^1 \\ \bar{A}_2^1 x_2 + \bar{A}_3^1 x_3 + \dots + \bar{A}_K^1 x_K &= \bar{l}^1 + \bar{v}^1 \\ \dots \end{aligned} \quad (9)$$

$$\bar{A}_K^{K-1} x_K = \bar{l}^{K-1} + \bar{v}^{K-1},$$

где $\bar{A}_j^{i-1}, \bar{l}^{i-1}, \bar{v}^{i-1}$ – проекции матриц $\bar{A}_j^{i-1}, \bar{l}^{i-1}, \bar{v}^{i-1}$ на $i < j \leq \hat{e}$ для $i < j \leq \hat{e}$.

При этом проекторы $P_{N(\bar{A}_{K-1}^T)}$ вычисляем по формуле

$$P_{N(\bar{A}_{K-1}^T)} = P_{N(\bar{A}_{K-1}^{(K-2)})} = I - P_{R(\bar{A}_1)} - P_{R(\bar{A}_2)} - \dots - P_{R(\bar{A}_{K-1})}, \quad (10)$$

а свойства 1 и 2 трансформируются в свойства 3 и 4:

$$3. P_{R(\bar{A}_i)} \cdot P_{R(\bar{A}_j)} = 0, \text{ если } i \neq j;$$

$$4. (I - P_{R(\bar{A}_1)} - P_{R(\bar{A}_2)} - \dots - P_{R(\bar{A}_K)}) \bar{l} = -\bar{v}.$$





$$P_{R(\bar{A}_i)} = \bar{A}_i \bar{A}_i^+ P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)} P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)} \bar{A}_i^{+T} \bar{A}_i^T = P'_{R(\bar{A}_i)} P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)} P'_{R(\bar{A}_i)} = \\ = P'_{R(\bar{A}_i)} (I - P_{R(\bar{A}_1)} - P_{R(\bar{A}_2)} - \dots - P_{R(\bar{A}_{i-1})}) P'_{R(\bar{A}_i)}. \quad (13)$$

Указанные проекторы рекомендуется вычислять по формуле

$$P_{R(\bar{A}_i)} = \bar{A}_i (\bar{A}_i^T P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)} \bar{A}_i)^{-1} \bar{A}_i^T P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)}. \quad (11)$$

Чтобы раскрыть содержание преобразования (11), докажем следующую теорему.

ТЕОРЕМА 1. Преобразование (11) реализует ортогонализацию проекторов $P_{R(\bar{A}_i)}$ по схеме Грамма-Шмидта.

Для доказательства теоремы воспользуемся тем, что обратную матрицу к матрице $\bar{A}_i^T P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)} \bar{A}_i$ можно вычислить по формуле

$$(\bar{A}_i^T P_{N(\bar{A}_{i-1}^T)} \bar{A}_i)^{-1} = \bar{A}_i^+ P_{N(\bar{A}_{i-1}^+)} \bar{A}_i^{+T}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), получим (13)

Таким образом, выражение (13) реализует схему Грамма-Шмидта ортогонализации матрицы проектора $P'_{R(\bar{A}_i)}$ по отношению к проекторам $P'_{R(\bar{A}_1)}, \dots, P'_{R(\bar{A}_{i-1})}$ и является доказательством теоремы.

II.

Комплектирование инерциальных и спутниковых измерений по схеме группового оценивания существенно повышает точность вычисления координат подвижных объектов. Основным методом комплектирования измерений реального времени служит калмановская фильтрация. Покажем, что её можно представить в терминах группового оценивания параметров модели Гаусса-Маркова методом наименьших квадратов.

Фильтр Калмана реализует рекуррентную схему оценивания вектора состояния x_t динамической системы, описываемой

$$x_k = S_{k-1} x_{k-1} + v_k; \quad (14)$$

$$l_k = A_k x_k + \delta_k. \quad (15)$$

Здесь S_{k-1} — переходная матрица состояния предыдущей эпохи, A_k — матрица преобразования вектора наблюдений l_k в

вектор состояния текущей k -ой эпохи, v_k, δ_k — векторы ошибок предсказания вектора состояния и проектирования вектора измерений соответственно. Уравнение (14) называют *уравнением состояния*, уравнение (15) — *уравнением наблюдения* [3].

Пусть P_k означает оператора проектирования на $R(A_k)$, тогда проекции $P_k x_{k+1}, P_k x_k, P_k x_{k-1}$ называют *предсказанной, профильтрованной и сглаженной* линейными оценками при заданном векторе наблюдений l_k . Особенно важно то, что предсказанная и сглаженная оценки могут быть выражены через профильтрованные, поэтому основной задачей становится нахождение проекции $\hat{x}_k = P_k x_k$.

Очевидно, что общее уравнение многогруппового уравнивания можно представить как $Ax = l - \delta$, которое в развёрнутом виде выглядит так:

$$\begin{bmatrix} A_0 & & & & \\ -S_0 & I & & & \\ & A_1 & & & \\ & -S_1 & I & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -S_{k-1} & I \\ & & & & A_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{k-1} \\ x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ 0 \\ l_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ l_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_0 \\ v_1 \\ \delta_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_k \\ \delta_k \end{bmatrix} \quad (16)$$

Две последние блок-строки, по сути, повторяют схему двухгруппового оценивания в составе уравнения состояния (14) и уравнения наблюдения (15).

Решение системы (16) наиболее эффективно получать по уже рассмотренной нами схеме многогруппового рекуррентного оценивания с использованием процедур последовательного ортогонального проектирования, позволяющих выполнять одношаговое обновление оценок вектора состояния и ковариации всех получаемых оценок. Эта возможность заключается в блочно двухдиагональной структуре матрицы A параметрической модели многогруппового оценивания.

$$Ax = I, \quad \begin{bmatrix} K(X_1)^{-1/2} & & & \\ -K(\Delta X_1)^{-1/2} & K(\Delta X_1)^{-1/2} & & \\ & K(X_2)^{-1/2} & & \\ & -K(\Delta X_2)^{-1/2} & K(\Delta X_2)^{-1/2} & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & -K(\Delta X_{n-1})^{-1/2} & K(\Delta X_{n-1})^{-1/2} \\ & & & & K(X_n)^{-1/2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \Delta \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \Delta \bar{X}_2 \\ \vdots \\ \bar{X}_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

Детальные алгоритмы этого варианта калмановской фильтрации могут быть различными. Нами предлагается алгоритм элементарных ортогональных вращений Гивенса.

При работе адаптивных измерительных систем создания ЭКМП информация о спутниковых координатах точек пути x_p, y_p, z_p и синхронизированных с ними числимых по показаниям гироскопа и датчика пути приращений координат $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p$ поступают последовательно, так что модель Гаусса-Маркова, если её формировать в явном виде, принимает многогрупповую форму (17), где I – единичные блоки третьего порядка,

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad \Delta X_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix},$$

Ковариационная матрица $K(I)$ вектора измерений имеет блочно диагональную структуру соответствующего размера

$$K(I) = \begin{bmatrix} K(X_1) & & & \\ & K(\Delta X_1) & & \\ & & K(X_2) & \\ & & & K(\Delta X_2) \\ & & & & \ddots & \ddots \\ & & & & & K(\Delta X_{n-1}) \\ & & & & & & K(X_n) \end{bmatrix}$$

Умножением слева на $K(I)^{-1/2}$ приведём модель (17) к равноточному виду

$$\bar{A}x = \bar{I}, \quad (18)$$

Поиск квадратного корня из симметричных матриц ковариации основан на свойстве ортогональных проекторов, а именно разложении пространства измерений с помощью одномерных проекторов P_i . С их участием любая матрица K может быть представлена в виде

$$K = \lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2 + \dots + \lambda_n P_n, \quad (19)$$

где λ_i – действительные и различные собственные числа матрицы K .

Такое представление удобно для определения корня матрицы.

III.

Для начала возведём (19) в квадрат и с учётом того, что $P_i P_i = P_i$, а $P_i P_j = 0$ для всех $i \neq j$, получим

$$K \cdot K = \lambda_1^2 P_1 + \lambda_2^2 P_2 + \dots + \lambda_n^2 P_n.$$

По индукции для любой степени m матрицы, в том числе и для степени $m = -\frac{1}{2}$,

будем иметь

$$K^{-\frac{1}{2}} = \lambda_1^{-\frac{1}{2}} P_1 + \lambda_2^{-\frac{1}{2}} P_2 + \dots + \lambda_n^{-\frac{1}{2}} P_n. \quad (20)$$

Понятно, что проекторы P_i могут быть сформированы столбцами собственных векторов x_i как произведение $x_i \cdot x_i^T$. В этом случае формулу (20) можно представить в матричном виде

$$K^{-\frac{1}{2}} = V \cdot S^{-\frac{1}{2}} \cdot V^T, \quad (21)$$

где V – ортогональная матрица собственных векторов матрицы K ;

S – диагональная матрица соответственных собственных значений.

Вычисление матриц $K^{-1/2}$ второго или третьего порядка, необходимых в нашем алгоритме, никаких затруднений не вызывает. В русле изложенного алгоритма рекуррентного оценивания параметров ЭКМП включает следующие этапы:

1. Модель (17) в явном виде не присутствует. При поступлении координат первого спутникового пункта и первых числимых приращений координат формируются блоки $K(X_p)^{-1/2}$, $K(\Delta X_p)^{-1/2}$ и подвектор равноточных измерений $\bar{l}_1 = (\bar{X}_1 \quad \Delta \bar{X}_1)^T$ из (18).





2. Вычисляют ненулевые элементы строки $\bar{l}_i$ для первого спутникового измерения и помещают её на место первой строки шестидиагональной верхней треугольной матрицы R_i , после чего образуют расширенную строку $(R_i, \bar{l}_i)$.

3. Формируют i -ю строку матрицы

$$A_i = \begin{bmatrix} R_{i-1} & b_{i-1} \\ \bar{a}_i & \bar{l}_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ленточной структуры ($i=1, 2, \dots, n$) с шириной ленты, равной шести, и образуют расширенную матрицу

$$\begin{bmatrix} R_i & b_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Если измерение необходимое, то с помощью левых плоских вращений Гивенса [6] строка $\bar{a}_i$ и матрица R_{i-1} приводятся к виду

$$\begin{bmatrix} R_i & b_i \\ 0 & f_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Число строк R_i на одну больше, чем в R_{i-1} .

Если же измерение избыточное, то ортогональным преобразованием Гивенса аннулируют все элементы строки a_i , приводя (22) к виду

$$\begin{bmatrix} R_i & b_i \\ 0 & f_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где b_i – вектор преобразованных свободных членов, а f_i – невязка геометрического условия $\Delta X_i - (X_i - X_{i-1})$.

4. Вычисляют допустимую невязку по приближённой формуле

$$f_{\text{дон}} = 2(K(X)_{ii} + K(X)_{i-1, i-1} + K(\Delta X)_{ii})^{1/2},$$

что позволяет выполнить отбраковку грубых измерений.

Если $f_i \geq f_{\text{дон}}$, то делается анализ i -го блока измерений.

5. Заменяют нулевую строку в (23) на строку $i+1$ и выполняют действия по пункту 3. (После ввода последней

$i+2$ -й строки и её обнуления переходят к пункту 6).

6. Находят решение шестидиагональной треугольной системы $R_i x = b$ методом обратной подстановки. *Вычисление лишь трёх последних неизвестных (оценок элементов последнего вектора состояния), по существу, соответствует оценкам калмановской фильтрации. Вычисление последующих оценок обратной подстановки является уточнением (сглаживанием) предыдущих оценок с учётом будущих.* При наличии блочной двухдиагональной и треугольной структуры формируемой матрицы R нет необходимости в сохранении всех её блоков. В процессе вычисления векторов состояния достаточно оставить лишь два последовательных блока, соответствующих предыдущему $i-1$ и текущему i состоянию.

7. Для точности оценки вычисляют диагональные элементы ковариационной матрицы параметров как

$$K(X)_i = \mu^2 \sum_{j=i}^{j=i+6} R_j^2.$$

8. Вычисляют поправки к результатам измерений $v = Ax - l$ и эмпирическую среднюю квадратическую ошибку единицы веса $\hat{\mu} \sqrt{K(X)_i}$ а также средние квадратические ошибки параметров $m(x)_i = \hat{\mu} \sqrt{K(X)_i}$.

Продемонстрированный алгоритм позволяет сократить количество арифметических действий по сравнению с обычными процедурами метода наименьших квадратов, реализуемых фильтром Калмана. Он эффективно использовался при разработке геоинформационной технологии (ГИТ), включающей:

1) *Временную ДП (ГНСС) и трёхмерную составную системы координат железнодорожной магистрали в проекции Коугия [5].*

2) *Адаптивный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) для создания ЭКМП на основе комплексирования инерциальных и спутниковых измерений (рис. 1).*

АИВК состоит из спутникового двухчастотного ГЛОНАСС/GPS приёмника (ровера) – 1, гироскопического датчика эйлеровых углов – 2, датчиков пути и ширины колеи – 3, контроллера для синхронной записи показаний этих измерительных устройств по часам ровера – 4 и персонального компью-

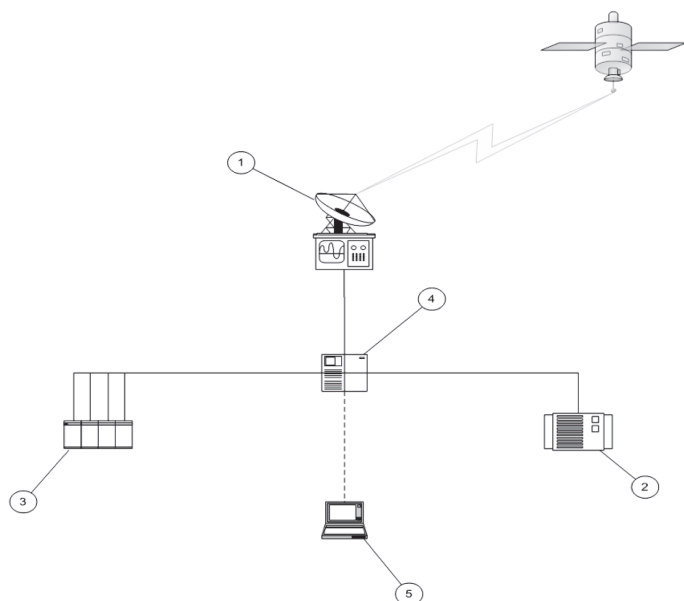


Рис. 1. Структурная схема АИВК.

тера — 5, а также системы временных базовых станций со спутниковыми приёмниками того же типа, что и ровер, установленных вдоль железнодорожной магистрали через 50—100 км друг от друга.

Поскольку существенная часть информации в адаптивные измерительные и навигационные системы поступает от ГЛОНАСС и GPS, возникла потребность в разработке эффективных алгоритмов спутниковой информации. Такая возможность была найдена за счёт расширения теории взвешенных линейных метрических графов в трёхмерном евклидовом пространстве [4]. Существенными результатами здесь можно считать установление взаимосвязи векторов базовых линий глобальных навигационных спутниковых систем с метрическими графами трёхмерного евклидова пространства. На основе этого в монографии [9] по-новому представлена теория обработки спутниковых измерений, поступающих пользователям аппаратуры геодезических приёмников ГНСС, даются наиболее рациональные для целей железнодорожного транспорта схемы спутниковых измерений, позволяющие получать точные координаты при расположении векторов базовых линий в пределах полосы отвода железных дорог.

Предложен способ спутниковой навигации маневровых локомотивов, использующий эталонные координатные модели станционных путей в виде взвешенного метрического графа. В общем случае такие

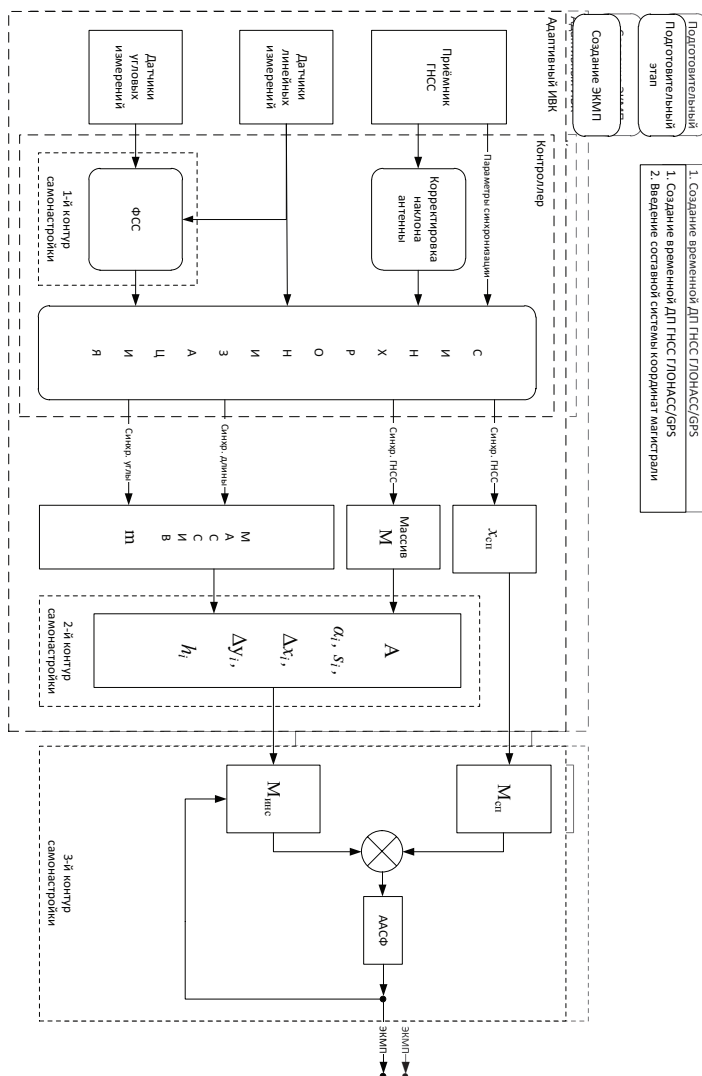
модели предполагают граф с метровыми дугами, метрика которого определяется линейными сплайнами длиной 1 м. Подобное представление вбирает всю точность исходных моделей, а сам граф обеспечивает весьма удобную информацию для проведения автоматизированной выправки путей в плане и профиле и достижения целей навигации.

С точки зрения интеллектуальной навигации важны новации, вносимые в теорию адаптивных систем навигации железнодорожного транспорта с известными траекториями движения типа ЭКМП. Между эталонной моделью и адаптивным измерительным комплексом устанавливается отрицательная обратная связь. Очевидно, что обратная связь может быть осуществлена с помощью навигационных функций вида пройденного пути, входящих в алгоритмы реального времени, которые опираются на адаптивные возможности стохастической фильтрации и рекуррентные схемы плоских вращений Гивенса. Наиболее эффективен при этом переход к плоской системе координат в проекции Коугия, обеспечивающий минимальные потери времени на вычисления.

Разработаны две схемы адаптивного навигационного алгоритма. Первая соответствует наличию эталонных моделей высокой точности. В этом варианте в процессе стохастической фильтрации комплексированных инерциальных и спутниковых измерений вычисляют высокоточ-



Рис. 2. Структурная схема ГИТ.



ный пикетаж пути, с учетом которого определяют координаты МО как навигационные функции. Во втором случае, когда фигурируют координатные модели пути с дециметровой или субдециметровой точностью, навигационные функции следует принять за косвенные измерения с известной весовой матрицей и повторить фильтрацию i -го блока с учётом поступления новых избыточных измерений.

При такой схеме стохастической фильтрации осуществляется отрицательная обратная связь навигационных функций с интегрированной навигационной системой, определяющая навигационную систему как адаптивную.

Выводы

Затронутые в статье вопросы и подходы к их решению вносят свой вклад в теорию

эталонных координатных моделей пути, технологии их создания и разработку на их основе теории адаптивных спутниковых навигационных систем железнодорожного транспорта.

Вместе с тем проводимые исследования оставляют пока открытыми и нерешенными многие не менее важные теоретические проблемы. Среди них:

1. Разработка теории и адаптивных алгоритмов обновления эталонных и высокоточных координатных моделей железнодорожного пути, имеющая существенное значение для мониторинга его геометрии.

2. То же самое в отношении комплексирования измерительных и навигационных средств применительно к автоматизированным системам управления движением типа МАЛС, КЛУБ и САУТ с целью повышения точности и надёжности местоопределения

мобильных объектов железнодорожного транспорта, использующих спутниковые ГЛОНАСС и GPS.

3. Совершенствование теории и адаптивных методов комплексирования измерительных и навигационных систем автоматизированных путеизмерительных и выправочных комплексов с ЭКМП при научной трактовке координатных определений и подготовке данных для выправки плана и профиля пути в координатной форме.

Такого рода задачи требуют продолжения исследований, сохранения их направленности и целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альберт А. Регрессия, псевдообращение и рекуррентное оценивание. — М.: Наука, 1977. — 221 с.

2. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. — 320 с.

3. Грооп Д. Методы идентификации систем. — М.: Мир, 1979. — 302 с.

4. Зыков А. А. Основы теории графов. — М.: Вузовская книга, 2004. — 664 с.

5. Лёвин Б. А., Круглов В. М., Матвеев С. И. и др. Геоинформатика транспорта. — М.: ВИНТИ РАН, 2006. — 336 с.

6. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. — М.: Наука, 1986. — 232 с.

7. Матвеев С. И. Геометрия группового уравнивания // Геодезия и картография. — 1997. — № 10. — С. 13–16.

8. Матвеев С. И., Коугия В. А. Выходоточные цифровые модели пути и спутниковая навигация железнодорожного транспорта. — М.: Маршрут, 2005. — 290 с.

9. Матвеев С. И., Розенберг И. Н. Графы и навигация. — М.: ВИНТИ РАН, 2011. — 196 с.

10. Тertychnyy-Dauri В. Ю. Адаптивная механика — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Факториал Пресс, 2003. — 464 с.

INTELLIGENT NAVIGATION: GLONASS AND COORDINATE MODELS

Matveev, Stanislav I. — D. Sc. (Tech), professor, head of the department of geodesy, geoinformatics and navigation of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The article is devoted to further elaboration of theory fundamentals and algorithms of railway intelligent navigation on the basis of GLONASS global satellite system and standard coordinate models of tracks. The models can be used to monitor geometry of track as well as to control and navigate scheduled trains. Flows of synchronized measuring inertial

data are adapted to standard model. In order to fulfill navigation functions the emphasis is put on motion trajectories simulated by linear metric graphs. The article sequentially analyzes structural and stage-by-stage features of simulation models and current and long-term research tasks referring the subject under the study.

Key words: satellite navigation, intelligent system, GLONASS, GPS, standard track coordinates models, theory, technology, adaptive algorithms.

REFERENCES

1. Albert A. Regression, And The Moor-Penrose Pseudoinvers [Russian title: *Regressiya, psevdooobraschenie i rekurrentnoe otsenivanie*]. Moscow, Nauka publ., 1977, 221 p.

2. Voevodin V. V., Kuznetsov Yu. A. Matrix and computation [Russian title: *Matritsy i vychisleniya*]. Moscow, Nauka publ., 1984, 320 p.

3. Graupe, Daniel. Identification of Systems [Russian title: *Metody identifikatsii sistem*]. Moscow, Mir publ., 1979, 302 p.

4. Zykov A. A. Fundamentals of graph theory [Russian title: *Osnovy teorii grafov*]. Moscow, Vuzovskaya kniga publ., 2004, 664 p.

5. Lievin B. A., Kруглов V. M., Matveev S. I. et al. Geoinformatics of transport [Russian title: *Geoinformatika transporta*]. Moscow, VINITI RAN, 2006, 336 p.

6. Lawson, Charles L., Hanson, Richard J. Solving

Least Squares Problems [Russian title: *Chislennoe reshenie zadach metoda naimen'shih kvadratov*]. Moscow, Nauka publ., 1986, 232 p.

7. Matveev S. I. Geometry of adjustment by groups [Russian title: *Geometriya gruppovogo uravnivaniya*]. *Geodeziya i kartografiya*, 1997, № 10, pp. 13–16.

8. Matveev S. I., Kougiya V. A. High-precision digital models of track and satellite navigation of railways [Russian title: *Vysokotochnnye tsifrovye modeli puti i sputnikovaya navigatsiya zheleznodorozhnogo transporta*]. Moscow, Marshrut publ., 2005, 290 p.

9. Matveev S. I., Rozenberg I. N. Graphs and navigation [Russian title: *Grafi i navigatsiya*]. Moscow, VINITI RAN, 2011, 196 p.

10. Tertychnyy-Dauri V. Yu. Adaptive mechanics [Russian title: *Adaptivnaya mehanika*]. 2d ed., rev. and enlarg. Moscow, Faktorial Press publ., 2003, 464 p.

Работа выполнена в рамках Гранта РФФИ 11-08-13131-офи-М-2011-РЖД.

The work was conducted in the framework of the grant of Russian Foundation for Fundamental Researches RFFI 11-08-13131-ofi-M-2011-RZD.

Координаты автора (contact information): Матвеев С. И. (Matveev S. I.) — matveev@cea.ru.

Статья поступила в редакцию /article received 12.02.2013

Принята к публикации / article accepted 26.02.2013

