

УДК 681.51+629.7.05

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕРВАЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ К ЗАДАЧАМ КОРРЕКТИРУЕМОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

В.Д. Дишель

Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. Н.А. Пилюгина
Россия, 117342, Москва, Введенского ул., 1
E-mail: vddishel@list.ru

О.С. Овчинникова

Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. Н.А. Пилюгина
Россия, 117342, Москва, Введенского ул., 1
E-mail: olesya.poyatsika@gmail.com

Ключевые слова: интервально-динамическое оценивание, объекты с необратимым характером процессов управления, БИНС, структурно-измерительная избыточность.

Аннотация: Дается краткое описание технологии интервально-динамического оценивания (ТИДО) как теоретической основы корректируемых инерциальных навигационных систем (КИНС). Обсуждается практическое применение ТИДО в КИНС миссий выведения на орбиты. Для КИНС с измерительной избыточностью найдены новые решения задач обнаружения некондиционных измерителей и восстановления уровня избыточности.

1. Введение

При создании интегрированных систем управления (ИСУ) движением, в состав которых вместе с основной – инерциальной – входит неинерциальная, например спутниковая навигационная система, одновременно с вопросами точности требуется решать проблему достоверности решений контура корректируемой инерциальной навигации.

Для ИСУ некоторых классов объектов обе проблемы – и точности, и достоверности – значимы и в равной мере приоритетны. К ним в первую очередь относятся объекты, процессам управления которыми присуще свойство необратимости, следствием чего недопустимым является проникновение в контур наведения даже на короткое время навигационных данных, не отвечающих надлежащему уровню достоверности.

Особенность задачи коррекции в рассматриваемой постановке обуславливается предположением, что на выходе неинерциальных или, говоря иначе, внешнетраекторных систем (ВТ-систем) возможны измерения с произвольными по структуре, градиентам и величине ошибками. В таких условиях классические оптимальные и минимаксные методы обработки неработоспособны.

О трудностях в удовлетворении требованиям и точности, и достоверности в оценивании говорит, например, тот факт, что ведущие мировые космические корпорации, к

примеру Arianespace, прикладывая значительные усилия, находятся в этом направлении на стадии научно-исследовательских работ [1] и практических успехов пока не имеют.

Специфика рассматриваемой задачи коррекции нашла отражение в новом, названном интервально-динамическим, методе [2] оценивания и идентификации. В его основу положена концепция соединения метода динамической (рекуррентной) фильтрации с интервальным принципом формирования оценки.

2. Основные положения интервально-динамического метода

2.1. Постановка задачи

Пусть в течение конечного промежутка времени $[t_0, t_f]$ от ВТ-системы поступает конечное число измерений m -мерного вектора

$$(1) \quad \mathbf{h}_{из}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) + \delta\mathbf{h}(t),$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t))$ - измеряемая функция; $\delta\mathbf{h}(t)$ – m -мерный вектор ошибок ВТ-измерений $\mathbf{h}_{из}(t)$, включающий как собственно ошибки, так и различные виды информационных нарушений в каналах измерений; $\mathbf{x}(t)$ – n -мерный вектор состояния, включающий в числе прочих векторы скорости $\mathbf{v}(t)$ и координат $\mathbf{r}(t)$. Информация об $\mathbf{x}(t)$ формируется интегрированием в темпе полета системы уравнений инерциальной навигации. В бесплатформенных КИНС к ним добавляются кинематические уравнения динамики углового движения.

Введем обозначения: \mathbf{I}_h - множество всех измерений $\mathbf{h}_{из}(t)$, которые возможны на интервале $[t_0, t_k] \subset [t_0, t_f]$; $\Omega_{\delta h}$ – множество всех возможных ошибок $\delta\mathbf{h}$ этих измерений; \mathbf{I}_h^+ – множество ВТ-измерений $\mathbf{h}_{из}(t)$, которые считаются достоверными (приемлемыми) и могут допускаться к выработке сигналов управления $\mathbf{u}(t)$; $\Omega_{\delta h}^+$ – множество ошибок измерений $\mathbf{h}_{из}(t) \in \mathbf{I}_h^+$, которые КИНС распознала как приемлемые; \mathbf{I}_h^- – множество измерения, которые считаются неприемлемыми и не могут допускаться к выработке сигналов управления; $\Omega_{\delta h}^-$ – множество ошибок таких измерений.

Множества $\Omega_{\delta h}$, $\Omega_{\delta h}^+$, $\Omega_{\delta h}^-$ зададим следующим образом:

$$(2) \quad \begin{aligned} \Omega_{\delta h} &= \{z/z = x \cup y, x \in \Omega_{\delta h}^+, y \in \Omega_{\delta h}^-\}, \Omega_{\delta h} = \Omega_{\delta h}^+ \cup \Omega_{\delta h}^-, \\ \Omega_{\delta h}^+ &= \{x/x = |\delta h_j(t)| \leq \delta h_j^{max} \cap |\delta \dot{h}_j(t)| \leq \delta \dot{h}_j^{max}\}, j = 1, 2, \dots, m, \\ \Omega_{\delta h}^- &= \{y/y = |\delta h_j(t)| > \delta h_j^{max} \cup |\delta \dot{h}_j(t)| > \delta \dot{h}_j^{max}\}, j = 1, 2, \dots, m, \end{aligned}$$

где δh_j^{max} , $\delta \dot{h}_j^{max}$ – заданные величины.

Введем понятие функционально значимого участка (ФЗУ) движения. Под ФЗУ будем понимать фрагмент управляемого участка, на котором выполняются условия

$$(3) \quad 1) \Delta T \geq \Delta T_{min}, (|\mathbf{w}(t_0^v, t_0^v + \Delta T)| \geq w_{min}), (t_0^v, t_0^v + \Delta T) \subset [t_0, t_k],$$

$$2) |\mathbf{I}_h^+| \geq k_{\delta h} |\mathbf{I}_h^-|, \mathbf{w}(t_0^v, t_0^v + \Delta T) = \int_{t_0^v}^{t_0^v + \Delta T} \dot{\mathbf{w}}(\tau) d\tau,$$

$\dot{\mathbf{w}}(\tau)$ – кажущееся ускорение, t_0^v и ΔT – время начала указанного фрагмента и его продолжительность, ΔT_{min} , w_{min} , $k_{\delta h}$ – априори задаваемые константы, причем $k_{\delta h} > 1$. Обычно $k_{\delta h} \approx 2, \dots, 3$; $|\mathbf{I}_h^+|, |\mathbf{I}_h^-|$ – обозначение мощностей множеств. Строка 2) в (3) означает, что на каждом ФЗУ с $\Delta T \geq \Delta T_{min}$ и набором на нем кажущейся скорости $|\mathbf{w}(t_0^v, t_0^v + \Delta T)| \geq w_{min}$ множество неприемлемых $\mathbf{h}_{из}(t) \in \mathbf{I}_h^-$ ВТ-измерений может содержать до $1/k_{\delta h}$ элементов от числа измерений $\mathbf{h}_{из}(t) \in \mathbf{I}_h^+$. Характер ошибок $\delta\mathbf{h}(t) \in \Omega_{\delta h}^-$ при этом произволен.

К (2), (3) добавим еще условие, которое определяет соотношение частот ошибок, присущих, с одной стороны, инерциальным, а с другой ВТ-системам, а именно:

$$(4) \quad |\omega_{\delta h_{\text{ВТ}}}|_{\min} \gg |\omega_{\delta x}|_{\max} \approx 2\pi/T_{\text{ш}},$$

где $|\omega_{\delta h_{\text{ВТ}}}|_{\min}$ и $|\omega_{\delta x}|_{\max}$ – минимальное и максимальное значения частот спектра ошибок $\delta \mathbf{h}(t) \in \Omega_{\delta h}^-$ ВТ-систем и ошибок $\delta \mathbf{x}(t)$ выходов ИНС; $T_{\text{ш}}$ – период Шулера.

Определим понятие наихудшей в модели (2)-(4) ситуации по ВТ-измерениям. Свяжем это с выполнением на каждом ФЗУ условий, при которых: 1) нижнее неравенство (3) обращается в равенство $|\mathbf{I}_h^+| = k_{\delta h} |\mathbf{I}_h^-|$; 2) расположение измерений $\mathbf{h}_{\text{из}}(t) \in \mathbf{I}_h^-$ максимально неблагоприятно с точки зрения принятого [2] критерия точности.

Совместное выполнение этих положений представим как условие принадлежности:

$$(5) \quad \mathbf{h}_{\text{из}}(t) \in \mathbf{I}_h^{-\min} \text{ при } \mathbf{I}_h^{-\min} \supset \mathbf{I}_h^-$$

и трактовать как «минимально гарантированное участие ВТ-системы в выработке \mathbf{u} ».

2.2. Основы решения

В обеспечение условия интервальности в структуру фильтра введем новый фактор – достаточно продолжительную мерную базу. Для этого:

1) каждый участок $[t_0, t_k]$ разобьем на интервалы $[t_0^v, t_f^v]$, $v = 1, 2, \dots$ заданной длительности ($\sim 10\text{с}$) и примем, что получаемые на одном $[t_0^v, t_f^v]$ измерения (1) для обновления оценки $\mathbf{x}(t)$ могут использоваться единожды и лишь в составе единой группы;

2) измерения (1) заменим интервально формируемыми функционалами из них. При этом использовать будем только измерения, которые системой в ходе очередного интервала $[t_0^v, t_f^v]$ были опознаны как приемлемые (у которых $\delta \mathbf{h}(t) \in \Omega_{\delta h}^+$), а, во-вторых, рассматривать такие измерения в виде линейных комбинаций от них. Выразим это так:

$$(6) \quad \mathbf{J} = \int_{t_0^v}^{t_f^v} \mathbf{A}(t)(\mathbf{h}(\mathbf{x}, t) + \delta \mathbf{h}(t)) dt; \quad \mathbf{J}_h = \int_{t_0^v}^{t_f^v} \mathbf{A}(t) \mathbf{h}_{\text{рас}}(\mathbf{x}_h, t) dt;$$

$$\mathbf{h}_{\text{рас}}(\mathbf{x}_h, t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, t),$$

где $\mathbf{A}(t)$ – матричная функция ($p \times m$, $p \leq m$), определяемая методом обработки, $\mathbf{x}_h(t) = \mathbf{x}(t) + \delta \mathbf{x}$ – вектор состояния навигационной траектории; $\delta \mathbf{x}$ – его ошибка.

3) обратимся к уравнению инерциальной навигации и введем в него дельта-функцию $\delta(t - t_{\text{ут}}^v)$ как множитель перед взвешенной невязкой функционалов (6) ВТ-измерений.

В результате получим уравнение динамической фильтрации следующего вида

$$(7) \quad \frac{d\mathbf{y}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{y}) + \dot{\mathbf{w}}_y(t) + \mathbf{L} [\mathbf{J}(\mathbf{h}_{\text{из}}(t)) - \mathbf{J}_h(\mathbf{h}_{\text{рас}}(t))] \delta(t - t_{\text{ут}}^v)$$

при

$$\mathbf{y}(t_0^v) = \mathbf{x}_h(t_0^v),$$

где $\mathbf{y}(t)$ – n -мерный вектор; $\mathbf{f}(\mathbf{y})$ – вектор гравитационного ускорения (в общем случае некоторая вычисляемая функция); $\dot{\mathbf{w}}_y(t)$ – аналог ускорения $\dot{\mathbf{w}}_h$ ($\dot{\mathbf{w}}_h$ – результат измерений инерциальной системы вектора $\dot{\mathbf{w}}(t)$, $\dot{\mathbf{w}}_h(t) = \dot{\mathbf{w}}(t) + \delta \dot{\mathbf{w}}(t)$), $t_{\text{ут}}^v$ – момент времени, единственный на каждом $[t_0^v, t_f^v]$, $v = 1, 2, \dots$, для которого определяется [3, 4] вектор поправки $\Delta \mathbf{y}(t_{\text{ут}}^v)$ к траектории $\mathbf{y}(t)$ ($t_{\text{ут}}^v$ – момент уточнения); \mathbf{L} – весовая ($n \times p$) матрица.

На основе теории сопряженных уравнений осуществлена оптимизация фильтра. Найдены условия [2], которым должны отвечать $\mathbf{L}, \mathbf{A}, t_{\text{ут}}^v$, при которых интервально-динамический фильтр с однократно вырабатываемой на $[t_0^v, t_f^v]$ оценкой эквивалентен по точности фильтру Калмана, в котором она вырабатывается с темпом ВТ-измерений.

Это означает, что когда поступающие в фильтр измерения отвечают допущениям теории фильтрации, интервально-динамическое оценивание эквивалентно по точности классическим методам. Когда же, как и бывает на практике, данное условие не выпол-

няется, интервально-динамический метод эффективнее. Объясняется это следующим. Преобразование (6), переводящее первичные ВТ-измерения в их функционалы, являясь интервальным, производится не над одномоментно принятыми измерениями, как в известных методах, а над группой измерений, распределенных на интервале. Формируется группа в виде линейных комбинаций, где участвуют только ВТ-измерения, которые системой в ходе мерного интервала были распознаны как приемлемые (см. (2)). Выделение их осуществляется процедурой распознавания. Основывается она на методах искусственного интеллекта, модели (2)-(4), интервальности формирования оценки. В результате к функционалам (6) становится применима центральная предельная теорема.

Введем понятие. Назовем оценивание гарантированно-достоверным, если какими бы ни были ошибки $\delta \mathbf{h} \in \Omega_{\delta h}^-$ некоторой части \mathbf{I}_h^- ВТ-измерений множества \mathbf{I}_h всех возможных ВТ-измерений, описываемых моделью (2)-(4), а также моделью (5) наиболее неблагоприятной по неприемлемым измерениям ситуации на каждом ФЗУ, ошибки $\delta y_j^+(t_{yT}^v)$ апостериорных компонент $y_j^+(t_{yT}^v), j = 1, 2, \dots, n$ каждого обновляемого навигационного решения $\mathbf{y}^+(t_{yT}^v), v = 1, 2, \dots$, уравнения (7) не превышают свои априорные значения, удовлетворяя условию $|\delta y_j^+(t_{yT}^v)| \leq |\delta y_j^-(t_{yT}^v)| = |\delta x_j(t_{yT}^v)|, j = 1, 2, \dots, n$.

2.3. Применение ТИДО в миссиях выведения

Технология с входящими в нее алгоритмами и бортовым математическим обеспечением внедрена в серийные образцы ИСУ. Такие ИСУ эксплуатируются уже десять лет. За это время осуществлено почти шестьдесят миссий [5] со стартами с космодромов: Байконур, Плесецк, ЕКЦ “Kuru”, Восточный. Они обеспечили выведение с точностями, которые недоступны другим отечественным и зарубежным комплексам выведения, превосходя их в точности на один/два порядка.

2.4. Развитие ТИДО применительно к КИНС нового поколения

Успешный опыт разработки и эксплуатации КИНС в существующих средствах выведения стали катализатором создания нового поколения таких систем на основе БИНС со структурно-измерительной избыточностью. Созданная БИНС имеет по шесть чувствительных приборов каждого типа с додекаэдральной ориентацией осей чувствительности [6].

К важнейшим решениям, найденным для таких БИНС, относятся решения по обнаружению в ходе полета измерителей с повышенными погрешностями измерений (параметрические отказы) по одной...двум измерительным осям каждого типа, решения по формированию корректирующих поправок к формулярным данным таких измерителей и восстановлению их точностных характеристик [5]. Особенность и эффективность решений обуславливается тем, что их построение осуществляется по интервальным измерениям инерциальных измерителей, причем с накоплением показаний непосредственно по измерительным осям. До сих пор такой подход в литературе не встречался.

Возможность и осмысленность этого обуславливаются выявленными специфическими свойствами траекторного и углового движений. Дело в том, что на траекториях многих типов объектов имеются продолжительные участки $[t_0, t_k]$, движение на которых характеризуется взаимно пропорциональными изменениями во времени разномименных компонент кажущейся скорости в проекциях на оси связанной системы координат объекта. Такой же характер на отдельных участках движения имеют и изменения проекций вектора угловой скорости на те же оси.

Интервальность позволила многократно по сравнению с известными одноопросными способами понизить уровень ошибок, при котором происходит их обнаружение.

Математическое моделирование [7] начальной выставки БИНС, процессов навигации и ориентации на траекториях выведения, подтвердили эффективность найденных решений. Многочисленные иллюстрации этого будут продемонстрированы в докладе.

Полученные результаты, как теоретического характера, так и результаты моделирования полностью подтвердили эффективность применения и развития ТИДО для решения информационных задач в перспективных КИНС, создаваемых на основе БИНС со структурно-измерительной избыточностью. Использование характерных для рассматриваемых объектов свойств траекторного и углового движений позволило перейти на метод с интервальным накоплением показаний инерциальных измерителей, причем не в интегралах уравнений движения, как в работах других авторов, а непосредственно по осям их чувствительности. Последующая после локализации измерителей перекалибровка некоторых формулярных данных модели погрешностей обеспечивает восстановление точностных характеристик датчиков, а для БИНС в целом восстановление ее исходной структурной и измерительной избыточности.

Найденные новые технические решения, воплощенные в бортовом программно-математическом обеспечении, обеспечивают максимально полную реализацию измерительно-избыточных аппаратных возможностей БИНС.

Список литературы

1. Belin S., Dubuc F., Villers S., Reis A.C. Requirements toward GNSS chain for Ariane 5 Mid-Life Evolution // 5th Workshop ESA on GNSS. Netherlander. 2010.
2. Дишель В.Д. Интервально-динамический метод гарантированно-достоверного оценивания и идентификации для задач корректируемой инерциальной навигации (ч. 1) // Труды ФГУП НПЦАП. 2017. № 3. С. 12-31.
3. Дишель В.Д. Интервальные методы высокоточного гарантированно-достоверного оценивания и идентификации в задаче корректируемой инерциальной навигации. Доклад на семинаре лаборатории 7 Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина, ИПУ РАН 14.04.2015.
4. Dishel V.D., Sapojnikov A.I., Malishev A.V. High-Precision Guaranteed Validity Estimation Methods Application for Integrated Inertial Navigation Solution of Orbital Vehicles // Advances in the Astronautical Sciences (AAS 17-876). 2017. Vol. 161. P. 353-372.
5. Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Пояцька (Овчинникова) О.С., Соколова Н.В. Технология интервально-динамического оценивания и идентификации как средство повышения точности СУ средств выведения...// XXV МКИНС. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 53-63.
6. Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Немкевич В.А., Сулимов В.Г., Дервянкин А.В. Принципы обеспечения отказоустойчивости при додекаэдрозбыточной структуре БИНС// Труды МНТК «Системы и комплексы автоматического управления ЛА, посвященной 105-ю с дня рождения акад. Н.А. Пилюгина». Москва, 2013. Под ред. акад. РАН Васильева С.Н. М.: ИПУ РАН, С. 72-83.
7. Пояцька (Овчинникова) О.С. Идентификация некондиционных инерциальных измерителей в составе избыточного БИБ // VIII НТК молодых ученых. М.: ФГУП «НПЦАП», 2018. С. 151-153.