

Использование методов оптимального стохастического управления для решения задачи начальной ориентации инерциальной навигационной системы при диагностике транспортно-эксплуатационного состояния дорог

Е.Г.Чуб

В настоящее время одним из важнейших факторов социально-экономического развития любого региона является наличие современной транспортной инфраструктуры, обеспечивающей надежность и безопасность перевозок. Для диагностики транспортно - эксплуатационного состояния дорог, оперативного контроля качества дорожных работ используются передвижные лаборатории (например, КП-514МП и их модификации), оснащенные вычислительными комплексами, осуществляющими сбор информации, управление измерениями, обработку результатов измерений и диагностику функциональных узлов. При измерениях параметров дорог, таких, как ровность [1], радиус кривизны в плане трассы дороги, радиусы вертикальных выпуклых и вогнутых кривых, наличие виражей, переходных кривых, имеющих переменный радиус, расстояние видимости проезжей части дороги, используются гироскопические датчики. Точность решения задачи начальной ориентации инерциальных навигационных систем (ИНС), построенных на основе использования гиросtabilизированной платформы (ГСП), во многом зависит от возможности определения пространственной ориентации осей ее стабилизации [2]. Решение этой задачи может осуществляться как наземными средствами, так и бортовыми. Анализ литературы [4,5,6] показывает, что последний подход является более перспективным, поскольку его использование не требует: высокой точности взаимной выставки бортовых и наземных приборов ИНС, восстановления

прицельных положений в случае их потери, затрат времени на подготовку к движению лаборатории.

В рамках реализации второго подхода в [2] был рассмотрен вопрос использования методов оптимального управления пространственной ориентацией ГСП. В тоже время полученное решение было ориентировано на применение детерминированной модели вектора состояния ИНС. В то время как реальные системы автомобильного транспорта функционируют в условиях действия возмущений различной физической природы.

Таким образом, возникает актуальная научная и практическая задача начальной ориентации ИНС платформенного типа, функционирующей в условиях действия возмущений.

Будем полагать, что в состав измерительного комплекса ИНС наряду с тремя ортогональными акселерометрами входит дополнительно астровизир, позволяющий осуществлять высокоточное визирование на выбранную звезду. В качестве модели дрейфа ГСП будем использовать полином второго порядка.

Сделанные допущения позволяют представить модель движения управляемой ГСП в виде

$$\begin{vmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{vmatrix} = \Phi(\beta, \gamma)R + \Phi(\beta, \gamma)(UD(\alpha, \beta, \gamma)V^T(t)(G + w) + \quad (1)$$

$$\left((D(\alpha, \beta, \gamma)V^T(t)(G + w))^T \hat{\otimes} K \right) D(\alpha, \beta, \gamma)V^T(t)(G + w) + W + \Phi(\beta, \gamma)KM,$$

где G - известный вектор ускорений в АСК, R, U, K – коэффициенты модели дрейфа ГСП, D, V – матрицы направляющих косинусов, α, β, γ – углы Эйлера Крылова, M – вектор искомого управления, w – вектор случайных возмущающих ускорений, направленных по осям гироскопического трехгранника и описываемый в общем случае БГШ с нулевым математическим ожиданием и известной матрицей

интенсивностей $D_w(t)$, W – БГШ с нулевым математическим ожиданием и матрицей интенсивностей $D_w(t)$.

Система уравнений (1) может быть использована для описания управляемого движения ГСП в инерциальном пространстве. Важной особенностью (1), имеющей большое практическое значение, является ее описание в углах разворота относительно *инерциальной* СК. В этой СК углы разворота ГСП оказываются весьма малыми на длительном интервале времени – при современном уровне технологии не превышают долей градуса в течение десятков часов [9,10]. Все это позволяет перейти от нелинейной модели (1) к линеаризованной модели движения ГСП, оказывающейся адекватной на длительном интервале времени и существенно проще реализуемой в современных ИНС

$$\dot{\beta} = f_1^\beta(\beta, t) + f_2^\beta(M, \beta, t) + f_3^\beta \xi, \quad \text{где } f_i^\beta \text{ – известные функции,} \quad (2)$$

Как видно с помощью проведенных построений и использования показаний акселерометра удалось свести нелинейную трехмерную систему уравнений (1) к одномерному стохастическому дифференциальному уравнению (2). Очевидно, что использование (2) вместо (1) существенно упрощает поставленную задачу.

По окончании синтеза уравнений вектора состояния в виде (2) с целью возможности последующего синтеза апостериорной плотности распределения необходимо использовать уравнение наблюдателя в виде

$$Z_A = H(t)\beta + W_A \quad (3)$$

где Z_A – выходной сигнал акселерометра, W_A – белый гауссовский вектор-шум (БГШ) с нулевым математическим ожиданием и матрицей интенсивностей $D_{W_A}(t)$.

Апостериорная плотность вероятности процесса β_t , описывается уравнением Стратоновича, решение которого а, следовательно, и синтез оптимального управления представляется сложной задачей. Исследуем приближённый метод его решения, основанный на том, что определенный

вид АПВ можно имеет место, исходя из физических соображений. В качестве такой АПВ будем рассматривать распределение Пирсона.

Используя методику синтеза уравнений моментов, приведенную в [3]

получим замкнутую систему моментов:

$$\dot{m}^\beta = F(m^\beta, t) + F_0(m^\beta, t)M, \quad (4)$$

где $F(m^\beta, t)$, $F_0(m^\beta, t)$ известные векторные и матричные функции.

Будем полагать, что целью управления является обеспечение требуемой ориентации гиросtabilизированной платформы, то есть малости углов α и β и равенства нулю угла γ . Тогда задачу синтеза искомого управления формализуем следующим образом. На заданном интервале времени $T = [t_0, t_k]$, параметры состояния которого описываются системой уравнений (4), требуется определить вектор-функцию управления M из условия минимума функционала

$$J = \int_{t_0}^{t_k} \left(\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^3 \tilde{D}_{ij}^2 + M^T M \right) dt = \int_T L(m^\beta, M, t) dt \quad (5)$$

где $\tilde{D}_{ij} = \tilde{D}_{ij}(\beta)$ - ij -й элемент матрицы \tilde{D} , а t_k - определяется исходя из времени функционирования объекта.

Подобная форма критерия оптимальности позволяет минимизировать отклонение всех осей ГСК от осей ИСК: первое слагаемое играет основную роль, а слагаемое $M^T M$ определяет оптимальные (минимальные) энергетические свойства процесса управления.

Для синтеза искомого вектора управления M , обеспечивающего минимум критерия (5) при описании вектора состояния системой уравнений (4), используем принцип максимума, который позволяет свести поставленную задачу к интегрированию системы уравнений [3,7,8]

$$\dot{\tilde{m}}^\beta = F(\tilde{m}^\beta, t) - P \left[\frac{\partial L(\tilde{m}^\beta, 0, t)}{\partial m^\beta} \right]^T, \quad (6)$$

$$\dot{P} = 2 \left\{ \frac{\partial F(\tilde{m}^\beta, t)}{\partial m^\beta} \right\} P + P \left\{ \frac{\partial}{\partial \mu} \left[\frac{\partial L(\tilde{m}^\beta, 0, t)}{\partial m^\beta} \right]^T + \frac{\partial}{\partial m^\beta} [F(\tilde{m}^\beta, t)]^T \right\} - 2P \left\{ \frac{\partial}{\partial m^\beta} \left[\frac{\partial L(\tilde{m}^\beta, 0, t)}{\partial m^\beta} \right]^T \right\} P$$

где матрица P играет роль весовой матрицы при отклонении оптимального вектора от его аппроксимации, а вектор управляющих моментов имеет вид

$$M = -F_0(m^\beta, t) P \left[\frac{\partial L(\tilde{m}^\beta, 0, t)}{\partial m^\beta} \right]^T.$$

Таким образом, разработанный метод начальной ориентации ИНС на основе управляемой гиросtabilизированной платформы в полной мере решает поставленную задачу.

Литература:

1. Углова Е.В., Илиополов С.К., Селезнев М.С. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтовых покрытий [Текст]: Монография / Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009.-244 с.
2. Межирицкий Е.Л., Денисов М.М., Малыхин Л.И, Мишина В.К., Никифоров В.М. Автоматизированные системы сбора и обработки информации для управления и целеуказания [Текст]: Монография / М.: Литкон, 2009. – 352 с.
3. Синицын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева [Текст]: Монография / М.:Логос, 2006.– 640с.
4. Погорелов В.А. Многоструктурное оценивание комплексированной навигационной системы многоразового космического аппарата [Текст] / – М.: Наука Космические исследования. — 2008. Т. 46. — № 3. С. 243-248.
5. Щербань И.В. Толмачев С.А. Красников С. О. Универсальная стохастическая модель движения наземного транспортного средства [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник

- Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1812> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. Хацько Н. Е. О возможности использования инерциальных датчиков низкого и среднего класса точности в системах автоматического управления полетом летательного аппарата. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1756> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
 7. Grewel M.S., Henderson V.D., Miysako R.S. Application of Kalman Filtering to the Calibration and Alignment of Inertial Navigation Systems //IEEE trans. Aerospace and Electronic Syst. – 1993. – V.AES-29, №3. – P.786-797.
 8. Lawrence, A. Modern Inertial Technology – Navigation, Guidance and Control, Springer-Verlag, Second Edition. – 1998
 9. Назаров Б. И., Черников С.А., Хлебников Г.А., Верхов Г.В. Командно-измерительные приборы [Текст]: Монография / – М.: МО СССР, 1987. – 640 с.
 - 10.Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация [Текст]: Монография / – М.: Наука, 1976. – 672 с.