

Контроль инерциально-спутниковых наблюдений по комбинированным критериям согласия

Иванов С.А.

Раменский приборостроительный завод,

ул. Михалевича, 39, Раменское, Московская область, 140100, Россия

e-mail: srpremier@mail.ru

Статья поступила 18.11.2020

Аннотация

Работа посвящена проблеме повышения достоверности контроля и локализации нарушений в инерциально-спутниковых навигационных системах. Предлагаемые решения проблемы опираются на декомпозицию диагностических моделей таких систем и применение комбинированных статистических критериев. Технология последовательной обработки наблюдений позволяет формировать диагностические параметры по выборке невязок на скользящем временном интервале. Приводятся и анализируются результаты натурных экспериментов с типовой БИНС. Сделаны выводы о необходимости адаптивно-робастной обработки инерциально-спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, спутниковая навигационная система, помехи, контроль, фильтр Калмана.

Введение

Современное состояние бортового оборудования характеризуется внедрением навигационных комплексов (НК) нового поколения. Ядром таких НК являются интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИСНС) [1-5] на базе квантово-оптических измерителей: лазерных и волоконно-оптических гироскопов. Интеграция основана на различии спектральных характеристик ошибок бесплатформенной инерциальной (БИНС) и спутниковой (СНС) навигационных систем. В БИНС такие ошибки лежат в низкочастотной, а в СНС - в высокочастотной области спектра. Однако в практических применениях возникают трудности спутниковой поддержки БИНС, связанные с нестабильностью информации от СНС по следующим причинам [4,6]:

- естественные и имитационные помехи;
- переотражение сигналов;
- пропадание сигналов из-за затенений;
- появления аномальных сигналов при изменении спутниковых созвездий и плохом геометрическом факторе.

Использование аномальных сигналов при формировании инерциально-спутниковых наблюдений может привести к нарушению информационной целостности ИСНС [7,8], когда при аппаратурной исправности получаемые оценки навигационных параметров являются недостоверными. Поэтому возникает задача обнаружения и парирования аномальных наблюдений, а также локализации связанных с такими наблюдениями систем и их адаптации к текущей помеховой обстановке. Информационная целостность опирается на решение указанной задачи

для защиты НК от недостоверной информации, которая может поступать от ИСНС. Парирование аномальных сигналов может быть реализовано на основе робастных процедур [9], а настройка параметров оценивающих фильтров на текущую помеховую обстановку – на основе адаптивных процедур [9] обработки наблюдений. Аналитические подходы к решению задачи адаптивно-робастной защиты информационной целостности ИСНС опираются на применение диагностических моделей и решающих правил для обнаружения и парирования нарушений.

Типовая схема ИСНС с контуром формирования инерциально-спутниковых наблюдений $Z_i = Z(t_i)$ для оценки вектора ошибок БИНС x представлена на рисунке 1, где $Y(t)$ – вектор реальных параметров ориентации и навигации; $Y_{\text{БИНС}}$ – вектор параметров, формируемых БИНС; $Y_{\text{СНС}}$ – вектор параметров, формируемых СНС; \hat{x} – оценка вектора ошибок БИНС x ; $\hat{\dots}$ – символ оценки; ОФК – обобщенный фильтр Калмана [10], предназначенный для применения в нелинейных динамических системах (ДС).

При оценке ошибок БИНС приемник СНС рассматривается как датчик внешней позиционной и скоростной информации [11]. Такой приемник выдает в дискретные моменты времени геодезические широту φ , долготу λ и высоту h над соответствующим земным эллипсоидом вращения, а также проекции вектора относительной скорости \bar{V} на оси сопровождающего трехгранника $oENH$

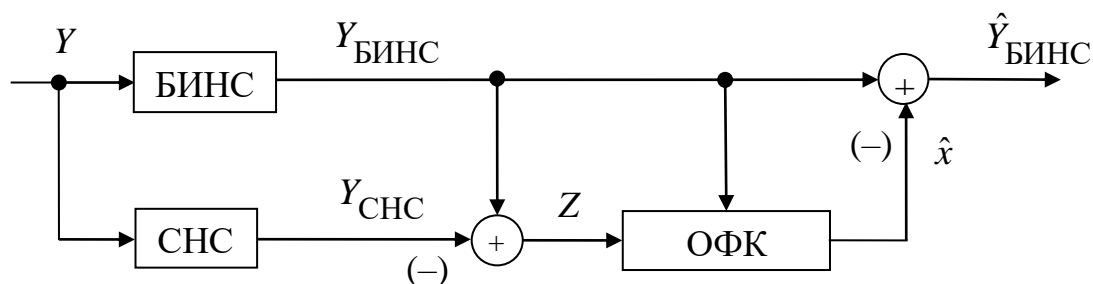


Рис. 1 - Типовая схема ИНС

геодезической системы координат; Оценка вектора ошибок БИНС и её чувствительных элементов может быть выполнена путём обработки в i – й момент времени следующих наблюдений

$$Z_{V(i)} = [V_E V_N V_H]_{\text{БИНС}(i)}^T - [V_E V_N V_H]_{\text{СНС}(i)}^T; \quad (1)$$

$$Z_{K(i)} = [\varphi_i \lambda_i h_i]_{\text{БИНС}}^T - [\varphi_i \lambda_i h_i]_{\text{СНС}}^T, \quad (2)$$

где $\bar{V} = [V_E V_N V_H]^T$ – вектор относительной скорости в проекциях на оси трехгранника $oENH$.

Цель работы – повышение точностных характеристик ИНС на основе локализации и парирования аномальных наблюдений, а также настройки параметров оценивающего фильтра на текущую помеховую обстановку.

Достижение поставленной цели опирается на применение комбинированных статистических критериев и адаптивно-робастных процедур обнаружения и парирования информационных нарушений [6].

1. Параметрическая диагностика инерциально-спутниковых наблюдений

Для формирования допусков и контроля ИНС могут быть использованы статистические свойства вектора невязок v_i , входящего в алгоритм ОФК [10,12]:

$$v_i = Z_i - \hat{Z}_i = Z_i - H_i \hat{x}_{i/i-1} = [v_{1(i)} v_{2(i)} \dots v_{j(i)} \dots v_{l(i)}]^T, \quad (3)$$

где $\hat{x}_{i/i-1} = \Phi_i \hat{x}_{i-1/i-1}$ – прогнозируемая оценка на i – м шаге по $(i - 1)$ – м наблюдениям Z_{i-1} ; Φ_i – переходная матрица для вектора ошибок БИНС; H_i – матрица связи векторов ошибок БИНС и наблюдений.

Известно [13,14], что в ДС, модель ошибок которой настроена на исправное состояние, при отсутствии нарушений вектор невязок имеет гауссовское (нормальное) распределение с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей α_i , т.е.

$$v_i \in N(0, \alpha_i) \quad (4).$$

Учитывая принцип ортогональности оптимальных оценок $M[e_i \mathcal{G}_i^T] = 0$, можно показать, что

$$\alpha_i = M[v_i v_i^T] = H_i P_{i/i-1} H_i^T + R_i, \quad (5)$$

где $P_{i/i-1} = M[e_{i/i-1} e_{i/i-1}^T] = \Phi_i P_{i-i/i-1} \Phi_i^T + \Gamma_i Q_{i-1} \Gamma_i^T$; $e_{i/i-1} = x_i - \hat{x}_{i/i-1}$; $\mathcal{G}(t)$ – вектор ошибок наблюдений, имеющий ковариационную матрицу $M[\mathcal{G}(t) \mathcal{G}^T(t-\tau)] = R(t) \delta(t-\tau)$; Γ_i – переходная матрица для вектора возмущений БИНС $\xi(t)$, характеризующегося ковариационной матрицей $M[\xi(t) \xi^T(t-\tau)] = Q(t) \delta(t-\tau)$; $\delta(t-\tau)$ – дельта-функция; $M[\dots]$ – оператор математического ожидания.

Применение традиционного ОФК предполагает одновременную обработку всех элементов вектора наблюдения Z_i с учетом прогнозных значений оценок

$\hat{x}_{i/i-1}$. Поэтому для контроля состояния ДС необходимо было бы проверять, является ли вектор v_i l -мерной гауссовской последовательностью. Однако на практике решение данной задачи затруднительно. В связи с этим на базе вектора невязок формируют более компактные в вычислительном отношении диагностические параметры. Такие параметры опираются на свертку вектора невязок v_i и ковариационной матрицы α_i :

$$J_i = v_i^T \alpha_i^{-1} v_i . \quad (6)$$

В квадратичной форме (6) элементы матрицы α_i рассматриваются как нормирующие коэффициенты, учитывающие информацию о требуемых статистических характеристиках вектора невязок. Можно показать [13], что если вектор невязок v_i имеет гауссовское распределение, то квадратичная форма (6) имеет распределение χ^2 с l степенями свободы

$$J_i \in \chi^2(l, 2l) \quad (7)$$

Таким образом, соотношение (7) определяет необходимое условие правильного функционирования ДС, которому можно поставить в соответствие область допустимых значений параметра J_i . При обосновании допуска на указанный параметр необходимо учитывать числовые характеристики распределения χ^2 и заданный уровень значимости для критерия качества контроля. Для реализации указанных требований могут быть использованы свойства квантиля $a(l)$ [15] для распределения χ^2 , а именно:

$$P\{J_i > J_{T, a(l)}\}, \quad (8)$$

где $J_{T, a(l)}$ – табличное значение параметра для заданного квантиля $a(l)$ и числа степеней свободы l ; $a(l)$ – квантиль порядка a , $a \in (0, 1)$.

Контроль по обобщенному параметру J_i позволяет оценить состояние ИСНС в целом, без анализа, какой из элементов вектора наблюдений наиболее вероятно является не кондиционным. На практике возникает необходимость контроля каждого элемента вектора наблюдений Z_i . В этом случае задача диагностирования может быть решена, если ошибки наблюдений статистически независимы, т.е. матрица R_i в соотношении (5) является диагональной. Если наблюдения взаимно коррелированы, то выполняется их предварительная декомпозиция [13]. С учетом этого представляется возможным выполнять поэлементную обработку вектора невязок (3) и анализировать состояние каждого из l измерительных каналов. Например, для контроля j -го измерительного канала может быть использована нормированная невязка $\beta_j = v_j / \sqrt{\alpha_j}$.

Статистические свойства параметра β_j^2 могут быть использованы для локализации нарушений. Для этого по аналогии с обобщенным параметром (6) при $l=1$ может быть сформировано необходимое условие отсутствия аномальных наблюдений в ИСНС по каждому из измерительных каналов, а именно:

$$J_j = \beta_j^2 \in \chi^2(1, 2). \quad (9)$$

Условию (9) и квантилю $a(1)$ можно поставить в соответствие следующие допуски для диагностического параметра J_j [13]

$$P\{J_j \geq J_{T,a(1)}\} = \begin{cases} a(1)=0.02, & J_{T,a(1)} = 5.412; \\ a(1)=0.01, & J_{T,a(1)} = 6.635; \\ a(1)=0.001, & J_{T,a(1)} = 10.827. \end{cases} \quad (10)$$

Анализ табличных данных (10) показывает, что с достаточно высокой точностью квантиль $a(1) = 0.02$ отражает правило трех сигм 3σ [15], которое применяется при обработке нормально распределенных скалярных случайных величин, а именно:

$$\beta_j^2 \leq \gamma_1^2 = M[\beta_j^2] + 3\sqrt{D[\beta_j^2]} = 1 + 3\sqrt{2} \approx 5.2, \quad (11)$$

где $D[\dots]$ – оператор дисперсии.

С учетом допуска γ_1^2 диагностирование по критерию χ^2 сводится к следующим проверкам:

$$\begin{cases} \text{если } \beta_j^2 \leq \gamma_1^2, & \text{в } j\text{-м наблюдении нет нарушений;} \\ \text{если } \beta_j^2 > \gamma_1^2, & \text{в } j\text{-м наблюдении есть нарушения.} \end{cases} \quad (12)$$

Применение критерия χ^2 позволяет обнаруживать текущие нарушения в ИСНС. На практике возникает также необходимость анализировать информацию о функционировании ИСНС за определенный период времени. На основе ретроспективных данных могут определяться соответствующие диагностические параметры. Технология последовательной обработки наблюдений позволяет формировать такие параметры по выборке невязок на скользящем временном

интервале. Для этого могут быть использованы эргодические свойства ОФК [17], априорно настроенного на правильное функционирование ИСНС. Такими параметрами являются дисперсии невязок в каждом из l каналов наблюдений. Прогнозируемое значение дисперсии α_j в j -м канале наблюдений в i -й момент времени определяется по соотношению (5), а ее оценка $\hat{\alpha}_{j(i)}$ – по реальной выборке невязок

$$\hat{\alpha}_{j(i)} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=i-N+1}^i [v_{j(k)} - \bar{v}_{j(i)}]^2; \quad j = \overline{1, l}, \quad (13)$$

где $\bar{v}_{j(i)}$ – оценка математического ожидания невязки в j -м канале наблюдений в i -й момент времени; N – количество отсчетов на скользящем временном интервале $T = [t_{i-N+1}, t_i]$. С учетом условия (4) отсутствию нарушений можно поставить в соответствие желаемое значение математического ожидания невязки $\bar{v}_{j(i)} = 0$.

В качестве параметра, характеризующего состояние ИСНС на интервале T , может быть принято отношение реальной $\hat{\alpha}_j$ и прогнозируемой α_j дисперсий, а именно:

$$F_j = \hat{\alpha}_j / \alpha_j. \quad (14)$$

Известно [15], что при выполнении условия (4) параметр (14) имеет распределение \mathcal{G}^2 , а именно:

$$F_j \in \mathcal{G}^2(b, c), \quad (15)$$

где $b = N / (N - 2)$; $c = 4N(N - 1) / [(N - 2)^2(N - 4)]$.

Используя правило 3σ , условие (15) может быть представлено в виде

$$F_j \leq \eta_1^2 = M[F_j] + 3\sqrt{D[F_j]} = b + 3\sqrt{c}. \quad (16)$$

С учетом допуска η_1^2 технология контроля наблюдений по критерию ϑ^2 будет иметь вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } F_j \leq \eta_1^2, \text{ то в ИСНС по } j\text{-му наблюдению на интервале } T \\ \text{не было нарушений;} \\ \text{если } F_j > \eta_1^2, \text{ то в ИСНС по } j\text{-му наблюдению на интервале } T \\ \text{были нарушения.} \end{array} \right\} \quad (17)$$

Процедура (17) дополняет проверку (12) для повышения достоверности контроля. В то же время при контроле инерциально-спутниковых наблюдений возникает задача различения нарушений в БИНС и СНС [16]. Решение указанной задачи может быть основано на комплексировании критериев χ^2 и ϑ^2 . Аномальные сигналы, связанные с СНС, являются, как правило, импульсными [17]. В то же время нарушения, связанные с БИНС, являются постепенными и медленно меняющимися из-за ухудшения точностных характеристик чувствительных элементов: гироскопов и акселерометров.

Контроль по критерию χ^2 позволяет обнаруживать как аномальные наблюдения, так и постепенные нарушения. Диагностический параметр F_j , формируемый по критерию ϑ^2 , определяется по множеству невязок v_j на скользящем временном интервале. Сбойные сигналы, используемые для вычисления такого параметра, усредняются и несущественно влияют на результаты контроля по критерию ϑ^2 . В то же время постепенные нарушения, характеризующиеся постоянными смещениями невязок относительно их номинальных значений,

приводят к отклонению параметра F_j от допуска. Поэтому, если нарушение в j -м канале наблюдений выявляется по обоим критериям, то оно наиболее вероятно связано с БИНС, если только по критерию χ^2 , то оно наиболее вероятно связано с СНС.

Парирование нарушений сводится к следующему адаптивно-робастному алгоритму [18] обработки наблюдений:

- при отсутствии нарушений невязка v_j обрабатывается с помощью ОФК;
- аномальные сигналы наблюдений, выявленные по критерию χ^2 , исключаются из обработки или обрабатываются с определенными коэффициентами доверия [13];
- нарушения, выявленные по критерию ϑ^2 , парируются путем адаптации параметров ОФК к реальным измерительным процессам в БИНС, а именно: при обработке j -го наблюдения и нарушении условия (17) из соотношений (14) и (16) определяется приращение $\Delta\alpha_j$, корректирующее в алгоритме ОФК дисперсию невязки (5) относительно допуска η_1^2 :

$$\Delta\alpha_j = (\hat{\alpha}_j - \eta_1^2 \alpha_j) / \eta_1^2.$$

2. Анализ результатов исследований

В работе объектом исследований являлась типовая ИСНС [20], в которой Инерциальный измерительный модуль (ИИМ) выполнен на базе триады волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и триады кварцевых акселерометров. Частота обновления и регистрации данных на встроенную в систему флэш-память для ИИМ

1кГц, для СНС \leq 1Гц. Наличие встроенной флэш-памяти позволило исследовать программно-математическое обеспечение (ПМО) на множестве разработанных алгоритмов. Базовый вектор состояния БИНС включает 18 параметров, а именно: ошибки счисления составляющих вектора относительной скорости, ошибки счисления элементов кватернионов навигации и ориентации, угловые дрейфы ВОГ, смещения сигналов акселерометров, ошибку счисления высоты относительно земного эллипсоида. Эксперименты проводились на автомобиле в наземных условиях, наиболее критичных для применения СНС. Результаты сравнительного анализа функционирования ИСНС с различными алгоритмами обработки наблюдений получены на основе счисления параметров движения по зарегистрированным сигналам ИИМ и спутникового приемника.

На рисунке 2 показана горизонтальная траектория движения, где

$$\Delta\varphi_R = [\varphi(t) - \varphi(t_0)]R; \Delta\lambda_R = [\lambda(t) - \lambda(t_0)]R \cos\varphi;$$

R – величина радиуса-вектора местоположения ИСНС.

$\Delta\varphi_R$, км

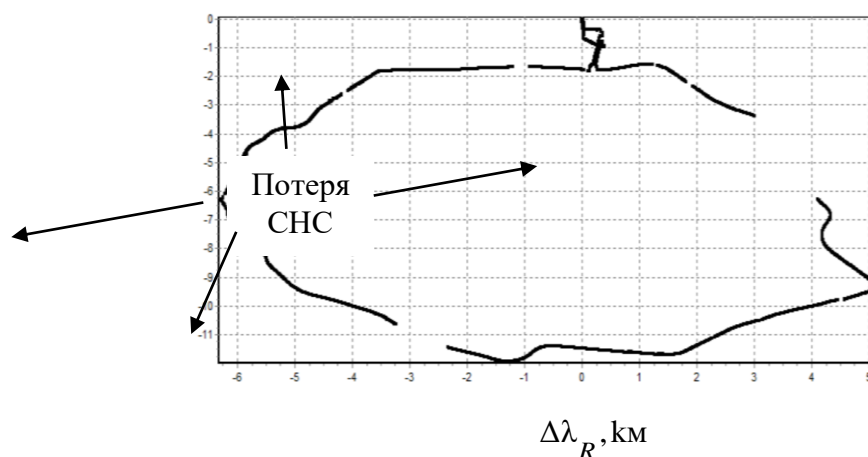


Рис. 2. - Горизонтальная траектория движения испытательной лаборатории

На рис. 3-5 показаны круговые ошибки оценки местоположения типовой системы в инерциально-спутниковом режиме, а именно: на рисунке 3 – без контроля целостности наблюдений; на рисунке 4 – с контролем целостности наблюдений и допуском $\gamma_1^2 = 11.8$; на рисунке 5 – с контролем целостности наблюдений по комбинированному критерию χ^2/g^2 и адаптивно-робастной настройкой ОФК, где

$$\Delta S = \sqrt{\delta_\varphi^2 + \delta_\lambda^2}; \delta_\varphi = (\varphi_{\text{БИНС}} - \varphi_{\text{СНС}})R; \delta_\lambda = (\lambda_{\text{БИНС}} - \lambda_{\text{СНС}})R \cos \varphi_{\text{СНС}}.$$

$\Delta S, \text{ м}$

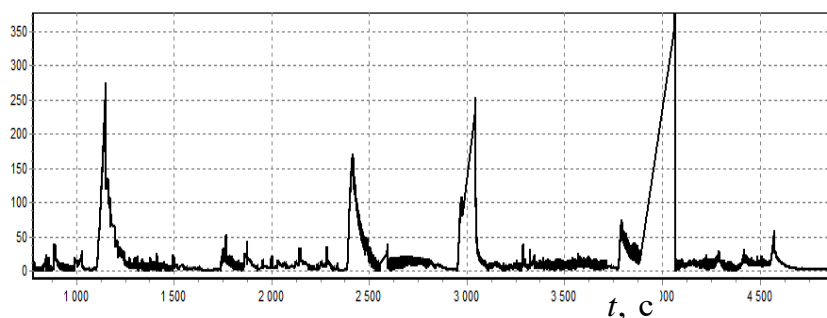


Рис. 3. - Позиционная ошибка ИСНС без контроля целостности наблюдений

$\Delta S, \text{ м}$

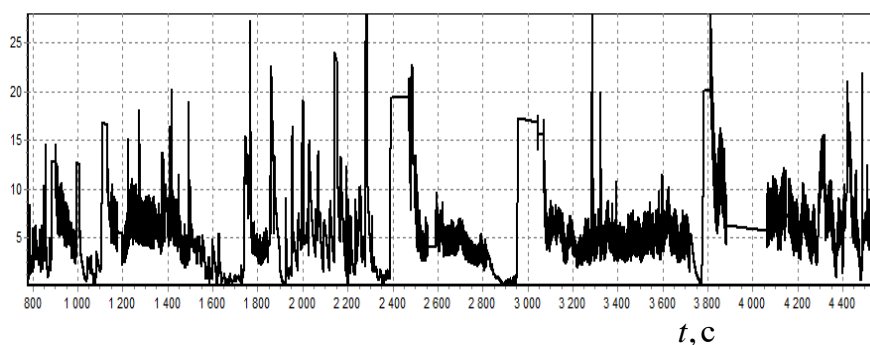


Рис. 4. - Позиционная ошибка ИСНС с контролем целостности наблюдений

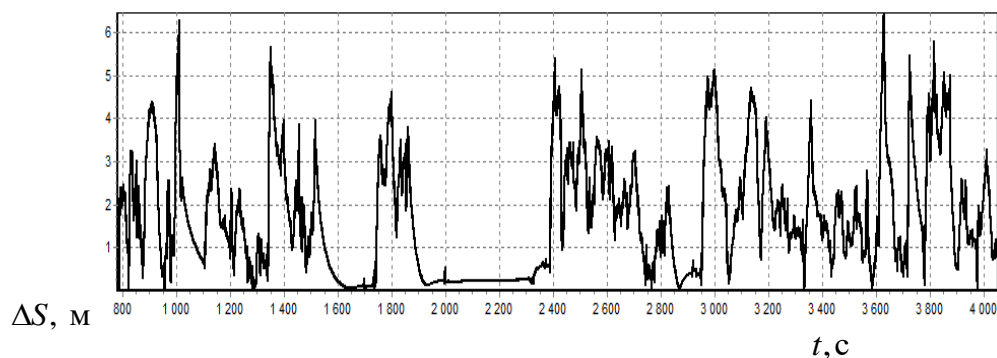


Рис. 5. Позиционная ошибка ИСНС с контролем целостности наблюдений и адаптивной настройкой ОФК

Заключение

Можно видеть, что адаптивно-робастная обработка инерциально-спутниковых наблюдений обеспечивает целостность навигационных определений и повышает достоверность позиционирования в сложной помеховой обстановке, характерной для подвижных объектов ВВСТ. Следует, однако, отметить необходимость проведения дополнительных исследований, связанных с обнаружением и парированием имитационных помех для СНС.

Автор выражает признательность доктору технических наук, профессору кафедры «Интегрированные бортовые комплексы навигации, управления и наведения летательных аппаратов» филиала «Стрела» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), Главному научному сотруднику ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт» Черндарову Александру Владимировичу за научную поддержку.

Библиографический список

1. Емельянцеv Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. - СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2016. – 394 с.

2. Kaspar B., Dahlen N. Demonstration of the Global Positioning System Guidance Package on U.S. NAVY F/A-18 // 5th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, CSRI Electropribor, 1998, pp. 372 - 376.
3. Hielman B.R., Pinchak S.J. Increased Combat Effectiveness with Embedded GPS/INS in A-10 Fichter Aircraft // 5th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, CSRI Electropribor, 1998, pp. 387 - 393.
4. Schmidt G.T. GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments // Gyroscopy and Navigation, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 41 - 53. DOI: [10.1134/S207510871902007X](https://doi.org/10.1134/S207510871902007X)
5. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю.А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32 – 41.
6. Горшев А.В. Стратегия алгоритмического повышения точностных характеристик и информационной надежности инерциально-спутниковых навигационных систем в составе беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102217>
7. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. - М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
8. Tanil C., Khanafseh S., Joerger M., Pervan B. An INS Monitor to Detect GNSS Spoofers Capable of Tracking Vehicle Position // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, vol. 54, no. 1, pp. 131 - 143. DOI: [10.1109/TAES.2017.2739924](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2739924)
9. Джанджгава Г.И., Чернодаров А.В. Инерциальная навигация и адаптивно – робастная фильтрация // Аэрокосмическое приборостроение. 2015. № 8. С. 19 – 29.

10. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. - М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.

11. Бухалёв В.А., Болдинов В.А. Фильтрация сигналов при низкочастотных помехах в измерительно-информационных системах беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87283>

12. Чернодаров А.В. Контроль и адаптивно-робастная оценка состояния интегрированных навигационных систем на базе квантово-оптических измерителей // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 185 (11). С. 5 – 12.

13. Чернодаров А.В. Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. - М.: Научтехлитиздат, 2017. – 300 с.

14. Gertler J.J. Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, N.Y., Marcel Dekker, 1998.

15. Корн Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, ГРФМЛ, 1973. – 832 с.

16. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Наука, ГРФМЛ, 1985. – 640 с.

17. Wu W.R. Target tracking with glint noise // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1993, vol. 29, no. 1, pp. 174 - 185.

18. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Transactions of ASME. Ser. D. Journal of Basic Engineering, 1960, vol. 82, pp. 35 – 45.

19. Чернодаров А.В., Иванов С.А. Идентификация моделей и адаптивная фильтрация шумов инерциальных измерителей // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91962>

20. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Карпов О.А. Летная отработка инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-500НС в высоких широтах // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник статей. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 296 - 299.

Inertial-satellite observations monitoring by combined goodness-of-fit criteria

Ivanov S.A.

Ramenskoye Instrument-Making Plant,

39, Mikhalevicha str., Ramenskoye, Moscow region, 140100, Russia

e-mail: srpremier@mail.ru

Abstract

GPS is the most widespread and advanced global navigation satellite system (GNSS). However, the GPS signals are the subject to a large number of different types of interference, both natural (the GPS signal can be weakened by trees, buildings, and antenna orientation), and imitation (intentional) interference. Intentional interference, also called spoofing, allows entering false GPS information into the navigation system.

Powerful jammers are easy to detect and neutralize due to the high intensity of radiation. Less powerful sources of interference are harder to find. It is important to deal with them by employing improved anti-interference technologies in receivers, improving the antenna, or integrating with an inertial navigation system or other devices insensitive to interference.

Inertial navigation systems (INS) are not affected by artificial interference. The main sources of errors in the INS are the errors in inertial sensors (gyroscopes and accelerometers), incorrect initialization of the navigation system, and imperfection of the gravitational model used for calculations.

The presented work is devoted to the problem of monitoring and violations localization reliability improving, namely, to the problem of detecting and parrying simulated interference in inertial-satellite navigation systems (ISNS).

The proposed solutions to the problem are based on the diagnostic ISNS models decomposition, and application of combined statistical criteria. The BINS error vector estimation and the reasons for the difficulties of satellite support for BINS are being considered. The technology of sequential processing of observations allows forming diagnostic parameters by the sample of residuals on a sliding time interval. The article presents and analyzes the results of field experiments with a typical BINS. Conclusions are drawn on the need for adaptive-robust processing of inertial-satellite observations.

The scientific novelty of the proposed work is associated with the addition of procedures for detecting and parrying anomalous inertial-satellite observations based on the combined statistical criterion χ^2/g^2 , with account for the fact that anomalous signals associated with the SNS are usually pulsed. Such procedures can be performed in both real time and according to the data from the on-board registration devices.

Keywords: inertial navigation system, satellite navigation system, interference, monitoring, Kalman filter.

References

1. Emel'yantsev G.I., Stepanov A.P. *Integrirovannye inertsial'no-sputnikovye sistemy orientatsii i navigatsii* (Integrated inertial satellite systems of orientation and navigation), Saint Petersburg, TsNII Elektropribor, 2016, 394 p.

2. Kaspar B., Dahlen N. Demonstration of the Global Positioning System Guidance Package on U.S. NAVY F/A-18, *5th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Saint Petersburg, CSRI Electropribor, 1998, pp. 372 - 376.
3. Hielman B.R., Pinchak S.J. Increased Combat Effectiveness with Embedded GPS/INS in A-10 Fichter Aircraft, *5th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, CSRI Electropribor, 1998, pp. 387 - 393.
4. Schmidt G.T. GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments, *Gyrossopy and Navigation*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 41 - 53. DOI: [10.1134/S207510871902007X](https://doi.org/10.1134/S207510871902007X)
5. Veremeenko K.K., Koshelev B.V., Solov'ev Yu.A. *Novosti navigatsii*, 2010, no. 4, pp. 32 – 41.
6. Gorshev A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102217>
7. Perov A.I., Kharisov V.N. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Forming-up principles and functioning), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p.
8. Tanil C., Khanafseh S., Joerger M., Pervan B. An INS Monitor to Detect GNSS Spoofers Capable of Tracking Vehicle Position, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, vol. 54, no. 1, pp. 131 - 143. DOI: [10.1109/TAES.2017.2739924](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2739924)
9. Dzhandzhgava G.I., Chernodarov A.V. *Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 8, pp. 19 – 29.
10. Babich O.A. *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh* (Information processing in navigation complexes), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 512 p.

11. Bukhalev V.A., Boldinov V.A. *Trudy MAI*, 2017, no 97. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87283>
12. Chernodarov A.V. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2012, no. 185 (11), pp. 5 – 12.
13. Chernodarov A.V. *Kontrol', diagnostika i identifikatsiya aviatsionnykh priborov i izmeritel'no-vychislitel'nykh kompleksov* (Control, diagnostics and identification of aviation devices and measuring and computing complexes), Moscow, Naughtekhlitizdat, 2017, 300 p.
14. Gertler J.J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, N.Y., Marcel Dekker, 1998.
15. Korn G.A. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (A guide to mathematics for scientists and engineers), Moscow, Nauka, GRFML, 1973, 832 p.
16. Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike* (Handbook of Probability and Mathematical Statistics). Moscow, Nauka, GRFML, 1985, 640 p.
17. Wu W.R. Target tracking with glint noise, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, vol. 29, no. 1, pp. 174 - 185.
18. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Transactions of ASME. Ser. D. Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35 – 45.
19. Chernodarov A.V., Ivanov S.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91962>

20. Chernodarov A.V., Patrikeev A.P., Karpov O.A. *XXV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: sbornik statei*, Saint Petersburg, TsNII “Elektropribor”, 2018, pp. 296 – 299.