

14. Siraya, T. N. Comparison of uncertainty estimates: Allan variance and sample variance // Proc. Intern Conf. "Measurement – 2001", Bratislava, 2001.
15. Aronsajn, N. Theory of reproducing kernels. - Trans. Amer. Math. Soc., 1960.
16. Newton, H. J. A conversation with E. Parsen // Statistical Science. - 2002. - Vol. 17, N 3.
17. Розанов, Ю. А. Теория обновляющих процессов. - М.: Физматгиз, 1980.
18. Granovsky, V. A. Noise characteristics in electrical measurements: metrological approach / V. A. Granovsky, T. N. Siraya // Proc. 12th IMEKO TC4 International Symposium "Electrical Measurements and Instrumentation" / - 2002, Zagreb, Croatia.

Abstract. The paper considers Allan variance, an up-to-date data diffusion characteristic which is gaining more and more popularity in applied fields, such as estimating the performance of navigation aids. To analyze Allan variance and to compare it with the other estimates a system for estimating the measurement errors is presented. Allan variance is compared with a classical sampling variance based on the theory of statistical decisions. For the formal description of Allan variance and other error characteristics it is proposed to use the functional Hilbertian spaces with reproducing kernels.

Материал поступил 26.04.10

УДК 621.396.988.6

И. Б. ВАЙСГАНТ, Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, В. А. ТУПЫСЕВ

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ИНФОРМАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЛАГА В ЗАДАЧЕ КОРРЕКЦИИ МОРСКОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается методика контроля внешней навигационной информации применительно к инерциальной навигационной системе (ИНС) полуаналитического типа с применением алгоритмов оптимальной фильтрации в замкнутой схеме коррекции. Особое внимание уделяется контролю информации, поступающей от относительного лага. Приводятся примеры обработки измерений, содержащих различные нарушения.

Качество работы ИНС, предназначенной для морских объектов, как известно, зависит не только от точности чувствительных элементов (ЧЭ), но и от внешней информации, используемой для ее коррекции и демпфирования. Обычно погрешности внешних по отношению к инерциальной системе источников навигационной информации описываются соответствующими статисти-

Вайсгант Игорь Борисович. Научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Литвиненко Юлия Александровна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Тупысев Виктор Авенирович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

ческими моделями и учитываются в алгоритмах ИНС. В то же время в показаниях внешних датчиков могут содержаться аномальные погрешности – нарушения или сбои [1]. Очевидно, что наличие аномальных погрешностей, характеризующихся чаще всего уровнем, существенно превышающим номинальные погрешности датчиков, приводит к появлению дополнительной погрешности выработки выходных данных и к существенным нарушениям работы ИНС. С учетом вышесказанного ясно, что решение задачи контроля и последующего исключения таких измерений из обработки приведет к повышению точности выработки навигационных параметров ИНС, что на сегодняшний день является актуальным.

В настоящей работе рассматриваются особенности реализации алгоритмов контроля внешней информации применительно к ИНС полуаналитического типа средней точности, для калибровки, коррекции и демпфирования которой используется фильтр Калмана (ФК) в замкнутой схеме [2, 3]. Измерения для ФК в автономном режиме работы ИНС формируются на основе информации от относительного лага, среди основных погрешностей которого можно выделить методическую погрешность, связанную с неучетом течения, инструментальные погрешности и погрешности юстировки. Следует также отметить ошибки измерения реальной скорости объекта, появляющиеся при применении однокомпонентного лага (измеряющего только продольную скорость). Кроме того, в относительных индукционных лагах, как правило, применяются фильтрующие элементы, главная цель которых – сглаживание короткопериодных флуктуаций потока, что при наборе и сбросе скорости (в случае постоянной времени фильтра более 16 с) приводит к появлению дополнительной погрешности выработки скорости, которая, в свою очередь, может служить причиной возникновения информационного нарушения.

Решение задачи контроля нарушений в информации о скорости, поступающей от внешних по отношению к ИНС источников, возможно различными методами. Подход к контролю неисправностей ИНС с использованием алгоритмов многоальтернативной фильтрации для дублированной системы, работающей в составе информационно избыточного навигационного комплекса, подробно рассмотрен в работах [1, 4]. Для одиночной ИНС также может быть реализован метод контроля на основе многоальтернативной фильтрации, который позволит не только контролировать и оценивать информационные нарушения лага, но и информационные нарушения в чувствительных элементах ИНС. Однако применение алгоритмов многоальтернативной фильтрации по сравнению с предлагаемым в работе методом требует существенных вычислительных затрат и приводит к необходимости значительной доработки алгоритмов ИНС.

При неинвариантном подходе решение рассматриваемой задачи возможно на основании известных характеристик движения объекта, например, путем наложения ограничений на величину сигнала скорости (или ее приращение), поступающего от внешнего измерителя, при превышении которого измерения, поступающие от лага, считаются недостоверным.

Кроме перечисленных выше методов для уменьшения ошибок морских ИНС, вызванных возникновением различного рода нарушений в канале лага, иногда применяют отключение демпфирования ИНС на маневре или посредством использования схем автономного демпфирования [5]. В ИНС, представленной в [6], контроль и отбраковка показаний внешних датчиков производится на осно-

ве данных, поступающих от используемого в системе фильтра Калмана. В работе [7] предлагается использовать винеровский процесс для описания погрешности лага, что позволяет уменьшить погрешности ИНС из-за аномальных ошибок датчиков.

Влияние погрешности измерения скорости объекта относительным лагом на ошибки выработки навигационных данных ИНС

Приведем схему использования информации, поступающей от двухкомпонентного относительного лага в ИНС полуаналитического типа [2, 3], в которой для обработки внешней информации применяются алгоритмы калмановской фильтрации. Измерения, поступающие на вход фильтра, формируются как разность между северной и восточной проекциями скорости, измеренной относительным лагом $V_{\mathcal{L}}^{E,N}$, и составляющими скорости, вырабатываемыми ИНС $V_{\text{ИНС}}^{E,N}$:

$$\begin{aligned} Z^E &= V_{\text{ИНС}}^E - V_{\mathcal{L}}^E = \Delta V_{\text{ИНС}}^E - \Delta V_{\mathcal{L}}^E + V_T^E + \xi_1; \\ Z^N &= V_{\text{ИНС}}^N - V_{\mathcal{L}}^N = \Delta V_{\text{ИНС}}^N - \Delta V_{\mathcal{L}}^N + V_T^N + \xi_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta V_{\text{ИНС}}^{E,N}$ – погрешность выработки скорости ИНС; $\Delta V_{\mathcal{L}}^{E,N}$ – погрешность относительного лага (обычно белозумная); $V_T^{E,N}$ – составляющие скорости неучтенного течения; $\xi_{1,2}$ – шумы измерений.

Проекции относительной скорости на географические оси, входящие в (1), рассчитываются с использованием курса, вырабатываемого ИНС, и продольной и поперечной составляющих скорости, измеренных относительным лагом. Отметим, что реализация схемы формирования измерений (1) позволяет оценить проекции скорости неучтенного течения, которые принято описывать марковским процессом первого порядка.

При использовании однокомпонентного лага, измеряющего только продольную скорость, наличие неизвестного поперечного перемещения объекта приводит к появлению дополнительной погрешности измерения реальной скорости движения. Однако для большинства надводных объектов эту погрешность из-за ее незначительности можно не учитывать.

Отдельно следует рассмотреть погрешность выработки относительной скорости, вызванную применением фильтрующего элемента в канале лага. Проанализируем ошибку измерения скорости относительным лагом при маневрировании объекта, выдаваемого на выход звеном первого порядка вида $(Ts + 1)^{-1}$, где T – постоянная времени (например, для лага ЛИ 2-1 $T=32$ с).

При маневре набора скорости на интервале времени $0 \leq t \leq t_k$ скорость судна равна $V(t) = a(t - t_0) + V(t_0)$, где a – ускорение. Ошибка измерений лагом скорости имеет вид:

$$\Delta V_{\text{лс}}(t) = aT(1 - e^{-t/T}) \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_k;$$

$$\Delta V_{\text{лс}}(t) = \Delta V_{\text{лс}}(t_k) e^{-(t-t_k)/T} \quad \text{при } t > t_k.$$

Пример 1. Набор скорости $V = 5$ м/с за 5 мин (рис. 1). Максимальное значение погрешности выработки скорости при этом достигает 0,5 м/с.

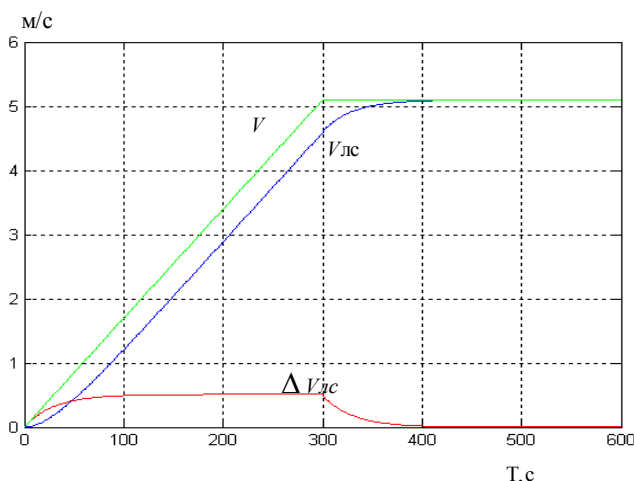


Рис. 1. Скорость объекта V , скорость, измеренная лагом $V_{лс}$, и ошибка выработки скорости $\Delta V_{лс}$ при маневре набора скорости

Из представленных расчетов видно, что погрешность измерения скорости при наличии сглаживающего звена в выходном канале относительного лага, вызванная маневром объекта, может достигать существенных значений. Результаты моделирования погрешностей ИНС, выраженных в условных единицах (рис. 2) показывают, что подобное возмущение в канале лага приведет к появлению дополнительной погрешности ИНС в выработке координат. Уровень этой погрешности, а также ее кратковременный характер в большинстве случаев позволит ошибке выработки координат ИНС не превысить требуемого допуска. С другой стороны, происходящее при этом изменение погрешности координаты и скорости может быть недопустимо в ряде задач и вызывать нарекания со стороны корабельных систем, использующих данные ИНС.

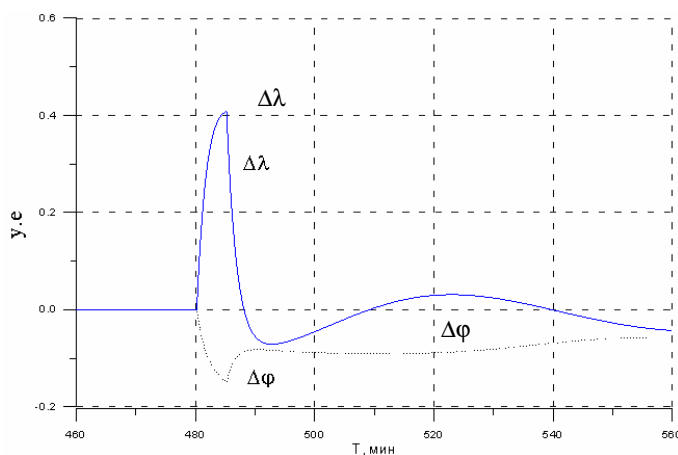


Рис. 2. Результаты моделирования дополнительной погрешности выработки координат ИНС при возмущении в канале лага

При циркуляции объекта возникает целый ряд дополнительных погрешностей измерения скорости относительным лагом, наличие которых может привести к увеличению погрешности выработки координат ИНС. Это подтверждается результатами, полученными на испытаниях ИНС при интенсивном маневрировании объекта. Так, на рис. 3 приведены данные погрешности измерения скорости относительным однокомпонентным лагом $\Delta V_{E, N\lambda}$ (при сравнении с показаниями СНС) и погрешности выработки координат ИНС – широты $\Delta\varphi$ и долготы $\Delta\lambda$.

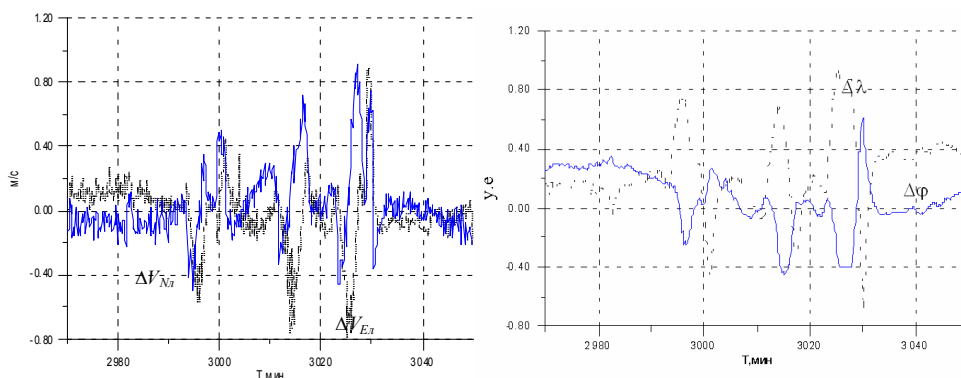


Рис. 3. Погрешности выработки скорости относительным лагом и погрешности выработки координат ИНС по результатам испытаний на объекте

Как видно из представленных графиков, ошибка измерения реальной скорости относительным лагом при циркуляции объекта достигает 1-1,5 уз, что приводит к существенному увеличению погрешности выработки координат ИНС. Основные причины возникновения подобных погрешностей при циркуляции вызваны неравномерностью скорости движения и наличием бокового перемещения объекта, не измеряемого однокомпонентным лагом. Ясно, что использование алгоритмов, позволяющих отключить измерения относительного лага при появлении погрешностей такого типа, позволит повысить точность выработки координат ИНС.

Методы контроля внешней информации о скорости

Применение алгоритмов оптимальной фильтрации для коррекции и демпфирования инерциальной системы позволяет реализовать несколько путей решения рассматриваемой задачи.

Для исключения погрешности измерения относительной скорости, вызванной наличием сглаживающего звена в относительном лаге, достаточно учесть параметры звена при синтезе фильтра Калмана, а измерения сформировать как разность между показаниями лага и скоростью по данным ИНС, предварительно пропущенной через такое же звено:

$$Z^{III} = \tilde{V}_{ИНС}^{III} - V_{Л}^{III};$$

$$Z^{PP} = \tilde{V}_{ИНС}^{PP} - V_{Л}^{PP};$$

где $\tilde{V}_{ИНС}^{ПР,ПП} = \frac{1}{sT+1} V_{ИНС}^{ПР,ПП}$; $V_{ИНС}^{ПР,ПП}$ – проекции скорости измеренной ИНС на продольную и поперечную оси объекта; $V_{\mathcal{L}}^{ПР,ПП}$ – продольная и поперечная составляющие относительной скорости, выработанные лагом.

Такой подход полностью исключает ошибку, связанную с запаздыванием показаний лага, а изменения, вносимые при этом в структуру ФК, не оказывают влияния на точность работы ИНС. Если параметры сглаживающего звена неизвестны, для уменьшения погрешностей, возникающих при циркуляции объекта, можно применить процедуру контроля, построенную на основе анализа измерений Z , поступающих на вход ФК, воспользовавшись квадратичной формой

$$\rho^2 = v^T B^{-1} v, \quad (2)$$

где $v = Z - H\tilde{X}$ – невязка измерений; $B = (HPbH^T + R^{-1})$; H – матрица измерений; Pb – ковариационная матрица прогноза; $\tilde{X}$ – оценка прогноза вектора состояния.

Составляющие квадратичной формы (2) v и B входят в уравнения оптимального фильтра и вырабатываются на каждом шаге, поэтому вычисление текущего значения ρ не составляет труда. Известно [8], что при выполнении предположения о гауссовском характере шумов измерений и порождающих шумов рассматриваемая скалярная величина удовлетворяет распределению χ^2 с математическим ожиданием, равным размерности вектора измерений. Используя это свойство, можно установить допустимую область значений ρ , при превышении которого поступившие измерения бракуются.

Такой подход является более универсальным, поскольку направлен не только на уменьшение погрешностей ИНС, вызванных сглаживанием показаний лага, но и позволяет исключать кратковременные сбои различной природы, содержащиеся в измерениях, поступающих в ФК.

Уровень значимости критерия отбраковки можно установить на основе анализа возникающих погрешностей выработки навигационных данных и соответствующего изменения значений ρ при воздействии нарушений. На рис. 4 приведена зависимость ρ от длительности и уровня возмущения по каналу лага из примера 1. Отметим, что поскольку точностные характеристики ИНС допускают в течение определенного времени (~30 мин) отключить все измерения, то определять, в каком именно канале – северном или восточном – произошло нарушение, нет необходимости.

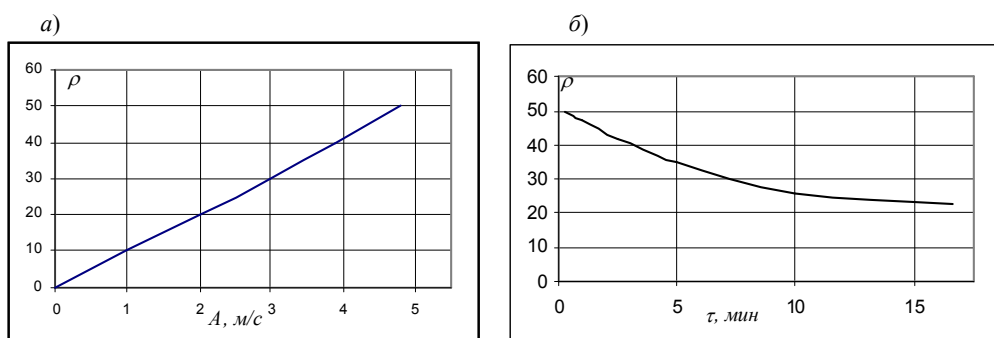


Рис. 4. Зависимость ρ от уровня A (а) и от длительности τ (б) возмущения по каналу лага

Анализ результатов позволяет заключить, что используемый подход больше всего пригоден для отбраковки кратковременных сбоев большого уровня. Так, моделирование показывает, что единичные сбои по скоростным измерениям полностью исключаются из обработки и не дают дополнительной погрешности выработки навигационных данных ИНС.

Нарушения более сложной формы определяются несколько хуже – при большей длительности и небольшом уровне оно может быть не выявлено (в зависимости от установленного уровня значимости) или исключено не полностью. Эффективность алгоритма можно оценивать по результату сравнения уровней дополнительной погрешности выработки координат при возникновении возмущения при применении отбраковки «некачественных» измерений и без нее.

На рис. 5 приведены данные моделирования погрешностей выработки координат рассматриваемой ИНС, выраженных в условных единицах, при воздействии возмущения по каналу лага при отбраковке на уровне значимости 3% и без отбраковки. Из рисунка видно, что нарушение исключено не полностью и приводит к незначительному увеличению погрешности выработки координат.

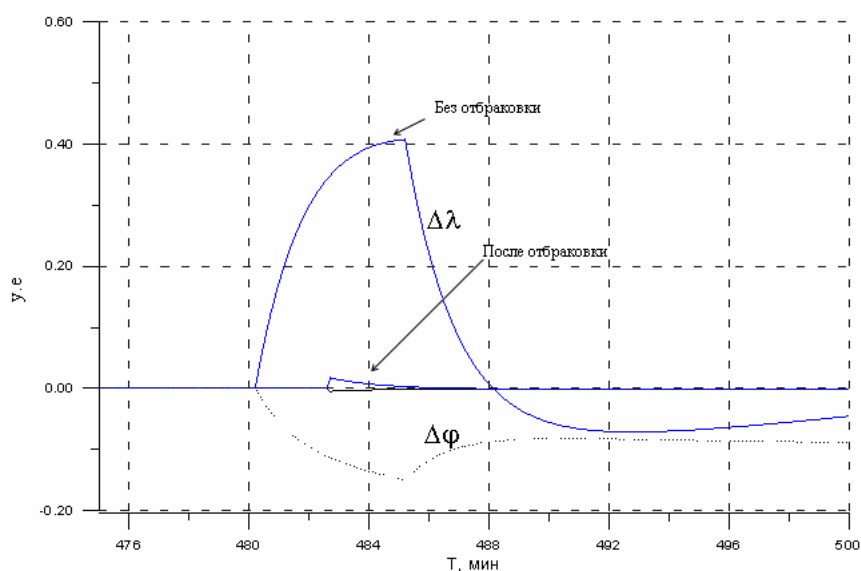


Рис. 5. Погрешности выработки координат ИНС при воздействии возмущения при отбраковке на уровне значимости 3% и без отбраковки

Очевидно, что рассмотренный критерий будет чувствителен не только к изменению погрешности внешних источников информации, но и к ошибкам чувствительных элементов ИНС – гироскопам и акселерометрам, что, в свою очередь, может привести к отбраковке «качественных» измерений относительного лага.

Проверку чувствительности алгоритма можно проводить методом моделирования, при котором в качестве возмущений задается дополнительное увеличение погрешности одного из ЧЭ, превышающее в n раз номинальный уровень ошибки этого элемента.

Результаты моделирования приведены на рис. 6.

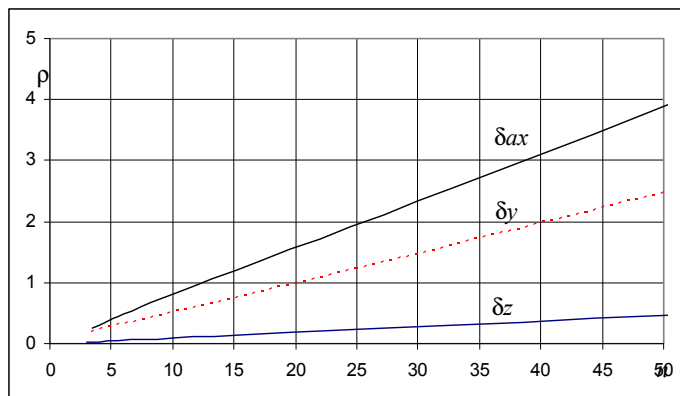


Рис. 6. Зависимость ρ от уровня дополнительного ухода азимутального δz и горизонтального δy гироскопов и смещения нуля акселерометра δax в автономном режиме работы ИНС

Вероятность появления ошибок ЧЭ, превосходящих в десятки раз их номинальный уровень, как показывает опыт эксплуатации рассматриваемой системы, близка к нулю, тем не менее, для того чтобы избежать потери нормальных измерений от относительного лага при значительном увеличении погрешности ЧЭ, можно ограничить время использования алгоритма контроля до 10-15 мин. Подобное ограничение, с одной стороны, позволяет отбраковывать только кратковременные ошибки внешних измерителей (для контроля которых и предназначен предложенный подход), а с другой – обеспечивает практически непрерывное демпфирование инерциальной системы от относительного лага даже при наличии аномальной ошибки ЧЭ.

Заключение

Для снижения погрешностей морских ИНС, вызванных ошибками внешних измерителей, необходимо осуществление контроля качества информации, используемой для калибровки, демпфирования и коррекции инерциальной системы. Наиболее универсальным подходом является процедура контроля невязки ФК, позволяющая исключать любые нарушения связанные с превышением допустимого уровня ошибки измерений. Такой способ применительно к инерциальной навигационной системе полуаналитического типа, как показали результаты моделирования, позволяет осуществлять контроль и отбраковку аномальных погрешностей измерения лагом скорости объекта.

Предложенный алгоритм эффективно применен для контроля позиционных измерений в изделии типа «Ладога-М».

Исключение ошибки, связанной со сглаживанием показаний лага, может эффективно осуществляться (в дополнение к процедуре отбраковки) путем учета параметров сглаживающего звена при синтезе фильтра Калмана.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ проект № 09-08-00828

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дмитриев, С.П.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / С.П.Дмитриев, Н.В.Колесов, А.В.Осипов. - С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
2. **Берман, З.М.** Преимущества инерциальной навигационной системы с фильтром калмановского типа в замкнутой схеме коррекции / З.М. Берман [и др.] // Гироскопия и навигация.- 1999.- № 1(24). – С. 48-55.
3. **Вайсгант, И.Б.** Погрешности выработки навигационных параметров платформенными инерциальными системами среднего класса точности в зависимости от широты места / И.Б.Вайсгант, Ю.А.Литвиненко // Изв. вузов. Приборостроение. - 2002.- № 9
4. **Дмитриев, С.П.** Информационный контроль и диагностика дублированных инерциальных систем / С.П.Дмитриев, Д.А.Кошаев // Гироскопия и навигация.- 2005.- № 2.
5. **Одинцов, А.А.** Погрешности морских инерциальных навигационных систем на управляемых магнитных сферических гироскопах / А.А.Одинцов, В.Б.Васильева, Ю.Е.Наумов // Гироскопия и навигация.- 2008.- № 1(60).- С. 33-42.
6. **Y.Paturel, V.Rumoroso, A. Chapelon, J.Honthaas.** MARINS, the First FOG Navigation System for Submarines., Symposium Gyro Technology 2006, Stuttgart, Germany.
7. **Тупысев, В.А.** Использование винеровских моделей для описания уходов гироскопов и ошибок измерения в задаче оценивания состояния инерциальных навигационных систем // Гироскопия и навигация.- 2002.- № 3(38).- С. 23-33.
8. **Ривкин, С.С.** Статистическая оптимизация навигационных систем / С.С.Ривкин, Р.И.Ивановский, А.В.Костров. - Л.: Судостроение.- 1989.- 184 с.
9. **Дмитриев, С.П.** Фильтрационный подход в задаче контроля целостности спутниковой навигационной системы: в кн. Марковская теория оценивания в радиотехнике / С.П.Дмитриев, А.В.Осипов. - М.: Радиотехника. -2004.- С. 425-439.
10. **Герцман, В.Е.** Методика отбраковки аномальных измерений при определении траектории по данным бортовой аппаратуры потребителя GPS/ГЛОНАСС/ В.Е.Герцман, В.В.Чистяков // Гироскопия и навигация.- 2002.- № 3(38).-С. 3-11.
11. **Лесючевский, В.М.** Синтез цепей коррекции инерциальной навигационной системы полуаналитического типа, использующую информацию от лага / В.М.Лесючевский, Л.П.Несенюк // Вопросы приборостроения, серия Навигация и гироскопия.- 1977.- Вып. 26.
12. **Анучин, О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов/О.Н.Анучин, Г.И.Емельянцеv. - С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2003.-389 с.

Abstract. The procedure of checking the external navigational information is considered as applied to a semianalytic-type inertial navigation system (INS) using algorithms of optimal filtering in a closed-loop correction system. Special attention is paid to checking of the data coming from a water speed log. Examples of processing the measurements containing different irregularities are presented.

Материал поступил 06.10.09