

**АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ И ДЕМПФИРОВАНИЯ
ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
СРЕДНЕЙ ТОЧНОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЛАГА**

Рассматривается возможность применения грубого относительного лага только для решения задачи демпфирования инерциальной навигационной системы. Показано, что коррекция погрешностей чувствительных элементов инерциальной системы при этом не производится. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований.

Введение

Наличие колебательных составляющих погрешностей инерциальных навигационных систем (ИНС): на частоте Шулера при построении вертикали и на частоте суточного вращения Земли при моделировании инерциального трехгранника – широко известно [1–4]. В некоторых работах, например в [5], рассмотрен подход к задаче автономного демпфирования, основанный на соответствующей модификации уравнений идеальной работы ИНС, приводящей, однако, к увеличению погрешностей навигационных определений на маневре.

Для исключения колебательных погрешностей ИНС целесообразно привлечение данных от внешних средств измерения навигационных параметров или связанных с ними сигналов [1–4, 6–8]. Наиболее эффективно использование спутниковой навигации, неприемлемое для рассматриваемых далее подводных морских объектов, допускающих лишь эпизодическое подвсплытие для проведения коррекций ИНС.

Альтернативой этому варианту является привлечение измерений скорости относительным лагом (ОЛ), основная погрешность которого возникает из-за неизвестной с достаточной точностью скорости течения. Кроме того, существует целый ряд аномальных погрешностей ОЛ, зависящих от внешних условий, в частности от температуры и глубины погружения, а также от обрастания датчиков ОЛ.

Для дальнейшего исследования учтем полезный эффект измерения в виде разности показаний скорости объекта, вырабатываемой ИНС и содержащей погрешность в форме колебаний на двух оговоренных выше частотах, и сигнала скорости, вырабатываемого ОЛ и не содержащего этих колебательных составляющих. Наличие колебательных составляющих, присутствующих как в измерении, так и в модели подлежащих оценке фильтром Калмана (ФК) сигналов, приводит к следующей постановке. Выделим при использовании измерения

Дмитриев Сергей Петрович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Зиненко Владимир Михайлович. Доктор технических наук, первый заместитель генерального директора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

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

$Z(t) = V_{\text{ИНС}}(t) - V_{\text{ОЛ}}(t)$ две задачи: оценку погрешностей ИНС в определении навигационных параметров, сводящуюся к оценке погрешностей чувствительных элементов ИНС (коррекция ИНС), и оценку колебательных составляющих погрешностей ИНС (демпфирование ИНС).

Далее покажем на примере ИНС полуаналитического типа, модель погрешностей которой приведена, например, в [8], возможность применения даже «грубого» относительного лага только для решения задачи демпфирования.

Решение задачи коррекции и демпфирования инерциальной навигационной системы с использованием данных относительного лага

Измерительный модуль ИНС типа «Ладога–М», рассматриваемой в настоящей работе, состоит из стабилизированной в плоскости горизонта платформы, содержащей чувствительные элементы – три двухстепенных гироскопа и три акселерометра. Для обеспечения наблюдаемости погрешностей чувствительных элементов стабилизированная платформа непрерывно вращается вокруг вертикальной оси со скоростью 4Ω , где Ω – скорость вращения Земли.

В общем виде модель погрешностей ИНС может быть описана следующим уравнением:

$$\dot{X} = FX + G\xi, \quad (1)$$

где X – вектор состояния, F, G – нестационарные матрицы, элементы которых приведены в [8], ξ_i – белые шумы.

Вектор состояния X содержит погрешности выработки навигационных параметров и погрешности чувствительных элементов

$$X_i = [\alpha, \beta, \Delta V_E, \Delta V_N, \Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta K, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z], \quad (2)$$

где α, β – погрешности построения плоскости горизонта, $\Delta V_E, \Delta V_N$ – погрешности выработки составляющих скорости в географических осях, $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta K$ – погрешности выработки широты, долготы и курса, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z$ – погрешности гироскопических чувствительных элементов (ГЧЭ) и акселерометров в осях гиростабилизированной платформы.

В рассматриваемой ИНС информация о скорости используется для формирования так называемых скоростных измерений ФК:

$$\begin{aligned} Z_1 &= V_{\text{ИНС}_E} - V_{\text{Л}} \sin K, \\ Z_2 &= V_{\text{ИНС}_N} - V_{\text{Л}} \cos K, \end{aligned} \quad (3)$$

где $V_{\text{Л}}$ – продольная скорость объекта по данным относительного лага, $V_{\text{ИНС}_E, N}$ – составляющие скорости объекта по данным ИНС в географической системе координат, K – курс объекта.

Заметим, что если модель погрешностей ИНС, представленная в общем виде соотношениями (1), (2), достаточно подробно изучена в обширной литературе и охватывает чувствительные элементы ИНС, построенные на различных принципах действия, то описание погрешности ОЛ требует использования моделей, учитывающих многообразие как внешних условий плавания объекта, так

и классических составляющих погрешностей ОЛ, порожденных наличием неучтенного течения.

Представляется, что используемый при анализе точности ИНС, демпфированной по данным ОЛ, состав погрешностей ОЛ достаточно адекватен реальным условиям: он учитывает кроме инструментальных погрешностей ОЛ, аппроксимируемых белым шумом, погрешности неучтенного течения. С известной долей вероятности наличие данных о течении (среднеквадратическое значение (СКЗ) и изменчивость) могут быть использованы при решении задачи демпфирования ИНС, приводя к повышению точности выработки навигационных данных ИНС. Ясно, что использование упрощенной модели погрешности ОЛ, например, в виде белого шума, не учитывающей «гладкий» характер течения, представляется довольно грубым описанием погрешностей лага при решении задачи демпфирования ИНС.

В эксплуатируемых в настоящее время ИНС типа «Ладога-М» в модели ФК для описания погрешностей измерений относительной скорости ОЛ предусмотрены две составляющие: бел шумная погрешность интенсивности $R=0,2$ м/с, уровень которой характеризует инструментальные погрешности лага, и погрешность скорости неучтенного течения, описываемого марковским процессом первого порядка:

$$\Delta \dot{V}_{TE,N} = -\alpha_T V_{TE,N} + \sigma_T \sqrt{2\alpha_T} \xi, \quad (4)$$

где α_T – величина, обратная интервалу корреляции скорости неучтенного течения ($1/\alpha_T = 2$ ч), σ_T – среднеквадратическое значение (СКЗ) скорости неучтенного течения.

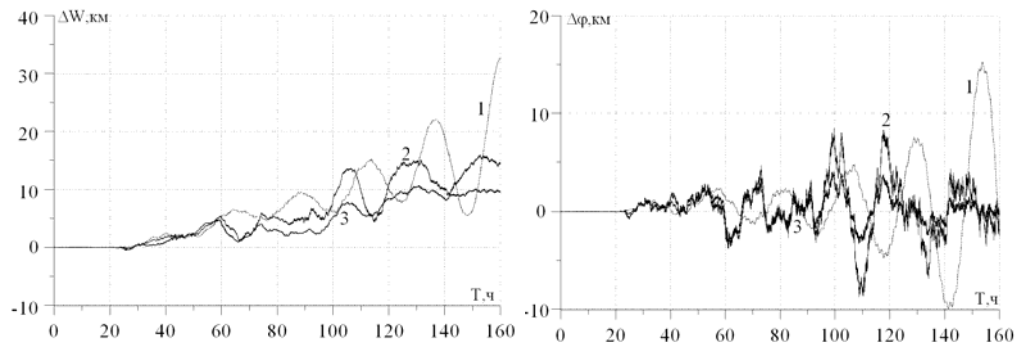


Рис. 1. Погрешность выработки отстоя и широты ИНС при различном демпфировании

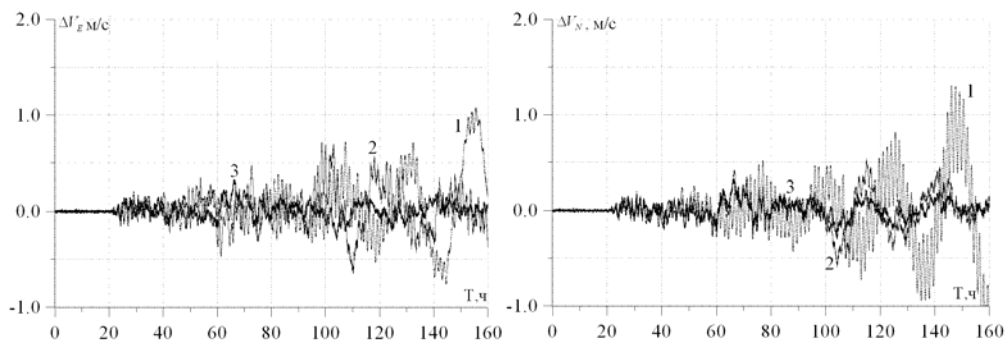


Рис. 2. Погрешность выработки восточной и северной составляющих скорости ИНС при различном демпфировании

Варьируя уровень СКЗ σ_T в (4), проведем анализ качества демпфирования рассматриваемой ИНС.

На рис. 1 и 2 приведены результаты моделирования погрешностей выработки широты, отществия и скорости рассматриваемой ИНС при использовании гироскопических чувствительных элементов повышенного класса точности (максимальное значение случайной составляющей скорости ухода не превышает 0,002 град/ч).

Кривая 1 отражает погрешности выработки навигационных данных ИНС при отсутствии скоростных измерений, т.е. при работе ИНС в недемпфированном режиме, кривая 2 – результаты моделирования погрешностей ИНС при использовании для демпфирования ИНС данных относительного лага при большом уровне СКЗ скорости течения $\sigma_T = 1,5$ м/с, кривая 3 – результаты моделирования погрешностей ИНС при использовании для демпфирования ИНС данных относительного лага при незначительном уровне СКЗ скорости течения $\sigma_T = 0,5$ м/с.

На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования погрешностей инерциальной системы при использовании более грубых ГЧЭ (максимальное значение случайной составляющей скорости ухода не превышает 0,01 град/ч). Обозначения на рисунках совпадают с обозначениями на рис. 1 и 2.

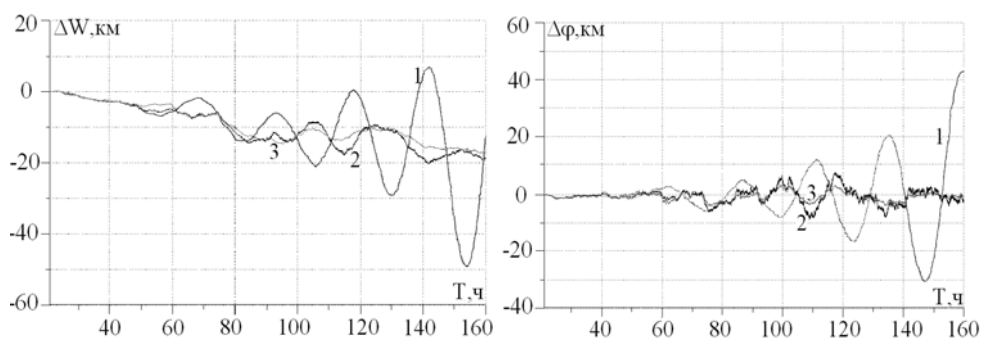


Рис. 3. Погрешность выработки отществия и широты ИНС с ГЧЭ пониженной точности при различном демпфировании

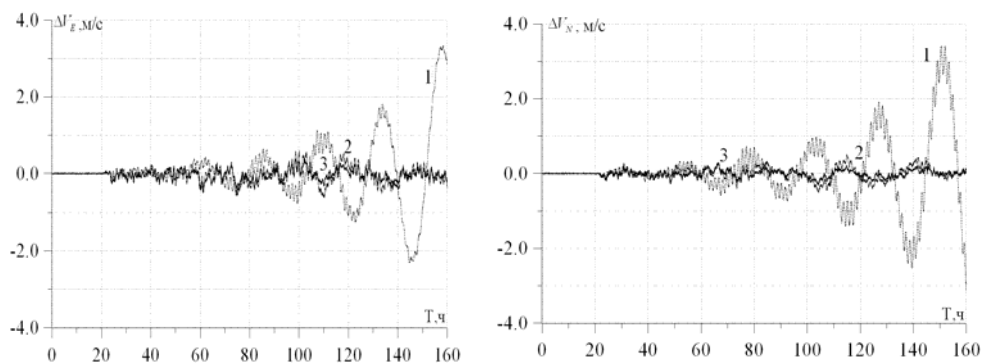


Рис. 4. Погрешность выработки северной и восточной составляющих скорости ИНС с ГЧЭ пониженной точности при различном демпфировании

Хорошо видно, что на первых 48 ч работы ИНС поведение демпфированной и недемпфированной систем различается незначительно, отличия начинают сказываться при времени работы более 80 ч. Однако из кривых на интервале 80–160 ч следует, что использование лага при высоком уровне неопределенно-

сти знания скорости течения позволяет производить демпфирование ИНС, так как колебательная составляющая погрешности выработки навигационных данных не увеличивается со временем, как это характерно для недемпфированной системы (кривая 1). Вместе с тем можно показать, что в инерциальной системе, демпфированной по данным лага при значительном уровне СКЗ скорости течения, коррекция погрешностей чувствительных элементов ИНС практически не происходит, это следует из сравнения такой системы с ИНС, демпфированной по данным лага при малом уровне СКЗ скорости течения (кривая 3), это же подтверждается результатами испытаний, приведенных далее.

Для проверки эффективности коррекции ИНС по данным ОЛ рассмотрим расширенную модель погрешностей ОЛ, которая включает в дополнение к модели (4) аномальные погрешности лага ΔV_A в виде кусочно-постоянной функции, определяющей значение ΔV_A на длительных интервалах времени.

На рис. 5–7 приведены результаты испытаний ИНС типа «Ладога-М» в условиях стенда. Погрешность лага имитировалась марковским процессом первого порядка при $\sigma_T = 0,15$ м/с, к которому в моменты времени 47 и 49,5 ч были добавлены аномальные погрешности лага ΔV_A уровня 3 м/с. Скорость неучтенного течения при синтезе ФК была описана марковским процессом с $\sigma_T = 1,5$ м/с.

Результаты исследования показывают (см. кривые на рис. 5, 6), что использование увеличенного значения СКЗ скорости течения в модели ФК не приводит, даже при наличии в показаниях лага аномальной погрешности, к уточнению погрешностей ИНС по данным такого лага. Это с очевидностью следует из кривых рис. 7, которые показывают, что в этом случае не происходит изменения оценок дрейфов гироскопов.

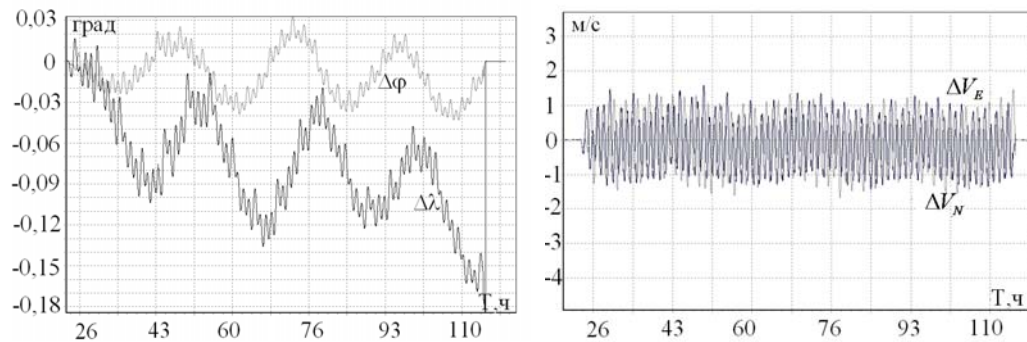


Рис. 5. Погрешность выработки координат и скорости при $\sigma_T = 1,5$ м/с при наличии погрешности лага $\Delta V_A = 3$ м/с

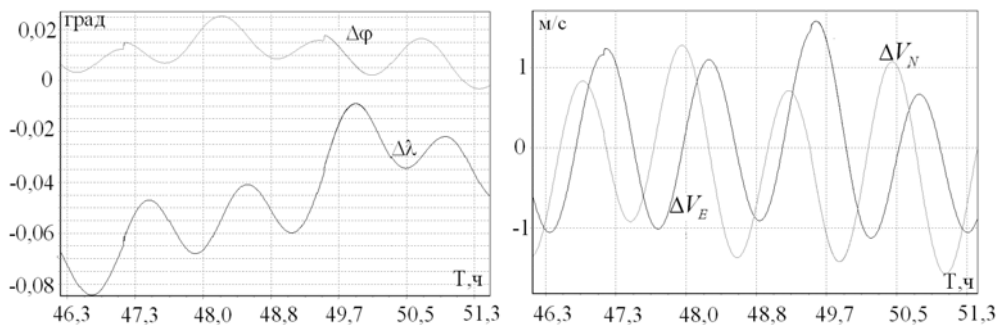


Рис. 6. Погрешность выработки координат и скорости при $\sigma_T = 1,5$ м/с при наличии погрешности лага $\Delta V_A = 3$ м/с (в увеличенном масштабе времени)

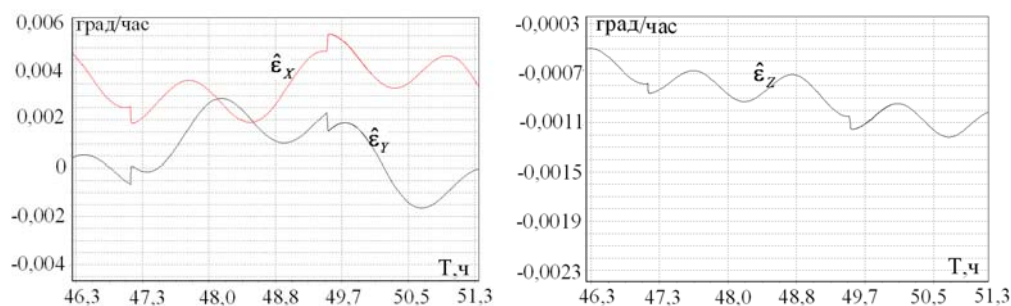


Рис. 7. Оценка ФК уходов гироскопов при $\sigma_r=1,5$ м/с при наличии погрешности лага $\Delta V_A=3$ м/с (в увеличенном масштабе времени).

Тем не менее применение относительного лага даже при высоком уровне неопределенности знания скорости течения позволяет производить демпфирование ИНС. Из рис. 5 видно, что колебательная составляющая погрешности скорости и координат не увеличивается со временем, это же подтверждается результатами моделирования, приведенными выше.

Заключение

Результаты моделирования и испытаний подтверждают возможность решения задачи демпфирования ИНС по данным лага при высоком уровне неопределенности знания скорости течения, что, в свою очередь, позволяет снизить погрешности выработки навигационных данных инерциальной системой. Вместе с тем показано, что коррекция погрешностей чувствительных элементов ИНС в этом случае не осуществляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бромберг, П.В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979.
2. Инерциальные навигационные системы морских объектов / Д.П. Лукьянов [и др.] – Л.: Судостроение, 1989. – 184с.
3. Андреев, В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. – М.: Наука, 1966.
4. Анучин, О.Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцева. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2003. – 389 с.
5. Одинцов, А.А. Об одной схеме автономного демпфирования инерциальных навигационных систем / А.А. Одинцов, В.Б. Васильева, Ю.Н. Наумов // Гироскопия и навигация, 2008, №1, с. 33–42.
6. Ривкин, С.С. Статистическая оптимизация навигационных систем / С.С. Ривкин, Р.И. Ивановский, А.В. Костров. – Л.: Судостроение, 1976.
7. Челпанов, И.Б. Расчет характеристик навигационных гироскопов / И.Б. Челпанов, Л.П. Несенюк, М.В. Брагинский. – Л.: Судостроение, 1978.
8. 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.

Abstract. The paper focuses on the use of a low-accuracy electromagnetic log exclusively for damping of inertial navigation system. The log errors considered include a number of errors depending on sailing conditions along with the speed of current. By the example of local level INS, the errors of INS sensors are shown to be almost not corrected. Modeling and experimental results are presented.

Key words: damping, navigation system, low-accuracy electromagnetic log, INS

Материал поступил 11.04.2012