

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА, ВЫРАБАТЫВАЮЩИХ СКОРОСТНУЮ ИНФОРМАЦИЮ

### CHARACTERIZATION OF ERRORS IN NAVIGATING COMPLEX SYSTEMS THAT PRODUCE HIGH-SPEED INFORMATION

*В статье рассмотрены навигационные системы, измеряющие параметры скоростной информации, и причины возникновения в них погрешностей. Выработка навигационных данных с повышенной точностью в большей степени зависит от скоростной информации, которая вырабатывается и передается внешним потребителям при помощи системы инерциальной навигации и гиросtabilизации «Дельта», индукционного лага ЛИ2-1, аппаратуры потребителей спутниковых систем ГЛОНАСС и НАВСТАР «Бриз-ПЛ». Погрешности счисления пути и выработки координат места корабля также зависят от точности используемой для этих целей скоростной информации, вариантов счисления и способа учета элементов течения. К тому же, при выходе из строя инфраструктуры систем источников внешней информации, необходимо автономное счисление, основанное на выработке скоростных данных собственными средствами и определении курса с максимально возможной точностью. Коррекция движения корабля при этом по визуальным ориентирам также требует выработки курса с максимально возможной точностью.*

*The article describes the navigation system produces high-speed data and their uncertainties. Development of navigation data with increased accuracy is largely dependent on the MSE-speed-information that is generated and transmitted to external customers using inertial navigation system and gyrostabilization «Delta», the induction lag LI2-1, machine-ry consumers GLONASS and NAVSTAR «Breeze-PL». « Error generation and dead reckoning position coordinates of the ship also depend on their accuracy used for this purpose high-speed data, numbering options and ways to address the elements of flow-cops. In addition, in case of failure of infrastructure systems external sources of information necessary to the non-autonomous dead reckoning based on the development of high-speed data-sredst you own and determining the course as accurately as possible. Correction of motion of the ship at the same time visual reference also requires the development of the course as accurately as possible*

*Ключевые слова: комплекс навигации и гиросtabilизации; инструментальная погрешность, мгновенная скорость движения, навигационные параметры, спутник, индукционный лаг.*

*Key word: complex navigation and gyrostabilization; instrumental error, instantaneous speed, navigation options, satellite, induction lag.*

**А**

ВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ комплекс навигации и гиросtabilизации вырабатывает скоростные данные, используемые для определения параметров стабилизации технических средств: трех составляющих мгновенной скорости движения  $\tilde{V}_N, \tilde{V}_E, \tilde{V}_Z$  и двух составляющих линейной скорости движения корабля относительно грунта в географической системе координат  $V_N, V_E$ . Внешним потребителям передаются скоростные данные, вырабатываемые инерциальной навигационной системой (ИНС) «Дельта», аппаратурой потребителей космической навигационной системы «Бриз-ПЛ» и относительным лагом ЛИ2-1. Две составляющие линейной скорости от ИНС «Дельта» транслируются потребителям в случае ее работы в корректируемом режиме (режим комплекса — инерциальный). В других режимах внешним потребителям поступает скоростная информация от аппаратуры потребителей космической навигационной системы (АП КНС) или от лага. Три составляющие мгновенной скорости движения  $\tilde{V}_N, \tilde{V}_E, \tilde{V}_Z$  вырабатываются только ИНС [1] – [4].

Точность работы ИНС зависит от инструментальных погрешностей ее основных элементов — двухстепенных поплавковых гироскопов (ДПГ) и прецизионных поплавковых угловых компенсационных акселерометров, а также от методических погрешностей выработки навигационных параметров.

Основные источники погрешностей выработки ИНС навигационных параметров:

- дрейф ДПП;
- нелинейность и нестабильность характеристики датчика моментов ДПП;
- возмущающие моменты относительно оси  $OY$  подвеса маятника-поплавка чувствительного элемента акселерометра;
- нечувствительность акселерометра;
- смещение нуля характеристики акселерометра.

Дрейф ДПП имеет в общем случае систематический характер. Нелинейность и нестабильность характеристики датчика моментов ДПП обусловлены неточной работой цепи управления датчиком и погрешностью в величине радиуса Земли и также имеют систематический характер [5].

Инструментальные погрешности акселерометров обусловлены действием возмущающих моментов относительно оси  $OY$  подвеса маятника-поплавка. Основными причинами возникновения этих моментов является остаточное трение в опорах, упругость токопроводов к датчику угла, взаимодействие ферромагнитных масс поплавка с различными магнитными полями, конвекционные потоки поддерживающей жидкости при неравномерном распределении теплового поля и др. Суммарное влияние указанных возмущений на показания акселерометра проявляется в виде его нечувствительности, которая при производстве уменьшается до незначительных величин и смещения нуля характеристики, которая является основной погрешностью акселерометра и имеет систематический характер. При постоянной величине смещения нуля в показания акселерометра входит соответствующая проекция силы тяжести, платформа гировертикали устанавливается под углом к истинному горизонту, что влияет на значения приборных угловых скоростей и вызывает погрешность выработки инерциальной широты [6].

К основным методическим погрешностям относятся систематические погрешности выработки ИНС курса, которые определяются погрешностью выставки гироазимутгоризонта ИНС в диаметральной плоскости корабля и погрешностью трансляции курсового угла азимутальной платформы из гироазимутгоризонта в центральную вычислительную машину. Методические погрешности по величине соизмеримы с инструментальными. Их определение и компенсация осуществляются автоматически во время предварительной и окончательной подготовки корабля к бою и походу [7]. Таким образом, счисление навигационных параметров в ИНС сопровождается нарастанием во времени погрешностей счисления, что увеличивает погрешности вырабатываемых навигационных параметров.

Принцип выработки относительной скорости индукционным лагом заключается в измерении напряжения, возникающего от ЭДС, наводимой во встречном потоке воды и преобразовании ее в показания скорости. В зависимости от причин появления погрешности индукционного лага подразделяются на *инструментальные* и *методические*. По характеру проявления они могут быть *систематическими* и *случайными*.

Инструментальные погрешности в основном имеют случайный характер и обусловлены несовершенством конструкции и изготовления приборов лага, а также изменением параметров элементов в процессе эксплуатации. Поддержание уровня инструментальных погрешностей в допустимых пределах осуществляется в процессе технического обслуживания лага. Инструментальная погрешность измерения скорости лага ЛИ2-1 с  $P = 0,997$  не превышает 0,1 уз. Методические погрешности обусловлены различными факторами как гидродинамического, так и электромагнитного характера. Они оказывают основное влияние на точность работы лага. К основным методическим погрешностям относятся:

- погрешность, обусловленная действием пограничного слоя воды;
- погрешность, вызванная квадратурной помехой;
- погрешность, обусловленная изменением электропроводности морской воды;
- погрешности, обусловленные волнением моря, рысканием, креном и дифферентом корабля;
- погрешность, обусловленная электромагнитными полями корабля и океана.

Погрешность, обусловленная действием пограничного слоя, является наиболее существенной из методических погрешностей и может достигать значений до 1 уз. На ее величину оказывают влияние характеристики набегающего потока воды, которые в основном зависят от обрастания корпуса и скорости корабля [8].

Квадратурная помеха обусловлена созданием переменного магнитного поля в целях исключения эффекта поляризации электродов лага, что приводит к появлению в сигнале лага составляющей  $U_{кв} \sin \omega t$ , не зависящей от скорости.

Погрешность, обусловленная изменением электропроводности морской воды, имеет систематический характер и определяется выражением

$$\delta V = -\frac{2V \Delta R_i}{R_i + R},$$

где  $\Delta R_i$  — изменение сопротивления индукционного первичного преобразователя сигнала (ИППС), вызванное изменением солености воды;  $R$  — входное сопротивление измерительной схемы лага.

Величина внутреннего сопротивления приемного устройства зависит от удельного сопротивления морской воды. Для районов океана с соленостью воды 2 – 35 ‰ величина  $\Delta R_i$  мала и погрешность лага остается практически постоянной. В районах с соленостью менее 2 ‰  $\Delta R_{пв}$  резко возрастает, что приводит к появлению погрешности скорости до нескольких десятков долей узла [9]. Влияние этих погрешностей может быть устранено загроублением чувствительности лага.

Среднеорбитальной судовой навигационной системе (СНС) свойственны погрешности, которые по происхождению подразделяются на *методические* и *аппаратурные* (инструментальные), а по характеру проявления — на *систематические* и *случайные*.

На радиосигналы, передаваемые с навигационных спутников (НС) на АП КНС, оказывают воздействие как внешние факторы (ионосфера, тропосфера), так и внутренние аппаратурные факторы, проявляющиеся при приеме, передаче, обработке радиосигналов, решении навигационной задачи и выдаче полученных результатов потребителям [10].

К методическим относятся погрешности, обусловленные влиянием ионосферы и тропосферы на прохождение радиосигнала, неточностью передаваемой с НС эфемеридной информации, геометрическими факторами созвездий НС, несовершенством метода сличения бортовой шкалы времени спутника со шкалой времени корабельного аппаратурного генератора, многолучевостью, неточным знанием высоты антенны и др.

Ионосферная погрешность обусловлена эффектом рефракции сигналов НС, вызванной неоднородностями и изменением диэлектрической проницаемости ионосферы с изменением высоты, и влечет изменение трассы, а следовательно, задержку сигнала НС. На величину ионосферной погрешности значительное влияние оказывают время года и суток, солнечная активность, геомагнитная широта места потребителя и другие факторы, определяющие условия распространения радиосигнала в ионосфере. Ионосфера является диспергирующей средой, ее рефракция зависит от частоты сигнала.

Основная составляющая тропосферной погрешности обусловлена наличием тропосферной рефракции, которая по причинам, аналогичным приведенным для ионосферы, вызывает задержку распространения радиосигнала НС в тропосфере. Значение тропосферной погрешности зависит от факторов, которые достаточно точно известны и прогнозируются (взаимные координаты НС и корабля, температура, давление, влажность воздуха). Тропосфера не является диспергирующей средой (тропосферная рефракция не зависит от частоты сигнала).

Эфемеридные погрешности связаны с неточностью определения параметров орбит навигационных спутников, а также непредсказуемым смещением положения спутников на орбите из-за различных случайных факторов. Достоверность передаваемых со спутника частотно-временных поправок и эфемерид зависит от срока, прошедшего с момента их закладки в память бортовой ЭВМ. Существующая в аппаратуре спутника задержка между выходным навигационным сигналом и выходным сигналом бортового эталона времени и частоты (групповая задержка) вносит

дополнительную погрешность в дальномерные измерения, в которую входят систематическая и случайная составляющие [11].

Вследствие несовершенства процедур сверки и хранения бортовой шкалы времени НС возникают погрешности их частотно-временного обеспечения, одним из проявлений которых является смещение фаз излучаемых дальномерных кодов и меток времени, что приводит к погрешностям измерения расстояний до спутника и расчета его координат.

Погрешности из-за многолучевости обусловлены тем, что на приемную антенну АП КНС может поступать не только прямой сигнал от НС, но и множество переотраженных сигналов от морской поверхности. Уровень отраженного сигнала может быть соизмерим с прямым сигналом, что приводит к существенным погрешностям полезного сигнала и к погрешностям в схемах слежения за его параметрами (задержкой, частотой и фазой). Величины погрешностей зависят от взаимного расположения НС, антенны и отражающей поверхности. Взаимное расположение НС и антенны АП КНС определяет величину геометрического фактора. Погрешности измерений квазидальностей по сигналам НС, расположенных на горизонте, больше, чем по сигналам НС, находящихся в районе зенита, поскольку сигнал от них до корабля проходит большее расстояние сквозь толщу ионосферы.

К основным инструментальным погрешностям относятся *шумовая* и *динамическая* погрешности схем слежения аппаратуры за задержкой прихода сигналов спутника и измерения доплеровского сдвига частоты, погрешность за изменение характеристик электроэлементов аппаратуры с течением времени, погрешности вычислительных элементов [12] – [14].

Для компенсации и стабилизации ошибок инерциального счисления в ИНС «Дельта» применяются средства внешней коррекции непрерывного действия — относительный лаг ЛИ2.1 и эпизодического действия — АП КНС «Бриз-ПЛ», ПИ РНС «Квиток-3Н». Средства коррекции эпизодического действия применяются для точной выставки начальных условий и коррекции навигационных параметров ИНС.

Скорость, вырабатываемая лагом, используется для демпфирования ИНС. По скорости от относительного лага и курсу вычисляются северная и восточная составляющие. Формируются разности с соответствующими составляющими скорости, выработанной ИНС (приборной), которые подаются на фильтр, настроенный на определенную полосу пропускания частот. На выходе фильтра получают сглаженные разности, алгебраическим сложением которых с составляющими скорости лага восстанавливают приборную скорость ИНС, используемую при дальнейшем формировании сигнала интегральной коррекции гироскопа. При этом необходимо учитывать скорость течения (суммарного сноса), так как приборная скорость ИНС вырабатывается относительно дна. Неучет течения является вторым по величине после дрейфов гироскопов возмущающим фактором для ИНС. Таким образом, основными факторами, вызывающими погрешности скоростной информации ИНС, являются использование сигнала лага напрямую, без учета течения и какой-либо предварительной обработки, высокочастотная погрешность вырабатываемой ИНС скорости и фазовые искажения, вносимые фильтром нижних частот. Способами уменьшения погрешностей вырабатываемой ИНС скорости являются повышение точности используемой для этой цели скоростной информации, получаемой от лага, а также уменьшение или более точный учет высокочастотных погрешностей непосредственно самой инерциальной системы и совершенствование применяемых в ней фильтров.

В архитектуре ИНС «Дельта» реализована сильно связанная схема комплексирования, которая предусматривает совместную обработку в вычислителе ИНС составляющих линейной скорости, вырабатываемых самой ИНС и составляющих скорости, полученной на основании данных от относительного лага (автономный режим). В случае нормальной работы АП КНС в обработку принимаются и вырабатываемые ею параметры для позиционной коррекции (корректируемый режим).

Таким образом, в результате совместной обработки скоростной информации, осуществляемой посредством динамического фильтра большой размерности, предельные погрешности (с  $P = 0,997$ ) составляющих линейной скорости навигационного комплекса не превышают 0,5 м/с.

### Список литературы

1. Михальский В. А. Метрология в кораблевождении и решение задач навигации / В. А. Михальский, В. А. Катенин. — СПб.: Элмор, 2009. — 288 с.
2. Груздев Н. М. Теория навигационных погрешностей / Н. М. Груздев. — СПб.: СПбВМИ, 2002. — 325 с.
3. Лаврентьев А. В. Технические средства кораблевождения / А. В. Лаврентьев, С. Ф. Лабутич, А. Б. Парамонов, А. И. Тузов: учебник. — М.: Морские средства навигации надводных кораблей, 2007. — С. 101–114.
4. Михальский В. А. Теория и модели погрешностей навигационных измерений / В. А. Михальский, А. Г. Кушнарев, М. В. Тюлькин [и др.] — СПб.: ВСОК ВМФ, 2006.
5. Пешехонов В. Г. Единая система инерциальной навигации и стабилизации «Ладога-М» / В. Г. Пешехонов, Б. Л. Шарыгин, Ю. В. Миронов // Морская радиоэлектроника. — 2003. — № 1. — С. 26–30.
6. Бабиченко А. В. Инженерная физика / А. В. Бабиченко, В. К. Шкред // Научно-технический журнал. — 2011. — № 11. — С. 33–52.
7. Иванов Б. Е. К вопросу о навигационной безопасности плавания / Б. Е. Иванов / Пятая Российская науч.-практ. конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО-2004). — СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 2004. — С. 74–86.
8. Соколов А.И. Навигация и управление движением / А. И. Соколов, А. С. Фирса / Материалы XV конференции молодых ученых «Обработка сигнала в электромагнитном лаге». — СПб., 2013. — С. 88–94.
9. Смирнов Е. Л. Технические средства судовождения. — Т. 2. / Е. Л. Смирнов, А. В. Яловенко, В. К. Перфильев. — СПб.: Элмор, 2000.
10. Борисов Д. В. Возможности приёмоиндикаторов СРНС ГЛОНАСС и NAVSTAR, установленных на кораблях и судах ВМФ / Д. В. Борисов // Научно-методический сборник. — СПб.: СПбВМИ, 2006. — С. 54–60.
11. Алексеев С.П. Об интеграции информационного обеспечения задач навигации, стабилизации и управления движением морских подвижных объектов / С.П. Алексеев, Г.И. Емельянцева // Навигация и гидрография. — 1996. — № 2. — С. 73–76.
12. Горкавенко Ю. Н. Радиотехнические и астронавигационные средства кораблевождения. — Ч. 1 / Ю. Н. Горкавенко, А. В. Лаврентьев, Н. Б. Лукашевич и др. — СПб.: СПбВМИ, 2001. — С. 84–99.
13. Горкавенко Ю. Н. Основы устройства и использования навигационной аппаратуры потребителя «Бриз» среднеорбитальных спутниковых систем ГЛОНАСС и NAVSTAR / Ю. Н. Горкавенко, А. А. Опалев, М. Ю. Шелякин. — СПб.: СПбВМИ, 2001. — С. 63–72.
14. Соловьев Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 326 с.

УДК 532.516.5:532.582.32

**А. В. Коптев**  
канд. физ.-мат. наук, доц.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДВОДНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ДИНАМИКУ КОРАБЛЯ

## RESEARCH OF INFLUENCE OF UNDERWATER CURRENT ON THE DYNAMICS OF THE SHIP

*Предложен аналитический метод расчета воздействия подводного течения на погруженную часть корабля. Метод основан на решении краевой задачи для уравнений установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости при граничных условиях прилипания и условия для скорости водного потока в задан-*