УДК 629.58

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОДНОМАЯКОВОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

А.И. Машошин

Акционерное общество «Концерн "Центральный научноисследовательский институт «Электроприбор"»¹

Приведены результаты исследования алгоритма одномаяковой навигации (AOH) автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), синтезированного по критерию максимального правдоподобия. В качестве маяка рассматривался необитаемый надводный аппарат (HA). Исследование проводилось путем имитационного моделирования, в процессе которого оценивались характеристики синтезированного алгоритма в зависимости от точности измерения курса и составляющих вектора скорости АНПА, координат НА по данным спутниковой навигационной системы, скорости и времени распространения сигнала между НА и АНПА, а также от скорости и направления течения; траектории движения НА относительно АНПА. Показано, что наибольшее влияние на точность определения места АНПА при применении синтезированного алгоритма оказывает траектория движения НА, а также течение в районе при отсутствии абсолютного лага. При правильном выборе траектории НА и применении абсолютного лага ошибка определения места АНПА соответствует ошибке определения места НА, не возрастая с течением времени.

введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования морских глубин [1].

Важным условием для решения задач, возлагаемых на АНПА, является их высокоточная навигация в трёхмерном подводном пространстве [1, 2].

Олним из методов навигации АНПА является метод одномаяковый навигации (МОН) (в англоязычной литературе single beacon navigation), называемый также методом синтезированной либо динамической длинной базы [2-7]. Суть МОН состоит в измерении на последовательных интервалах времени расстояния между мобильным маяком и движущимся АНПА и использовании его для коррекции результатов счисления места АНПА по курсу и скорости, периодически измеряемых бортовыми средствами АНПА. МОН был предложен сотрудниками ИПМТ ДВО РАН в работах [8–12] и в настоящее время в России и за рубежом рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных методов для навигации АНПА [2–7].

МОН имеет ряд разновидностей. Самая распространенная из них состоит в том, что АНПА сопровождает некий надводный аппарат (НА) (как правило, необитаемый), который периодически (в среднем 1 раз в минуту) определяет своё место с использованием спутниковой навигационной системы (СНС) и передаёт свои текущие координаты на АНПА. Во время передачи происходит модемный обмен информацией [13], в результате которого определяется время распространения сигнала от НА до АНПА и как следствие – наклонное расстояние между ними. Зная глубины НА и АНПА, измеряемые с высокой точностью, на АНПА наклонное расстояние пересчитывается в горизонтальное. Это расстояние совместно с курсом и скоростью АНПА используется для коррекции результатов счисления пути АНПА. Для реализации метода одномаяковой навигации используются [2–4]: расширенный фильтр Калмана, метод максимального правдоподобия, последовательный метод Монте-Карло, называемый также фильтром частиц (particle filter), алгебраический метод, геометрический метод.

Среди всех методов навигации АНПА МОН обладает рядом достоинств, одним из которых является то, что район действий АНПА, в котором обеспечивается его высокоточная навигация, ограничен только дальностью плавания НА, которая может быть весьма большой (например, при использовании в качестве НА волнового глайдера). Другим достоинством метода является то, что один НА может обеспечить высокоточную навигацию группы АНПА.

¹ 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30. Тел.: 8(812) 2329970. E-mail: aimashoshin@mail.ru

Методу одномаяковой навигации АНПА посвящено значительное число работ как в России, так и за рубежом. Однако практически во всех работах рассматривается конкретный эпизод применения МОН. Целью предлагаемой работы является исследование точности навигации АНПА, обеспечиваемой МОН, в различных условиях плавания.

Исследование проводилось с использованием алгоритма одномаяковой навигации (АОН), синтезированного по критерию максимального правдоподобия. Выбор именно этого алгоритма обусловлен тем, что он позволяет достаточно просто и в то же время строго комплексировать разнородные методы определения координат объекта [14].

1. Синтез максимально правдоподобного алгоритма одномаяковой навигации

Постановка задачи

АНПА, оснащенный бортовыми средствами навигации, включающими датчик курса (ДК) (например компас), гидроакустический (абсолютный) лаг (ГАЛ) и датчик глубины (ДГ), движется в подводном положении. Бортовые средства периодически в моменты времени $t_i (t_0 -$ момент начала движения) вырабатывают:

• курс \hat{K}_i с ошибкой ΔK_i , распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием (MO) и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_k ;

• продольную Vk_i и поперечную \hat{Vs}_i составляющие абсолютной скорости с ошибками ΔVk_i и ΔVs_i , распределенными по нормальному закону с нулевым МО и СКО σ_v ;

• оценку глубины H_i с пренебрежимо малой ошибкой.

С использованием этих данных осуществляется счисление пути АНПА.

АНПА сопровождает надводный аппарат (НА), являющийся маяком. Периодически в моменты времени *t_m* осуществляются следующие действия:

• по сигналам СНС НА оценивает свои координаты \hat{X}_m , \hat{Y}_m в некоторой местной декартовой системе координат с ошибками ΔX_m , ΔY_m , распределенными по нормальному закону с нулевым MO и СКО $\sigma_{\chi\gamma}$;

• происходит модемный обмен между НА и АНПА, в процессе которого АНПА оценивает время \hat{T}_m распространения сигнала между НА и АНПА (с ошибкой, распределенной по нормальному закону с нулевым МО и СКО σ_T) и получает от НА оценки его текущих координат \hat{X}_m , \hat{Y}_m ;

• на АНПА определяется оценка наклонного расстояния между НА и АНПА \hat{R}_m :

$$\hat{R}_m = \hat{C}_{_{36}} \cdot \hat{T}_m, \qquad (1)$$

где $\hat{C}_{_{36}}$ – оценка скорости распространения сигнала между НА и АНПА, распределенная по нормальному закону с нулевым МО и СКО σ_c .

Эти данные используются для коррекции счисления пути АНПА.

При этом предполагается:

 траектория движения АНПА состоит из галсов прямолинейного равномерного движения на одной глубине и галсов маневрирования, на которых изменяется хотя бы один из трех параметров движения АНПА – курс, скорость либо глубина;

• в районе плавания имеется течение с неизвестными для АНПА направлением K_r и скоростью V_r ;

 глубина под килем АНПА позволяет эффективно использовать ГАЛ; • заглубление излучающей антенны НА *H_M* считается известным с пренебрежимо малой ошибкой;

• допуская малость относительных ошибок определения скорости распространения сигнала между АНПА и НА $C_{_{36}}$ и времени $T_{_M}$, ошибку ΔR_m определения расстояния R_m можно принять нормальной с нулевым МО и СКО

$$\sigma_R = R_m \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C_{_{36}}}\right)^2} [15];$$

• ввиду измерения разными устройствами ошибки всех перечисленных выше оценок параметров можно считать взаимно независимыми.

Требуется синтезировать алгоритм, обеспечивающий циклическое определение координат АНПА с минимально возможными ошибками.

Синтез алгоритма

Остановимся на синтезе алгоритма по критерию максимального правдоподобия.

Рассмотрение особенностей решаемой задачи привело к следующим выводам:

 коррекцию счисления пути АНПА с использованием оценок расстояния до НА целесообразно осуществлять только на галсах движения АНПА с постоянными курсом, скоростью и глубиной;

• синтез алгоритма целесообразно осуществлять с использованием всех данных, поступивших с начала галса;

• алгоритм должен функционировать циклически, включаясь на галсах с постоянными параметрами движения при поступлении на свой вход новой оценки расстояния между НА и АНПА. При этом кроме этой оценки алгоритм должен использовать последние на данный момент времени оценки курса и составляющих скорости АНПА. С учетом сделанных выводов запишем стохастические модели оценок параметров, соответствующие моменту времени t_j , где j – номер цикла решения задачи на текущем галсе движения с постоянными курсом, скоростью и глубиной:

• стохастическая модель оценки курса АНПА при помощи датчика курса:

$$K_{j} = K + \Delta K_{j};$$
 (2)
• стохастические модели оценок продольной и поперечной составляющих скорости АНПА при помощи ГАЛ:

• стохастическая модель оценки наклонного расстояния между НА и АНПА:

$$\begin{split} \hat{R}_{j} &= R(t_{j}, X_{0}, Y_{0}, K, V, H, \hat{X}m_{j} - \Delta Xm_{j}, \hat{Y}m_{j} - \Delta Ym_{j}, Hm, K_{T}, V_{T}) + \\ &+ \Delta R_{j}. \end{split}$$

В формулах (2-4):

• *K*, *V*, *Vk*, *Vs*, *H*, *Xm_j*, *Ym_j*, *Hm*, *K_T*, *V_T* – истинные значения соответствующих параметров;

• $\Delta K_{j}, \Delta V k_{j}, \Delta V s_{j}, \Delta X m_{j}, \Delta Y m_{j} -$ ошибки измерения параметров на *j*-м цикле;

• *X₀*, *Y₀* – координаты АНПА на момент начала галса;

• $R(t_j, X_0, Y_0, K, V, H, Xm_j, Ym_j, Hm, K_T, V_T)$ – неслучайная функция неслучайных аргументов, позволяющая вычислить истинное наклонное расстояние между НА и АНПА:

$$R_{j} = R(t_{j}, X_{0}, Y_{0}, K, V, H, Xm_{j}, Ym_{j}, Hm, K_{T}, V_{T}) = (5)$$

$$= \sqrt{(X_{j} - Xm_{j})^{2} + (Y_{j} - Ym_{j})^{2} + (H - Hm)^{2}}, X_{j} = X_{0} + Vp \cdot (t_{j} - t_{0}) \cdot sin Kp, Y_{j} = Y_{0} + Vp \cdot (t_{j} - t_{0}) \cdot cos Kp;$$
(6)

• *Кр*, *Vp* – путевой угол и путевая скорость АНПА с учетом влияния течения:

$$Vp = \sqrt{Vk^2 + Vs^2}, \qquad (7)$$

$$Kp = K + arc tg \frac{V_S}{Vk},$$
 (8)

$$Vk = V + V_T \cdot \cos(K_T - K),$$

$$Vs = V_T \cdot \sin(K_T - K).$$
(9)

Если зафиксировать в правых частях формул (2–4) все переменные, кроме ошибок измерения соответствующих параметров, то можно записать условные плотности распределения вероятностей (ПРВ) оценок параметров, стоящих в левых частях этих формул:

$$g_{\hat{K}_{j}/K}(k) = g_{\Delta K_{j}}(k-K), \quad (10)$$

$$g_{\hat{V}_{k_{j}}/Vk}(v) = g_{\Delta Vk_{j}}(v-Vk), \quad (11)$$

$$g_{\hat{V}_{s_{j}}/Vs}(v) = g_{\Delta Vs_{j}}(v-Vs), \quad (11)$$

$$g_{\hat{K}_{j}/R_{j}}(r_{j}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [g_{\Delta Xm_{j}}(x) \times (12) \times g_{\Delta Ym_{j}}(y) \cdot g_{\Delta R_{i}}(r_{j}-R_{j})] \cdot dx/dy.$$

Поскольку, как было предположено выше, ошибки оценок используемых параметров взаимно независимы, совместная условная ПРВ оценок параметров в момент времени определяется произведением правых частей формул (10–12). Учитывая нормальность распределения ошибок, будем иметь:

$$g(k_{j}, vk_{j}, vs_{j}, r_{j} / X_{0}, Y_{0}, Kp, Vp) =$$

$$= norm(k_{j} - K // 0; \sigma_{K}) \times$$

$$\times norm(vk_{j} - Vk // 0; \sigma_{V}) \times$$

$$\times norm(vs_{j} - Vs // 0; \sigma_{V}) \times (13)$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [norm(x // 0; \sigma_{XY}) \times$$

$$\times norm(y // 0; \sigma_{XY}) \times$$

$$\times norm(r_{j} - R_{j} // 0; \sigma_{R})] \cdot dx / dy,$$

где $norm(x // m_X, \sigma_X)$ – нормальная плотность распределения случайной величины $X \, c \, MO \, m_X$ и СКО σ_X .

Интервал Δt измерения параметров \hat{K}_j , $\hat{V}k_j$, $\hat{V}s_j$, T_j , Xm_j , Ym_j будем выбирать превышающим интервал корреляции ошибок измерения. Тогда совместная условная ПРВ всех оценок параметров, полученных с момента начала галса, запишется в виде:

$$g(\mathbf{k}, \mathbf{v}k, \mathbf{v}s, \mathbf{r} / X_0, Y_0, Kp, Vp) =$$

$$= \prod_{j=l}^N g(k_j, vk_j, vs_j, r_j / X_0, Y_0, Kp, Vp),$$
(14)

где N – номер текущего цикла решения задачи с момента начала галса; $\hat{\mathbf{K}}, \hat{\mathbf{V}}k, \hat{\mathbf{V}}s, \hat{\mathbf{R}}$ – вектора оценок одноименных параметров; $\mathbf{k}, \mathbf{v}k, \mathbf{v}s, \mathbf{r}$ – их неслучайные аналоги – аргументы совместной условной ПРВ.

На практике правая часть выражения (14) может быть модифицирована путем добавления множителя, учитывающего устаревание более ранних оценок параметров. Это позволяет уменьшить влияние трудно предсказуемой динамики изменения статистических характеристик ошибок измерения параметров во времени.

Подставляя в формулу (14) вместо неслучайных векторных (\mathbf{k} , $\mathbf{v}k$, $\mathbf{v}s$, \mathbf{r}) и скалярных (k_i, vk_i, vs_i, r_i) аргументов соответствующие оценки параметров $(\hat{\mathbf{K}}, \hat{\mathbf{V}}k, \hat{\mathbf{V}}s, \hat{\mathbf{R}} \, \mathrm{u} \, \hat{K}_{i}, \hat{\mathcal{V}}k_{i}, \hat{\mathcal{V}}s_{i}, \hat{R}_{i}),$ получим функцию правдоподобия $(\Phi\Pi) g(\hat{\mathbf{K}}, \hat{\mathbf{V}}k, \hat{\mathbf{V}}s, \hat{\mathbf{R}}/X_0, Y_0, Kp, Vp),$ зависящую только от искомых параметров X₀, Y₀, Kp, Vp. Значения параметров X_0, Y_0, Kp, Vp , соответствующие глобальному максимуму этой ФП, являются оптимальными (по критерию максимального правдоподобия) оценками искомых параметров:

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_{0/opt}, \hat{Y}_{0/opt}, \hat{K}p_{opt}, \hat{V}p_{opt} \end{pmatrix} = = \arg \max_{X_0, Y_0, Kp, Vp} g\left(\hat{\mathbf{K}}, \hat{\mathbf{V}}k, \hat{\mathbf{V}}s, \hat{\mathbf{R}} / (15) / X_0, Y_0, Kp, Vp \right).$$

Поскольку ФП $g(\hat{\mathbf{K}}, \hat{\mathbf{V}}k, \hat{\mathbf{V}}s, \hat{\mathbf{R}} / X_0, Y_0, Kp, Vp)$ может оказаться многомодальной, то одним из вариантов поиска её глобального максимума является следующий. В качестве начального приближения залаются значения искомых параметров, полученные на предыдущем цикле решения задачи. В окрестности этих значений и в пределах максимально возможных ошибок искомых параметров одним из стандартных методов поиска максимума функции многих переменных [16] (например, методом наискорейшего спуска) находится локальный максимум ФП и запоминаются его величина и соответствующие ему значения искомых параметров. Затем поиск локального максимума повторяется, но при прибавлении к значению одного из параметров в начальном приближении величины максимально возможной ошибки этого параметра. Снова запоминаются величина локального максимума и соответствующие ему значения искомых параметров. Затем поиск локального максимума снова повторяется, но уже при вычитании из значения того же параметра в начальном приближении величины максимально возможной ошибки этого параметра. Затем варьируемый параметр возвращается в исходное состояние и начинается варьирование значения следующего параметра в начальном приближении. Таким образом, поиск локального максимума ФП осуществляется 9 раз. Из 9 полученных локальных максимумов выбирается наибольший (глобальный), и соответствующие ему значения искомых параметров принимаются за оптимальные.

С использованием полученных по алгоритму (15) оптимальных оценок можно определить текущие декартовы координаты АНПА на текущем прямолинейном галсе:

$$\hat{X}_{N} = \hat{X}_{0/opt_{N}} + \hat{V}p_{opt_{N}} \cdot (t_{N} - t_{0}) \times \\
\times sin(\hat{K}p_{opt_{N}}), \qquad (16) \\
\hat{Y}_{N} = \hat{Y}_{0/opt_{N}} + \hat{V}p_{opt_{N}} \cdot (t_{N} - t_{0}) \times \\
\times cos(\hat{K}p_{opt_{N}}).$$

Таким образом, оптимальным (по критерию максимального правдоподобия) алгоритмом определения искомых параметров движения АНПА X_0 , Y_0 , Kp, Vp на текущем галсе является алгоритм (15), а оценка текущих координат АНПА с использованием этих параметров вычисляется по формуле (16).

В момент начала маневрирования АНПА по курсу, скорости либо глубине коррекция пути АНПА с использованием описанного алгоритма прерывается и прокладка пути АНПА осуществляется только по счислению с использованием в качестве начального приближения координат и параметров движения АНПА, полученных на последнем галсе работы алгоритма. При выходе на установившийся режим движения начинается новый галс лвижения с постоянными параметрами движения, и алгоритм коррекции свою работу начинает заново, используя в качестве начального приближения координат и параметров движения АНПА их счислимые значения на текущий момент времени.

2. Моделирование алгоритма

Методика моделирования

Целью моделирования является исследование характеристик синтезированного алгоритма в зависимости от:

 точности измерения курса и составляющих вектора скорости АНПА; • точности измерения расстояния до маяка;

• точности определения скорости распространения сигнала между АНПА и маяком;

• скорости течения;

• траектории движения маяка относительно АНПА.

В качестве показателя точности одномаяковой навигации АНПА была выбрана ошибка $\Delta R_{i,j}$ определения места АНПА на *j*-м цикле решения задачи на *i*-м цикле статистических испытаний. Для краткости будем называть её ошибкой места АНПА. Она вычисляется как расстояние между декартовыми координатами АНПА $\hat{X}_{i,j}$, $\hat{Y}_{i,j}$, полученными в результате работы того или иного алгоритма, и истинными декартовыми координатами АНПА $X_{AHПA_i}$, $Y_{AHПA_i}$:

$$\Delta R_{i,j} = \sqrt{\left[\hat{X}_{i,j} - X_{AH\Pi A_j}\right]^2 + \left[\hat{Y}_{i,j} - Y_{AH\Pi A_j}\right]^2} . (17)$$

По результатам серии М из статистических испытаний вычислялись среднеквадратические ошибки места АНПА на каждом на *j*-м цикле решения задачи:

$$\sigma R_{j} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \left(\Delta R_{i,j} \right)^{2}}.$$
 (18)

Структура имитационной модели приведена на рис. 1.

Моделирование проводилось в следующей последовательности.

1. Путём предварительного моделирования был выбран базовый эпизод, характеризующийся:

 типовыми ошибками измерения параметров, используемых в алгоритме;

 оптимальным маневрированием НА для реализации метода одномаяковой навигации [5];

• отсутствием течения.

2. Моделировалась точность навигации АНПА для базового эпизода.

3. Исследовалась робастность синтезированного алгоритма.



Рис. 1. Структура имитационной модели

4. Моделировалась точность навигации АНПА при варьировании каждого из исследуемых факторов.

5. На основе анализа полученных результатов формулировались выводы о точности одномаяковой навигации АНПА в различных условиях.

Описание базового эпизода

АНПА движется на глубине H = 30 м, курсом $K = 90^{\circ}$, со скоростью V = 1 м/с. Глубина под килем АНПА 150 м. Бортовые навигационные средства АНПА периодически измеряют текущие значения курса, абсолютных продольной и поперечной составляющих скорости, а также глубины. Измерение курса характеризуется среднеквадратической погрешностью (СКО) 0,5°. Составляющие скорости измеряются с СКО 0,1 м/с. Глубина АНПА определяется с пренебрежимо малой ошибкой. Результаты измерения усредняются на интервале времени 60 с и подаются на вход исследуемого алгоритма.

Течение в районе плавания отсутствует.

НА движется по циклоиде с радиусом окружности 200 м и генеральными курсом и скоростью, совпадающими с курсом и скоростью движения АНПА (рис. 2).

С интервалом в 60 с НА при помощи СНС определят свои декартовы координаты с СКО 1 м и путем модемного обмена сообщает их на АНПА. В процессе модемного обмена определяется время распространения сигнала между НА и АНПА с СКО 50 мкс [13].

Заглубление приёмно-излучающей антенны НА известно с высокой точностью и составляет 3 м.

Скорость распространения сигнала между НА и АНПА известна с ошибкой 1 м/с.

Исследуемый алгоритм (15) запускается циклически с периодом 60 с после каждого определения расстояния между НА и АНПА. На каждом цикле на вход алгоритма поступают полученные с момента начала текущего галса массивы замеров расстояния между НА и АНПА, а также курса, составляющих скорости и глубины АНПА, сглаженные на интервале 60 с. Длительность моделируемого галса движения АНПА с постоянными параметрами движения составляет 60 мин.

Пример динамики ошибки места АНПА $\Delta R_{i,j}$ для базового эпизода при использовании синтезированного алгоритма одномаяковой навигации (АОН) показан на рис. 3 красным цветом. Для сравнения на том же рисунке синим цветом изображена аналогичная ошибка при реализации алгоритма счисления пути (АСП) АНПА по замерам курса и составляющих скорости.

Из рис. 3 следует, что на первых минутах движения АНПА оба алгоритма обеспечивают сопоставимую точность. Однако в дальнейшем ошибка при использовании АОН остаётся на одном и том же уровне, а ошибка счисления со временем возрастает.

При моделировании базового эпизода средняя за галс (60 мин) СКО определения места АНПА при использовании АОН составила 1,1 м, при использовании только счисления – 4,9 м.

Результаты исследования робастности синтезированного алгоритма

Под робастностью алгоритма будем понимать устойчивость результата его работы при отличии вероятностных распределений входных переменных, для которых синтезирован алгоритм, от их истинных распределений [17].

В рассматриваемом случае на вход алгоритма поступают оценки 6 параметров: курса и двух составляющих скорости АНПА, двух координат НА и расстояния между НА и АНПА. При синтезе предполагалось, что их ошибки распределены по нормальному закону, с нулевым математическим ожиданием и СКО соответственно $\sigma_{k}, \sigma_{v}, \sigma_{xy}$ и $\sigma_{\rm p}$. Поскольку устройства измерения, как правило, характеризуются центрированными ошибками с нормальным распределением, синтезированный алгоритм проверялся на робастность относительно только СКО этих распределений.

Проверка осуществлялась путём установления устойчивости результата работы алгоритма при моделировании базового эпизода при отклонениях значений констант σ_{k} , σ_{ν} , σ_{XY} , σ_{R} , используемых в алгоритме (15), в 5 раз в ту и другую сторону от тех значений СКО, при которых моделировались оценки соответствующих параметров.

Проверка робастности алгоритма показала, что изменение результата работы алгоритма при отклонении значений используемых в алгоритме констант, описывающих СКО входных данных, от значений СКО, при которых моделировались эти данные, не превысило нескольких десятков сантиметров, что для решаемой задачи несущественно. Отсюда можно сделать вывод, что синтезированный алгоритм является робастным.

Результаты моделирования алгоритма при варьировании каждого из исследуемых факторов

Согласно приведенной выше методике данное исследование проводилось путем моделирования базового эпизода, в котором варьировалось значение одного из входных параметров.

Варьировались следующие параметры:

• СКО измерения курса АНПА от 0,5° до 3°;

• СКО измерения составляющих скорости АНПА от 0,1 до 1 м/с;

• СКО измерения координат НА по данным СНС от 1 до 5 м;

• СКО измерения времени распространения сигнала между НА и АНПА от 50 до 1000 мкс;

• СКО определения скорости распространения сигнала между НА и АНПА от 1 до 5 м /с;

• скорость течения в направлении, перпендикулярном курсу АНПА, от 0 до 5 м/с в двух вариантах: при использовании абсолютного лага и при использовании относительного лага.



Рис. 2. Траектории движения АНПА (прямая линия) и НА (циклоида)



Рис. 3. Динамика ошибки определения места АНПА в базовом эпизоде

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА



Рис. 4. Траектории движения АНПА (прямая линия) и НА (синусоида)

Моделирование показало, что при варьировании значений практически всех перечисленных параметров в указанных пределах средняя за галс (60 мин) СКО определения места АНПА не превысила 2 м/с. Исключение составил случай наличия течения при использовании относительного лага. В этом случае СКО определения места АНПА росла с ростом скорости течения и при скорости течения 5 м/с составила 13 м.

Также при моделировании оценивалась ошибка навигации АНПА от вида траектории движения НА. Моделировались 4 типа траектории: циклоида (рис. 2), синусоида (рис. 4), ломаная линия (рис. 5) и прямая линия, параллельная линии курса АНПА. При движении по каждой из траекторий генеральный курс и генеральная скорость НА моделировались равными курсу и скорости АНПА. Кроме того, для каждого из первых трех типов траекторий варьировалась ширина полосы, в которой маневрировал НА (ширина полосы соответствует размаху графиков по оси У на рис. 1, 4 и 5). Зависимость средней за галс СКО определения места АНПА от ширины полосы маневрирования НА для первых трех типов траектории НА приведена на рис. 6. Для четвертого типа траектории НА (прямой линии, параллельной линии курса АНПА) среднее значение ошибки определения места АНПА составило 16-40 м, что не позволи-



Рис. 6. Зависимость средней за галс СКО определения места АНПА от ширины полосы маневрирования НА



Рис. 5. Траектории движения АНПА (прямая линия) и НА (ломаная линия)

ло наглядно отобразить график для этой траектории на рис. 6.

3. Обсуждение результатов моделирования

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Наибольшее влияние на точность определения места АНПА при использовании предложенного алгоритма одномаяковой навигации (АОН) оказывают вид траектории движения НА и скорость течения в районе при отсутствии абсолютного лага.

2. Исследования подтвердили известный вывод, что траектория движения НА должна быть такой, чтобы курсовые углы НА относительно АНПА в моменты времени измерения взаимного расстояния между НА и АНПА периодически меняли борт и вообще изменялись в возможно широких пределах.

3. При правильном выборе траектории НА, использовании абсолютного лага и типовых ошибках измерения курса и скорости АНПА, скорости и времени распространения сигнала между НА и АНПА ошибка определения места АНПА при использовании АОН практически равна ошибке определения места НА, причем не возрастая с течением времени.

4. В аналогичных условиях ошибка определения места АНПА без коррекции по данным, полученным от НА, с течением времени возрастает в среднем на 5 м за 1 час плавания.

5. Значительный выигрыш по точности навигации коррекция по данным от НА даёт в условиях наличия течения в районе и при невозможности использовать ГАЛ. В этих условиях ошибка определения места АНПА при использовании АОН возрастает на 1–13 м в зависимости от скорости и курса течения. Ошибка, обеспечиваемая только счислением, в этом случае становится неприемлемой для практики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе синтезирован по критерию максимального правдоподобия алгоритм одномаяковой навигации и исследована обеспечиваемая им точность определения текущего места АНПА в зависимости от условий и точности измерения параметров, используемых в алгоритме.

Показано, что наибольшее влияние на точность определения места АНПА при применении синтезированного алгоритма оказывает траектория движения надводного аппарата (НА), а также скорость течения в районе при отсутствии абсолютного лага. При правильном выборе траектории НА и применении абсолютного лага ошибка определения места АНПА практически равна ошибке определения места НА, не возрастая с течением времени.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02928-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.

- 2. Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges // Proc. IFAC Conf. on Maneuvering and Control of Marine Craft. Lisbon, 2006.
- 3. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Исследование некоторых алгоритмов одномаяковой мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний // Гироскопия и навигация. 2015. № 4. С. 160–170.

4. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. О методе оценивания точности работы одномаяковой мобильной навигационной системы подводного аппарата с помощью водного аппарата, оснащенного DGPS // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 1 (21). С. 31–40.

5. Scherbatyuk A.Ph., Dubrovin F.S. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proc. IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. Porto, 2012.

6. Webster S.E., Eustice R.M., Singh H., Whitcomb L.L. Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles // Int. Journ. of Robotics Research. 2012. Vol. 31, No 8. P. 935–950.

7. Webster S.E., Walls J.M., Whitcomb L.L., Eustice R.M. Decentralized extended information filter for single-beacon cooperative acoustic navigation: Theory and experiments // IEEE Transactions on Robotics. 2013. Vol. 29, No 4. P. 957–974.

8. Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н., Каморный А.В. Гидроакустическая навигационная система подводного робота без опорных навигационных маяков // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1 (7). С. 15–21.

9. Пат. 2344435 РФ, МПК G01S3/80. Способ навигационного обеспечения автономного подводного робота, контролируемого с борта обеспечивающего судна / Ю.В. Матвиенко, Р.Н. Рылов, А.В. Каморный и др.; заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2007117288/28; заявл. 08.05.2007; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2.

10. Ageev M.D., Kiseljev L.V., Scherbatyuk A.Ph. Integreted Positioning System for AUV // Proc. Underwater Int. Conf. Vancouver, 1989.

11. Ageev M.D., Kiseljev L.V., Scherbatyuk A.Ph. Tasks for the Autonomous Underwater Robot // Proc. URIC'92. Pisa, 1992.

12. Scherbatyuk A.Ph. The AUV Positioning Using Ranges from One Transponder LBL // Proc. OCEANS Conference. San-Diego, USA, 1995.

13. Кебкал К.Г., Кебкал А.Г., Кебкал В.К. Инструментальные средства синхронизации гидроакустических устройств связи в задачах управления подводными сенсорами, распределенными антеннами, автономными аппаратами // Гироскопия и навигация. 2014. № 2 (85). С. 70–85.

14. Машошин А.И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до цели // Морская радиоэлектроника. 2012. № 2 (40). С 30-34

15. Тейлор Д. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985.

16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: пер. с англ. М.: Наука, 1977.

17. Хьюбер Дж. Робастность в статистике: пер. с англ. М.: Наука, 1984.

