

Д. А. КОШАЕВ, В. В. БОГОМОЛОВ

ДЛИННОБАЗОВОЕ ПОДВОДНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ С КОМПЛЕКСИРОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДО И ПОСЛЕ НАЧАЛА РЕШЕНИЯ, И УСТРАНЕНИЕМ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ. ЧАСТЬ 2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Апробирован рассмотренный в первой части статьи алгоритм определения координат автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) по измерениям дальностей до гидроакустических маяков, данным относительного лага и курсоуказателя. Отличительные особенности алгоритма – запуск без использования априорных координат АНПА и без необходимого для однозначного навигационного решения набора измерений, рекуррентная обработка в едином фильтре текущих и сохраненных до начала решения измерений, учет и разрешение неоднозначности положения АНПА. Проведено сравнение быстродействия предложенного алгоритма с другими возможными решениями. Приведены результаты моделирования и постобработки натурных данных, позволяющие оценить время до получения первого однозначного решения и точность однозначных решений с помощью разработанного алгоритма при различном числе и расположении гидроакустических маяков и траектории движения АНПА. Рассмотрены варианты со случайной и неизвестной рассинхронизацией шкал времени маяков и АНПА, когда используются либо дальномерные, либо разностно-дальномерные измерения. Сопоставлены решения с учетом и без учета сохраненных до запуска алгоритма измерений.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, метод длинной базы, дальномерные и разностно-дальномерные измерения, числение пути, фильтр Калмана, неоднозначность, апостериорная вероятность, моделирование, постобработка натурных данных.

Введение

В первой части статьи [1] была изложена математическая постановка рассматриваемой задачи определения координат АНПА на основе метода длинной базы. Задача предусматривает наличие нестандартных для применения этого метода условий,

Кошаев Дмитрий Анатольевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Богомолов Владимир Валентинович. Начальник сектора, аспирант, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург).

Статья по докладу на XXXIV конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова, 2024.

когда число доступных маяков и конфигурация их расположения относительно АНПА не позволяют получить однозначное навигационное решение по одномоментным измерениям. Считается, что априорные координаты АНПА, которые позволяли бы выбрать однозначное решение, отсутствуют. Предполагается, что рассинхронизация шкал времени маяков и АНПА может иметь случайный характер (константа + белый шум) с известными характеристиками либо представлять собой неизвестную величину. В последнем случае в обработке участвуют разностно-дальномерные измерения. Также первая часть статьи содержит детальное описание алгоритма решения задачи, в котором сочетаются нелинейные, в том числе многоальтернативные, и линейные методы оценивания для получения экономичного решения, которое может быть реализовано в бортовом вычислителе АНПА в реальном времени.

Данная часть статьи посвящена исследованию представленного ранее алгоритма и состоит из трех разделов. В разделе 1 даны оценки быстродействия алгоритма по сравнению с другими решениями, также предусматривающими обработку текущих и сохраненных измерений. В разделах 2, 3 приведены результаты численной апробации алгоритма, полученные путем моделирования множества случайных реализаций погрешностей измерений и камеральной обработки натурных данных. При этом сопоставляются решения с учетом и без учета измерений, сохраненных до запуска алгоритма. Главным образом рассматриваются сценарии, где возникает неоднозначность в определении координат АНПА. Результаты анализируются с точки зрения времени получения первого однозначного решения и точности однозначных решений. В случае моделирования приводятся среднеквадратические погрешности (СКП) координат. При этом сопоставляются действительные СКП, вычисленные по реализациям погрешностей оценок координат, и расчетные СКП, полученные из ковариационных матриц, вырабатываемых в алгоритме [2]. При моделировании, помимо СКП, определяется доля однозначных решений из общего их числа.

1. Оценка быстродействия

В настоящем разделе речь идет о сравнении времени, которое требуется для реализации представленного в первой части статьи алгоритма и других алгоритмов, также предусматривающих постепенную обработку сохраненных до запуска решения измерений на одном неначальном шаге работы (после получения вектора измерений Y_1 , Y_2 и т.д.). Предполагалось, что рассинхронизация шкал времени маяков и АНПА δ имеет случайный характер, т.е. в обработке непосредственно участвуют исходные дальномерные измерения. До запуска решения поступали измерения от одного маяка, после запуска – от двух. Вычисления, связанные с определением отношения апостериорных вероятностей гипотез для неоднозначного решения, при сравнении не учитывались.

В качестве альтернативы привлекалось два алгоритма. Первый содержит два фильтра Калмана (ФК), один из которых обрабатывает текущие измерения в прямом времени, а другой – сохраненные измерения в обратном времени. Данные двух фильтров комплексируются с помощью метода фиктивных измерений [3, 4]. Второй альтернативный алгоритм отличается от алгоритма с двумя ФК тем, что обработка сохраненных измерений в нем выполняется не с помощью ФК, а путем сглаживания в фиксированной точке (СФТ) [5, 6], под которой здесь понимается момент начала решения. Рассмотрены два варианта для каждого из альтернативных алго-

ритмов. В первом варианте два ФК или СФТ с ФК – обозначим их $\leftarrow\text{ФК}+\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{СФТ}+\text{ФК}\rightarrow$ – задействованы поочередно, во втором варианте они работают параллельно – $\leftarrow\text{ФК}\|\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{СФТ}\|\text{ФК}\rightarrow$. Следует иметь в виду, что технология параллельных вычислений далеко не всегда может быть реализована в бортовом вычислителе АНПА, так как требует специального аппаратного и программного обеспечения. Предложенный в статье алгоритм предусматривает обработку текущих измерений в прямом времени и сохраненных до начала решения измерений в обратном времени с помощью единого ФК, отсюда его обозначение – $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$. Быстродействие алгоритмов оценивалось при разном числе ΔN сохраненных измерений, обрабатываемых за один i -шаг решения. Понятно, что алгоритмы $\leftarrow\text{ФК}\|\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{СФТ}\|\text{ФК}\rightarrow$ наиболее эффективны при $\Delta N = 1$, когда объем параллельно выполняемых в них вычислений для прямого и обратного времени сопоставим. По мере увеличения ΔN различие производительности между $\leftarrow\text{ФК}\|\text{ФК}\rightarrow$ и $\leftarrow\text{ФК}+\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{СФТ}\|\text{ФК}\rightarrow$ и $\leftarrow\text{СФТ}+\text{ФК}\rightarrow$, очевидно, должно нивелироваться.

Приведенная на рис. 1 диаграмма показывает отношение времени выполнения алгоритмов $\leftarrow\text{ФК}+\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{ФК}\|\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{СФТ}+\text{ФК}\rightarrow$, $\leftarrow\text{СФТ}\|\text{ФК}\rightarrow$ ко времени выполнения алгоритма $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$. Следует иметь в виду, что оно варьируется в зависимости от вычислительной техники и среды программирования. При другой размерности вектора состояния оценки быстродействия также могут измениться. В связи с этим приведенные данные нельзя распространить на бортовые версии алгоритмов, но они дают примерное представление о сравнительном быстродействии указанных алгоритмов.

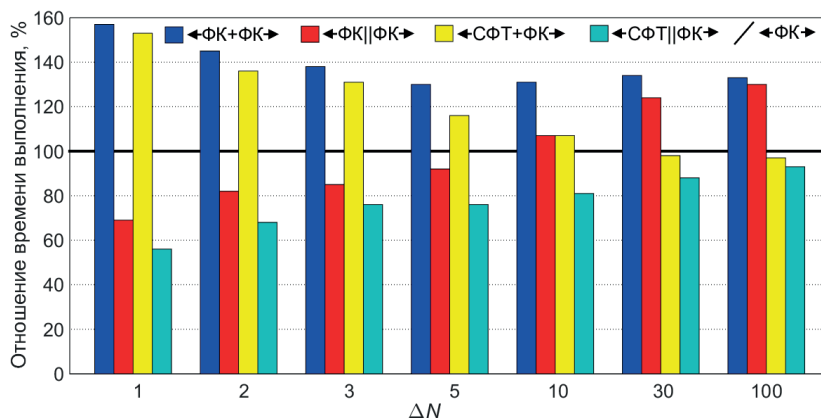


Рис. 1. Отношение времени выполнения четырех алгоритмов и алгоритма $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$ на одном начальном шаге решения

В целом можно сказать, что обсуждаемые решения не имеют кардинальных отличий в быстродействии. Алгоритм $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$ обладает определенным преимуществом перед альтернативными, где не применяются параллельные вычисления. По сравнению с $\leftarrow\text{ФК}+\text{ФК}\rightarrow$ алгоритм $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$ выигрывает в быстродействии 30–60% для всех рассмотренных $\Delta N \leq 100$. В отличие от $\leftarrow\text{СФТ}+\text{ФК}\rightarrow$ алгоритм $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$ показывает лучшие на 30–50% результаты только для $\Delta N \leq 3$. Наиболее производительный из представленных вариантов $\leftarrow\text{СФТ}\|\text{ФК}\rightarrow$ превосходит $\leftarrow\text{ФК}\rightarrow$ по быстродействию на 20–50% для $\Delta N \leq 10$, но при дальнейшем увеличении ΔN его преимущество практически сходит на нет.

Вместе с тем установлено, что время, затрачиваемое на запуск решения ($i = 0$) при $n_0 = 2, L = 12$ для получения $\tilde{\mathbf{x}}_0^{(l)}, \tilde{\mathbf{y}}_0^{(l)}$ из $\tilde{\mathbf{x}}_0^{(l)}, \tilde{\mathbf{y}}_0^{(l)}, l = \overline{1, L}$, с применением 5 итераций

(этап 2 разд. 2 в [1]), оказывается меньшим, но сопоставимым со временем выполнения рассмотренных алгоритмов на нена начальном шаге с $\Delta N = 100$, если вычислять $\tilde{\mathbf{x}}_0^{(l)}, \tilde{\mathbf{y}}_0^{(l)}$ поочередно. В случае параллельного вычисления $\tilde{\mathbf{x}}_0^{(l)}, \tilde{\mathbf{y}}_0^{(l)}$ это время существенно сокращается. Длительность вычисления отношения апостериорных вероятностей гипотез $\delta p_i^{1/2}$ кратно меньше, чем общее время работы алгоритмов при $\Delta N = 1$.

2. Моделирование

Исследуемый алгоритм был промоделирован в различной навигационной обстановке – как при случайной, так и при неизвестной рассинхронизации δ шкал времени маяков и АНПА. Путевая скорость АНПА задавалась равной 5 м/с. Моделирование проводилось с использованием 1500 реализаций случайных погрешностей дальномерных измерений, данных курсоуказателя и лага, а также погрешностей знания скорости течения. Параметры погрешностей: среднеквадратическое отклонение (СКО) шумов измерений дальности $\sigma_v = 10$ м, СКО постоянной погрешности знания скорости звука $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, СКО шума измерений лага $\sigma_{\Delta v} = 0,1$ м/с, СКО медленноменяющихся погрешностей определения курса $\sigma_{\Delta \kappa} = 5^\circ$ и знания составляющих скорости течения $\sigma_{\Delta u} = 0,25$ м/с, интервалы корреляции этих составляющих $\tau_{\Delta u} = \tau_{\Delta \kappa} = 3600$ с. При случайной рассинхронизации СКО ее постоянной составляющей $\sigma_b = 20$ м, шумовой составляющей $\sigma_e = 2$ м. Дискретность поступления измерений $\Delta t_i = 1$ с. Гидроакустические измерения моделировались только при условии, что расстояние от маяка до АНПА не превышает 1 км. Параметры алгоритма: предполагаемая максимальная дальность приема сигнала от маяков $D_{\max} = 1,5$ км; параметр, определяющий шаг сетки предварительных оценок $\delta \bar{\mathbf{x}} = 300$ м; число сохраненных измерений, которые обрабатываются на первом после запуска алгоритма шаге решения $\Delta N_0 = 0$ (т.е. до получения вектора измерений Y_1 они не обрабатываются) и на нена начальных шагах (после получения Y_1, Y_2 и т.д.) $\Delta N = 10$; порог отношения апостериорных вероятностей гипотез о положении АНПА – при случайной рассинхронизации $\delta \bar{p} = 10^4$, при неизвестной рассинхронизации $\delta \bar{p} = 10^5$. Напомним, что $D_{\max}, \delta \bar{\mathbf{x}}$ используются для определения границ предварительных оценок при запуске алгоритма (см. пояснения к выражениям (8) в [1]). Если отношение большей апостериорной вероятности к меньшей превышает порог $\delta \bar{p}$, более вероятная гипотеза принимается за истинную и решение считается однозначным (см. правило выбора истинной гипотезы в начале разд. 4 в [1]).

Результаты моделирования представлены на рис. 2–4 в однотипном формате. На графиках слева сверху изображены маяки, истинная траектория, пример траектории для ложной гипотезы о положении АНПА, которая рассматривается до разрешения неоднозначности без учета сохраненных измерений, линии положения – окружности и гиперболы для дальномерных и разностно-дальномерных измерений в момент запуска решения. Под разностно-дальномерными измерениями понимаются разности между измерениями от маяков 2, 3 и маяка 1. На двух верхних графиках справа показаны полученные по множеству решений действительные (из реализаций погрешностей оценок) и расчетные (из ковариационных матриц ФК) СКП [2] оценок координат, выработанных рассматриваемым алгоритмом с учетом и без учета сохраненных до его запуска измерений. Это СКП только для однозначных решений, т.е. для тех, в которых на данный момент времени из двух гипотез о возможном положении АНПА была

выбрана истинная. По этой причине графики СКП начинаются не с самого начала работы алгоритма, когда число однозначных решений мало. На третьем графике сверху справа показана доля однозначных решений из общего их числа – 1500. По горизонтальной оси на графиках отложено время, прошедшее от момента запуска решения t_0 . В нижней части рисунков приведены график курса АНПА и диаграмма используемых маяков. При моделировании рассматривались случаи А, Г2, Б2, введенные в [1], где в начале решения невозможно определить однозначное положение АНПА.

Сначала выскажем несколько общих замечаний по результатам моделирования. Из графиков СКП видно, что расчетная СКП адекватно передает реальный уровень погрешности. Расхождения между расчетной и действительной СКП заметны, но не существенны. При моделировании полученные однозначные решения были правильными, т.е. из двух гипотез о положении АНПА истинная выбиралась безошибочно. Судя по графикам доли (%) однозначных решений на рис. 2, 3, обработка сохраненных измерений позволяет ускорить разрешение неоднозначности. Если сравнивать СКП координат среди однозначных решений, то и здесь алгоритм с учетом сохраненных измерений имеет преимущество, особенно это видно по СКП x на рис. 3 сверху. Хотя с течением времени это преимущество снижается.

Обсудим далее отдельные примеры.

1. Результаты, приведенные на рис. 2 сверху, показывают, что устранению неоднозначности решений со случайной рассинхронизацией δ и двумя маяками способствуют развороты АНПА. В частности, разворот, выполненный до запуска алгоритма, позволил резко увеличить число однозначных решений при учете в алгоритме сохраненных измерений. Неоднозначность положения АНПА разрешается благодаря тому, что для истинной гипотезы вновь поступающие гидроакустические измерения согласуются с оценками прогноза координат АНПА по данным лага и курсоуказателя, тогда как для ложной гипотезы измерения и прогнозируемые координаты со временем все больше противоречат друг другу. Это противоречие может нарастать медленно или быстро в зависимости от траектории движения АНПА и расположения маяков. В примере на рис. 2 сверху прямолинейный участок траектории, на котором происходит запуск решения, имеет небольшой наклон (10 град) к прямой, проходящей через маяки 1 и 2, что затрудняет разрешение неоднозначности. При увеличении наклона траектории, как в примере на рис. 2 внизу, где наклон составляет 60 град, неоднозначность разрешается быстрее (при учете сохраненных измерений – почти сразу). Если АНПА движется прямолинейно и параллельно линии маяков, то разрешение неоднозначности оказывается невозможным без априорных данных о его координатах.

2. При неизвестной рассинхронизации δ и трех маяках разрешение неоднозначности возможно и при прямолинейном движении АНПА, даже если он движется вдоль прямой, соединяющей маяки 1, 2, а маяк 3 располагается с небольшим смещением от этой прямой (см. рис. 3 сверху). Если угол между траекторией АНПА и прямой, проходящей через маяки 1, 2, увеличивается до 60 град (рис. 3 внизу), неоднозначность разрешается почти так же быстро, как в аналогичном случае с двумя маяками и случайной δ (рис. 2 внизу). Заметим, что в примере на рис. 3 внизу СКП координат с учетом и без учета сохраненных измерений практически совпадают, поскольку участок до начала решения, где можно сохранить измерения, достаточно короткий. Но однозначные решения при использовании сохраненных измерений все-таки получаются быстрее, чем без них.

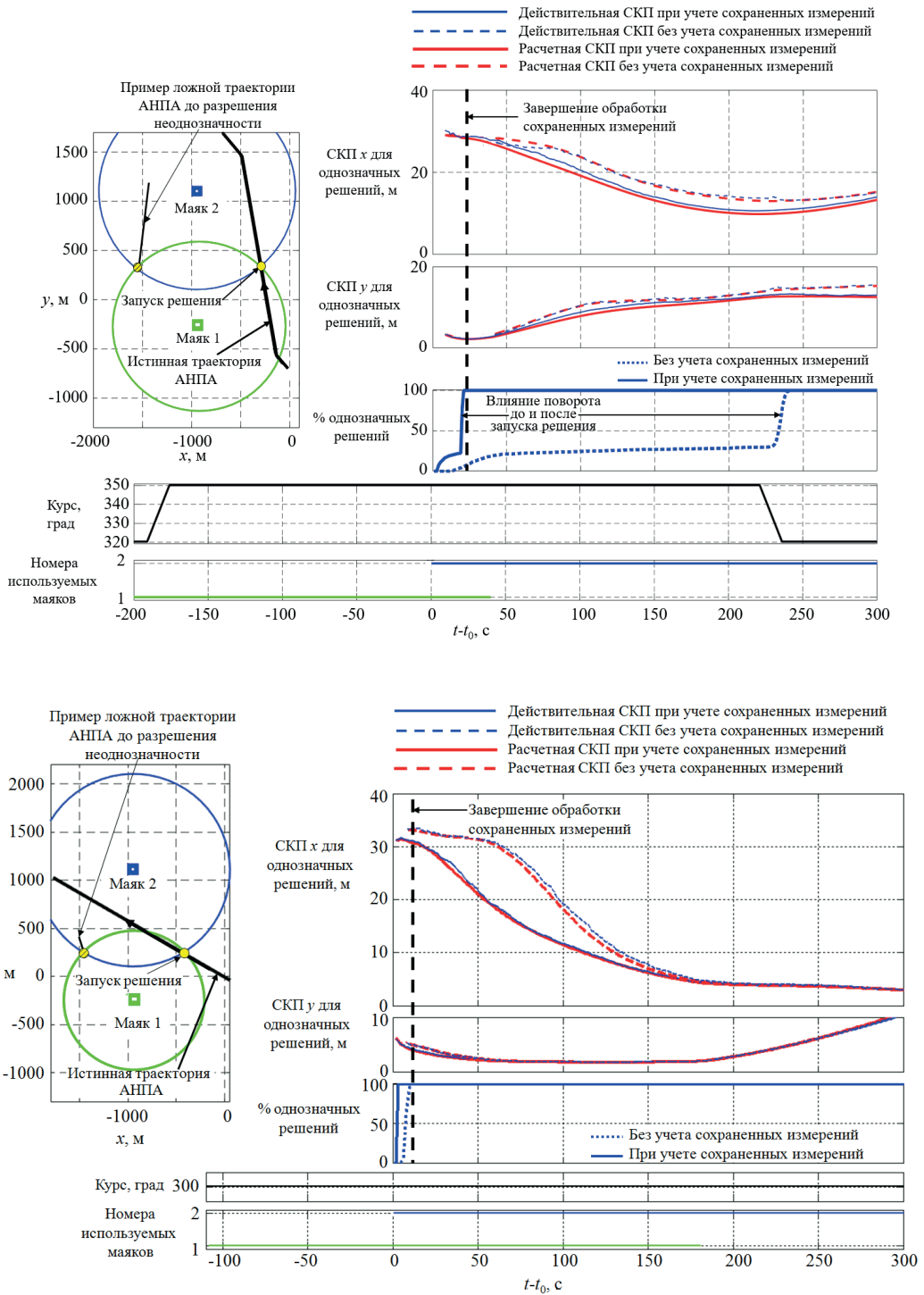


Рис. 2. Условия и результаты моделирования при случайной рассинхронизации шкал времени маяков и АНПА в случае А [1] при различных траекториях АНПА

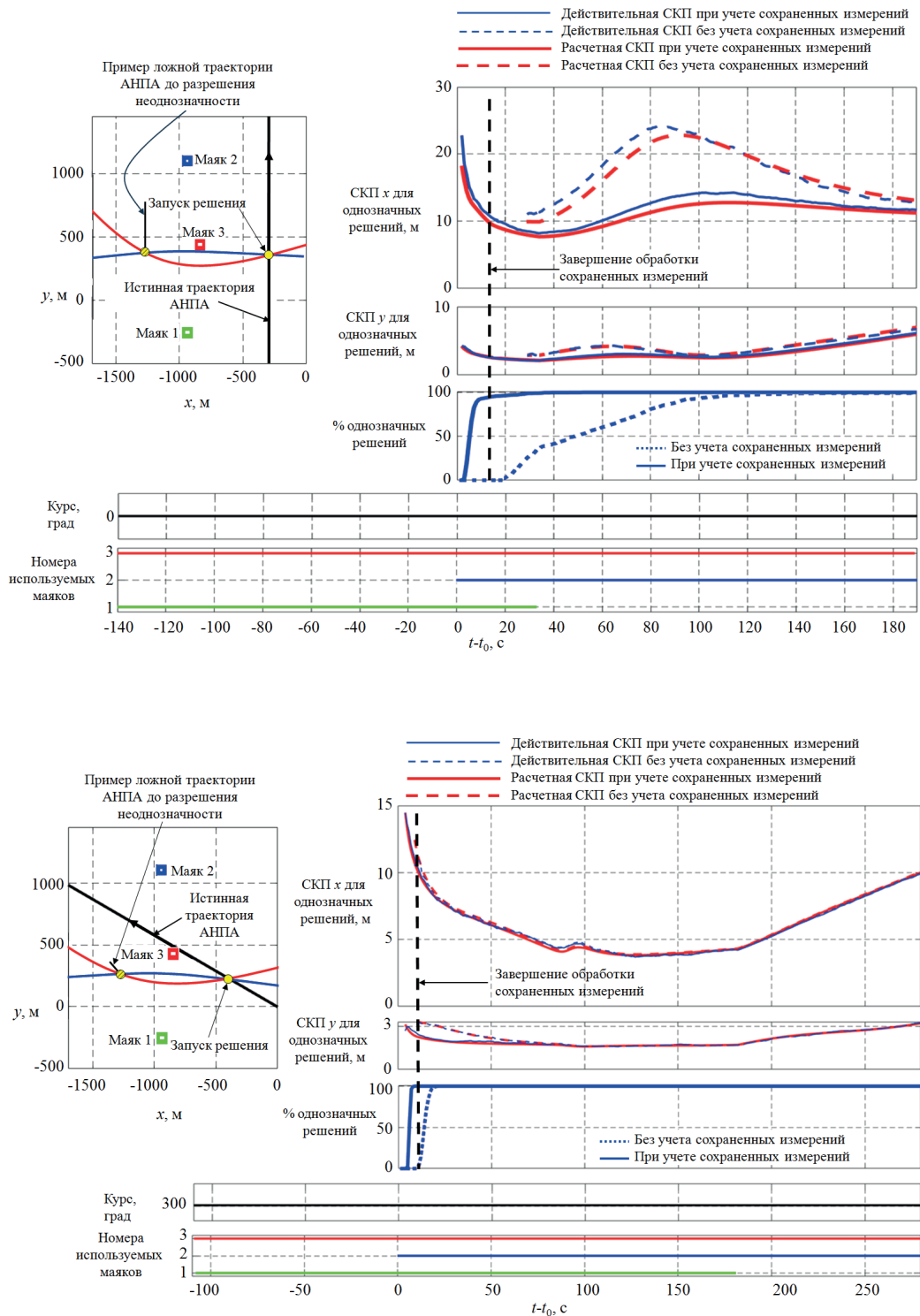


Рис. 3. Условия и результаты моделирования при неизвестной рассинхронизации шкал времени маяков и АНПА в случае Г2 [1] при различных траекториях АНПА

3. На рис. 4 приведены результаты при случайной рассинхронизации и трех маяках, расположенных почти на одной прямой, что неблагоприятно отражается на точности навигационного решения и приводит к неоднозначности, т.к. линии положения в виде трех окружностей близки к пересечению в двух местах. В этом примере предполагалось, что никакие измерения не сохранялись до начала решения, например по причине запуска или перезапуска всей навигационной задачи. В данном случае в начале решения большая полуось a расчетного эллипса погрешностей координат превысила порог $\bar{a} = 500$ м, и решение выполнялось с учетом неоднозначности (см. описание случая Б в [1]). В ходе последующей обработки измерений неоднозначность сравнительно быстро разрешилась.

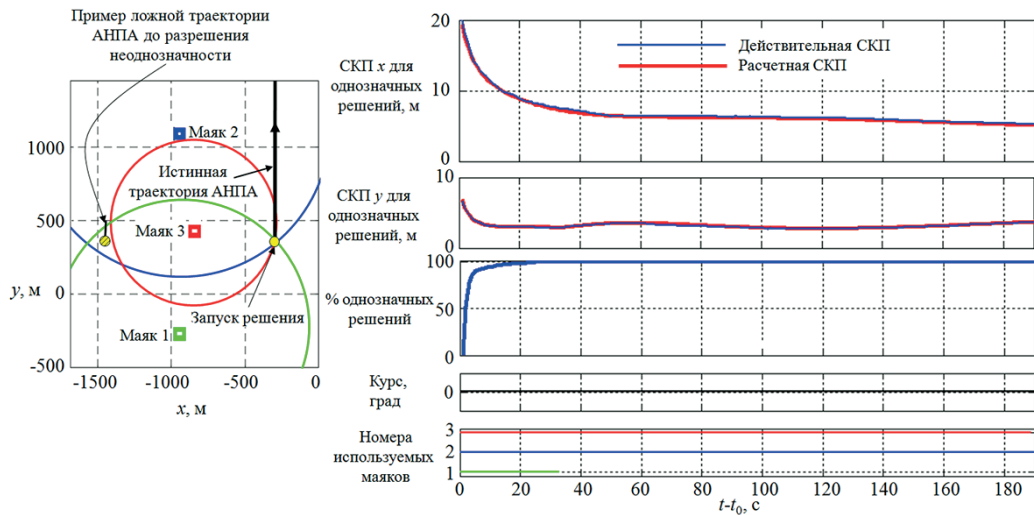


Рис. 4. Условия и результаты моделирования при случайной рассинхронизации шкал времени маяков и АНПА в случае Б2 [1]

Вместе с тем установлено, что с точки зрения СКП координат однозначных решений предложенный алгоритм практически не отличается от того, в котором до обработки текущих измерений обрабатываются все сохраненные измерения с помощью процедуры СФТ [5, 6]. Не выявлено и каких-либо существенных отличий в результатах между предложенным алгоритмом и тем, где применяется два ФК для раздельной обработки текущих и сохраненных измерений, а их комплексирование выполняется методом фиктивных измерений [3, 4].

В заключение раздела отметим, что приведенные на графиках значения СКП получены в нестандартных для применения метода длинной базы навигационных условиях, поэтому их не стоит сравнивать с теми предельными значениями погрешности (10 м и менее), которые считаются типовыми для обычных условий.

3. Постобработка натуральных данных

На рис. 5, 6 показаны условия и результаты экспериментов с натурными данными, обработанными в камеральном режиме, при случайной и неизвестной рассинхронизации δ шкал времени маяков и АНПА. Натурные данные были получены на катере, оборудованном приемником сигналов глобальных навигационных спутниковых си-

стем (ГНСС). В роли АНПА выступал буксируемый подводный аппарат с гидроакустической системой. В эксперименте со случайной рассинхронизацией участвовало 2 маяка (случай А [1]), с неизвестной рассинхронизацией – 3 маяка (случай Г1 [1]).

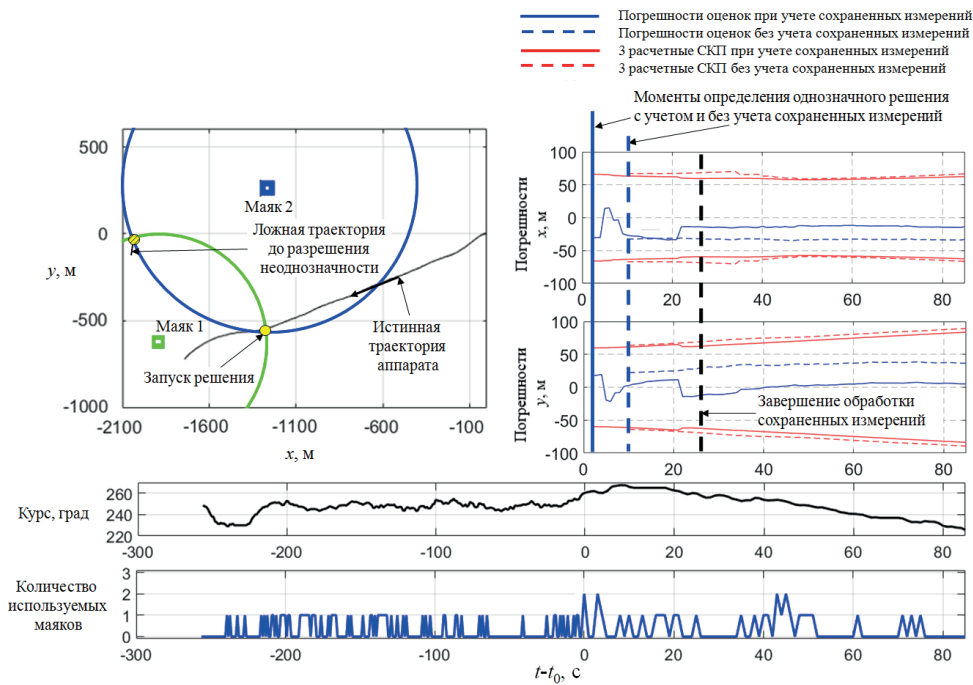


Рис. 5. Условия и результаты постобработки натуральных данных при случайной рассинхронизации шкал времени маяков и АНПА в случае А [1]

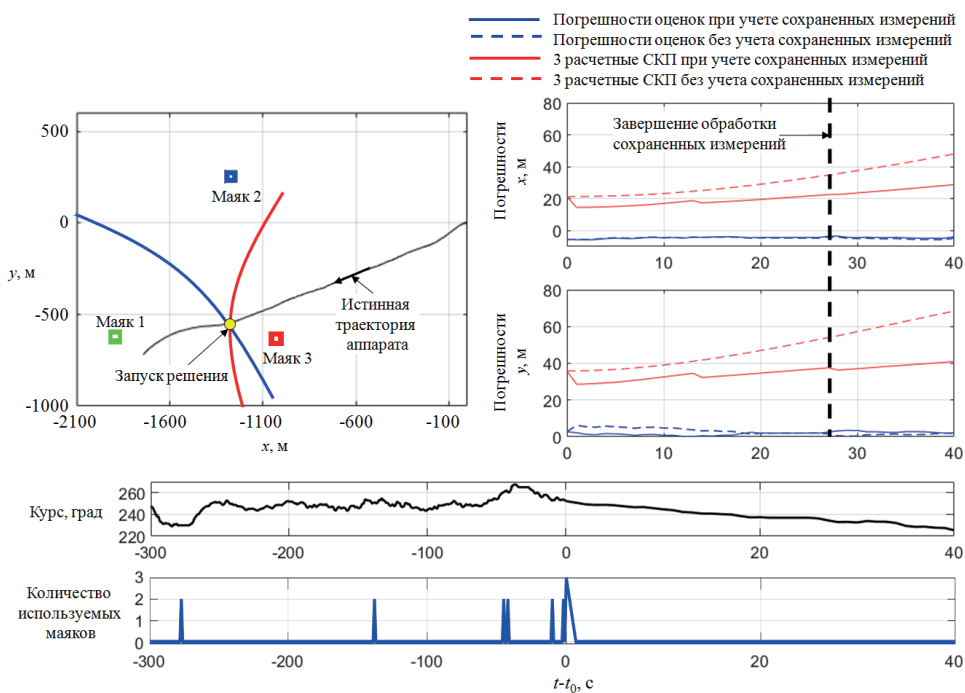


Рис. 6. Условия и результаты постобработки натуральных данных при неизвестной рассинхронизации шкал времени маяков и АНПА в случае Г1 [1]

При неизвестной рассинхронизации после запуска решения имелись измерения только от одного маяка, которые не использовались, поскольку составить разностное измерение было невозможно, а до запуска поступало всего лишь 6 одновременных измерений от двух маяков (см. нижний график на рис. 6). Таким образом, здесь после запуска решения происходила обработка редких сохраненных измерений в течение 28 с, тогда как решение без учета сохраненных измерений свелось к счислению (прогнозу) координат, которое отталкивалось от начального решения, полученного по измерениям от трех маяков.

Как и при моделировании, рассматривались решения с учетом и без учета сохраненных измерений. Скорость буксируемого аппарата составляла около 4 м/с. Его эталонные координаты рассчитывались на основе координат от ГНСС-приемника и известной длины кабель-троса. Для счисления использовались географические составляющие абсолютной скорости от ГНСС-приемника, поэтому погрешности курса и составляющих скорости течений отсутствуют и в задаче не оцениваются. В остальном расчеты с натурными данными проводились при тех же параметрах алгоритма, что и моделирование. В задаче со случайной рассинхронизацией в измерения добавлялось постоянное смещение $b = 30$ м (при заданном в алгоритме $\sigma_b = 20$ м).

Графики на рис. 5, 6 аналогичны рассмотренным ранее для моделирования. Основным отличием является то, что вместо действительной и расчетной СКП, полученных по множеству решений, здесь приводятся реализация погрешности оценки и утроенное значение СКП, полученное из соответствующего диагонального элемента ковариационной матрицы ФК. На графиках курса и числа используемых маяков шкала времени до запуска решения сжата по сравнению со шкалой после запуска.

Из графиков погрешностей оценок координат при случайной рассинхронизации (рис. 5) видно, что при учете сохраненных измерений неоднозначность устраняется через 2 с после запуска решения, а без их учета – через 11 с. Угол между направлением траектории АНПА и прямой линией, проходящей через два маяка, в эксперименте со случайной рассинхронизацией достаточно велик для быстрого получения однозначного решения. Разрешению неоднозначности не мешает даже разреженная диаграмма поступления измерений. При неизвестной рассинхронизации (рис. 6) неоднозначность отсутствует благодаря удачной геометрии расположения маяков и АНПА в момент поступления одновременных измерений от трех маяков.

Погрешности однозначных решений в эксперименте со случайной рассинхронизацией оказываются заметно меньше при учете сохраненных измерений, а при неизвестной рассинхронизации слабо зависят от этого фактора. Утроенные расчетные СКП с запасом превышают реальный уровень погрешности. Приведенные результаты обработки натурных данных, среди прочего, демонстрируют работоспособность представленного алгоритма при сильнофрагментированной диаграмме поступления гидроакустических измерений.

Заключение

Установлено преимущество разработанного алгоритма в быстродействии перед другими алгоритмами, обрабатывающими текущие и сохраненные измерения (с помощью двух ФК либо с применением процедуры СФТ и ФК) без технологии параллельных вычислений. Отмечено, что наиболее сложной в вычислительном от-

ношении оказывается выработка начального неоднозначного решения. Алгоритм апробирован при моделировании множества случайных реализаций погрешностей измерений и постобработке натурных данных. Установлено, что учет сохраненных до запуска алгоритма измерений в первую очередь полезен для сокращения времени получения однозначного решения. В ситуации с двумя доступными маяками и случайной рассинхронизацией шкал времени маяков и АНПА продемонстрировано сокращение времени разрешения неоднозначности при выполнении АНПА поворотов и при увеличении угла между его траекторией и прямой, проходящей через маяки. В ситуации с тремя доступными маяками и неизвестной рассинхронизацией (при использовании разностно-дальномерных измерений) показано, что неоднозначность разрешается даже при расположении маяков примерно на одной прямой и движении АНПА вдоль нее. Подтверждено, что расчетная СКП адекватно передает реальный уровень погрешности как при моделировании, так и при обработке натурных данных.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>*

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошаев Д.А., Богомолов В.В. Длиннобазовое подводное позиционирование с комплексированием измерений, полученных до и после начала решения, и устранением неоднозначности. Часть 1. Математическое описание // Гироскопия и навигация. 2025. Т. 33. №1 (128). С. 125–145. EDN OVBJBK.
2. Степанов О.А., Исаев А.М. Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №3 (122). С. 48–65. EDN MVWKGK.
3. Кошаев Д.А. Метод фиктивных измерений для многоальтернативного оценивания процессов в линейной стохастической системе // Автоматика и телемеханика. 2016. №6. С. 81–108.
4. Богомолов В.В. Позиционирование автономного необитаемого подводного аппарата с одновременной обработкой текущих и сохраненных измерений дальностей от менее чем трех гидроакустических маяков // Подводные исследования и робототехника. 2024. №2 (48). С. 58–67. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_07. EDN: TGEOGR.
5. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1977. 440 с.
6. Богомолов В.В., Кошаев Д.А. Алгоритм позиционирования подводного аппарата по измерениям дальности до маяков при их недостаточном для одномоментного навигационного решения количестве // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. Санкт-Петербург, 2022. С. 66–69.

Koshaev, D.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg) and **Bogomolov, V.V.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, St. Petersburg)
Long Baseline Underwater Positioning with Fusion of Saved and Current Measurements and Ambiguity Resolution. Part II. Performance evaluation, *Гироскопия и Навигация*, 2025, vol. 33, no. 2 (129), pp. 91–102.

Abstract. The article presents the results of testing the algorithm, considered in the first part, for determining the position of an autonomous underwater vehicle (AUV) based on measurements of ranges to acoustic beacons and on the data from a water-speed log and a heading

indicator. Distinctive features of the algorithm are the start without using AUV a priori coordinates and without the set of measurements required for an unambiguous navigation solution, recursive processing, in the same filter, of current measurements and those saved before the algorithm starts, and accounting for the ambiguity of the AUV position and its resolution. The performance of the proposed algorithm is compared with other possible solutions. The results of simulation and field data post-processing have been obtained, which make it possible to estimate the time to get the first unambiguous solution and the accuracy of unambiguous solutions using the developed algorithm with a different number and location of acoustic beacons and the AUV trajectory. The cases are considered when the desynchronization of the beacon and AUV clocks is a random variable and when the desynchronization is unknown; consequently, either range measurements or range-difference measurements are used. The solutions are compared taking into account the measurements saved before the algorithm start and without taking them into account.

Key words: autonomous underwater vehicle, long baseline method, range and range difference measurements, dead reckoning, Kalman filter, ambiguity, a posteriori probability, simulation, field data post-processing.

Материал поступил 17.12.2024