УДК 629.197

Д. А. КОШАЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КУРСА ПО ФАЗОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ВИДИМОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ НА НЕПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

Предлагается алгоритм определения курса с использованием двухантенной аппаратуры спутниковой навигации, в котором неоднозначность фазовых измерений разрешается сразу для всех полученных разномоментных измерений. В отличие от традиционных алгоритмов здесь для решения не требуется одновременное наблюдение четырех и более спутников. Представлены полученные с применением одночастотных приемников результаты испытаний при различных секторах видимости. Даны рекомендации по расположению антенного блока.

Введение

Определение курса объекта с помощью фазовых измерений от разнесенных антенн давно не является чем-то новым в сфере применения глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). На сегодняшний день отечественные и зарубежные фирмы серийно выпускают 2-, 3- и 4-антенную аппаратуру ГНСС, обеспечивающую определение курса или всех углов ориентации объекта [1–10]. Среди продуктов ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» также имеется двухантенная спутниково-инерциальная система «Вега» и ее облегченная (с точки зрения точностных характеристик гироскопов) экспериментальная версия «ИСОН-1», которые прошли серию автомобильных и корабельных испытаний [11]. В то же время имеется немало публикаций, в которых излагаются математические основы различных вариантов определения курса или всех углов ориентации по фазовым измерениям ГНСС [12-20]. При этом везде или почти везде задача решается по полному или избыточному созвездию космических аппаратов (КА) ГНСС, т.е. по 4 и более КА, относящимся к одной ГНСС.

Между тем для некоторых приложений представляет интерес определение курса в сильно стесненных с точки зрения наблюдаемости КА условиях. Такие условия складываются, например, на буровых установках и платформах, где верхняя полусфера в значительной степени перекрывается вышками, антеннами и другими строениями и оборудованием. В ходе проведения буровых работ знание курса требуется для выставки скважинного прибора гироинклинометра. При этом антенный блок следует размещать ближе к скважине, где, как правило, и имеет место проблема с ограниченной видимостью КА. Задача определения курса по малочисленной группировке КА оказывается актуальной и при проведении автомобильных испытаний навигационной аппаратуры в городских условиях, когда еще перед поездкой, которая обычно начинается в стесненном пространстве, нужен достаточно точный курс для эталонирования испытуемого изделия.

Кошаев Дмитрий Анатольевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

В настоящей работе предлагается алгоритм определения курса в подобных условиях. Его отличительной особенностью является исключение неоднозначности фазовых измерений на заключительном этапе для всех полученных от начала решения измерений. Наряду с этим новым свойством в алгоритме используются уже внедренные и апробированные в изделии «Вега» и экспериментальном образце «ИСОН-1» способы сокращения вычислительных затрат при обработке фазовых измерений.

Используемые типовые приемы обработки фазовых измерений

Предварительно поясним некоторые устоявшиеся приемы обработки фазовых измерений, применяемые в рассматриваемом алгоритме оценки курса.

Алгоритм рассчитан на применение двух приемников спутниковой навигации, каждый из которых имеет свой генератор опорного сигнала. В связи с этим согласно общепринятой практике в решении непосредственно участвуют вторые разности фазовых измерений дальностей от КА до антенн приемников [12]. Под первыми разностями понимаются разности измерений от одних и тех же КА для двух приемников, а под вторыми – разности между первыми разностями, относящимися к одному моменту времени, но к разным КА. В алгоритме применяется распространенное правило формирования вторых разностей, когда выбирается основной КА, первые разности измерений для которого вычитаются из первых разностей измерений для остальных – вспомогательных КА. Во вторых разностях измерений исключаются ошибки шкал времени двух приемников, ошибки шкал времени КА, эфемеридные, ионосферные и тропосферные погрешности. Вторые разности фазовых измерений, как и сами фазовые измерения дальностей, формируются с точностью до целого числа длин волн (около 19 см для частоты L1), т.е. обладают неоднозначностью, которая должна быть устранена перед определением курса.

Поскольку в задаче предполагается использование двух приемников, в общем случае возникает необходимость синхронизировать их измерения. Синхронизация требуется из-за расхождения шкал времени, формируемых генераторами двух приемников. Влияние расхождения шкал исключается путем ввода в первые разности измерений поправок - произведений радиальных скоростей для соответствующих КА и расхождения шкал двух приемников, которое можно приближенно оценить по первым разностям псевдодальностей. В случае если приемники работают в режиме подстройки шкалы времени и при этом обеспечивается малость ошибок оценок смещений шкал относительно системного времени, введение поправок в первые разности измерений не требуется.

Антенны приемников располагаются на едином кронштейне, образуя антенный блок. В алгоритме оценки курса в той части, где выполняется исключение неоднозначности фазовых измерений, используется значение длины антенной базы L − расстояния между фазовыми центрами антенн. Это значение определяется с помощью процедуры калибровки, проводимой в течение длительного времени в благоприятных с точки зрения наблюдаемости КА условиях. После калибровки обеспечивается неизменное положение антенн на кронштейне. Значение L не является абсолютно точным из-за ограниченной длительности процедуры калибровки и вариаций фазовых центров антенн. Это обстоятельство учитывается при исключении неоднозначности посредством оценки среднеквадратической погрешности (СКП) калибровки L, которая обычно составляет единицы миллиметров.

Структура и особенности алгоритма оценки курса в условиях ограниченной видимости КА

Как уже отмечалось, особенностью разработанного алгоритма является получение курсового решения после исключения неоднозначности сразу для всей совокупности фазовых измерений, полученных от начала решения, без необходимости одновременного наблюдения полного или избыточного числа КА. Снятие этого требования существенно расширяет возможности получения курсового решения при наблюдаемости КА лишь в некоторой части верхней полусферы. На рис. 1 представлена блок-схема разработанного алгоритма, предполагающего, что ориентация антенной базы в ходе решения не меняется.

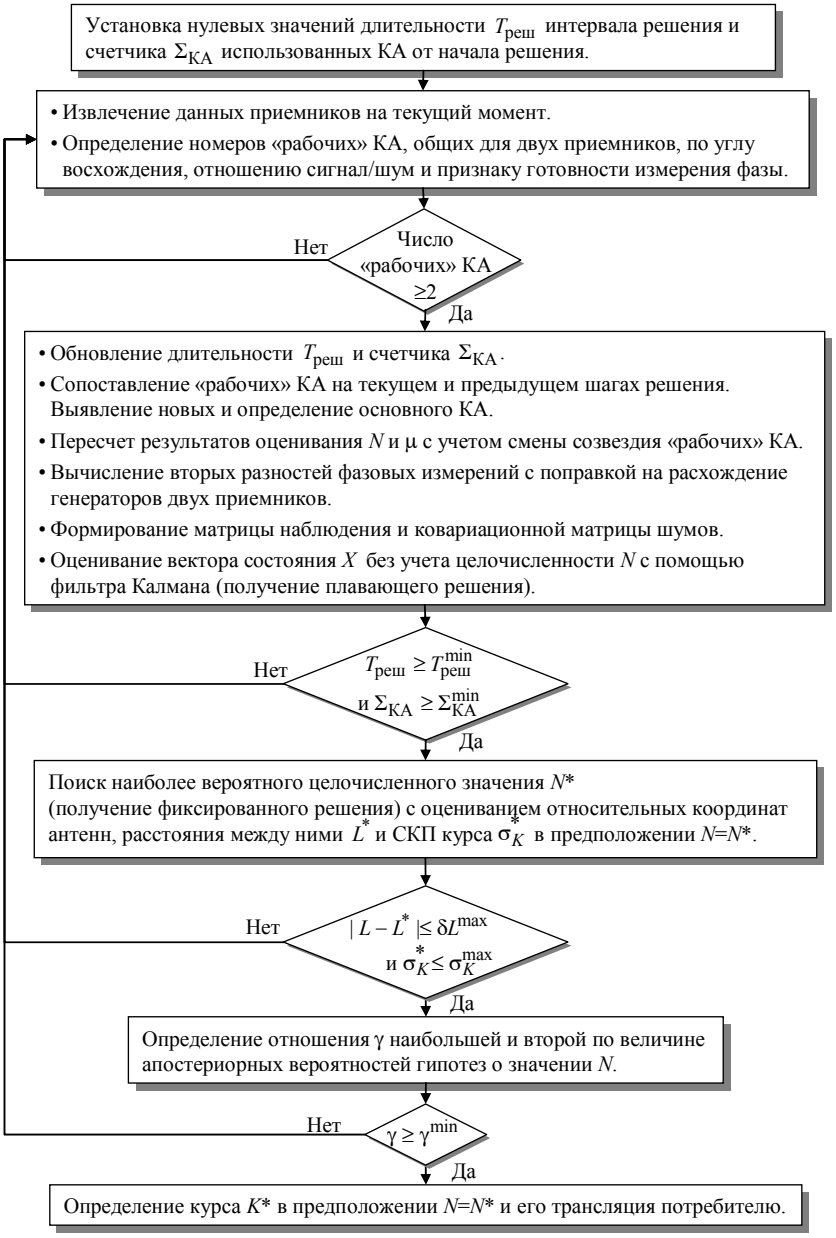

Рис. 1. Блок-схема оценки курса по фазовым измерениям ГНСС,
где $T_{реш}^{min}$, $\Sigma_{КА}^{min}$, δL^{max}, σ_K^{max}, γ^{min} - заранее заданные пороговые значения

Обращаем внимание, что в алгоритме предусматривается проверка ряда условий. Условие «Число «рабочих» КА ≥2», очевидно, должно выполняться, чтобы образовать хотя бы одну вторую разность измерений. Условие для расчетного значения СКП курса σ_K^* призвано обеспечить заданную потребителем предельную погрешность определения курса $3\,\sigma_K^{\max}$.

Условия для длительности решения $T_{\text{реш}}$, числа $\Sigma_{\text{КА}}$ используемых от начала решения КА, оценки L^* длины антенной базы и отношения γ наибольшей и второй по величине апостериорных вероятностей гипотез о периодах фазовых измерений подбираются с таким расчетом, чтобы предоставлять курсовое решение только при достоверном исключении неоднозначности фазовых измерений. Недостаточная достоверность может привести к фатальным для пользователя последствиям, когда расчетное значение СКП σ_K^* будет удовлетворять условию $\sigma_K^* \le \sigma_K^{\max}$, а реальная погрешность определения курса значительно превышать уровень $3\sigma_K^{\max}$. При невыполнении какого-либо условия производится обработка новых измерений. Отметим, что условие на $T_{\text{реш}}$ может определяться и исходя из готовности пользователя затратить определенное время на получение решения. Оно не теряет смысл даже в благоприятных для наблюдения за КА ситуациях, когда временные ресурсы позволяют достичь более высокой по отношению к заданному значению $\sigma_K^{\max}$ точности курсоуказания.

В алгоритме используется удобный с вычислительной точки зрения двухэтапный подход к исключению неоднозначности фазовых измерений [16, 17, 19, 21]. Сначала формируется так называемое плавающее решение – результат оценивания, где периоды вторых разностей фазовых измерений предполагаются вещественными величинами. Далее производится поиск наиболее вероятной целочисленной комбинации периодов – так называемое фиксированное решение, на основе которого вычисляется значение курса. Рассмотрим подробнее некоторые аспекты предложенного решения.

Для получения плавающего решения на каждом шаге с помощью фильтра Калмана оценивается вектор состояния $X = \left(S^{\mathrm{T}}, N^{\mathrm{T}}, \mu^{\mathrm{T}}\right)^{\mathrm{T}}$. На вход фильтра поступает вектор вторых разностей фазовых одномоментных измерений, представляемый в виде

$$Y = H\,S + \Lambda\,N + \mu + v. \qquad (1)$$

Здесь S – постоянный трехмерный вектор относительных координат фазовых центров двух антенн в прямоугольной геоцентрической системе координат, H – матрица, образованная из разностей направляющих косинусов вспомогательных и основного КА на текущий момент; N – вектор целого числа периодов для вторых разностей фазовых измерений, использованных от начала решения; Λ – матрица, выделяющая из вектора N компоненты, относящиеся к текущим вторым разностям фазовых измерений, и предусматривающая их умножение на соответствующую длину волны для перевода в линейную меру; μ, v – векторы коррелированных во времени и белошумных составляющих помех для вторых разностей фазовых измерений на текущий момент.

Направляющие косинусы КА могут поступать непосредственно от приемника в специальных сообщениях. Если используемая модель приемника не предусматривает выдачу направляющих косинусов, их можно рассчитать, пользуясь эфемеридами КА и приближенными координатами потребителя.

Отметим, что необходимость учета коррелированных помех μ в (1) обусловлена протяженным временем фильтрации измерений в рассматриваемой задаче (1 ч и более). По сравнению со случаем, где решение может быть получено без длительного накопления и обработки измерений (в алгоритмах реального времени) в рассматриваемой задаче нужно полагаться на достаточно адекватное описание изменчивости помех. Анализ длительных реализаций вторых разностей фазовых измерений показал, что коррелированные помехи могут быть описаны в виде марковских процессов 1-го порядка.

Фильтр Калмана вырабатывает оценку $\widehat{X}$ и ковариационную матрицу P_X ее погрешности без учета целочисленного характера компонент вектора N – это, собственно, и есть плавающее решение. Значения $\widehat{X}$ и P_X используются для поиска наиболее вероятного (имеющего максимальную апостериорную вероятность) значения N*, т.е. для получения фиксированного решения. Можно показать, что искомое значение определяется выражением

$$N^* = \arg\max_{N \in \mathbb{Z}} g(N), \tag{2}$$

где $\mathbb{Z}$ – целочисленное множество соответствующей размерности; $g(N) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left[(L - |\overset{\vee}{S}(N)|)^2 \Big/ \overset{\vee}{\sigma}_L^2(N) + (N-\widehat{N})^{\mathrm{T}} P_N^{-1} (N-\widehat{N}) \right] \right) \Big/ \overset{\vee}{\sigma}_L(N)$ – величина, пропорциональная апостериорной вероятности значения N; $\overset{\vee}{S}(N) = \hat{S} + P_{SN} P_N^{-1} (N - \widehat{N})$ – оценка вектора S относительных координат антенн; $\overset{\vee}{\sigma}_L^2(N) = \overset{\vee}{S}(N)^{\mathrm{T}} \overset{\vee}{P}_S \overset{\vee}{S}(N) \Big/ |\overset{\vee}{S}(N)|^2$ – дисперсия погрешности оценки расстояния между антеннами; $\overset{\vee}{P}_S = P_S - P_{SN} P_N^{-1} P_{SN}^{\mathrm{T}}$ – ковариационная матрица погрешности оценки вектора S, предполагающие, что значение N является истинным.

В приведенных выражениях $\hat{S}$, $\widehat{N}$ и P_S, P_{SN}, P_N – оценки векторов S, N и соответствующие блоки ковариационной матрицы погрешностей, которые извлекаются из полученных на этапе плавающего решения $\widehat{X}$ и P_X. Отметим, что возможность оценивания трехмерного вектора S при известном N обеспечивается выполнением условия на число используемых КА $\Sigma_{\mathrm{KA}} \geq \Sigma_{\mathrm{KA}}^{\min}$, проверка которого предваряет (см. рис. 1) этап поиска N*. Пороговое значение $\Sigma_{\mathrm{KA}}^{\min}$ устанавливается не ниже 5, что гарантирует наблюдаемость S. При использовании 4 КА возможны ситуации с высоким значением геометрического фактора PDOP, когда их расположение не обеспечивает достаточную наблюдаемость S.

Перед выполнением собственно поиска N* применяется широко практикуемая при исключении неоднозначности фазовых измерений процедура LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) [16, 17, 22]. В данной процедуре результаты плавающего решения пересчитываются в $\widehat{\tilde{N}} = Z^{\mathrm{T}} \widehat{N}$, $\tilde{P}_N = Z^{\mathrm{T}} P_N Z$, где матрица Z такая, что вектор $\tilde{N} = Z^{\mathrm{T}} N$ остается целочисленным, но при этом $\tilde{P}_N$ оказывается близка к диагональной. Это существенно ускоряет поиск наиболее вероятного значения $\tilde{N}^*$ согласно соотношению типа (2). Наиболее вероятное значение исходного вектора N определяется в результате обратного преобразования $N^* = Z^{-\mathrm{T}} \tilde{N}^*$.

Несмотря на положительный эффект от преобразования $\widehat{N}$ и P_N с помощью процедуры LAMBDA, нахождение N^* при высокой размерности N представляет собой нетривиальную задачу, для решения которой используется экономичный в вычислительном смысле метод [19], внедренный в программное обеспечение изделия «Вега» и экспериментального образца «ИСОН-1», где он показал свою эффективность в ходе натурных испытаний [11]. В нем применяется рациональная сортировка перебираемых значений целого числа периодов фазовых измерений, которая реализуется с помощью легко выполнимых операций с целыми числами. Метод предусматривает последовательное сужение области поиска наиболее вероятного значения фазовых периодов в процессе выполнения перебора.

После определения значения N^* получаем используемые для контроля его достоверности величины

$$L^* = |\overset{\vee}{S}(N^*)|, \quad \sigma_K^* = \sqrt{(S_N^*)^2\,\overset{\vee}{\sigma}^2_{S_E} - 2S_E^*S_N^*\,\overset{\vee}{\rho}_{S_ES_N} + (S_E^*)^2\,\overset{\vee}{\sigma}^2_{S_N}} \Big/ \left[(S_E^*)^2 + (S_N^*)^2\right], \quad (3)$$

где S_E^*, S_N^* – оценки восточной и северной относительных координат антенн в предположении $N{=}N^*$; $\overset{\vee}{\sigma}^2_{S_E}$, $\overset{\vee}{\sigma}^2_{S_N}$, $\overset{\vee}{\rho}_{S_ES_N}$ – дисперсии и взаимная ковариация погрешностей оценивания горизонтальных относительных координат антенн в случае, когда значение N известно. При этом S_E^*, S_N^*, $\overset{\vee}{\sigma}^2_{S_E}$, $\overset{\vee}{\sigma}^2_{S_N}$, $\overset{\vee}{\rho}_{S_ES_N}$ определяются путем линейного преобразования $\overset{\vee}{S}(N^*)$ и $\overset{\vee}{P}_S$ с помощью приближенных (полученных приемником спутниковой навигации) значений широты и долготы.

Если проверка вычисленных согласно (3) величин L^*, σ_K^* прошла успешно, выполняется поиск второго наиболее вероятного значения вектора N

$$N^{**} = \arg \max_{N\in\mathbb{Z},\, N\neq N^*} g(N)\cdot \quad (4)$$

При нахождении (4) используются промежуточные результаты, полученные на этапе определения (2), которые позволяют ограничить область поиска.

После отыскания N^{**} вычисляется отношение $\gamma = g(N^*)/g(N^{**})$ двух наибольших апостериорных вероятностей гипотез о значении N. На основании этого отношения, как видно из рис. 1, принимается окончательное решение о достоверности значения N^*. В итоге после успешной проверки всех условий пользователь получает курсовое решение K^*, которое определяется, исходя из соотношений

$$\sin K^* \propto S_E^*, \qquad \cos K^* \propto S_N^*.$$

Ценой, которую приходится платить за получение единого решения для всей совокупности разномоментных измерений, является сравнительно большое количество подлежащих определению значений периодов фазовых измерений. Их количество зависит не только от числа используемых КА, но и от разрывности реализаций измерений. После разрыва, как и при появлении в «рабочем» созвездии нового КА, в фазовых измерениях появляется неоднозначное целое число периодов, которое должно быть оценено. Обычной в рассматриваемой задаче является ситуация, когда приходится оценивать несколько десятков значений фазовых периодов.

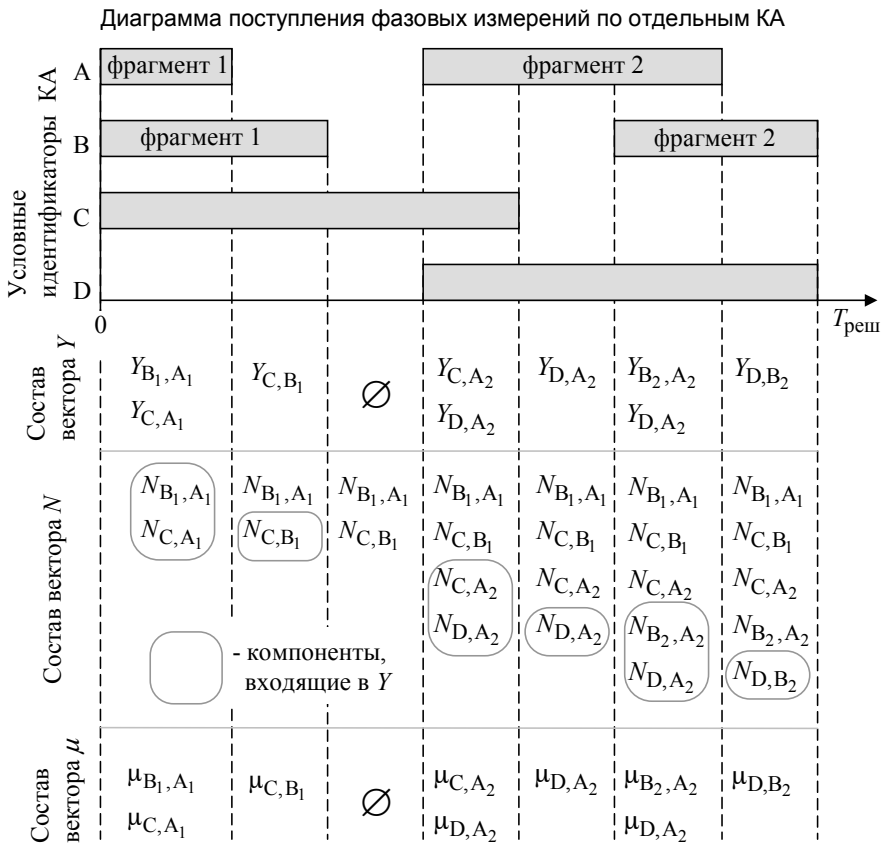

Рис. 2. Изменение состава вектора вторых разностей фазовых измерений Y, вектора целого числа периодов N и вектора коррелированных помех μ в зависимости от диаграммы поступления измерений. Нижние индексы указывают на вспомогательный и основной КА, используемые при образовании соответствующей второй разности, а также на номер фрагмента измерений.

Из рис. 2 видна взаимосвязь векторов Y, N и μ с диаграммой поступления измерений. При прекращении/перерыве в поступлении измерений, очевидно, сокращается размерность вектора измерений и входящих в вектор состояния коррелированных помех. Размерность же вектора N не меняется. Причем, если пропадают измерения от основного КА, его роль переходит к КА, который был вспомогательным на предыдущем шаге решения. При этом состав вектора N претерпевает изменение (см. 2-й и 7-й столбцы схемы на рис. 2). В случае пропадания измерения от вспомогательного КА ни размерность, ни состав вектора N не меняются (3-й и 5-й столбцы). С появлением/возобновлением поступления измерений от какого-либо КА он, если речь не идет об отсутствии на предыдущем шаге измерений от двух КА, используется в качестве вспомогательного, и это сопровождается увеличением размерности векторов Y, N и μ (6-й столбец). В результате размерность вектора N в ходе решения задачи постоянно увеличивается.

При смене созвездия «рабочих» КА в алгоритме предусмотрен пересчет полученных фильтром Калмана результатов оценивания векторов N и μ (в 3-м сверху прямоугольном блоке на рис. 1), который позволяет в полной мере учесть взаимосвязь компонент, входящих в текущие и предыдущие измерения.

Испытания с искусственным ограничением видимости КА

Ниже приводятся и обсуждаются результаты апробации разработанного алгоритма по 2-герцовым реализациям фазовых измерений GPS и прочим вспомогательным данным, которые записывались с помощью аппаратуры ИСОН-1 [11], содержащей две платы приемника спутниковой навигации МПВ 1К-161-42, серийно изготавливаемые ОАО «РИРВ» [23]. Антенны приемников неподвижно устанавливались на едином кронштейне, образуя базу 1,5 м. Реализация алгоритма определения курса осуществлялась на ПК в камеральном режиме. Необходимые данные записывались на крыше корпуса ЦНИИ «Электроприбор» при отсутствии естественных препятствий для прохождения сигналов КА. Проверка алгоритма выполнялась при двух вариантах ориентации антенной базы: в направлении север–юг (азимут около 180°) и восток–запад (азимут около 90°). Тестовые реализации измерений для обоих вариантов ориентации начинались в одно и то же время суток, поэтому они практически совпадают с точки зрения диаграммы наблюдаемых КА GPS, периодичность обращения которых составляет около 12 ч. Для обоих вариантов ориентации базы искусственно вносились различные ограничения или так называемые «маски» на видимые КА. Во всех масках задавался минимальный угол восхождения используемых КА, равный 10град, – типовое ограничение, при котором снижается риск приема переотраженных сигналов. В дополнение к этому накладывались различные ограничения на сектор видимости КА, т.е. ограничения на азимуты используемых КА. Угол, ограничивающий сектор видимости, принимал значения 360° (открытая полусфера), 180°, 120° и 90°. Для каждого из этих секторов рассматривались случаи, когда антенная база проходит по биссектрисе сектора (два диаметрально противоположных случая) и когда она перпендикулярна биссектрисе (еще два случая). Во всех случаях было получено 24 тестовых курсовых решения, которые начинались с часовым смещением относительно друг друга. Для всех тестов решение выполнялось с одними и теми же настройками, т.е. алгоритм не подстраивался специально под конкретную ситуацию. При этом использовались следующие пороги $T_{\text{реш}}^{\min}$=1 ч, $\Sigma_{\text{КА}}^{\min}$=5, $\delta L^{\max}$=0,02 м, $\sigma_K^{\max}$=0,2°, $\gamma^{\min}$=300.

На момент получения курсового решения K^* фиксировалась его погрешность, а также длительность решения $T_{\text{реш}}^*$ и рассчитанная в алгоритме СКП σ_K^*. Графики этих величин представляются ниже. В определенных случаях графики $T_{\text{реш}}^*$ и σ_K^* не приводятся, когда они приближенно или точно равны пороговым значениям $T_{\text{реш}}^{\min}$ и $\sigma_K^{\max}$. Погрешности тестовых решений определялись относительно эталонных значений курса, которые для обоих вариантов ориентации антенной базы вычислялись путем обработки протяженных (около 4 суток), реализаций измерений от всех КА с углом восхождения не менее 10°.

По результатам тестовых решений сделаны следующие выводы и рекомендации.

А. Открытая полусфера

При наблюдении в течение 1 ч всех КА с углом восхождения не менее 10° предельная погрешность определения курса в зависимости от ориентации антенной базы составляет 0,1-0,14° (рис. 3). Меньше – при ориентации вдоль оси север–юг, больше – вдоль оси восток–запад.

В данной ситуации выработка всех решений сдерживалась условием $T^*_{\text{реш}} \geq T^{\min}_{\text{реш}}$. Остальные условия начинали выполняться раньше. По этой причине длительность каждого решения $T^*_{\text{реш}}$ равнялась $T^{\min}_{\text{реш}}$=1 ч, а расчетная СКП определения курса σ^*_K оказывалась меньше $\sigma^{\max}_K$=0,2°. При этом важно отметить, что полученные значения σ^*_K вполне отражает реальную точность определения курса – погрешность находится в пределах $\pm 3\sigma^*_K$.

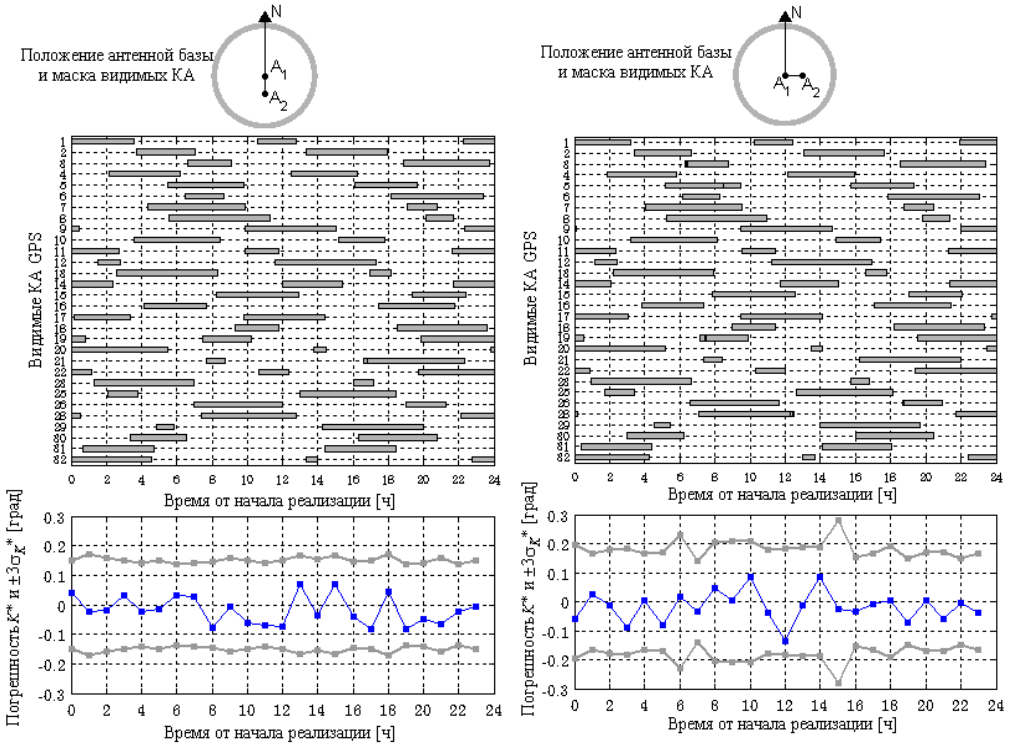

Рис. 3. Условия и результаты курсовых решений при открытой полусфере с азимутом антенной базы 180° (слева) и 90° (справа). Для всех решений $T^*_{\text{реш}} = T^{\min}_{\text{реш}}$=1 ч

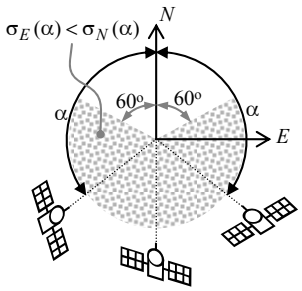

Рис. 4. Методический пример расположения КА относительно потребителя

Обоснуем влияние расположения антенной базы на точность определения курса с помощью простого методического примера. Рассмотрим двумерную задачу определения координат по вторым разностям фазовых измерений от трех КА, один из которых расположен к югу от потребителя, а два других находятся к востоку и к западу и имеют азимуты α и 360°-α (рис. 4). Будем иметь в виду использование однократных измерений с исключенной фазовой неоднозначностью. Проанализируем точность оценивания координат по этим измерениям.

Используя южный КА в качестве опорного, запишем матрицу наблюдения для вторых разностей измерений $H(\alpha) = \begin{pmatrix} \sin\alpha & 1+\cos\alpha \\ -\sin\alpha & 1+\cos\alpha \end{pmatrix}$. Отметим, что выбор опорного КА не имеет значения для точности определения координат и делается только для определенности.

Ковариационная матрица шумов вторых разностей измерений представляет собой $R = \rho\left(\begin{array}{c|c} 2 & 1 \\ \hline 1 & 2 \end{array}\right)$, где ρ - дисперсия шумов первых разностей фазовых измерений. В соответствии с методом наименьших квадратов ковариационная матрица погрешностей определения восточной и северной координаты в зависимости от положения вспомогательных (западного и восточного) КА определяются как

$$P(\alpha) = \left(H(\alpha)^{\mathrm{T}} R^{-1} H(\alpha)\right)^{-1} = \frac{\rho}{2}\left(\begin{array}{c|c} 1/\sin^2\alpha & 0 \\ \hline 0 & 3/(1+\cos\alpha)^2 \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} \sigma_E^2(\alpha) & 0 \\ \hline 0 & \sigma_N^2(\alpha) \end{array}\right).$$

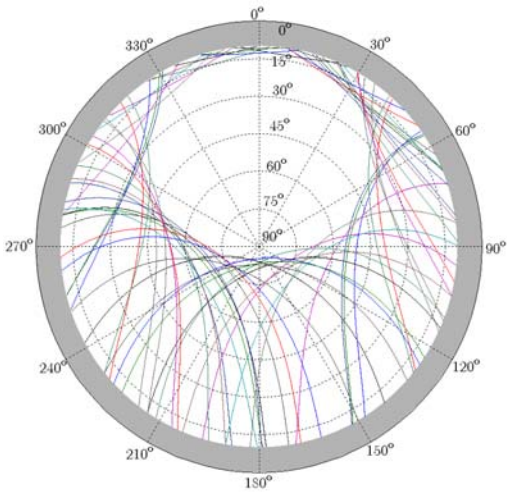

Рис. 5. Траектории видимых в С.-Петербурге КА GPS на 24 ч интервале с ограничением угла восхождения в 10°

Анализ данного выражения показывает, что при условии $60^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$ справедливо неравенство $\sigma_E(\alpha) < \sigma_N(\alpha)$. С учетом диагонального характера $P(\alpha)$ оно означает, что направлением, координата вдоль которого определяется с минимальной СКП, является ось восток–запад.

Возвращаясь к задаче определения курса, нетрудно понять, что при $60^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$ наиболее высокая точность определения курса обеспечивается при размещении антенной базы вдоль оси север–юг, так как именно в этом случае погрешность курса определяется величиной $\sigma_E(\alpha)$.

Обратимся к рис. 5, где показаны реальные траектории КА GPS, наблюдаемых в С.-Петербурге в течение суток. Из рисунка видно, что расположение КА близко к симметричному относительно оси север–юг. При этом северная часть небесной полусферы заполнена сравнительно слабо. Такая конфигурация траекторий видимых КА с учетом вывода, сделанного для рассмотренного выше методического примера (при $60^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$), объясняет, почему при испытаниях была получена более высокая точность определения курса для антенной базы, расположенной вдоль оси север–юг, и позволяет рекомендовать это положение как наилучшее в условиях открытой небесной полусферы.

Расчеты положения КА относительно других точек, проведенные по данным альманаха, говорят об актуальности высказанной рекомендации на широтах 40-70°.

В отличие от ситуации с открытой полусферой в рассматриваемых далее вариантах с ограниченной видимостью КА выработку курсового решения чаще всего сдерживает невыполнение условия $\sigma_K^* \le \sigma_K^{\max}$. В результате на момент получения курсового решения величина σ_K^* будет всегда равна или чуть меньше $\sigma_K^{\max}$=0,2°. Поэтому наибольший интерес здесь вызывает не столько погрешность решения (она должна соответствовать $\sigma_K^{\max}$=0,2°), сколько его длительность $T_{\text{реш}}^* \ge T_{\text{реш}}^{\min}$=1 ч.

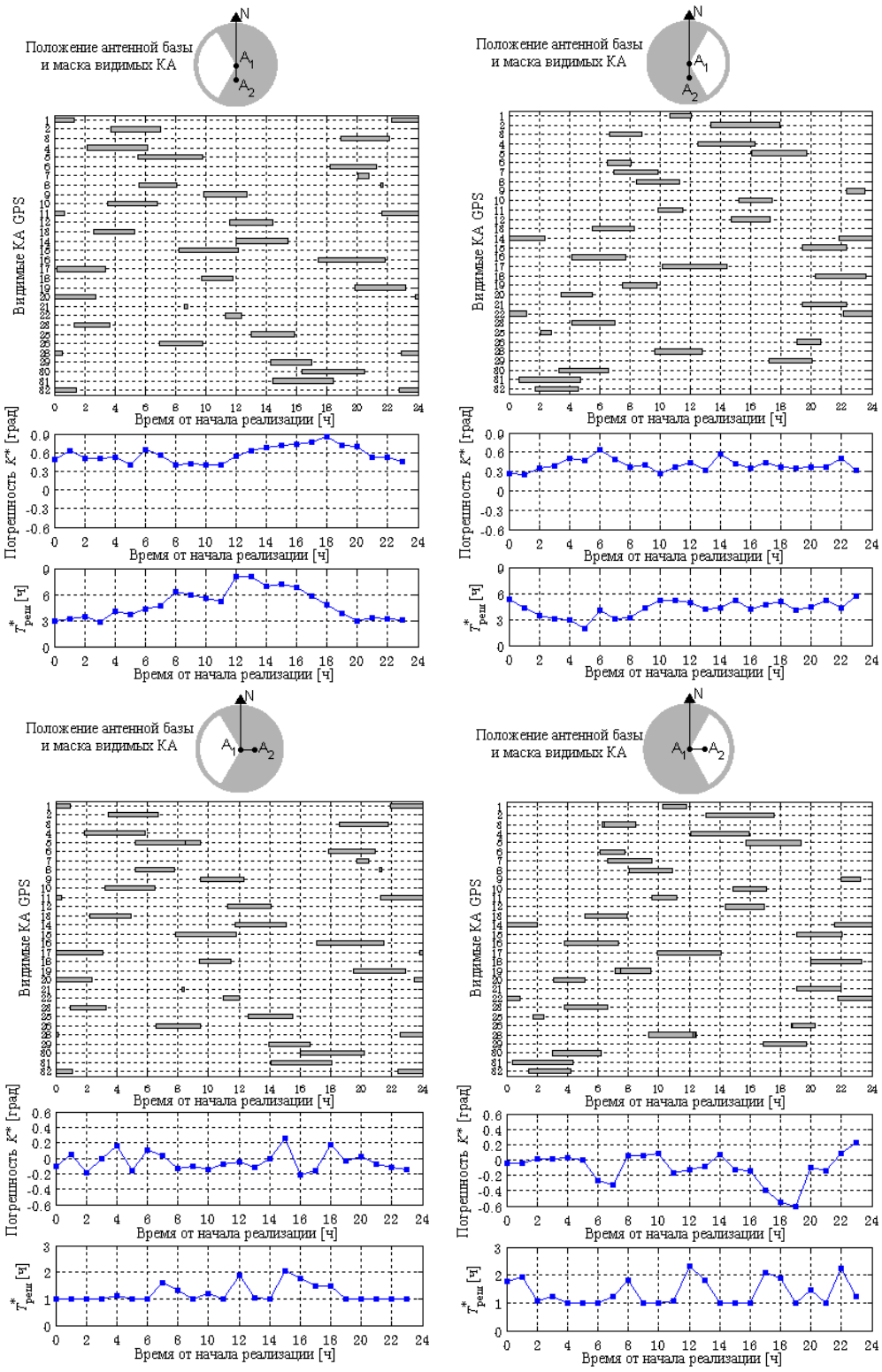

Рис. 6. Условия и результаты курсовых решений со 120° сектором видимых КА и антенной базой, расположенной в азимуте 90° по биссектрисе сектора (сверху) и в азимуте 180° перпендикулярно биссектрисе сектора (снизу). Для всех решений $\sigma_K^* \approx \sigma_K^{\max} = 0{,}2°$

Б. Расположение антенной базы относительно сектора видимости

При ограниченном секторе видимости КА антенную базу следует размещать примерно по биссектрисе угла, ограничивающего сектор видимости. Целесообразность соблюдения этой рекомендации подтверждается сопоставлением представленных на рис. 6 результатов для антенной базы, расположенной по биссектрисе секторов видимости КА (верхние графики), с результатами для антенной базы, расположенной перпендикулярно биссектрисе тех же секторов видимости (нижние графики). Нетрудно заметить, что для выработки решения в последней ситуации требуется в 2-4 раза больше времени. При этом наблюдается некоторое несоответствие действительной погрешности расчетному значению СКП.

Данную рекомендацию можно обосновать с помощью представленного выше методического примера, в котором дополнительно вводится в рассмотрение ограниченный сектор видимости, направленный вниз. При этом направление на юг следует понимать как биссектрису сектора видимости. Очевидно, что установленное для данного примера неравенство $\sigma_E(\alpha) < \sigma_N(\alpha)$ говорит о более высокой точности определения координаты в поперечном к биссектрисе направлении и, значит, ориентация антенной базы вдоль биссектрисы наиболее предпочтительна с точки зрения точности определения курса. Ясно, что такое положение антенной базы будет наиболее выгодным и при обработке разномоментных измерений с точки зрения времени достижения требуемой точности, т.е. времени до выполнения условия $\sigma_K^* \le \sigma_K^{\max}$.

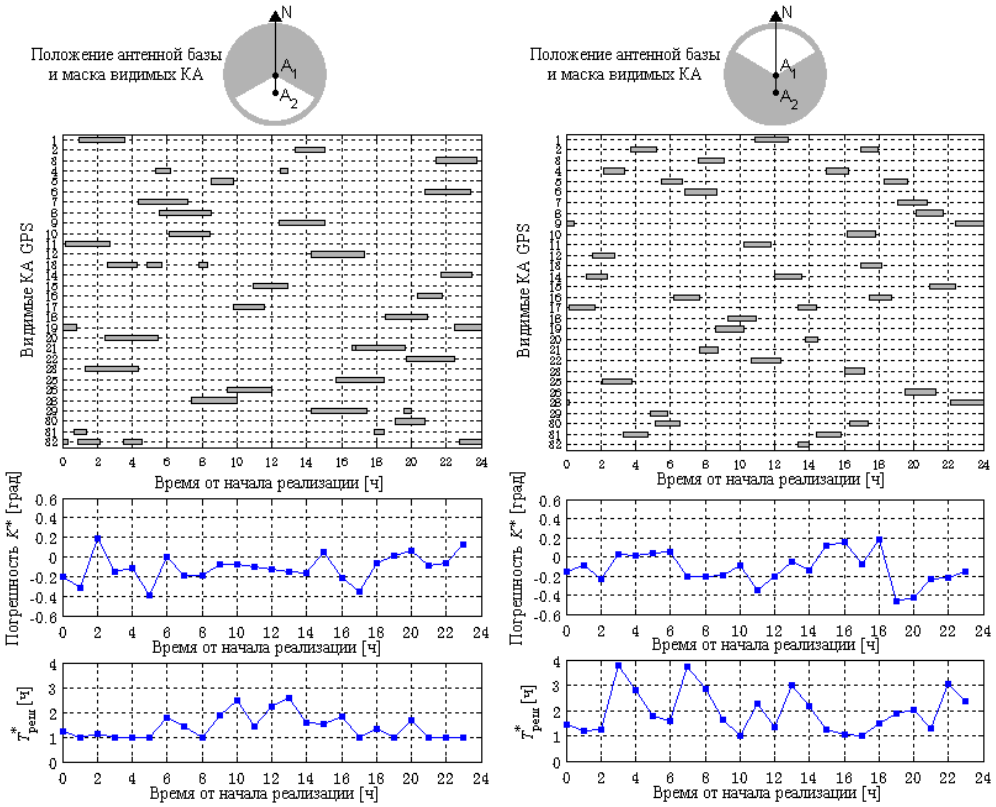

Рис. 7. Условия и результаты курсовых решений со 120° сектором видимых КА и антенной базой, расположенной в азимуте 180° по биссектрисе сектора. Для всех решений $\sigma_K^* \approx \sigma_K^{\max}$ =0,2°

В. Выбор сектора видимости

Следует избегать размещения антенн к северу от препятствий, блокирующих прохождение сигналов от КА. Целесообразность выполнения этой рекомендации для широты 60° вполне очевидна из рис. 5, где ясно видна ущербность северной части полусферы с точки зрения количества видимых КА и их концентрации в области низких углов восхождения, где измерения КА имеют повышенный уровень помех. Актуальность рекомендации находит подтверждение при сравнении результатов, представленных справа на рис. 7, где использовались КА из северной части полусферы, с результатами, показанными слева на этом же рисунке, где видимые КА ограничивались сектором той же ширины, но уже с южной стороны. Широты, где данная рекомендация имеет значение, можно оценить диапазоном 40-70°.

Г. Результаты для разных секторов видимости КА

Если в ситуациях с ограниченным сектором видимости КА соблюдаются рекомендации, указанные в подразделах *Б* и *В*, то возможности курсового решения с помощью разработанного алгоритма при растворе сектора 180°, 120° и 90° характеризуются представленной ниже таблицей, при этом погрешности K^* находятся в пределах ±0,6°, т.е. $\pm 3\sigma_K^{\max}$.

Сектор видимости КА		$T^*_{\text{реш}}$, ч	
Направление	Раствор, °	Средняя	Максимальная
На запад или восток	180	1,1	1,7
	120	1,5	2,5
	90	2	5
На юг	180	1	1
	120	1,5	2,5
	90	2	4

В настоящее время готовится к публикации статья, в которой, в частности, будут представлены результаты натурных испытаний предложенного здесь алгоритма определения курса на мобильной буровой установке. На основании этих результатов показана возможность получения курса с погрешностью до 0,2° при часовом интервале решения и размещении антенного блока непосредственно на платформе установки к югу от буровой вышки или на удалении от установки на расстояние, сопоставимое с высотой вышки. В то же время выявлены проблемы с обеспечением точности курсоуказания при установке антенного блока без соблюдения указанных выше рекомендаций и в условиях, способствующих возникновению многочисленных переотражений сигналов КА.

Заключение

Разработанный алгоритм предоставляет возможность определения курса с помощью двухантенной аппаратуры ГНСС в условиях ограниченной наблюдаемости КА. Особенностью алгоритма является разрешение фазовой неоднозначности на заключительном этапе для всех полученных от начала решения и

неотбракованных измерений. Представленный алгоритм предполагает работу с неподвижной антенной базой.

В серии тестовых решений, проведенных с применением реальной одночастотной аппаратуры ГНСС при антенной базе 1,5 м с искусственным ограничением доступности КА, показана возможность обеспечения СКП определения курса в 0,2° при использовании КА в секторах радиовидимости 180°, 120° и 90° за 1-5 ч. При этом выработаны рекомендации ориентировать антенную базу примерно по биссектрисе угла, определяющего сектор видимости, и избегать размещения антенн к северу от препятствий, блокирующих прохождение сигналов от КА.

В ходе испытаний также установлено, что в условиях открытой верхней полусферы курс определяется с погрешностью до 0,1-0,14° при длительности решения 1 ч. Дана рекомендация размещать антенную базу в направлении север−юг для обеспечения наилучшей точности. Проведенные по данным альманаха КА расчеты подтверждают актуальность выработанных рекомендаций на широтах 40-70°.

Результаты исследований позволяют говорить о возможности эффективного применения предложенного алгоритма, например для выставки скважинного прибора гироинклинометра на буровых установках, а также самоподъемных, погружных и стационарных платформах при соблюдении определенных рекомендаций. Не существует препятствий и для использования разработанного алгоритма на полупогружных платформах. В этом случае в алгоритме целесообразно применить квазидетерминированную модель угловых движений платформы, вызванных волнением моря. Параметры такой модели должны быть включены в вектор состояния.

Можно ожидать, что при использовании двухчастотной аппаратуры ГНСС произойдет повышение точности и сокращение времени определения курса благодаря более надежному разрешению фазовой неоднозначности.

Литература

1. http://www.navis.ru
2. http://www.ire.krgtu.ru
3. http://mkb-kompas.ru
4. http://www.oaoniikp.ru
5. http://www.javad.com\jgnss
6. http://www.novatel.com
7. http://www.trimble.com
8. http://www.furuno.com
9. http://www.ashtech-oem.com
10. http://www.hemispheregps.com
11. **Блажнов, Б.А.** Опыт разработки двухантенной спутнико-инерциальной системы / Б.А.Блажнов [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. - № 4. – С.123-124.
12. Global Positioning System: Theory and Applications / Edited by B. W. Parkinson, J. J. Spliker Jr. V. II. 1996.
13. **Lightsey, E.G., Crassidis J.L., Markley F.L.** Fast Integer Ambiguity Resolution for GPS Attitude Determinatuon // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. 1999, Portland, OR. V. 1. P. 115-123.
14. **Бернелли-Заццера, Ф.** Недорогое оборудование для определения ориентации университетского спутника PalaMede по сигналам GPS / Ф.Бернелли-Заццера, М.Молина, М.Ванотти // Гирскопия и навигация.- 2001. - № 4. - С. 73-82.
15. **Li Y., Zhang K., Grenfell R.** Improoved Knight Method Based on Narrowed Search Space for Instaneous GPS Attitude Determination // NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation. 2005. V. 52. No. 2. P. 111-119.

16. **Teunissen P.J.G.** The LAMBDA Method for the GNSS Compass // Artificial Satellites. 2006. V. 41. No. 3. P. 89-103.
17. **Buist P.** The Baseline Constrained LAMBDA Method for Single Epoch, Single Frequency Attitude Determination Applications // Proc. of ION GNSS 20th International Meeting of the Satellite Division, Sept. 25-28, 2007, Fort Worth, TX. P. 2962-2973.
18. **Hirokawa, R., Ebinuma, T.** A Low-Cost Tightly Coupled GPS/INS for Small UAVs Augmented with Multiple GPS Antennas // NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation. -2009. - V. 56. - No. 1. - P. 35-44.
19. **Блажнов, Б.А.** Определение относительной траектории движения и углов ориентации по фазовым спутниковым измерениям и данным микромеханического гироскопа / Б.А.Блажнов, Д.А.Кошаев // Гироскопия и навигация. - 2009. - №4.- С. 15-34.
20. **Алешечкин, А.М.** Алгоритм определения угловой ориентации объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. - 2012. - №2. - С. 13-27.
21. **Дмитриев, С.П.** Многоканальная фильтрация и ее применение для исключения неоднозначности при позиционировании объектов с помощью GPS / С.П.Дмитриев, Д.А.Кошаев, О.А.Степанов // Изв. РАН. Теория и системы управления.- 1997. - №1.- С. 65-70.
22. **De Jong P.J., Tiberius C.C.J.M., Teunissen P.J.G.** Computational Aspects of the LAMBDA Method for GPS Ambiguity Resolution // Proc. of ION GPS-96. Sept. 17-20, 1996, Kansas City, Missouri.
23. http://www.rirt.ru

Abstract. Heading determination algorithm using the two GNSS receivers is proposed, where ambiguity of phase measurements is resolved simultaneously for all the measurements taken at different times. Unlike the traditional algorithms, here the solution does not require simultaneous observation of four or more satellites. Test results obtained with various sectors of visibility using single-frequency receivers are presented. Recommendations on antenna module location and orientation are given.

Key words: GNSS-based attitude determination, ambiguity resolution, restricted radio visibility

Материал поступил 27.02.13