

Чернов И. В., Литинский Е. И., Левадный Ю. В.
I. V. Chernov, E. I. Litinskii, Yu. V. Levadny

**МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО АЗИМУТА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СПУТНИКОВО-ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

**ON-LINE DETERMINATION METHOD OF MINUTE AZIMUTH ANGLE USING
INTEGRATED SATELLITE-GYROSCOPE SYSTEM**

Чернов Иван Владимирович – адъюнкт кафедры высшей геодезии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, г. Санкт-Петербург). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Mr. Ivan V. Chernov – a Post-graduate Student, Higher geodesy Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Литинский Евгений Игоревич – адъюнкт кафедры высшей геодезии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, г. Санкт-Петербург). E-mail: litinskij1990@mail.ru.

Mr. Yevgeny I. Litinskii – a Post-graduate Student, Higher geodesy Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: litinskij1990@mail.ru.

Левадный Юрий Валерьевич – заместитель начальника кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, г. Санкт-Петербург). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Mr. Yurii V. Levadny – Deputy head of phototopography and photogrammetry Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Аннотация. Постоянное совершенствование сложных технических систем требует повышения точности и оперативности определения геодезических данных. В состав этих данных входят как прямоугольные, так и эллипсоидальные координаты, нормальная высота, астрономический азимут направлений, ускорение силы тяжести, высота квазигеоида, составляющие отклонения отвесных линий (в плоскостях меридиана и первого вертикала) элементов технических систем. Наибольшее влияние на способность технических систем решать задачи по предназначению оказывает точность определения азимутов. Для повышения достоверности определения азимутов направлений при ориентировании азимутальные определения должны производиться двумя независимыми методами. Кроме того, технические системы могут располагаться в закрытых (ограниченных) пространствах. Среди существующих методов определения азимута достичь указанной точности позволяет только астрономический метод. Но из-за сильной зависимости астрономического метода от метеорологических условий и трудоёмких наблюдений оперативно определить азимут с требуемой точностью невозможно, как и невозможно получить азимуты направлений с требуемой точностью вторым независимым методом. В работе обосновывается способ повышения оперативности высокоточного определения азимута двумя независимыми методами в закрытых и ограниченных пространствах. Практическая значимость полученных результатов определяется повышением эффективности геодезической подготовки сложных технических систем. Главное преимущество разработанной методики и метода состоит в выполнении требований к точности с надёжным контролем и высокой оперативностью геодезической подготовки.

Summary. Continuous improvement of complex technical systems requires improving the accuracy and efficiency of determining geodesic data. These data include rectangular and ellipsoidal coordinates, normal height, astronomical azimuth of directions, the gravity acceleration, quasigeoid height and the components of the vertical lines deviations in technical systems (in the plane of the meridional and Prime vertical). The greatest impact on the ability of technical systems to solve tasks belongs to the accuracy of the azimuth determination. To improve the reliability of determining the azimuth directions in the azimuthal orientation the determination should be done with two independent methods. In addition, the technical system may be located in enclosed (confined) spaces. Among the existing methods for the determination of the azimuth, only astronomical method allows achieving the specified precision. However, because of the strong dependence of the astronomical method on meteorological conditions and time-consuming observations to determine the azimuth with the required accuracy quickly is impossible, as it is impossible to obtain the azimuths of the directions with the required accuracy with an independent method.

The authors substantiate the way of increasing the efficiency of high-precision azimuth with two independent methods in closed and confined spaces. The practical significance of the obtained results is determined by the efficiency of geodesic preparation of complex technical systems. The main advantage of the developed technique and the method is the requirement of precision with reliable control and high efficiency of geodesic training.

Ключевые слова: интеграция, азимут, повышение точности, автономное ориентирование, высокоточное ориентирование, оперативное ориентирование, относительный метод, космические навигационные системы.

Key words: integration, azimuth, improving the accuracy, autonomous orientation, high precision orientation, on-line orientation, relative method, space navigation systems.

УДК 355 (623.64)

Введение

Интеграция для статического (неподвижного относительно Земли) определения азимута в научной литературе не встречается. Зато эта задача успешно решается в навигационных системах [2, 5]. В целях навигации интегрируются аппаратура потребителей космических навигационных систем (АП КНС) и инерциальные навигационные системы (ИНС). Главным элементом ИНС является гироскоп (лазерный, роторный, оптико-волоконный и т.д.). Существующие способы интеграции АП КНС и ИНС функционируют в условиях изменения положения (движения) и ориентации в пространстве самой интегрированной системы [2, 5]. Конечной целью интеграции в таких условиях является уточнение координат, составляющих скорости и ориентации в пространстве, а также прогноз положения системы относительно геоцентрической системы координат.

Применение существующих способов интеграции ИНС и АП КНС для определения азимутов ограничено обязательным наличием перемещения самой интегрированной системы. Случай статического гироскопического ориентирования исключает передвижение интегрированной системы. Существующие способы интеграции ИНС и АП КНС неприменимы при определении азимутов направлений в целях геодезического обеспечения, т.е. становится актуальной задача разработки метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы.

Теоретические основы метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием спутниковой системы. Идея метода определения азимута с применением АП КНС состоит в решении обратной геодезической задачи по координатам пунктов, полученных относительным методом космической геодезии.

Чтобы вычислить геодезические азимуты, по координатам пункта B, L, H' с измеренными разностями координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ вычисляются координаты B, L других пунктов, закрепляющих определяемые направления. И только теперь из решения обратной геодезической задачи по полученным координатам пунктов вычисляются геодезические азимуты направлений и расстояния (длины геодезических линий на эллипсоиде).

Исходя из того что в локальном районе (10 – 30 км) влияние различных источников ошибок на результаты измерений одинаково для любого приемника, получим

$$\begin{cases} X_M = X'_{Mi} + \partial X_i, \\ Y_M = Y'_{Mi} + \partial Y_i, \\ Z_M = Z'_{Mi} + \partial Z_i; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_M = X'_{Ni} + \partial X_i, \\ Y_M = Y'_{Ni} + \partial Y_i, \\ Z_M = Z'_{Ni} + \partial Z_i; \end{cases} \quad (2)$$

где $\partial X_i, \partial Y_i, \partial Z_i$ – поправки для локального района в момент времени t_i ; $X'_{Mi}, Y'_{Mi}, Z'_{Mi}, X'_{Ni}, Y'_{Ni}, Z'_{Ni}$ – координаты точек M и N , закрепляющих ориентируемое направление, в момент времени t_i , полу-

ченные абсолютным методом; $X_M, Y_M, Z_M, X_N, Y_N, Z_N$ – координаты точек M и N в общеземной системе координат WGS-84 или ПЗ-90. В момент времени t_i будет получен вектор $M'N'$, искажённый ошибками $\partial X_i, \partial Y_i, \partial Z_i$.

Запишем координаты вектора MN и $M'N'$

$$MN \{X_M - X_N, Y_M - Y_N, Z_M - Z_N\}$$

$$M'N' \{X'_M - X'_N, Y'_M - Y'_N, Z'_M - Z'_N\}$$

Тогда, используя (1) и (2), получим координаты $M'N'$

$$M'N' \{(X_M - \partial X_i) - (X_N - \partial X_i), (Y_M - \partial Y_i) - (Y_N - \partial Y_i), (Z_M - \partial Z_i) - (Z_N - \partial Z_i)\},$$

после очевидных преобразований

$$M'N' \{X_M - X_N, Y_M - Y_N, Z_M - Z_N\}$$

Одним из достаточных условий коллинеарности векторов является равенство нулю их векторного произведения. Так как соответствующие координаты векторов $M'N'$ и MN равны, то приведённое выше условие коллинеарности векторов выполняется. Вектор $M'N'$ будет коллинеарен и сонаправлен вектору MN .

Точность определения координат абсолютным методом космической геодезии составляет 15 м, а точность определения приращения координат находится в миллиметровом диапазоне. Следовательно, за промежуток времени $\Delta t = t_0 + t_i$ получим множество сонаправленных векторов, которые будут иметь среднюю квадратическую ошибку (СКО) координат до 15 м.

На рис. 1 mn – проекция ориентируемого направления MN (нормальное сечение) на поверхность относимости, $m'p'$ – линия, параллельная меридиану mp . Пусть поверхность относимости является сферической. Допустим, имеются погрешности ΔB и ΔL геодезических координат для направления MN . Погрешности ΔB и ΔL геодезических координат приведут к тому, что за проекцию направления MN на поверхности относимости вместо mn будет принята $m'n'$.

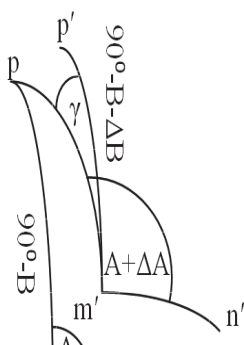


Рис. 1. Смещение проекции ориентируемого направления

Через p на рис. 1 обозначено положение полюса. Геодезический азимут в смещённом положении точки m будет равен $A + \Delta A$, где ΔA – ошибка азимута, вызванная погрешностями геодезических координат. Она согласно уравнению Лапласа в случае, когда зенитное расстояние направления равно 90 градусов, будет равна $\Delta A = \Delta L \sin B$. Угол γ при m' есть сближение меридианов на эллипсоиде, которое в сферическом приближении равно $\gamma = \Delta L \sin B$, то есть совпадает с ΔA . Это означает, что угол $p'm'n'$ равен A [3, 40].

В общем случае, когда зенитное расстояние направления MN не будет равно 90 градусов дуги, будет иметься зависимость ошибки ориентировки (δA) mn от погрешности ΔB и ΔL геодезических координат [3, 41]:

$$\delta A = (\Delta B \sin A - \Delta L \cos A \cos B) \operatorname{ctg} z. \quad (3)$$

Из (3) видно, что δA зависит от азимута и от угла наклона ориентируемого направления. При величинах ошибок $\Delta L, \Delta B$, не превышающих 15 м на широте г. Москвы, значение выражения в скобках не превысит 0,7 секунды дуги. Результаты расчёта величины δA при условиях, описанных выше, для углов наклона ориентируемого направления, равных 2, 5, 6, 7, 10, 20 градусов, дуги приведены на рис. 2.

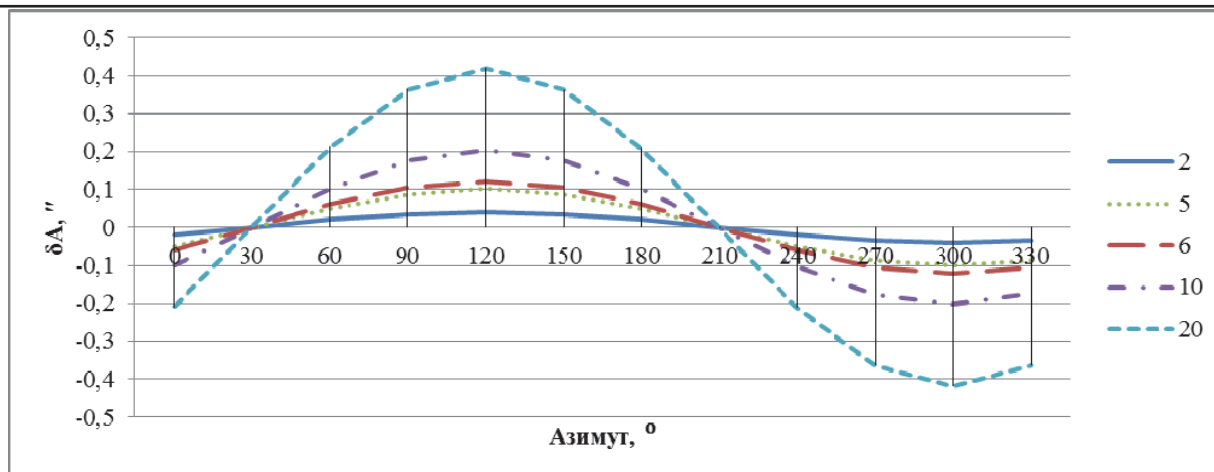


Рис. 2. Результаты расчёта величины δA для углов наклона ориентируемого направления, равных 2, 5, 6, 7, 10, 20 градусов дуги

Из рис. 2 и формулы (3) видно, что в этом случае даже при погрешностях, в линейной мере достигающих 15 м, разница (δA) между любыми азимутами из множества полученных векторов не превысит 0,1 угловой секунды при углах наклона ориентируемого направления менее 5 градусов. При ориентировке направления, близкой к $\pi/3 + \pi$, величина $\delta A \approx 0$.

В случае высокоточного ориентирования и превышения угла наклона ориентируемого направления величины 5 градусов дуги (ориентирование в горной местности), необходимо учитывать величину δA . При использовании предлагаемого метода ориентирования учёт величины δA не возможен, так как не используется геодезическая основа, необходимая для расчёта величин ΔB и ΔL геодезических координат. Однако появляется возможность компенсировать величину δA выбором направления, близкого к $\pi/3 + \pi$. В данном случае ориентируемое направление (близкое к $\pi/3 + \pi$) будет практически полностью избавленное от влияния систематических ошибок ориентирования, зависящих от азимута направления. В дальнейшем от этого направления методом измерения углов «во всех комбинациях» или «круговых приёмов» геодезический азимут может передаваться на любое направление с начального пункта ориентируемого направления.

Изложенный подход даст возможность контроля стабильности ориентируемых направлений с помощью контрольного угла, образованного направлением, близким к $\pi/3 + \pi$, и направлением, требуемым для ориентирования. Это позволит контролировать стабильность направлений, азимуты которых определяются.

Таким образом, из-за погрешностей геодезических координат, полученных одновременно абсолютным методом, происходит параллельное смещение проекции направления на поверхность относимости, для которого определяется азимут. Это даёт основание утверждать, что относительный метод космической геодезии позволяет определять геодезические азимуты направлений без использования исходной геодезической основы с прецизионной точностью.

Относительный метод космической геодезии предполагает одновременные наблюдения на определяемых и исходных пунктах и совместную пост обработку результатов этих наблюдений. Для реализации этого метода достаточно установить АП КНС на пунктах, закрепляющих ориентируемое направление, и произвести одновременные наблюдения. Азимут, полученный данным способом, будет являться геодезическим.

Пусть по результатам обработки спутниковых измерений получены координаты пунктов в геодезической системе координат. Для определения геодезического азимута перейдём из пространственной геоцентрической системы координат к топоцентрической горизонтной Y', X', Z' по формуле [5, 5]

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix},$$

где

$$A^T = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 \cos B \sin B \end{bmatrix};$$

B, L – геодезические широта и долгота пункта.

Тогда геодезический азимут направления MN можно найти из уравнения [5, 10]

$$A = \arctg\left(\frac{\Delta Y'}{\Delta X'}\right),$$

где $\Delta X', \Delta Y'$ – приращения в топоцентрической горизонтной системе координат.

Пренебрегая методическими погрешностями превычисления координат, СКО определения геодезического азимута вычислим из формулы

$$m_{AMN} = \frac{\rho'' m_p}{D},$$

где ρ'' – постоянная ($\rho'' = 206\,265''$); m_p – СКО измерения приращений координат между точками; D – расстояние между точками установки антенн АП КНС, приведенное на плоскость горизонта $D = (X^2 + Y^2)^{1/2}$.

Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов ориентирных направлений m_{AMN} АП КНС при точности определения приращений координат $m_p = 5 \text{ мм} + 1 \text{ мм на } 1 \text{ км}$ линии представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение относительного метода космической геодезии при одновременных наблюдениях без использования опорных точек (наземной исходной геодезической основы) позволяет определять геодезические азимуты с СКО $0,5 - 0,3''$ при длине ориентируемого направления порядка $1000 - 2000 \text{ м}$.



Рис. 3. Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов в зависимости от расстояния D между точками установки антенн АП КНС, приведенного на плоскость горизонта

Теоретические основы метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием гиротеодолитных комплектов. В качестве независимого метода выбран гироскопический метод ориентирования. Тенденции к ускорению измерительного процесса, к повышению

точности определения азимутов и к удешевлению гирокомпасов (ГТ) привели к активному развитию датчиков угловой скорости, основанных на лазерных гироскопах. Хотя лазерные гирокомпасы (ЛГ) обладают повышенным быстродействием, моторесурсом и низкой стоимостью по отношению к роторным, первые уступают вторым в точности. Причинами, ограничивающими точность возможности ЛГ, являются: необходимость высокоточного определения угла β , широты места установки ЛГ и характеристики ЛГ (показатели дрейфа и стабильность масштабного коэффициента).

Проблема высокоточного определения угла β , широты ϕ места установки ЛГ и масштабного коэффициента при определении азимутов направлений решается применением методики [4]:

- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН1, близком к азимуту 135° ;
- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН2 = ОН1 – 90° ;
- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН3 = ОН2 – 90° ;
- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН4 = ОН3 – 90° ;
- учёта медленной составляющей дрейфа ЛГ (из совместной обработки ОН1, ОН3 и ОН2, ОН4);
- вычисления азимута направления ОН1 без учёта масштабного коэффициента ЛГ по формуле

$$\operatorname{tg} a_1 = \operatorname{tg} a'_1 + \left(\operatorname{tg} a'_1 \frac{\sin \beta_1}{\cos a'_1} - \frac{\sin \beta_2}{\cos a'_1} \right) \operatorname{tg} \phi$$

где $\operatorname{tg} a'_1 = \Omega_2/\Omega_1 = v_2/v_1$; Ω_2 – проекция угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН2; Ω_1 – проекция угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН1.

Для дальнейшего повышения точности определения азимутов направлений возможно применить ориентирование с применением гиротеодолитного комплекта (ГТК). При высокоточном ориентировании ГТК целесообразно применять ориентирование по створу и по связующим направлениям с визированием внутри схемы автоколлимационным методом.

Таким образом, разработано два независимых подхода к определению астрономического азимута, подлежащих интеграции. Определены их точностные возможности и ограничения, позволяющие повысить точность определения азимутов. Следующим этапом является разработка способа интеграции обоих методов ориентирования.

Теоретические основы метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием спутниково-гироскопической системы. Для интегрирования гироскопической системы и АП КНС с целью высокоточного оперативного определения азимутов сначала необходимо определиться с исходным набором информации. По результатам измерений неподвижно установленного на поверхности Земли ЛГ получают астрономический азимут ОЧ ЛГ и широту точки установки ЛГ. По результатам измерений АП КНС определяют координаты точки установки антенны приёмника. Так как вся интегрированная система неподвижна для получения возможности совместной обработки данных, необходимо установить дополнительную антенну АП КНС на ориентирный пункт. Таким образом, от системы разнесённых антенн АП КНС становится возможно получить геодезический азимут и длину линии между установленными антеннами из решения обратной геодезической задачи. Но полученные азимуты из наблюдений ЛГ и АП КНС будут разными: по результатам гироскопических наблюдений определяется астрономический азимут, а после обработки данных АП КНС – геодезический. Астрономический азимут отсчитывается от астрономического меридиана, а геодезический азимут – от геодезического меридиана. Для перехода в единую систему отсчёта необходимо ввести в геодезический азимут поправку Лапласа [3, 39]:

$$a = A + \delta A, \delta A = \eta \operatorname{tg} \phi - (\eta \cos A - \xi \sin A) \operatorname{ctg} z,$$

где A – геодезический азимут; δA – поправка Лапласа; η – составляющая уклонения отвесной линии в первом вертикале; ξ – составляющая уклонения отвесной линии в меридиане; z – зенитное расстояние на ориентирный пункт; a – астрономический азимут.

Возможности современной геодезии позволяют определять составляющие уклонения отвесной линии в первом вертикале η и меридиане ξ с СКО порядка $0,3''$. Такая точность определения составляющих уклонения отвесной линии обеспечивается интеграцией геометрического нивелирования и методов космической геодезии. В этом подходе составляющие уклонения отвесной линии находятся из ортометрических и нормальных превышений. Этого вполне достаточно для получения астрономического азимута с СКО не хуже $1''$.

Приведя полученные азимуты к единой системе отсчёта, получим два независимых измерения одной величины. Доказано [1, 113], что случайная СКО надёжно вычисляется по ограниченному числу измерений. Для оценки точности значения СКО Гауссом получена формула [1, 113]

$$m_m = m / \sqrt{2n}, \quad (4)$$

где m_m – СКО значения m ; m – СКО измерения; n – число измерений.

В случае с двумя независимыми равноточными измерениями получим $m_m = m/2$, т.е. оценка точности по отклонениям от средних значений будет ненадёжной [1, 182]. Иными словами, достоверность характеристики точности в этом случае недопустимо низкая. Таким образом, возникает вопрос оценивания точности двойных измерений азимута и определения количества двойных измерений, позволяющих достоверно оценить их точность.

В соответствии с требованиями ГОСТ [ГОСТ В 20.57.304-76 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие технические требования, методы контроля и испытаний. Москва, 1977. 141 с.] точность контрольной системы должна составлять $1/5$ – $1/3$ (в исключительных случаях $1/2$) точности контролируемой системы. Учитывая то, что азимут должен быть определён с точностью (СКО) до $2''$, оценка его СКО (m_m) должна составить $0,4$ – $0,7''$.

Если двойные измерения повторены k раз, число измерений составит $n = 2k$. Используя формулу (4), при требовании точности ориентирования $2''$ и $m_m = 0,4$ – $0,7''$ получим необходимое количество двойных измерений $k = 2$.

Таким образом (при $m = 2''$), для достоверной оценки точности двойных измерений с m_m не хуже $0,7''$ их необходимо повторить минимум дважды.

Если в разностях двойных измерений $-\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_k$ остаются малые систематические ошибки, то математическое ожидание разности составит малую величину [1, 184]: $M(\Delta a) = \Delta a_{\text{ср}} = [\Delta a]/k$, где $\Delta a_{\text{ср}}$ – среднее значение разности двойного измерения азимута; $[\Delta a]$ – гауссово обозначение суммы разностей двойных измерений.

В этом случае СКО разности можно получить из формулы Бесселя [1, 188]. Принимая во внимание то, что Δa_i найдены с одинаковой точностью, получим $m_{\Delta a} = 2^{1/2} m_a$. Следовательно, СКО двойных равноточных измерений составит

$$m_a = \sqrt{\frac{[\varepsilon^2]}{2(k-1)}},$$

где ε – разность разностей двойных измерений.

Для решения задачи оперативного определения высокоточных азимутов с целью геодезического обеспечения сложных технических систем необходимо учесть ограничения. В качестве ограничений необходимо принять допустимую СКО ($2''$) определения астрономического азимута и требования по оперативности получения этих азимутов (до пяти суток). Учёт указанных ограничений позволяет определить метод оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы. Метод содержит следующие этапы:

- оперативное (первые – третьи сутки) определение эталонных направлений на базе эталонирования гирокомпасов (БЭГ) с СКО $m \leq 0,5 - 1''$ (с использованием синхронно работающих АП КНС);
- одновременное эталонирование гиротеодолитов (гирокомпасов) комплекта на эталонных направлениях БЭГ;
- оперативное (третьи – четвертые сутки) определение азимутов исходных направлений технической системы с СКО $m \leq 2 - 3''$ (с применением синхронно работающих АП КНС и комплекта гиротеодолитов).

Все этапы метода включили в себя определение азимута с применением АП КНС без геодезической основы, а третий этап дополнительно включил вторые независимые (гироскопические) измерения азимутов направлений и их совместную обработку. Алгоритм метода представлен на рис. 4.

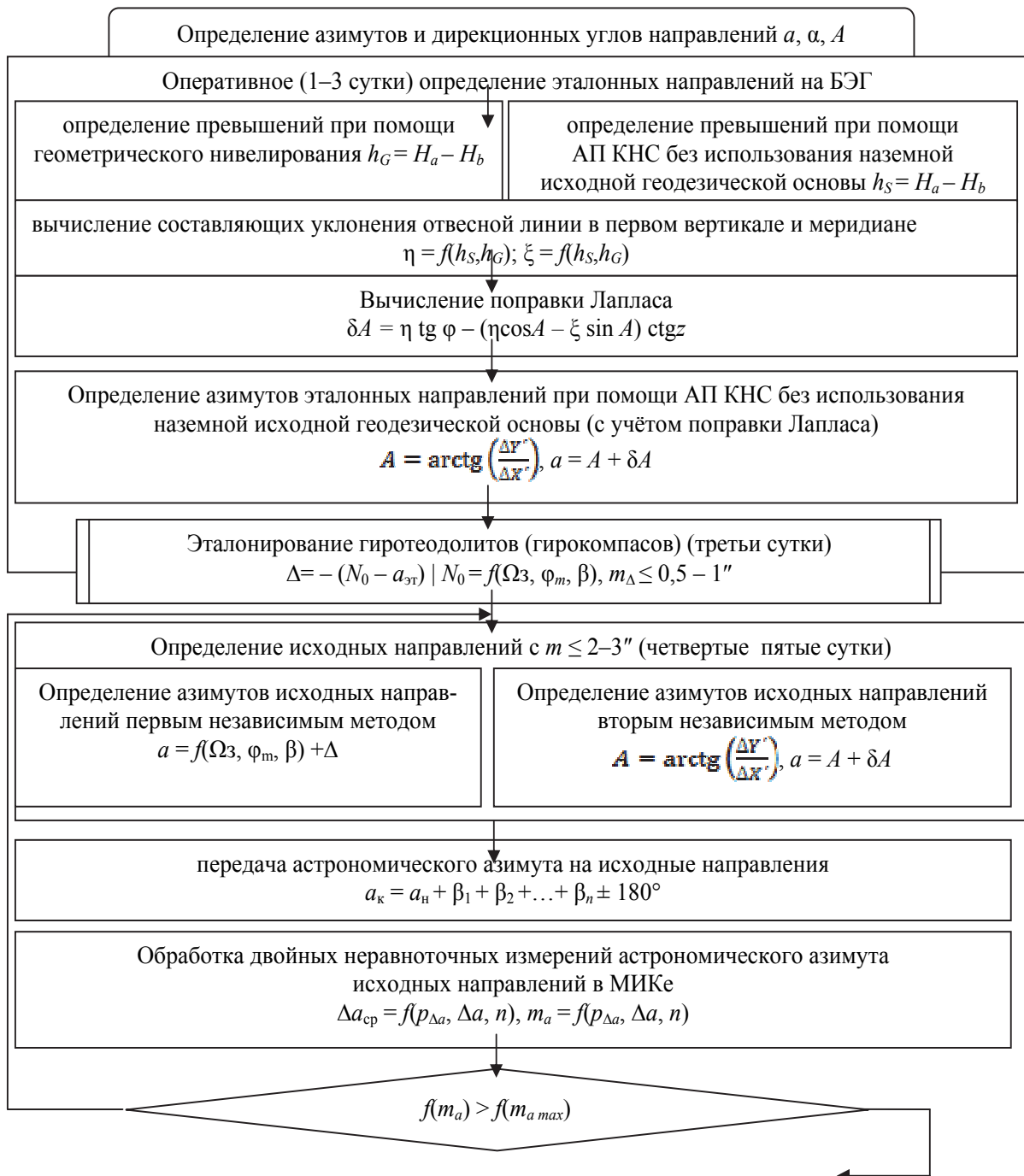


Рис. 4. Алгоритм метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы



Заключение

Таким образом, доказано, что повышение оперативности ориентирования путём отказа от применения наземной исходной геодезической основы и интеграции гироскопических и спутниковых наблюдений возможно. В итоге разработанный метод позволяет осуществить:

- отказ от использования наземной исходной геодезической основы при определении азимутов относительным методом космической геодезии;
- совместную обработку результатов гироскопического ориентирования и спутниковых наблюдений АП КНС;
- надёжное оценивание точности результирующих значений азимутов из двойных наблюдений.

Разработанный метод обладает универсальностью и может быть применен в неподготовленных в топогеодезическом отношении районах. Главное преимущество разработанного метода состоит в выполнении требований точности с надёжным контролем и высокой оперативностью геодезической подготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович, А. В. Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. пособие. Ч. 1 / А. В. Астапович. – СПб.: СПбВТКУ, 1997. – 199 с.
2. Демидов, О. В. Задача тесной интеграции систем ГЛОНАСС и GPS с инерциальными навигационными системами разных классов точности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. 01.02.01 / Демидов Олег Викторович. – М., 2009. – 139 с.
3. Пеллинен, Л. П. Высшая геодезия / Л. П. Пеллинен. – М.: Недра, 1978. – 264 с.
4. Чернов, И. В. Совершенствование методики определения азимутов с использованием лазерных гироскопов / И. В. Чернов // Информация и космос. – 2016. – № 6 (в печати).
5. Яковлев, А. И. Высшая геодезия. Решение практических задач высшей геодезии: учеб. пособие / А. И. Яковлев. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 109 с.