

Относительная точность навигационного космического аппарата

и оптимизация навигационного решения

В статье рассматривается параметр оценки точностных характеристик радионавигационных полей спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, BeiDou, GPS и др., необходимый для оценки влияния каждого навигационного спутника на общую точность геопозиционирования с целью оптимизации текущего созвездия для получения максимальной точности навигационно-временного решения.

Сергей Платонов
sergeyplatonovcgs@gmail.com

Введение

При решении навигационной задачи с использованием спутниковых навигационных систем (СНС) возникает проблема неоднородности точностных характеристик навигационных космических аппаратов (НКА), что приводит к ухудшению точностных показателей решения навигационно-временной задачи вследствие повышенных ошибок отдельных НКА.

Возникает задача фильтрации измерений отдельных НКА для оптимизации используемого навигационной аппаратурой потребителя (НАП) созвездия СНС с целью получения максимально возможной точности геопозиционирования.

Решение данной задачи имеет большое значение для улучшения точностных характеристик геопозиционирования и повышения надежности и непрерывности геопозиционирования с требуемой точностью. Конечная цель решения данной проблемы — повышение качества спутниковой навигации в различных отраслях (персональный трекинг, М2М, геодезия и др.).

Погрешности НКА

Как известно, при обработке навигационных измерений (кодовых и фазовых) НКА возникает целый бюджет ошибок измерения — как случайных, так и систематических:

- ошибки эфемеридно-временной информации (ЭВИ);
- ошибки, вызванные задержками сигнала в трактах аппаратуры НКА;
- ошибка из-за сдвига фазового центра антенны НКА;
- задержка при распространении сигнала от бортового генератора до излучателя антенны для НКА ГЛОНАСС (групповая задержка);

- остаточные ошибки из-за влияния ионосферы, тропосферы, вращения Земли за время распространения сигнала;
- межлитерные задержки сигнала;
- межканальные задержки сигнала;
- ошибки многолучевости;
- сдвиг фазового центра антенны НАП;
- задержки сигнала в трактах НАП;
- инструментальная погрешность измерения для НАП;
- инструментальная погрешность измерения для НКА.

Бюджет ошибок навигационных измерений уникален для каждого НКА:

- Присутствуют инструментальные систематические ошибки, присущие конкретному НКА: погрешности измерений, задержки в трактах аппаратуры НКА, сдвиг фазового центра антенны НКА.
- Ошибки штатной ЭВИ, закладываемой на НКА, также различны для каждого НКА.
- Каждый НКА имеет уникальную погрешность, обусловленную геометрическим фактором расположения НКА относительно НАП (в первую очередь, это относится к значению угла места, который влияет и на геометрический фактор созвездия, и на уровень сигнал-шум для сигнала НКА).
- В силу неоднородности ионосферы и тропосферы и в совокупности с различной геометрией расположения НКА относительно НАП ионосферные и тропосферные задержки сигнала сильно разнятся для каждого НКА.
- Присутствует уникальная ошибка измерений для различных моделей НАП, причем эта ошибка представляет собой множество индивидуальных погрешностей для каждого НКА и для каждой комбинации измерений — для кодовых (причем для каждого

типа кода — СТ, ВТ, С/А, Р(Y) и др.) на каждой несущей частоте и для фазовых на каждой несущей частоте.

- Ошибка многолучевого распространения сигнала вследствие его переотражения от металлических поверхностей и конструкций всегда может возникнуть в любой сфере применения.

Бюджет ошибок широк и разнообразен по своей физической природе.

Некоторые из них могут быть выявлены и отфильтрованы только в конкретной точке местонахождения НАП, например низкий угол места НКА и многолучево́сть. Другие носят системный характер: относятся к ошибкам самой орбитальной группировки СНС и должны выявляться и устраняться при эксплуатации внешних систем мониторинга СНС. К ним относятся повышенные ошибки штатной ЭВИ («старая» закладка ЭВИ, повышенные ошибки вычисления ЭВИ), а также повышенные ошибки измерений (инструментальные случайные или систематические, межлитерные и межканальные задержки, сбои НКА).

Точный учет ошибок, вызванных средой распространения навигационного сигнала, требует не только более совершенных моделей учета данных ошибок, но и использования в этих моделях внешних данных (тропосферные карты, характеристики ионосферы, такие как Total Electron Content).

Для учета систематических ошибок измерений для каждой пары «НАП–НКА» требуется уточнение этих систематических погрешностей для каждого измерения НКА, выполняемого конкретной моделью НАП, а затем, при решении навигационно-временной задачи, потребуются калибровка каждого измерения с использованием данных об этих погрешностях. С учетом многообразия и моделей НАП, и навигационных сигналов СНС решение этой задачи представляет собой большую научно-исследовательскую работу, включающую развертывание сети постоянно действующих станций с различными моделями НАП.

Таким образом, для оптимизации и повышения точности решения навигационно-временной задачи по СНС принципиально важна оценка влияния каждого отдельного НКА.

Относительная точность НКА

Для решения задачи оценки влияния погрешности отдельного НКА на общую точность решения навигационно-временной задачи по созвездию СНС предлагается использование нового параметра — относительной точности НКА (Relative Accuracy — RA).

Цель использования параметра «относительная точность» НКА — оценка влияния бюджета ошибок каждого отдельного НКА, используемого в решении навигационно-временной задачи, на общую точность геопозиционирования в текущей точке в режиме реального времени.

Теоретически относительная точность НКА рассчитывается следующим образом:

$$RA = \frac{\sigma_{НКА}}{\sigma_{СНС}} \times 100\%, \quad (1)$$

где: $\sigma_{НКА}$ — точность отдельного НКА; $\sigma_{СНС}$ — точность позиционирования по созвездию СНС.

Относительная точность показывает, как влияет точность отдельного НКА $\sigma_{НКА}$ на общую точность решения навигационно-временной задачи по созвездию СНС $\sigma_{СНС}$. Таким образом, относительная точность показывает — ухудшает или улучшает отдельный НКА конечную пользовательскую точность местоопределения.

Использование параметра «относительная точность» в режиме реального времени в точке геопозиционирования НАП должно позволить выявлять НКА, ухудшающие общую точность позиционирования, фильтровать их из текущего созвездия, таким образом оптимизируя созвездие СНС для получения максимально возможной точности решения навигационно-временной задачи.

Для выполнения оптимизации созвездия СНС по показателям относительной точности НКА необходимо на эпоху решения навигационно-временной задачи вычислить значения RA для каждого НКА, отфильтровать НКА с завышенными значениями RA и снова провести решение навигационно-временной задачи. В отличие от алгоритма RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), подразумевающего перебор всех комбинаций созвездий СНС с последовательным исключением каждого наблюдаемого НКА, алгоритм оптимизации созвездия

по показателю относительной точности может быть выполнен быстрее, так как он позволяет отфильтровать НКА с повышенными ошибками сразу после первого решения навигационно-временной задачи.

Параметр «относительная точность» имеет теоретическое предельно допустимое значение, равное 100%, так как превышение 100% означает, что точность измерения отдельного НКА превосходит точность геопозиционирования по всему созвездию СНС.

Рассмотрим геометрический смысл параметра «относительная точность».

Точность измерения по отдельному НКА есть ошибка измерения дальности от НАП до НКА, которая по физическому смыслу представляет собой разницу между измеренной и вычисляемой величинами дальности «НАП–НКА». При этом измеряемая даже по одному НКА дальность «НАП–НКА» уже задает поверхность положения точки наблюдения в пространстве — сферу. Таким образом, ошибка измерения НКА, определяемая как разность этих двух сфер, задает величину пространственной линейной ошибки местоопределения по исследуемому НКА (рис. 1).

Точность геопозиционирования по всему созвездию СНС также представляет собой пространственную оценку вычисленного положения НАП относительно истинного — радиус-вектор, который задает вероятностное положение вычисленной точки стояния НАП относительно истинной (рис. 2).

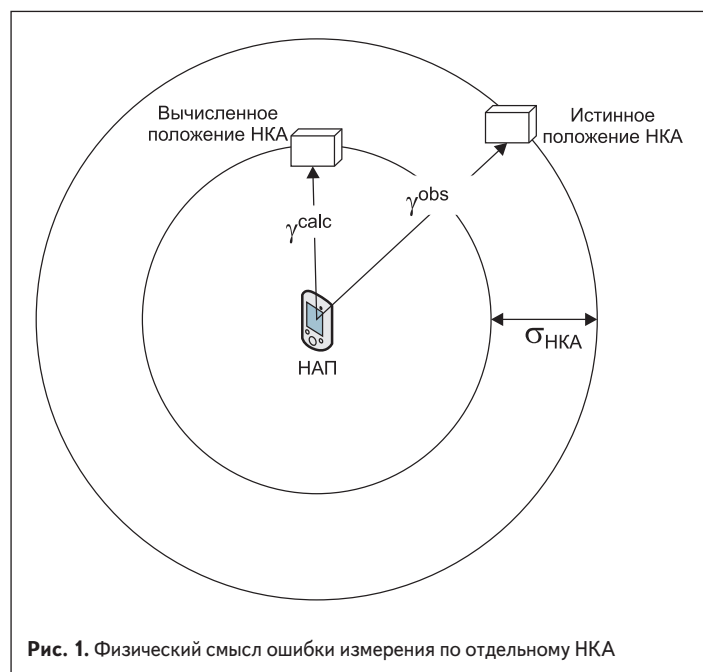


Рис. 1. Физический смысл ошибки измерения по отдельному НКА

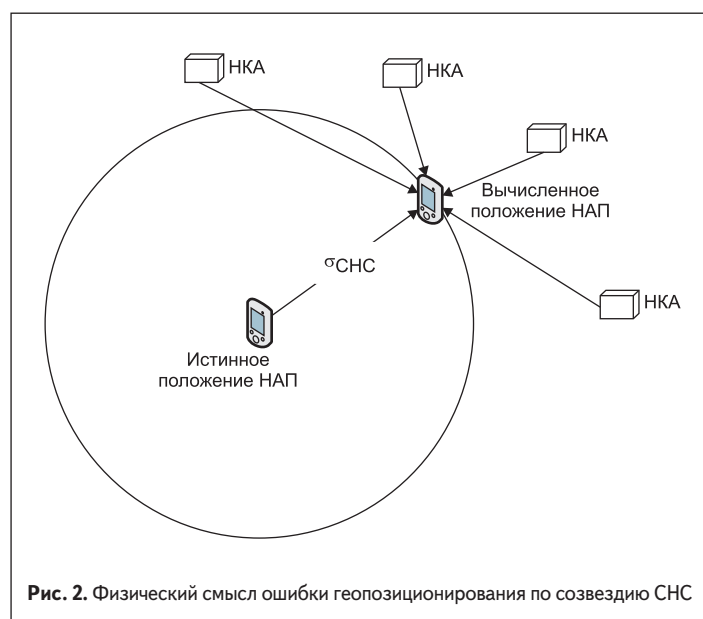


Рис. 2. Физический смысл ошибки геопозиционирования по созвездию СНС

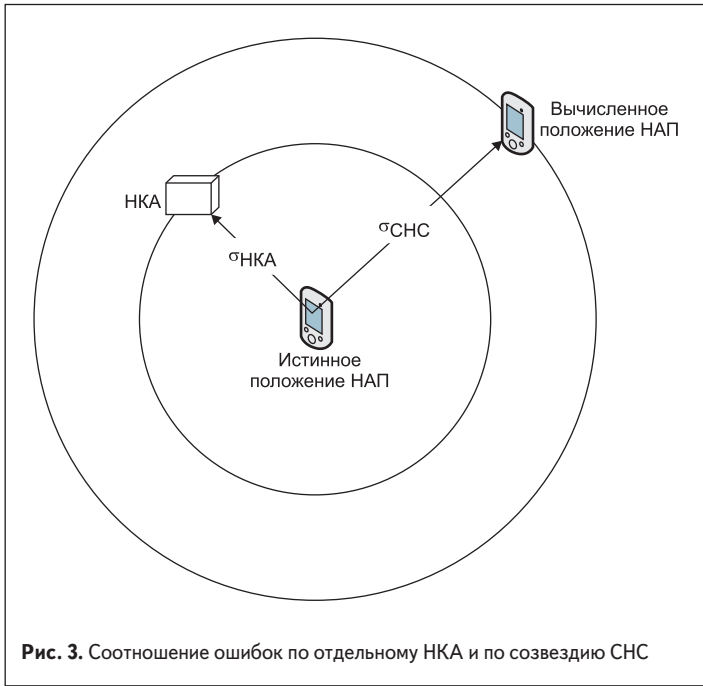


Рис. 3. Соотношение ошибок по отдельному НКА и по созвездию СНС

Таким образом, и ошибка измерения по отдельному НКА, и ошибка геопозиционирования по всему созвездию СНС задают геометрическую поверхность — сферу, описывающую смещение в пространстве вычисляемого положения НАП относительно истинного положения (рис. 3).

В предлагаемой методике вычисления параметра «относительная точность» происходит сопоставление радиус-векторов двух сфер, задающих вероятностное положение в пространстве точки наблюдения, — по измеряемому НКА и по всему созвездию СНС, что позволяет оценить влияние отдельного НКА на общую точность позиционирования.

Для решения задачи оптимизации созвездия СНС по показателю относительной точности НКА вычисление RA должно выполняться во встроенном программном обеспечении (ПО) НАП в режиме реального времени на каждую эпоху навигационных измерений. Для вычисления RA необходимо иметь оценки точности измерений каждого НКА и точности решения навигационно-временной задачи по всему созвездию СНС, полученные в рамках одной методики оценки точности. При этом возникает проблема: истинное местоположение НАП в общем случае неизвестно, а в случае использования НАП на движущемся объекте истинное положение неизвестно в каждой точке маршрута. В связи с этим невозможно оценить ошибки геопозиционирования и ошибки измерений отдельных НКА относительно точных координат точки стояния НАП.

Предлагается следующий вариант расчета относительной точности.

При решении координатно-временной задачи по созвездию СНС исходным уравнением связи измеряемых величин и уточняемых параметров является уравнение следующего вида:

$$r = \sqrt{(X_{НКА} - X_{НАП})^2 + (Y_{НКА} - Y_{НАП})^2 + (Z_{НКА} - Z_{НАП})^2} + \Delta t_{НАП}, \quad (2)$$

где: r — измеряемая дальность от НАП до НКА; $X_{НКА}, Y_{НКА}, Z_{НКА}$ — координаты НКА на момент измерения; $X_{НАП}, Y_{НАП}, Z_{НАП}$ — координаты точки местонахождения НАП на момент измерения; $\Delta t_{НАП}$ — уход часов НАП относительно системного времени СНС.

Линеаризуем исходное уравнение связи (2) в окрестности точки начальных условий (приближенные координаты точки местонахождения НАП) путем разложения уравнения связи в ряд Тейлора с удержанием только линейных членов. В результате получим уравнение поправок:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r}{\partial X_{НАП}^0} \Delta X_{НАП} + \frac{\partial r}{\partial Y_{НАП}^0} \Delta Y_{НАП} + \\ & + \frac{\partial r}{\partial Z_{НАП}^0} \Delta Z_{НАП} + \frac{\partial r}{\partial \Delta t_{НАП}} \Delta(\Delta t_{НАП}) + (r^{calc} - r^{obs}) = v, \quad (3) \end{aligned}$$

где: $X_{НАП}^0, Y_{НАП}^0, Z_{НАП}^0$ — приближенные значения координат точки местоположения НАП; $\Delta X_{НАП}, \Delta Y_{НАП}, \Delta Z_{НАП}$ — поправки в приближенные значения координат точки местоположения НАП; $\Delta(\Delta t_{НАП})$ — поправка в уход часов НАП относительно системного времени СНС; r^{calc} — вычисленное по математической модели расстояние от НАП до НКА; r^{obs} — измеренная дальность от НАП до НКА; v — невязка, обусловленная ошибками НКА.

При синхронном наблюдении нескольких НКА возникает система уравнений поправок:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r_1}{\partial X_{НАП}^0} \Delta X_{НАП} + \frac{\partial r_1}{\partial Y_{НАП}^0} \Delta Y_{НАП} + \\ & + \frac{\partial r_1}{\partial Z_{НАП}^0} \Delta Z_{НАП} + \frac{\partial r_1}{\partial \Delta t_{НАП}} \Delta(\Delta t_{НАП}) + (r_1^{calc} - r_1^{obs}) = v_1 \\ & \frac{\partial r_2}{\partial X_{НАП}^0} \Delta X_{НАП} + \frac{\partial r_2}{\partial Y_{НАП}^0} \Delta Y_{НАП} + \\ & + \frac{\partial r_2}{\partial Z_{НАП}^0} \Delta Z_{НАП} + \frac{\partial r_2}{\partial \Delta t_{НАП}} \Delta(\Delta t_{НАП}) + (r_2^{calc} - r_2^{obs}) = v_2 \\ & \dots \\ & \frac{\partial r_N}{\partial X_{НАП}^0} \Delta X_{НАП} + \frac{\partial r_N}{\partial Y_{НАП}^0} \Delta Y_{НАП} + \\ & + \frac{\partial r_N}{\partial Z_{НАП}^0} \Delta Z_{НАП} + \frac{\partial r_N}{\partial \Delta t_{НАП}} \Delta(\Delta t_{НАП}) + (r_N^{calc} - r_N^{obs}) = v_N \end{aligned}, \quad (4)$$

где N — число наблюдаемых НКА.

Система уравнений (4) в матричной форме имеет вид:

$$B \times X + L = V, \quad (5)$$

где: B — матрица коэффициентов (частные производные уравнений связи по определяемым параметрам) уравнений поправок; X — вектор-столбец определяемых параметров (координаты точки местоположения и уход часов НАП); L — вектор-столбец свободных членов уравнений поправок (разности между вычисленными и измеренными дальностями от НАП до НКА); V — вектор-столбец поправок в измерения (невязки, обусловленные ошибками НКА).

Далее при решении навигационно-временной задачи применяется метод наименьших квадратов (для повышения точности решение выполняется итерационно). Составляется система нормальных уравнений вида:

$$B^T B X + B^T L = 0. \quad (6)$$

Решение системы нормальных уравнений (6) позволяет вычислить определяемые параметры:

$$X = -(B^T B)^{-1} B^T L. \quad (7)$$

Для вычисления параметра «относительная точность» в качестве точности отдельного НКА $\sigma_{НКА}$ предполагается использование невязки измерения v по данному НКА, которая вычисляется после решения навигационно-временной задачи:

$$V = B \times X + L. \quad (8)$$

Вектор невязок представляет собой столбец, содержащий невязки измерений по каждому НКА, используемому в навигационно-временном решении.

В качестве точности навигационно-временного решения по всему созвездию СНС предлагается использовать среднюю квадратическую ошибку единичного измерения, вычисляемую после решения навигационной задачи по методу наименьших квадратов:

$$\mu = \sqrt{\frac{v^T v}{n - m}}, \quad (9)$$

где: n — число НКА, используемых в решении; m — число определяемых параметров.

Таким образом, вычисление относительной точности предлагается по следующей формуле:

$$RA = \frac{v_j}{\mu} \times 100\%, \quad (10)$$

где: v_j — невязка измерения по исследуемому НКА; μ — средняя квадратическая ошибка единичного измерения.

В формуле (10) для вычисления относительной точности используются две характеристики, полученные в рамках одной методики оценки точности, что позволяет объективно оценивать влияние точности отдельного НКА на общую точность навигационно-временного решения.

В предлагаемой методике оценки относительной точности невязка измерения по отдельному НКА включает в себя полный бюджет ошибок измерений по НКА, что позволяет рассматривать параметр «относительная точность» в качестве универсального параметра оценки влияния НКА, учитывающего как случайные ошибки измерений, так и системные ошибки СНС и ошибки, вызванные средой распространения навигационного сигнала.

Оценка параметра «относительная точность НКА» для НКА ГЛОНАСС

С использованием параметра «относительная точность» было проведено исследование влияния НКА системы ГЛОНАСС на общую точность геопозиционирования.

Исследование проводилось при следующих условиях:

- Использовался двухчастотный (L1+L2) двухсистемный (ГЛОНАСС+GPS) навигационный приемник «Legacy».
- Решение выполнялось в абсолютном режиме позиционирования с использованием кодовых измерений на несущих частотах L1 и L2 с компенсацией ионосферной задержки по комбинации двухчастотных измерений.
- Интервал решения навигационно-временной равен 8 суткам — это интервал повторяемости орбит НКА ГЛОНАСС.
- Шаг решения навигационно-временной задачи составлял 30 секунд.

Полученные результаты оценки относительной точности для каждого НКА ГЛОНАСС на заданном интервале исследования приведены на рис. 4–6.

На этих рисунках приведены значения RA на каждую эпоху решения навигационно-временной задачи и отмечена граница в 100% — это точность позиционирования по всему созвездию СНС.

Результаты показывают, что большая часть НКА ГЛОНАСС имеет ошибки измерения навигационных параметров, не превышающие общую точность позиционирования по всему созвездию. На рис. 7 для каждого НКА ГЛОНАСС приведено число эпох, в которые ошибка по НКА не превышала ошибки по созвездию, в процентном соотношении от всего 8-суточного интервала.

Согласно графику на рис. 7 для большинства НКА ГЛОНАСС ошибка измерения не превышала общую ошибку позиционирования практически в 100% эпох наблюдений. В среднем по всей орбитальной группировке на 8-суточном интервале было получено 96,6% измерений, не ухудшающих общую точность позиционирования.

Стоит отметить, что для двух НКА (орбитальные слоты № 14 и 15) число измерений с $RA > 100\%$ составило около 90% и 79% соответственно. При использовании методики оценки относительной точности НКА в режиме реального времени в прошивке НАП была бы возможность исключить эти НКА в соответствующие эпохи из навигационно-временного решения и тем самым повысить точность геопозиционирования.

Также стоит отметить, что подобные результаты оценки влияния отдельных НКА на общую точность геопозиционирования могут быть применены в системной задаче мониторинга состояния орбитальной группировки СНС. В частности, повышенные значения RA, имеющие явную систематическую составляющую в своих значениях, могут сигнализировать о возникновении систематических ошибок в функционировании СНС (ошибки в штатной ЭВИ, задержки сигнала в трактах

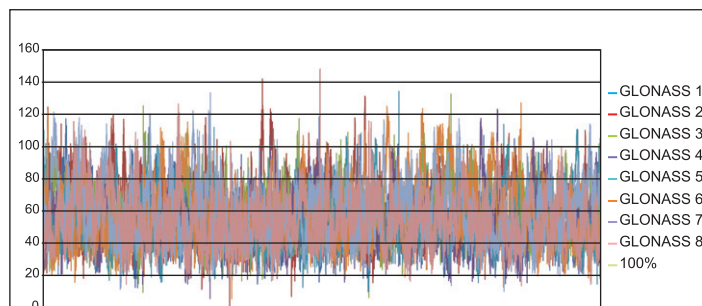


Рис. 4. Значения RA для НКА ГЛОНАСС № 1–8

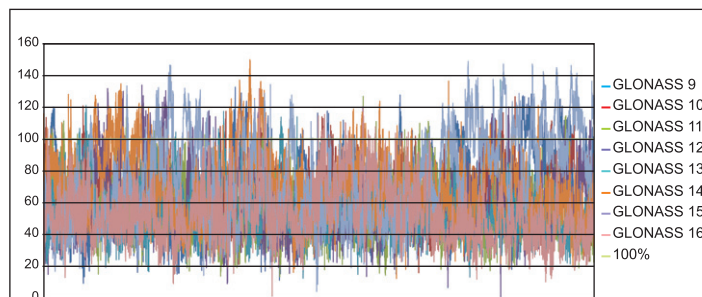


Рис. 5. Значения RA для НКА ГЛОНАСС № 9–16

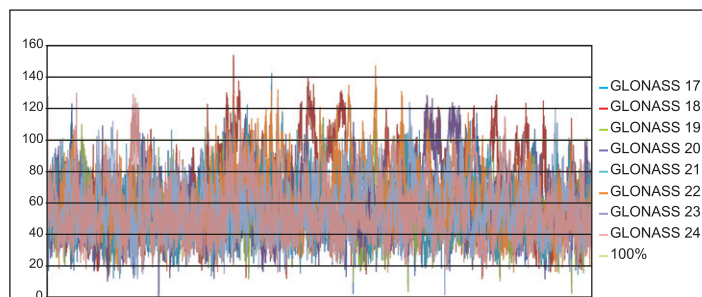


Рис. 6. Значения RA для НКА ГЛОНАСС № 17–24

аппаратуры НКА и т. п.). Это может быть полезной информацией для органов управления СНС при решении задач выявления сбоев НКА, их оперативного устранения и анализа потребительских характеристик как каждого НКА, так и всей СНС в целом.

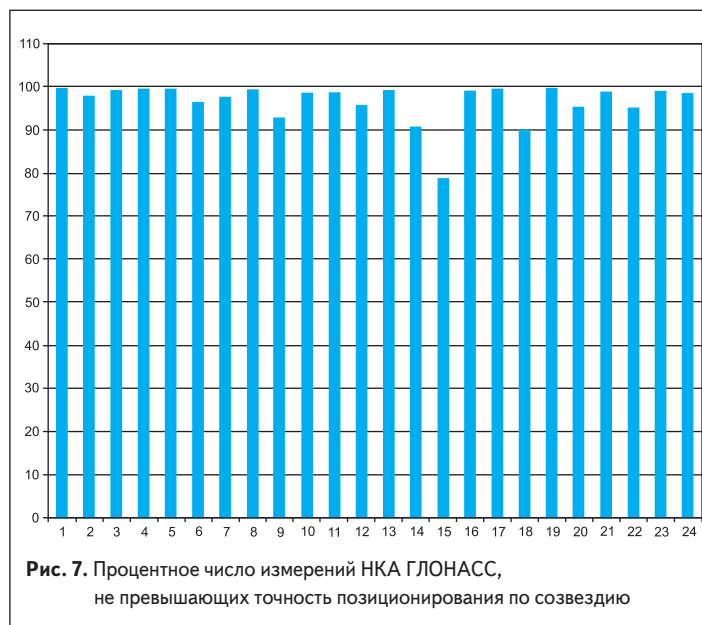


Рис. 7. Процентное число измерений НКА ГЛОНАСС, не превышающих точность позиционирования по созвездию

Заключение

Рассмотренный в статье параметр «относительная точность» позволяет оценивать влияние на общую точность геопозиционирования точности каждого НКА СНС, причем в отношении каждого типа или комбинации измерений (кодовые, фазовые, на разных частотах, с разными псевдослучайными кодами). Данный параметр позволяет учитывать влияние всего бюджета ошибок измерений.

Параметр «относительная точность» имеет важное преимущество перед существующими способами оценки точностей отдельных НКА и точности по созвездию СНС — он позволяет оценить именно влияние (ухудшение/улучшение) каждого НКА на конечную точность позиционирования по созвездию СНС, в то время как абсолютные погрешности каждого НКА не дают понимания, как они повлияют на общую точность и при каких условиях НКА следует исключать из решения. Проблема абсолютных погрешностей измерений НКА заключается в том, что неизвестно, какое пороговое значение погрешности следует использовать для фильтрации НКА из созвездия СНС в целях улучшения точности позиционирования. Задать универсальное абсолютное пороговое значение погрешности измерения НКА практически невозможно, так как существуют систематические погрешности в измерениях СНС, рост которых может привести к тому, что у большинства НКА будет превышено пороговое значение погрешности измерения. К тому же точность штатного эфемеридно-временного обеспе-

чения постоянно улучшается для каждой СНС (вследствие улучшения математических моделей обработки, использования новых станций слежения, использования межспутниковых измерений и пр.), что ведет к тому, что пороговые значения погрешностей измерений со временем должны корректироваться (это становится проблемой, когда какое-то значение уже «зашито» в прошивку НАП). Для абсолютных погрешностей измерений НКА возможно задать корректно только достаточно завышенное пороговое значение, превышение которого будет говорить о серьезном сбое НКА (когда произошел системный сбой и требуется вмешательство центра управления СНС). Параметр «относительная точность» позволяет проводить оценку точности измерений отдельных НКА на более «тонком» уровне и выявлять ухудшения точности измерений, значения которых могут быть не так велики по абсолютной величине, но их влияние на общую точность геопозиционирования будет негативное.

Использование оценки относительной точности НКА во встроенном ПО НАП в режиме реального времени позволит выполнять фильтрацию НКА с повышенными ошибками измерений с целью оптимизации созвездия СНС для получения максимальной точности геопозиционирования.

Также параметр «относительная точность» может быть полезен при решении системной задачи мониторинга радионавигационных полей СНС для оценки качества радионавигационного сигнала каждого НКА. ■