
УДК 629.7, ББК 68.53

Модификация алгоритмов функционирования бортовой интегрированной навигационной системы автономного космического аппарата

Кружков Д. М.^{*}, Ким Р. В.^{}**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

^{}e-mail: kruzhkovd@mail.ru*

*^{**}e-mail: romanvkim@yandex.ru*

Аннотация

В настоящей статье рассматриваются пути модификации автономной астро-спутниковой навигационной системы, установленной на целевом космическом аппарате, функционирующем на геостационарной и высокоэллиптической орбитах. Приводятся результаты имитационного моделирования процесса функционирования модернизированной навигационной системы и оценки точностных характеристик формируемого навигационного решения.

Ключевые слова

навигация, комплексирование, астро-спутниковая навигационная система, фильтр Калмана, ГЛОНАСС, астродатчик, геостационарная орбита

Введение

Актуальность проблемы автономного функционирования космических группировок систем связи была описана ранее в [1]. Также в [1] было предложено одно из направлений ее возможных решений, заключающееся в отказе от использования традиционного источника навигационной информации на целевом космическом аппарате (ЦКА) – инерциальной

навигационной системы и ее замене на борту комбинацией двух систем – оптической астросистемы и приемника глобальной навигационной спутниковой системы, связанных по глубоко-интегрированной схеме комплексирования. Навигационная система (НС) с предложенным составом навигационного оборудования носит название астро-спутниковой. Разработанный ранее комплекс моделей и алгоритмов, необходимый для оценки точностных характеристик предложенной системы был рассмотрен в [1]. Результаты имитационного моделирования [1,2] процесса функционирования разработанной астро–спутниковой навигационной системы показали возможность ее применения в условиях как отсутствия, так и наличия широкополосной искусственной помехи на целевых космических аппаратах на геостационарной и высокоэллиптической орбитах. При этом в условиях отсутствия помех сформированная навигационная система обеспечивает высокую точность навигационного определения для ЦКА на геостационарной орбите (ГСО) – порядка 20 метров (СКО). Однако, в результате имитационного моделирования были выявлены следующие проблемы, требующие модификации предложенной НС:

- периодическое ухудшение условий видимости навигационных космических аппаратов (НКА) и нехватка измерений для проведения навигационного определения, в особенности это касается ЦКА на высокоэллиптической орбите (ВЭО);

- наличие искусственной помехи, значительно затрудняющей прием сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Для решения описанных проблем требуется усовершенствование предложенного ранее облика и состава астро-спутниковой навигационной системы.

1. Постановка технической задачи исследования

В данной работе идея комплексирования астроприборов с ГНСС – приемником получила свое развитие в виде следующих доработок алгоритмов функционирования НС:

- Увеличение числа обрабатываемых в интегральном фильтре измерений за счет применения межспутниковых измерений взаимных дальностей;
- Использование фазовых измерений в процессе выработки навигационного решения;
- Включение в состав бортового комплекса дополнительной ГНСС – антенны, ориентированной в направлении от Земли, для целевого космического аппарата на высокоэллиптической орбите;
- Формирование вида диаграммы направленности с максимальным качеством приема полезного навигационного сигнала от спутников СНС и одновременно удовлетворяющего условиям минимизации влияния помехи;

В связи с расширением состава моделируемых процессов программный комплекс потребовалось дополнить следующими моделями:

- Фазовых измерений ГЛОНАСС/GPS приемника.
- Определения углов ориентации КА на основе измерений ГЛОНАСС/GPS приемника, оснащенного многоантенной системой и функционирующего в режиме фазовых измерений.
- Беззапросных межспутниковых измерений.
- Формирования радионавигационных параметров с учетом особенностей приема сигналов двусторонней антенной системой ГЛОНАСС/GPS приемника КА на высокоэллиптических орбитах.

Также для решения поставленной задачи было необходимо реализовать перечисленные ниже алгоритмы:

- Модернизированной интеграции данных астроприборов, измерений радионавигационных параметров ГЛОНАСС/GPS приемника и результатов межспутниковых измерений с использованием интегрального фильтра Калмана;
- Адаптивный алгоритм проведения коррекций интегрального фильтра в зависимости от условий наблюдаемости источников навигационной информации;
- Формирования требований к апертуре активной фазированной антенной решетке ГНСС целевого КА, обеспечивающей с одной стороны высокую чувствительность к сигналам ГНСС и эффективное подавление действия помех с другой.

2. Математические модели и алгоритмы

Далее рассмотрены основные детали реализации перечисленных выше моделей и алгоритмов.

2.1. Межспутниковые измерения

В целях компенсации недостаточного количества видимых НКА, необходимых для получения навигационной информации в процессе функционирования ЦКА на геостационарной и высокоэллиптической орбитах, в качестве дополнительного источника навигационных данных были использованы межспутниковые измерения. В общем случае, эти измерения представляют собой беззапросные измерения дальностей от ЦКА до отдельно взятых НКА с любыми параметрами орбит.

Параметры орбит НКА, используемых для получения межспутниковых измерений, могут быть различными в зависимости от типа НКА. В данной работе для получения межспутниковых измерений предложено использовать космические аппараты, функционирующие на геостационарной орбите. Благодаря особенностям параметров данного типа орбиты удалось обеспечить практически постоянную ориентацию в пространстве друг относительно друга НКА и ЦКА (в случае ГСО), что позволило получать навигационные данные от НКА без прерываний. Необходимо отметить, что отсутствие прерываний в приеме навигационной информации от НКА крайне важно для устойчивой работы интегрального фильтра и получения высокоточного навигационного решения.

Предварительные эксперименты показали, что, использование межспутниковых измерений привело к увеличению числа видимых НКА. Ниже на рисунке 1, 2 представлены эволюции числа видимых антенной ЦКА, находящегося на геостационарной орбите, навигационных спутников в отсутствие помех. Состав созвездий GPS, ГЛОНАСС, использованных в экспериментах, идентичен принятому в экспериментах, результаты которых приведены ранее[1]. Помимо созвездий GPS и ГЛОНАСС было добавлено два спутника на ГСО. Зависимость на рисунке 1 соответствует условиям, когда межспутниковые измерения не проводятся. Зависимость на рисунке 2 соответствует условиям, когда в процессе функционирования бортового комплекса ЦКА используются измерения беззапросных дальностей до двух КА, находящихся на геостационарной орбите.

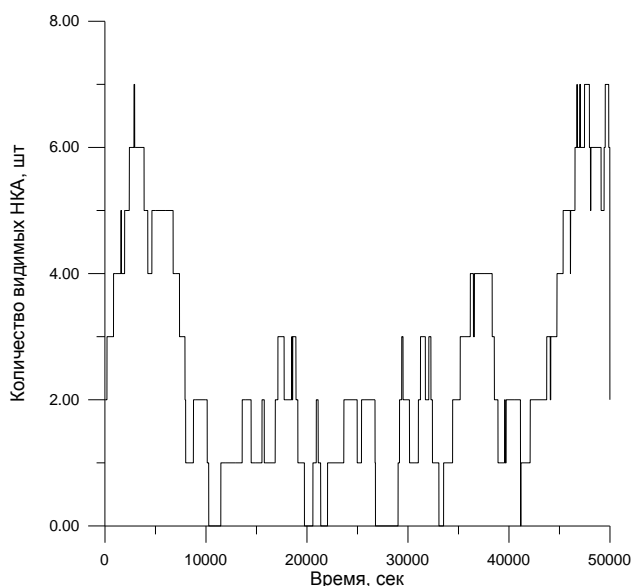


Рис.1. Диаграммы числа видимых спутников для ЦКА на ГСО без учета НКА на геостационарной орбите

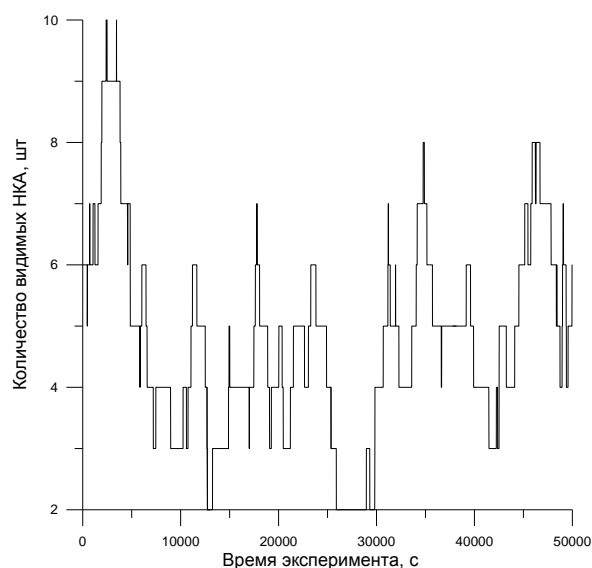


Рис.2. Диаграммы числа видимых спутников для ЦКА на ГСО с учетом НКА на геостационарной орбите

Как следует из приведенных на рисунках 1,2 зависимостей, НКА на геостационарной орбите остаются видимыми для ЦКА в течение всего периода обращения. Как следствие, минимальное число видимых НКА при функционировании ЦКА на ГСО в условиях помех возросло до двух. Аналогичная ситуация наблюдается в случае с ЦКА на ВЭО (рисунки 3,4).

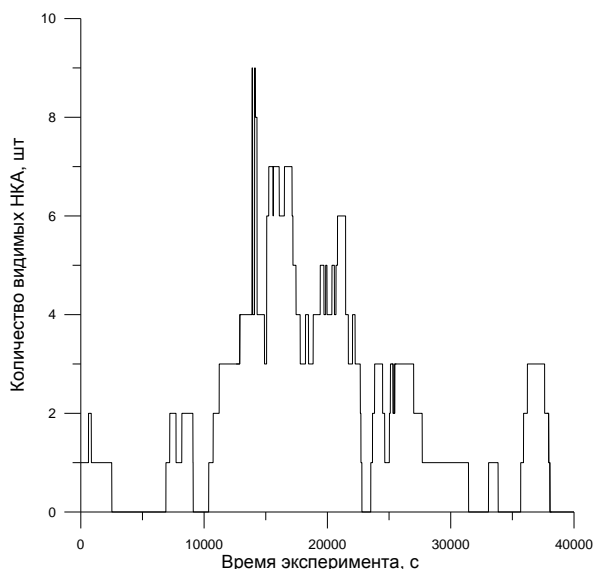


Рис.3. Диаграмма числа видимых спутников для ЦКА на ВЭО без учета НКА на геостационарной орбите.

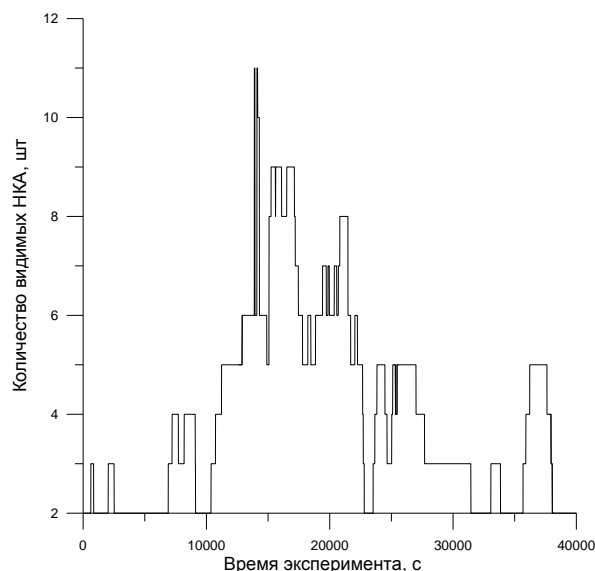


Рис.4. Диаграмма числа видимых спутников для ЦКА на ВЭО с учетом НКА на геостационарной орбите

2.2. Модификация алгоритма интеграции данных

В связи с изменяющимися условиями видимости НКА их количество может варьироваться в широком диапазоне, что приводит к необходимости принятия мер по повышению точности навигационных определений. Данная задача может быть решена путем настройки работы интегрального фильтра в переходных режимах. Предпосылкой к такой доработке являются результаты имитационного моделирования, полученные при моделировании работы астро-спутниковой навигационной системы [1]. С целью повышения точности навигационного решения была произведена модернизация ПМО [2], в частности, был доработан алгоритм интеграции данных навигационных измерений. Суть доработок и результат приведены и подробно описаны в [2]. Приводимые ниже зависимости сформированы по результатам имитационного моделирования процесса функционирования ЦКА с учетом всех доработок интегрального фильтра.

2.3. Обработка фазовых измерений в алгоритме интеграции данных

В связи с тем, что основная антенна ЦКА, выполняющая целевую функцию, должна быть всегда направлена на Землю [1], особую важность при навигационном определении играет оценка углов ориентации ЦКА. Стоит отметить, что использование фазовых измерений способствует повышению надежности определения компонент фазового вектора углового положения, а также может потенциально повысить точность этих определений [3]. Для получения фазовых измерений требуется установка блока антенн на ЦКА. Ниже описан алгоритм моделирования фазовых измерений, а также его программная реализация.

2.3.1. Математическая модель фазовых измерений

На рисунке 7 приведена общая схема формирования многоантенным ГНСС – приемником фазовых измерений.

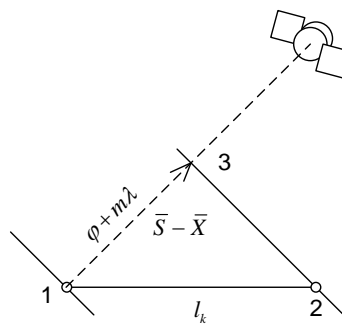


Рис. 7. Схема проведения фазовых измерений.

На рисунке 7 l_k - база антенны, имеющая концы в точках 1 и 2, в которых приемная антенна принимает сигнал от НКА; \vec{S} - радиус - вектор НКА, \vec{X} - радиус-вектор ЦКА.

Измеренная разность фаз пришедшего в точки 1 и 2 сигнала НКА, с учетом целого количества m уложившихся в отрезок 1-3 длин волн может быть представлена следующим соотношением:

$$\varphi + m\lambda = |l_k| \cdot \left((R^T \cdot l_k^o) \cdot (\vec{S} - \vec{X})^o \right), \quad (1)$$

где $|l_k|$ - длина антенной базы, $[\vec{S} - \vec{X}]^o$ - орт направления на НКА, по которому производятся измерения, полученный разностью радиус-вектора НКА и радиус-вектора ЦКА, l_k^o - орт антенной базы в связанной СК, λ - длина волны принятого сигнала, R^T - транспонированная матрицы перехода от инерциальной СК в связанную.

Конечное выражение для моделирования измерений имеет вид:

$$\varphi = \left(\left[\frac{|l_k| \cdot \left((R^T \cdot l_k^o) \cdot (\bar{S} - \bar{X})^o \right)}{\lambda} \right] - \left[\frac{|l_k| \cdot \left((R^T \cdot l_k^o) \cdot (\bar{S} - \bar{X})^o \right)}{\lambda} \right] \right) \cdot 360^o, \quad (2)$$

где $[]$ – операция взятия целой части.

2.3.2. Математическая модель определения углов ориентации ЦКА на основе фазовых измерений

Вектор l_k^o из выражения (2), характеризующий многоантенную систему ЦКА расположен вдоль связанных осей Ox , Oz :

$$l_k = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

Для использования фазовых измерений на борту необходимы компоненты векторов антенных баз в инерциальной системе координат. Матрица перехода от инерциальной к связанной СК определяется соотношением:

$$R = R_3 \times R_2 \times R_1, \quad (4)$$

где:

$$R_1 = R_z(u) \times R_x(i) \times R_z(\Omega) = \begin{pmatrix} \cos(u) \cdot \cos(\Omega) - \sin(u) \cdot \cos(i) \cdot \sin(\Omega) & \cos(u) \cdot \sin(\Omega) + \sin(u) \cdot \cos(i) \cdot \cos(\Omega) & \sin(u) \cdot \sin(i) \\ -\sin(u) \cdot \cos(\Omega) - \cos(u) \cdot \cos(i) \cdot \sin(\Omega) & -\sin(u) \cdot \sin(\Omega) + \cos(u) \cdot \cos(i) \cdot \cos(\Omega) & \cos(u) \cdot \sin(i) \\ \sin(i) \cdot \sin(\Omega) & -\sin(i) \cdot \cos(\Omega) & \cos(i) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R_2 = R_x(\pi) \times R_z\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_3 = R_z(\varphi_z) \times R_y(\varphi_y) \times R_x(\varphi_x) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_z) \cos(\varphi_y) & \sin(\varphi_z) \cos(\varphi_x) + \cos(\varphi_z) \sin(\varphi_y) \sin(\varphi_x) & \sin(\varphi_z) \sin(\varphi_x) - \cos(\varphi_z) \sin(\varphi_y) \cos(\varphi_x) \\ -\sin(\varphi_z) \cos(\varphi_y) & \cos(\varphi_z) \cos(\varphi_x) - \sin(\varphi_z) \sin(\varphi_y) \sin(\varphi_x) & \cos(\varphi_z) \sin(\varphi_x) + \sin(\varphi_z) \sin(\varphi_y) \cos(\varphi_x) \\ \sin(\varphi_y) & -\cos(\varphi_y) \sin(\varphi_x) & \cos(\varphi_y) \cos(\varphi_x) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Помимо измеренной фазы для получения навигационного решения необходимо разрешить неопределенность в виде числа m уложившихся в отрезок 1-3 длин волн сигнала

НКА. Это можно сделать, используя разность двух последовательных измерений до НКА. С учетом сказанного измерение будет иметь вид:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = |l_k| \cdot \left[\left(\left[R^T(\varphi_{X1}, \varphi_{Y1}, \varphi_{Z1}) \cdot l_k^o \right] \cdot [\bar{S} - \bar{X}]^o \right) - \left(\left[R^T(\varphi_{X2}, \varphi_{Y2}, \varphi_{Z2}) \cdot l_k^o \right] \cdot [\bar{S} - \bar{X}]^o \right) \right] \quad (8)$$

Продифференцировав приведенное выше выражение (8), можно получить компоненты матрицы наблюдаемости (Н):

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial(\varphi_X / \varphi_Y / \varphi_Z)} = |l_k| \cdot \frac{1}{|\bar{S} - \bar{X}|} \cdot \left[\frac{\partial \left(R^T(\varphi_1) \cdot l_k^o \cdot (\bar{S} - \bar{X}) \right)}{\partial(\varphi_X / \varphi_Y / \varphi_Z)} - \frac{\partial \left(R^T(\varphi_2) \cdot l_k^o \cdot (\bar{S} - \bar{X}) \right)}{\partial(\varphi_X / \varphi_Y / \varphi_Z)} \right] \quad (9)$$

Полученные таким образом компоненты матрицы Н используются для выработки поправок к оценкам углов ориентации ЦКА.

2.4. Модель антенной системы приемника ГНСС ЦКА

2.4.1. Апертура основной приемной антенны

Результаты имитационного моделирования процесса функционирования навигационной системы КА показали [1], что наличие активной помехи максимальной мощности значительно ухудшает условия наблюдаемости НКА. Для улучшения условий наблюдаемости необходимо разработать вид апертуры приемной антенны ГНСС ЦКА, который обеспечивал бы стабильный прием сигналов НКА в условиях противодействия помехи. Для решения данной задачи необходимо определить области, в которых необходимо обеспечить стабильный прием ГНСС сигнала, а также области, в которых необходимо максимальное ослабление любых принимаемых сигналов. При этом требуется выполнение двух условий: во-первых, необходимо ослабить прием в раскрыве приемной антенны, содержащий угловую зону напротив всей Земной поверхности, так как источник помехи располагается на Земле; во-вторых, необходимо предусмотреть минимально требуемое соотношение сигнал/шум в диапазоне углов визирования видимых НКА. Для определения такого диапазона были проведены дополнительные эксперименты, показавшие, что наиболее используемыми при приеме сигнала ГНСС являются углы визирования 18 – 23 градуса:

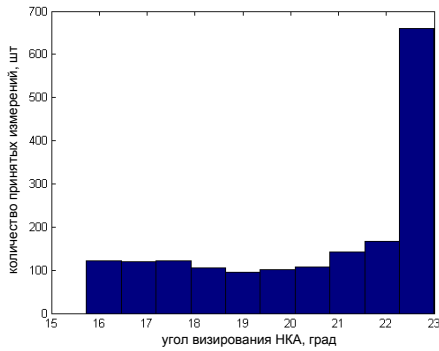


Рис. 8. Зоны приема сигналов ГЛОНАСС(1800 приемов).

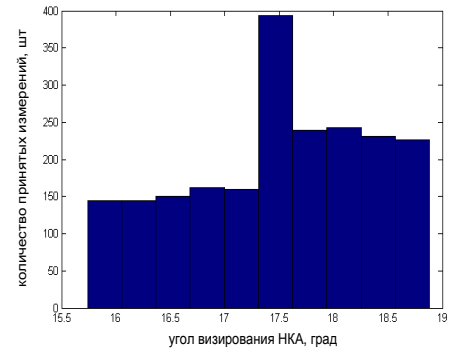


Рис. 9. Зоны приема сигналов GPS(2000 приемов).

На рисунках 8, 9 изображены гистограммы углов приема сигналов ГНСС приемной антенной ЦКА с удовлетворительным соотношением сигнал/шум. По оси ординат отложено количество полученных измерений, по оси абсцисс – угол принятия измерения (фактически он соответствует углу визирования НКА со стороны ЦКА). Границы диапазона 16 – 23 градуса, за которыми нет ни одного принятого и обработанного сигнала ГНСС обусловлены следующими ограничениями: до 16 градусов – перекрытием навигационного сигнала Землей и ее помехонасыщенной атмосферой, свыше 23 градусов – раскрывом излучающей антенны НКА ГНСС. Зависимость мощности принимаемого ГНСС сигнала от направления приема, полученная в результате натуральных экспериментов, приведена рисунке 10 [4]:

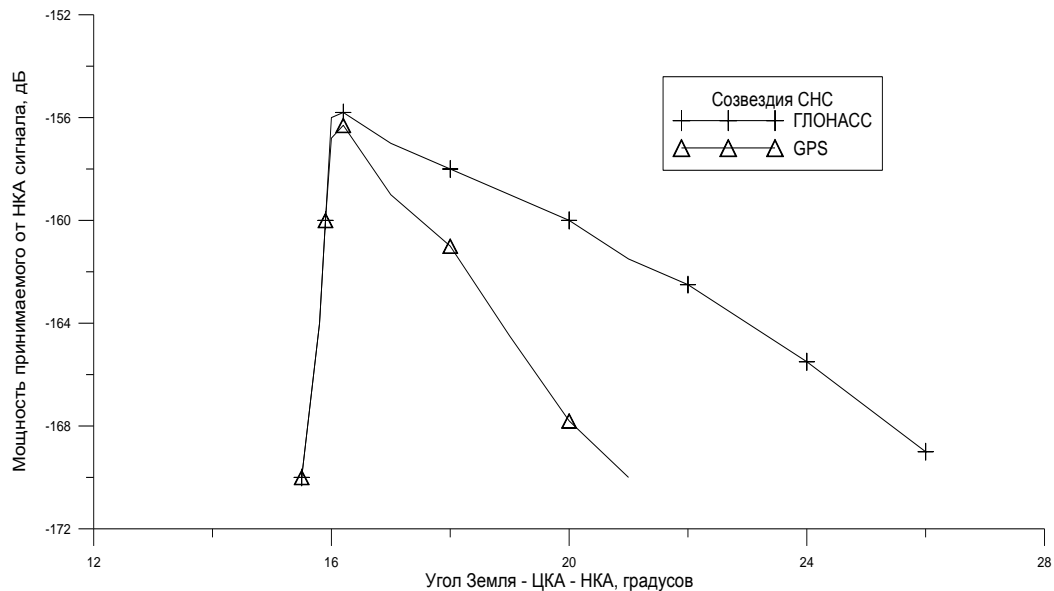


Рис. 10. Мощность принимаемого сигнала ГНСС в зависимости от угла приема.

С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод, что всю угловую область раскрыва приемной ГНСС–антенны ЦКА можно разделить на 3 зоны – внутренняя зона максимального

ослабления сигнала, средняя зона – зона приема ГНСС сигналов и 3 зона – ослабления сигнала. На рисунке 11 представлено центральное сечение идеальной апертуры, соответствующей выдвинутым требованиям.

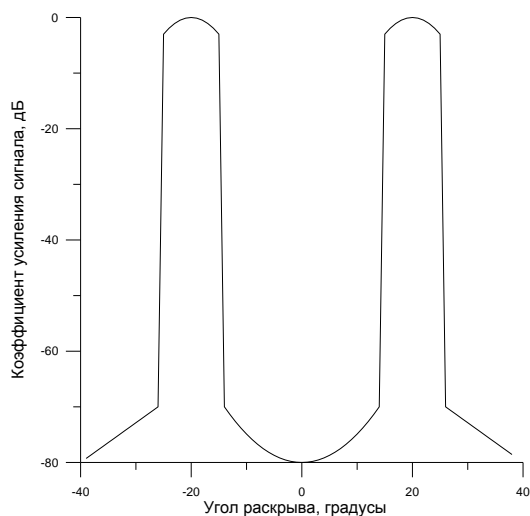


Рис. 11. Сечение идеальной апертуры приемной антенны – ГНСС.

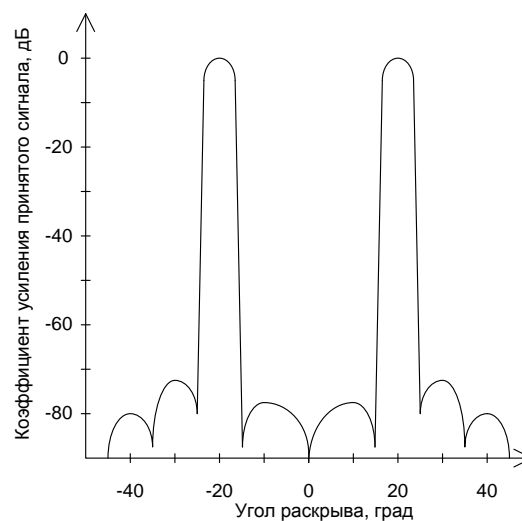


Рис. 12. Очертания используемой апертуры антенны ЦКА на ГСО

На рисунке 11 видно, что апертура антенны представляет собой два лепестка небольшой ширины, с максимумами, направленными в углы -20° и 20° . Исходя из значения максимальной мощности помехи -100 дБ и минимально возможного приема сигнала от НКА -164 дБ достаточным является максимальное ослабление антенны -80 дБ.

На практике подобный вид идеальной апертуры не достижим, поэтому при проведении имитационного моделирования целесообразно использовать наиболее близкую к требуемой диаграмму направленности существующих активных фазированных антенных решеток (АФАР), внешний вид которой представлен на рисунке 12.

Преимуществами предложенной формы диаграммы направленности антенной системы являются:

- Отсутствие необходимости изменения формы в процессе проведения навигационных измерений;
- Отсутствие необходимости изменения направления основных лепестков.

Использование подобной апертуры позволяет удешевить и упростить получаемую конструкцию приемной ГНСС антенны, так как при использовании предлагаемой диаграммы направленности антенны достаточным будет установка фазированной антенной решетки (ФАР) взамен дорогостоящей и энергоемкой АФАР.

Результаты имитационного моделирования с использованием в составе НС ГНСС–антенны с предложенной диаграммы направленности приведены на рисунках 13, 14 и 15:

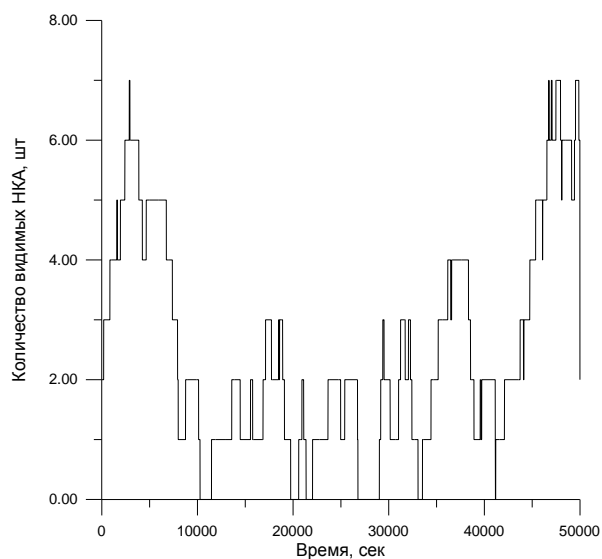


Рис. 13. Отсутствие помехи

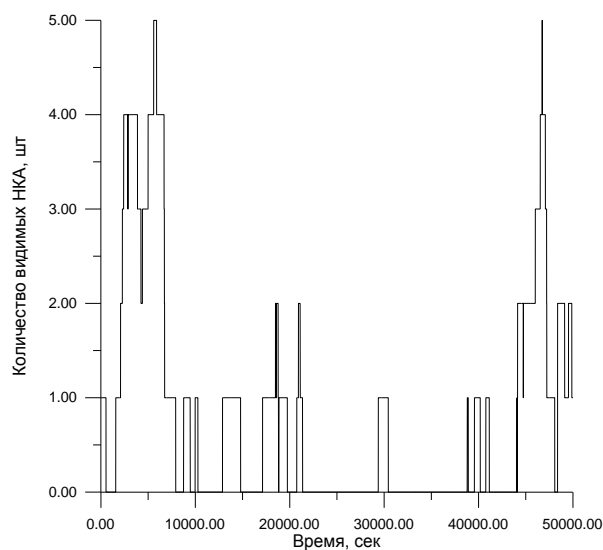


Рис. 14. Помеха максимальной мощности

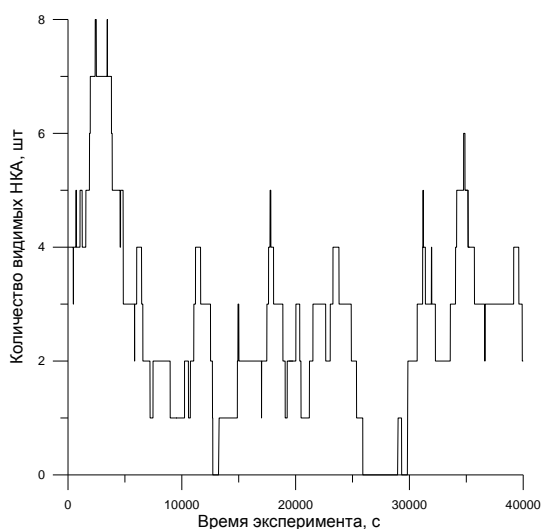


Рис. 15. Помеха максимальной мощности. Предложенная апертура диаграммы направленности приемной ГНСС – антенны

Полученные результаты показывают, что применение предложенной диаграммы направленности позволило эффективно подавлять помеху и производить измерения по максимальному количеству видимых НКА, доступных ранее только в отсутствие помехи.

2.4.2. Модернизированный блок приемных антенн для ЦКА на ВЭО

Результаты имитационного моделирования процесса функционирования навигационной системы ЦКА на ВЭО орбите показывают [1], что по сравнению с ЦКА на ГСО, условия

видимости и навигационных определений на протяжении всех экспериментов значительно хуже. Подробно причины этого факта уже были описаны в [1].

В настоящей работе предложено модернизировать для ЦКА на ВЭО антенную систему для обеспечения:

- приема ГНСС сигналов в «слепых» зонах на участках орбиты с высотами менее высоты ГНСС созвездий;
- эффективного подавления влияния мощной широкополосной помехи, направленной с Земли.

Для реализации этих требований ЦКА на ВЭО необходимо оснастить дополнительной приемной ГНСС-антенной, направленной в противоположную от направления основной антенны сторону. При этом возможны различные режимы работы такой двухантенной системы:

1. При снижении ЦКА до определенного значения высоты орбиты производится переключение на дополнительную антенну и прием ГНСС сигналов осуществляется через нее.
2. Одновременное использование обеих ГНСС-антенн с поочередной обработкой сигналов.

Ниже приведены зависимости количества видимых НКА основной и дополнительной антеннами в течении одного витка ЦКА:

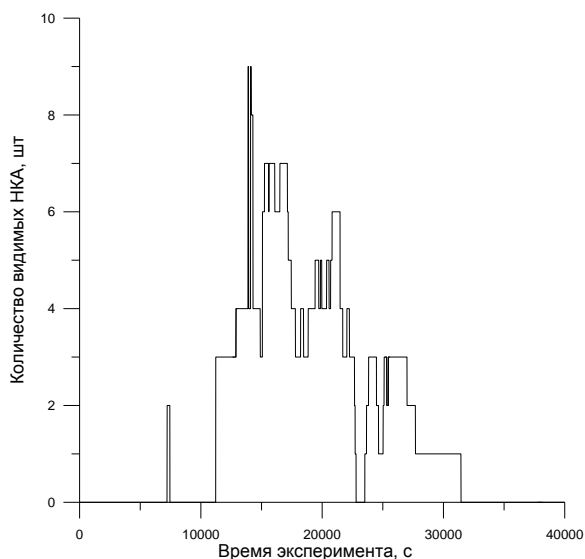


Рис. 16. Основная антенна.

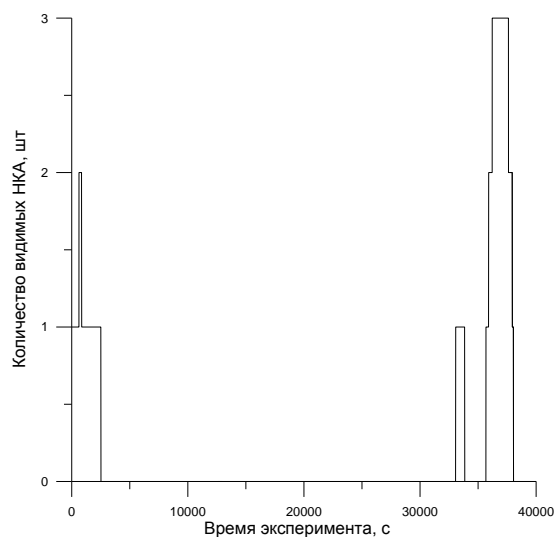


Рис. 17. Дополнительная антенна

Зависимости, приведенные на рисунках 16 – 17, показывают, что в случаях отдельного использования обеих антенн, прием ГНСС сигналов обеспечивается со значительными по времени интервалами отсутствия видимых НКА. Однако, совместное использование обеих

антенных систем позволяет частично перекрыть пустые зоны каждой из антенн и таким образом сократить промежутки, когда количество видимых НКА равно нулю, что и отображено на рисунке 18:

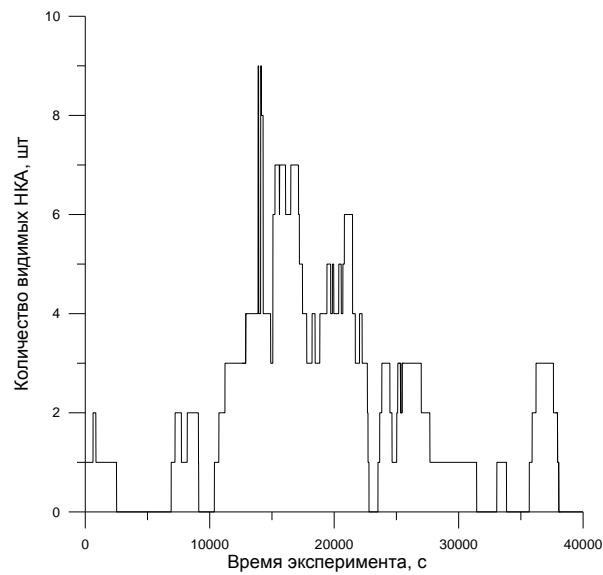


Рис. 18. Совместное использование антенн.

Стоит добавить, что в условиях наличия мощной помехи со стороны Земли вторая приемная антенна не подвержена ее влиянию и, как следствие, для этой антенны условия приема не меняются. Это отображено на графиках количества видимых НКА каждой из антенн в условиях наличия помехи максимальной мощности:

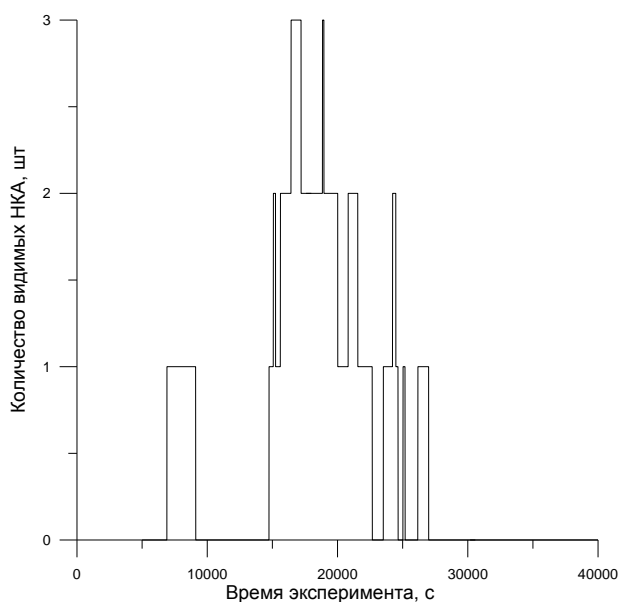


Рис. 19. Основная антенна.

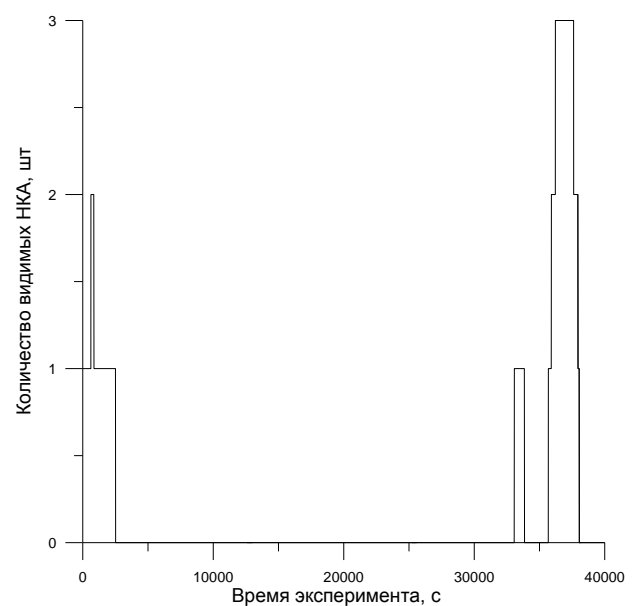


Рис. 20. Дополнительная антенна

Эволюция количества видимых НКА при совместном использовании обеих антенн, функционирующих в условиях действия широкополосной помехи, приведена на рисунке 21.

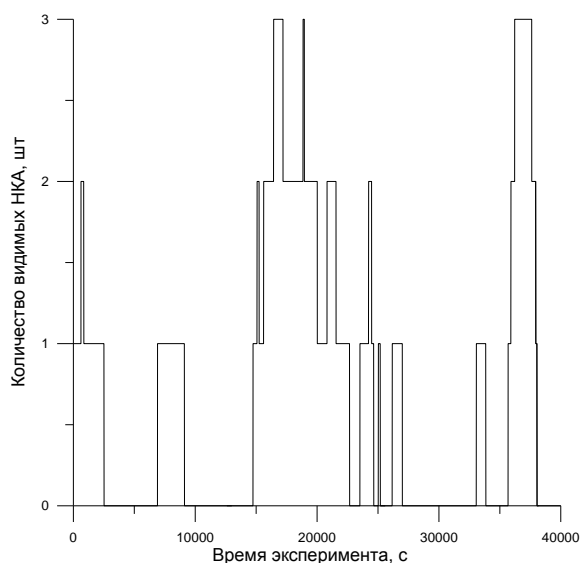


Рис. 21. Совместное использование антенн при помехе.

3. Результаты имитационного моделирования

В целях анализа эффективности произведенных доработок астро-спутниковой системы было проведено имитационное моделирование процесса движения ЦКА. В целях обеспечения идентичности условий моделирования ранее проведенным экспериментам[1], исходные данные для ЦКА были взяты без изменений.

Результаты проведенного моделирования представлены в виде зависимостей, иллюстрирующих эволюции ошибок оценок фазового вектора (ФВ) ЦКА. По оси абсцисс на всех зависимостях отложено время моделирования в секундах. Размерность оси ординат на графиках в случае отображения ошибок координат выражена в метрах, в случае отображения ошибок определения угловой ориентации – в радианах.

3.1. Геостационарная орбита

Ниже в серии рисунков 22-27 представлены ошибки оценок компонент и углов ФВ ЦКА на геостационарной орбите в условиях помех.

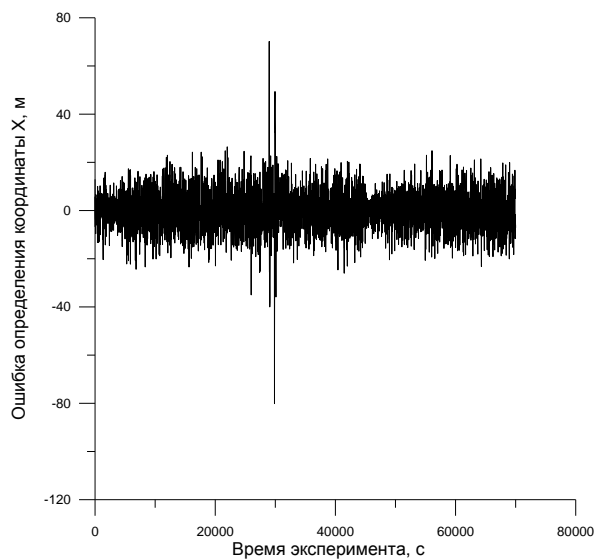


Рис. 22. Ошибка определения координаты X ЦКА на ГСО.

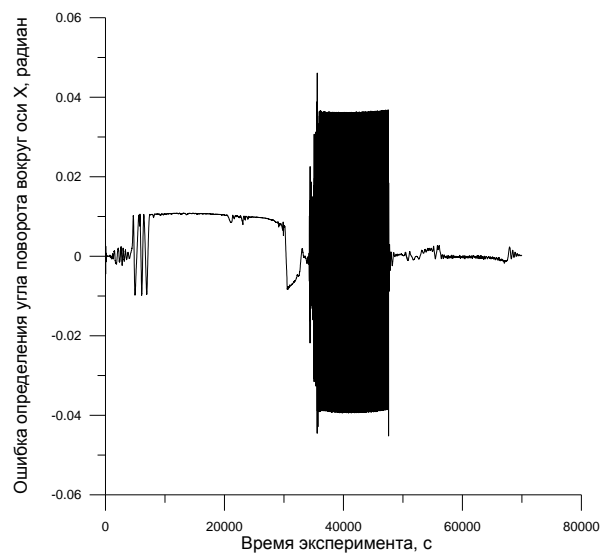


Рис. 25. Ошибка определения угла поворота ЦКА вокруг оси X.

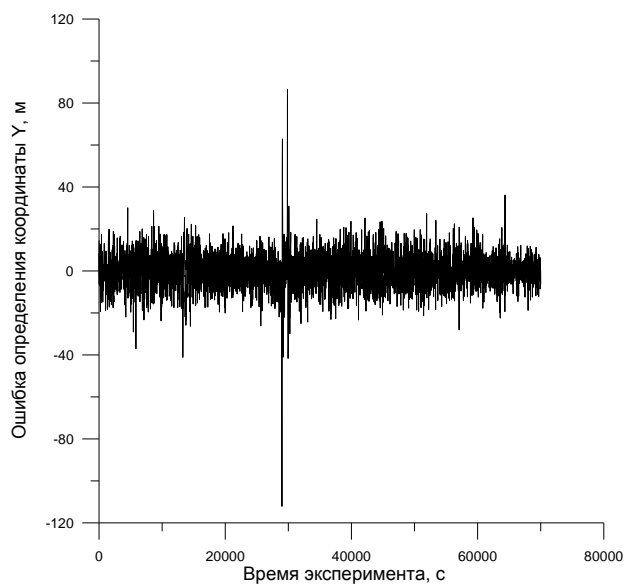


Рис. 23. Ошибка определения координаты Y ЦКА на ГСО.

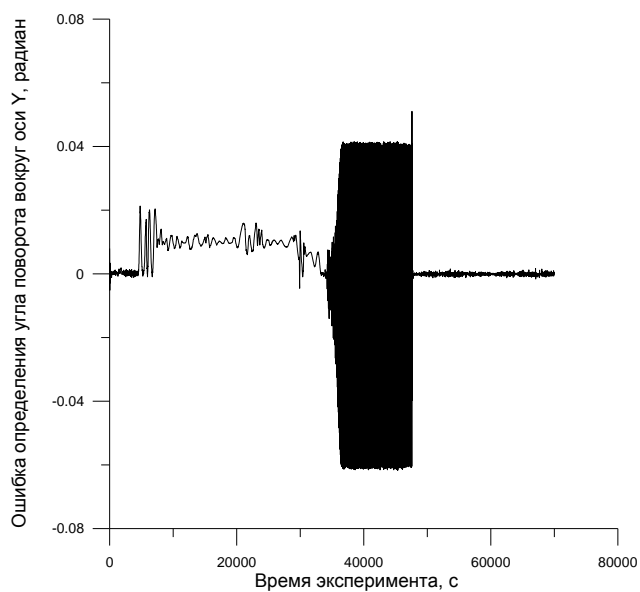


Рис. 26. Ошибка определения угла поворота ЦКА вокруг оси Y.

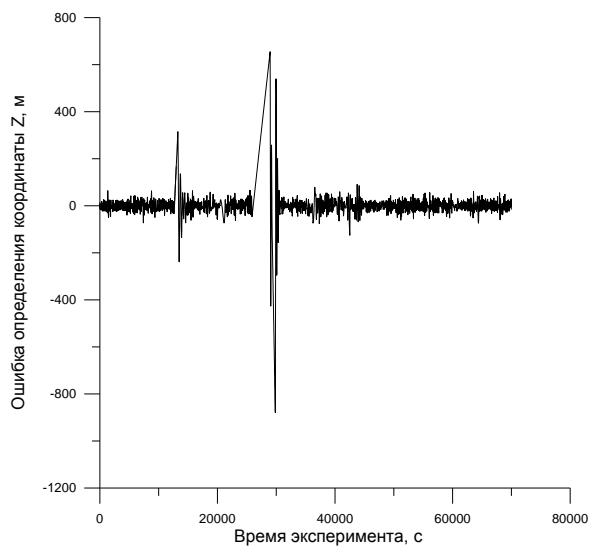


Рис. 24. Ошибка определения координаты Z ЦКА на ГСО.

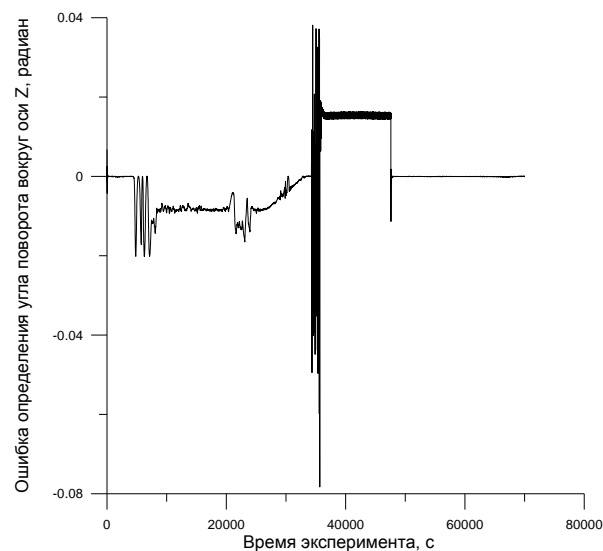


Рис. 27. Ошибка определения угла поворота ЦКА вокруг оси Z.

Зависимости на рисунках 22–24 показывают, что процесс оценивания координат ЦКА на ГСО бортовой навигационной системой в целом устойчив. Как уже было сказано ранее, колебания в районе 30000 секунды происходят при резкой смене условий наблюдаемости. Подтверждение этому можно найти на рисунке 28, где отображено количество видимых НКА. В результате изменения их количества интегральный фильтр обработки измерений работает в переходном процессе, который отчетливо виден на рисунках 22–24. Однако, в конечном итоге, процесс навигационных определений возвращается в штатный режим работы и уровень ошибок определения координат составляет порядка 20 метров.

Характер зависимостей эволюций ошибок определения углов ориентации ЦКА отличается от зависимостей ошибок определения координат. Это вызвано тем, что, прежде всего, количество измерений, передаваемых астросистемой интегральному фильтру, всегда равно трем и всегда меньше количества измерений, получаемых ГНСС – приемником при наличии большого числа видимых НКА. Поэтому переходные процессы фильтра, возникающие в результате смены условий наблюдаемости НКА, приводящие к росту ошибок определения координат, приводят также к сильной расходимости выдаваемого решения определения угловой ориентации. В таких случаях, в связи с малым числом измерений и наличием большой ошибки в определении координат, астросистема хуже справляется с решением своей задачи, что и проиллюстрировано на рисунках 25–27, где в районе 40000 секунды идет длительный переходный процесс на грани устойчивости фильтра. Однако, благодаря подбору параметров фильтра в результате итеративных коррекций и восстановления ковариационных матриц ошибки определения углов

стабилизировались возле нулевых значений, что и продемонстрировано на конечном участке эксперимента после 50000 секунды на рисунках 25-27.

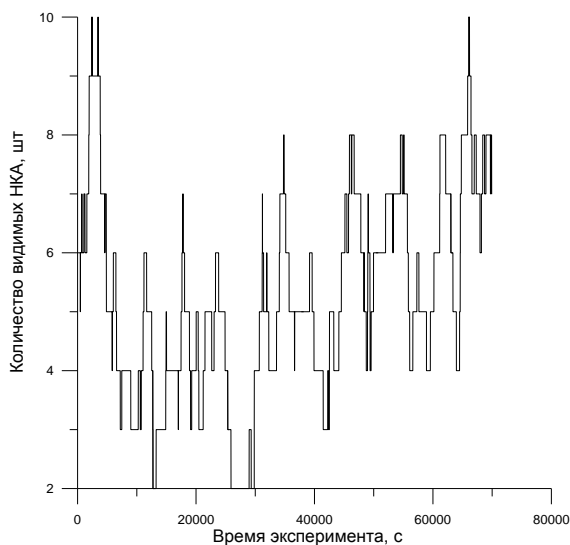


Рис. 28. Количество видимых НКА приемной ГНСС антенне ЦКА на ГСО.

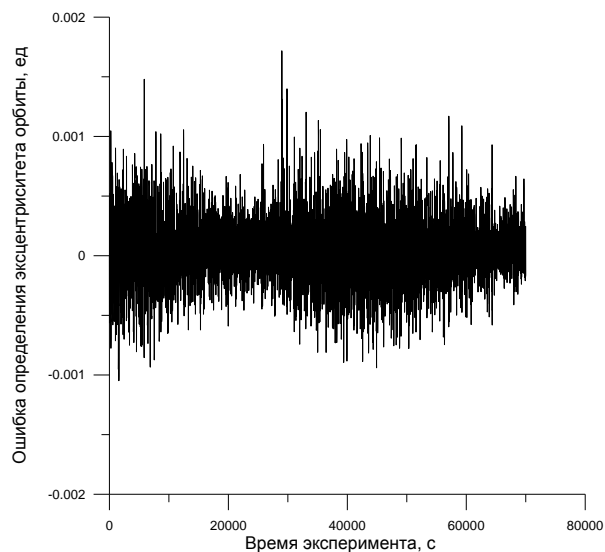


Рис. 29. Ошибка определения эксцентриситета орбиты ЦКА на ГСО.

Для определения степени деформированности опорной орбиты, генерируемой интегрированным навигационным комплексом, приведен рисунок 29, отображающий эволюцию ошибок определения эксцентриситета в пределах 0.001.

3.2.Высокоэллиптическая орбита

Ниже рассмотрены ошибки оценок компонент ФВ ЦКА на высокоэллиптической орбите.

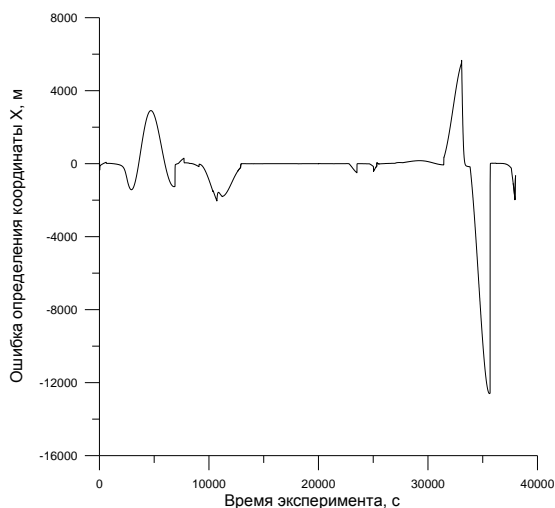


Рис. 30. Ошибка определения координаты X ЦКА на ВЭО.

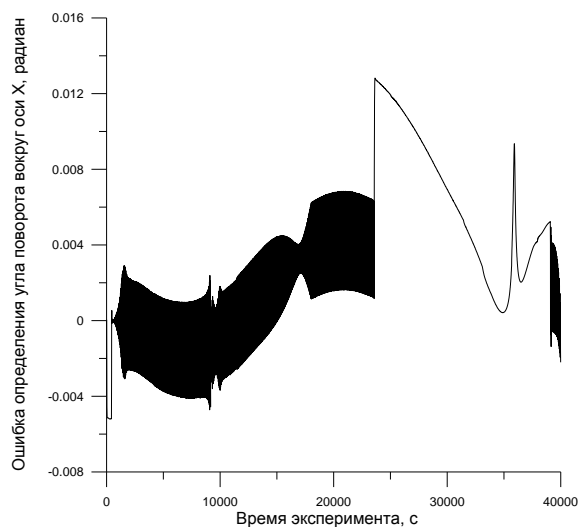


Рис. 33. Ошибка определения угла поворота ЦКА вокруг оси X.

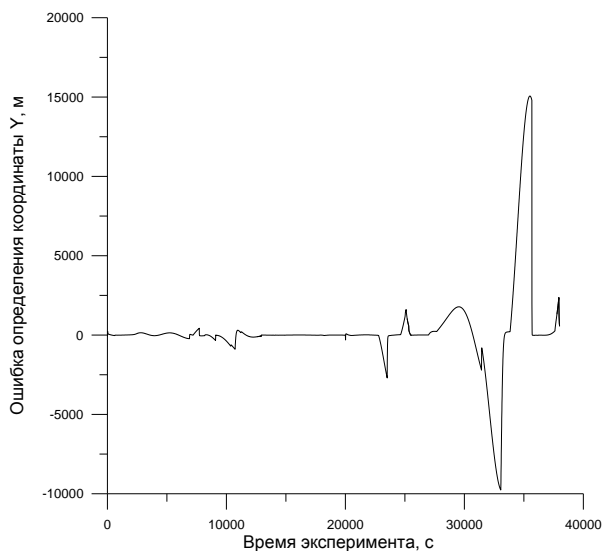


Рис. 31. Ошибка определения координаты Y ЦКА на ВЭО.

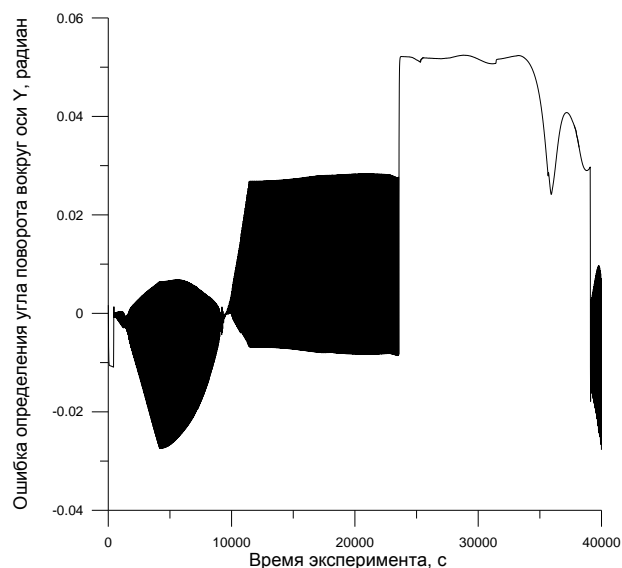


Рис. 34. Ошибка определения угла поворота ЦКА вокруг оси Y.

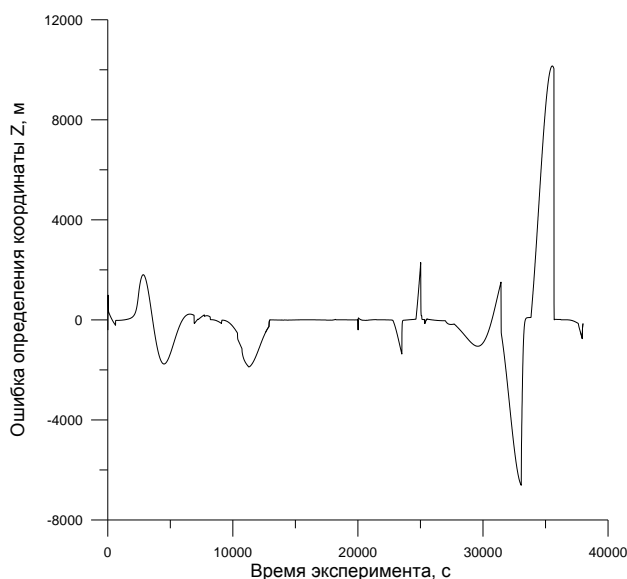


Рис. 32. Ошибка определения координаты Z ЦКА на ВЭО.

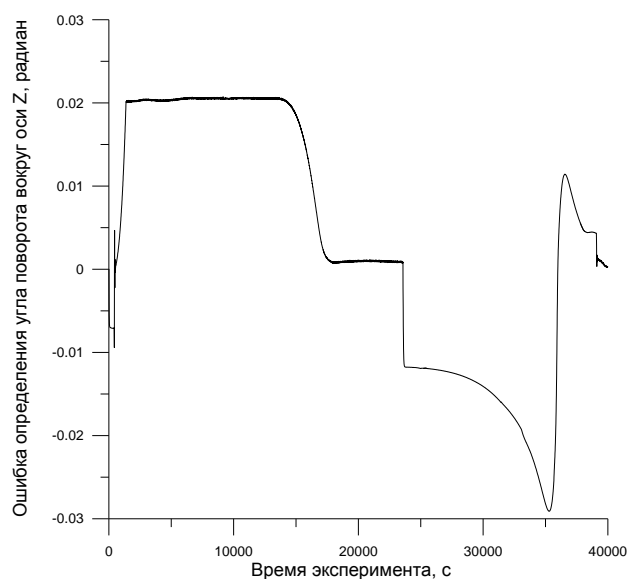


Рис. 35. Ошибка определения угла поворота ЦКА вокруг оси Z.

Как неоднократно отмечалось ранее, условия наблюдаемости в процессе навигационного определения ЦКА на ВЭО значительно хуже, чем у ЦКА на ГСО. Однако, как свидетельствуют зависимости, представленные на рисунках 30–32, в результате проведенной модернизации используемых моделей и алгоритмов процесс навигационных определений остается стабильным в течение всего витка ЦКА. В результате использования модернизированной антенной системы значительно увеличилось количество видимых НКА и, как следствие, возросла точность вырабатываемых навигационных определений.

Рассмотрим эволюции ошибок определения углов ориентации ЦКА. В связи с тем, что оценка углов ориентации производится напрямую обработкой измерений от астродатчиков, угловые составляющие фазового вектора оцениваются НС ЦКА на ВЭО примерно с такой же точностью, как у ЦКА на ГСО. Небольшой рост уровня ошибок в определении углов ориентации ЦКА на ВЭО по сравнению с ЦКА на ГСО обусловлен большим количеством всплесков в ошибках определения координат. Периоды резкого роста этих ошибок хорошо видны на рисунках 33–35. По этой же причине у ЦКА на ВЭО отсутствуют ярко выраженные установившиеся режимы работы фильтра, когда ошибки колеблются возле нуля, как это происходит в случае ЦКА на ГСО и отображено на рисунках 22–27. В итоге, можно утверждать, что для ЦКА на ВЭО характерен постоянный переходной режим работы интегрального фильтра. Однако, в отличие от ранее полученных экспериментов [1], навигационное решение сохраняет устойчивость в процессе функционирования ЦКА на всем витке ВЭ орбиты.

4.Выводы

В результате проведенной модернизации разработанной ранее астро-спутниковой навигационной системы удалось существенно улучшить характеристики формируемого ею навигационного решения, в частности:

1. В значительной степени исключить участки, на которых отсутствует возможность приема ГНСС-сигналов при движении ЦКА на ГСО и ВЭО. При этом минимальное число видимых НКА определяется количеством КА, привлекаемых для реализации межспутниковых измерений;
2. Обеспечить избыточность и робастность процесса определения ориентации ЦКА путем привлечения дополнительных фазовых ГНСС измерений;
3. Повысить точность генерируемых интегральным фильтром навигационных решений и исключить участки «неустойчивой» работы интегрального фильтра;
4. Повысить помехозащищенность приемной ГНСС антенны за счет доработки ее апертуры, что позволило увеличить число видимых в условиях помех НКА в среднем с 1 до 3;

Таким образом, проведенная модернизация ПМО интегрированной навигационной системы обеспечила следующие характеристики точности решения навигационной задачи:

□ Таблица 1

	Модернизированное ПМО	Исходное ПМО
по эксцентриситету на ГСО	СКО = 0.001	СКО = 0.005
по эксцентриситету на ВЭО	СКО = 0.003	СКО = 0.03

Библиографический список

1. Кружков Д.М. "Оценка точности астро-спутниковой интегрированной навигационной системы спутника связи". Труды МАИ, №51, 2012.
2. Кружков Д.М. "Точностные характеристики бортовой интегрированной навигационной системы спутника связи". Труды МАИ, №57, 2012.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. Под редакцией М.Н. Красильщикова и Г.Г. Себрякова, М., Физматлит, 2009
4. Булынин Ю.Л., Гречкосеев А.К., Гречкосеева Д.Д. Результаты баллистико-навигационного обеспечения геостационарных спутников ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф.Решетнева. 15-я международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Материалы конференции, Евпатория, Украина, 2010.