

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОБОСНОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Власов В.А.¹, Горбулин В.И.¹, Каргу Д.Л.¹, Паршин А.В.¹

¹ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), vlasovsl@rambler.ru

Рассмотрены актуальные вопросы разработки формирования облика перспективной сети станций системы контроля целостности радионавигационного поля системы ГЛОНАСС, которая позволит улучшить основные показатели качества функционирования системы, такие как устойчивость работы, точность определения места объекта, доступность системы, целостность системы, непрерывность функционирования. Предложена новая постановка задачи обоснования размещения сети наземных станций радиоконтроля в предположении, что часть станций уже существует. Требуется минимизировать количество дополнительных станций, обеспечивающих экстремум заданной целевой функции. Отмечено, что выбор мест расположения может быть основан на задаче покрытия сферы кругами. Однако в работе предложена постановка задачи, учитывающая не только участки с трехкратным, но и с двукратным и однократным покрытием орбиты космического аппарата зонами радиоконтроля. Предлагается расчет покрытия зон радиоконтроля наземных станций проводить с использованием математического аппарата метода наложения орбитальных карт, характеризующегося низкой вычислительной сложностью алгоритмов, что позволяет выполнять расчеты для комбинаторных задач высокой размерности.

Ключевые слова: навигационный космический аппарат, глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС, сеть станций, целостность навигационного поля.

THE FORMALIZATION OF THE PROBLEM OF SUBSTANTIATING A GLOBAL NETWORK INTEGRITY MONITORING OF GLONASS NAVIGATION FIELD

Vlasov V.A.¹, Gorbulin V.I.¹, Kargu D.L.¹, Parshin A.V.¹

¹Military Space academy n.a. A.F.Mozhaisky, Saint-Petersburg, Russia (197198, Saint-Petersburg, street Zhdanovskaya, 13), vlasovsl@rambler.ru

The actual design issues shaping the image of a promising network of stations radio navigation system integrity checking field GLONASS system, which will improve the basic quality parameters of the system, such as the stability of the accuracy of determining the place of an object, system availability, system integrity, continuity of function. A new formulation of the problem justify placing a network of ground monitoring stations on the assumption that some of the stations already exists. Is required to minimize the number of additional stations providing the extremum of the predetermined target function. It is noted that the selection of the locations may be based on the problem of coating the sphere circles. However, in the proposed formulation of the problem taking into account not only the sections with a triple, but also with a double and a single coating of the orbit of the spacecraft radio zones. It is proposed to cover the settlement zones radio ground stations to carry out using the mathematical apparatus of the overlay method orbital cards, characterized by low algorithm complexity computing algorithms to perform calculations for combinatorial problems of high dimensionality.

Keywords: spacecraft navigation, global navigation satellite system GLONASS, a network of stations, the integrity of the navigation field.

В целях более полного удовлетворения требований потребителей навигационной информации в настоящее время глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС совершенствуется в направлении улучшения основных показателей качества функционирования системы [1], а именно:

- повышение устойчивости работы, особенно в условиях помех;
- повышение точности определения места объекта;
- повышение доступности информации;

- повышение целостности информации;
- обеспечения непрерывности функционирования.

Одним из главных источников снижения указанных показателей являются сбои в работе аппаратуры или программно-алгоритмического обеспечения космических аппаратов. Для устранения негативных последствий таких ситуаций разработан специальный комплекс технических и организационных мероприятий, позволяющих вносить соответствующие коррективы в навигационную аппаратуру потребителя. Способность космической системы оперативно реагировать на нештатные ситуации характеризуется показателем, получившим наименование целостности системы [1].

Целостность космической системы ГЛОНАСС – это её способность выдавать потребителю своевременное и достоверное предупреждение в тех случаях, когда какие-либо сигналы нельзя использовать по целевому назначению в полном объеме. Характеризуется целостность соответствующей вероятностью.

В настоящее время растут требования к точности и целостности навигационных определений. Однако штатные средства системы ГЛОНАСС не могут удовлетворить эти возрастающие потребности и характеризуются низкой оперативностью оповещения потребителей о нарушениях целостности [1]. Пользовательские алгоритмы контроля целостности также не обеспечивают надежного обнаружения нарушения целостности при неблагоприятной геометрии навигационных космических аппаратов.

Решение указанных задач возможно за счет создания системы контроля целостности радионавигационного поля (СКРЦНП) системы ГЛОНАСС, которая позволит обеспечить потребителей навигационными определениями с требуемой точностью в реальном времени и мониторинг целостности ГНСС ГЛОНАСС в реальном времени. СКРЦНП должна вырабатывать два типа данных: информацию целостности и корректирующую информацию. Задачами СКРЦНП является ведение оперативного мониторинга целостности, ведение апостериорного мониторинга целостности, обеспечение требуемой точности определения координат в реальном времени.

Выбор количества и конкретных мест базирования дополнительных станций сети СКРЦНП должен быть основан на решении математической оптимизационной задачи, формулировка которой заключается в следующем.

Пусть сеть СКРЦНП имеет в своем составе K_{const} функционирующих станций с координатами $Y_{const} = [(\varphi_1, \lambda_1), (\varphi_2, \lambda_2), \dots, (\varphi_{K_{const}}, \lambda_{K_{const}})]^T$. Средства выделяются на создание и эксплуатацию дополнительных K_{var} станций, которые могут быть размещены в $K_{доп}$ ($K_{var} \leq K_{доп}$) дополнительных точках, образующих множество

$M_{\text{доп}}, |M_{\text{доп}}| = \text{card}(M_{\text{доп}}) = K_{\text{доп}},$ с координатами $Y_{\text{доп}} = [(\varphi_1, \lambda_1), (\varphi_2, \lambda_2), \dots, (\varphi_{K_{\text{доп}}}, \lambda_{K_{\text{доп}}})]^T.$

Требуется определить координаты K_{var} станций, вводимых дополнительно в эксплуатацию, таких, чтобы при известных ограничениях обеспечить экстремум некоторой целевой функции $P.$ Иными словами, из множества $M_{\text{доп}}$ возможных точек размещения станций требуется определить такое подмножество $M_{\text{var}}^* (M_{\text{var}}^* \subseteq M_{\text{доп}}, |M_{\text{var}}^*| = \text{card}(M_{\text{var}}^*) = K_{\text{var}}),$ чтобы обеспечить экстремум целевой функции $P(M_{\text{var}}^*)$ при заданных ограничениях:

$$M_{\text{var}}^* = \arg \underset{M_{\text{var}}^* \subseteq M_{\text{доп}}}{\text{extr}} P(M_{\text{var}}^*; M_{\text{const}}).$$

Здесь символами $|\cdot|, \text{card}$ обозначена мощность множества.

Окончательный выбор вида целевой функции и ограничений зависит от конкретных условий, в которых принимается решение. Наиболее распространенными являются следующие варианты целевой функции и ограничений: либо надо максимизировать технические показатели при заданном уровне экономических ресурсов, либо, наоборот, необходимо обеспечить требуемый уровень технических показателей при минимуме инвестиционных затрат. В статье предлагается рассмотреть техническую сторону вопроса при условии, что стоимость и эксплуатационные затраты всех станций одинаковы.

При рассмотрении технических показателей функционирования системы зачастую в качестве целевой функции принимают вероятность выполнения целевой задачи. Применительно к рассматриваемым вопросам выбора сети станций целевой задачей можно считать своевременное обнаружение факта нарушения целостности навигационного поля вследствие сбоя функционирования одного из космических аппаратов (КА), а также определение номера этого спутника («фальшь-КА»). Искажение навигационного поля устраняется за счет того, что «фальшь-КА» временно выводится из процесса формирования навигационного поля до тех пор, пока выявленные сбои не будут устранены.

Следует подчеркнуть, что данная процедура является весьма ответственной: вероятность ошибочного выведения из состава орбитальной группировки одного из спутников должна быть близкой к нулю. Для выполнения данного жесткого требования принят мажоритарный принцип принятия решения: каждый навигационный КА (НКА) должен контролироваться одновременно тремя станциями. Тогда в течение времени $\Delta t_{\text{расч}}$ на основании расчетов по некоторому алгоритму каждая станция вырабатывает признак (метку) о годности или негодности сигналов данного НКА. Если отрицательных признаков будет два или три из трёх, то рассматриваемый спутник временно выводится из процесса формирования навигационного поля.

Для того, чтобы каждый из КА системы находился в зонах радиовидимости по крайней мере трех станций, достаточно трехкратного покрытия сферы, содержащей круговые орбиты навигационных спутников. Для поиска количества и мест расположения станций необходимо решить задачу комбинаторной геометрии о покрытии сферы равновеликими кругами [2].

Следует подчеркнуть, что обоснование глобальной сети станций на основе реализации методов комбинаторной геометрии сопряжено с необходимостью их усовершенствования, позволяющего учитывать различие геометрических параметров зон радиовидимости. Кроме того, получаемое решение будет избыточным, поскольку, вообще говоря, требуется покрывать не всю сферу, а только орбиты спутников. Поэтому далее будет рассмотрен альтернативный способ обоснования глобальной сети станций, основанный на баллистических методах расчета интервалов радиовидимости.

Вероятность выполнения целевой задачи при реализации мажоритарного принципа характеризуется отношением суммарной длины $L_{Dostup \geq K_{3AD}}^*$ участков трассы КА, на которых показатель доступности больше или равен трем ($K_{3AD} = 3$), к общей длине трассы $L_{\text{трассы замык}}$

$$P(M_{\text{var}}; M_{\text{const}}) = \frac{L_{Dostup \geq K_{3AD}}^*}{L_{\text{трассы замык}}}.$$

Поскольку длина трассы от варианта расположения станций не зависит, то целевая функция (вероятность решения целевой задачи) фактически становится эквивалентной длине $L_{Dostup \geq K_{3AD}}^*$ участков трассы, на которых значение показателя доступности (кратности покрытия) больше или равно трем

$$P(M_{\text{var}}; M_{\text{const}}) = L_{Dostup \geq K_{3AD}}^*.$$

Исследования показали, что для получения лучших показателей целесообразно станции размещать «равномерно» вдоль трассы КА как на всей поверхности Земли (здесь уместно отметить, что в общем случае строгое решение задачи о редчайшем расположении точек на сфере и родственной задачи о покрытии сферы равновеликими кругами до сих пор не получено), так и на территории Российской Федерации. Однако на практике такой подход представляется практически не осуществимым. Места возможного расположения станций распределяются неравномерно, несколькими группами (кластерами). Из каждого кластера наибольший вклад в трехкратное покрытие трассы приносят те три станции, которые расположены как можно ближе друг к другу. С другой стороны, станции из удаленных кластеров обеспечивают сравнительно малое трехкратное покрытие трассы, хотя доля двукратного покрытия остается значительной. В этой связи возникает закономерный вопрос:

если на участке двукратного покрытия трассы спутник получает две отрицательные метки, то является ли это условие достаточным для «отключения» данного КА? Ведь если бы рядом оказалась третья станция, то её положительный признак никак не повлиял бы на принимаемое решение. Представленные аргументы позволяют сделать важный вывод: при синтезе сети наземных станций необходимо учитывать не только участки с трехкратным, но и с двукратным покрытием трассы КА зонами радиоконтроля, а в перспективе (после усовершенствования соответствующих алгоритмов принятия решения) – и участки однократного покрытия. Поэтому целесообразно математическую постановку задачи рассматривать в более общем виде.

Пусть на участках трассы КА, на которых обеспечивается значение показателя не менее трех, т.е. трехкратный (и более) контроль станциями сети СКРЦНП, условная вероятность безошибочного определения за время $\Delta t_{\text{расч}}^{[3]}$ факта сбоя функционирования рассматриваемого навигационного спутника задается величиной $p_{\text{усл}}^{[3]}$. Пусть, кроме того, процесс обнаружения нарушения целостности навигационного поля вследствие отклонений в режиме работе анализируемого НКА характеризуется следующими параметрами:

- длительностью расчетов $\Delta t_{\text{расч}}^{[2]}$ и условной вероятностью $p_{\text{усл}}^{[2]}$, если спутник контролируется двумя станциями одновременно;
- длительностью расчетов $\Delta t_{\text{расч}}^{[1]}$ и условной вероятностью $p_{\text{усл}}^{[1]}$, если спутник контролируется только одной станцией.

Тогда вероятность $P(M_{\text{var}}; M_{\text{const}})$ выполнения целевой задачи сетью СКРЦНП, характеризуемой параметрами $(M_{\text{var}}; M_{\text{const}})$, т.е. вероятность своевременного безошибочного обнаружения сетью факта нарушения целостности навигационного поля вследствие сбоев функционирования одного из КА, а также определения номера этого спутника, определится следующим соотношением:

$$P(M_{\text{var}}; M_{\text{const}}) = \sum_{k=1}^{K_{\text{зАД}}} P_{\text{Dostup}=k} \cdot P_{\text{усл}}^{[k]},$$

где $P_{\text{Dostup}=k}$ – вероятность того, что НКА находится на участке орбиты, для которого показатель доступности равен k . Эта вероятность имеет геометрическую трактовку и рассчитывается по формуле

$$P_{\text{Dostup}=k} = \frac{L_{\text{Dostup}=k}^* - \omega_{\text{НКА}} \cdot \Delta t_{\text{расч}}^{[k]}}{L_{\text{трассы замык}}},$$

где $\omega_{\text{НКА}}$ – средняя угловая скорость вращения НКА по орбите:

$$\omega_{\text{НКА}} = \frac{V_{\tau}}{r} = \frac{V \cdot \cos \theta}{r},$$

V – модуль вектора скорости \vec{V} движения НКА по орбите; θ – угол между вектором скорости \vec{V} НКА и радиусом-вектором \vec{r} .

Исходными данными для расчета данного показателя являются:

1) длительность l -го интервала времени $T_{\text{Dostup}=K_{\text{ЗАД}}}^{[l]}$, в течение которого навигационный сигнал от рассматриваемого КА доступен заданному количеству станций $K_{\text{ЗАД}}$, т.е. текущее значение показателя доступности $Dostup(t)$ для данного спутника равно $K_{\text{ЗАД}}$. Здесь обозначено:

$\sim t$ – текущий момент времени;

$\sim l$ – номер интервала времени, на котором обеспечивается наблюдение КА заданной краткости $K_{\text{ЗАД}}$;

$\sim Dostup_j(t) = \sum_{k=1}^K Dostup_{jk}(t)$ – показатель доступности j -го КА ($j = 1, \dots, J$, J – количество

спутников в орбитальной группировке), определяемый общим количеством станций, которым в текущий момент времени t доступен навигационный сигнал данного спутника, где k – номер станции, $K = K_{\text{const}} + K_{\text{var}}$ – количество станций в сети. Поскольку все КА орбитальной группировки имеют одну и ту же повторяющуюся через 17 витков трассу (этот период времени иногда называют интервалом замыкания трассы $T_{\text{ЗАМЫК}}$), то все спутники, с точки зрения анализа показателей качества наземных станций сети СКРЦНП, находятся в одинаковых условиях. Поэтому в дальнейшем индекс j опускается, исследуется показатель доступности одного КА. Здесь уместно отметить, что в литературе встречаются и другие наименования этого показателя такие, как «степень покрытия витка», «кратность наблюдения КА» наземными станциями и т.п.

2) длительность $\Delta t_{\text{расч}}$ интервала времени, потребного для проведения расчетов $T_{\text{Dostup}=K_{\text{ЗАД}}}^{[l]}$.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать программное обеспечение, основанное на математическом аппарате метода наложения орбитальных карт [3–5]. Меньшая вычислительная сложность алгоритмов позволяет выполнять расчеты для комбинаторных задач высокой размерности.

Таким образом, рассмотрена формализация задачи обоснования глобальной сети контроля целостности навигационного поля системы ГЛОНАСС. Предложены два основных

пути решения поставленной задачи. Первый основан на решении задачи комбинаторной геометрии о покрытии сферы равновеликими кругами. Второй путь основан на баллистических методах расчета интервалов радиовидимости. Анализ показал, что более предпочтительным является второй подхода, реализация которого позволит решить задачу минимизации количества дополнительных станций системы контроля радионавигационного поля системы ГЛОНАСС при заданной вероятности выполнения целевой задачи сетью СКРЦНП.

Список литературы

1. Сайт проекта *Spacecorp* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spacecorp.ru/press/publications/item108.php> (дата обращения: 21.01.14).
2. Горбулин В.И. Оптимизация орбитального построения глобальных космических систем наблюдения: учеб. пособие. – СПб.: МО РФ, 2001. – 172 с.
3. Горбулин В.И. Использование орбитальных карт для разработки метода расчета показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли // Информация и космос. – 2009. - № 4. – С. 66–74.
4. Горбулин В.И. Применение кватернионов для аналитического расчета интервалов наблюдения спутником заданного объекта // Информация и космос. – 2009. - № 3. С. 62–67.
5. Горбулин В.И. Оперативный расчёт интервалов наблюдения заданной длительности космических аппаратов на круговых и эллиптических орбитах // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 131. № 6. – С. 19–22.

Рецензенты:

Петров Г.Д., д.т.н., профессор, начальник кафедры организации эксплуатации и технического обеспечения вооружения, военной и специальной техники ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург;

Басыров А.Г., д.т.н., профессор, начальник кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.