

УДК 621.396.67

СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ

А. А. Алексеенко¹, Е. В. Бикеев¹, М. О. Дорофеев¹, М. В. Лукьяненко², М. Г. Матыленко¹

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: mathylenko@iss-reshetnev.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

Рассмотрены актуальные вопросы повышения качества связи и улучшения характеристик крупногабаритной трансформируемой антенны (КТА). Решить эти проблемы возможно только при высокой точности геометрии поверхности рефлектора антенны и его пространственного положения относительно облучателя. Для выполнения требований к точности геометрии КТА и её наведению в заданное положение при штатной эксплуатации необходима прецизионная система наведения (СН) КТА, которая должна обеспечивать заданную точность профиля отражающей поверхности рефлектора КТА относительно его теоретического профиля, а также точность его позиционирования относительно облучателя. С учетом задач, возложенных на СН КТА, проведен анализ требований к СН КТА, позволяющий определить основные технические требования к системе и её элементам. Определены основные подходы и принципы построения подобной системы, а также проработаны варианты её состава. Рассмотрены способы и методы управления геометрией КТА.

Ключевые слова: крупногабаритная трансформируемая антенна, система наведения антенны, крупногабаритный рефлектор, геометрические характеристики рефлектора, погрешности наведения, точность поверхности рефлектора.

THE GUIDANCE SYSTEM OF LARGE FLEXIBLE ANTENNA

A. A. Alekseenko¹, E. V. Bikeev¹, M. O. Dorofeev¹, M. V. Luk'janenko², M. G. Matylenko¹

¹JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: mathylenko@iss-reshetnev.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

The actual problems of improvement of quality of communication and large flexible antennas (LFA) characteristics are considered. It is possible to solve these problems on condition that high precision of antenna reflector surface shape and its space attitude with respect to a feeder. A precision guidance systems of LFA are necessary to meet the requirements to LFA shape and its pointing to a given position during orbit operation. The guidance system should provide a given accuracy of a profile of reflecting surface of LFA reflector with respect to a theoretical profile as well as a positioning precision relative to a feeder. Considering the tasks that the guidance system of LFA performs, the analysis of requirements to the guidance system of LFA is fulfilled that allows the main technical requirements to the system and its elements to be determined. The main approaches and principles of designing of such systems are specified as well as alternatives of its structure are studied. Methods and techniques of LFA shape control are considered.

Keywords: large flexible antenna, antenna guidance system, large reflector, reflector shape properties, guidance error, reflector shape precision.

Анализ современного состояния космической отрасли показывает перспективность развития широкополосной связи, что связано с созданием космических аппаратов (КА), имеющих в своём составе КТА с рефлектором большого размера (диаметром более 8 м), и глобальной зоной покрытия.

Особую актуальность имеют крупногабаритные трансформируемые бортовые рефлекторы и антенные

системы, обладающие принципиально новыми качествами и обеспечивающие существенное повышение уровня предоставления информационных услуг конечным потребителям спутниковой связи, а именно, гарантированное раскрытие крупногабаритных антенн на орбите, высокая точность ориентации, сохранение геометрических и радиотехнических параметров при длительном сроке активного существования

КА. Не менее важной является задача уменьшения массы конструкции КТА [1].

Ввиду больших габаритов КТА затруднена экспериментальная отработка в наземных условиях. Отработка облучателя, штанги рефлектора и самого рефлектора выполняется раздельно, что приводит к большим погрешностям взаимного расположения облучателя и рефлектора. Погрешности расположения конструкций ведут к погрешностям наведения, деформации главного луча и уменьшению коэффициента усиления КТА.

Для отработки раскрытия рефлектора в наземных условиях с контролем точности его радиоотражающей поверхности после раскрытия требуется система обезвешивания, которая по сложности конструкции и стоимости не уступает самому рефлектору. Поэтому экспериментальная отработка вопросов точности геометрии радиоотражающей поверхности рефлектора в полном объеме нецелесообразна [2].

В общем виде погрешность наведения КТА можно представить следующими составляющими:

- погрешность определения положения и формы рефлектора;
- погрешность управления положением и формой рефлектора;
- погрешность наведения КТА за счет ориентации корпуса КА.

Повышение качества связи и улучшение характеристик подобных КТА возможно только при высокой точности геометрии поверхности рефлектора антенны и его пространственного положения относительно облучателя. Для выполнения требований к точности геометрии КТА и ее наведению в заданное положение при штатной эксплуатации необходима прецизионная СН КТА, которая должна обеспечивать заданную точность профиля отражающей поверхности рефлектора КТА относительно его теоретического профиля, а также точность его позиционирования относительно облучателя. Это позволит осуществлять прием и передачу высокочастотных сигналов и формировать требуемую диаграмму направленности. Учитывая задачи, возложенные на СН КТА, необходимо определить основные подходы и принципы построения подобной системы, а также проработать варианты ее состава. По выполнению задач СН КТА можно условно разделить на подсистемы измерения и управления.

Подсистема измерения должна иметь в своем составе:

- прибор, работающий по принципу 3D-камеры, позволяющий определять пространственные координаты некоторого количества контрольных элементов (КЭ) с заданной точностью и осуществлять визуальный контроль на этапе раскрытия рефлектора;
- КЭ, являющиеся пассивными отражателями на основе световозвращающих пленок;
- алгоритмы определения пространственного положения и формы рефлектора.

Подсистема измерения осуществляет визуальный контроль рефлектора КТА, определение его текущих геометрических характеристик и подготовку исходных данных для орбитальной юстировки рефлектора.

Подсистема управления должна иметь в своем составе:

- устройство регулировки положения рефлектора (УРПР);
- устройство поднастройки формы рефлектора (УПФР);
- алгоритмы определения положения и формы рефлектора.

Измерение пространственных координат некоторого количества КЭ, расположенных на поверхности рефлектора, позволяет определить его линейное и угловое положение в системе координат КА, а также оценить форму поверхности рефлектора по отклонениям измеренных координат КЭ от их теоретических значений. В свою очередь, информация о положении и форме крупногабаритного рефлектора КТА позволяет сформировать управляющее воздействие, необходимое для корректировки его геометрии с помощью управляющих элементов СН КТА.

Требования к геометрии КТА подразумевают совпадение положения фокуса, вписанного в радиоотражающую поверхность параболоида вращения (ПВ), с фазовым центром облучателя и совпадение положения оптической оси ПВ со своим теоретическим положением с некоторой заданной точностью.

Функциональная схема СН КТА представлена на рис. 1.

Функционирование КТА требует выполнения следующих условий:

- расстояние между фокусом рефлектора и фазовым центром облучателя не должно превышать некоторого значения R ;
- угловое положение фокальной оси рефлектора должно быть близко к номинальному, чтобы углы поворота фокальной оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях не превышали некоторого значения α ;
- точность профиля отражающей поверхности рефлектора, определяемая среднеквадратичным отклонением (СКО) отражающей поверхности относительно теоретически обоснованной поверхности ПВ, должна быть не хуже некоторого значения σ .

Для определения текущей геометрии рефлектора КТА на КА очевидным является использование современных методов геодезического контроля антенн, широко применяемых при создании наземных антенн и космических радиотелескопов.

Проведенный анализ материалов позволяет сделать следующие выводы:

1. Для определения текущих геометрических характеристик КТА необходимы измерения пространственных координат контрольных точек (КТ) поверхности рефлектора, положение и количество которых должно быть оптимизировано, исходя из требований к точности измерения.

2. Учитывая прозрачность материала сетеполотна рефлектора, а также возможные помехи, создаваемые солнцем, звездами и бликами от элементов конструкции КА, попадающих в поле зрения измерительной аппаратуры, в местах положения КТ необходимо размещение КЭ, обеспечивающих отражение света в обратном направлении.

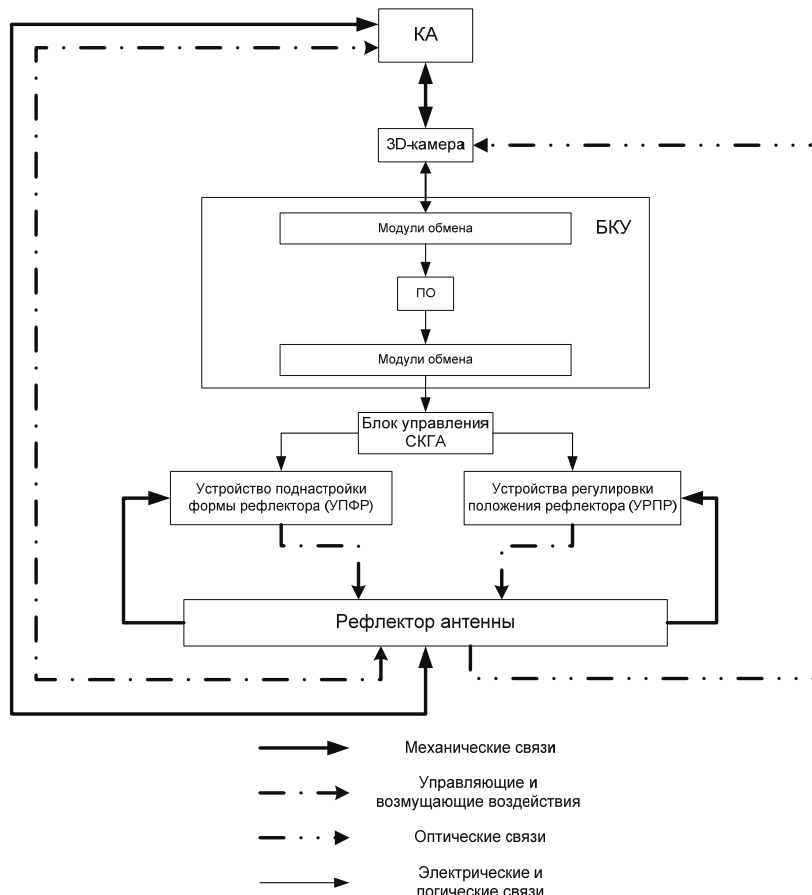


Рис. 1. Функциональная схема СН КТА

3. КЭ должны иметь пассивное, световозвращающее исполнение, поскольку размещение активных КЭ является очень сложной технической проблемой.

4. Подсистема измерения должна иметь собственную осветительную систему, мощности которой должно быть достаточно для обеспечения требуемого уровня соотношения сигнал/шум.

5. Для определения пространственных координат КТ поверхности рефлектора необходимо измерение углового положения КЭ и расстояния до него.

6. Наиболее распространенными бесконтактными системами определения геометрии крупногабаритных конструкций во многих отраслях промышленности являются системы, построенные на измерениях лазерных теодолитов, лазерных сканеров и 3D-камер. Преимуществом сканирующих измерительных приборов является более высокая точность по сравнению со статическими приборами. Однако исходя из расчетов ожидаемых деформаций конструкции антенны, источником наибольших искажений геометрических параметров рефлектора являются температурные деформации вследствие неравномерного солнечного освещения конструкции. Температурные деформации являются периодическими, имеющими период обращения КА по орбите. Принимая во внимание количество КЭ, размещаемых на рефлекторе, их измеренные координаты будут принадлежать различным деформированным состояниям рефлектора, имеющим между собой значительные различия. Исходя из выше-

изложенного, подсистема измерения должна быть построена на основе статического прибора типа 3D-камеры [3].

7. Для получения достоверных сведений об отклонениях профиля рефлектора измерительный прибор должен быть расположен на основании, имеющем высокую стабильность положения относительно системы контроля (СК) КА.

8. Для выполнения задач визуального контроля КТА измерительный прибор должен иметь возможность создавать фотоснимки элементов конструкции антенны, попадающие в его поле зрения. Такими возможностями обладают фотокамеры на основе ПЗС-матрицы.

Для реализации подсистемы измерения были разработаны алгоритмы определения геометрических характеристик КТА на основе измерений координат КЭ, определено оптимальное с точки зрения точности измерения и эффективности управления количество и расположение КЭ и сформированы требования к составным частям подсистемы измерения.

Положение рефлектора в базовой СК КА определяется положением СК, в которой отражающая поверхность описывается каноническим уравнением ПВ. Реализуется данная СК построенным СК по трем КТ. Положение СК трех точек известно как в СК вписанного параболоида (ВП), так и в базовой СК КА. Исходя из этого, находится взаимное положение СК ВП и базовой СК КА.

СКО отражающей поверхности рефлектора находится из вычисленных кратчайших расстояний от КТ до поверхности ВП.

Оптимальное количество КЭ определяется исходя из габаритов рефлектора и предъявляемых требований к точности его отражающей поверхности. Например, равномерное расположение 96 КЭ обеспечивает требуемую точность определения положения рефлектора диаметром 48 м и требуемую точность определения СКО отражающей поверхности рефлектора, а именно: погрешность измерения углового положения рефлектора в базовой СК КА не более 45 угловых секунд и погрешность измерения положения фокуса рефлектора в базовой СК КА не более 14 мм.

КЭ выполнен на базе световозвращающей плёнки алмазного типа космического назначения. Для осуществления измерений КЭ выбран прибор в виде моноблока, устанавливаемый снаружи корпуса КА и функционирующий в условиях космического пространства. В приборе используется матрица, построенная на лавинных фотодиодах (SPAD-матрица). Каждый пиксель матрицы состоит из фотодиода и построенной на КМОП-структуре схемы синхронизации (CMOS-timing).

Общее искажение отражающей поверхности рефлектора на орбите можно представить в виде суммы из трех составляющих:

- смещение рефлектора как жесткого тела;
- искажение поверхности за счет деформаций элементов силового каркаса рефлектора;
- искажение поверхности за счет деформаций формообразующей структуры.

Компенсации отклонения формы поверхности и положения рефлектора с целью обеспечения требуемой диаграммы направленности рефлектора реализуется орбитальной юстировкой рефлектора. Под орбитальной юстировкой понимается набор управляющих воздействий, приводящих текущую геометрию рефлектора к геометрии с требуемыми характеристиками. Орбитальная юстировка может проводиться как однократно, после раскрытия рефлектора, так и периодически, для компенсации отклонений, накопленных вследствие деградации материала, или периодических, вследствие температурных деформаций [4; 5].

Под управлением формой рефлектора понимается совокупность управляющих воздействий УПФР, приводящих форму радиоотражающей поверхности рефлектора к заданной с требуемой точностью. Точность поверхности характеризуется величиной СКО измеренных КТ относительно идеальной поверхности.

Управление формой рефлектора возможно при воздействии либо на элементы его силового каркаса (телескопические спицы), либо на элементы его формообразующей структуры (ФОС), состоящей из симметричных фронтальной и тыльной сетей, соединенных вантами. Осуществление необходимого управления поверхностью рефлектора за счет регулировки спиц является достаточно трудной задачей, так как, воздействуя на одну или несколько спиц, влияние этого воздействия проявляется в других местах поверхности, где корректировка ее формы не нужна. При воздействии на ФОС управление формой представляет собой

точечную регулировку радиоотражающей поверхности рефлектора, которая является более реализуемой и простой в разработке алгоритма управления и в процессе работы.

Наземная отработка раскрытия рефлектора показала, что наибольшие отклонения от теоретической формы поверхности рефлектора наблюдаются в местах, близких к краям рефлектора (в зоне расположения периферийного шнура). Следовательно, наибольший вклад в искажение формы отражающей поверхности рефлектора вносит уменьшение натяжения периферийного шнура фронтальной сети ФОС. Исходя из этого, для возможности управления натяжением периферийного шнура необходимо располагать, как минимум, по одному КЭ в центре каждого сегмента рефлектора возле периферийного шнура.

УПФР имеет следующий состав:

- устройство натяжения периферийного шнура (УНПШ);
- устройство точечной регулировки формы рефлектора (УТРФР).

Основной функцией УНПШ является поддержание формы рефлектора путем натяжения периферийного шнура. Длина и натяжение периферийного шнура определяют форму рефлектора, которая должна оставаться расчётной. Для сохранения требуемой формы шнур должен быть натянут с определенным усилием. УТРФР предназначено для регулировки длин оттяжек ФОС в местах расположения КЭ. Алгоритм работы УНПШ представлен на рис. 2.

Исследование алгоритма управления формой рефлектора проводилось с помощью математического моделирования, которое заключалось в применении управляющих воздействий (ход длин оттяжек шнуров вантовой структуры) на деформированное состояние формы рефлектора с дальнейшей оценкой результатов этих воздействий. Управляющие воздействия определялись как расстояния от КТ до ВП. Затем, если СКО отражающей поверхности рефлектора превышало заданное, проводили повторное управление.

Под управлением положением рефлектора понимается совокупность управляющих воздействий УРПР, приводящих положение рефлектора (угловое и линейное) в его теоретическое положение с заданной точностью. Точность управления положением рефлектора определяется отклонением фокальной оси антенны от своего номинального положения и расстоянием от фокуса до фазового центра облучателя.

Для управления положением рефлектора было рассмотрено несколько вариантов состава УРПР:

- одно двухступенное поворотное устройство (ДПУ);
- одно ДПУ и одно одноступенное поворотное устройство;
- три ДПУ;
- два ДПУ и одно одноступенное линейное устройство;
- шестиступенное устройство (Гексапод) [6].

Пространственное положение рефлектора определяется тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами (углами Эйлера). Следовательно, в идеальном случае управление положением рефлек-

тора реализуется по всем шести степеням свободы. В противном случае, как это видно по результатам моделирования, ошибки управления увеличиваются. Каждый вариант состава УРПР имеет то или иное количество степеней свободы относительно своей СК. Определяющей задачей для СН КТА является корректировка угловых и линейных смещений рефлектора, обеспечивающая заданные радиочастотные характеристики (РХ) антенны. Обеспечение РХ осуществляется компенсацией линейных и угловых смещений рефлектора относительно некоторой базовой системы координат КА либо решением задачи минимизации отклонения фокальной оси антенны от ее заданного положения. Состав УРПР зависит от выбора одного из подходов к обеспечению РХ антенны, а также от предъявляемых требований к точности управления пространственным положением рефлектора.

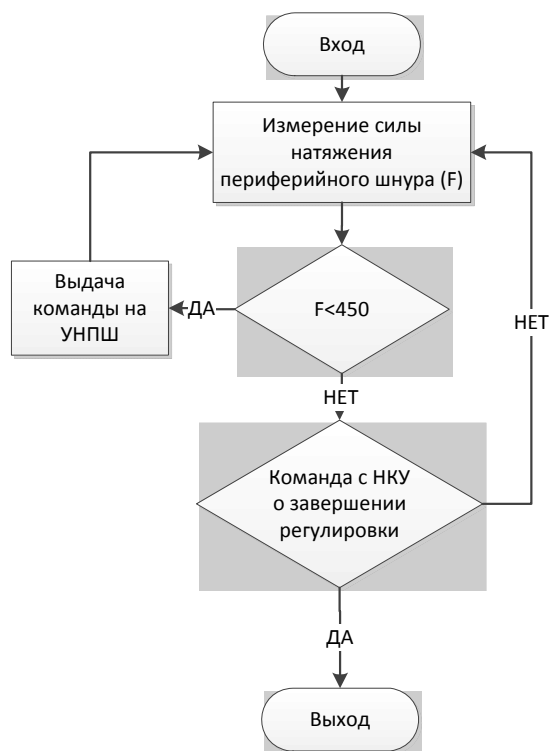


Рис. 2. Алгоритм управления натяжением периферийного шнура

В результате проделанной работы были определены основные подходы и принципы построения СН КТА, а также проработаны варианты ее состава. Кроме того, рассмотрены способы и методы управления геометрией КТА. Проведенный анализ позволяет определить основные технические требования к системе и ее элементам.

Библиографические ссылки

1. Пономарев С. В., Халиманович В. И. Задача компьютерного моделирования при создании крупногабаритных трансформируемых рефлекторов // Фун-

даментальные и прикладные проблемы современной механики : материалы 5 Всерос. науч. конф. (3–5 окт. 2006, г. Томск). С. 38–42.

2. Бушинский В. А., Клишев О. П., Матырев А. И. Исследование влияния упругих колебаний крупногабаритных элементов конструкции космического аппарата на искажение геометрических характеристик рефлектора // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 2. С. 102–108.

3. Выбор приборного состава системы определения геометрии крупногабаритной трансформируемой антенны / Г. П. Титов, М. Г. Матыленко, Е. В. Бикеев, М. О. Дорофеев // Решетневские чтения : материалы XV Международ. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (10–12 ноября 2011, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 98–99.

4. Пат. № 2418346. Российская Федерация. Зонтичная антенна космического аппарата / Тестоедов Н. А., Халиманович В. И., Величко А. И. и др. Оpubл. 2009.

5. Пат. № 2370864. Российская Федерация. Зонтичная антенна космического аппарата / Халиманович В. И., Величко А. И., Шипилов Г. В., Романенко А. В. и др. Оpubл. 2008.

6. Пат. № WO2011089198. Шестистержневая конструкция / Патентообладатель SCHWAB MARTIN (Германия).

References

1. Ponomarev S. V., Khalimanovich V. I. *Materialy 5 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki* (In Proc. Of the 5th All-Russian conference: Fundamental and practical issues of modern mechanics). Tomsk, 3–5 Oct, 2006. p. 38–42.

2. Bushinskiy V. A., Klishev O. P., Matyrev A. I. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2007, no. 2, p. 102–108.

3. Titov G. P., Matylenko M. G., Bikeev E. V., Dorofeev M. O. *Reshetnevskie chteniya: materialy XV Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M. F. Reshetneva* (In proc. of the 15th international scientific conference “Reshetnevskie chteniya”). Krasnoyarsk, 10–12 of Nov., 2011, p. 98–99.

4. Testoedov N. A., Khalimanovich V. I., Velichko A. I., Lekanov A. V., Shipilov G. V. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata* [Umbrella antenna spacecraft]. Patent RF, no. 2418346, 2009.

5. Khalimanovich V. I., Velichko A. I., Shipilov G. V., Romanenko A. V. et al. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata* [Umbrella antenna spacecraft]. Patent RF, no. 2370864, 2008.

6. SCHWAB MARTIN, Patent WO2011089198.

© Алексеенко А. А., Бикеев Е. В., Дорофеев М. О., Лукьяненко М. В., Матыленко М. Г., 2014