КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КРУПНОГАБАРИТНОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

.....

Н. А. Белокурова, В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. Ю. Федотов, А. П. Кайбаров, Д. А. Козуб

Мониторинг ионосферы Земли из космоса является важным для целого ряда направлений хозяйственной деятельности. В данной работе предложена новая конструкция антенно-фидерного устройства, созданная для работы совместно с бортовым ионозондом на космических аппаратах «Ионосфера-М». Длина антенн напрямую связана с длиной волны излучаемого сигнала и обратно пропорциональна частоте работы ионозонда, бортовые ионозонды работают на разных частотах, в том числе от 0,1 МГц, поэтому габариты приемных и передающих антенн достигают десятков метров. Телескопическая конструкция антенн на основе углепластиковых секций обладает низкой массой, достаточной жесткостью и удовлетворяет требованию по величине электрического сопротивления, а также позволяет при небольшой длине в транспортном (сложенном) положении достичь значительной длины в орбитальной конфигурации.

Ключевые слова: трансформируемая конструкция, антенно-фидерное устройство, космический аппарат.

Одним из способов исследования ионосферы Земли является метод зондирования ионосферы из космоса. Для этих целей используют бортовые ионозонды, располагаемые на борту космического аппарата (КА) или станции. Ионозонд представляет собой электронное устройство, способное генерировать сигналы различных частот и обрабатывать принимаемый сигнал различных частот. При этом для работы ионозонду необходимы приемная и передающая антенны. Длина таких антенн напрямую связана с длиной волны излучаемого сигнала и частотой работы ионозонда. Для исследования ионосферы Земли необходимо использовать различные частоты, в том числе и низкие: от 0,1 МГц. Для подобных частот необходимы очень габаритные антенны, длина которых измеряется десятками метров. По причине того, что антенна должна эксплуатироваться в космосе, на нее накладывается целый ряд серьезных ограничений, в частности, масса антенны должна быть минимальна, а конструкция антенны должна быть трансформируемой. При этом в сложенном виде антенна должна умещаться под обтекателем ракеты-носителя и быть достаточно прочной, чтобы выдерживать нагрузки выведения, а в разложенном виде необходимо, чтобы антенна при своей длине была достаточно жесткой и выдерживала воздействие внешних факторов космического пространства, таких как температурные перепады, вакуум и действие радиации. Кроме перечисленного антенна должна иметь низкое электрическое сопротивление. Создание подобной антенны является интересной и сложной конструкторской задачей.

На протяжении последних десятилетий создания систем внешнего зондирования ионосферы в разное время были разработаны и выведены на орбиту Земли несколько ионозондов. Первым спутником с панорамной установкой ионосферного зондирования в начале 70-х годов XX века был канадский КА «Алуэт-1» (рис. 1, *a*). Диапазон рабочих частот ионосферной станции был

от 0,45 до 11,8 МГц. На этом спутнике были впервые применены четыре саморазворачивающиеся радиоантенны, выполненные из тонких пружинных полосок бериллиевой бронзы с эффектом памяти.

В транспортной конфигурации все восемь плеч антенн были размещены в трубках и скручены в спирали. В космосе антенна выезжала из трубки и разворачивалась. Длина диполей у такой антенны могла варьироваться, в зависимости от исполнения, от 10 см до 45 м [1]. Также был запущен еще один КА «Алуэт-2». Антенно-фидерное устройство (АФУ) на его борту состояло из скрещенных вибраторов длиной 23 и 73 м, выполненных из бериллиевой бронзы.



Рис. 1. Примеры антенно-фидерных устройств бортовых ионозондов: *а* – космический аппарат «Алуэт-1»; *б* – антенны ионозонда ИС-338 стации «Мир»



Рис. 2. Антенно-фидерное устройство на космическом аппарате: *а* – в орбитальной конфигурации (*1* – плечо неподвижное передающей антенны; *2* – плечо подвижное передающей антенны; *3* – плечо первой приемной антенны; *4* – плечо второй приемной антенны); *б* – в транспортной конфигурации



Рис. 3. Конструкция телескопического элемента (сложенная конфигурация)

Другое габаритное АФУ было установлено на КА MARSIS (специализированный радар Европейского космического агентства для зондирования ионосферы и глубинных слоев марсианской поверхности, одна из главных миссий КА «Марс-экспресс»). Его диполи были выполнены из стекловолокна и кевлара с гибкими соединениями, сложенными друг на друга (два диполя по 20 м длиной, состоящие из 13-ти сегментов, сложенных «гармошкой», и один диполь – 7 м). Бортовой ионозонд ИС-338 был размещен также на космической станции «Мир», его АФУ представлено на рис. 1, δ , при этом длина диполей составляла 8 и 24 м [2].

Целью данной статьи является разработка конструкции трансформируемой крупногабаритной антенны космического назначения для бортового ионозонда КА «Ионосфера-М». На основе проведенных расчетов в [3] было установлено, что длина передающей антенны должна быть 30 м, при этом она должна состоять из четырех плеч антенн по 15 м каждое, расположенных, как показано на рис. 2, *а*.

Также АФУ должно содержать две приемные антенны длиной по 15 м, состоящие каждая из двух плеч антенн по 7,5 м. При этом габариты аппарата не превышают длину 1 м, то есть длина плеч антенн в транспортном положении не должна превышать 1 м (рис. 2, δ). Суммарная масса АФУ не должна превышать 45 кг. Электрическое сопротивление каждого плеча антенны не должно превышать 30 Ом. Кроме этого АФУ должно быть устойчиво к механическим нагрузкам при выведении, а также к воздействиям космический среды (давление, температура, радиационная стойкость). Плечи антенн должны иметь возможность многократного складывания/раскладывания для обеспечения достаточности наземной отработки.

В обеспечении выполнения технических требований были проведены объемные работы по математическому моделированию и физическому макетированию различных вариантов конструктивных решений для создания трансформируемого крупногабаритного АФУ. Были рассмотрены разные принципы выдвижения диполей плеч антенн. Например, вариант, когда плечо антенны состоит из ленты с памятью формы, скрученной в катушку; вариант с пневматической системой развертывания диполей и различные варианты с выдвигаемыми приводом телескопическими элементами.

Телескопический элемент (ТЭ) представляет собой раздвижную телескопическую углепластиковую конструкцию (рис. 3). Для плеч передающей антенны ТЭ состоит из 25-ти конических секций с наибольшим диаметром всего 60 мм, для плеч приемных антенн – из 16-ти конических секций с наибольшим диаметром 34 мм. Углепластиковые секции сделаны тонкостенными, что позволяет им быть одновременно легкими и жесткими. Масса 15-метрового ТЭ составляет чуть больше одного килограмма и имеет длину в сложенном виде около 70 см, а в разложенном – 15 метров.

Секции ТЭ должны быть тщательно подогнаны друг к другу, чтобы в выдвинутом виде обладать низким электрическим сопротивлением, поскольку электрическое сопротивление каждого из 24-х сочленений секции между собой вносит вклад в сопротивление ТЭ. Корневая секция плеча антенны, расположенного непосредственно около корпуса аппарата, должна быть выполнена из диэлектрического материала, эта секция, в отличие от остальных, имеет стеклопластиковую часть и на отдельные ее участки наносится гальваническое покрытие для снижения переходного электрического сопротивления между внешней частью секции, где располагается контактный хомут, и внутренней ее частью, которая сопрягается с первой подвижной секцией.

В ходе создания АФУ был выбран принцип раскладывания ТЭ в орбитальную конфигурацию, а именно выталкивание секций элементом конструкции, располагающимся внутри ТЭ. При этом конструкция привода и выталкивающего элемента должна обеспечивать как раскладывание, так и складывание ТЭ плеча антенны, так как для наземной отработки необходимо многократно выдвигать ТЭ. Рассматривались варианты нейлонового троса, с резьбой по всей длине, и вариант с металлической пружинной лентой. В первом случае (рис. 4) привод представлял собой редуктор, на выходном валу которого было проделано центральное резьбовое отверстие, через которое проходил трос с резьбой. Трос собран в катушку, при включении привода выходной вал вращался, работала передача «винт - гайка» между тросом и приводом, и трос выталкивал секции ТЭ. Был создан макет и проведены испытания по выдвижению. Время выдвижения ТЭ составляло более 15-ти минут. При такой конструкции одной из значимых проблем являлась технологическая сложность создания длинного нейлонового троса с непрерывной резьбой, а также износ резьбы на гибком нейлоновом тросе, кроме того, сам трос в катушке со временем деформировался и после разматывания оказывался сильно изогнутым, что препятствовало выдвижению секций ТЭ.

Для устранения перечисленных замечаний нейлоновый трос был заменен на пружинную ленту без резьбы и создан другой привод (рис. 5).



Рис. 4. Макет антенны с приводом выдвижения с нейлоновым гибким тросом с резьбой



Рис. 5. Антенна с приводом выдвижения телескопического элемента на основе стальной пружинной ленты: 1 – телескопический элемент; 2 – катушка с лентой; 3 – привод

Лента смотана в катушку 2, катушка закреплена на выходном валу привода 3. Привод представляет собой двухступенчатый мотор-редуктор с цилиндрической и червячной передачами. Моторредуктор при подаче питания на двигатели раскручивает катушку, стальная лента высвобождается и выталкивает секции ТЭ 1, так как лента соединена с телескопической секцией наименьшего диаметра.

Поскольку при передаче усилия от привода к секциям ТЭ при помощи стальной ленты происходит потеря устойчивости ленты, то важно было правильно определить жесткость ленты, то есть подобрать геометрические параметры сечения ленты так, чтобы, с одной стороны, лента была максимально тонкой для обеспечения ее малых объема и массы, а с другой – имела достаточную толщину, чтобы потеря устойчивости ленты внутри каждой секции не происходила более двух раз.

Лента, теряя устойчивость внутри секций ТЭ, получает новые точки касания с секциями ТЭ, передача выталкивающего усилия от привода через ленту происходит в этих точках. Таким образом, если первыми будут выдвинуты секции больших диаметров, то это затруднит выдвижение секций наименьшего диаметра. Для упорядочивания последовательности выхода секций, а также для создания контролируемого усилия при выходе каждой следующей секции ТЭ, был создан дополнительный элемент конструкции – пружинные держатели (рис. 6).

На секциях ТЭ со стороны наименьшего диаметра наклеены кольца 3, в которых по кругу выполнены три небольших отверстия. Через эти отверстия продеты держатели 1. На концах держателей есть разветвление пружинных проволок 2. Для того чтобы секция могла продвинуться вперед, необходимо деформировать ответвленные проволоки до размеров отверстия в кольце, таким образом, можно задавать усилие выхода следующей секции и обеспечивать последовательность выдвижения секций.

Для контроля длины выдвижения ТЭ в конструкции необходимо было предусмотреть датчик длины. Учитывать длину выдвинутого ТЭ можно по длине ленты, потребовавшейся для ее выдвижения. Поэтому была предложена следующая конструкция датчика (рис. 7). На катушке размещен потенциометр 1 с надетой на выходной вал звездочкой 2 и три лепестка 3. При повороте катушки лепестки поворачивают звездочку, изменяя выходное сопротивление потенциометра, и таким образом подсчитываются обороты катушки, то есть можно судить о длине высвободившейся ленты и, соответственно, ТЭ.

Поскольку при выведении на целевую орбиту элементы конструкции испытывают вибрацию, а вал потенциометра очень легко поворачивается, то несбалансированная звездочка может прокручивать вал потенциометра. Чтобы избежать этого, были введены дополнительные элементы – полосы потенциометра 4, создающее дополнительное механическое сопротивление повороту звездочки 2 на валу при выведении КА на орбиту. Полосы выполнены из полиэтилентерефталатной пленки и подогнуты так, чтобы создавать два противонаправленных момента.

Для обеспечения жесткого закрепления ТЭ во время выведения и разобщения ее с лентой привода в конструкции предусмотрен фиксатор ТЭ (рис. 8). Он представляет собой небольшой пружинный замочек, для открывания которого необходимо приложить определенное усилие в направлении выдвижения.

Предложенная конструкция ТЭ и привода выдвижения успешно прошла многократные испытания по выдвижению ТЭ, а также испытания на устойчивость к механическим и климатическим внешним воздействиям.



Рис. 6. Пружинные держатели на телескопическом элементе: 1 – держатели; 2 – разветвление проволок; 3 – кольца телескопического элемента



Рис. 7. Датчик выдвижения: 1 – потенциометр; 2 – звездочка; 3 – лепестки; 4 – полосы потенциометра



Рис. 8. Устройство закрепления телескопического элемента: 1 – фиксатор

Выводы

1. Предложенная телескопическая конструкция антенны на основе углепластиковых секций:

 – обладает низкой массой, достаточной жесткостью и удовлетворяет требованию по величине электрического сопротивления;

 позволяет достичь 30-метровой длины в орбитальной конфигурации при длине в сложенном виде, не превышающей одного метра. 2. Конструкция привода и прочих механизмов из состава плеча антенны обеспечивает выдвижение телескопической антенны на требуемую длину. Принцип действия может быть использован при создании крупногабаритных трансформируемых антенн различной длины.

Литература

1. Подлесный, А. В. Оценка коэффициента связи антенн при использовании непрерывных ЛЧМ-сигналов в установках зондирования внешней ионосферы / А. В. Подлесный, А. А. Науменко, М. В. Цедрик // Солнечно-земная физика. – Иркутск : Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 122–129.

Поступила в редакцию 25.04.2025

2. Радиозондирование ионосферы ионозондами, установленными на борту Международной космической станции и транспортного грузового корабля «Прогресс» / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – Королев : Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, 2015. – № 6 (85). – С. 121–127.

3. Анализ электрических характеристик антенно-фидерного устройства ЛАЭРТ для космических аппаратов «Ионосфера-М» / А. Б. Захаренко, А. Ю. Федотов, П. П. Телепнев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2025. – Т. 204. – № 1. – С. 20–26.

Нина Андреевна Белокурова, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, т. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе,

npoфeccop, m. 8 (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, начальник отдела, доцент,

m. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

Александр Юрьевич Федотов, доктор технических наук, главный конструктор

антенно-фидерных устройств космических аппаратов, т. (495) 366-27-55, e-mail: lab1811@mcc.vniiem.ru.

Андрей Платонович Кайбаров, инженер-конструктор 1 категории.

Дмитрий Александрович Козуб, кандидат технических наук, инженер 1 категории.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DESIGN OF TRANSFORMABLE LARGE SPACE ANTENNA

N. A. Belokurova, V. Ya. Gecha, A. B. Zakharenko, A. Yu. Fedotov, A. P. Kaybarov, D. A. Kozub

Monitoring of the Earth ionosphere from space is important for a wide range of business activity directions. The present scientific work presents new design of antenna-feeder device created for operation jointly with on-board ionozond on the lonosphere-M spacecrafts. Length of antenna is directly related to the length of radiated signal wave and inversely related to the frequency of ionozond operation, on-board ionozonds operate at different frequencies, including from 0,1 MHz, that's why the dimensions of receive and transmitting antennas can reach tens of meters. Extensible construction of antennas on the basis of carbon composite sections has low mass, sufficient rigidity and complies with the requirement for value of electrical resistance and also allows achieving the considerable length in orbit configuration. Key words: transformable construction, antenna-feeder device, spacecraft.

References

1. Podlesniy, A. V. Assessment of antenna communication coefficient in case of use of continuous LFM signals in installations for external ionosphere remote sensing / A. V. Podlesniy, A. A. Naumenko, M. V. Cedrik // Solar-Terrestrial Physics. – Irkutsk : Solar-Terrestrial Physics Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2019. – Vol. 5. – No. 4. – P. 122–129.

2. Radio-sounding of ionosphere by the ionozonds installed on the board of the International Space Station and Progress cargo vehicle / N. P. Danilkin, G. A. Jbankov, S. V. Zhuravlev [et al.] // Cosmonautics and rocket engineering. – Korolev : Central Research Institute for Machine Building, 2015 – No. 6 (85). – P. 121–127.

3. Analysis of electrical characteristics of LAERT antenna-feeder device for Ionosphere-M spacecrafts / A. B. Zakharenko, A. Yu. Fedotov, P. P. Telepnev [et al.] // Electromechanical matters. VNIIEM Studies. – 2025. – Vol. 204. – № 1. – P. 20–26.

> Nina Andreevna Belokurova, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Department, t. +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

Vladimir Yakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director General for Science,

Professor, t. +7 (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.

Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences, Head of Department,

Associate Professor, t. +7 (495) 366-26-44, e-mail:otdel18@mcc.vniiem.ru.

Aleksandr Yurievich Fedotov, Doctor of Technical Sciences, Chief Designer of spacecraft

antenna-feeder devices, t. +7 (495) 366-27-55, e-mail: lab1811@mcc.vniiem.ru.

Andrei Platonovich Kaybarov, 1nd Category Design Engineer.

Dmitrii Aleksandrovich Kozub, Candidate of Technical Sciences, 1st Category Engineer. (JSC «VNIIEM Corporation»).