

## СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

А. Б. Гладышев<sup>1</sup> ✉, Д. Д. Дмитриев<sup>1</sup>, В. Н. Ратушняк<sup>1</sup>,  
А. В. Жгун<sup>1</sup>, О. Б. Грицан<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Перспективным решением для предоставления услуг связи и передачи данных на территории Крайнего Севера является развитие телекоммуникационной сети на основе спутниковых систем связи. Поэтому задача разработки и создания земных станций перспективных систем спутниковой связи, имеющих характеристики, значительно превышающие мировые аналоги, является актуальной. Характеристики таких станций во многом зависят от характеристик антенных систем, которые определяют энергетические характеристики канала связи. Целью работы является разработка стенда для измерения направленных характеристик антенн спутниковых систем связи на базе сферического сканера TS8991. Спиральное сканирование, в отличие от классического сферического сканирования, представляет собой альтернативный метод измерений, направленный на уменьшение времени измерений при сохранении необходимой точности. В результате данной работы был реализован алгоритм спирального сканирования на основе сканера ближнего поля фирмы Rohde & Schwarz TS8991 и построен стенд для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи, представлена его структурная схема. На разработанном стенде была подвергнута испытанию антенна с рефлектором диаметром 1,2 м. Результаты измерений показали отклонения измеренных значений от расчетных, обусловленные конструктивными недостатками антенны. Время измерений и преобразований в дальнейшем поле для антенны с диаметром рефлектора 1,2 м с помощью такого стенда составило 35 минут.

Ключевые слова: спутниковая система связи, измерение параметров антенны, плоский сканер, цилиндрический сканер, сферический сканер.

### Введение

Освоение Арктического региона, на сегодняшний день, приобретает особую значимость для национальных интересов России. Однако полно-

ценное развитие труднодоступных северных регионов возможно при обеспечении данного региона достаточно развитой системой связи.

Развитие телекоммуникаций в Арктике, основанное на использовании традиционных наземных сетей связи, характеризуется некоторыми трудностями, выраженными в следующих факторах:

- низкая плотность населения;
- слабое развитие инфраструктуры, транспортных путей и линий связи;
- большая площадь охватываемой территории;
- сложные климатические условия.

Разрешение этих трудностей является сложной, а иногда и неразрешимой задачей.

Сложившаяся ситуация делает актуальным вопрос развития систем спутниковой связи для обеспечения телекоммуникационными услугами

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства земных станций перспективных систем спутниковой связи для обеспечения связанности труднодоступных, северных и Арктических территорий Российской Федерации», осуществляемого при участии Сибирского федерального университета (соглашение № 075-11-2019-078 от 13.12.2019)*

✉ a-qlonass@yandex.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2020

территории труднодоступных, в том числе и северных, регионов нашей страны.

Использование возможностей зарубежных систем спутниковой связи при этом осложняется высокой стоимостью предоставляемых услуг, а также не достаточной зоной покрытия труднодоступных северных регионов России [1; 2].

Указанные факторы снижают возможности по применению зарубежных систем связи на территории России, поэтому задача создания и развития отечественной системы спутниковой связи является, несомненно, актуальной.

Из всего вышесказанного возникает новая задача по разработке и созданию непосредственно земных станций систем спутниковой связи (ЗССС), имеющих характеристики, значительно превышающие мировые аналоги [3].

Характеристики таких станций во многом зависят от характеристик антенных систем, которые определяют энергетические характеристики канала связи.

Для измерения параметров разрабатываемых антенн необходимо иметь соответствующий измерительный комплекс, позволяющий с высокой точностью определять эти параметры и по результатам измерений осуществлять дальнейшую настройку антенны при ее установке на изделие. В данной работе предлагается вариант стенда для контроля и настройки параметров антенн ЗССС.

Одним из важнейших элементов радиолинии «ЗССС – космический аппарат» является антенная система ЗССС. Ее энергетические характеристики напрямую определяют отношение сигнал-шум на входе приемника, а, следовательно, и вероятность битовой ошибки BER. Поэтому очень важно знать такие параметры антенной системы, как коэффициент усиления (КУ), коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент полезного действия, шумовая температура и др. [4].

Существует два способа измерения направленных характеристик антенн – измерения в дальней и ближней зонах.

При измерениях в дальней зоне необходимое расстояние между испытуемой и вспомогательной антеннами определяется размерами их апертур и рабочей длиной волны. При обеспечении нужных расстояний электромагнитное поле, излучаемое вспомогательной антенной, можно считать плоской волной.

При измерениях в ближней зоне характеристики антенн находятся путем обработки результатов измерений ближнего поля. Ближнее поле антенны чаще всего измеряется на плоскости, расположенной перед антенной, с использованием двухкоординатных механизмов (сканеров) для перемещения измерительного зонда. Расстояние между антенной и зондом лежит в пределах от не-

скольких длин волн до нескольких размеров раскрыва антенны и всегда значительно меньше расстояния до границы дальней зоны.

В виду громоздкости системы измерения характеристик антенн в дальней зоне предпочтение было отдано разработке стенда на основе способа измерения поля в ближней зоне.

Суть способа измерения характеристик антенн в ближней зоне состоит в исследовании амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля вблизи апертуры антенной системы и математического пересчета характеристик электромагнитного поля в дальней зоне [5].

Таким образом, используя способ ближнего поля, представляется возможность измерения таких характеристик антенных систем, как: амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН), коэффициент эллиптичности и угол наклона поляризационного эллипса (в случае круговой поляризации), характеристики направленных свойств антенны.

Для измерения характера распределения электромагнитного поля в ближней зоне используют специально разработанные сканирующие устройства. Данные сканирующие устройства измеряют ближнее поле антенны либо вдоль плоской поверхности вблизи апертуры антенны (плоский сканер), либо вокруг антенны, но линейно в вертикальном направлении (цилиндрический сканер), либо описывая сферу, где центром этой сферы является исследуемая антенна (сферический сканер).

## 1. Плоский сканер

Плоский сканер используется для исследования антенн, все излучаемое поле которых сконцентрировано вблизи апертуры на некой поверхности, представляющей собой плоскость [6].

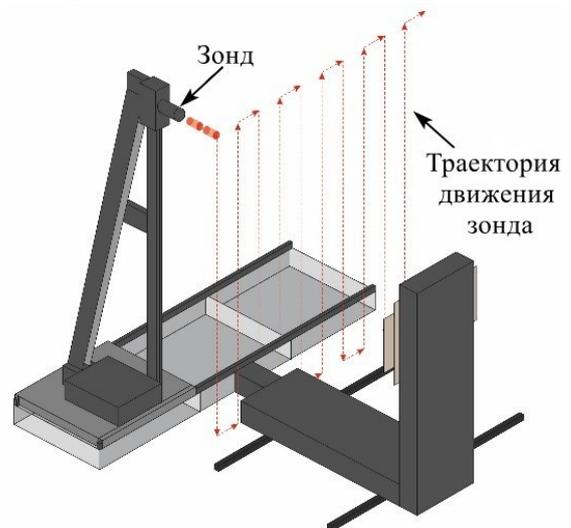


Рис. 1. Схематическое изображение плоского сканера

Сканирующее устройство измеряет характеристики ближнего поля, перемещая измерительный зонд вдоль этой плоскости на расстоянии  $3...5\lambda$  от антенны, как показано на рис. 1.

Данный способ позволяет проводить измерение направленных свойств антенны в секторе до  $\pm 70^\circ$ .

## 2. Цилиндрический сканер

Цилиндрическое сканирование применяется для исследования направленных свойств антенн с широкой ДН в одной плоскости и узкой в другой. К таким антеннам относятся в основном зеркальные антенны, где в качестве рефлектора используется зеркало в виде усеченного параболоида.

При измерении параметров антенны с использованием цилиндрических сканеров исследуемая антенна размещается на азимутальном столе. Одновременно с линейным перемещением зонда в вертикальном направлении осуществляется вращение исследуемой антенны на азимутальном столе [7]. В результате область сканирования представляет собой цилиндрическую поверхность (рис. 2).

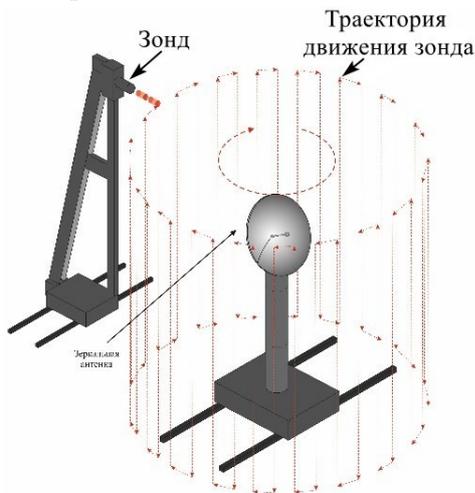


Рис. 2. Схема цилиндрического сканирования

При цилиндрическом сканировании антенн с «веерными» ДН из-за ограничения области сканирования в вертикальном направлении получить полную диаграмму можно только в азимутальной плоскости, но при этом ограниченную в угломестной плоскости.

## 3. Сферический сканер

Сферическое сканирование является универсальным способом сканирования антенн [8]. В то же время этот способ относится к наиболее сложным: во-первых, данный способ сканирования ведет к конструктивной сложности построения сканера, во-вторых, требует разработки слож-

ных алгоритмов обработки. Поэтому такой способ применяется тогда, когда нельзя обойтись плоским или цилиндрическим сканером. Схема сферического способа сканирования приведена на рис. 3.

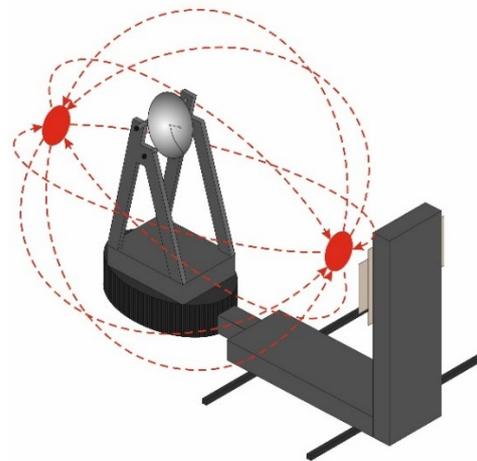


Рис. 3. Схема сферического сканирования

В основном, сферические сканеры используются для измерения характеристик слабонаправленных неапертурных антенн и антенн с малыми электрическими размерами.

Так как при осуществлении измерений на сферическом сканере ориентация вектора  $\vec{E}$  измеряемой антенны постоянно меняется, то необходимо измерять две ортогональные компоненты поля: при вертикальном и при горизонтальном положении вектора  $\vec{E}$  линейно-поляризованного зонда.

## 4. Измерение методом спирального сканирования на сферическом сканере

Спиральное сканирование представляет собой альтернативный метод измерений, направленный на уменьшение времени измерений при сохранении необходимой точности.

В отличие от классического сферического сканирования (рис. 4а), при спиральном сканировании точки измерений образуют собой спираль, описанную вокруг измеряемой антенны (рис. 4б).

По результатам измерений эквивалентные поверхностные токи пересчитываются в ДН дальней зоны. Алгоритм расчета, при этом, должен поддерживать полную коррекцию на пробник, а также коррекцию на отражения от металлического пола для полубезэховых камер. Необходимым условием при измерении является прием показаний от внешнего измерителя геометрии в реальном времени.

В результате данной работы был реализован алгоритм спирального сканирования на основе сканера ближнего поля фирмы Rohde & Schwarz TS8991 [9; 10] и построен стенд для контроля и на-

стройки параметров антенн ЗССС, структурная схема которого представлена на рис. 5.

Принцип действия стенда для контроля и настройки параметров антенн ЗССС основан на измерении амплитудно-фазового распределения (АФР) напряженности электромагнит-

ного поля в ближней зоне антенны. Измерения АФР проводятся с помощью векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA50, один порт которого подключен к излучающей антенне, а второй порт – к приемной, при этом система является двунаправленной.

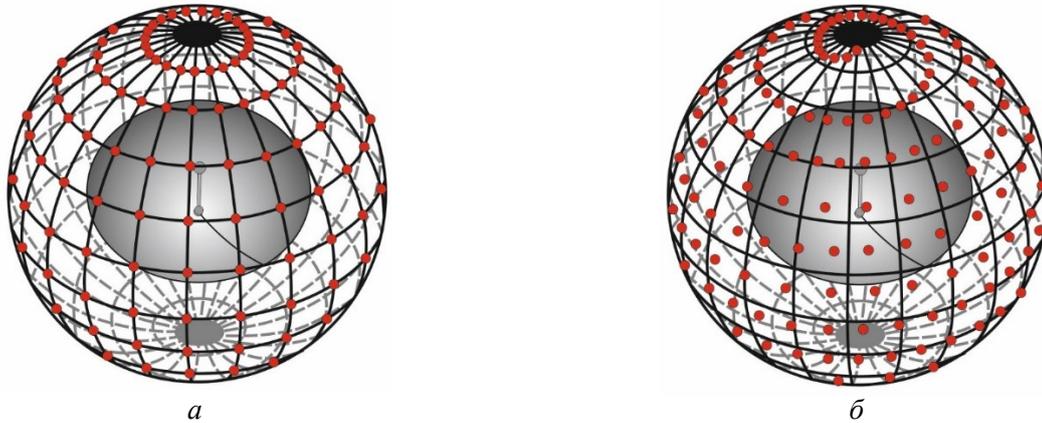


Рис. 4. Точки классического сферического сканирования (а) и спирального сканирования (б)

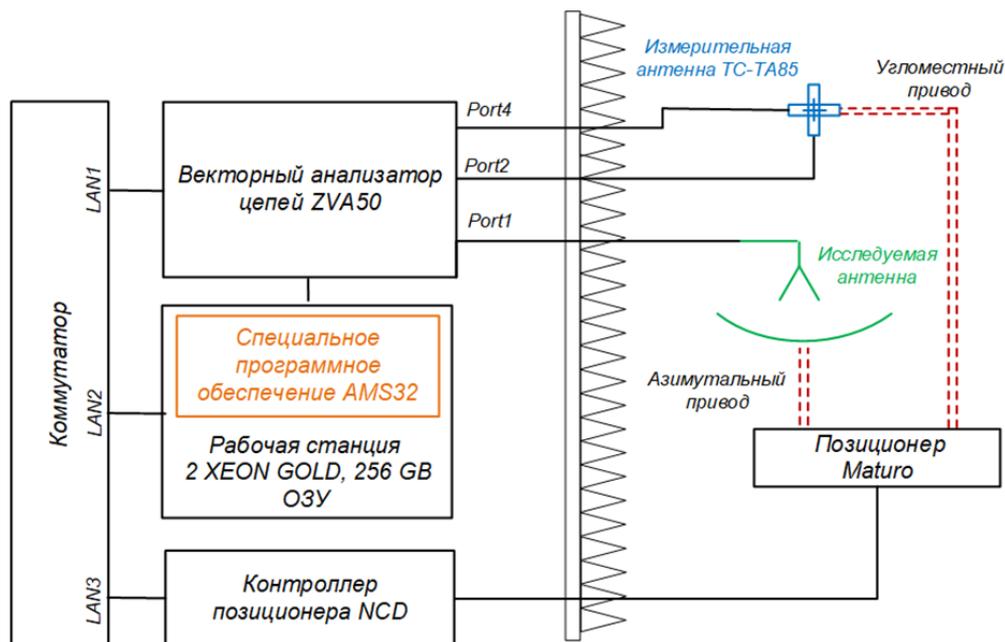


Рис. 5. Структурная схема стенда для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи

В качестве одной из антенн используется пробник ближнего поля на основе двухполяризационной антенны Вивальди, в качестве второй – исследуемая антенна (рис. 6).

Антенны закрепляются на позиционере, осуществляющем механическое перемещение антенн друг относительно друга таким образом, что точки выборки АФР располагаются на сферической поверхности. Управление перемещением позиционера и измерения на векторном анализаторе цепей

проходят в автоматическом режиме и синхронизированы во времени.

Управление ведется с внешнего компьютера со специальным программным обеспечением (СПО) с использованием ресурсов контроллера NCD Mature. СПО собирает результаты измерения АФР в ближней зоне и с помощью математических алгоритмов проводит пересчет в полную трехмерную ДН антенны в дальней зоне. По данной диаграмме определится значение коэффициента

усиления исследуемой антенны, для чего предварительно система калибруется с использованием набора рупорных антенн.

На разработанном стенде была подвергнута испытаниям антенна ЗССС, представляющая собой двухзеркальную конструкцию схемы Кассегрена с параболическим рефлектором диаметром 1,2 м и контррефлектором, имеющим специальный профиль центрального сечения отражающей поверхности (рис. 7).

В соответствии с результатами расчетов рассматриваемый вариант исполнения антенны обеспечивает следующие проектные значения:

- КУ – не менее 44,8 дБ;
- расчетные уровни первых боковых лепестков ДН (УБЛ) – не более -19,4 дБ;
- ширина ДН антенны по уровню -3 дБ составляет порядка 0,8°.

На рис. 8 представлена расчетная ДН антенны на частоте приема ЗССС 19,472 ГГц.

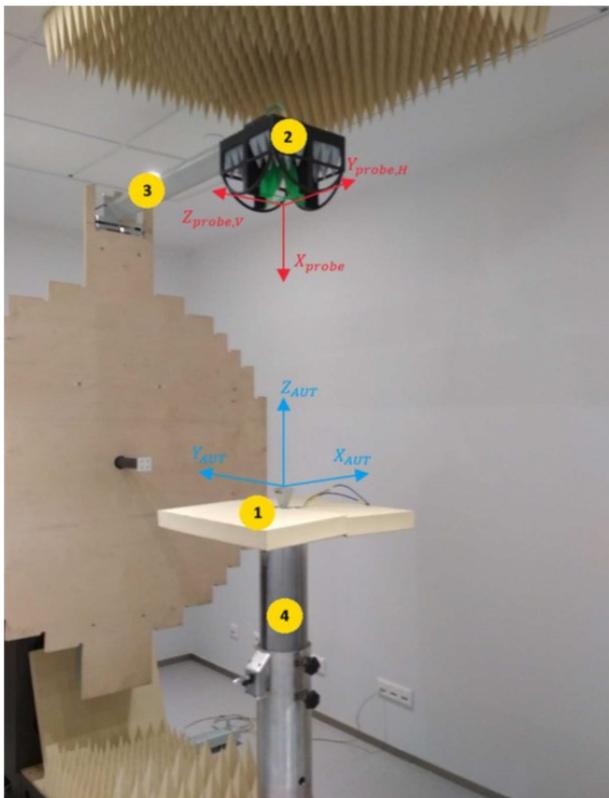


Рис. 6. Общий вид рабочей зоны сферического позиционера: 1 – эталонная (испытуемая) антенна; 2 – пробник поля (зонд); 3 – мачта угломестного привода позиционера; 4 – опора стола азимутального привода позиционера



Рис. 7. Рабочее место стенда с установленной зеркальной антенной с диаметром рефлектора 1,2 м

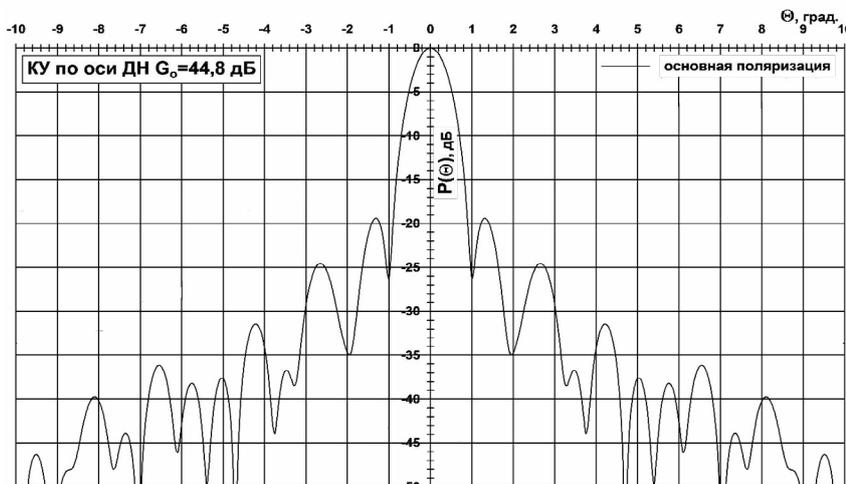


Рис. 8. Расчетная ДН на частоте приема 19,472 ГГц

Для проведения измерений КНД антенны, построения ДН, определения УБЛ и вычисления КУ к приемному порту антенны был подключен коаксиально-волноводный переход с сечением волноводного окна  $11 \times 5,5$  мм и проведены измерения в секторе  $\pm 10^\circ$  с шагом  $0,4^\circ$ . Время измерения заняло порядка 35 минут. Результаты измерений представлены на рис. 9.

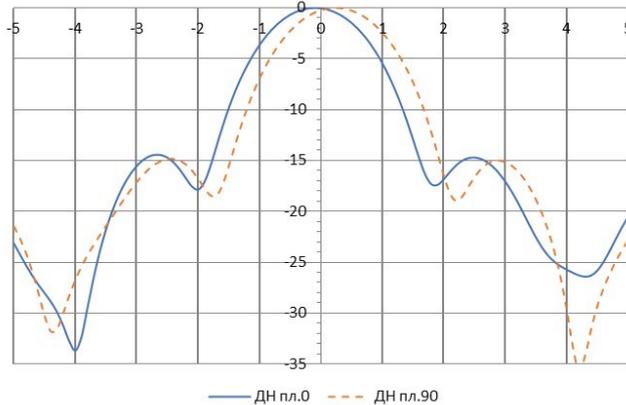


Рис. 9. Измеренная ДН антенны на частоте приема ЗССС 19,472 ГГц

Таблица

Направленные характеристики антенны ЗССС

Параметр	Расчетное значение	Пл. $0^\circ$	Пл. $90^\circ$
Максимум КНД, дБ	45,8	37,88	38,06
Направление главного максимума, $^\circ$	0	-0,1	0,2
УБЛ, дБ	-19,4	-14,7	-15,01
Ширина ДН, $^\circ$	0,8	1,7	1,6

Таким образом, применение метода спирального сканирования позволяет за достаточно

небольшое время получить реальные характеристики антенны и проводить анализ причин отклонений, измеренных от рассчитанных характеристик.

Из анализа характеристик, приведенных в табл., можно сделать вывод, что увеличение ширины главного лепестка ДН исследуемой антенны по сравнению с расчетными данными привело к уменьшению КНД и увеличению УБЛ.

Одной из возможных причин полученных в результате измерения отклонений – нахождение облучающей системы не в фокусе. Нельзя однозначно утверждать, вследствие чего произошло отклонение – из-за конструктивных особенностей антенны (отклонение облучающей системы от оси, влияние корпуса для оборудования и т. д.) или из-за наклона антенны на рабочем столе.

## Заключение

Разработанный на основе сферического сканера Rohde & Schwarz TS8991 стенд для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи, используя метод спирального сканирования, способен с достаточной точностью и достоверностью измерять характеристики антенных систем.

Достоинством стенда, построенного по изложенным принципам, будет являться меньшее время, необходимое для проведения измерений параметров исследуемых антенн.

Время измерений и преобразований в дальнее поле для антенны с диаметром рефлектора 1,2 м с помощью такого стенда составило 35 минут. При этом в случае применения амплифазометрического метода время измерений будет составлять порядка 9 часов, а при применении компактного полигона – около 2,5 часа.

## Список литературы

- [1] Выгонский Ю. Г. Предложения по созданию космической системы для предоставления телематических услуг связи // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9–4. С. 719–723.
- [2] Андреев А. М., Богинский Л. П., Гришин М. В. Принципы построения зарубежных спутниковых систем персональной подвижной связи : учеб. пособие. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2008. 345 с.
- [3] Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratuschnyak V. N., Grithan O. B. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet // *Journal of Physics: Conference Series – 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*. 2020. vol. 1515. issue 3. doi: 10.1088/1742-6596/1515/3/032041
- [4] Захарьев Л. Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М. : Радио и связь, 1985. 368 с.
- [5] Валитов Р. Р., Киселев С. К. Измерение основных характеристик фазированной антенной решетки для доплеровского измерителя составляющих скорости авиационного применения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20. № 4–3 (84). С. 351–361.
- [6] Миляев П. В., Калинин Ю. Н. Современные методы и средства измерения характеристик антенн // *Метрология в радиоэлектронике : тезисы докладов IX Всеросс. науч.-техн. конф.* 2014. С. 16–20.
- [7] Мухин А. В. Исследование радиотехнических характеристик зеркальных антенн космических аппаратов :

дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Томск, 2016. 140 с.

- [8] Кирпанев А. В., Кирпанев Н. А. Принципы исследования антенн с обтекателем регулярной формы с помощью сферического сканера // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 4. С. 14–21.
- [9] Испытательная система для измерения характеристик беспроводной связи R&S TS8991 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage\\_63493-8444.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html) (дата обращения 15.08.20).
- [10] TS8991 OTA Performance Test System. Perfect characterization of wireless products over the air interface [Электронный ресурс]. URL: [https://www.av-iq.com/avcat/images/documents/datasheet/ts8991\\_datasheet.pdf](https://www.av-iq.com/avcat/images/documents/datasheet/ts8991_datasheet.pdf) (дата обращения 15.08.20).

## STAND FOR MEASURING THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF ANTENNAS OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

**A. B. Gladyshev<sup>1</sup>, D. D. Dmitriev<sup>1</sup>, V. N. Ratushnyak<sup>1</sup>,  
A. V. Zhgun<sup>1</sup>, O. B. Gritsan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

*The development of network based on satellite communication systems is a promising solution for providing telecommunications services in the Arctic. Therefore, the task of developing and creating earth stations for advanced satellite communication systems that have characteristics significantly higher than their world counterparts is actual. Characteristics of such stations depend on antenna's systems characteristics that determine the energy characteristics of the communication channel. The aim of this work is a stand developing for measuring directional characteristics of antennas of satellite communication systems based on the spherical scanner (TS8991). Spiral scanning is an alternative measurement method aimed at reducing measurement time with saving necessary accuracy. As a result of this work, the spiral scanning algorithm based on the near-field scanner Rohde & Schwarz TS8991 was implemented. Moreover, the stand for monitoring and configuring the parameters of satellite earth station antennas was built. Block diagram of this stand is presented in article. An antenna with 1,2 m diameter of reflector was tested on the developed stand. The measurement results showed deviations of the measured values from the calculated values, which related by design disadvantages of the antenna. The stand using time was 35 minutes for measurements and conversions to the far field, for an antenna with 1,2 m diameter of reflector.*

*Keywords: satellite communication system, measurement of antenna parameters, flat scanner, cylindrical scanner, spherical scanner.*

### References

- [1] Vygon'skiy Yu. G. *Predlozheniya po sozdaniyu kosmicheskoy sistemy dlya predostavleniya telematicheskikh uslug svyazi* [Proposals for the establishment of space systems to provide telematics services] // Fundamental research, 2014, no. 9–4, pp. 719–723. (In Russian)
- [2] Andreev A. M. *Principy postroeniya zarubezhnykh sputnikovyyh sistem personal'noj podvizhnoy svyazi* [Principles of building foreign satellite systems of personal mobile communication: studying manual]. St. Petersburg, Military academy of A. F. Mozhaisky, 2008. 345 p. (In Russian)

- [3] Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratuschnyak V. N., Grithan O. B. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet // Journal of Physics: Conference Series – 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies, 2020, vol. 1515, issue 3. doi: 10.1088/1742-6596/1515/3/032041
- [4] Zakhariev L. N. *Metody izmereniya harakteristik antenn SVCH* [Methods for measuring the characteristics of microwave antennas]. Moscow, Radio and communications, 1985. 368 p. (In Russian)
- [5] Valitov R. R., Kiselev S. K. *Izmerenie osnovnykh harakteristik fazirovannoj antennoj reshetki dlya doplerovskogo izmeritelya sostavlyayushchih skorosti aviacionnogo primeneniya* [Measurement of the main characteristics of a phased array antenna for a Doppler speed meter for aviation applications] // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018, vol. 20, no. 4–3 (84), pp. 351–361. (In Russian)
- [6] Milyaev P. V., Kalinin Yu. N. *Sovremennye metody i sredstva izmereniya harakteristik antenn* [Modern methods and tools for measuring antenna characteristics]. Abstracts of the IX Russian scientific and technical conference «Metrology in radio electronics», 2014, P. 16–20. (In Russian)
- [7] Mukhin A. V. Research of radio technical characteristics of mirror antennas of spacecraft : Cand. Diss. Tomsk, 2016, 140 p.
- [8] Kirpanev A. V., Kirpanev N. A. *Principy issledovaniya antenn s obtekatelem reguljarnoj formy s pomoshch'yu sfericheskogo skanera* [Principles of antennas research with a shape fairing by using a spherical scanner] // Issues of radio electronics, 2020, no. 4, pp. 14–21. (In Russian)
- [9] *Ispytatel'naya sistema dlya izmereniya harakteristik bosprovodnoj svyazi R&S TS8991* [Test system for measuring the characteristics of wireless communications R&S TS8991]. Available at: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage\\_63493-8444.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html) (accessed 15.08.20). (In Russian)
- [10] TS8991 OTA Performance Test System. Perfect characterization of wireless products over the air interface. Available at: [https://www.av-iq.com/avcat/images/documents/datasheet/ts8991\\_datasheet.pdf](https://www.av-iq.com/avcat/images/documents/datasheet/ts8991_datasheet.pdf) (accessed 15.08.20).

## Сведения об авторах

*Гладышев Андрей Борисович* – начальник кафедры Сибирского федерального университета. Окончил Военный университет ПВО (г. Тверь) в 2000 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

*Грицан Олег Борисович* – начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева в 2010 году, в 2013 году – аспирантуру (там же). Область научных интересов: станции спутниковой связи.

*Дмитриев Дмитрий Дмитриевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Сибирского федерального университета. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО в 1995 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

*Жгун Александр Вячеславович* – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.

*Ратушняк Василий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры АСУ ВКС Сибирского федерального университета. Окончил филиал Военного университета ПВО в 2002 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи.