

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ

© 2018

- О. В. Васюткина** ведущий инженер-конструктор центра получения и обработки информации «Самара»;  
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;  
[croi@mail.ru](mailto:croi@mail.ru)
- А. В. Вопилин** инженер-конструктор 2 категории центра получения и обработки информации «Самара»;  
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;  
[croi@mail.ru](mailto:croi@mail.ru)
- С. В. Радучев** инженер-конструктор 1 категории центра получения и обработки информации «Самара»;  
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;  
[croi@mail.ru](mailto:croi@mail.ru)
- Р. Р. Халилов** кандидат технических наук, начальник центра получения и обработки информации «Самара»;  
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;  
[halilovr82@mail.ru](mailto:halilovr82@mail.ru)
- В. С. Якунин** заместитель начальника центра получения и обработки информации «Самара»;  
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;  
[svetaslav@bk.ru](mailto:svetaslav@bk.ru)

Рассматривается задача определения характеристик диаграммы направленности антенны космического аппарата, решение которой позволит оценить изменения параметров антенны с течением времени. Для решения задачи предложен метод определения диаграммы направленности антенны космического аппарата с использованием наземной станции приёма информации. Представлены результаты имитационного моделирования распределения электромагнитного излучения по поверхности Земли для различных трасс пролёта, показывающие возможность использования наземной станции приёма информации для построения диаграммы направленности антенны космического аппарата. Приведён алгоритм расчёта частей диаграммы направленности с их последующим объединением, определены условия, ограничивающие точность предложенного метода и направление по ускоренному построению диаграммы направленности антенны космического аппарата. Представлена апробация предложенного метода на примере антенны малого космического аппарата «АИСТ–2Д». Для этого построена диаграмма направленности антенны радиолинии передачи целевой информации космического аппарата и определены характерные части диаграммы направленности антенны. Представлены результаты проведённого сравнительного эксперимента с изменением направления излучения антенны и определением изменений характеристик приёма информации.

*Космический аппарат; дистанционное зондирование Земли; наземная станция приёма информации; диаграмма направленности антенны.*

---

**Цитирование:** Васюткина О.В., Вопилин А.В., Радучев С.В., Халилов Р.Р., Якунин В.С. Определение диаграммы направленности антенны космического аппарата с использованием наземной станции // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 20-27.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-20-27

### Введение

В настоящее время динамично развиваются технологии, связанные с использованием космического пространства. Одно из направлений такого развития – это использование космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Мирровая

группировка данного типа космических аппаратов (КА) постоянно растёт и развивается, миниатюризация и интеграция блоков и устройств позволяют расширять возможности и качество работы, одновременно с этим сокращаются сроки на подготовку к запуску [1]. Несмотря на то, что все блоки и устройства отдельно и совместно проверяются на Земле, в том числе проверяются характеристики антенны [2; 3], а результаты испытаний и характеристики устройств фиксируются, полезно иметь возможность измерить характеристики в процессе полёта КА. Это может использоваться, например, для оценки деградации антенны КА и изменения её характеристик с течением времени или для подстройки наземной станции для обеспечения приёма сигнала с нового типа КА.

В качестве постановки задачи определим, что для построения диаграммы направленности антенны передачи целевой информации КА должны быть использованы измерения, полученные с использованием наземной станции приёма информации. При этом данные измерения должны производиться в процессе приёма целевой информации, исключая ограничения на использование КА по целевому применению. Характерными измерениями, фиксируемыми при приёме информации, являются значения уровня сигнала на входе приёмника, угла места и азимута, отнесённые ко времени получения данных измерений.

### Синтез метода

Для построения диаграммы направленности бортовой антенны КА было рассмотрено распределение электромагнитного излучения по поверхности Земли при передаче сигнала с КА на наземный пункт приёма информации (НППИ) при различных трассах пролёта. Для этого проведено имитационное моделирование, при котором использовались баллистические данные МКА «АИСТ-2Д» и координаты станции приёма информации Центра получения и обработки информации (ЦПОИ) «Самара» ракетно-космического центра «Прогресс». При этом моделировался случай, когда КА развёрнут в надир на всём протяжении сеанса связи. Диаграмма направленности была разделена на кольца, которые отображают границы распределения электромагнитного излучения по поверхности Земли в зависимости от углов диаграммы бортовой антенны.

Задача нахождения границ облучённого участка земной поверхности была сведена к нахождению пересечения конуса и сферы (рис. 1).

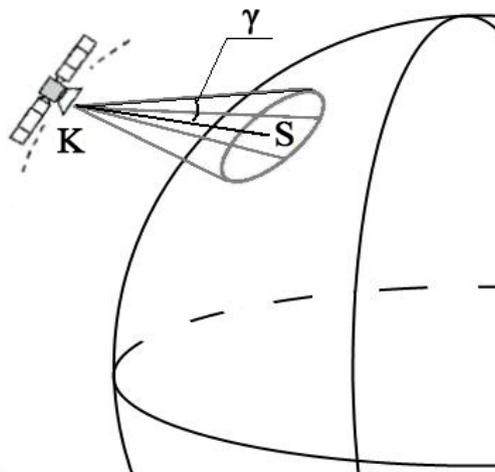


Рис. 1. Геометрическая формализация задачи нахождения границы облучённого участка земной поверхности

Граница облучённого участка земной поверхности определялась как решение следующей системы уравнений для каждого положения центра масс КА [4]:

$$\begin{cases} \frac{(x-k_1(t))(s_1-k_1(t))+(y-k_2(t))(s_2-k_2(t))+(z-k_3(t))(s_3-k_3(t))}{\sqrt{(x-k_1(t))^2+(y-k_2(t))^2+(z-k_3(t))^2} \sqrt{(s_1-k_1(t))^2+(s_2-k_2(t))^2+(s_3-k_3(t))^2}} = \cos\gamma, \\ x^2+y^2+z^2=R^2, \end{cases}$$

где  $K(k_1(t), k_2(t), k_3(t))$  – координаты текущего положения центра масс КА на орбите;  $S(s_1, s_2, s_3)$  – координаты пункта приёма информации;  $\gamma$  – половина ширины границы кольца диаграммы направленности бортовых антенн высокоскоростной радиолинии КА.

В случае непустого пересечения конуса излучения по главному лепестку диаграммы направленности, задаваемого первым уравнением системы, с поверхностью Земли из двух образовавшихся кривых выбиралась та, расстояние от точек которой до положения центра масс КА меньше.

На рис. 2 представлены распределения электромагнитного излучения по поверхности Земли и трасса пролёта КА при передаче информации с КА на НППИ с максимальным углом места (УМ) 24, 45, 67 и 88°.

Из приведённых рисунков видно, что каждая трасса пролёта формирует облучение земной поверхности своей частью диаграммы, которая меняется при изменении положения КА. Таким образом, при достаточном количестве сеансов связи и выше приведённых условиях можно зафиксировать уровень мощности сигнала, получаемого станцией приёма информации от различных частей диаграммы направленности. При последующем анализе полученных результатов из частей формируется полная диаграмма направленности передающей антенны КА в полёте.

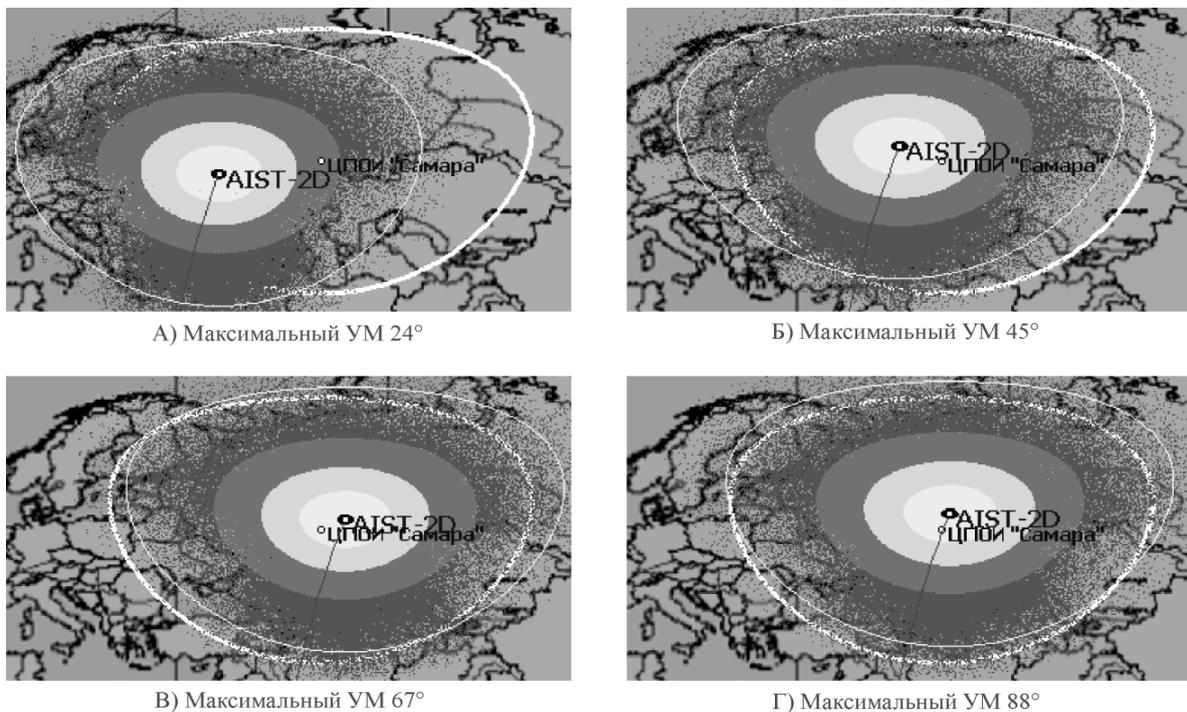


Рис. 2. Распределение электромагнитного излучения по поверхности Земли для различных трасс пролёта

Для измерения диаграммы направленности необходимо:

1. Зафиксировать трассы полёта КА в различных азимутальных направлениях при едином направлении пролёта, например С–Ю, при этом хотя бы одна из них должна быть с максимальным углом места  $\alpha = 90^\circ$ . Трасса, проходящая через максимальный угол места, даст возможность построить диаграмму во всех направлениях излучения, в том числе и в направлении центра антенны.

2. Перевести бортовую антенну КА в направление в нади́р либо при отсутствии приводов на антенне расположить КА в направлении полёта в центр Земли.

3. Зафиксировать мощность сигнала с входных каскадов станции приёма информации, при этом привязать измерение мощности сигнала к углам места и азимута  $P(\alpha_\beta)$ .

4. Рассчитать ослабление при распространении сигнала в свободном пространстве по выражению [5]:

$$A_{св}(\alpha_\beta) = \left( \frac{4\pi r(\alpha_\beta)}{\lambda} \right)^2.$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны;  $r(\alpha_\beta)$  – дальность связи [6]:

$$r(\alpha_\beta) = \sqrt{R^2 \left( \sin \left( \frac{\alpha_\beta \pi}{180} \right) \right)^2 - \left( R^2 - (R + H)^2 \right) - R \sin \left( \frac{\alpha_\beta \pi}{180} \right)},$$

где  $R$  – радиус Земли;  $H$  – высота орбиты КА;  $\alpha$  – угол места КА;  $\beta$  – азимут КА.

5. Просуммировать полученные значения  $A_{св}(\alpha_\beta)$  со значениями мощности сигнала:  $R(\alpha_\beta) = P(\alpha_\beta) + A_{св}(\alpha_\beta)$ .

Полученный вектор  $R(\alpha_\beta)$  значений определяет вид сечения пространственной диаграммы направленности бортовой антенны. После проведения нескольких измерений в разных азимутальных направлениях возможно получить трёхмерный вид диаграммы направленности бортовой антенны.

Для построения трёхмерного вида диаграммы направленности бортовой антенны полученные значения  $R(\alpha_\beta)$  заносятся в матрицу  $\mathbf{U}$  размерностью  $N$  на  $M$ . Значения  $N$  и  $M$  определяются следующими выражениями:  $N = \frac{360}{\Delta_\beta} + 1$ , где  $\Delta_\beta$  – шаг измерения азимута, и  $M = \frac{90}{\Delta_\alpha} + 1$ , где  $\Delta_\alpha$  – шаг измерения угла места.

Столбец матрицы соответствует приведённому значению азимута в момент измерения в диапазоне от 0 до  $360^\circ$ , а строка – приведённому значению угла места в момент измерения в диапазоне от 0 до  $90^\circ$ . Если в строке остались нулевые значения, то они заполняются линейным приведением одного ненулевого значения к другому. Затем значения азимута и угла места переводятся в полярные координаты с радиусом  $90^\circ$ . Значения мощности заносятся в массив размерностью  $2M - 1$  на  $2M - 1$ , где строки и столбцы соотносятся с полученными полярными координатами. Поскольку матрица дискретна, то при переводе значений азимута и угла места в полярные координаты остаются незаполненные ячейки внутри заданного радиуса, которые заполняются усреднением значений близлежащих ячеек. Полученная матрица представляет собой трёхмерную модель диаграммы направленности.

Необходимо отметить, что при фиксировании во время сеансов связи мощности сигнала с КА станцией приёма информации с большей или меньшей величиной  $\Delta_\alpha$  и  $\Delta_\beta$ , вид полученной диаграммы при построении будет приближаться или удаляться от истинной диаграммы исходя из ошибок интерполяции.

Отметим, что в представленном методе построения диаграммы направленности:

1. Не учитывается ослабление сигнала в атмосферных газах, которое целиком вызвано явлением поглощения и в основном зависит от частоты, угла места, высоты над уровнем моря и плотности водяных паров (абсолютная влажность). На частотах ниже 10 ГГц им обычно можно пренебречь [7].

2. Влияние ослабления сигнала из-за гидрометеоров не учитывается, так как выбираются сеансы связи, при проведении которых осадков нет.

3. Погрешность измерения диаграммы зависит от погрешности наведения антенны наземной станции приёма информации на КА.

4. Диаграмма направленности бортовой антенны КА строится с учётом особенностей расположения антенны и корпуса КА, а также с учётом затенения антенны рядом стоящими блоками и устройствами КА.

Возможно ускорение построения диаграммы направленности за счёт использования нескольких территориально удалённых станций приёма информации. Тогда матрица  $U$  будет получена следующим образом:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^l U_j}{l},$$

где  $U_j$  – матрица, полученная с помощью  $j$ -станции;  $l$  – количество станций.

### **Апробация метода**

Данный метод построения диаграммы направленности бортовой антенны КА был опробован с использованием станции приёма информации ЦПОИ «Самара». Строилась диаграмма направленности малого космического аппарата (МКА) «АИСТ-2Д», запущенного 28 апреля 2016 г. [8]. МКА имеет широконаправленную передающую антенну с косекансным видом диаграммы направленности, имеющей характерные минимумы и максимумы в зависимости от угла между продольной осью антенны и направлением к точке наблюдения.

По разработанному методу была построена диаграмма направленности антенны передачи целевой информации МКА. Исходными данными для построения были результаты измерений, полученные станцией приёма информации ЦПОИ «Самара». Результат построения представлен на рис. 3.

Диаграмма была построена из матрицы  $91 \times 361$ , дискретность составила  $1^\circ$ . Значения элементов матрицы между собой были линейно интерполированы. Для построения использовалось 142 сеанса связи. На рис. 3 коэффициент усиления антенны изображён в градациях цвета от чёрного (минимума) к белому (максимуму).

Как видно из рис. 3, диаграмма направленности антенны МКА неравномерна, отсутствует симметрия и видны провалы. В сеансах связи провалы в диаграмме направленности характеризовались снижением уровня принимаемого сигнала.

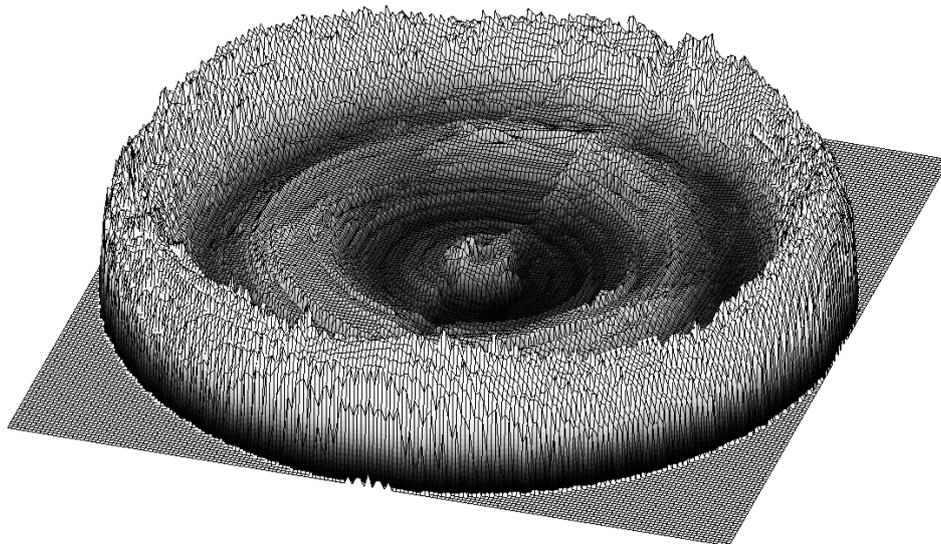


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны КА

Анализ диаграммы позволил предположить, что при повороте МКА по углу рыскания характер изменения мощности принимаемого сигнала изменился на величину разницы уровней в диаграмме между значениями в сеансе связи с поворотом и без него. Данное предположение было подтверждено, характер изменения сигнала в процессе приёма информации соответствовал предполагаемым изменениям.

### Заключение

Разработанный метод обладает рядом преимуществ, поскольку позволяет оценивать изменения характеристик антенны с течением времени, исключая при этом ограничения на использование космического аппарата по целевому применению. Результаты использования метода позволили улучшить качество приёма информации с МКА «АИСТ-2Д» станцией приёма информации ЦПОИ «Самара».

### Библиографический список

1. Исследование рынка малых космических аппаратов в ретроспективе 2002-2013 гг. и с прогнозом до 2020 г. <http://o2consulting.ru/articles/market-research-mka/>
2. Захаров Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Щеглов К.С. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
3. Гавриленко В.Г., Калинин А.В. Методы измерения характеристик антенн по сигналам вземных радиоисточников. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет, 2012. 58 с.
4. Железнов Ю.Е., Котлова Т.В., Соломатин П.А., Халилов Р.Р., Якунин В.С. Обеспечение передачи информации на наземные пункты приёма информации с защитой от несанкционированного доступа (селективной передачи) // Сборник материалов VI научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Москва: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2009. С. 189-193.
5. Расчёт ослабления в свободном пространстве. Рекомендация МСЭ-R P.525-3 (11/2016). [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-I!!PDF-R.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-I!!PDF-R.pdf)
6. Журавлёв А.А. Передача цифровой информации от космических аппаратов на Землю при малых углах места. Дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2001. 123 с.

7. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос. Рекомендация МСЭ-R P. 618-12 (07/2015). [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-12-201507-S!!PDF-R.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-12-201507-S!!PDF-R.pdf)

8. Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Абрашкин В.И., Халилов Р.Р., Ткаченко С.И., Космодемьянский Е.В., Борисов М.В., Ткаченко И.С., Вагнер О.И., Нураева С.П., Влащенко О.В. Опыт-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Первые результаты и перспективы // Сборник материалов XIII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». М.: Манускрипт, 2016. С. 23-27.

## DETERMINATION OF SPACECRAFT ANTENNA DIRECTIVITY PATTERN WITH THE USE OF AN EARTH-BASED STATION

© 2018

- O. V. Vasyutkina** Lead Design Engineer, “Samara” Earth remote sensing data acquisition, processing and distribution center;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[cpoi@mail.ru](mailto:cpoi@mail.ru)
- A. V. Vopilin** Design Engineer, “Samara” Earth remote sensing data acquisition, processing and distribution center;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[cpoi@mail.ru](mailto:cpoi@mail.ru)
- S. V. Raduchev** Design Engineer; “Samara” Earth remote sensing data acquisition, processing and distribution center;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[cpoi@mail.ru](mailto:cpoi@mail.ru)
- R. R. Khalilov** Candidate of Science ( Engineering), Head of the “Samara” Earth remote sensing data acquisition, processing and distribution center;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[halilovr82@mail.ru](mailto:halilovr82@mail.ru)
- V. S. Yakunin** Deputy Head of “Samara” Earth remote sensing data acquisition, processing and distribution center;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[svetaslav@bk.ru](mailto:svetaslav@bk.ru)

The problem of defining characteristics of the spacecraft antenna directivity pattern is considered in the paper. The solution of the problem will make it possible to estimate changes of antenna parameters with time. A method of defining the spacecraft antenna directivity pattern with the use of the earth-based data receiving stations is proposed for solving the problem. The results of simulation modeling of distribution of electromagnetic radiation over the Earth's surface for different routes of flight are presented in the paper. These results show the possibility of using an earth-based data receiving station for the construction of the spacecraft antenna directivity pattern. An algorithm of calculating parts of the direction characteristic with their subsequent integration is given in the article. The conditions limiting the accuracy of the proposed method as well as the ways of speeding up the construction of the spacecraft antenna directivity pattern are determined. Approbation of the proposed method through the example of the antenna of the small spacecraft “AIST-2D” is discussed. The directivity pattern of the antenna of the radio data link for transmitting target information of the satellite was constructed for this purpose and characteristic parts of the antenna directivity pattern are defined. The results of the comparative experiment with changes in the antenna radiation direction and definition of changes in information reception characteristics are presented.

*Spacecraft; Earth remote sensing; earth-based data receiving stations; antenna directivity pattern.*

---

**Citation:** Vasyutkina O.V., Vopilin A.V., Raduchev S.V., Khalilov R.R., Yakunin V.S. Determination of spacecraft antenna directivity pattern with the use of an Earth-based station. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 20-27. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-20-27

## References

1. *Issledovanie rynka malykh kosmicheskikh apparatov v retrospektive 2002-2013 gg. i s prognozom do 2020 g.* [Small spacecraft marketing survey in retrospective of 2002–2013 with a forecast up to 2020]. Available at: [http:// o2consulting.ru/articlecs/market-research-mka/](http://o2consulting.ru/articlecs/market-research-mka/)
2. Zakharov L.N., Lemanskiy A.A., Turchin V.I., Tseytlin N.M., Shcheglov K.S. *Metody izmereniya kharakteristik antenn SVCh* [Methods of measuring microwave antenna characteristics]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1985. 368 p.
3. Gavrilenko V.G., Kalinin A.V. *Metody izmereniya kharakteristik antenn po signalam vnezemnykh radioistochnikov* [Methods of measuring antenna characteristics by the signals of extraterrestrial radio sources]. Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod Publ., 2012. 58 p.
4. Zheleznov Yu.E., Kotlova T.V., Solomatin P.A., Khalilov R.R., Yakunin V.S. Obespechenie peredachi informatsii na nazemnye punkty priema informatsii s zashchitoy ot nesanktsionirovannogo dostupa (selektivnoy peredachi). *Sbornik materialov VI nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sistemy nablyudeniya, monitoring i distantsionnogo zondirovaniya Zemli»*. Moscow: MNTORES im. A.S. Popova Publ., 2009. P. 189-193. (In Russ.)
5. Calculation of free-space attenuation. Recommendation ITU-R P.525-3 (09/2016). Available at: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-I!!PDF-E.pdf)
6. Zhuravlev A.A. *Peredacha tsifrovoy informatsii ot kosmicheskikh apparatov na Zemlyu pri malykh uglakh mesta* [Transmission of digital information from spacecraft to Earth at small elevation angles]. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Science. Samara, 2001. 123 p.
7. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Recommendation ITU-R P.618-12 (07/2015). Available at: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-12-201507-S!!PDF-R.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-12-201507-S!!PDF-R.pdf)
8. Akhmetov R.N., Stratilatov N.R., Abrashkin V.I., Khalilov R.R., Tkachenko S.I., Kosmodem'yanskiy E.V., Borisov M.V., Tkachenko I.S., Vagner O.I., Nuraeva S.P., Vlasenko O.V. Opytno-tehnologicheskyy malyy kosmicheskyy apparat «AIST-2D». Pervyye rezul'taty i perspektivy. *Sbornik materialov XIII nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sistemy nablyudeniya, monitoring i distantsionnogo zondirovaniya Zemli»*. Moscow: Manuskript Publ., 2016. P. 23-27. (In Russ.)