

# Измерение параметров амплитудной диаграммы направленности антенной системы навигационного космического аппарата с помощью наземного измерительного комплекса

А. С. Завгородний, В. Л. Воронов, И. В. Рябов, Н. Р. Цигенгагель

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: zavgor@vniiftri.ru, voronov@vniiftri.ru, ryabov@vniiftri.ru, tcigengagel\_nr@vniiftri.ru

*Рассмотрен метод измерений параметров амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерных устройств навигационных космических аппаратов с поверхности Земли. Выполнены предварительные расчёты участков объёмной фигуры амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерного устройства навигационного космического аппарата. Результаты расчётов демонстрируют работоспособность метода.*

**Ключевые слова:** радионавигационный сигнал, амплитудная диаграмма направленности, навигационный космический аппарат, глобальная навигационная спутниковая система, ГЛОНАСС.

В связи с непрерывным ужесточением требований к точностным характеристикам глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС растёт важность и трудоёмкость её метрологического обеспечения. Все больше параметров наземного, пользовательского и космического сегментов системы требуют регулярных измерений и обеспечения прослеживаемости к государственным эталонам.

Важным этапом эксплуатации навигационного космического аппарата (НКА) являются лётные испытания. В процессе испытаний оцениваются параметры передающих и антенно-фидерных устройств (АФУ) НКА – энергетические, спектральные и временные характеристики излучаемого радионавигационного сигнала, а также характеристики диаграммы направленности (ДН) АФУ. Несмотря на то, что в интерфейсном контрольном документе [1] в явном виде не регламентированы параметры амплитудной ДН АФУ НКА, эта характеристика определяет, прежде всего, мощность сигнала в приземном слое при различных положениях НКА относительно потребителя, т. е. непосредственно влияет на качество навигационных определений.

**Теоретическое обоснование.** Рассмотрим задачу измерений формы амплитудной ДН АФУ НКА с использованием наземного измерительного комплекса (ИК) на основе крупноапертурной антенной системы. Антенная система наземного ИК расположена в дальней зоне АФУ НКА и имеет узкую ДН с известными параметрами. В процессе измерений характеристик ДН аппарат совершает движение по круговой орбите вокруг Земли. Измерительный комплекс при этом является стационарным объектом на поверхности Земли и движется вместе с ней, его антенная система наводится на НКА по имеющейся эфемеридной информации. В зависимости от ракурса НКА (углового положения линии визирования ИК–НКА в заданной системе координат) мощность принимаемого сигнала будет изменяться в зависимости от амплитуды напряжённости поля, излучаемого АФУ НКА вдоль линии визирования. Таким образом, для измерений характеристик амплитудной ДН АФУ НКА достаточно измерить мощность радионавигационного сигнала с различных ракурсов с учётом ослабления сигнала на трассе распространения. По результатам измерений эквивалентной изотропно излучаемой мощности НКА

с различных ракурсов можно восстановить форму ДН. Следует отметить, что восстановление формы ДН возможно только при постоянстве излучаемой НКА суммарной мощности радионавигационных сигналов и режимов работы передающих устройств и АФУ НКА.

На погрешность измерений параметров ДН наибольшее влияние оказывают следующие факторы: определение ракурса НКА относительно места расположения наземного ИК и ослабление сигнала на трассе распространения. Очевидно, что без этой информации результаты измерений мощности в приземном слое не позволяют оценить форму ДН АФУ НКА.

Решение задачи определения ослабления сигнала на трассе распространения достаточно подробно описано в [2]. Данная статья посвящена вопросам расчёта ракурса НКА и пересчёту результатов измерений в систему координат НКА.

Направление распространения сигнала от АФУ НКА к расположенным на поверхности Земли объектам удобнее рассматривать в локальных, связанных с НКА системах координат. Несколько таких систем рассмотрены в [3, 4]. Для решения задачи измерений ДН и расчёта ракурсов НКА–ИК целесообразно использовать систему координат  $R_{YS}$ , связанную с геометрическим положением НКА на орбите. В зарубежной литературе – это система рулевого управления или система рыскания, в отечественной – система «Земля–Солнце». Оорты системы координат  $R_{YS}$  определены следующим образом [3]:

$$\mathbf{e}_{X,YS} = \mathbf{e}_{Y,YS} \times \mathbf{e}_{Z,YS};$$

$$\mathbf{e}_{Y,YS} = (\mathbf{e}_O \times \mathbf{r}) / |\mathbf{e}_O \times \mathbf{r}|;$$

$$\mathbf{e}_{Z,YS} = -\mathbf{r} / |\mathbf{r}|,$$

где  $\mathbf{e}_{X,YS}$  – единичный вектор, соответствующий оси ОХ системы координат  $R_{YS}$ ;  $\mathbf{e}_{Y,YS}$  – единичный вектор, перпендикулярный направлениям на Солнце и в надири;  $\mathbf{e}_{Z,YS}$  – единичный вектор, направленный к центру масс Земли;  $\mathbf{e}_O$  – вектор направления на Солнце от центра масс НКА;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор НКА, соединяющий центр масс НКА и центр масс Земли.

Координаты центра масс Солнца в геоцентрической системе координат рассчитываются с использованием библиотек эфемеридной информации DE421 [5]. Координаты центра масс НКА  $x_{\text{НКА}}, y_{\text{НКА}}, z_{\text{НКА}}$  в геоцентрической системе координат можно вычислить по алгоритму, приведённому в [1], однако эти расчёты обычно предназначены для предварительной настройки систем слежения навигационной аппаратуры, не требующих высоких точностных характеристик. Наиболее высоким качеством с точки зрения метрологических характеристик обладают результаты расчёта эфемеридной информации НКА, распространяемые ЦНИИМАШ (данные находятся в открытом доступе, например [6]). На основании этих данных проведены следующие расчёты.

Геометрическая ось антенной системы НКА сонаправлена орту  $e_{z,YS}$  [3]. Это означает, что ось главного лепестка ДН АФУ НКА должна быть направлена на центр масс Земли. Оценим пределы, в которых возможно измерение параметров ДН АФУ НКА при наблюдениях с земной поверхности. Ширина основного лепестка ДН АФУ, очевидно, должна быть больше, чем угловые размеры Земли в локальной системе координат НКА. Это обусловлено необходимостью обеспечения работы навигационной аппаратуры воздушных и космических потребителей сигналов ГНСС. Таким образом, принципиально невозможно измерить характеристики всей ДН АФУ, так как с поверхности Земли будет видна только центральная часть основного лепестка. Для оценки угловых размеров этой области требуется определить наибольший угол, который составит с направлением орта  $e_{z,YS}$  линия визирования НКА–ИК. Поскольку в [1] энергетические характеристики радионавигационных сигналов указаны для углов места не менее  $5^\circ$ , то исключим все положения НКА, угол места которых меньше  $5^\circ$  и, тем более, отрицательный. Оценка сводится к решению геометрической задачи (рис. 1), где  $a_3=6378$  км – экваториальный радиус Земли,  $h=19100$  км – средняя высота орбиты НКА ГНСС ГЛОНАСС;  $\alpha_{\text{а-НКА}}$  – наибольший угол, который составит с осью симметрии ДН линия визирования НКА–ИК. Применим теорему синусов в получившемся треугольнике и получим решение [7]:

$$(a_3 + h) / \sin(90^\circ + 5^\circ) = a_3 / \sin \alpha_{\text{а-НКА}};$$

$$\alpha_{\text{а-НКА}} = \arcsin(a_3 \sin 95^\circ / (a_3 + h));$$

$$\alpha_{\text{а-НКА}} \approx 14^\circ 29'.$$

Следует отметить, что рассмотренный пример соответствует оптимальному расположению антенной системы наземного ИК с точки зрения наблюдений за НКА – на экваторе. Для арктических широт это значение составляет лишь немного меньше (приблизительно  $14^\circ 23'$ ) причём ширина главного лепестка ДН составляет не менее  $\pm 19^\circ$  относительно оси симметрии [1], т. е. находясь на поверхности Земли, можно измерять характеристики амплитудной ДН АФУ НКА только в секторе  $\pm 14,5^\circ$  от её предполагаемой оси симметрии, в центральной части ДН.

Итак, форма центральной части амплитудной ДН АФУ может быть оценена по точкам, каждая из которых получена в результате измерений мощности сигнала, распространяющегося от АФУ НКА до антенной системы наземного ИК. Для расчёта углов, за-

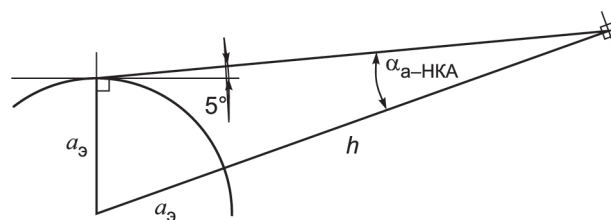


Рис. 1. Определение пределов видимости ДН АФУ НКА при измерении с поверхности Земли

дающих это направление в локальной системе координат НКА, требуется знать координаты места расположения антенной системы наземного ИК в каждый из моментов измерений. Для этого необходимо преобразовать координаты из геоцентрической системы в локальную, связанную с НКА систему «Солнце–Земля», с помощью классической формулы [7]:

$$\begin{pmatrix} x_{aYS} \\ y_{aYS} \\ z_{aYS} \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix} - M^{-1} \begin{pmatrix} x_{\text{НКА}} \\ y_{\text{НКА}} \\ z_{\text{НКА}} \end{pmatrix},$$

где  $x_{aYS}, y_{aYS}, z_{aYS}$  – координаты антенной системы наземного ИК в локальной системе координат; матрица  $M$  составлена из координат ортов  $e_{x,YS}, e_{y,YS}, e_{z,YS}$  системы  $R_{YS}$ ;  $x_a, y_a, z_a$  – координаты антенной системы в геоцентрической системе координат.

Следует отметить, что центр локальной системы координат  $R_{YS}$  связан с центром масс НКА, но не с фазовым центром АФУ. Расстояние между этими точками известно [3] и составляет не более нескольких метров, что при решении задачи измерений амплитудной ДН АФУ пренебрежимо мало с учётом расстояния между НКА и антенной системой наземного ИК. При измерениях фазовых характеристик ДН АФУ НКА это смещение, безусловно, необходимо учитывать, однако этот вопрос выходит далеко за рамки темы настоящей статьи.

Важно определить критерии достаточности измерительной информации для оценки формы центральной части ДН АФУ. Многолетние результаты наблюдений НКА и анализ формы зависимостей мощности радионавигационных сигналов от угла места [8] показывают, что основной лепесток ДН имеет сложную форму с углублением и выступами в центральной части. Для того чтобы при аппроксимации не исказить форму амплитудной ДН, необходимо выбрать шаг проведения измерений мощности меньше углового размера этих элементов формы в два – три раза. Допустим, что углубление в центральной части основного лепестка ДН занимает около трети его ширины (что наблюдается на практике [8]), и получим шаг  $30/9 \approx 3,3^\circ$ , т. е. для оценки формы амплитудной ДН АФУ центральная часть должна быть измерена шагом измерений не более  $3^\circ$ . Поскольку оценивается форма объёмной фигуры, то под шагом проведения измерений следует понимать максимальный угловой размер ячейки, образованной ближайшими тремя соседними точками, в которых проводились измерения мощности сигнала.

**Результаты моделирования. Эксперимент.** При непрерывном движении НКА относительно места расположения наземного ИК координаты  $x_{aYS}, y_{aYS}, z_{aYS}$  изменяются. Проследим это

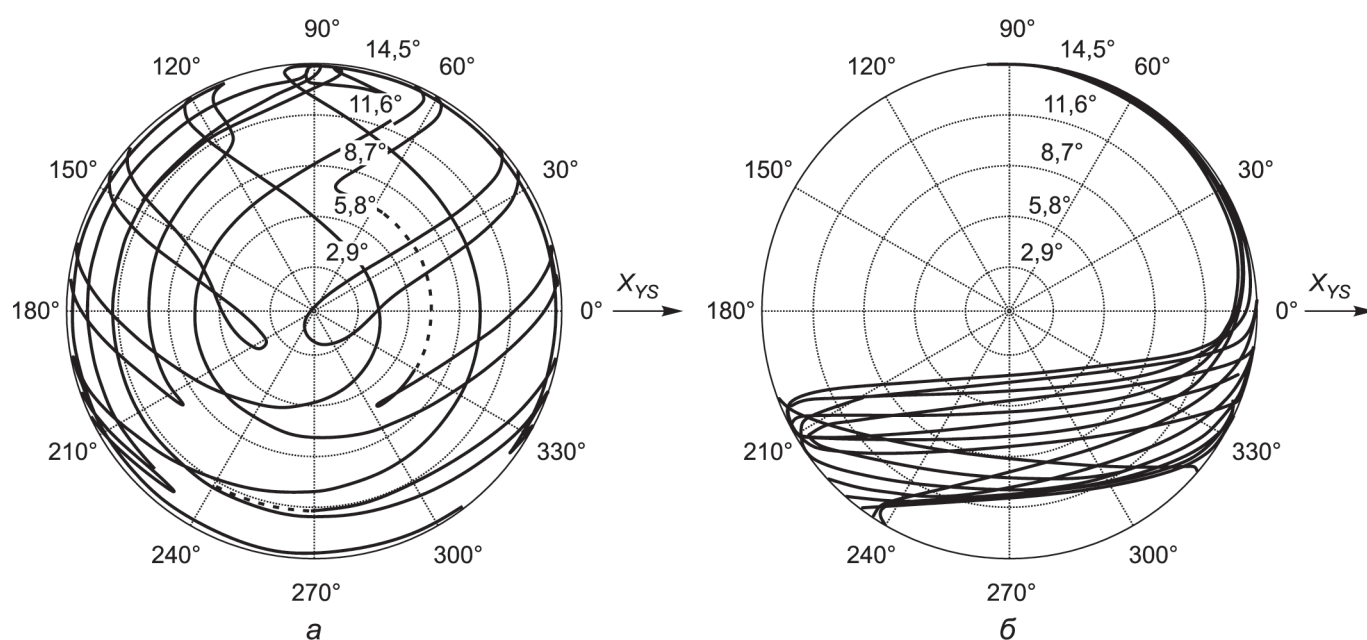


Рис. 2. Ракурсы НКА–ИК в полярной системе координат, связанной с центром масс НКА, на интервале 8 сут при расположении комплекса на экваторе (а) и в Арктике (б)

изменение на различных временных интервалах. Интервал повторяемости трасс движения НКА, а также зон радиовидимости наземными средствами составляет 7 сут 23 ч 27 мин [9]. Это означает, что за 8 сут НКА будет наблюдаться из места расположения наземного ИК под всеми возможными ракурсами. Рассчитаем углы линии визирования на антенную систему наземного ИК относительно НКА в этом интервале. В зависимости от широты места расположения наземного ИК ракурсы будут разными. Результаты моделирования временных зависимостей ракурсов НКА–ИК на интервале 8 сут при расположении наземного ИК на экваторе и в области Арктики приведены на рис. 2. При размещении антенной системы на экваторе вся центральная область ДН АФУ покрыта точками, в которых были проведены измерения. Иными словами, НКА находился под разными ракурсами относительно антенной системы, позволяя измерить характеристики центральной видимой с поверхности Земли части ДН практически со всех сторон. Напротив, при размещении антенной системы в предельно северных (или в предельно южных) широтах количество ракурсов невелико, и большая часть центральной области ДН оказывается не охваченной измерениями. Следует отметить, что такой характер заполнения центральной части ДН АФУ НКА точками (в которых измерена мощность сигнала) зависит только от широты расположения ИК. Долгота места расположения малозначительна из-за асинхронности орбит НКА ГНСС ГЛОНАСС. Так как метод разрабатывался на основании данных, полученных с использованием аппаратуры метрологического комплекса оценки энергетических характеристик (МК ОЭХ), то расчёты были выполнены, прежде всего, для места расположения его антенной системы.

Ракурсы, под которыми НКА наблюдается из места расположения МК ОЭХ, позволяют оценить амплитудную ДН в большей части её центральной области, однако остаётся участок ДН АФУ, на котором измерительная информация отсутствует (рис. 3). Это

означает, что на интервале 8 сут получить достаточное количество измерений для восстановления формы центральной части амплитудной ДН АФУ, используя измерения одного наземного ИК, не удастся. Повторяемость трасс движения НКА не является абсолютной и при должном накоплении результатов наблюдений центральная часть ДН будет закрыта необходимым количеством точек. Однако произойдет это через 30–35 сут от начала наблюдений, что скажется на результатах оценки. В таком временном интервале характеристики АФУ НКА могут претерпевать изменения, связанные с переключением работы активных элементов, с общим старением высокочастотного тракта и пр., соответственно результаты, полученные в начале такого большого периода наблюдений, к его концу могут потерять актуальность.

Применение второго ИК повышает оперативность получения данных. Также использование второго ИК способствует увеличению количества измерительной информации об амплитудной ДН АФУ НКА. Однако важно предусмотреть места расположения антенных систем таким образом, чтобы наблюдаемые комплексами области ДН дополняли друг друга, а не полностью перекрывали. Так расположение второй антенной системы на той же широте, что и первая практически не приводит к увеличению оцениваемой области ДН, тогда как при размещении второй антенны на той же долготе, но южнее приводит к уменьшению «белого пятна» (см. рис. 3). В качестве предполагаемых мест размещения второго наземного ИК рассматриваются полигоны ВНИИФТРИ и его филиалов в г. Иркутске и п.г.т. Джубге.

Предложенный подход опробован во ВНИИФТРИ с использованием измерительной информации МК ОЭХ [9]. В качестве объекта исследований был выбран НКА № 755 (R21), участвовавший в наибольшем количестве сеансов наблюдений. Измерения проводились 10 и 29 января, 6, 20 и 28 февраля, 10 июля, 10 и 15 августа, а также 3 сентября 2018 г.

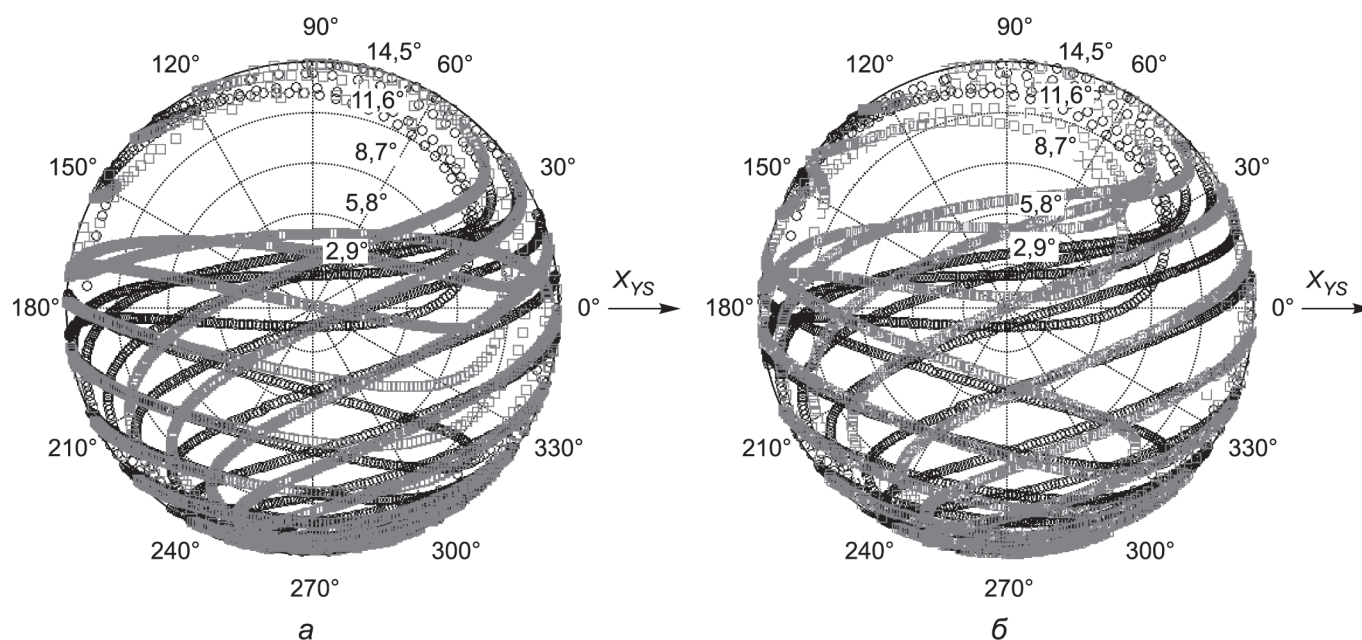


Рис. 3. Ракурсы НКА–ИК в полярной системе координат, связанной с центром масс НКА, на антенные системы первого наземного комплекса (МК ОЭХ) и второго наземного комплекса, расположенного в г. Иркутске (а) и в п.г.т. Джубге (б), на интервале 8 сут

Для оценки параметров формы ДН АФУ результаты измерений мощности предварительно обрабатывали в три этапа.

1. Проведена компенсация вариаций мощности сигнала из-за изменения длины трассы распространения в процессе наблюдений. Расстояние от места расположения наземного ИК до НКА рассчитывали по формуле

$$R = \sqrt{x_{aYS}^2 + y_{aYS}^2 + z_{aYS}^2}.$$

Известно, что мощность сигнала убывает пропорционально квадрату пройденного электромагнитной волной расстояния, ослабление  $I_{тр}$  сигнала (в децибелах) на трассе распространения рассчитывается как [10]:

$$I_{тр} = 10 \lg \left( (4\pi)^2 R^2 / \lambda^2 \right) = 20 \lg (4\pi R / \lambda),$$

где  $\lambda$  – длина волны радиоизлучения, для радионавигационных сигналов  $\lambda \approx 18,5$  см в диапазоне  $L_1$  и  $\lambda \approx 24$  см в диапазонах  $L_2, L_3$ .

Полученные поправки добавляются к результатам измерений мощности (в дБ исх. 1 мВт).

2. Учтена зависимость ослабления в нижних слоях атмосферы от погодных условий. Согласно [2] зависимость ослабления (в децибелах) в тропосфере от угла места (в диапазоне 5–90°) можно оценить по формуле

$$I_{троп} = 0,03 / \sin \alpha + k_{H_2O},$$

где  $I_{троп}$  – ослабление сигнала в тропосфере;  $\alpha$  – угол места

НКА;  $k_{H_2O}$  – коэффициент, характеризующий облачность и осадки (оценивается по таблицам из [2]).

Такой метод оценки влияния погодных условий будет использоваться лишь до включения в состав МК ОЭХ радиометра водяного пара [11], который позволит измерять ослабление нижней атмосферы непосредственно на трассе распространения сигнала, а не использовать для этого математические модели. В настоящее время применение метода моделирования и выбора коэффициентов для оценки влияния факторов нижней атмосферы обусловлено простотой и отсутствием лучшей альтернативы.

На заключительном этапе выполнено нормирование результатов измерений мощности. Нормировка заключается в приведении результатов измерений к диапазону 0–1 (–∞...0 дБ), для этого из всех значений мощности (в децибелах) вычитается максимальное значение. Нормирование выполняется в целях удобства измерений угловых характеристик по полученной фигуре ДН. В результате обработки построены сечения ДН. В силу разрозненности результатов наблюдений НКА по времени, а также очевидной недостаточности охвата центральной части ДН восстановить её исходную форму по имеющимся на момент написания статьи данным не представляется возможным. Тем не менее, опробование показывает, что при накоплении достаточного количества таких сечений, полученных при наблюдении НКА двумя (и более) наземными ИК, можно восстановить форму центральной части ДН (рис. 4).

**Выводы.** Наблюдение НКА с использованием одного наземного ИК не позволяет получить достаточное количество измерительной информации для восстановления формы центральной части ДН АФУ НКА, хотя большая её часть будет охвачена результатами измерений (см. рис. 3). Использование второго наземного ИК позволяет повысить оперативность получения изме-

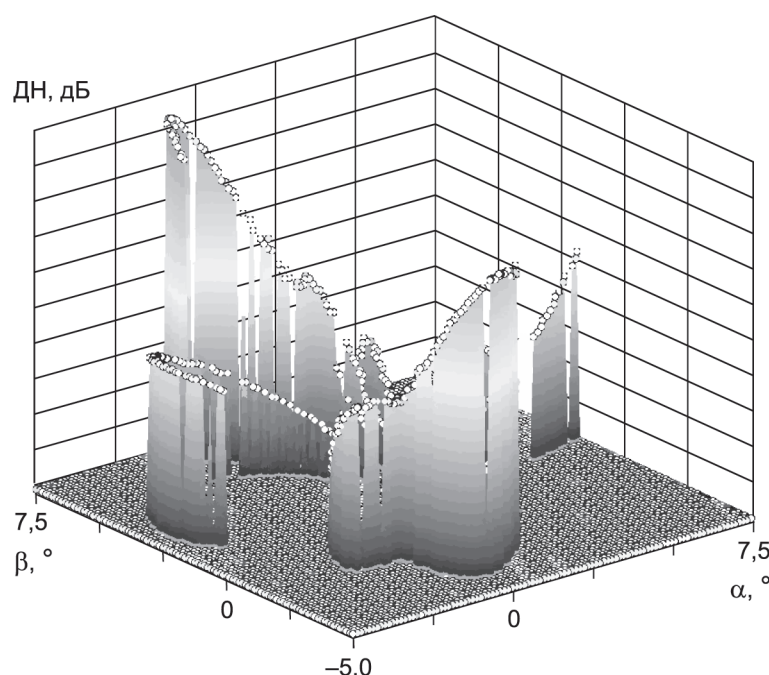


Рис. 4. Сечения амплитудной ДН АФУ НКА:  
 $\beta$ ,  $\alpha$  – угол места и азимут соответственно в локальной системе координат НКА

рительной информации, а также, при правильном расположении, значительно снижает (вплоть до исключения) площадь «белых пятен» в центральной части ДН.

Предложенный метод оценки характеристик амплитудной ДН АФУ НКА основан на обработке результатов измерений мощности радионавигационных сигналов, полученных при известных ракурсах НКА относительно ИК, совместно с параметрами нижней атмосферы. Предварительные результаты показывают возможность применения метода. На их основании можно сформулировать требования к оперативности исходной измерительной информации: НКА должен наблюдаться, по крайней мере, двумя удалёнными по широте наземными ИК на временном интервале не менее 8 сут. Работы по отработке и совершенствованию метода продолжаются.

#### Литература

1. **Глобальная** навигационная спутниковая система ГЛОНАСС.

Интерфейсный контрольный документ. Версия 5.1. [Электрон. ресурс]. <http://www.aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf> (дата обращения: 08.09.2018).

2. **Бартенев В. А., Болотов Г. В., Быков В. Л., Дьячков М. Н., Кантор Л. Я.** / Под ред. Кантора Л. Я. Спутниковая связь и вещание: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.

3. **Montenbruck O., Schmid R., Mercier F., Steigenberger P., Noll C., Fatkulin R., Kogure S., Ganeshan A. S.** GNSS satellite geometry and attitude models // *Advances in Space Research*. 2015. No. 56. P. 1015–1029.

4. **Фатеев А. В., Емельянов Д. В., Тентилов Ю. А., Овчинников А. В.** Прохождение особых участков орбиты навигационным космическим аппаратом системы ГЛОНАСС // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 4 (56). С. 126–131.

5. **Folkner W. M., Williams J. G., Boggs D. H.** The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421 // *IPN Progress Report 42-178*. August 15, 2009. [Электрон. ресурс]. [https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress\\_report/42-178/178C.pdf](https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-178/178C.pdf) (дата обращения: 26.09.2018).

6. **Информационно-аналитический** центр координатно-временного и навигационного обеспечения. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Официальный сайт]. [www.glonass-iac.ru](http://www.glonass-iac.ru) (дата обращения: 19.10.2018).

7. **Письменный Д. Т.** Конспект лекций по высшей математике: полный курс, 4-е изд. М.: Айрис-пресс, 2006. 608 с.

8. **Завгородний А. С.** Результаты наблюдений навигационных космических аппаратов при помощи специализированного метрологического комплекса (МК ОЭХ) // Системный анализ, управление и навигация: Тез. докл. XXIII междунар. науч. конф., 30 июня – 8 июля 2018 г., Евпатория. М.: МАИ, 2018 г. С. 33–34.

9. **Завгородний А. С., Рябов И. В., Воронов В. Л.** Метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов ГНСС «ГЛОНАСС» // *Альманах современной метрологии*. 2016. № 7. С. 124–138.

10. **Перов А. И., Харисов В. Н.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010.

11. **Приложение** к свидетельству № 62257-15. Описание типа средства измерений. Абсолютные радиометры водяного пара. [Электрон. версия] [www.all-pribors.ru/docs/62257-15.pdf](http://www.all-pribors.ru/docs/62257-15.pdf) (дата обращения: 14.09.18).

Дата принятия: 10.10.2018.

## Measuring the amplitude pattern parameters of navigation satellite antenna system using a ground-based measuring complex

**A. S. Zavgorodniy, V. L. Voronov, I. V. Ryabov, N. R. Tsigengagel**

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev town, Moscow region, Russian Federation,  
 e-mail: [zavgor@vniiftri.ru](mailto:zavgor@vniiftri.ru), [voronov@vniiftri.ru](mailto:voronov@vniiftri.ru), [ryabov@vniiftri.ru](mailto:ryabov@vniiftri.ru), [tcigengagel\\_nr@vniiftri.ru](mailto:tcigengagel_nr@vniiftri.ru)

*Metrological support of the navigation signal and satellite antenna-feeder system characteristics measurements is a challenge, directed to the GNSS GLONASS parameters achievement. The article is dedicated to performing measurements of satellite direction amplitude diagram from the Earth's surface. A measurement method is proposed, preliminary calculations of navigation satellite antenna directivity diagram form, demonstrating its efficiency, were performed.*

**Key words:** metrology, radionavigation signal, directivity amplitude diagram, satellite GNSS GLONASS.