

УДК 621.3.088

**О ВОССТАНОВЛЕНИИ ФОРМЫ АМПЛИТУДНОЙ
ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННО-
ФИДЕРНОГО УСТРОЙСТВА НАВИГАЦИОННОГО
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

**А.С. Завгородний, В.Л. Воронов, И.В. Рябов,
А.А. Чигвинцев, С.В. Туринцев**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,

zavgor@vniiftri.ru,

voronov@vniiftri.ru,

ryabov@vniiftri.ru,

andrei_chigvince@mail.ru,

basek@rambler.ru

Аннотация. Статья посвящена восстановлению формы амплитудной диаграммы направленности навигационного космического аппарата. В качестве исходной информации использованы результаты наблюдений спутника при помощи двух удалённых друг от друга антенных систем. Приведены результаты восстановления формы, сделаны выводы о перспективах и направлениях дальнейшей работы.

Ключевые слова: навигационный космический аппарат (НКА), антенные системы, амплитудная диаграмма направленности, измерение мощности.

**ON THE RECOVERY OF THE FORM OF THE AMPLITUDE
DIAGRAM OF THE ANTENNA-FEEDER DEVICE
OF THE NAVIGATION SPACE VEHICLE
ON THE RESULTS OF GROUND OBSERVATIONS**

**A.S. Zavgorodniy, V.L. Voronov, I.V. Ryabov,
A.A. Chigvintsev, S.V. Turintsev**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,

zavgor@vniiftri.ru,

voronov@vniiftri.ru,

ryabov@vniiftri.ru,

andrei_chigvince@mail.ru,

basek@rambler.ru

Annotation. The article is devoted to the reconstruction of the shape of the amplitude pattern of the navigation spacecraft. The results of satellite observations using two antenna systems separated from each other were used as the initial information. The results of shape restoration are presented, conclusions are drawn about the prospects and directions of further work.

Key words: navigation spacecraft (NSC), antenna systems, amplitude pattern, power measurement.

Введение

Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) широко востребованы в жизни современного общества. Технологии ГНСС применяются не только для определения координат потребителя, также с их помощью решаются задачи определения точного времени и синхронизации, автоматизации сельского хозяйства, безопасности и прочего. По этим причинам метрологическое обеспечение сигналов глобальных навигационных систем востребовано и продолжает совершенствоваться вместе с технологиями ГНСС.

Одним из наиболее важных радиотехнических параметров сигналов ГНСС является мощность. Значение мощности навигационного сигнала, принимаемого потребителем на поверхности Земли, приведено в [1]. Однако регулярные наблюдения и измерения энергетических характеристик сигналов НКА показывают, что уровень мощности принимаемого сигнала может изменяться в зависимости от угла возвышения аппарата над горизонтом в пределах нескольких децибел [2]. Более того, наблюдения НКА на особых участках орбит [3] показали асимметрию амплитудных диаграмм направленности некоторых НКА, что означает зависимость мощности принимаемого сигнала не только от угла возвышения, но и от места приёма и ракурса НКА относительно наблюдателя. Поэтому разные потребители навигационных сигналов одного и того же аппарата могут принимать сигналы различного уровня мощности. В результате даже по регулярным измерениям мощности сигнала НКА, проводимым при помощи измерительного комплекса, сложно судить об энергетических характеристиках сигнала в областях, удалённых от комплекса. Для решения задачи глобальной оценки мощности сигнала необходимо знание параметров амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерного устройства (АФУ) НКА.

Результаты наблюдений НКА

В целях метрологического обеспечения энергетических характеристик сигналов ГНСС во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан специализированный комплекс, предназначенный для измерений радиотехнических параметров навигационных сигналов (МК ОЭХ-М). Комплекс включает в себя две крупноапертурные зеркальные антенны с диаметром рефлекторов 12 м, расположенные на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» (Менделеево, Московская обл.) и Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (Иркутск). Использование крупноапертурных антенных систем позволяет решить задачи усиления навигационного сигнала до уровней, превышающих чувствительность измерительной аппаратуры, а также осуществлять пространственную селекцию сигнала, снижая уровень помех. Работы по мониторингу характеристик

сигналов космических аппаратов непрерывно ведутся с 2016 г. с использованием одной, а с 2020 г. — с использованием двух антенных систем. Сеанс наблюдений НКА заключается в сопровождении аппарата антенной системой во время его прохождения в зоне видимости комплекса, «от горизонта до горизонта» и непрерывном измерении параметров принимаемого сигнала НКА. Типичные результаты измерений мощности навигационных сигналов в диапазонах частот L1, L2 и L3 НКА № 755 ГНСС ГЛОНАСС (точка R21) приведены на рис. 1.

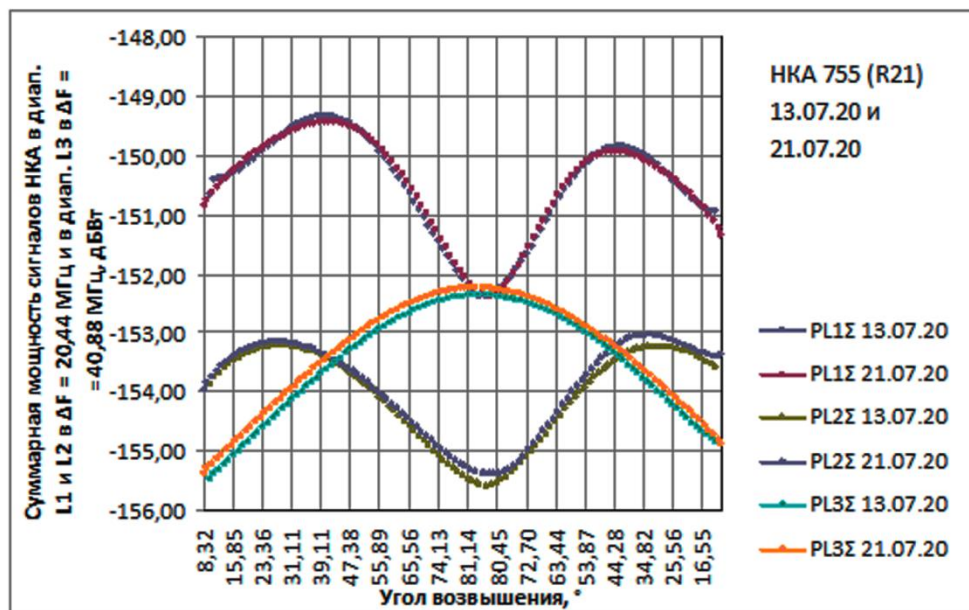


Рис. 1. Результаты наблюдений НКА 755 13 и 21 июля 2020 г.

Зависимости мощности радиосигналов от угла места в разных диапазонах частот имеют разную форму. В диапазонах L1 и L2 фигура может иметь два локальных максимума (как на рис. 1) или, если угол возвышения НКА за один сеанс не достигает 30–35°, один максимум. Вид графика мощности сигнала в диапазоне L3 зависит от типа НКА: у аппаратов «ГЛОНАСС-М» при любом возвышении в течение сеанса наблюдений зависимость имеет один максимум, соответствующий наибольшему углу возвышения; у аппаратов «ГЛОНАСС-К» форма зависимости аналогична диапазонам частот L1 и L2.

Представленные на рис. 1 зависимости совпадают с разницей не более 0,25 дБ (что свидетельствует о высокой повторяемости результатов). Следует обратить внимание на отличия формы графиков в различных диапазонах частот. Зависимости мощности в диапазонах L1 и L2 имеют характерный провал на больших углах возвышения, а мощность в диапазоне частот L3

монотонно возрастает с ростом угла возвышения. Как будет показано далее, это указывает на различия формы амплитудных диаграмм направленности в этих диапазонах частот, поскольку каждую угломестную зависимость мощности сигнала в первом приближении можно рассматривать как криволинейное сечение диаграммы направленности НКА.

Восстановление формы амплитудной диаграммы направленности АФУ НКА

Для перехода от угломестных зависимостей мощности навигационных сигналов к фигуре амплитудной диаграммы направленности АФУ НКА необходима довольно сложная математическая обработка. Под восстановлением формы понимается двухмерная интерполяция априорно неизвестной поверхности, методы интерполяции обсуждаются ниже.

Для восстановления формы диаграммы направленности выбираются результаты наблюдений НКА, полученные в течение восьми суток. Такая продолжительность обусловлена интервалом повторяемости трасс движения НКА [1]. По прошествии восьми суток ракурсы НКА относительно измерительного комплекса начнут повторяться, т.е. такие наблюдения НКА не будут нести в себе новую информацию о форме диаграммы направленности. За этот период целесообразно провести как можно больше наблюдений НКА для того, чтобы получить наибольшее количество сечений диаграммы. Использование второй антенной системы позволяет сократить время сбора первичной измерительной информации и повысить подробность восстановленной диаграммы. Это происходит потому, что сечения диаграммы направленности НКА, полученные в результате наблюдений с двух разнесённых пунктов, дополняют друг друга. То есть плотность точек диаграммы, достигаемая одной антенной за 8 суток, в случае работы с двумя антеннами достигается раньше (примерно на 3–4 сутки в зависимости от положения НКА). В качестве исходных данных будем использовать результаты наблюдений НКА 756 (точка R05) в период с 15 по 19 июня 2020 г. Всего за эти 5 суток было проведено 16 сеансов с использованием комплекса МК ОЭХ-М. Из них 10 сеансов выполнены при помощи антенной системы, расположенной во ФГУП «ВНИИФТРИ» (далее — 1-й пункт), и 6 — при помощи антенной системы, расположенной на территории ВСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» (далее — 2-й пункт).

Итак, в результате наблюдений получены массивы данных, представляющие собой значения мощности сигнала, принимаемого потребителем в месте расположения измерительного комплекса, а также значения азимута и угла возвышения НКА во время наблюдений. На первом этапе проводится коррекция результатов измерений мощности сигнала с учётом изменяющегося расстояния между НКА и измерительным комплексом, а также с учётом

ослабления радиосигнала в атмосфере. Координаты НКА в геоцентрической системе координат за интересующий период наблюдений можно получить в электронном виде на сайте АО «ЦНИИмаш» [4] или рассчитать, используя специализированные библиотеки [5]. Определить параметры трассы распространения позволяют радиометры водяного пара, входящие в состав МК ОЭХ-М. Радиометр сопровождает НКА одновременно с антенной системой и оперативно оценивает ослабление радиосигнала в атмосфере на частотах 20,7 и 31,4 ГГц, затем эти данные пересчитываются в навигационный диапазон через математический аппарат модели распространения радиоволн в атмосфере [6]. На следующем этапе оценивается ракурс НКА относительно наблюдателя. Для расчёта положения ортов локальной системы координат, связанной с бортом НКА, требуется знать координаты центра масс Солнца в геоцентрической системе координат, их рассчитывают с использованием данных модели DE421 [7]. Затем выполняется пересчёт координат измерительного комплекса из геоцентрической системы координат в локальную систему координат НКА. Важно помнить о пределах применимости наблюдений с поверхности Земли. Антенная система НКА всегда ориентирована оптической осью по направлению к центру масс Земли [8]. При высоте орбиты НКА ГНСС ГЛОНАСС 19400 км и среднем радиусе Земли около 6400 км область диаграммы направленности, которая теоретически может быть оценена с поверхности Земли, ограничена круговым сектором $14,5^\circ$ от оси симметрии диаграммы. На практике это значение составляет не более $13\text{--}14^\circ$ в силу условий наблюдения НКА, ограничивающими факторами являются затенение от зданий и объектов вблизи антенной системы, резкий рост поглощения радиосигналов в атмосфере при наведении на малые углы возвышения или «в горизонт», а также конструктивные особенности антенн. Получившиеся в результате криволинейные сечения амплитудной диаграммы направленности в диапазоне L3 приведены на рис. 2

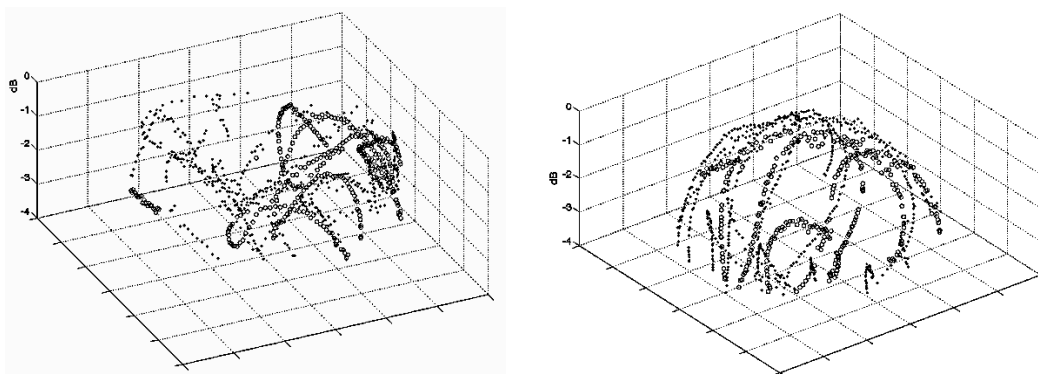


Рис. 2. Криволинейные сечения амплитудной диаграммы направленности АФУ НКА в диапазонах частот L1 (слева) и L3 (справа). Синим показаны сечения, полученные по наблюдениям из 1-го пункта; красным цветом — из 2-го пункта

После преобразования координат результаты измерений мощности нормируются и выстраиваются в виде криволинейных сечений амплитудной диаграммы направленности. Получившийся «остов» из опорных точек амплитудной диаграммы АФУ НКА интерполируется поверхностью. Наиболее простой способ двумерной интерполяции — линейный. В большинстве программ математического моделирования этот алгоритм реализован в виде готового набора функций. Пример линейной интерполяции приведён на рис. 3.

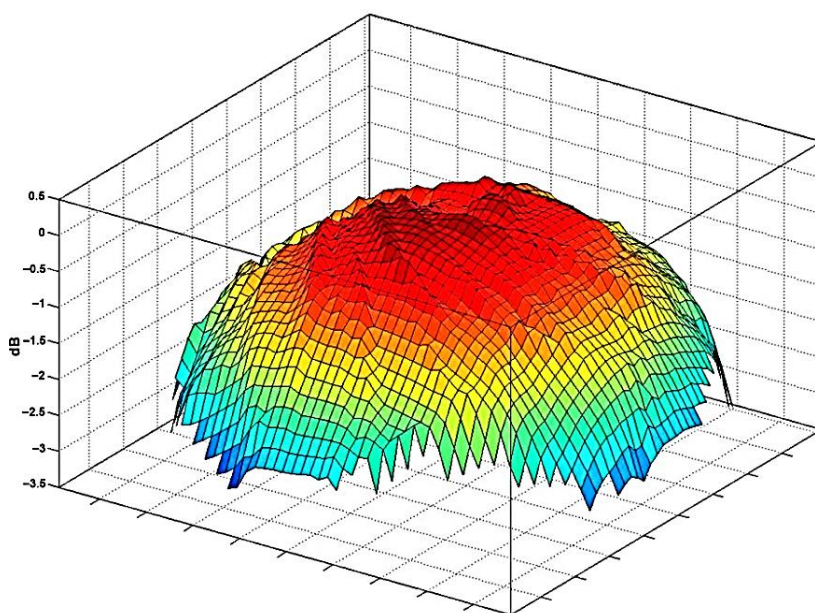


Рис. 3. Результат восстановления формы амплитудной ДН АФУ НКА в диапазоне частот L3 методом линейной интерполяции

Восстановление формы линейным методом позволяет быстро получить результат, алгоритм довольно прост и не требует больших вычислительных затрат. В то же время линейный метод имеет недостатки: чувствителен к «выбросам», т.е. форма поверхности будет сильно искажена в местах ошибок измерений, а также в результате интерполяции на поверхности остаются «рёбра» и «изломы», которых, конечно, не может быть у реальной диаграммы направленности.

Другим подходом является использование метода радиально-базисных функций (РБФ) [9], который позволяет аппроксимировать сечения гладкой поверхностью. В качестве базовой функции следует выбирать гладкие кривые (например, функции Бесселя или Гаусса). Однако применение этого метода сопряжено с рядом сложностей: весовые коэффициенты функций вычисляются в результате решения СЛАУ вида

$$Ax = b, \tag{1}$$

где A — значения базисных функций; x — вектор неизвестных коэффициентов; b — значения высот восстанавливаемой поверхности. На практике шум измерений нарушает совместность этой системы, и в явном виде задача не решается. По Тихонову [10], в этом случае целесообразно применение метода регуляризации, который заключается в решении не СЛАУ (1), а уравнения

$$(A + \alpha E)x = b, \quad (2)$$

где α — коэффициент, стремящийся к 0; E — единичная матрица размерности A . Именно оптимальный выбор α определяет метрологические характеристики найденного таким образом решения. Обычно оценивают так называемую невязку

$$r_n = Ax_a - b, \quad (3)$$

здесь x_a — решение уравнения (2). Если модуль вектора (3) не превышает погрешность измерений элементов вектора b , то x_a считают также решением (1) с точностью до погрешности измерений. Применение метода для восстановления всей фигуры амплитудной диаграммы требует вычислительных затрат, а также требует трудоёмкой подготовки результатов измерений. Однако в настоящее время метод успешно применяется для восстановления формы отдельных элементов. Для разных частей диаграммы используются разные наборы весовых коэффициентов и иногда разные базисные функции. Пример восстановления формы центральной части диаграммы в диапазоне частот L1 показан на рис. 4.

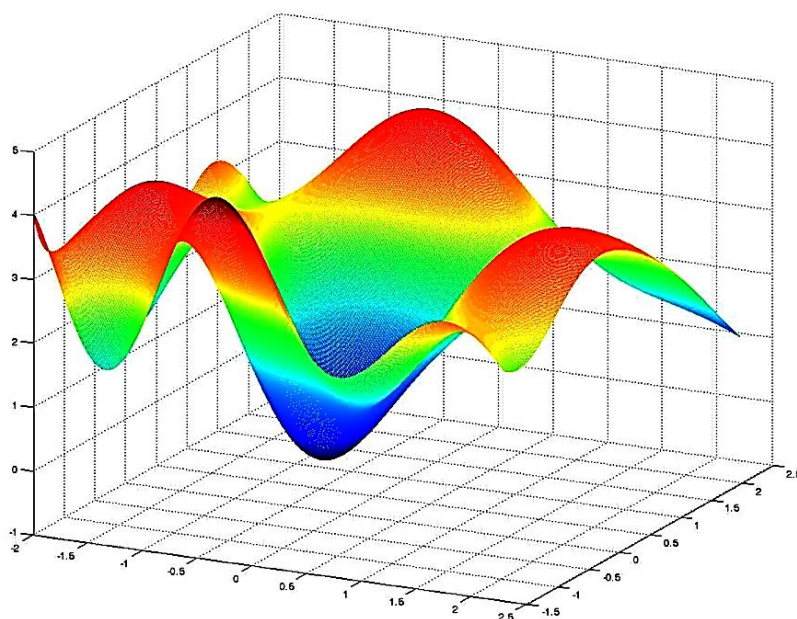


Рис. 4. Результат восстановления формы фрагмента (центральной части) амплитудной ДН АФУ НКА в диапазоне частот L1 методом радиально-базисных функций

Выводы и перспективы

Восстановление формы амплитудных диаграмм направленности АФУ НКА и последующее измерение их параметров — необходимое направление метрологического обеспечения радионавигационных сигналов. В качестве исходных данных для таких оценок используются зависимости мощности сигналов НКА от угла возвышения, полученные с использованием двух разнесённых в пространстве крупноапертурных антенных систем.

В настоящее время планируются работы по оценке формы диаграммы аппаратов «ГЛОНАСС-М» и «ГЛОНАСС-К», имеющих сигналы в трёх диапазонах частот, а также наблюдение изменений уже восстановленных диаграмм во времени.

Предложенный метод может быть использован для оценки параметров АФУ НКА во время лётных испытаний.

Список литературы

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Версия 5.1. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.kiam1.rssi.ru/pub/gps/lib/icd/ikd51ru.pdf>. Дата обращения: 05.08.2020.
2. Завгородний А.С., Воронов В.Л., Рябов В.И. Измерение мощности сигналов навигационных космических аппаратов // Тезисы докладов Восьмой Всероссийской конференции КНВО-2019. СПб.: ИПА РАН, 2019. С. 155–156.
3. Денисенко О.В., Федотов В.Н., Воронов В.Л., Рыжов В.С., Завгородний А.С., Рябов И.В. Результаты наблюдений за навигационными космическими аппаратами на особых участках орбиты // Измерительная техника. 2018. № 2. С. 20–23.
4. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/>. Дата обращения: 10.08.2020.
5. Ephem 3.7.7.1. Project description [Electronic resource]. URL: <https://pypi.org/project/ephem/>. Дата обращения: 10.08.2020.
6. Liebe H.J. MPM — An atmospheric millimeter-wave propagation model // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1989. V. 10. No. 6. P. 631–650.
7. Williams J.G., Boggs D.H., Folkner W.M. DE421 Lunar Orbit, Physical Librations, and Surface Coordinates, JPL Interoffice Memorandum 335-JW, DB, WF-20080314-001 (internal document) [Electronic resource]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, March 14, 2008. URL: https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-178/178C.pdf. Дата обращения: 05.11.2019.

8. 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. 56. P. 1015–1029.
9. *Numerical Recipes* / ed. by W.H. Press et al. 3rd edition. Cambridge, 1986. P. 685–692.
10. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 283 с.

Статья поступила в редакцию: 19.10.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 24.11.2020 г.

Статья принята в работу: 03.12.2020 г.