УДК 528.15 ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОПРАВОК НАВЕДЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В.Л. Воронов, А.С. Завгородний, И.В. Рябов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл. zavgor@vniiftri.ru

Предложены и опробованы методы юстировки антенной системы. Создан задел для уменьшения составляющей погрешности измерений мощности радионавигационных сигналов за счет неточности наведения.

The antenna system adjusting methods are proposed and tested. A reserve to reduce the component of the error in measuring the power of radio navigation signals due to inaccuracy in the guidance has been created.

Ключевые слова: радионавигационный сигнал, энергетические характеристики, двухзеркальная антенная система

Введение

Качество навигационных определений по радиосигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) зависит от множества параметров, среди которых радиотехнические характеристики навигационного сигнала и, прежде всего, его мощность. Для решения задач метрологического обеспечения характеристик радионавигационных сигналов во ФГУП «ВНИИФТРИ» был создан метрологический комплекс оценки энергетических характеристик радионавигационных сигналов (МК ОЭХ) [1, 2]. Основу комплекса составляет крупноапертурная двухзеркальная антенная система (построенная по схеме Кассегрена) с диаметром основного рефлектора 12 м. Вид антенной системы приведен на рис. 1.



Рис. 1. Антенная система МК ОЭХ

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

Использование крупноапертурной антенной системы для измерений мощности навигационного сигнала необходимо по двум причинам:

1. Мощность навигационного сигнала на приземном уровне мала (приблизительно от минус 161 до минус 155 дБВт согласно ИКД [3]) и не достигает чувствительности метрологически обеспеченных средств измерений радиотехнических величин. Крупноапертурная антенна и активные элементы высокочастотного тракта усиливают сигнал до требуемых уровней мощности.

2. В радионавигации используются широкополосные сигналы, несущие частоты которых либо отстоят друг от друга по частоте на небольшую величину (ГНСС ГЛОНАСС), либо совпадают (ГНСС GPS, Galileo). Это приводит к наложению спектров сигналов различных НКА, а значит делает невозможным измерения энергетических и спектральных характеристик сигналов по отдельности. Для решения задачи пространственной селекции одного сигнала необходима высокая направленность антенной системы. Причем со временем в условиях развертывания нескольких ГНСС и появления дополнительных НКА требования по направленности становятся только жестче. Достаточная для сопровождения одного аппарата на протяжении всего периода его видимости направленность (ширина диаграммы направленности) достигается при диаметре рефлектора более 7 м.

Процедура измерений мощности в интересах потребителя ГНСС ГЛО-НАСС подразумевает пересчет результатов измерений мощности, полученных на выходе высокочастотного тракта крупноапертурной антенной системы, к условиям работы типичной навигационной аппаратуры потребителя, антенная система которой, согласно ИКД [3], обладает малым усилением (3 дБ) и линейной поляризацией. Для этого из измеренного МК ОЭХ значения нужно вычесть коэффициент усиления собственно антенной системы и коэффициент передачи её высокочастотного тракта.

Высокочастотный тракт антенной системы МК ОЭХ сконструирован с учетом возможности калибровки широкополосным сигналом генератора шума, квазинавигационными сигналами цифрового генератора, а также калибровки с использованием векторного анализатора цепей. В результате проведения полной калибровки высокочастотного тракта перечисленными способами возможна оценка ослаблений и коэффициентов усиления в отдельных элементах тракта. Наилучшие метрологические характеристики калибровки коэффициента передачи тракта достигаются при использовании векторного анализатора цепей: пределы погрешности калибровки составляют приблизительно ± 0,05 дБ [4, 5].

Калибровка коэффициента усиления крупноапертурных антенных систем проводится методами ближней и дальней зоны. Методы ближней зоны основаны на измерениях распределения электромагнитного поля по апертуре антенны и пересчете полученных результатов в характеристики направленности и эффективности. В случае с МК ОЭХ применение этих методов технически нецелесообразно, так как подобные измерения распределения поля потребовали бы либо создания специализированного стенда вокруг антенны, что сильно сузило бы её диапазон рабочих углов, либо использования малогабаритного квадрокоптера с радиозондом, положение которого нестабильно, а погрешность измерений характеристик поля которым велика. Методы дальней зоны подразумевают использование для калибровки радиосигнала источника, расположенного в так называемой дальней зоне антенной системы, т.е. удаленное от антенной системы на расстояние L, которое определяется как [6]:

$$L \ge 2\frac{D^2}{\lambda},\tag{1}$$

где D – характерный габарит апертуры (для разных типов антенн выбирается по-разному), λ – длина волны принимаемого (или излучаемого) сигнала. Такие источники могут быть установлены на вышках и высотных объектах, находиться на борту летательных и космических аппаратов, либо это могут быть радиоастрономические источники. Расстояние до границы дальней зоны для антенной системы МК ОЭХ с диаметром рефлектора D = 12 м в радионавигационном диапазоне (длины волн λ приблизительно от 16 до 25 см) составляет не менее 1,6 км, а в Ku диапазоне (длина волны λ около 2 см) – не менее 14,5 км. На территории ФГУП «ВНИИФТРИ» нет объектов, удовлетворяющих требованию достаточного удаления от места расположения МК ОЭХ, при этом также не выполняются требования прямой видимости источника, отсутствия металлических объектов по направлению боковых лепестков и т.д. Характеристики сигналов НКА априорно неизвестны, однако, как будет показано ниже, в предположении постоянства мощности радионавигационного сигнала на коротких временных интервалах (порядка единиц минут) сигналы НКА могут использоваться при юстировке антенной системы. В качестве источника сигнала для абсолютной калибровки коэффициента усиления антенной системы было решено выбрать Солнце [2].

Методика калибровки по радиоизлучению Солнца подразумевает измерение полного коэффициента передачи всей антенной системы (т.е. коэффициента усиления антенны и коэффициента передачи высокочастотного тракта). Полный коэффициент передачи антенной системы G рассчитывается по формуле [7]

$$G[\partial B] = 10 \lg \left[\frac{8\pi \cdot f^2 \cdot P_{\text{HM}} \cdot Y \cdot g_d \cdot Q \cdot R^2}{c^2 \cdot \Pi \cdot S_{\text{COT}} \cdot 10^{-22}} \right],$$
(2)

где f – частота, на которой производятся измерения, Гц; Π – ширина полосы, в которой проводятся измерения мощности, Гц; $P_{\rm изм}$ – измеренное значение мощности излучения Солнца в полосе Π , Вт; $S_{\rm сол}$ – значение спек-

тральной плотности потока мощности Солнца, Вт / (Гц·м2); R – расстояние от Земли до Солнца, a.e.; с – скорость света, $\approx 2,998 \cdot 10^8$ м / с; Y – коэффициент потерь на трассе распространения, g_d – поправка на отличие фазового фронта падающей волны источника от плоского (иначе в литературе - поправка на «неточечность» источника по сравнению с шириной диаграммы направленности), О – коэффициент потерь за счет погрешности системы наведения антенны. Рассмотрим величины, входящие в расчетную формулу. Первые шесть из них представляют собой либо универсальные физические константы, либо результаты измерений физических величин, которые прослеживаются к государственным эталонам. Последние три – это множители, оценивающие потери за счет недостатка той или иной информации. Т.е. их уточнение приведет к снижению общей погрешности калибровки. Коэффициент потерь в атмосфере У является сложной функцией угла места наведения, параметров атмосферы, а также их высотного распределения. В настоящее время этот коэффициент и его зависимость от угла места оценены по [8], аппаратура для его измерений будет разрабатываться в рамках модернизации МК ОЭХ до 2020 года. Поправка на отличие фазового фронта падающей волны источника от плоского (иначе в литературе – поправка на «неточечность» источника) g_d оценивается исходя из соотношения угловых размеров луча антенной системы и Солнца, вычисления проводились по методике, изложенной в [8]. Оценка коэффициента потерь за счет погрешности системы наведения Q не требует привлечения дополнительной измерительной информации, вопросам разработки и опробования методики компенсашии этой составляющей посвящена настоящая статья.

Оценка вклада погрешности системы наведения в общую погрешность измерений мощности МК ОЭХ

Погрешность калибровки полного коэффициента передачи антенной системы комплекса складывается из погрешностей измерений (оценок) величин, участвующих в уравнении (2). Оценим пределы погрешности калибровки полного коэффициента усиления комплекса ΔG как алгебраическую сумму погрешностей величин, выраженных в дБ:

$$\pm \Delta G[\partial B] = \pm (2\Delta f + \Delta \Pi + \Delta P_{\mu_{3M}} + \Delta S_{con} + \Delta R + \Delta Y + Q).$$
(3)

Здесь Δf – погрешность измерений частоты гармонического радиосигнала. Относительная погрешность измерений частоты гармонического радиочастотного сигнала при помощи электронно-счетного частотомера составляет не более 10⁻⁷ [9], т.е. величина Δf , выраженная в дБ, пренебрежимо мала. Относительная погрешность измерений полосы пропускания $\Delta \Pi$ для большинства современных радиотехнических средств измерений обычно не превосходит 1 %, что соответствует 0,04 дБ [10]. Погрешность измерений мощности в полосе $\Delta P_{изм}$ соответствует погрешно-

сти измерений ваттметра поглощаемой мощности 0,15 - 0,18 дБ [11]. Погрешность оперативных результатов измерений спектральной плотности потока мощности излучения Солнца ΔS_{сол}, находящихся в открытом доступе, составляет 0,2 дБ [12]. Расстояние от Земли до Солнца известно с очень малой погрешностью, текущее расстояние уточняется ежедневно по источнику [13]. Следует отметить, что под величиной ΔY следует понимать не погрешность измерений ослабления атмосферы (так как эта величина отдельно не измеряется), а пределы изменений этого ослабления. Дело в том, что и радионавигационный сигнал и излучение Солнца проходят путь в одинаковых условиях тропосферы. При калибровке комплекса по радиосигналу Солнца коэффициент потерь У калибруется вместе с коэффициентом усиления антенны и коэффициентом передачи тракта, а при последующем наблюдении НКА значение У пересчитывается в зависимости от угла возвышения аппарата согласно [8]. Анализ результатов длительных наблюдений различных НКА показал, что изменение ослабления атмосферы ΔY за сеанс наблюдений (в отсутствии осадков) не превосходит $\pm (0.4 - 0.5)$ дБ.

Коэффициент потерь за счет погрешностей системы наведения *Q* показывает, какую мощность антенная система могла бы измерить в отсутствие ошибок наведения (см. рис. 2).



Рис. 2. К определению коэффициента потерь Q

На рис. 2 показан случай наведения антенной системы на НКА с некоторой ошибкой V_1 (в силу осевой симметрии диаграммы направленности зеркальной антенны не имеет значения ошибка по азимуту, по углу места или одновременно по двум координатам). По причине «промаха» мимо цели комплекс измерит мощность P_1 , когда как без ошибки наведения измерил бы мощности P_0 . Величина Q равна отношению P_0 / P_1 , или

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

$$Q[\partial B] = P_0[\partial B] - P_1[\partial B].$$
⁽⁴⁾

Эта величина впервые была оценена по технической документации на антенную систему, предоставленную разработчиком, и в результате обработки одновременных наблюдений различных НКА МК ОЭХ и РТ-7,5 (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Первоначальная оценка величины Q составила около $\pm (0,1 - 0,2)$ дБ (т.е. оцененные по формуле (3) пределы погрешности измерений полного коэффициента передачи МК ОЭХ составляют около $\Delta G = \pm 1$ дБ). Дальнейшее исследование Q не требовало привлечения дополнительной измерительной информации (в отличие от, например, Y), потому было продолжено. Результаты этого исследования приведены ниже.

Методики юстировки диаграммы направленности МК ОЭХ

Ошибки системы наведения можно разделить на две группы: ошибки привода (люфты механической части системы наведения) и ошибки в результате отклонения максимума диаграммы направленности от геометрической оси антенны (в результате искажений рефлектора 1 или 2 рода [6]). Обе группы ошибок являются функциями угла места, однако их сумму в каждом положении антенны можно определить в процессе юстировки диаграммы направленности. Для этого разработаны две методики автоматизированной юстировки:

1. Методика растрового сканирования Солнца.

2. Методика крестообразного сопровождения НКА.

Обе методики предполагают одновременное движение диаграммы направленности антенны по двум траекториям: обычной траектории сопровождения объекта (НКА или небесного тела) и траектории специальной формы, позволяющей получить сведения о форме диаграммы направленности. В качестве траекторий специальной формы выбраны прямоугольный растр и крест (что отражено в названии методик). Для обеих методик важно постоянство мощности излучаемого сигнала, а также обеспечение эфемеридами источника для сопровождения. Методики юстировки реализованы в виде программ управления приводами антенной системы и средствами измерений мощности из состава МК ОЭХ, а также вычислительного алгоритма последующей математической обработки результатов измерений в целях определения погрешностей наведения на источник сигнала по азимуту и углу места. Рассмотрим методики подробнее.

Методика растрового сканирования

Методика заключается в последовательном перемещении диаграммы направленности антенной системы по точкам, образующим прямоугольный растр с центром в точке предполагаемого нахождения источника радиосигнала. Так как источник сигнала (Солнце) находится в непрерывном

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

движении, то координаты точек растра рассчитываются с учетом этого смещения.

Измерения мощности сигнала производятся в каждой точке растра с накоплением 5 с, переход от точки к точке растра осуществляется за 3 с. Это означает, что для полной съемки диаграммы направленности потребуется $N \cdot (5 + 3)$ с, где N – количество обрабатываемых точек. Оператор устанавливает геометрические размеры и подробность растра. Например, при заявленной ширине диаграммы направленности антенной системы МК ОЭХ 1° в диапазоне частот L требуется сканирование на \pm 2° от центра с подробностью не ниже 20', а для Ku диапазона следует выбирать размер растра около \pm 30' с подробностью 2' - 3'. Подробность и размер определяют длительность процедуры сканирования, так в первом случае длительность сканирования составит (4° / 20' + 1)2 · (5 + 3) = 1352 с, т.е. около 22 минут.

Результаты сканирования Солнца с различной подробностью приведены на рис. 3 и 4. Несмотря на отличие Солнца от точечного источника для МК ОЭХ в L диапазоне, удобно использовать круглую форму Солнца для нахождения максимума диаграммы.



Рис. 3. Результаты растрового сканирования Солнца в диапазонах частот L1, L2 и L3 (растр 5° х 5° с шагом 12')



Рис. 4. Результаты растрового сканирования Солнца в диапазонах частот L1, L2, L3 и Ки (растр 1° х 1° с шагом 3′)

На рис. З заметно смещение центров окружностей (на виде сверху) относительно геометрического центра растра (квадрата), однако разрешение растра не позволяло точно оценить эти смещения. Более подробное сканирование (на рис. 4) позволило измерить эти сдвиги.

Методика крестообразного сопровождения НКА

Методика заключается в *непрерывном* движении диаграммы направленности вместе с источником сигнала, то опережая его, то запаздывая. На траекторию сопровождения объекта накладывается крестообразная траектория. Измерения мощности производятся в процессе непрерывного движения диаграммы направленности без накопления. Результаты измерений мощности образуют сечения диаграммы в угломестной и азимутальной плоскостях. На рис. 5 приведены результаты юстировки диаграммы направленности по R03 (744) НКА ГНСС ГЛОНАСС.



Рис. 5. Результаты крестообразного сопровождения НКА R03. Сечения диаграммы направленности в угломестной (слева) и азимутальной (справа) плоскостях

На рис. 5 видно, что результаты измерений мощности в диапазоне частот L2 подвержены действию помех (пики, отмеченные овалами), эти «выбросы» устраняются при последующей обработке.

Сравнение методов

После анализа границ применения обеих методик и сравнения результатов измерений (полученных при работе по ним), можно сформулировать следующие выводы:

Таблица 1

Название метода	Достоинства	Недостатки		
Растровое сканирование Солнца	 Метод позволяет юстировать диаграмму направленности в любом диапазоне частот, так как спектр солнечного излучение пия сплошной. Солнечное излучение превосходит по мощности большинство объектов дальней зоны, действие помех минимально. Характеристики солнечного излучения хорошо известны, так как наблюдение за Солнцем в различных диапазонах частот ве- дется множеством лабора- торий, данные некоторых из них находятся в откры- том доступе. 	 Большая продолжите льность процедуры, время проведения юстировки пропорционально квадра- ту количества точек раст- ра. Достаточные размеры и подробность растра приводят к продолжи- тельностям сканирования от полутора часов и более. Солнце выбрано в каче- стве источника сигнала еще потому, что за такое время только этот источ- ник мало смещается по углу места. Юстировка возможна только в светлое время суток и только на углах места, на которых нахо- дится Солнце. Процедура нежела- тельна в теплое время го- да, так как долгое сопро- вождение Солнца приво- дит к разогреву облучате- ля и, как следствие, уве- личению случайной со- ставляющей погрешности. 		

Сравнение методов уточнения поправки наведения Q

~

п

		продолжение таолицы 1		
Крестооб-	1. Возможность юстиров	1. Результаты измере-		
разное сопро-	ки диаграммы направлен-	ний подвержены дей-		
вождение НКА	ности в любое время суток	ствию помех, что несмот-		
	и при любых углах места,	ря на частичную компен-		
	так как множество косми-	сацию при обработке мо-		
	ческих аппаратов (не обя-	жет приводить к смеще-		
	зательно принадлежащих	нию оценок положения		
	ГНСС) всегда находятся в	максимума.		
	зоне видимости антенной	2. Далеко не все косми-		
	системы.	ческие аппараты с извест-		
	2. Получение измеритель	ными эфемеридами излу-		
	ной информации происхо-	чают сигналы в диапазо-		
	дит максимально быстро,	нах частот L1, L2, L3 и,		
	процесс измерений занима-	тем более, в Ки.		
	ет около 2 – 4 минут в за-	3. Погрешность метода		
	висимости от размеров	сильно зависит от синхро-		
	«креста».	низации управляющей		
		ПЭВМ со шкалой UTC.		

В результате юстировки диаграммы направленности различными методами получены значения поправок. Примеры результатов юстировки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты юстировки диаграммы направленности антенной системы МК ОЭХ различными методами

Диапазоны частот	L1	L2	L3	Ku	Угол
					места
Крестовое сопро- вождение	0,02 / 0,18	0,09 / 0,31	-	-	62°
Растровое скани- рование Солнца (об- щее)	0 / 0,25	-0,01 / 0,38	-0,02 / 0,37	-	12°
Растровое скани- рование Солнца (по- дробное)	0,04 / 0,29	0,08 / 0,41	0,09 / 0,43	0 / 0,39	14°

Результаты, полученные методами растрового сканирования находятся ближе друг к другу, однако сканирование с низким разрешением привело к ошибочному результату при оценке поправки по азимуту. Метод крестового сопровождения в целом позволяет оценить поправки, однако должен проверяться более точным способом (по растровому методу).

Выводы

В результате проведенной работы были разработаны методы автоматизированной юстировки диаграммы направленности антенной системы МК ОЭХ, получены поправки системы наведения, что позволило создать задел для снижения общей погрешности измерений мощности радионавигационных сигналов на 0,2 дБ, а также для измерений формы диаграммы направленности антенной системы.

По результатам измерений юстировочных поправок по предложенным методикам была найдена функциональная зависимость поправки от угла места, которая в настоящее время участвует при вычислении траекторий со-провождения (график приведен на рис. 6). Существенной поправки по азимуту не потребовалось.



Рис. 6. Зависимость юстировочной поправки от угла места

Литература

 Завгородний А.С., Печерица Д.С. Метод измерения мощности ортогональных составляющих сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Тез. докл. научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XX веке», 20 марта 2014 г., Менделеево – Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2014. – 180 с. – С. 18 – 24.

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

- Завгородний А.С. О калибровке метрологического комплекса оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов по полному коэффициенту передачи // Тез. докл. научнопрактической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», 2 марта 2016 г., Менделеево – Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2016. – С. 151 – 157.
- 3. Интерфейсный контрольный документ ГНСС ГЛОНАСС. Электронный pecypc: http://www.aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf
- 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. – Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2016. – 200 с. – С. 124 – 138.
- 5. Руководство оператора анализатора цепей векторного N5222A. Электронный pecypc: http://na.support.keysight.com/pna/help/index.html
- 6. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. – М.: Советское радио, 1964.
- 7. Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Рыжов В.С. «Калибровка радиотракта радиотелескопа РТ-7,5 при мониторинге сигналов навигационных космических аппаратов» // Вестник Московского государственного техническо-го университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2014. № 6. http://scholar.google.com/citations?view_op=list_hcore&venue=kX18mCVdmXUJ.20 16&hl=ru
- 8. Спутниковая связь и вещание. Справ. под ред. Кантора Л.Я. М.: Радио и связь, 1997.
- 9. Частотомер CNT-90. Технические характеристики. Электронный ресурс: http://www.prist.ru/produces/pdf/cnt-90.pdf
- 10. Анализатор сигналов векторный N9030A. Руководство по работе в режиме анализа сигналов. Электронный ресурс: http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/N9060-90035.pdf?id=873460
- Ваттметр поглощаемой мощности N1914A. Технические характеристики. Электронный ресурс: http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/N1913-90009.pdf?id=1717342
- 12. Национальное управление океанических и атмосферных исследований (США). Электронный ресурс: http://www.noaa.gov/
- 13. Программа расчета данных наведения на космические аппараты и небесные тела Stellarium. Электронный pecypc: http://stellarium.org/