

КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Рассмотрен расчет радиолиний «НКА – анализатор спектра» и «генератор помех – анализатор спектра» для их калибровки с целью испытания навигационной аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем на помехоустойчивость.

Ключевые слова: навигационная аппаратура потребителей, спутниковые радионавигационные системы, помехоустойчивость.

В настоящее время все большее значение приобретают средства спутниковой радионавигации (СРНС) как в гражданской отрасли, так и в военных приложениях. Широкое применение СРНС находят для решения задач временной синхронизации, определения географических координат и пространственной ориентации. Многие приложения СРНС требуют непрерывного навигационно-временного обеспечения, в том числе и в условиях воздействия промышленных и преднамеренных помех. Для определения помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя (НАП) СРНС проводятся испытания, при этом, как правило, определяется устойчивость НАП СРНС к воздействию широкополосных шумовых и гармонических помех.

По общепринятым методикам испытаний на помехоустойчивость НАП СРНС полезный сигнал с навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС, GPS и сигнал помехи принимаются на разные антенны [1]. Как правило, антенны разнесены друг от друга, но находятся на достаточно близком расстоянии, что приводит к переотражениям как полезного сигнала, так и сигнала помехи от антенн и их мачт. Неидентичность антенн также существенно увеличивает погрешность измерений.

Помехоустойчивость НАП СРНС с реальным антенно-фидерным устройством (АФУ) значительно отличается от помехоустойчивости НАП СРНС с идеальной антенной. Реальная помехоустойчивость зависит от нескольких факторов: неравномерности распределения плотности потоков мощности НКА у поверхности Земли при различных углах местоположения, особенно при малых углах; различия плотности потоков мощности в L_1 и L_2 диапазонах; неравномерности диаграммы направленности (ДН) приемной антенны АФУ НАП СРНС.

К примеру, при испытаниях НАП СРНС на помехоустойчивость срыв слежения по всем НКА должен происходить почти одновременно при одном уровне мощности помехи. Аналогично, захват всех НКА также должен происходить почти одновременно, но при меньших уровнях помехового сигнала.

На самом деле этого не происходит. Так как НКА на малых углах места (в пределах $10...20^\circ$), принимаются с ослаблением от 15 до 12 дБ, относительно 3 дБ усиления эталонной антенны.

Чтобы учесть все факторы, влияющие на помехоустойчивость НАП СРНС, необходимо произвести точный расчет энергетических характеристик радиолинии «НКА – АФУ НАП СРНС». Для систем ГЛОНАСС и GPS основные расчетные характеристики совпадают, поэтому можно ограничиться расчетом только для ГЛОНАСС.

В предлагаемой методике испытаний НАП СРНС тракт контроля спектральной мощности помехового сигнала предлагается совместить с рабочим радиочастотным трактом информационного канала. Данный метод измерения помехоустойчивости НАП СРНС является более точным и простым, так как приемная измерительная антенна принимает как основной сигнал с НКА ГЛОНАСС, GPS, так и сигнал помехи, который с высокой точностью измеряется анализатором спектра. В данной методике исключается неизбежная ошибка вследствие неидентичности антенн, связанная с неточностью определения уровней измеренного сигнала помехи и поступившего сигнала помехи на вход АФУ НАП СРНС.

Мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НКА ГЛОНАСС на выходе приемной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления 3 дБи и при угле места НКА более 5° составляет не менее минус 161 дБВт для частот поддиапазона L_1 . Мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НКА ГЛОНАСС-М на выходе приемной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления 3 дБи и при угле места НКА более 5° составляет не менее минус 167 дБВт для частот поддиапазонов L_2 [2].

В качестве обобщенной характеристики радиолинии используют величину энергетического потенциала. Под энергетическим потенциалом радиолинии будем понимать отношение мощности сигнала навигационного спутника на выходе приемного устройства (P_c) к спектральной плотности мощности шума в полосе 1 Гц (N_0):

$$Q = \frac{P_c}{N_0}, \quad (1)$$

Как показано в [3], при значениях $q > 5$ плотность вероятности суммы сигнала и шума практически соответствует нормальному распределению с математическим ожиданием, равным амплитуде сигнала

и средним квадратическим отклонением, соответствующим $\sigma_{\text{ш}}$. В этих условиях надежно обнаруживается сигнал на фоне шумов.

Погрешность измерения фазового сдвига на элементарном интервале измерения является критической величиной, определяющей возможность непрерывного сопровождения сигнала НКА фильтром фазовой автоподстройки частоты (так называемая «схема слежения за несущей»). Предельное значение $\sigma_{\text{фпр}}$, при котором может наступить срыв слежения за фазой, для фазового дискриминатора, имеющего раскрыв дискриминационной характеристики $\Delta D = \pm 90^\circ$, составляет $\sigma_{\text{фпр}} \geq \Delta D/10 = 9^\circ$.

Среднеквадратичную погрешность измерения фазового сдвига σ_ϕ можно определить по выражению:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{N_0}{2P_C T_{\text{изм}}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{изм}}$ – интервал измерения.

При заданной среднеквадратичной погрешности фазового сдвига $\sigma_\phi = 4^\circ$ и времени измерения 10 мс, принятом в НАП СРНС, можно вычислить минимальную требуемую мощность сигнала на выходе идеальной эталонной антенны:

$$P_C = \frac{N_0}{2\sigma_\phi^2 T_{\text{изм}}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 210}{2 \cdot 5,03 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2}} \cong 2,8807 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}. \quad (3)$$

Переведя данную величину в логарифмическую шкалу, выраженную дБ, получим:

$$P_C (\text{дБ}) = 10 \lg(P_C) = -165,4 \text{ дБВт}.$$

Энергетический потенциал для приемника с изотропной идеальной приемной антенной:

$$Q = -165,4 - (-205,4) \cong 40,1 \text{ дБВт}. \quad (4)$$

Таким образом, энергетический потенциал НКА с малыми углами места снижается до 25...28 дБ только за счет неравномерности ДН.

Расчетные значения эффективной плотности потока мощности у поверхности Земли, обеспечиваемые НКА без учета затухания в атмосфере и эффективные мощности сигналов, принимаемых потребителем на эталонную антенну с НКА, в логарифмическом виде приведены в табл. 1.

Для более точного учета всех факторов, влияющих на помехоустойчивость, необходимо произвести более точный расчет радиолинии от генераторов помех до анализатора спектра.

В упрощенном виде можно считать, что измерительный тракт можно представить в виде радиочастотной линии передачи мощности с генератора помех на анализатор спектра, блок-схема которого приведена на рисунке.

С генератора помехи сигнал через аттенуатор по СВЧ фидеру поступает на излучающую антенну. На некотором расстоянии от передающей антенны находится приемная измерительная антенна. Принятый антенной сигнал поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ), усиленный сигнал по фидеру через адаптер и делитель СВЧ мощности идет на НАП СРНС и на анализатор спектра.

Проанализируем вышеприведенную схему. Ослабление, вносимое в радиолинию аттенуатором, известно, коэффициенты передачи радиочастотных фидеров, излучающей антенны, МШУ, адаптера и делителя мощности могут быть измерены с достаточно высокой точностью. В итоге, задача сводится к расчету коэффициента передачи радиолинии и определению коэффициента передачи K_A приемной антенны АФУ НАП СРНС.

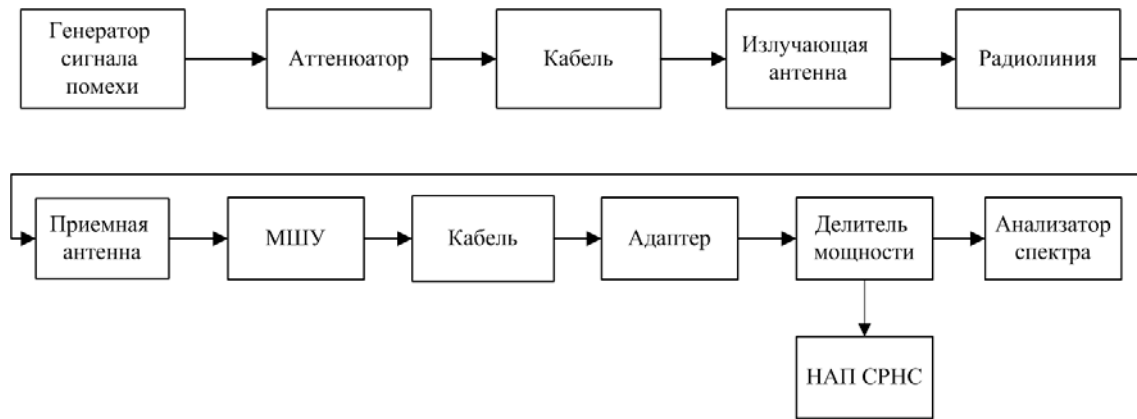
Плотность потока мощности электромагнитного излучения (ЭМИ) Π_r (в Ваттах на единицу площади) на расстоянии r от источника излучения для источника с изотропной излучающей антенной определяется по выражению [4]

$$\Pi_r = \frac{P_r}{4\pi r^2}, \quad (5)$$

где P_r – излучаемая мощность передающей антенной.

Расчетные плотности потока мощности ЭМИ у поверхности Земли от НКА и соответствующие эффективные мощности на выходе эталонной антенны

Навигационная система	Частотный канал	Коэффициент усиления бортовой излучающей антенны НКА, дБ		Плотность потока мощности у поверхности Земли, дБВт/м ²	Эффективная мощность, дБВт
1	2	3		4	5
ГЛОНАСС	L_1	В зените	10	-128,5	-151,0
		В углах $\pm 15^\circ$	12	-126,0	-148,5
		В углах $\pm 19^\circ$	8	-130,5	-153,0
	L_2	В зените	9	-137,5	-158,0
		В углах $\pm 15^\circ$	11	-139,5	-160,0
		В углах $\pm 19^\circ$	9	-139,5	-160,0
GPS	L_1	В зените	10	-130,0	-152,5
		В углах $\pm 15^\circ$	12	-128,0	-150,5
		В углах $\pm 19^\circ$	8	-132,0	-154,5
	L_2	В зените	9	-139,0	-156,5
		В углах $\pm 15^\circ$	11	-141,0	-161,5
		В углах $\pm 19^\circ$	9	-139,0	-156,5



Блок-схема измерительного стенда для испытаний НАП СРНС на помехоустойчивость

Для источника ЭМИ, антенна которого обладает усилением G_r в направлении r ,

$$P_r = \frac{P_r G_r}{4\pi r^2}. \quad (6)$$

Плотность потока мощности в области расположения фазового центра приемной антенны АФУ НАП СРНС рассчитаем по упрощенной формуле (1).

Мощность сигнала, принимаемого изотропной антенной АФУ НАП СРНС от излучающей антенны генератора помехи:

$$P_i = P_r \cdot S_{\text{эфф}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь приемной антенны.

Эффективную мощность сигнала, принимаемого изотропной антенной приемника, можно представить и в логарифмическом виде:

$$P_{i\text{эфф}} = 10(\lg P_i + \lg S_{\text{эфф}}) - L_{\text{атм}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{атм}}$ – затухание в атмосфере, связанное с потерями на рассеяние мощности излучения на микрочастицах, загрязняющих атмосферу.

В формуле есть два слагаемых: первое слагаемое характеризует коэффициент передачи K_A приемной антенны АФУ НАП СРНС, второе характеризует затухание в пространстве. Затуханием в атмосфере можно пренебречь, так как расстояние, на котором размещаются передающая и приемные антенны в измерительном стенде, не велико, и потери в атмосфере будут незначительными. Коэффициент передачи радиотракта K_{Σ} в логарифмическом виде определим по формуле

$$K_{\Sigma} = 10 \lg P_{i\text{эфф}}, \quad (9)$$

Эффективная мощность сигнала, принимаемая эталонной антенной, в логарифмическом виде и есть коэффициент передачи приемной эталонной антенны K_A . Коэффициент передачи K_A приемной антенны в радиолинии можно вычислить через эффективную площадь антенны, зная ее коэффициент направленного действия (КНД):

$$K_{A\text{эфф}} = 10 \lg S_{\text{эфф}}. \quad (10)$$

Эффективная площадь антенны является параметром, характеризующим качество антенн. Чтобы перейти от известного КНД (усиления G) к более привычной площади антенны, можно воспользоваться формулой

$$S = \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (11)$$

где S – геометрическая площадь антенны; λ – длина волны на средней рабочей частоте антенны.

В АФУ НАП СРНС применяются полосковые антенны, относящиеся к классу аппретурных антенн [6]. Площадь аппретурной антенны определяется по выражению

$$S_{\text{эфф}} = \frac{S}{v}, \quad (12)$$

где v – коэффициент использования площади антенны.

Для аппретурных антенн v достаточно высок и достигает значения 0,9–0,94 [6]. Из-за сложной формы облучателя приемной антенны НАП СРНС v можно с достаточной точностью принять равной 0,8, что в логарифмическом виде будет составлять 0,8 дБ.

Коэффициент передачи $K_{A\text{эфф}}$ приемной антенны можно вычислить исходя из принципа баланса мощностей в СВЧ тракте.

Так как неизвестный коэффициент передачи K_A приемной антенны АФУ НАП СРНС является единственным неизвестным параметром, то он будет равен сумме всех коэффициентов передачи блоков, образующих измерительную радиолинию:

$$P_{\Gamma} + L_{\text{аттен}} + L_{\text{каб. изл}} + G_{\text{Аизл}} + K_{\Sigma} + K_{A\text{эфф}} + G_{\text{МШУ}} + L_{\text{каб. изм}} + L_{\text{ад}} + L_{\text{дел}} = P_{\text{анализ}}, \quad (13)$$

где P_{Γ} – мощность генератора помех; $L_{\text{аттен}}$ – ослабление, вносимое аттенюатором; $L_{\text{каб. изл}}$, $L_{\text{каб. изм}}$ – ослабление, вносимое кабельными линиями; $G_{\text{Аизл}}$ – коэффициент усиления передающей антенны; K_{Σ} – коэффициент передачи радиолинии; $K_{A\text{эфф}}$ – коэффициент передачи приемной антенны; $G_{\text{МШУ}}$ – коэффициент усиления МШУ; $L_{\text{ад}}$ – ослабление, вносимое адаптером; $L_{\text{дел}}$ – ослабление, вносимое делителем;

$P_{\text{анализ}}$ – мощность помехового сигнала, измеренного анализатором спектра.

Таким образом, калибровка измерительного тракта позволяет рассчитать поправочный коэффициент N к показаниям анализатора спектра в L_1 и L_2 диапазоне, который равен сумме коэффициентов передачи всех блоков от анализатора спектра до приемной антенны:

$$N = -K_{\text{Аэфф}} - G_{\text{МШУ}} + L_{\text{каб.изм.}} + L_{\text{ад}} + L_{\text{дел.}} \quad (14)$$

При помощи найденного поправочного коэффициента определяется мощность помехового сигнала, приведенного к входу приемной антенны АФУ НАП СРНС, при котором происходят срывы сопровождения и захвата сигналов НКА. Применение предложенной методики позволяет измерять реальную устойчивость НАП СРНС к воздействию помех вне зависимости от значений коэффициентов передачи приемного тракта, что дает возможность сравнить ее с предлагаемыми моделями помеховой обстановки.

Библиографические ссылки

1. Дмитриев Д. Д. Исследование помехоустойчивости аппаратуры радионавигации // Современные проблемы развития науки, техники и образования : сб. научн. тр. / под науч. ред. М. А. Барышева, В. И. Кокорина. Красноярск : ИПК СФУ, 2009. С. 202–209.
2. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах L_1, L_2 / РНИИ КП. ред. 5.1. М. : РНИИ КП, 2008.
3. Айбиндер И. М. Шумы радиоприемников. М. : Связь, 1974. 328 с.
4. Уайт Д. Р. Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. М. : Советское радио, 1977.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010.
6. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М. : Радио и связь, 1986.

V. N. Tyapkin, Y. L. Fateev, D. D. Dmitriev, V. G. Konnov

CALIBRATION OF MEASURING PATH FOR ECM TEST OF NAVIGATION EQUIPMENT OF CUSTOMERS OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS

The authors consider calculation of radio-frequency lines «Navigation space satellite – the spectrum analyzer» and «the generator of noises – the spectrum analyzer» for their calibration for ECM test of navigation equipment of customers of satellite radio navigation systems.

Keywords: navigation equipment of customers, satellite radio navigation systems, interference immunity.

© Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л., Дмитриев Д. Д., Коннов В. Г., 2012

УДК 629.78.064.5

В. Е. Чеботарев, В. Д. Звонарь, Р. Ф. Фаткулин, Г. В. Дмитриев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

Проведен анализ различного типа электрообогревателей космического аппарата и для каждого из них составлена математическая модель расчета параметров при наличии конструктивных и тепловых ограничений. Разработана методика выбора параметров электрообогревателей по критериям, зависящим от вида ограничений и обеспечивающих заданную плотность теплового потока. Представлены результаты расчета параметров электрообогревателей космического аппарата информационного обеспечения и сформулированы рекомендации по их выбору в условиях неопределенности факторов эксплуатации.

Ключевые слова: космический аппарат, электрообогреватель, математическая модель.

Электрообогреватели космического аппарата (КА) совместно со средствами охлаждения используются для поддержания заданного теплового режима оборудования, создавая необходимое равновесие между притоком и оттоком тепла от этого оборудования. Электрообогреватель (ЭО) содержит токонесущий провод и электроизолирующую подложку [1].

Основными параметрами ЭО являются: мощность, масса, площадь обогреваемой поверхности.

Мощность ЭО определяется по закону Ома [2]:

$$N_{\text{ЭО}} = \frac{U^2}{R_{\text{пр}}} = \frac{U^2}{R_l l_{\text{пр}}} = \frac{U^2 S_{\text{пр}}}{\rho_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ЭО}}$ – мощность ЭО, Вт; U – напряжение электропитания ЭО, В; $R_{\text{пр}}$ – электрическое сопротивление провода, Ом; R_l – удельное электрическое сопротивление единицы длины провода, Ом/м; $S_{\text{пр}}$ – площадь сечения провода, м^2 ; $\rho_{\text{пр}}$ – удельное электриче-