

УДК 621.37.08

А. Л. Макаров¹, В. В. Овсяников², А. Л. Ольшевский¹, В. М. Попель¹

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет

Исследование безэховости компактного антенного полигона в диапазоне сверхвысоких частот

Надійшла до редакції 15.03.07

Наведено результати досліджень характеристик невіддунності нового компактного антенного полігону, який розроблено в ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля для експериментального випробування радіоелектронного устаткування космічних апаратів з випромінювальними засобами діапазону надзвичайно високих частот. Наведено результати автономних досліджень окремих секцій радіопоглинального покриття камери та дослідження рівнів відбитого електромагнітного поля усередині компактного антенного полігону.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем экспериментальной отработки радиоэлектронных средств и антенн космических аппаратов (КА) является создание компактных антенных полигонов (КАП) в виде экранированных снаружи безэховых камер небольших размеров, размещенных внутри помещений с нормальными условиями для обслуживания персонала и аппаратуры [3]. Внутренняя поверхность КАП с установленным внутри коллимационным зеркалом, испытываемой аппаратурой и оборудованием покрывается изнутри радиопоглощающим покрытием (РПП). Это необходимо для снижения до минимума паразитных переотражений и уровней взаимовлияния между антеннами в рабочих диапазонах сверхвысоких частот (СВЧ), и следовательно, для обеспечения высокой точности измерений.

В связи с тем что на практике РПП изготавливается из отдельных пластин (секций), которыми затем покрывается КАП изнутри, после изготовления проводятся два этапа испытаний

КАП. Первый — автономные исследования поглощательных свойств отдельных пластин РПП, второй — исследования уровней отраженного электромагнитного (ЭМ) поля и «безэховых» зон внутри КАП, покрытого поглощающими пластинами.

АВТОНОМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ СЕКЦИЙ КОМПАКТНЫХ АНТЕННЫХ ПОЛИГОНОВ

Автономные исследования коэффициентов отражения отдельных радиопоглощающих секций КАП в частотном диапазоне выполняются на специальном стенде (рисунок). При этом измеряются зеркальные коэффициенты отражения и электромагнитные поля рассеяния [1, 2, 4, 5]. Зеркальный коэффициент отражения — это отношение плотности потока мощности, отраженной от поверхности РПП к плотности потока мощности, падающей на поверхность РПП в случаях, когда углы падения и отражения относительно нормали равны и лежат вместе с ней в

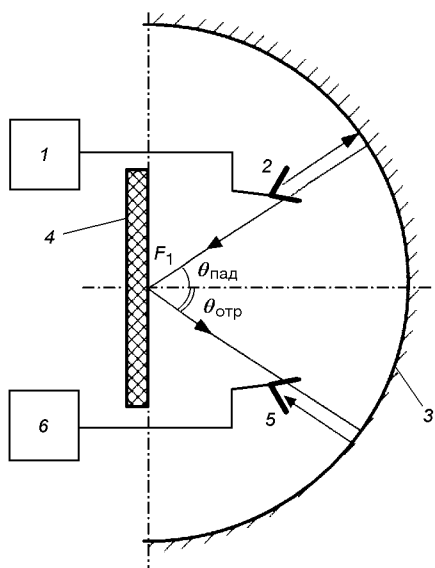


Схема измерений зеркальных коэффициентов отражений и электромагнитных полей рассеяния отдельных пластин РПП: 1 — микроволновый генератор, 2 — передающая антенна, 3 — эллипсоидальный отражатель, 4 — исследуемый материал (эталонный отражатель), 5 — приемная антенна, 6 — измерительный приемник

дной плоскости. Электромагнитное поле рассеяния это уровень электромагнитного излучения, рассеянный РПП под углами наблюдения, не совпадающими с углом, зеркальным углом падения [6]. Стенд включает в себя СВЧ генератор 1, выход которого соединен с передающей антенной 2, отражатель 3, образованный частью внутренней поверхности эллипсоида вращения. При калибровке в первом фокусе эллипсоида F_1 расположен плоский металлический отражатель (эталонный отражатель), а при измерениях — исследуемый материал 4. Приемная антенна 5 нагружена на измерительный приемник 6. Антенны 2 и 5 расположены в плоскости, перпендикулярной к большой оси эллипсоида и установлены с возможностью вращения вокруг нее, при этом они обращены к поверхностям отражателя 3, расположенным напротив исследуемого материала (или эталонного отражателя) 4, а их оси проходят через второй фокус эллипсоида. Отражатель 3 представляет собой вырезку из внутренней поверхности эллипсоида вращения, ограниченную плоскостью, проходящей через большую ось эллипсоида, а также двумя

параллельными плоскостями, перпендикулярными большой оси эллипсоида, одна из которых проходит через малую ось эллипсоида, а другая отстоит от нее на некотором расстоянии. Общая площадь эллипсоидального отражателя 3 составляет около 140 м^2 . Стенд позволяет реализовать измерения в диапазоне СВЧ-модулей зеркальных коэффициентов отражения в диапазоне углов падения $15 \dots 80^\circ$ при ТЕ- и ТМ-поляризациях падающей волны, а также измерения относительного распределения рассеянного поля при фиксированных углах падения $0 \dots 80^\circ$ и углах приема $\pm 80^\circ$ путем углового перемещения передающей и приемной антенн по направляющим. Применение эллипсоидального отражателя 3 в сочетании с традиционными схемами измерений позволяет повысить точность оценки и увеличить динамический диапазон.

При измерениях зеркальных коэффициентов отражения, на место исследуемого материала 4 (рисунок) устанавливается эталонный отражатель того же размера, например металлический лист, модуль коэффициента отражения от которого принимается за 1. Далее с помощью аттенюатора и индикатора измерительного приемника 6 измеряется угловая зависимость мощности $A_1(\theta)$ сигнала, отраженного от эталонного отражателя при заданной поляризации падающей волны (ТЕ или ТМ). Затем вместо эталонного отражателя устанавливается исследуемый материал 4 и производится таким же образом измерение угловой зависимости мощности $A_2(\theta)$ сигнала, отраженного от исследуемого материала. После этого вычисляется угловая зависимость модуля зеркального коэффициента отражения от исследуемого материала $R(\theta)$ при заданных поляризациях падающей и отраженной волн по формуле

$$R(\theta) = A_2(\theta) - A_1(\theta) \text{ (дБ)}.$$

При измерениях электромагнитных полей рассеяния передающая антенна устанавливается в положение, соответствующее углу падения падающей волны θ_1 , и с помощью аттенюатора и индикатора измерительного приемника 6 проводится измерение угловой зависимости $A_3(\varphi)$ мощности сигнала, рассеянного исследуемым материалом при заданной поляризации падающей волны. После этого вычисляется относительное поле рассеяния исследуемого материала

при заданных поляризациях падающей и рассеянной волн по формуле

$$P(\varphi) = A_3(\varphi) - A_1(\theta) \text{ (дБ)}.$$

При измерениях используются обычные СВЧ-генераторы и измерительные приемники. В качестве передающей и приемной антенн — стандартные измерительные антенны.

Применение изложенной методики позволило получить новые данные о характеристиках широкодиапазонного поглотителя типа «Универсал» в частотном диапазоне $f = 1 \dots 15$ ГГц. При этом модули зеркальных коэффициентов отражения изменяются в пределах $-6 \dots -56$ дБ, а электромагнитные поля рассеяния — в пределах $-15 \dots -60$ дБ в широком диапазоне углов θ, φ .

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ БЕЗЭХОВОСТИ КОМПАКТНЫХ АНТЕННЫХ ПОЛИГОНОВ

Исследуемый компактный антенный полигон имеет форму прямоугольного параллелепипеда размерами $26 \times 9 \times 9$ м, рабочие поверхности которого облицованы изнутри поглотителем электромагнитной волны (РПП) типа «Универсал» [3], а снаружи экранированы.

Целью исследований является определение уровней отраженного поля (коэффициентов безэховости) в КАП, а также расположение и размеры безэховой зоны, необходимой для размещения и нормального функционирования излучающих систем в см- и дм-диапазонах длин волн. Под коэффициентом безэховости понимается отношение величины отраженного сигнала рабочими поверхностями безэховой камеры к величине прямого сигнала, пришедшего от передающей антенны в заданной точке КАП. Под зоной безэховости понимается часть объема КАП, в любой точке которого коэффициент безэховости ниже заданного значения [5]. Измерения в КАП проводились по методу определения коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН) свободного пространства для ортогональной поляризации электромагнитной волны. В качестве передающей и приемной антенн использовались две пары одинаковых секториальных Е- и Н-рупоров, имеющих широкие (100°) диаграммы направленности (ДН) в одной

плоскости и узкие (15°) в другой, что позволяло отдельно оценивать величину отраженного поля от боковых стен, пола и потолка. Для оценки значений отраженного поля от боковых стен антенны ориентировались так, чтобы широкие ДН антенн находились в горизонтальной плоскости параллельно плоскости пола, а перемещение приемной антенны осуществлялось по прямой, соединяющей боковые стены КАП. При определении величины отражений от пола и потолка антенны были переориентированы на 90° , а приемная антенна перемещалась в вертикальной плоскости. Передающая и приемная антенны располагались в противоположных сторонах КАП в местах предполагаемого расположения антенного коллиматора и приемных антенн. Под плоскостью перемещения понимается плоскость, проходящая через направление перемещения и центр раскрыва передающей антенны.

При обработке результатов измерений на всех полученных экспериментальных кривых строились огибающие полученных максимумов (P_{\max}) и минимумов (P_{\min}). Выбирались точки, в которых отношение P_{\max}/P_{\min} максимально, и уровень отражений в децибелах определялся по формуле

$$L_{\text{изм}} = 20 \lg \left[\left(\sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} - 1 \right) / \left(\sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} + 1 \right) \right].$$

Погрешность ΔL измеренного уровня отражений в децибелах определяем по формуле

$$\Delta L = 8.68 \frac{k_0^2}{k_0^2 - 1} \left(\frac{1}{P_{\max}} + \frac{1}{P_{\min}} \right) \Delta P,$$

где $k_0 = \sqrt{P_{\max}/P_{\min}}$, ΔP — погрешность измерения P_{\max} и P_{\min} .

Направление прихода отраженного сигнала относительно плоскости, перпендикулярной к направлению перемещения приемной зондовой антенны, определяется по формуле

$$\nu = \arcsin \frac{\lambda}{T},$$

где λ — длина рабочей волны, T — пространственный период колебаний на исследуемом участке экспериментальной кривой. Погрешность определения угла $\Delta \nu$ в градусах определяем по формуле

Значение коэффициентов безэховости (в дБ)

f (ГГц) / λ (см)	Отражения от боковых стен КАП		Отражения от пола и потолка КАП		Отражения от торцевой стены КАП со стороны приемной антенны	
	Е-поляризация	Н-поляризация	Е-поляризация	Н-поляризация	Е-поляризация	Н-поляризация
15.0/2.0	-38.2	-34.9	-36.9	-33.8	-37.4	-37.4
4.3/7.0	-36.1	-33.8	-35.4	-33.6	-34.2	-34.2
1.0/30.0	-25.4	-21.6	-23.8	-20.1	-28.8	-28.8

$$\Delta\nu = \frac{\lambda/T}{57.3\sqrt{1 - (\lambda/T)^2}} \Delta T,$$

где ΔT — относительная погрешность измерения периода, являющаяся суммой погрешности измерения периода на экспериментальной кривой и погрешности измерения регистрирующего прибора.

Затем производим определение измеренного уровня отражений методом гармонического анализа. При этом каждую экспериментальную кривую дискретизируем, например, с шагом $q = 0.3\pi$, получая n чисел. Из совокупности m экспериментальных кривых получаем двумерные массивы P_{ij} с размерами $m \times n$.

Среднее значение P_0 массива чисел P_{ij} определяем по формуле

$$P_0 = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}.$$

Вычитаем из каждого элемента массива P_{ij} среднее значение P_0 , получаем массив $\hat{P}_{ij} = P_{ij} - P_0$.

Для значений углов ν и ζ от 0 до 90° с шагом 1° определяем измеренные уровни отражений $L_{\text{изм}}$, выраженные в децибелах для различных направлений прихода ν и ζ отраженных сигналов

$$L_{\text{изм}}(\nu, \zeta) = 20 \lg \frac{1}{P_0} \sqrt{S_p^2 + C_p^2},$$

где

$$S_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{P}_{ij} \sin(i\omega_i q + j\omega_j q),$$

$$C_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{P}_{ij} \cos(i\omega_i q + j\omega_j q),$$

$$\omega_i = k \sin \zeta, \quad \omega_j = k \sin \nu,$$

ζ — угол между направлением прихода отра-

женного сигнала и плоскостью перемещения, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Погрешность определения углов ζ и ν в градусах определяем по формулам

$$\Delta\zeta = \frac{57.3}{2(m-1)q},$$

$$\Delta\nu = \frac{57.3}{2(n-1)q}.$$

Таким образом, максимальное значение $L_{\text{изм}}(\nu, \zeta)$ это измеренный уровень отражения в децибелах, а углы ζ и ν , соответствующие максимальному $L_{\text{изм}}(\nu, \zeta)$, — направление прихода сигнала.

Результаты измерений коэффициентов безэховости приведены в таблице.

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что в случае расположения передающей антенны на равном удалении от боковых стен, потолка и пола и на расстоянии 6.0 м от торцевой стены, область наименьших отражений в КАП находится вокруг прямой линии (продольной оси), соединяющей передающую и приемную антенны. Общая погрешность оценки безэховости КАП не превышает 1.2—1.5 дБ.

Компактный антенный безэховый полигон, разработанный и изготовленный в КБ космических аппаратов, систем и комплексов Государственного конструкторского бюро «Южное» им. М. К. Янгеля является уникальным сооружением, позволяющим производить точные СВЧ-измерения, оценку электромагнитной совместимости радиосистем, оценку эффективной поверхности рассеяния аэрокосмических аппаратов и другие работы при обеспечении высокой

степени имитации безэховости свободного и космического пространства.

Использование данного компактного антенного полигона для измерений в СВЧ-диапазоне позволяет повысить качество и культуру производства, ускорить выпуск новой техники и по многим показателям получить экономию затрачиваемых средств.

Авторы выражают благодарность Ю. К. Александрову и В. М. Хохлову (Москва, Россия) за ценные советы и участие в проведении работ.

1. Алимин Б. Ф. Техника измерений коэффициентов отражения поглотителей электромагнитных волн: Обзор // Заруб. радиоэлектроника.—1977.—№ 2.—С. 88—110.
2. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. — М.: Сов. радио, 1972.—232 с.
3. Овсяников В. В., Попель В. М., Ольшевский А. Л., Попель П. В. Компактный антенный полигон для экспериментальной отработки антенн космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 85—91.
4. Ольшевский А. Л., Попель В. М., Костенко Г. А., Овсяников В. В. Исследование поглощающих свойств отдельных секций компактного антенного полигона в

микроволновом диапазоне // 16th Int. Crimean Conf. «Microwave and Telecommunication Technology» (11—15 Sept. 2006, Sevastopol). — Sevastopol, 2006.—P. 823—824.

5. ОСТ 92-4739-86. Камеры безэховые. Метод измерения коэффициента безэховости. — Введ. 01.01.88.
6. ОСТ 92-4740-86. Материалы радиопоглощающие для безэховых камер. Метод измерения коэффициента отражения в диапазоне углов падения электромагнитной волны. — Введ. 01.01.88

RESEARCH OF THE ECHOLESS OF COMPACT ANTENNA RANGE IN THE SUPER HIGH FREQUENCY BAND

O. L. Makarov, V. V. Ovsyanikov, O. L. Ol'shevskiy, V. M. Popel'

We present some results of our research of echoless characteristics of the new compact antenna range developed at the Yuzhnoe State Design Office named after M. K. Yangel for experimental investigation of radio-electronic and radiating devices of space vehicles for the super high frequency band. We give our results of independent research of separate parts of radio absorbing covering of the chamber as well as some results of complex research of the levels of the reflected electromagnetic field inside the compact antenna range.