

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЗЭХОВЫХ КАМЕР СВЧ. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА БЕЗЭХОВОСТИ

В.С. Наконечный, А.Е. Присяжный, А.А. Побережный
(Харьковский университет Воздушных Сил)

Рассмотрен метод измерения величины коэффициента безэховости безэховой камеры СВЧ. Приведены структурная схема измерения коэффициента безэховости и радиолокационные дальностные портреты макетов воздушных целей, измеренные на ее базе.

электродинамическое моделирование, безэховые камеры СВЧ, коэффициент безэховости

Постановка проблемы. Наличие каталога радиолокационных характеристик (РЛХ) целей позволяет находить аналитическим путем значения параметров отраженного сигнала для любой РЛС с известными техническими показателями при заданных условиях наблюдения. Получить такой каталог возможно с помощью электродинамического моделирования на базе безэховых камер (БЭК) СВЧ.

Анализ литературы. Известно значительное число работ, как наших соотечественников, так и зарубежных авторов, посвященных моделированию [1 – 11] и методам непосредственного измерения рассеянной мощности в безэховых камерах [12]. В данной статье приведен модифицированный метод непосредственного измерения рассеянной мощности, когда приемная антенна располагается вне объема БЭК.

Цель статьи. Целью данной статьи является рассмотрение с общих позиций модифицированного метода измерения величины коэффициента безэховости (K_B) безэховых камер СВЧ.

Основная часть. Современный этап развития процесса измерения радиолокационных дальностных портретов (РДП) воздушных целей (ВЦ) предполагает два основных метода моделирования: математическое и физическое.

При решении задач математического моделирования основой для исследования являются численные методы. Для получения РДП ВЦ, т.е. объектов сложной формы, подверженных случайным воздействиям или имеющих стохастическую структуру, необходимо использование быстродействующих ЭВМ, что связано с воспроизведением, как различных

ракурсов воздушной цели, так и ее электродинамического взаимодействия с электромагнитным полем зондирующего сигнала.

Основными недостатками, проявляющимися при машинной реализации методов математического моделирования процесса измерения РДП ВЦ, являются: ограниченная точность представления поверхности имитационных моделей, а в ряде случаев неполная определенность в математическом описании этих поверхностей; сложность и неоднозначность решения электродинамической задачи взаимодействия имитационных моделей ВЦ с плоской электромагнитной волной зондирующих сигналов, особенно в случае движущихся моделей.

При физическом моделировании исследуемые процессы или объекты воспроизводятся с сохранением их физической природы (натурное моделирование) или с использованием подобных физических явлений (масштабное моделирование).

Натурное моделирование процесса измерения РДП требует создания дорогостоящих макетов РЛС, облучающих цели. Для измерения РДП под различными ракурсами целей необходим либо облет этих целей вокруг РЛС, либо перемещение макета РЛС вокруг цели, расположенной на земле. В первом случае измерение РДП будет очень дорогостоящим процессом, а во втором практически не решается задача подавления мешающих отражений от земли и местных предметов.

Масштабное моделирование характеризуется, прежде всего, тем, что исследования проводятся на физических моделях, обладающих физическим подобием, т.е. сохраняющих полностью или хотя бы в основном природу явлений. Примером может служить ультразвуковой полигон (гидроакустическое моделирование) или применение безэховых камер (электродинамическое моделирование) для исследования процессов распространения радиоволн.

Электродинамическое моделирование является основным методом получения РДП макетов различных средств воздушного нападения в широком диапазоне частот. При выполнении требований электродинамического подобия в получаемых результатах учитываются нелинейности тракта прохождения сигнала и эффекты его переотражения, вклад которых практически невозможно оценить другими методами.

В качестве моделей применяют точные уменьшенные копии исследуемых радиолокационных целей. При этом размеры модели ℓ_m и цели ℓ_c , а также длины волны λ_m , λ сигналов, которыми отличаются модель РЛС и реальная РЛС соответственно, должны быть такими, чтобы выполнялось условие [1, 12]:

$$\frac{\ell_{\text{ц}}}{\ell_{\text{м}}} = \frac{\lambda_{\text{м}}}{\lambda}. \quad (1)$$

Тогда эффективная отражающая поверхность (ЭПР) реальной цели после получения ЭПР ее модели составит $\sigma_{\text{ц}} = \sigma_{\text{ц}} \lambda^2 / \lambda_{\text{м}}^2$

Кроме того, для уменьшения погрешностей при получении РДП, необходимо, во-первых, обеспечить плоский фронт волны, облучающий модель, т.е. модель нужно располагать от передающей антенны на расстоянии не менее [13]

$$\Gamma_{\text{минпер}} = \frac{D}{4} + \frac{D}{2 \frac{D}{\lambda}}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{\text{минпер}}$ – минимально допустимое расстояние от передающей антенны до объекта облучения; D – размер апертуры передающей антенны; λ – длина волны, облучающей цель.

Минимальное расстояние до объекта исследования должно обеспечиваться выполнением неравенства

$$\Gamma_{\text{минпр}} \geq \frac{\ell_{\text{мmax}}}{4} + \frac{\ell_{\text{мmax}}}{2 \frac{\ell_{\text{мmax}}}{\lambda}}, \quad (3)$$

где $\Gamma_{\text{минпр}}$ – минимально допустимое расстояние от объекта облучения до приемной антенны РЛС; $\ell_{\text{мmax}}$ – максимальный размер элемента конструкции модели.

Практически, в случае совмещенной РЛС, расстояние от антенн до модели ВЦ выбирают значительно большим из двух значений $\Gamma_{\text{минпер}}$ и $\Gamma_{\text{минпр}}$.

Для уменьшения погрешностей измерения, обусловленных паразитными отражениями, как правило, модель помещают в безэховую камеру. Основной задачей БЭК является ослабление до требуемой величины отражений от поверхностей, ограничивающих ее объем. Так создаются условия "свободного пространства" внутри замкнутого объема, при котором поле источника не искажается за счет отражений.

Для получения более точных измерений РДП в БЭК последние экранируют с целью снижения общего уровня электрорадиопомех. Гарантированный малый уровень отраженного сигнала при проведении измерений в БЭК является ее основной характеристикой и называется коэффициентом безэховости $K_{\text{Б}}$. В большинстве случаев этот уровень

обеспечивается не во всем объеме безэховой камеры, а лишь в ее части, называемой безэховой зоной.

Для измерения РДП, имеющих значительный перепад уровней отраженных от воздушной цели сигналов, целесообразна облицовка внутренней поверхности БЭК радиопоглощающими материалами (РПМ), обеспечивающими минимальную величину K_B в широком диапазоне частот и углов падения электромагнитной волны.

К таким РПМ относятся радиопоглощающие материалы рассеивающего типа, которые характеризуются значительной поперечной неоднородностью и могут быть условно объединены классом шиповидных или рассеивающих материалов. Поглощение радиоволн в таких материалах, происходит при их многократном отражении. При этом толщина поглощающего материала эквивалентна высоте переотражающих пирамид. Внутренняя поверхность безэховой камеры представлена на рис. 1.

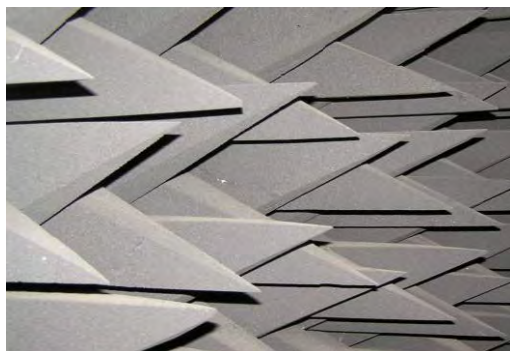


Рис. 1. Внутренняя поверхность БЭК, имеющая шиповидный РПМ

Электромагнитная волна, упавшая на радиопоглощающие пирамиды, претерпевает многократное переотражение между их стенками до практически полного затухания. Число переотражений тем больше, чем меньше угол при вершине пирамиды.

Радиопоглощающие материалы пирамидальной формы имеют коэффициент отражения в области миллиметровых и сантиметровых волн – 40 ... – 50 дБ [14].

Для измерения величины K_B БЭК применялся модифицированный метод непосредственного измерения рассеянной мощности [14]. Необходимость модернизации известного метода измерения K_B вызвана тем, что при измерении РДП ВЦ приемная антенна располагается не внутри объема БЭК, а рядом с передающей антенной. Поэтому в знаменателе

выражения для K_B целесообразно использовать не проникающий по боковым и задним лепесткам передающей и приемной антенн сигнал передатчика, флуктуирующий при вращении приемной антенны по случайному закону, а сигнал, принимаемый главным лепестком приемной антенны от металлического листа, облучаемого слабонаправленной передающей антенной, т.е.

$$K_B = \frac{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}}{(4\pi r_{\text{БЭК}}^2)^2} \sigma_{\text{БЭК}} A_{\text{эфф}}}{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}}{(4\pi r_{\text{М}}^2)^2} \sigma_{\text{М}} A_{\text{эфф}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{пер}}, G_{\text{пер}}$ – мощность излучения и коэффициент усиления передающей антенны соответственно; $\sigma_{\text{БЭК}}$ и $r_{\text{БЭК}}$ – эквивалент ЭПР площади БЭК, отражающей сигнал в направлении главного лепестка приемной антенны и расстояние от этой площади до передающей и приемной антенн соответственно; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь приемной антенны; $\sigma_{\text{М}}$ – ЭПР металлического листа, расположенного в направлении главного лепестка приемной антенны на расстоянии $r_{\text{М}}$ от нее.

Из последнего выражения следует, что измеренный данным методом коэффициент безэховости K_B пропорционален коэффициенту отражения РПМ: $K_B = (\sigma_{\text{БЭК}}/\sigma_{\text{М}})(r_{\text{М}}/r_{\text{БЭК}})^4$.

Структурная схема измерения K_B описанным методом представлена на рис. 2.

Для реализации такого метода применяли в качестве слабонаправленной передающей антенны прямоугольную рупорную антенну с апертурой 12 см. Роль приемной антенны выполняла прямоугольная рупорная антенна Пб-23, предназначенная для лабораторных, высокоточных измерений и имеющая узкую диаграмму направленности.

Методика измерения K_B заключалась в следующем. Слабонаправленной передающей антенной равномерно облучалась вся безэховая зона БЭК, а узконаправленная приемная антенна на первом этапе фокусировалась на металлическую пластину, расположенную на противоположной стороне БЭК. Размер металлической пластины составил $0,25 \times 0,5$ м. На спектроанализаторе вводилось затухание в 100 дБ, и производился замер интенсивности зондирующего сигнала, отраженного от металлической пластины. Значение показания аттенюатора фиксировалось. Затем металлическую пластину из БЭК убрали. На втором этапе приемная антенна

П6-23 фокусировалась последовательно на все участки БЭК. На спектроанализаторе производился замер интенсивности отражения от этих участков. Уменьшая затухание, вводимое аттенюатором (рис. 2), добивались такого же значения интенсивности сигнала, отраженного от поверхности участка БЭК, что и при наличии металлической пластины. Разница в показаниях значений шкалы аттенюатора давала оценку коэффициента безэховости анализируемого участка БЭК. Аналогичным образом были проведены измерения во всем сантиметровом диапазоне радиоволн.

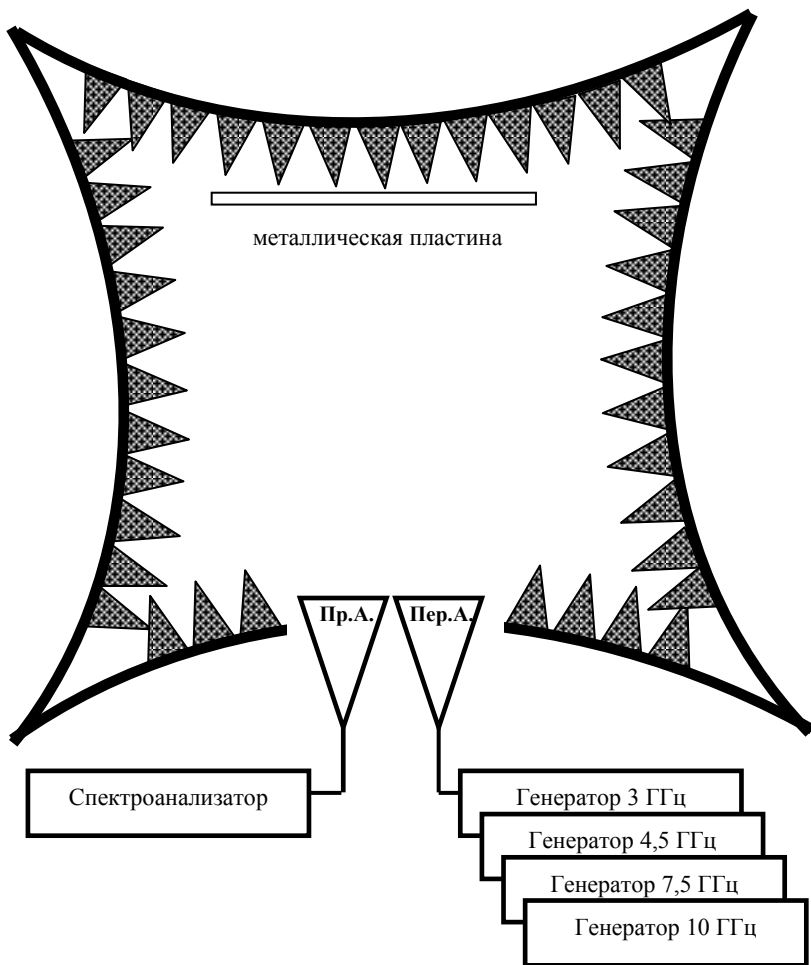


Рис. 2. Структурная схема измерения коэффициента безэховости K_B

Таким образом, используя вышеизложенный метод, измерены минимальные значения коэффициентов безэховости, которые находятся в пределах -30 дБ, -40 дБ, -47 дБ и -52 дБ для частот $f_1 = 3$ ГГц, $f_2 = 4,5$ ГГц, $f_3 = 7,5$ ГГц, $f_4 = 10$ ГГц соответственно. Погрешность определения метрологических характеристик не превышала $+1$ дБ. При этом БЭК имела стены криволинейной подушкообразной формы с размерами: $8,3 \times 5,2 \times 4$ м; РПМ рассеивающего типа состоящий из 8400 пирамид; высота пирамид – 320 мм; угол при вершине 30 град. При таких размерах в диапазоне углов падения $Q = (0...40)$ град число отражений каждого луча составляло не менее четырех и поглощение при каждом отражении было порядка 5...12 дБ.

В качестве примера использования БЭК на рис. 3 представлены РДП и соответствующие им фотографии макетов воздушных целей различных размеров и конфигурации, измеренные в спектральной области с помощью алгоритмов цифрового спектрального анализа Фурье и Кейпона (пунктирные и сплошные линии соответственно).

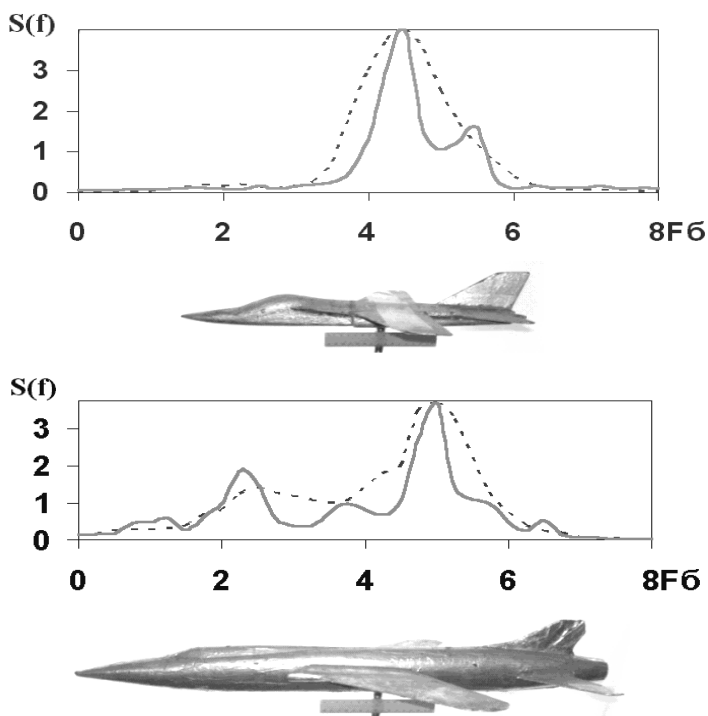


Рис. 3. РДП и фотографии макетов ВЦ различных размеров и конфигурации, измеренные в БЭК

Выводы. При электродинамическом моделировании РДП макетов ВЦ в широком диапазоне частот с использованием БЭК СВЧ учитываются нелинейности тракта прохождения сигнала и эффекты его переотражения, вклад которых практически невозможно оценить другими методами. Поэтому, в условиях ограниченного финансирования научных изысканий, БЭК является практически единственным способом, позволяющим проводить исследования и получать реальные РДП различных моделей целей как с использованием простых, так и сложных (многочастотных) сигналов. При этом показатель K_B является весьма важным параметром, показывающим степень достоверности проводимых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Веников В.А., Веников В.Г. Теория подобия и моделирования.* – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
2. *Любарский Г.Я. Математическое моделирование и эксперимент.* – К.: Наукова думка, 1987. – 160 с.
3. *Максимей И.В. Математическое моделирование больших систем.* – Минск: Высшая школа, 1985. – 119 с.
4. *Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника.* – М.: Радио и связь, 1985. – 200 с.
5. *Фортовой А.А. Системное моделирование на ЭВМ.* – Х.: МО СССР, 1987. – 232 с.
6. *Тамразов А.М. Планирование и анализ регрессионных экспериментов в технологических исследованиях.* – К.: Наук думка, 1987. – 176 с.
7. *Егоров А.Б., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента.* – Х.: Вища школа, 1986. – 240 с.
8. *Демидов Б.А. Методы военно-научных исследований. Ч. 4.* – Х.: МО СССР, 1989. – 594 с.
9. *Молчанов В.П. Основы матмоделирования.* – Х.: МО СССР, 1990. – 96 с.
10. *Математическое моделирование и эксперимент.* / Г.Я. Любарский, Р.П. Слабоспицкий, М.А. Хажмурадов, Р.И. Адушкина. – К.: Наук. думка, 1987. – 160 с.
11. *Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник* / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин, С.В. Москвитин, С.А. Горшков, Д.И. Леховицкий, Л.С. Левченко / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО "МАКВИС", 1998. – 828 с.
12. *Небабин В.Г., Сергеев В.В. Методы и техника радиолокационного распознавания.* – М.: Радио и связь, 1984. – 121 с.
13. *Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехн. спец. вузов.* – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
14. *Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ.* – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.

Поступила 26.10.2005

Рецензент: доктор технических наук, доцент Г.В. Ермаков,
Харьковский университет Воздушных Сил.