

Научная статья

УДК 621.317.08

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184503>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LJFAUP>

СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ В БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Артем Андреевич Ларин¹, Валерий Васильевич Бодрышев²✉

¹Научно-производственное предприятие Калужский приборостроительный завод
«Тайфун», Калуга, Российская Федерация

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Москва, Российская Федерация

¹larintema@ya.ru

²soplom@mail.ru✉

Аннотация. В статье описан способ организации радиоволнового контроля крупногабаритных радиопрозрачных укрытий (РПУ) в безэховой камере (БЭК). Рассмотрена проблематика создания БЭК в помещениях промышленного назначения (ППН), описан алгоритм расчета БЭК трапецеидальной формы, в рамках которого формализовано условие отсутствия переотражений первого и второго порядка в рабочей зоне камеры. Описан способ, позволяющий проводить измерения как величины потерь энергии, так и набег фазы электромагнитной волны (ЭМВ) в радиопрозрачной стенке в широком диапазоне частот. Данный метод позволяет подавлять влияние переотражений ЭМВ от радиопрозрачной стенки на результат измерений, что повышает точность получаемых результатов. Проведена экспериментальная оценка погрешности измерений радиотехнических параметров предложенным способом.

Ключевые слова: радиолокационная станция, обтекатель, радиопрозрачное укрытие, электромагнитная волна, величина потерь, коэффициент прохождения, набег фазы

Для цитирования: Ларин А.А., Бодрышев В.В. Способ организации радиоволнового контроля крупногабаритных радиопрозрачных укрытий в безэховой камере // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184503>

Original article

METHOD OF ORGANIZATION OF RADIO-WAVE CONTROL OF LARGE-SIZED RADIO-TRANSPARENT SHELTERS IN AN ANECHOIC CHAMBER

Artem A. Larin¹, Valery V. Bodryshev²✉,

¹Kaluga-based instrument-making plant «Typhoon»,

Kaluga, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russian Federation

¹larintema@ya.ru

²soplom@mail.ru✉

Abstract. Various radio transparent fairings are used to protect radar antennas from environmental influences. The main electrotechnical requirement for these products is the need for radio transparency (introduction of minimum electromagnetic wave (EMW) distortion) while maintaining strength and protective properties.

Due to the complexity of the technological cycle of their manufacture and the widespread use of manual labour in the formation of the layers of the radio-transparent wall, there are often various deviations in their design, such as deviations in the thickness of the layers of cladding or filler, an increase in the binder in one of the layers. Such variations can have a significant impact on the radiotransmission of the finished product, so the task of controlling the radiotransmission of RPU's at the production and incoming inspection stages is extremely important. In particular, this task becomes more complicated in the case of the

need to control large-format RPU (the size of which exceeds 2...3 metres), due to their large dimensions.

The paper describes the problem of creating anechoic chambers. Recommendations are given for the choice of the shape of the anechoic chamber in order to exclude the first and second electromagnetic wave over-reflections in its working area. Such decisions make it possible to minimise the influence of EMW over-reflections from the polygon elements on the measurement result. However, in order to combat the over-reflections from the radio-transparent wall, it is necessary to use additional mechanisms. To solve this problem, the author proposed and patented a method that allows to measure both the magnitude of the energy losses and the EMV phase run-up in the radio transparent wall in a wide range of frequencies. This method makes it possible to suppress the influence of EMV reflection from the radio transparent wall on the measurement result. The technical result is obtained by carrying out a series of measurements of the signal level at variation of the phase of the reflected wave in the interval between the measuring antenna and the wall, with subsequent mathematical processing of the results. The phase is varied by changing the position of the fairing relative to the antenna.

Experimental evaluation of the measurement error of radio parameters using the proposed method was carried out. As a result of the experiment it was established that the proposed method of organising the radio wave control allows to carry out measurements of energy losses with an error not exceeding 0.2 dB and measurements of the EMW phase run-up with an error not exceeding 5% in the frequency range from 3 to 11 GHz.

Keywords: radar station, fairing, radio-transparent shelter, electromagnetic wave, loss magnitude, transmission coefficient, phase raid

For citation: Larin A.A., Bodryshev V.V. Method of organization of radio-wave control of large-sized radio-transparent shelters in an anechoic chamber. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184503>

Введение

Для защиты антенных устройств радиолокационных станций (РЛС) от воздействий внешней среды используются различные радиопрозрачные укрытия [1].

Радиопрозрачность (внесения минимальных искажений электромагнитной волны (ЭМВ)) является главным электротехническим требованием к данным изделиям наряду с прочностными и защитными свойствами.

В настоящее время для обеспечения указанных выше требований при производстве РПУ широкое применение получили многослойные композиционные материалы [2]. Ввиду сложности технологического процесса их изготовления и широкого применения ручного труда на его этапах (формирование слоев, окрашивание, извлечение из матрицы и др.), нередко возникают различного рода отклонения в их конструкции, например, отклонение толщины слоев обшивок или заполнителя, увеличение связующего в любом из слоев. Такие отклонения могут оказывать значительное влияние на радиопрозрачность готового изделия, поэтому задача контроля радиопрозрачности РПУ на стадиях производства и входного контроля является крайне актуальной. Особенно данная задача усложняется в случае необходимости контроля крупногабаритных РПУ (размер которых более 2...3 метров), в силу их больших габаритов [3].

Известно множество методов позволяющих оценивать параметры изделий, влияющие на их радиопрозрачность. Так, например, методы, основанные на электрических испытаниях (резонансные, волновые) [4], основаны на измерении и анализе диэлектрических параметров. Данные параметры удобны для описания свойств однородных материалов. Для неоднородных материалов (в том числе композиционных), необходимо найти поле электрических параметров (их распределение). В подобных случаях удобно характеризовать материал не диэлектрическими (относительной диэлектрической проницаемостью ϵ и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta$), а радиотехническими параметрами, в частности величиной потерь и набегом фазы электромагнитной волны (ЭМВ) [5]. На основе выше сказанного, контроль радиопрозрачности крупногабаритных РПУ удобнее всего основывать на методах радиоволнового контроля, а именно измерении радиотехнических параметров, таких как величина потерь энергии и набег фазы ЭМВ.

Анализ известных методов радиоволнового контроля

Одной из основных проблем при проведении радиоволнового контроля РПУ является борьба с переотражениями ЭМВ как от самого РПУ, так и от конструкций полигона (бетонные или кирпичные стены, пол, потолок, металлические и иные нерадиопрозрачные конструкции). Одним из вариантов борьбы с паразитными переотражениями является применение методов временной селекции (Time domain) [6]. Применение такого подхода позволяет осуществлять селекцию полезного сигнала во временной области и существенно повысить точность проводимых измерений. Однако указанный подход не лишен таких недостатков как:

- результаты измерения имеют два разрыва (скачка) в начале и в конце рабочего частотного диапазона частот, вызванные эффектом Гиббса, что влияет на достоверность результатов при измерениях в широком диапазоне частот ЭМВ;
- для применения временной селекции необходимо дорогостоящее измерительное оборудование, поддерживающее опцию временной селекции (Time domain) или специализированное программное обеспечение для постобработки полученных результатов измерений.

В случае если на предприятии уже имеется БЭК [7] или ее создание является экономически обоснованной (БЭК может использоваться для проведения антенных измерений или испытаний на электромагнитную совместимость [8]) организация испытаний в БЭК является хорошей альтернативой. В этом случае, отказавшись от использования временной селекции, можно обойти ограничения связанные с эффектом Гиббса и значительно упростить процесс контроля радиопрозрачности РПУ. Рассмотрим основные известные способы организации таких измерений.

Для испытаний готовых РПУ испытания могут проводиться «штатно», в составе антенны и антенно-фидерного тракта РЛС, т.е. объектом исследований служит целиком система антенна-обтекатель (САО). Подробно такие испытания описаны специализированной литературе [9]. Однако изготовление в качестве технологической оснастки для проведения испытаний антенную систему из состава изделия может быть экономически нецелесообразным. Кроме этого, в случае необходимости локального измерения радиотехнических параметров в

радиопрозрачной стенке РПУ (например, с целью поиска дефектов), применение такого подхода может быть невозможно ввиду сопоставимого размера штатной антенны РЛС и самого РПУ. В таком случае штатную антенну целесообразно заменить на измерительную антенну с меньшей апертурой.

Такой подход (использование измерительных антенн, а не штатной антенны изделия) основан на методе замещения [9]. Реализация указанного способа подразумевает использование двух измерительных антенн, расположенных на расстоянии R обеспечивающем выполнение условия дальней зоны:

$$R = \frac{2d^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где d — максимальный габарит апертуры измерительной антенны, λ — длина ЭМВ.

Измерение выполняется на фиксированной частоте f_0 в два этапа. На первом этапе фиксируется амплитуда сигнала без РПУ E_1 . Далее, на втором этапе, перед одной из измерительных антенн устанавливается контролируемая область РПУ и выполняется повторное измерение амплитуды сигнала (с обтекателем) E_2 . Расчет измеренного значения Π (величины потерь энергии ЭМВ) выполняется по следующему выражению:

$$\Pi = E_1 - E_2, (\text{дБ}) \quad (2)$$

Аналогичным образом может быть измерен F (набег фазы ЭМВ):

$$F = F_1 - F_2, (\text{град}) \quad (3)$$

где F_1 — фаза сигнала без РПУ, F_2 — фаза сигнала с установленным РПУ.

Основным недостатком описанного способа является то, что в нем не учтено влияние переотражений ЭМВ от радиопрозрачной стенки РПУ, которое оказывает значительное влияние на точность проводимых измерений.

Способ решения проблемы влияния переотражений ЭМВ от радиопрозрачной стенки описана в работах Самбура Н.В. [10, 11]. Суть способа заключается в проведении не одного измерения на фиксированной частоте ЭМВ, а серии измерений на разных частотах с последующей математической обработкой полученных результатов с целью осуществления вариации фазы ЭМВ.

Одним из основных недостатков данного способа является то, что величина потерь оценивается комплексно (усредненно) для некоторого диапазона частот $f = f_{\min} \dots f_{\max}$, а не в фиксированной частотной точке $f = f_0$. Кроме этого, в данном способе не описывается измерение набега фазы ЭМВ.

Общим недостатком описанных выше способов является их отсутствие универсального подхода к измерению величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ в БЭК в широком диапазоне частот ЭМВ.

Организация БЭК для проведения измерений

Технологические циклы изготовления РПУ и РЛС, являющимися частями одной системы, часто проходят параллельно на одном и том же предприятии. Применение компактных полигонов на основе коллиматорного зеркала является одним классических решений для проведения антенных измерений выпускаемых антенных устройств из состава РЛС. Такое решение, несмотря на высокую себестоимость и сложность, является одним из самых универсальных и сложных, рассмотрим его подробнее.

Одним из способов снижения себестоимости компактных полигонов является их интеграция в существующие помещения производственного назначения (ППН). Это позволяет сократить затраты на строительство и использовать уже имеющиеся вспомогательные системы, такие как экранирование, отопление, кондиционирование, грузоподъемные устройства и системы пожаротушения. Однако такой подход ограничивает возможные размеры и форму полигона из-за геометрических параметров помещения.

Для облицовки безэховых камер (БЭК) требуется значительное количество радиопоглощающего материала (РПМ), иногда достигающее сотен квадратных метров. Это делает стоимость РПМ ключевым фактором при его выборе, что оправдывает применение материалов с компромиссными технико-экономическими характеристиками. Современные широкополосные РПМ имеют коэффициент отражения около $-20 \dots -30$ дБ, что недостаточно для измерений на компактных

полигонах, где уровень боковых лепестков (УБЛ) антенн может достигать $-40...50$ дБ. Оптимизация формы камеры позволяет улучшить её безэховые свойства, которые для камер простой формы ограничены коэффициентами поглощения и рассеяния РПМ. Так, например, в [12] приводится безэховая камера в форме прямоугольной трапеции, встроенная в ППН.

Обычно качество БЭК оценивается коэффициентом безэховости ($K_{БЭ}$) в рабочей зоне [12]. Коэффициент безэховости есть отношение полного потока мощности рассеянного камерой ($P_{расс}$) к потоку мощности (P_o) пришедшему от излучателя: $K_{БЭ} = P_{расс} / P_o$. При этом предельное значение коэффициента ограничено неравенством:

$$K_{БЭ} \leq p^n, \quad (4)$$

где p — коэффициент отражения по мощности материала покрытия стенок камеры, n — минимальное число переотражений не прямых лучей из зоны излучения в зону приема [13].

Знак в неравенстве (4) показывает, что коэффициент безэховости может снижаться из-за зависимости коэффициента отражения (p) от угла падения ЭМВ на радиопоглощающий материал, формы камеры и различных паразитных эффектов, таких как дифракция на краях зеркала или просачивание рабочей зоны БЭК энергии от облучателя зеркала коллиматора.

Простейшая форма безэховой камеры — прямоугольная, что удобно совмещается с типичной формой производственных помещений. Однако из-за отражений первого порядка ($n = 1$) (например, от задней стенки) безэховость камеры ограничивается коэффициентами поглощения и рассеяния используемого РПМ.

С развитием техники и теории антенных измерений при проектировании безэховых камер особое внимание уделялось их геометрической форме и конфигурации. Для компактных полигонов с коллиматорным зеркалом выделяют два основных подхода к снижению коэффициента безэховости камеры [14, 15]:

- 1) сложная форма поверхности (криволинейные или ломаные профили стен БЭК);

- 2) простая форма поверхности, но с профилированными элементами (профилирование экранами, вертикальными или горизонтальными гофрами, а также рассеивающими пирамидами различных форм и размеров).

Оба подхода направлены на увеличение количества переотражений (n) и различаются способами перенаправления или рассеивания паразитных волн. Однако они имеют свои недостатки:

- 1) в первом случае (сложная форма стен) — это большие габариты и сложность конструкции;
- 2) во втором случае (простая форма с профилированными элементами) — наличие локальных элементов сложной формы, что усложняет конструкцию и затрудняет использование стандартного радиопоглощающего материала (РПМ), например, пирамидального типа. Это приводит к увеличению расхода материала, нарушению его целостности и общему усложнению технологии покрытия.

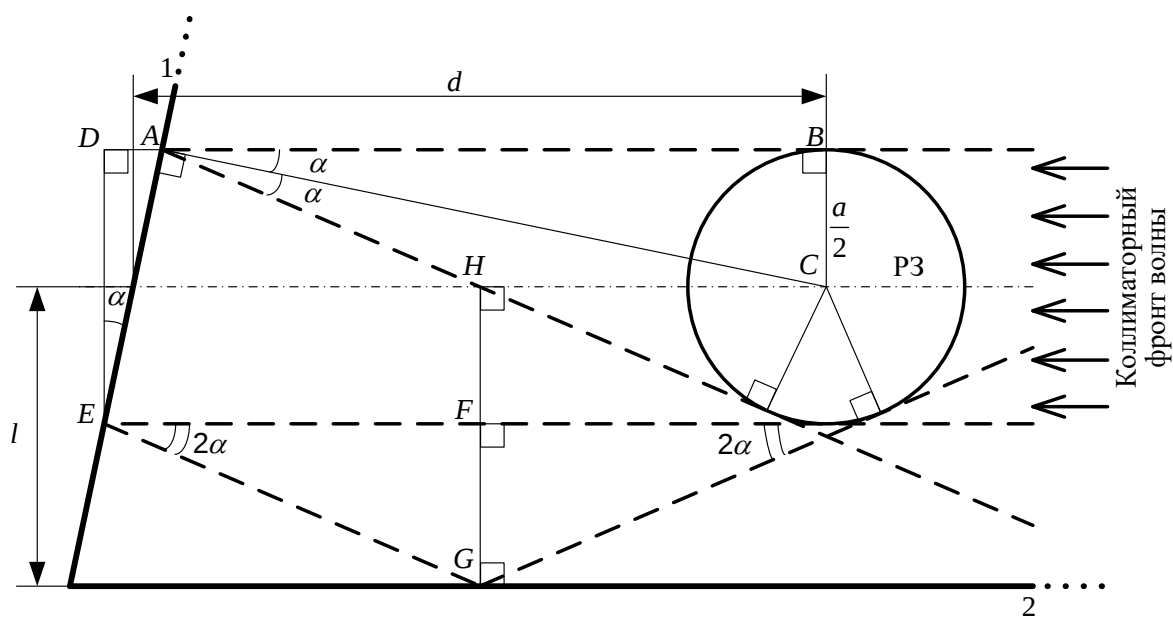
Компромиссным решением является трапецеидальная форма камеры со скошенной задней стенкой [16]. Её отличие от других известных конструкций (например, камер с наклонной задней стенкой или клиновидной формой [15]) заключается в том, что отражение "прожекторного" луча происходит только в горизонтальной плоскости в одном направлении, а также отсутствует дополнительный профилированный элемент (клин). Это позволяет снизить зависимость безэховости камеры от высоты помещения, что особенно важно, так как полезная высота ППН часто ограничена из-за наличия систем подъема, транспортировки, отопления и кондиционирования.

Таким образом, трапецеидальная форма камеры [16] сочетает в себе конструктивную простоту, сохранение габаритов и отсутствие дополнительных элементов, что упрощает покрытие внутренней поверхности РПМ. Асимметрия формы камеры относительно фокальной оси коллиматорного зеркала способствует снижению уровня паразитных отражений. Дополнительное пространство, необходимое для увеличения габаритов камеры, может быть использовано для

организации сквозного прохода (внутрицехового проезда) или размещения антенных устройств внутри камеры для их установки в рабочую зону.

Автором предложен [12] и запатентован [17] алгоритм определения оптимальной формы БЭК. На рисунке 1 показана геометрия камеры в области отражений первого и второго порядка. При проектировании изучался ход лучей волны, переизлучаемой коллиматорным зеркалом, в рамках приближения геометрической оптики [15, 18].

Границы "прожекторного луча" обозначены штриховыми линиями. Рабочая зона имеет цилиндрическую форму с радиусом основания $a/2$. Задняя стенка «1» наклонена под углом α относительно нормали к первичному коллиматорному фронту волны, а стенка «2» параллельна направлению распространения коллиматорного фронта волны.



Рисунок

1 — Ход лучей ЭМВ в БЭК, переизлучаемой коллиматорным зеркалом

При этом выполняются следующие условия:

1. *Условие отсутствия отражений первого порядка*

Искомый угол поворота задней стенки камеры α определяется на основе известного расстояния d до задней стенки «1» и размера рабочей зоны a , исходя из

подобия треугольников ABC и ADE (рисунок 1). Данный угол определяет отсутствие отражений первого порядка:

$$\alpha \geq \arctg \left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a} \right). \quad (5)$$

2. Условие отсутствия отражений второго порядка

Камера имеет асимметрию относительно фокальной оси зеркала коллиматора, при которой выполняется условие отсутствия отражений второго порядка. Данная асимметрия определяется расстоянием l от оси коллиматора до дальней боковой стенки «2» как сумма длин двух отрезков HF и FG (рисунок 1).

Длина отрезка HF равна половине размера рабочей зоны a .

Длину FG определяем на основе известных параметров a , d и α как катет треугольника EFG .

В результате получаем:

$$l \geq HF + FG = \frac{a}{2} + tg 2\alpha \left(\frac{d}{2} + \frac{a}{2} tg \alpha \right). \quad (6)$$

Таким образом, итоговое отсутствие отражений определяется следующей системой:

$$\begin{cases} \alpha \geq \arctg \left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a} \right) \\ l \geq \frac{a}{2} \cos^{-1} 2\alpha + \frac{d}{2} tg 2\alpha \end{cases} \quad (7)$$

Способ измерения радиотехнических параметров в БЭК

Вариант трапецидальной БЭК, рассмотренный выше, оснащен коллиматорным зеркалом для формирования плоского фронта ЭМВ, может быть использован не только для антенных измерений, но и для организации радиоволнового контроля РПУ. Схема рабочего места для проведения измерений радиотехнических параметров в БЭК с коллиматором представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 — Схема рабочего места в БЭК с коллиматором

Здесь под понятием «объект испытаний» понимается радиопрозрачная стенка РПУ.

В БЭК неоснащенных коллиматором, в качестве источника ЭМВ может быть использована направленная (предпочтительно рупорная) передающая антенна (рисунок 3 и 4), расположенная от приемной антенны на расстоянии, выполняющем условие (1).

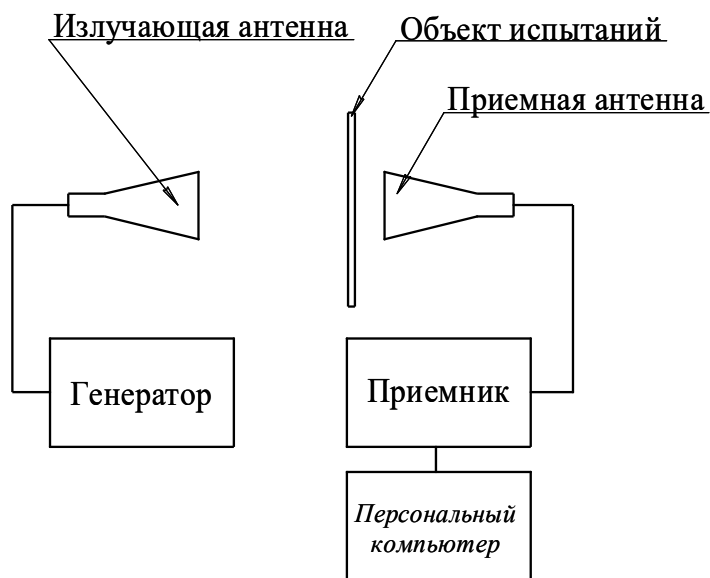


Рисунок 3 — Схема рабочего места в БЭК без коллиматора



Рисунок 4 — Фотография рабочего места

Как было сказано выше, проведение измерений в БЭК решает вопрос влияния переотражений ЭМВ от конструкций полигона на результат измерений. Однако, для борьбы с переотражениями от радиопрозрачной стенки необходимо использовать дополнительные механизмы. Для решения этой задачи был предложен и запатентован [19] способ, позволяющий проводить измерения как величины потерь энергии, так и набег фазы ЭМВ в широком диапазоне частот, позволяющий подавлять влияние переотражений ЭМВ от радиопрозрачной стенки на результат измерений. Рассмотрим ниже суть способа. Измерение проводятся по следующему алгоритму:

- 1) Выполняется измерение амплитуды E_1 и фазы F_1 на выходе приемной измерительной антенны без РПУ.
- 2) Устанавливается контролируемая область радиопрозрачной стенки РПУ перед приемной измерительной антенной.
- 3) Выполняется одновременное перемещение радиопрозрачной стенки РПУ с сохранением параллельности ее ориентации к апертуре приемной измерительной антенны (рисунок 5) и серия измерений амплитуды E'_2 и фазы F'_2 на выходе приемной (измерительной) антенны. Перемещение выполняется

на расстояние не менее половины длины волны, что обеспечивает гарантированное изменение фазы ЭМВ не менее чем на 2π .

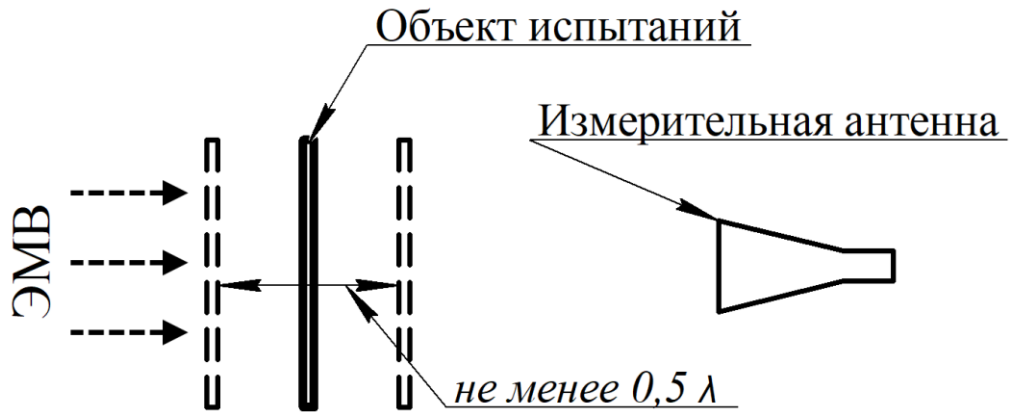


Рисунок 5 — Расположение обтекателя в процессе измерения

Примечание — амплитуду E_2' и фазу F_2' сигнала, измеренные в пункте 3, можно представить как $E_2' = E_1 - \Pi - L_{nep}$ (в логарифмических единицах) и $F_2' = F_1 - F - F_{nep}$ (в градусах), где L_{nep} — потери энергии ЭМВ на переотражение от радиопрозрачной стенки РПУ (в дБ), F_{nep} — фазовая ошибка, вызванная переотражением ЭМВ от стенки РПУ (в град). Величина значений L_{nep} и F_{nep} напрямую зависит от фазы ЭМВ приходящей в измерительную антенну и, при изменении фазы отраженной ЭМВ на величину 2π и более, принимают значения в диапазоне $L_{nep} = -P_{\Pi} \dots + P_{\Pi}$ и $F_{nep} = -P_F \dots + P_F$, где $\pm P_{\Pi}$ и $\pm P_F$ — максимальное и минимально значения величин L_{nep} и F_{nep} соответственно.

4) Находятся значения амплитуды E_2 и фазы ЭМВ F_2 с установленным РПУ. Для чего из полученной в п.3 серии измерений E_2' и F_2' , выбираются максимальные ($E_{2\max}$ и $F_{2\max}$) и минимальны ($E_{2\min}$ и $F_{2\min}$) значения, при этом

$$E_{2\max} = E_1 - \Pi + P_{\Pi}, \quad (8)$$

$$E_{2\min} = E_1 - \Pi - P_{\Pi}, \quad (9)$$

$$F_{2\max} = F_1 - F + P_F, \quad (10)$$

$$F_{2\min} = F_1 - F - P_F. \quad (11)$$

Примем $E_2 = E_1 - \Pi$ и $F_2 = F_1 - F$ тогда:

$$E_2 = \frac{E_{2\max} + E_{2\min}}{2}, \text{ дБ} \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{F_{2\max} + F_{2\min}}{2}, \text{ град} \quad (13)$$

5) Выполняется расчет величин Π и F по (2) и (3) соответственно.

Экспериментальная оценка погрешности измерений Π и F в БЭК

Экспериментальная оценка погрешности и определение ее целочисленного значения проводилась посредством измерений Π и F эталонного образца с последующим сравнением полученных результатов с расчетными значениями для данного эталона.

В качестве эталона были выбраны две пластины Фторопласта-4 толщиной 20 мм. Размер пластин $600 \times 600 \text{ мм}^2$. Выбор Фторопласта-4 в качестве эталона обусловлен хорошо отработанной технологией его изготовления, обеспечивающей достаточную однородность материала и постоянность его характеристик. Несмотря на то, что значения ε и $\text{tg} \delta$ для Фторопласта-4 являются справочными величинами, они были дополнительно подтверждены волноводным резонаторным методом для выбранного образца в рамках входного контроля ($\varepsilon = 2,3$ и $\text{tg} \delta = 0,0003$ в X -диапазоне частот), что соответствует справочным данным для Фторопласта-4. Эталонные значения

Π и F были рассчитаны по [18].

Измерения в БЭК проводились в компактном полигоне, расположенном в АО «Тайфун». Данный полигон оснащен коллиматором МАК-5 [17], в качестве приемной антенны использовалась измерительная антенна П6-123, в качестве измерительного прибора — векторный анализатор цепей *Agilent PNA N5224A*. Для повышения точности измерений проводилась усреднение полученных результатов в частотной

области по полиномиальному закону шестой степени. Схема рабочего места приведена на рисунке 2.

Измерения проводились в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц в связи с ограничением накладываемым оборудованием компактного полигона. Полученные результаты измерений Π представлены на рисунке 6. Эталон ориентировался строго параллельно апертуре измерительных антенн.

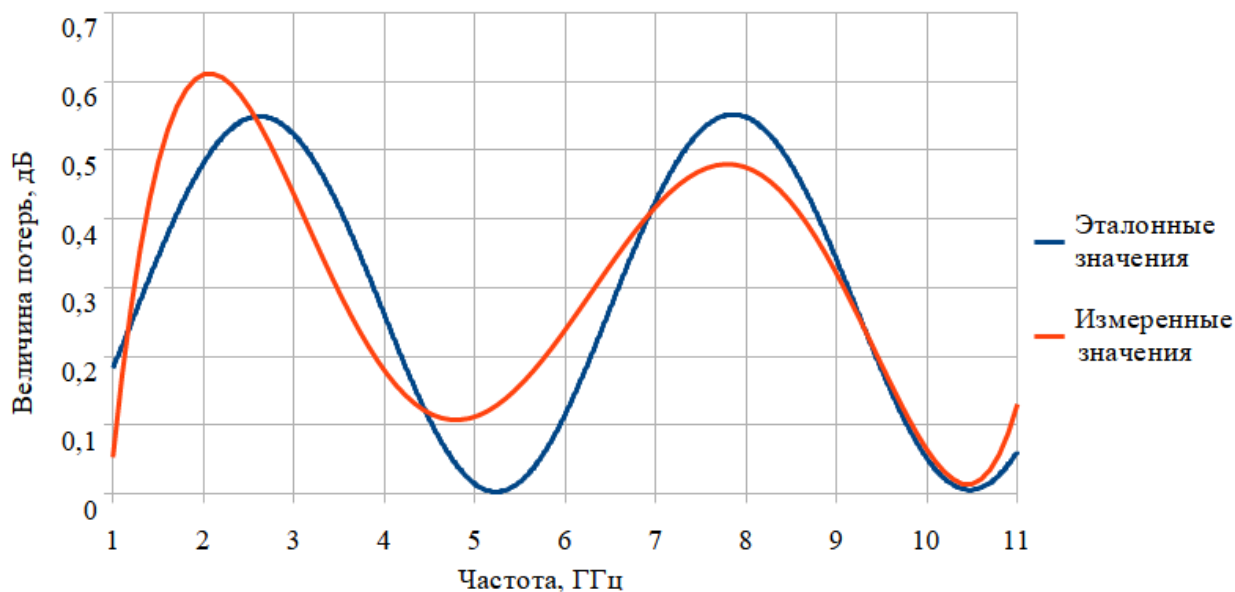


Рисунок 6 — Измеренные и эталонные значения величины потерь энергии ЭМВ в эталонном образце Фторопласта-4 толщиной 20 мм.

На представленном рисунке видно, что в диапазоне частотот 3 до 11 ГГц отличие измеренных значений величины потерь энергии от эталонных данных не превышают 0,2 дБ.

Абсолютные значения измеренного набега фазы ЭМВ в образце представлены на рисунке 7.

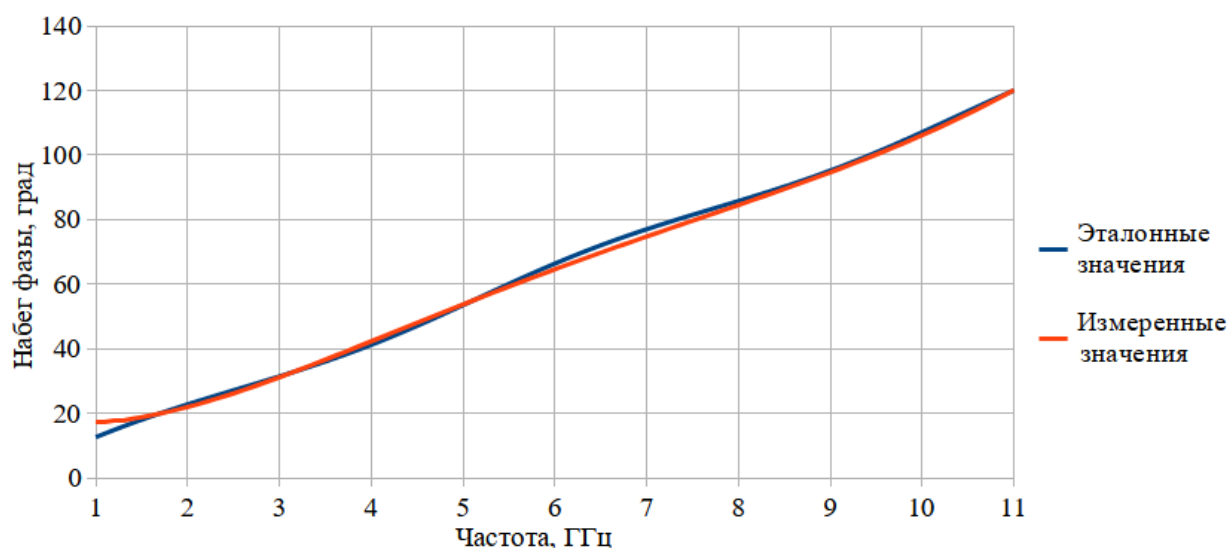


Рисунок 7 — Измеренные и эталонные значения набег фазы ЭМВ в образце Фторопласта-4 толщиной 20 мм

Ошибка измерения набег фазы (отклонение полученных результатов от эталонных значений) в процентном выражении представлена на рисунке 8.

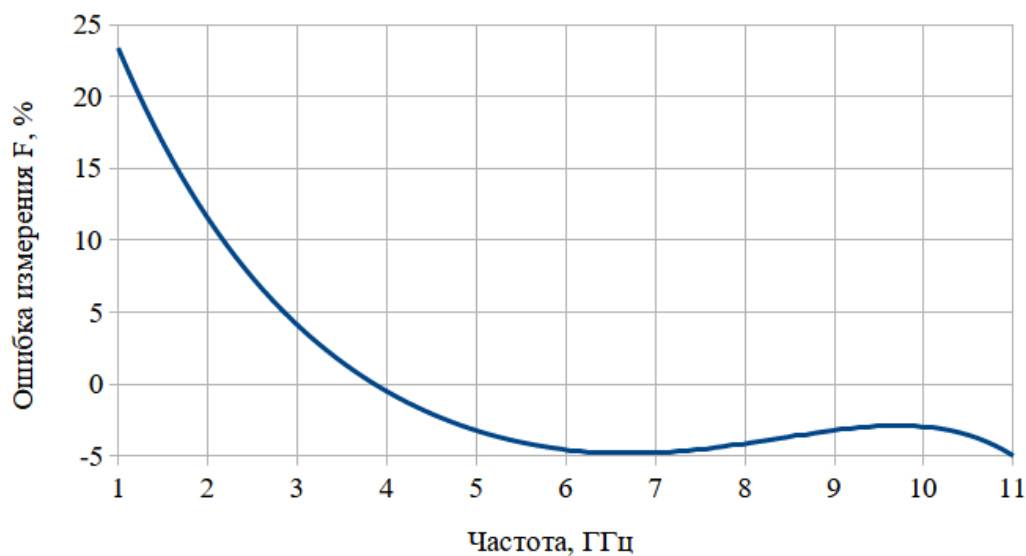


Рисунок 8 — Ошибка измерения набег фазы ЭМВ в образце Фторопласта-4 толщиной 20 мм

Видно, что в диапазоне частот от 3 до 11 ГГц отличие измеренных значений набег фазы ЭМВ от эталонных данных составило не более 5%.

В результате проведенного эксперимента было установлено, что предложенный способ организации радиоволнового контроля позволяет проводить измерение величины потерь энергии, с погрешностью, не превышающей 0,2 дБ, и измерение набега фазы ЭМВ, с погрешностью, не превышающей 5%, в диапазоне частот от 3 до 11 ГГц.

В заключение необходимо отметить, что предложенный метод, в силу своей универсальности, хорошо зарекомендовал себя как при измерении радиотехнических параметров крупногабаритных РПУ, так и при проведении их дефектоскопии [20]. По предложенному алгоритму была рассчитана и создана БЭК в АО «Тайфун», используемая в настоящий момент как для антенных измерений, так и для радиоволнового контроля крупногабаритных РПУ.

Список источников:

1. Гуртовник И.Г. Соколов В.И., Трофимов Н.Н. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. – М.: Мир, 2002. - 368 с.
2. Грищенко С.В. Расчёт и проектирование изделий конструкции самолёта из слоистых композитов с учётом межслоевых эффектов // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63011>
3. Ларин А.А. Практическая апробация метода дефектоскопии крупногабаритных радиопрозрачных укрытий, основанного на радиоволновом методе контроля // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184065>
4. Савицкий С.С. Методы и средства неразрушающего контроля: Учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты». – Минск: БНТУ, 2012. - 244 с.
5. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля. - Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2003. – 127 с.

6. Bodryshev V.V., Larin A.A., Rabinsky L.N. Flaw Detection Method for Radomes in Weakly Anechoic Conditions // TEM Journal. 2020. V. 9, Issue 1. P. 169-176. DOI: [10.18421/TEM91-24](https://doi.org/10.18421/TEM91-24)
7. Мехтиев Р.Ф., Савельев А.Н., Солод А.Г. Комплекс аппаратно-программных средств оперативного мониторинга радиолокационных побочных переотражений безэховой экранированной камеры // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112869>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-13)
8. Добычина Е.М., Снастин М.В., Обухов А.Е., Харалгин С.В. Испытания антенных решеток бортовых радиолокационных систем в антенном измерительно-вычислительном комплексе // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75661>
9. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1970. – 288 с.
10. Самбуров Н.В. Многочастотный способ измерения потерь в обтекателях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2015. Т. 15, № 3. С. 83–94.
11. Самбуров Н.В., Рыбаков Д.Ю. Способ измерения потерь в обтекателе. Патент RU 2 587 687 C1, 2016.06.20
12. Аксенов А.В., Ларин А.А., Самбуров Н.В. Безэховая камера, встраиваемая в помещения промышленного назначения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21, № 3. С. 66-74. DOI: [10.14529/ctcr210307](https://doi.org/10.14529/ctcr210307)
13. Бутакова С.В. Безэховые камеры с гладкими криволинейными профилями // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1996. Т. 39, № 9–10. С. 69–76.
14. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – М.: Наука, 2007. – 266 с.
15. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.

16. Самбуров Н.В., Рыбаков Д.Ю., Иванов Н.Г. Компактный антенный полигон в условиях геометрически ограниченных помещений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 10. С. 25–32.
17. Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В. Безэховая камера для антенных измерений. Патент RU 2 696 351 C1, 2019.08.01.
18. Chung B.K., Chuah H.T. Design and Construction of a Multipurpose Wideband Anechoic Chamber // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2003. Vol. 45, No. 6. P. 41–47.
19. Ларин А.А., Рыбаков Д.Ю., Самбуров Н.В. Способ измерения потерь в обтекатель регулярного типа. Патент RU 2 656 254 C1, 2018.06.04.
20. Бодрышев В.В., Ларин А.А. Дефектоскопия крупногабаритных обтекателей, основанная на измерении величины потерь энергии и набега фазы ЭМВ. Описание и практическая апробация // Антенны. 2024. № 5. С. 47-57.

References

1. Gurtovnik I.G. Sokolov V.I., Trofimov N.N. et al. *Radioprozrachnye izdeliya iz stekloplastikov* (Radio-transparent products from glass-reinforced plastics). Moscow: Mir Publ., 2002. 368 p.
2. Grishchenko S.V. Calculation and engineering structure an airplane made of laminated polymeric composite materials taking into account the effects interlaminar. *Trudy MAI*. 2015. No. 84. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63011>
3. Larin A.A. Practical testing of the method of defectoscopy of large-size radio-transparent shelters based on the method of radio-wave control. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184065>
4. Savitskii S.S. *Metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya: Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsial'nosti 1-38 01 01* (Methods and means of nondestructive testing: Educational and methodical manual for students of speciality 1-38 01 01). Minsk: BNTU Publ., 2012. 244 p.
5. Mishchenko S.V., Malkov N.A. *Proektirovanie radiovolnovykh (SVCH) priborov nerazrushayushchego kontrolya* (Designing of radio wave (microwave) devices of

nondestructive testing). Tambov: Tambovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2003. 127 p.

6. Bodryshev V.V., Larin A.A., Rabinsky L.N. Flaw Detection Method for Radomes in Weakly Anechoic Conditions. *TEM Journal*. 2020. V. 9, Issue 1. P. 169-176. DOI: [10.18421/TEM91-24](https://doi.org/10.18421/TEM91-24)

7. Mekhtiev R.F., Savel'ev A.N., Solod A.G. Hardware and software complex of operational monitoring tools for radar side remirroring of anechoic shielded chamber. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112869>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-13)

8. Dobychnina E.M., Snastin M.V., Obukhov A.E., Kharalgin S.V. Airborne radar antenna array test at the antenna measuring and computing complex. *Trudy MAI*. 2016. No. 91. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75661>

9. Prigoda B.A., Kokun'ko V.S. *Obtekateli antenn letatel'nykh apparatov* (Aircraft antenna fairings). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 288 p.

10. Samburov N.V. Multi-frequency method for measuring fairing losses. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. V. 15, No. 3. P. 83–94. (In Russ.)

11. Samburov N.V., Rybakov D.Yu. *Sposob izmereniya poter' v obtekatele*. Patent RU 2 587 687 S1 (Method of measuring the losses in the fairing. Patent RU 2 587 687 C1), 2016.06.20

12. Aksenov A.V., Larin A.A., Samburov N.V. Anechoic chamber built into industrial premises. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*. 2021. V. 21, No. 3. P. 66-74. (In Russ.). DOI: [10.14529/ctcr210307](https://doi.org/10.14529/ctcr210307)

13. Butakova S.V. Anechoic chambers with smooth curvilinear profiles. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*. 1996. V. 39, No. 9–10. P. 69–76. (In Russ.)

14. Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin V.S. *Kompaktnye poligony dlya izmereniya kharakteristik rasseyaniya ob'ektov* (Compact polygons for measuring the object scattering characteristics). Moscow: Nauka Publ., 2007. 266 p.

15. Mitsmakher M.Yu., Torgovanov V.A. *Bezekhovye kamery SVCH* (Anechoic chambers of the microwave). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982. 128 p.

16. Samburov N.V., Rybakov D.Yu., Ivanov N.G. Compact antenna polygon in the conditions of geometrically limited premises. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2014. V. 19, No. 10. P. 25–32. (In Russ.)
17. Larin A.A., Rybakov D.Yu., Samburov N.V. *Bezekhovaya kamera dlya antennykh izmerenii*. Patent RU 2 696 351 S1 (Compact antenna polygon in the conditions of geometrically limited premises. Patent RU 2 696 351 C1), 2019.08.01.
18. Chung B.K., Chuah H.T. Design and Construction of a Multipurpose Wideband Anechoic Chamber. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2003. V. 45, No. 6. P. 41–47.
19. Larin A.A., Rybakov D.YU., Samburov N.V. *Sposob izmereniya poter' v obtekatele regul'yarnogo tipa*. Patent RU 2 656 254 S1 (Method of measuring losses in a regular type fairing. Patent RU 2 656 254 C1), 2018.06.04.
20. Bodryshev V.V., Larin A.A. Defectoscopy of large fairings based on the measurement of energy losses and electromagnetic wave phase incursion. description and practical tests. *Antenny*. 2024. No. 5. P. 47-57. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 29.03.2025

Одобрена после рецензирования 31.03.2025

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 29.03.2025; approved after reviewing on 31.03.2025; accepted for publication on 25.04.2025