
Приборы и методы антенно-фидерных измерений

Научная статья
УДК 621.396.678
DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202301-05>

Проектирование и измерения рефлектора коллиматора со скругленными кромками и габаритными размерами 6 × 6 м

Е. В. Коротецкий¹, И. Ю. Тамарис²
^{1, 2} ООО «Радиолайн» (Москва, Россия)
¹ ek@radiorf.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Изготовление, монтаж и юстировка коллиматорных стенов с рефлекторами с габаритными размерами несколько метров являются нетривиальной задачей, требующей отдельной проработки под каждый проект. Неверный выбор геометрии рефлектора может привести к увеличению массы и размеров, что влечет за собой рост расходов на производство и проектируемой под стенд безэховой камеры. Кроме этого, увеличение массы накладывает дополнительные требования к жесткости стойки, к которой крепится рефлектор, и фундаменту под коллиматором. Как правило, рефлекторы больших размеров состоят из десятка составных частей, что приводит к необходимости иметь специальные юстировочные механизмы для прецизионной настройки расположения фрагментов рефлектора. Эти и другие вопросы слабо освещены в литературе, однако требуют решения при разработке больших коллиматорных стенов.

Цель. Разработать технические принципы и инженерные оценки для успешного проектирования, изготовления, монтажа и настройки коллиматорных стенов с рефлекторами больших размеров.

Результаты. Создан технический инструментарий для производственного цикла рефлектора коллиматора больших размеров. Представлено решение для юстировки положения фрагментов коллиматора на опорной стойке, а также особенности проектирования самой стойки. Представлены методики, используемые для настройки коллиматорного стенов.

Практическая значимость. Приведенные технические решения позволяют проектировать, изготавливать и настраивать коллиматорные стенов с крупногабаритными рефлекторами под требования заказчиков. Корректность применяемых подходов подтверждена результатами измерений тихой зоны коллиматорного стенов с рефлектором размером 6 × 6 м в безэховой камере ФГУП ВНИИФТРИ.

Ключевые слова

Коллиматор, конструкция, тихая зона, антенные измерения, спектр плоских волн

Авторы выражают благодарность заказчику коллиматорного стенов (ФГУП ВНИИФТРИ, особенно И.М. Малаю и А.В. Титаренко) за оказанное доверие и помощь на каждом этапе работы.

Для цитирования

Коротецкий Е.В., Тамарис И.Ю. Проектирование и измерения рефлектора коллиматора со скругленными кромками и габаритными размерами 6 × 6 м // Антенны. 2023. № 1. С. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202301-05>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Коллиматорные измерительные комплексы предназначены для формирования плоского амплитудно-фазового распределения на небольшом удалении от апертуры рефлектора коллиматора, что позволяет производить измерения при условиях дальней зоны в компактных безэховых камерах (БЭК). В настоящее время коллиматорные комплексы пользуются спросом в связи с техническим перевооружением промышленности для производства оборудования мобильной связи стандартов 4G, 5G и Интернета ве-

© Коротецкий Е.В., Тамарис И.Ю., 2023

щей. Типовой размер тихой зоны для этих нужд составляет 1–1,5 м. Наряду с измерениями диаграмм направленности (ДН) антенн, коллиматоры широко используются для измерений эффективной поверхности рассеяния. В последнем случае измеряемые объекты могут иметь габаритные размеры в разы больше среднего размера тихой зоны. Радиотехнический расчет такого крупного рефлектора ничем не отличается от расчета коллиматоров меньшего размера, но производство и сборка коллиматора с габаритными размерами несколько метров являются нетривиальной задачей. В статье представлены вопросы, с которыми столкнулась компания «Радиолайн» в процессе изготовления и настройки коллиматорного стенда с размером рефлектора 6 × 6 м.

Ц е л ь р а б о т ы – разработать технические принципы и инженерные оценки для успешного проектирования, изготовления, монтажа и настройки коллиматорных стендов с рефлекторами больших размеров.

Выбор геометрии рефлектора

В нашей стране вопросами разработки и конструирования коллиматорных измерительных стендов успешно занимались и внесли большой вклад Л.Д. Бахрах, А.П. Курочкин, Н.П. Балабуха [1–3]. Наибольшее распространение получили коллиматоры с зубцами [3]. Ввиду большого требуемого размера тихой зоны (3 м) было решено не использовать конструкцию с зубцами. Для минимизации продольного размера рефлектора коллиматора и, как следствие, размера БЭК был выбран рефлектор со скругленными кромками [4]. Дизайн рефлектора выполнялся на основе методики Гупта [5]. Ключевым параметром, который контролировался в процессе выбора оптимального дизайна, являлся радиус скругления кромок. Радиус влияет на производительность коллиматора на нижних частотах. Кроме того, от него во многом зависит толщина заготовок, которые необходимо приобрести. Чем ниже рабочая частота, тем больше радиус и толщина заготовки. Заготовки толщиной десятки сантиметров сложно найти в продаже. Поэтому радиус скругления кромок при низкой рабочей частоте выбирается на основе компромисса между радиотехническими характеристиками (РТХ) и технологичностью изделия.

В процессе проработки технологии изготовления оказалось, что ребра, которые по двум диагоналям проходят через всю поверхность рефлектора, нельзя делать острыми как в математической модели. Дело в том, что острые грани при выбранной технологии обработки резанием приводят к скачкам силуэтной кривой обрабатываемой поверхности, а также к тому, что силуэтная кривая начинает включать в себя часть внутренней образующей параметрической В-сплайн¹ [6] поверхности из математической модели, из-за чего поверхность в местах скачков обрабатывается программой автоматизированного управления станка (САМ-системой) неточно, с усложнением движения обрабатывающего инструмента.

Этой проблемы можно избежать, если изменять положение заготовки на станке. В случае обработки деталей для небольших коллиматоров это приемлемо. В случае работы с габаритными заготовками это либо оказывается невозможно, либо накладные расходы в виде необходимости изготовления более сложной технологической оснастки и времени на повторные наладочные операции на станке становятся существенными. Было принято решение скруглить острые ребра плавными поверхностями так, чтобы эти скругления стали касательными к поверхностям, лежащим по разные стороны от острых ребер (рис. 1). В результате силуэтная кривая стала гладкой линией без изломов и перестала включать в себя часть внутренней образующей В-сплайна. Радиотехнический расчет показал, что такое скругление ребер не привело к деградации РТХ коллиматора.

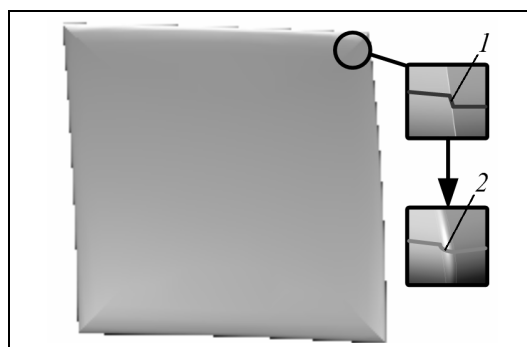


Рис. 1. Скругление ребер рефлектора коллиматора для повышения технологичности производства: 1 – силуэтная кривая со скачком на остром ребре; 2 – силуэтная кривая на ребре со скруглением

Fig. 1. Rounding of the collimator reflector edges to increase the manufacturability of production: 1 – silhouette curve with a jump on a sharp edge; 2 – silhouette curve on a rounded edge

¹ При трехосевой обработке заготовки на станке с ЧПУ граница обрабатываемой поверхности при закругленной форме рефлектора совпадает с силуэтной кривой этой поверхности. Силуэтная кривая является силуэтом параметрической поверхности рефлектора при взгляде из бесконечности по направлению оси фрезы.

Фокусное расстояние рефлектора выбиралось из баланса *четырёх факторов*: 1) энергетических характеристик; 2) неравномерности амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля; 3) требования к уровню кроссполяризации; 4) требования к уровню кривизны поверхности рефлектора.

С точки зрения последних трех факторов выгодно иметь длинный фокус, но с увеличением расстояния между облучателем и рефлектором ухудшается динамический диапазон системы. Короткий фокус приводит к увеличению опрокидывающего момента на стойку, к которой крепится рефлектор, из-за увеличения кривизны рефлектора и смещения его центра масс в направлении от стойки. Кроме этого, короткий фокус приводит к необходимости увеличения числа блоков, которые составляют поверхность рефлектора, так как кривизна поверхности влияет на толщину заготовки.

Изготовление рефлектора

Рефлектор (рис. 2, *в*) изготавливался из алюминиевого сплава. Качество металла, в частности, отсутствие пузырьков воздуха, которые могут вскрыться после механообработки, гарантировать невозможно. Наличие пустот от пузырьков на поверхности рефлектора напрямую влияет на неравномерность электромагнитного поля в тихой зоне. Углубление размером δ приводит к фазовой неравномерности 2δ . Если 2δ составляет 10° , то δ будет размером $0,014\lambda$. Тогда среднеквадратическая ошибка обработки поверхности рефлектора должна быть не хуже $0,02\lambda$ [7], где λ – длина волны. Сварка в местах пузырьков может привести к образованию трещин и деформации поверхности, поэтому было принято решение заполнять пустоты в металле краской с металлическими частицами в составе с последующей шлифовкой поверхности. Однако алюминиевые заготовки оказались хорошего качества и этой операции не потребовалось. Рефлектор коллиматора был разбит на 21 фрагмент. Число фрагментов выбиралось из соображений технологичности производства, доставки и монтажа. Разбиение рефлектора на фрагменты выполнялось таким образом, чтобы минимизировать число стыков в параболоиде, формирующем тихую зону.

Стойка рефлектора (рис. 2, *а*) представляет собой массивную ферменно-коробчатую конструкцию большой жесткости с достаточным числом перегородок. Внутри нее может находиться персонал для монтажа рефлектора. Жесткость стойки определяется массивностью фрагментов рефлектора. В процессе юстировки базовых точек, к которым крепится фрагмент рефлектора, в большей степени должен деформироваться фрагмент, а не стойка. Иначе при регулировке базовой точки недостаточная жесткость стойки собьет настройку соседних базовых точек. Стойка собрана на винтах и проклеена эпоксидным составом. Такой способ сборки позволяет избежать внутренних напряжений в металле, которые возникли бы при сварке. Часть стойки, к которой крепится рефлектор, выполнена из алюминиевого сплава, чтобы исключить возможные деформации поверхности рефлектора из-за разности коэффициентов термического расширения материалов стойки и рефлектора.

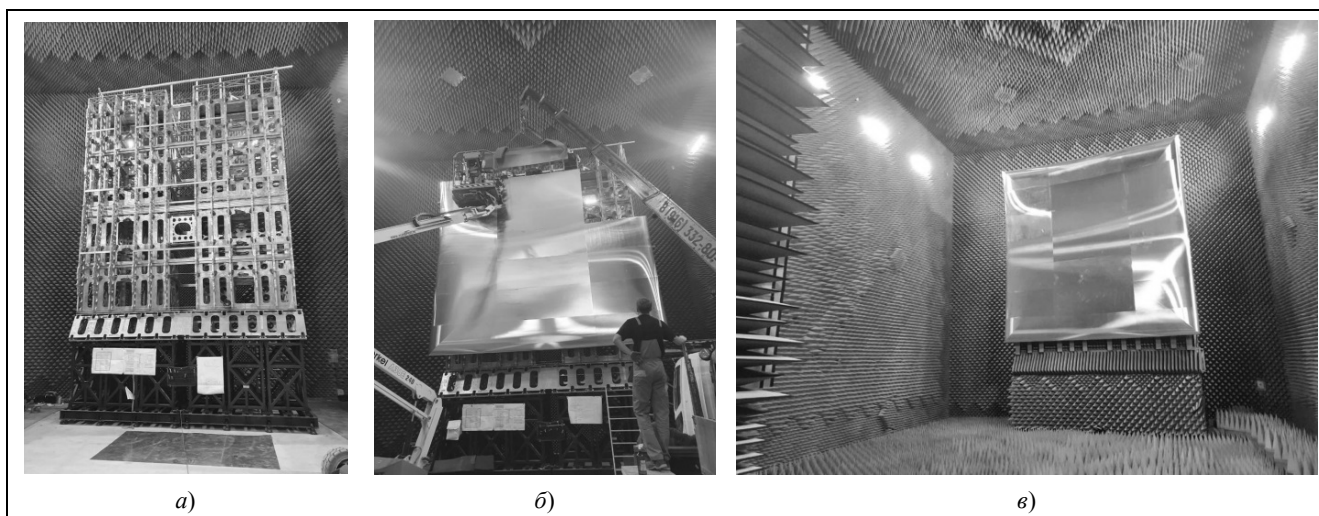


Рис. 2. Фото коллиматорного стенда: *а* – стойка для рефлектора коллиматора; *б* – рефлектор в процессе монтажа; *в* – коллиматорный стенд в сборе

Fig. 2. Photo of the collimator bench: *a* – rack for the collimator reflector; *b* – reflector during installation; *c* – collimator bench assembly

Юстировка и измерения коллиматора

Размещение фрагментов рефлектора на стойке (см. рис. 2, б) производилось в два этапа. На первом этапе выполнялась грубая установка всех блоков в свои посадочные места на базовые точки, оснащенные настроечными элементами. На втором этапе осуществлялась юстировка положения каждого фрагмента с контролем по лазерному трекеру. Жесткая конструкция стойки и наличие большого числа базовых точек позволили одновременно компенсировать погрешности изготовления фрагментов рефлектора, его гравитационное провисание, а также набегающую погрешность размеров рефлектора в размерных цепях, имеющих вследствие разбиения его на части.

Для настройки всего полотна рефлектора потребовалось несколько итераций. Результаты юстировки поверхности рефлектора в виде картограммы линейных отклонений и рассчитанных по ним значений среднеквадратических отклонений показаны на рис. 3. Среднеквадратическое отклонение точек всей видимой со стороны тихой зоны поверхности рефлектора составило $RMS = 0,027$ мм (рис. 3, а), параболической центральной части, которая формирует АФР в тихой зоне – $RMS = 0,022$ мм. Таким образом, применив инженерную оценку выше ($RMS = 0,02\lambda$ для фазовой ошибки в тихой зоне $\pm 10^\circ$), можно заключить, что рефлектор теоретически работоспособен вплоть до 200 ГГц.

Отладочные измерения коллиматора (рис. 4) проводились после заделки БЭЖ радиопоглощающим материалом (РПМ). Выбору РПМ и стратегии установки его в БЭЖ нужно уделять особое внимание, так как коллиматоры со скруглениями кромок рассеивают энергию в боковые стены, пол и потолок помещения активнее, чем коллиматоры с зубцами.

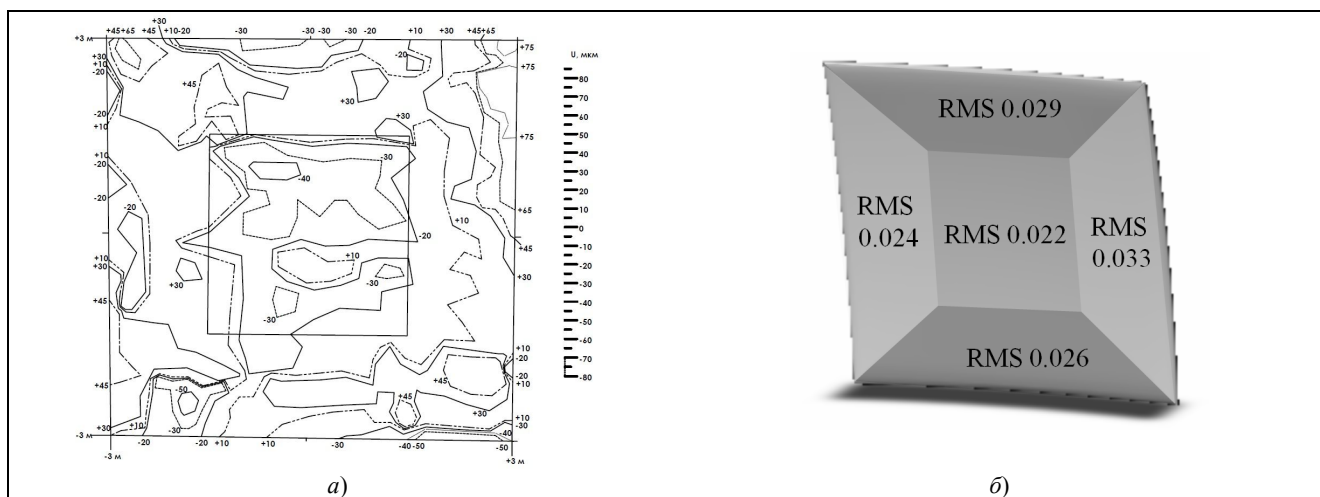


Рис. 3. Точность изготовления и юстировки поверхности рефлектора 6×6 м коллиматорного стенда: а – измеренные линейные отклонения поверхности рефлектора, мкм; б – среднеквадратические отклонения пяти секторов поверхности рефлектора, мм

Fig. 3. Accuracy of manufacturing and adjusting the reflector surface of 6×6 m for the collimator bench: а – measured linear deviations of the reflector surface, μm ; б – RMS of five sectors of the reflector surface, mm

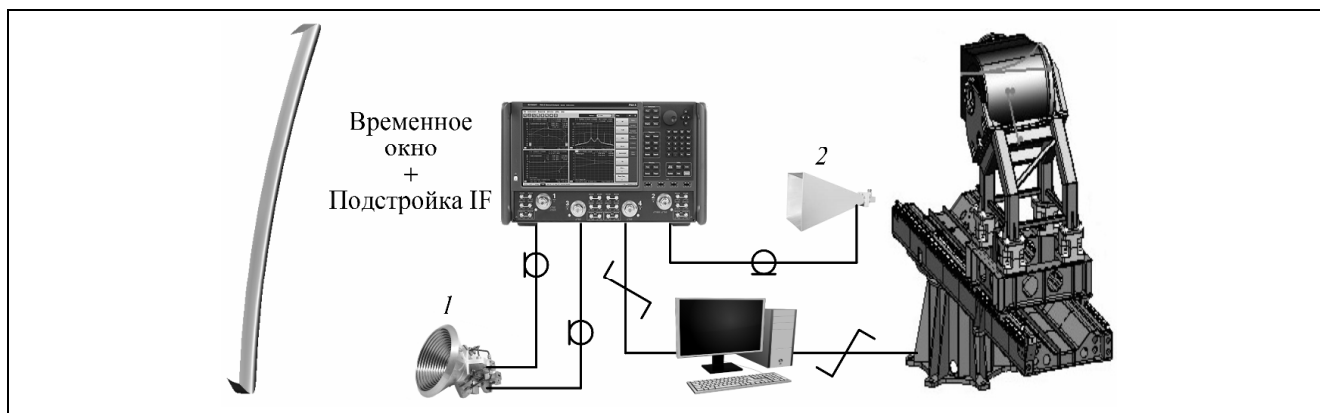


Рис. 4. Схема соединений оборудования при измерениях тихой зоны: 1 – облучатель; 2 – зонд

Fig. 4. Measurement configuration for the quiet zone test: 1 – feed; 2 – probe

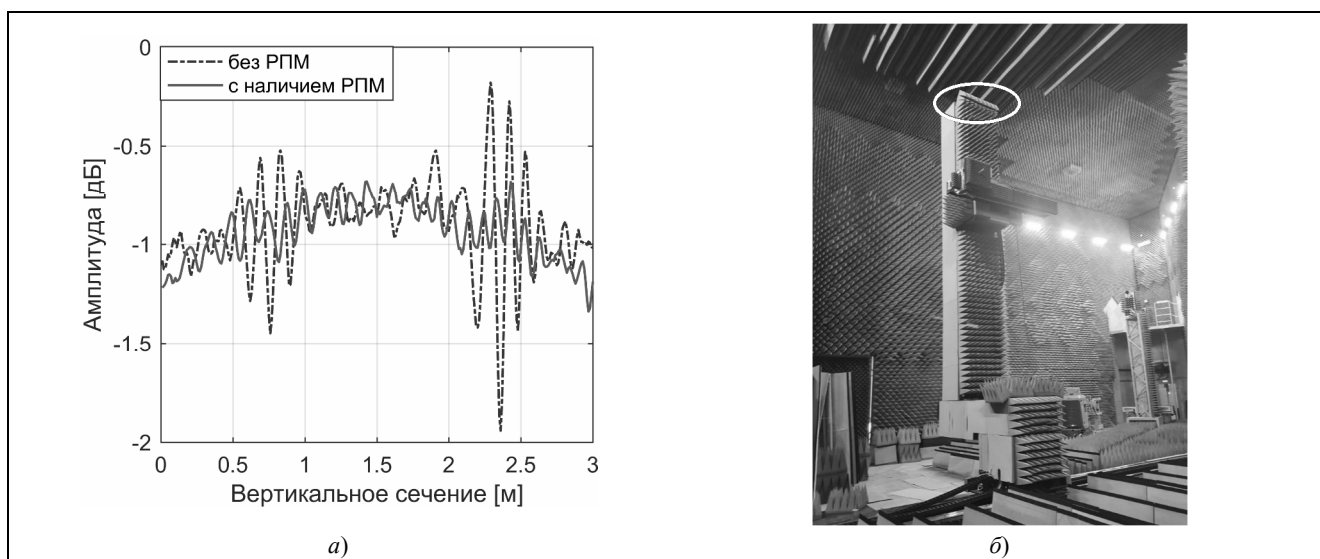


Рис. 5. Графическое представление влияния рассеяния поля на незакрытом РПМ участке башни слайдера на амплитудное распределение в тихой зоне на частоте 12,4 ГГц (а) и фото башни слайдера (б)

Fig. 5. Graphical representation of effect of field scattering because of the raw metal on the top of the slider tower on the amplitude distribution in a quiet zone at the frequency of 12,4 GHz (a) and photo of the slider tower (b)

В целях оценки производительности коллиматора без учета помеховой обстановки БЭК использовалось выделение контрольного сигнала во временной области с помощью оконной функции. Влияние шумов измерения минимизировалось при помощи подстройки значений полосы фильтра промежуточной частоты векторного анализатора цепей в каждом рабочем поддиапазоне. На основе полученных результатов измерений тихой зоны было отъюстировано положение слайдера, на котором устанавливалась измерительная антенна, а также угол наклона облучателя коллиматора. В качестве облучателей использовались сборки из гофрированных конических рупоров, соединенных с волноводными поляризационными селекторами. Облучатели разработаны компанией ООО «Радиолайн» специально для коллиматорных стендов, имеют низкий уровень кроссполаризации и кривизну амплитудной ДН меньше 1 дБ в секторе обзора тихой зоны рефлектора коллиматора. В начале процесса измерений верхушка башни слайдера (рис. 5, б) не была укрыта РПМ, происходило рассеяние поля на металлоконструкции башни, из-за чего при измерениях АФР были получены некорректные результаты. Проблема решилась после установки РПМ (рис. 5, а).

Для определения углового направления на источники дифракции использовалось приведение измеренного АФР к спектру плоских волн (PWS) [8]:

$$\mathbf{PWS}(k_x) = \int_{x=0}^L W(x)\mathbf{E}(x)e^{ixk_x} dx, \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{k_x}{k}\right),$$

где k_x – проекция волнового вектора на текущее сечение АФР; α – угол наблюдения; L – длина измеренного сечения АФР; $\mathbf{E}(x)$ – измеренное сечение АФР; $W(x)$ – оконная функция.

Графики измеренных сечений АФР по центру тихой зоны на трех частотах рабочего диапазона коллиматора показаны на рис. 6. В среднем по рабочему диапазону амплитудная неравномерность составила 1 дБ, фазовая – 10° . Также на рис. 6 представлены измеренные главные сечения амплитудной ДН пирамидального рупора и результаты моделирования этих сечений в программе электромагнитного анализа на одной из нижних частот рабочего диапазона (1,1 ГГц). Измеренные ДН соответствуют симуляциям.

Заключение

Коллиматорный измерительный стенд с размером тихой зоны 3×3 м был изготовлен и смонтирован во ФГУП ВНИИФТРИ. Стенд состоит из рефлектора с закругленными кромками, стойки рефлектора, слайдера для перемещений измеряемого изделия в тихой зоне, набора двухполяризационных облучателей и позиционера для них. Отклонения поверхности рефлектора коллиматора от трехмерной модели лежат в допустимых пределах и подтверждают правильность использованных технических решений. Результаты измерений АФР в тихой зоне удовлетворяют требованиям технического задания.

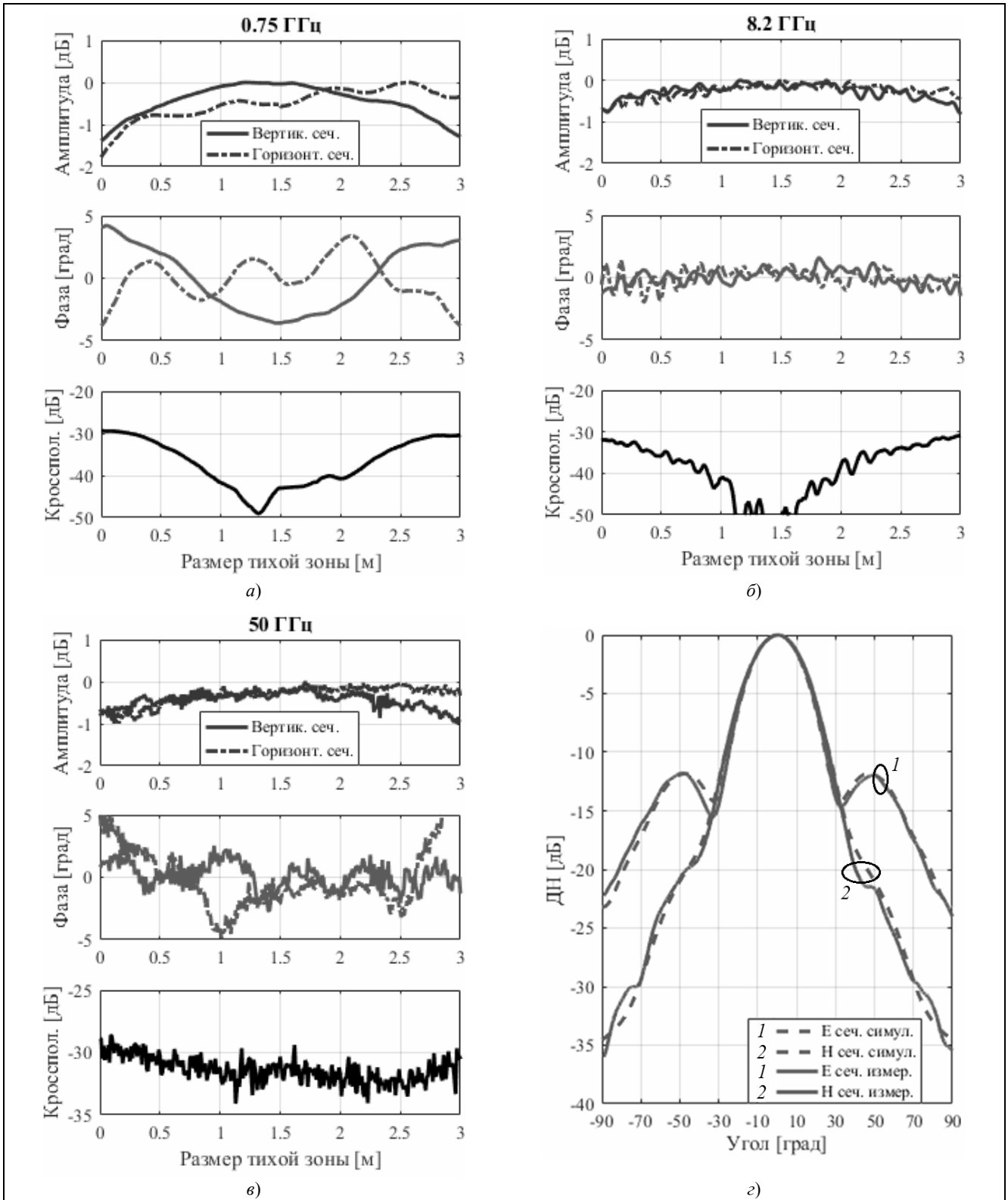


Рис. 6. Графическое представление результатов измерения: *a–в* – измеренные сечения АФР в центре тихой зоны коллиматора; *г* – измеренные на коллиматорном стенде главные сечения амплитудной ДН пирамидального рупора в сравнении с результатами моделирования на частоте 1,1 ГГц

Fig. 6. Graphical representation of the measured results: *a–c* – measured electromagnetic field distribution in the center of the collimator quiet zone; *d* – measured *E*- and *H*-cuts of the amplitude directional pattern of the pyramidal horn in comparison with the simulation results at a frequency of 1,1 GHz

Список источников

1. Бахрах Л.Д., Курочкин А.П. Голография в микроволновой технике. М.: Сов. радио. 1979.
2. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Курочкин А.П., Усин В.А., Шифрин Я.С. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука. 1985.
3. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука. 2007. С. 51.
4. Teh-Hong Lee, Burnside W.D. Performance trade-off between serrated edge and blended rolled edge compact range reflectors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. V. 44. № 1. С. 87–96.
5. Gupta I.J., Ericksen K.P., Burnside W.D. A method to design blended rolled edges for compact range reflectors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1990. V. 38. № 6. P. 853–861.
6. Rogers D.F., Adams J.A. Mathematical elements for computer graphics. London: McGraw-Hill Publishing Company. 1989. P. 467–471.
7. Parini C., Gregson S., McCormick J., van Rensburg J.D. Theory and practice of modern antenna range measurements. London: The Institution of Engineering and Technology. 2015. P. 97.
8. Liu X., Quan S. Spatial and angular domain simulation of the feed spillover in compact antenna test range // 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). IEEE. 2010. P. 159–162.
9. Бей Н.А., Митрохин В.Н., Парщиков А.А., Ямашкин В.П. Антенный полигон с зеркальным коллиматором // Антенны. 2006. № 7. С. 83–84.
10. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактный полигон для измерения рассеивающих свойств объектов и параметров антенн. Измерительное оборудование // Антенны. 2008. № 6. С. 59–67.

Информация об авторах

Егор Валерьевич Коротецкий – руководитель исследовательского отдела

SPIN-код: не представлен

Илья Юрьевич Тамарис – гл. конструктор

SPIN-код: не представлен

Поступила в редакцию 04.10.2022

Одобрена после рецензирования 13.12.2022

Принята к публикации 20.01.2023

ЖУРНАЛ «НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ: РАЗРАБОТКА, ПРИМЕНЕНИЕ»

Главный редактор: член-корреспондент РАН, профессор **Вадим Анатольевич Шахнов**

Международный научно-технический журнал, освещающий вопросы разработки и применения перспективных интеллектуальных систем и технологий.



Включен в Перечень ВАК

Издается с 1999 г.

ISSN 1999-8554

Периодичность – 6 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83825

Научные специальности ВАК

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
- 2.3.8 Информатика и информационные процессы
- 3.3.7. Авиационная, космическая и морская медицина
- 3.3.9. Медицинская информатика
- 5.7.6. Философия науки и техники

Информацию о журналах можно найти на сайте Издательства «Радиотехника».

Издательство «Радиотехника»:

107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,

тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru

Original article

Design and measurements of 6 x 6 m collimator reflector with rounded edges

E. V. Korotetskiy¹, I. Yu. Tamaris²

^{1, 2} LLC "RadiolLine" (Moscow, Russia)

¹ ek@radiorf.ru

Abstract

Compact antenna test range (CATR) is designed to form a plane wave at a small distance from the aperture of the collimator reflector, which allows measurements to be made under far field conditions in a compact anechoic chamber. Currently, collimators are in demand due to the technical re-equipment of the industry for the production of 4G, 5G and Internet of Things stuff. The typical size of a quiet zone for these needs is 1–1.5 m. Along with antenna pattern measurements, collimators are widely used for RCS measurements. In the latter case, the measured objects may have dimensions several times larger than the average size of the quiet zone. Manufacturing, installation and adjustment of collimator reflector of several meters in size is a non-trivial task that requires separate study for each project. An incorrect choice of the reflector geometry can lead to an increase in mass and size, which entails an increase in production costs and the anechoic chamber designed for the CATR. In addition, increase in mass imposes additional requirements on the rigidity of the rack to which the reflector is attached, and the foundation under the collimator. As a rule, large-sized reflectors consist of a dozen fragments, which leads to the need to have special adjustment mechanisms for precision tuning of the reflector fragments. These and other problems need to be solved when developing large CATR. The article presents the issues faced by the LLC «RadiolLine» in the process of manufacturing and setting up a collimator stand with a 6 x 6 m reflector. The issues of choosing the geometry of the reflector, its focal length have been highlighted. It has been shown how the agreement of the results of three-dimensional modeling of the reflector and production capabilities has been carried out. The features of the design of the reflector rack are touched upon, in particular, the appropriateness of using two materials: one for the base, and the second for the truss, which is connected to the reflector. After discussing the design features, a scheme for measuring the electromagnetic field distribution in a quiet zone, approaches to improving the quality of the RF characteristics of the CATR have been presented. It is noted that in the process of setting up the collimator, in order to determine the directions to the sources of diffraction, it is useful to apply the recalculation of the measured electromagnetic field in the quiet zone into the plane wave spectrum. At the end of the article, quiet zone cuts have been shown at frequencies of 0.75 GHz, 8.2 GHz and 50 GHz. Average peak-to-peak ripple of the amplitude-phase distribution in the operating frequency range of the CATR is 1 dB in amplitude and 10 degrees in phase.

Keywords

Collimator, design, quiet zone, antenna measurements, plane wave spectrum

For citation

Korotetskiy E.V., Tamaris I.Yu. Design and measurements of 6 x 6 m collimator reflector with rounded edges. Antennas. 2023. № 1. P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202301-05> (in Russian)

References

1. *Bakhrakh L.D., Kurochkin A.P. Golografiya v mikrovolnovoj tekhnike. M.: Sov. radio. 1979. (in Russian)*
2. *Bakhrakh L.D., Kremenetskij S.D., Kurochkin A.P., Usin V.A., Shifrin Ya.S. Metody izmerenij parametrov izluchayushchikh sistem v blizhnej zone. L.: Nauka. 1985. (in Russian)*
3. *Balabukha N.P., Zubov A.C., Solosin B.C. Kompaktnye poligony dlya izmereniya kharakteristik rasseyaniya ob'ektov. M.: Nauka. 2007. S. 51. (in Russian)*
4. *Teh-Hong Lee, Burnside W.D. Performance trade-off between serrated edge and blended rolled edge compact range reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. V. 44. № 1. S. 87–96.*
5. *Gupta I.J., Ericksen K.P., Burnside W.D. A method to design blended rolled edges for compact range reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1990. V. 38. № 6. P. 853–861.*
6. *Rogers D.F., Adams J.A. Mathematical elements for computer graphics. London: McGraw-Hill Publishing Company. 1989. P. 467–471.*
7. *Parini C., Gregson S., McCormick J., van Rensburg J.D. Theory and practice of modern antenna range measurements. London: The Institution of Engineering and Technology. 2015. P. 97.*
8. *Liu X., Quan S. Spatial and angular domain simulation of the feed spillover in compact antenna test range. 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). IEEE. 2010. P. 159–162.*
9. *Bej N.A., Mitrokhin V.N., Parshchikov A.A., Yamashkin V.P. Antennnyj poligon s zerkal'nym kollimatorom. Antenny. 2006. № 7. S. 83–84. (in Russian)*
10. *Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin V.S. Kompaktnyj poligon dlya izmereniya rasseivayushchikh svoystv ob'ektov i parametrov antenn. Izmeritel'noe oborudovanie. Antenny. 2008. № 6. S. 59–67. (in Russian)*

Information about the authors

Egor V. Korotetskiy – Head of R&D Department

Ilya Yu. Tamaris – Chief Designer

The article was submitted 04.10.2022

Approved after reviewing 13.12.2022

Accepted for publication 20.01.2023