

## Литература

1. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени обратного восстановления : ГОСТ 18986.8-73. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1998.
2. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени выключения : ГОСТ 18986.5-73. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1998.

3. Приборы полупроводниковые силовые, методы измерений и испытаний : ГОСТ 24461-80. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1990.
4. Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров : ГОСТ 19095-73. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1983.
5. Test methods for semiconductor devices, MIL-STD-750E [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.everyspec.com/> – Дата доступа 10.03.2021.

УДК 621.396

## РАЗРАБОТКА АНТЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ РАДИОКОЛЛИМАТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ Малай И.М., Титаренко А.В., Озеров М.А.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт  
физикотехнических и радиотехнических измерений»

г.п. Менделеево, Солнечногорск, Московская область, Российская Федерация

**Аннотация.** Одним из этапов создания радиотехнических систем является подтверждение задаваемых при проектировании характеристик используемых антенных систем или параметров штатной работы в режиме излучения и приема сигналов. Для решения этих задач необходимо использование антенных измерительных комплексов. Примером одного из наиболее универсальных решений для испытаний сложных радиотехнических систем являются измерительные комплексы на основе радиоколлиматоров. Такие комплексы, несмотря на известные достоинства, имеют ряд функциональных и технических ограничений. В работе изложены результаты исследований особенностей радиоколлиматорных систем, оказывающих ключевое влияние на их метрологические характеристики.

**Ключевые слова:** антенна, измерения, радиоколлиматор.

## DEVELOPMENT OF AN COMPACT RANGE FACILITY FOR RADIOELECTRONIC SYSTEMS TESTING

Malay I., Titarenko A., Ozerov M.

Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radioengineering»  
Solnechnogorsk city, Moscow region, Russian Federation

**Abstract.** One of the stages in the development of radio electronic systems is the confirmation of the characteristics of the antenna systems used during the design. It is necessary to use antenna measuring systems to solve these problems. An example of one of the most versatile solutions for radio electronic systems testing is a compact range. The paper presents the results of studies of the features of compact range systems that have a key effect on their accuracy.

**Key words:** antenna, compact range, measurements.

Адрес для переписки: Титаренко А.В., г.п. Менделеево, Солнечногорск 141570, Московская область, Российская Федерация  
e-mail: [titarenko@vniiftri.ru](mailto:titarenko@vniiftri.ru)

**Введение.** Одним из наиболее универсальных и эффективных типов антенных измерительных комплексов являются комплексы на основе радиоколлиматоров (компактные полигоны). Компактных полигонов в настоящее время насчитывается свыше сотни в мире и около десятка в Российской Федерации. Однако их теоретические и экспериментальные характеристики никем не афишируются. Единственным источником информации служат данные, предоставляемые производителями и публикуемые в научных статьях.

При проектировании радиоколлиматорного комплекса ФГУП «ВНИИФТРИ» решалась задача создания прецизионного инструмента для

антенных измерений обладающего широкими функциональными возможностями.

**Задачи проектирования.** Хотя известны примеры использования радиоколлиматоров на основе диэлектрических линз, наибольшее распространение получили радиоколлиматоры на основе металлических зеркал следующих видов:

- однозеркальные со скругленными краями;
- однозеркальные с зубчатыми краями;
- двухзеркальные с зубчатыми краями.

Все они отличаются только видом используемых коллиматорных зеркал. Характеристики радиоколлиматоров оцениваются по равномерности амплитудного-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля в рабочей зоне и уровню

кроссполяризации. Зеркало со скругленными краями при прочих равных позволяет получить более однородное поле в рабочей зоне, что приводит к меньшим погрешностям измерений [1]. К сожалению, его технология его изготовления сложнее, что обуславливает существенно большую стоимость в сравнении с аналогичным зеркалом с зубчатыми краями. Зеркала с зубчатыми краями проще в изготовлении, но обеспечивают несколько худшие характеристики.

Эксплуатируемые в настоящее время в России коллиматорные комплексы используют в своем составе зеркала с зубчатыми краями и характеризуются достаточно высоким уровнем точностных характеристик. Большинство из них обеспечивает размеры рабочей зоны  $\varnothing 1,8\text{--}2,4$  м. Задачей проектирования было создание комплекса, претендующего на роль «эталонного».

**Результаты проектирования.** В качестве основы создаваемого измерительного комплекса было выбрано был выбран радиоколлиматор, имеющий зеркало со скругленными краями (рис. 1) и обеспечивающий рабочую зону  $\varnothing 3$  м при габаритах вырезки  $6\times 6$  м. Зеркало имеет боковую схему облучения и фокусное расстояние 9,7 м. По результатам оптических измерений СКО отклонения профиля зеркала от заданного составило 30 мкм. Размеры специально спроектированной безэховой камеры соответствуют удвоенным габаритам зеркала. Совокупность указанных факторов обусловила хорошие параметры однородности поля в рабочей зоне.

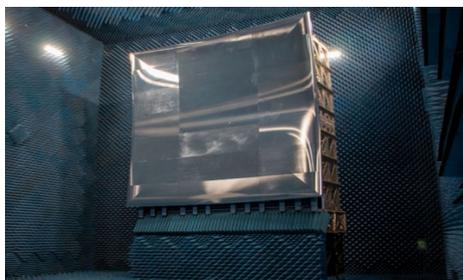
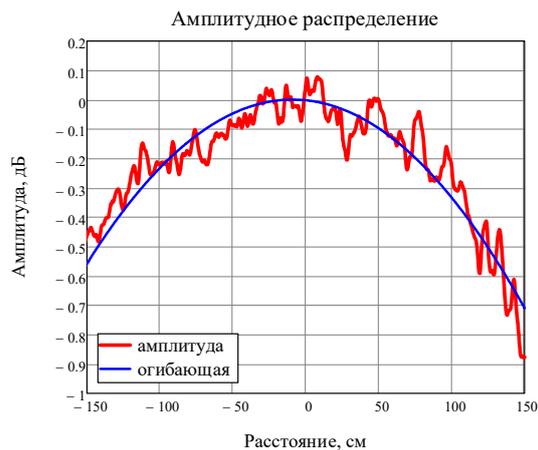


Рисунок 1 – Зеркало радиоколлиматора со скругленными краями

Результаты измерений АФР в рабочей зоне начиная с S-диапазона можно обобщить следующим образом:

- полная неравномерность амплитуды не более 1,0 дБ, амплитуда огибающей 0,6–0,8 дБ;
- амплитуда неравномерности фазы (без учета единичных отклонений)  $1^\circ/10$  ГГц свыше 10 ГГц и не более  $2^\circ$  до 10 ГГц.
- уровень кроссполяризации не хуже минус 28 дБ.

Пример АФР представлен на рис. 2. Стоит отметить, что измерения АФР проведены с использованием в качестве зондовой антенны открытого конца волновода, что исключает возможность намеренного завышения полученных характеристик.



а



б

а – амплитудное распределение;  
б – фазовое распределение

Рисунок 2 – Вертикальное сечение АФР на частоте 10 ГГц

Для оценки интегральных характеристик погрешностей измерений используется обобщенный критерий – эквивалентный уровень помех (ЭУП) [2]. Для оценки ЭУП исходя из полученных характеристик равномерности поля в рабочей зоне применяется Фурье-анализ [3]. На рис. 3 представлены результаты расчета ЭУП, полученные при моделировании на основе ранее представленных результатов. В качестве модели апертуры использовано распределение типа «косинус на пьедестале», размер пьедестала равен 0,5. Как видно, даже в створе зеркала радиоколлиматора ЭУП составляет около минус 50 дБ, что обуславливает превосходные точностные характеристики.

Радиоколлиматоры с зубчатыми краями имеют хоть и не лучшие, но сопоставимые значения неравномерности поля по амплитуде и примерно вдвое худшие по фазе. Наихудшие значения ЭУП составляют порядка минус 40 дБ. Однако, как уже было отмечено, серьезное влияние

на результаты измерений АФР оказывают направленные свойства антенны-зонда. И использование в качестве зондов широкополосных антенн с КНД порядка 9–13 дБ приводит к сглаживанию вариаций поля по сравнению с открытым концом волновода, имеющим КНД около 6–8 дБ.

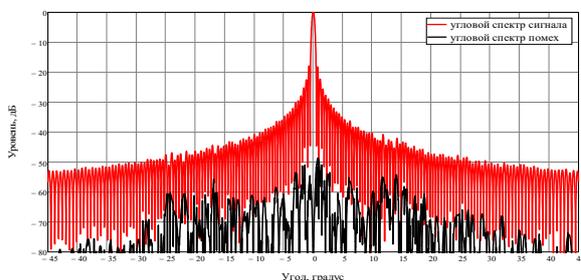


Рисунок 3 – Угловое распределение помех в вертикальное плоскости на частоте 10 ГГц

**Выводы.** Реализованная схема антенного измерительного комплекса на основе радиоколлиматора с зеркалом со скругленными краями обес-

печивает превосходство по величине ЭУП порядка 10 дБ над имеющимися аналогами с зубчатыми краями. Достигнутые характеристики позволяют использовать комплекс при выполнении измерений, требующих высокую точность или же в качестве эталонного компаратора при измерениях радиотехнических характеристик апертурных антенн.

#### Литература

1. Lee, T.-H. Performance Tradeoff Between Rolled and Serrated Edge / Teh-Hong Lee; W. D. Burnside // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – Vol. 44, № 1.
2. Озеро, М. А. Многомерная пространственная фильтрация для повышения точности измерений электродинамических характеристик излучения антенн / М. А. Озеров, А. В. Титаренко // Измерительная техника. – 2021. – № 11. – С. 46–54.
3. Wayne, D. Effects of a Non-Ideal Plane Wave on Compact Range Measurements / D. Wayne, J. Fordham, J. McKenna // Antenna Measurements Techniques Association 2014 Proceedings. – 2014.

УДК 681.586.2

### АНАЛИЗ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Абгарян Ж.С., Дулуб Я.В., Лихошерст В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены два способа создания первичных колебаний волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором. Проведены экспериментальные исследования и анализ достоинств и недостатков обоих способов с позиции построения датчика угловой скорости для систем ориентации или стабилизации.

**Ключевые слова:** резонанс, автоколебания, собственная частота, гироскоп.

### ANALYSIS OF WAYS TO CREATE PRIMARY OSCILLATIONS IN A METAL RESONATOR

Abgaryan Zh., Dulub Ya., Likhosherst V.

Tula State University  
Tula, Russian Federation

**Abstract.** Two methods of creating primary oscillations of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator are considered. Experimental studies and analysis of the advantages and disadvantages of both methods have been carried out from the position of constructing an angular velocity sensor for orientation or stabilization systems.

**Key words:** resonance, self-oscillation, natural frequency, gyroscope.

Адрес для переписки: Лихошерст В.В., пр. Ленина, 95, Тульский государственный университет, ЛИДПИ СОиН, Тула 300012, Российская Федерация  
e-mail: lvy\_01@inbox.ru

Выбор способа создания первичных колебаний является первоочередной задачей с которой сталкиваются разработчики при проектировании волнового твердотельного гироскопа (ВТГ), в частности с металлическим цилиндрическим резонатором [1]. Принцип работы гироскопов такого типа известен довольно давно [2], при этом одним из основных требований обеспечения функционирования гироскопа является создание

и поддержание колебаний на резонансной частоте. На сегодняшний день широко используются два способа: создание вынужденных колебаний на резонансной частоте и построение автоколебательного контура [1]. В упрощенном виде структурные схемы контуров приведены на рис. 1.

На рис. 1, а приведена структурная схема контура поддержания колебаний на резонансной частоте. Работа контура реализуется следующим