

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА КОЛЛИМАТОРА МАРК-12 НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

Балабуха Н.П.¹, Булычев Е.В. *¹, Зубов А.С.¹, Меньших Н.Л.¹, Солосин В.С.¹,
Федоров С.А.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 21.07.2023
Одобрена после рецензирования 28.07.2023
Принята к публикации 31.07.2023

Аннотация

В работе представлен анализ влияния отклонения отражающей поверхности зеркала коллиматора от теоретической на неравномерность распределения поля в рабочей зоне. На основе проведенных подробных исследований состояния поверхности зеркала коллиматора МАРК-12, расположенного в ИТПЭ РАН, разработана компьютерная модель данного зеркала. Проведены расчеты неравномерности распределения поля в рабочей зоне коллиматора для существующей и теоретической поверхности зеркала с использованием метода физической оптики. Определены вклады плавно меняющейся (влияние диаграммы направленности облучателя) и быстро меняющейся составляющих в неравномерность распределения поля в рабочей зоне.

Ключевые слова: компактный полигон, зеркальный коллиматор, рабочая зона, распределение поля, среднеквадратичная ошибка

EDN LHSGFW

DOI: 10.24412/2949-0553-2023-35-23-29

Введение

Зеркальные коллиматоры используются в радиофизических измерениях уже более полувека [1]. Зеркало коллиматора — это основная часть компактного полигона [2], позволяющая сформировать в некоторой области пространства распределение поля с допустимой неравномерностью распределения амплитуды и фазы. Компактный полигон предназначен для измерения характеристик рассеяния объектов и радиотехнических параметров излучения антенн с высокой точностью и в более благоприятных условиях [3], чем открытый полигон.

При проектировании зеркального коллиматора большое внимание уделяется кромкам зеркала [2]. Дифракционные эффекты на краях зеркала существенно влияют на неравномерность распределения поля в рабочей зоне в низкочастотной части рабочего диапазона. Существуют два основных способа уменьшения этого влияния: выполнение кромок зеркала в виде зубцов [4] или в виде отогнутых краев с обратной кривизной поверхности [5]. Оба подхода хорошо себя зарекомендовали [6].

Однако, с ростом частоты влияние кромок зеркала на неравномерность распределения амплитуды и фазы поля уменьшается [2, 6, 7]. Нижняя рабочая частота компактного полигона определяется размером зубцов или радиусом скруглений на краях зеркала. Верхняя рабочая частота ограничивается точностью изготовления поверхности реального зеркала, то есть тем, насколько она отличается от теоретической (параболоид вращения). В дальнейшем будем называть идеальностью поверхности отличие отражающей поверхности реального зеркала от теоретического.

Считается [3], что для получения приемлемых значений неравномерности поля в рабочей зоне отклонение поверхности зеркала от теоретической не должно превышать $\lambda/100$, где λ — рабочая длина самой короткой волны в рабочем диапазоне частот. Данное значение является оценочным. В

* Автор, ответственный за переписку: Егор Викторович Булычев, egor_itae@mail.ru

литературе подробные исследования поверхности зеркала коллиматора практически не освещаются, потому недостаточно информации о связи точности изготовления поверхности с неравномерностью распределения поля в компактном полигоне.

В данной работе представлены исследования влияния точности изготовления поверхности зеркала коллиматора на неравномерность распределения амплитуды и фазы поля в рабочей зоне коллиматора. Определены эффекты, связанные с влиянием облучателя. Выделены быстро меняющиеся составляющие неравномерности амплитуды поля, связанные с точностью изготовления поверхности зеркала коллиматора в различных диапазонах частот.

Зеркало коллиматора МАРК-12

Зеркало коллиматора МАРК-12 представляет собой несимметричную вырезку параболоида вращения с фокусным расстоянием 12 м (рисунок 1). Размер зеркала составляет около 11,6 x 13,8 м. Края зеркала коллиматора выполнены в виде зубцов длиной примерно 1,5 м и шириной - 1,2 м. Зубцы расположены по всему контуру зеркала и составляют вместе звездообразную кромку [8, 9]. Рабочий диапазон частот коллиматора от 0,8 ГГц до 40,0 ГГц. Рабочая зона представляет собой горизонтально расположенный цилиндр диаметром 6 м и длиной 10 м.

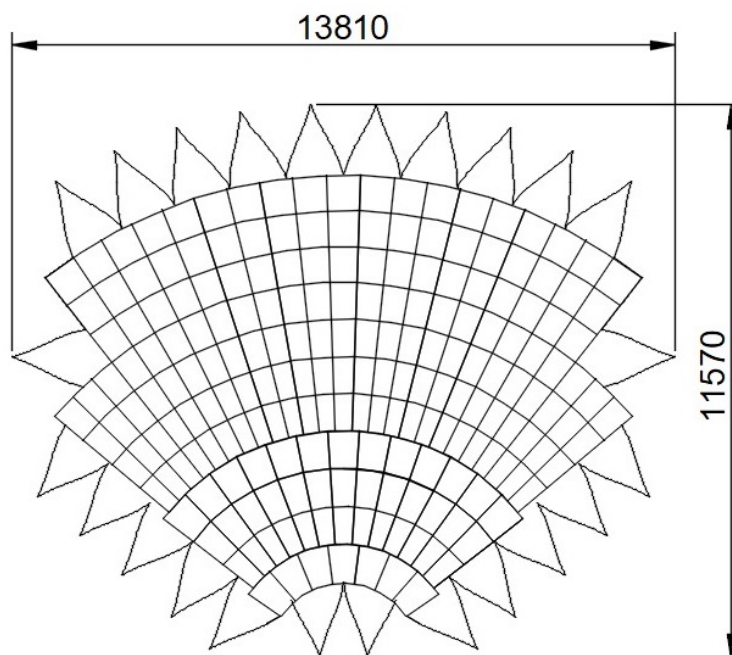


Рисунок 1 – Внешний вид зеркала коллиматора МАРК-12

Зеркало коллиматора МАРК-12 состоит из 203 прецизионных щитов. Неидеальность поверхности зеркала связана как с точностью изготовления щитов, так и с юстировкой щитов при настройке зеркала коллиматора. Целью юстировки зеркала является минимизация отклонения его поверхности от теоретической.

В рамках модернизации автоматизированного измерительного комплекса – компактного полигона - проведено расширение частотного диапазона измерений характеристик рассеяния объектов до 40,0 ГГц. В связи с этим потребовалась дополнительная юстировка поверхности зеркала коллиматора. Максимальные отклонения поверхности зеркала от теоретической должны быть не более 0,075 мм. Принято [2] состояние поверхности зеркала оценивать по значению среднеквадратичного отклонения (СКО). При нормальном законе распределения отклонений по доверительному интервалу 95% получаем, что максимальное значение СКО для щитов центральной зоны зеркала (проекция рабочей зоны на поверхность зеркала) должно составлять не более 0,038 мм.

Для измерения точности изготовления поверхности зеркала и его юстировки было разработано специализированное программное обеспечение для работы с лазерным трекером FARO Ion Xi. В результате юстировки для щитов центральной зоны СКО реальной поверхности зеркала составило 0,032 мм по доверительному интервалу 95%.

Проводилась юстировка не только щитов центральной зоны, но и практически всех щитов коллиматора за исключением четырех наиболее труднодоступных для настройки (по два крайних щита

в 8 и в 11 рядах). Таким образом, в результате работ по юстировке зеркала была получена подробная карта поверхности зеркала коллиматора МАРК-12. Наличие такой карты позволяет провести оценку вклада неидеальности поверхности зеркала коллиматора МАРК-12 в неравномерность распределения поля в рабочей зоне.

Поверхность зеркала коллиматора МАРК-12 и методы расчета распределения поля в его рабочей зоне

Для оценки влияния неидеальности поверхности зеркала коллиматора была разработана компьютерная модель поверхности. Основная часть зеркала коллиматора построена по точкам, полученным в результате сканирования поверхности зеркала. Массив данных содержит свыше 12 тысяч точек. В компьютерной модели фрагменты зеркала коллиматора, которые не были отсканированы с помощью лазерного трекера, являлись частью теоретической параболической поверхности.

На рисунке 2а представлена модель реального зеркала. Измеренные отклонения поверхности зеркала коллиматора МАРК-12 от теоретической показаны на рисунке 2б.

Оценка влияния точности изготовления поверхности зеркала может быть выполнена путем сравнения распределения поля в рабочей зоне моделей реального и теоретического зеркал, размещенных в свободном пространстве. Экспериментальным путем оценить влияние неидеальности невозможно, потому что всегда есть несоответствия полученной кромки зеркала и аналитической, есть влияние безэховой камеры, которая не может полностью поглотить помеховые сигналы.

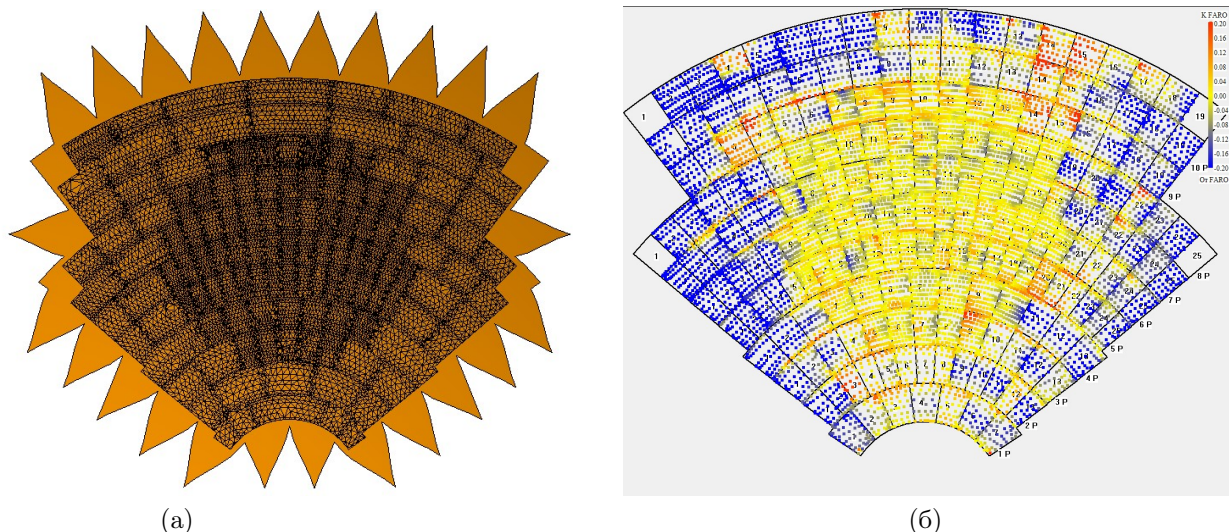


Рисунок 2 – Схематическое представление а) компьютерной модели и б) отклонения поверхности зеркала от теоретической

Расчет распределения поля в рабочей зоне коллиматора проводился в программе ФЕКО методом физической оптики. Метод физической оптики в данном случае дает результат близкий к точному в силу того, что размер зеркала составляет сотни длин волн. Компьютерная модель поверхности зеркала коллиматора представлена в формате, пригодном для импортирования в программу ФЕКО.

В качестве источника излучения использовался конический рупорный облучатель. Облучатель запитывался одномодовым волноводом, рассчитывалась его диаграмма направленности в передней полусфере. В фокус зеркала помещался уже не сам облучатель, а точечный источник с рассчитанной диаграммой направленности. Таким образом исключалось попадание излучения из облучателя в рабочую зону напрямую (без зеркала) и влияние переотражений между облучателем и зеркалом коллиматора на распределение поля в рабочей зоне.

Результаты расчета поля в рабочей зоне

Ниже представлены результаты расчета распределения поля в рабочей зоне моделей теоретического и реального коллиматоров МАРК-12 при вертикальной поляризации падающей волны.

При частоте излучения 3 ГГц (длина волны 10 см) неровности зеркала не влияют на распределение поля, что видно из представленных на рисунке 3 результатов расчета. Картины поля для теоретического

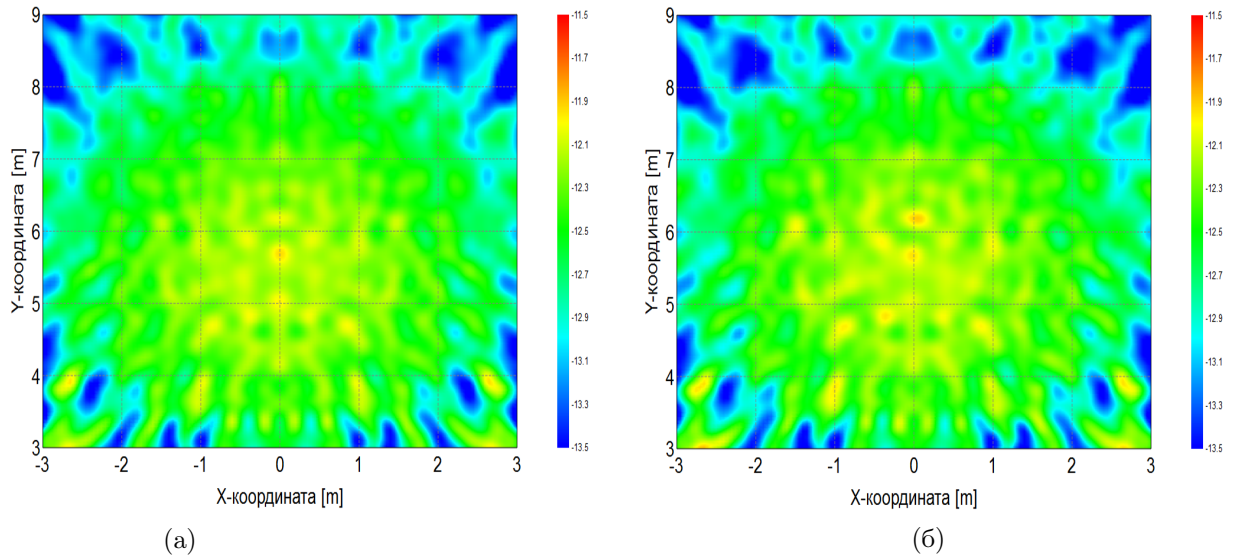


Рисунок 3 – Распределение амплитуды поля в центре рабочей зоны а) теоретического и б) реального коллиматора МАРК-12 при частоте 3 ГГц

и реального зеркала отличаются мало, неравномерность распределения амплитуды поля определяется именно формой кромок зеркала, а не состоянием его поверхности.

С ростом частоты излучения влияние неровностей поверхности становится ощутимым. Так на частотах 10 ГГц и 15 ГГц двумерные картины поля для теоретического и реального зеркал уже отличаются визуально (рисунки 4 и 5, соответственно). На этих частотах влияние кромок зеркала уже заметно снижается, и неравномерность поля определяется в большей степени именно неидеальностью поверхности зеркала.

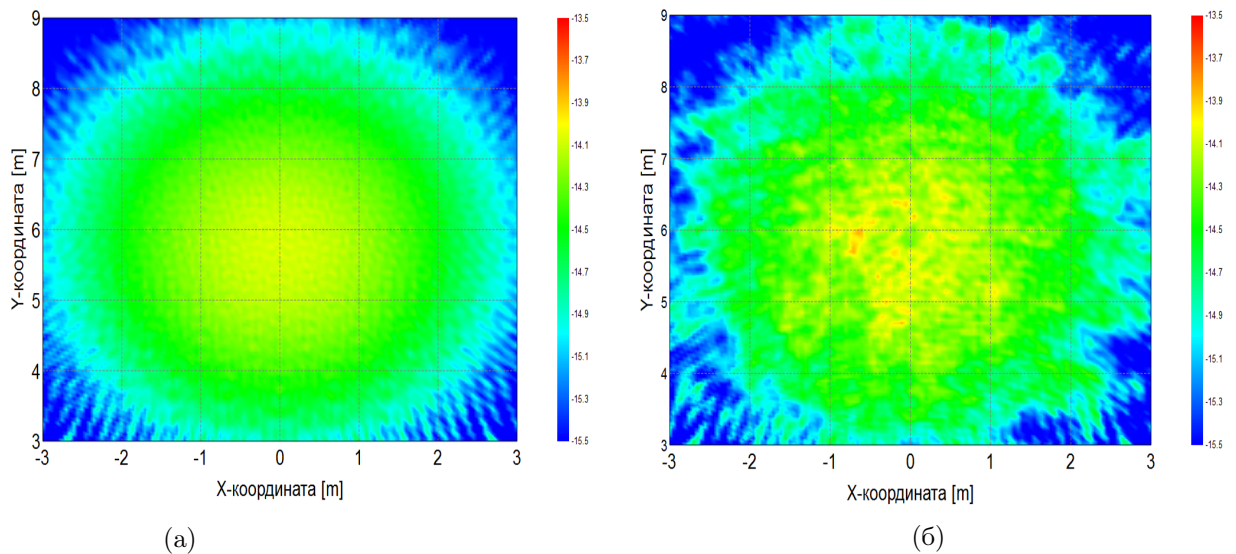


Рисунок 4 – Распределение амплитуды поля в центре рабочей зоны а) теоретического и б) реального коллиматора МАРК-12 при частоте 10 ГГц

На графиках на рисунке 6 приведены для количественного сравнения зависимости распределения амплитуды и фазы поля в горизонтальном сечении, проходящем через центр рабочей зоны, для теоретического (синяя кривая) и реального (красная кривая) коллиматоров при частоте 10 ГГц.

Как видно из графиков, колебания поля в рабочей зоне реального зеркала носят несколько хаотический вид, причем амплитуда колебаний незначительно ($0,2$ дБ по амплитуде и 1^0 по фазе) отличается от колебаний поля в рабочей зоне теоретического зеркала. Это указывает на хорошо выполненную юстировку зеркала и соответствует критерию $\lambda/100$ для точности поверхности зеркала коллиматора.

Можно выделить влияние облучателя на неравномерность распределения поля в рабочей зоне.

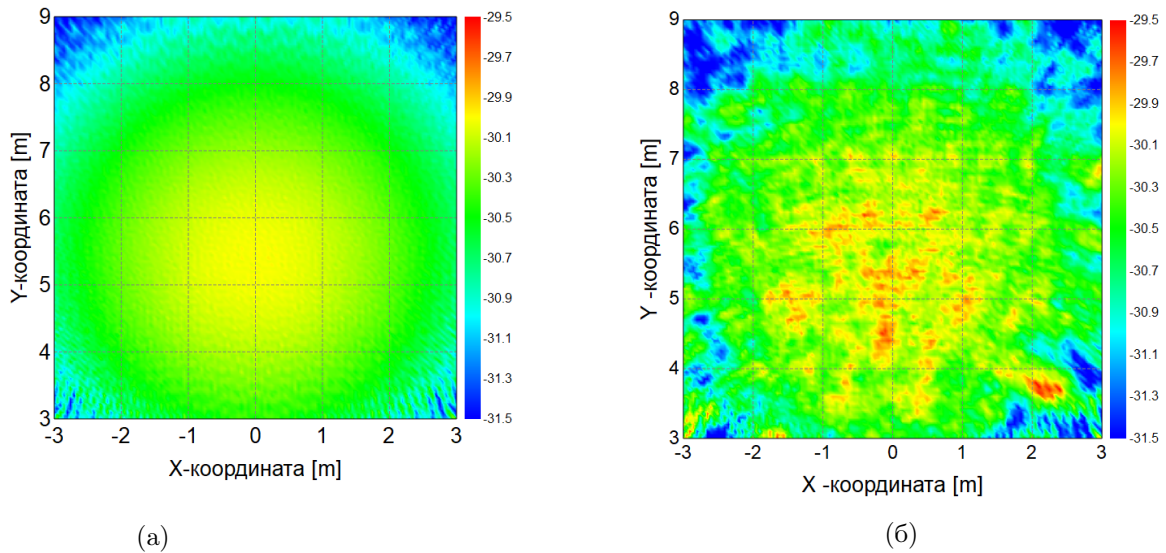


Рисунок 5 – Распределение амплитуды поля в центре рабочей зоны а) теоретического и б) реального коллиматора МАРК-12 при частоте 15 ГГц

В силу того, что для обеих поверхностей зеркала использовался один и тот же облучатель, плавно меняющаяся составляющая (taper) должна быть примерно одинаковой, а быстро меняющаяся составляющая (ripple) уже сильнее зависит от точности изготовления поверхности зеркала. Плавно меняющаяся составляющая неравномерности распределения поля имеет квадратичную зависимость от координаты, определяемую диаграммой направленности облучателя. Кромки зеркала одинаковые для обеих моделей, потому их влияние примерно равнозначно.

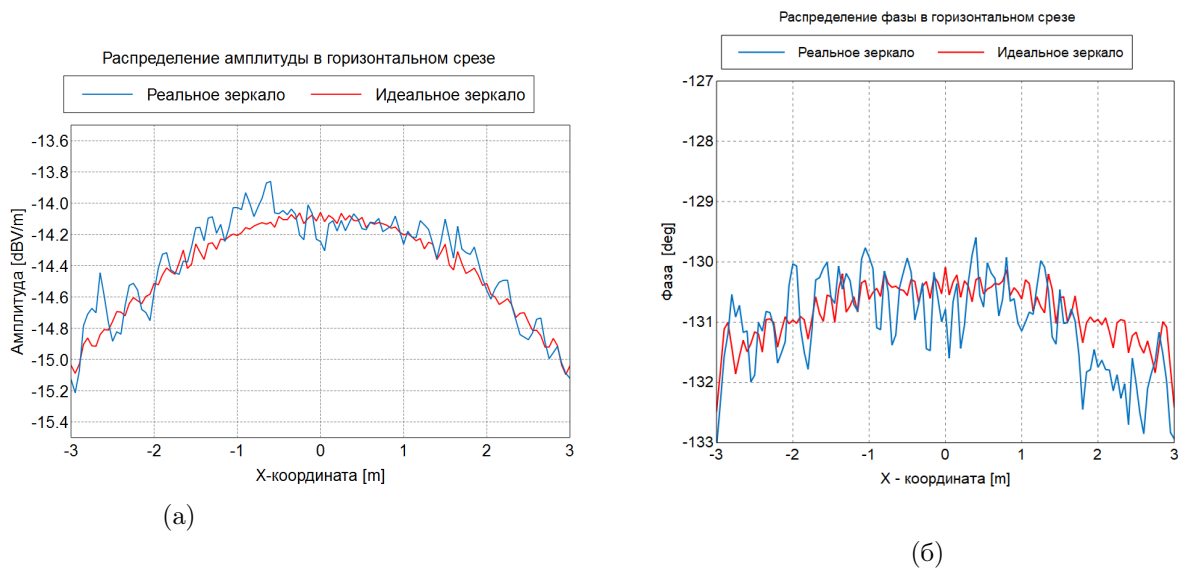


Рисунок 6 – Распределение а) амплитуды и б) фазы поля в центральном сечении рабочей зоны реального и теоретического коллиматора при частоте 10 ГГц

В Таблице 1 представлены значения неравномерности распределения амплитуды поля в рабочей зоне теоретического и реального коллиматоров для частот 3, 10 и 15 ГГц. Для двумерного распределения амплитуды поля построена параболическая аппроксимация, которая определяет плавно меняющуюся составляющую неравномерности поля. Максимальные изменения аппроксимирующих функций в рабочей зоне представлены в Таблице 1. Для получения быстро меняющейся составляющей неравномерности распределения поля из исходного двумерного распределения амплитуды вычитаем аппроксимирующую функцию. Принято использовать [3] доверительный интервал 95% для описания неравномерности поля, чтобы исключить случайные выбросы. Поэтому в таблице ниже полная и быстро меняющаяся составляющая неравномерности приведены с отбрасыванием самых плохих результатов.

Как видно из таблицы, полная неравномерность распределения амплитуды поля для теоретического зеркала немного уменьшается с ростом частоты, в то время как для реального зеркала такой

Таблица 1 – Неравномерность распределения амплитуды поля

Частота	Неравномерность распределения амплитуды поля	Теоретическое зеркало	Реальное зеркало
3 ГГц	полная (95%)	1,00 дБ	1,08 дБ
	плавно меняющаяся составляющая	0,73 дБ	0,77 дБ
	быстро меняющаяся составляющая (95%)	$\pm 0,45$ дБ	$\pm 0,49$ дБ
10 ГГц	полная (95%)	0,97 дБ	1,15 дБ
	плавно меняющаяся составляющая	1,01 дБ	1,05 дБ
	быстро меняющаяся составляющая (95%)	$\pm 0,18$ дБ	$\pm 0,34$ дБ
15 ГГц	полная (95%)	0,81 дБ	1,14 дБ
	плавно меняющаяся составляющая	0,68 дБ	0,73 дБ
	быстро меняющаяся составляющая (95%)	$\pm 0,26$ дБ	$\pm 0,50$ дБ

тенденции не наблюдается. Отличие в быстро меняющихся составляющих неравномерности распределения амплитуды поля для теоретического и реального зеркал увеличиваются с ростом частоты, что обусловлено неидеальностью поверхности зеркала.

Заключение

В работе проведена оценка влияния точности изготовления поверхности зеркала на неравномерность распределения поля в рабочей зоне коллиматора МАРК-12. Выполнено сравнение распределения полей, сформированных теоретическим и реальным зеркалом. Данные о профиле реального зеркала получены в результате прецизионного сканирования поверхности зеркала. Определены вклады в неравномерность распределения поля, обусловленные медленно и быстро меняющимися составляющими поля. Показана связь амплитуды быстро меняющейся составляющей и частоты. Сделан вывод, что критерий $\lambda/100$ для среднестатистического отклонения поверхности от точной (заданной) формы является достаточно обоснованным.

Список литературы

- [1] Johnson R.C., Ecker H.A., Moore R.A. Compact range techniques and measurements. IEEE Trans. on Anten. and Prop., 1969, V.17, N.5, P. 568.
- [2] Компактные полигоны для измерений характеристик рассеяния объектов. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. - М.: Наука, 2007. 266 с.
- [3] Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar cross section. Boston: SciTech Publishing, 1993, second edition, 477 p.
- [4] T. Lee, W.D. Burnside. Performance Trade-Off Between Serrated Edge and Blended Rolled Edge Compact Range Reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, V. 44, No. 1, January 1996.
- [5] I. J. Gupta, K. P. Ericksen, W.D. Burnside. A Method to Design Blended Rolled Edges for Compact Range Reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. V. 38, No. 6, June 1990.
- [6] C.A. Balanis. Antenna Theory. Analysis and Design. John Wiley & Sons. 2005.
- [7] D. Fasold. Measurement Performance of Basic Compact Range Concepts AMTA Conference 2006, pp.1-11.
- [8] A. M. Munos-Acevedo, M. Sierra-Castaner. An Efficient Hybrid GO-PWS Algorithm to Analyze Conformal Serrated-Edge Reflectors for Millimeter-Wave Compact Range. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. V. 60, No. 2, February 2012.
- [9] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Модернизация звездообразной кромки коллиматора МАРК-12. Современная электродинамика, №2 (4), апрель-май 2023, стр. 12-16.

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF IMPERFECTION
OF THE MARK-12 COLLIMATOR REFLECTOR SURFACE
ON THE FIELD DISTRIBUTION IN THE QUIET ZONE**

**Balabukha N.P.¹, Bulychev E.V.^{1*}, Zubov A.S.¹, Menshikh N.L.¹, Solosin V.S.¹,
Fedorov S.A.¹**

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* egor_itae@mail.ru

Abstract

The paper presents an analysis of the influence of the imperfection of the collimator reflector surface on the uneven distribution of the field in the quiet zone. The imperfection of the collimator reflector surface is called the deviation of the reflecting surface from the theoretical one. Based on the detailed studies of the structure of the reflector surface of the MARK-12 collimator located at ITAE RAS, a computer model of this reflector has been developed. Calculations of the uneven of the field distribution in the quiet zone of the collimator for the existing and theoretical reflector surfaces were carried out using the method of physical optics. The contributions of the taper (influence of the radiation pattern of the irradiator) and ripple components to the uneven distribution of the field in the quiet zone are determined.

Key words: compact range, reflector, quiet zone, field distribution, root mean square
