

УДК 001.891.573

АНАЛИЗ ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ПРИ ВЫНОСЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ ИЗ ФОКУСА

А. С. Zubov, А. В. Nikitenko

Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук,
125412, Москва, ул. Ижорская, д.13

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2019 г.

Аннотация. В работе рассмотрено влияние выноса облучателя коллиматора из фокуса на неравномерность фазы поля в рабочей зоне компактного полигона. Проведена численная оценка поля в рабочей зоне, рассмотрено два способа расчета – в геометрикооптическом приближении и методом физической оптики. Проведено сравнение этих методов. Также были проведены измерения неравномерности поля в рабочей зоне компактного полигона при смещении облучателя относительно фокуса зеркала. В работе приведены результаты эксперимента.

Ключевые слова: компактный полигон, расширенные радиоизображения, вынос облучателя из фокуса.

Abstract. A compact range is designed to conduct quasi-monostatic measurements of the scattering characteristics of various objects. However, the data obtained with bistatic measurements contains additional information about scattering patterns and can be used for design and optimization of the scattering characteristics of such objects at more detailed level. To conduct bistatic measurements in a compact range, it is necessary to shift the feed from the reflector's focus. This inevitably leads to a less uniform phase in the quiet zone. In this article, we consider approximate method based on ray optics to calculate this decrease in uniformity in the quiet zone of a compact range with laterally defocused feed. The calculation results for this method and physical optics are presented for two reflectors with diameters of 5 and 12 meters. Comparison of the calculated data shows good agreement, however the considered method shows much faster performance on personal computer. The experimental measurements data for compact range with 12-meter reflector is also

presented, which also agrees well with approximate calculations. Using this approximate method, we can estimate the size of a quiet zone depending on the bistatic angle; several dependence curves are presented for 6, 10 and 18 GHz. It is shown that simple lateral defocusing of the reflector feed creates a much smaller quiet zone than the zone limited only by the geometry of the reflector itself. In order to get closer to this geometric limit, it is necessary not only to shift feed laterally, but also to use shifts in other directions and/or more complex feeds and measurement methods. Using ray optics technique, we estimate the vertical feed shifts for various azimuthal bistatic angles.

Key words: compact range, defocused feed, higher-order diffraction centers.

Введение

Для анализа диаграмм обратного рассеяния (ДОР) в СВЧ диапазоне обычно применяется построение радиоизображений методом синтеза апертуры. Также, при отражении от объектов сложной формы для получения детальной информации о механизмах рассеяния используют построение расширенных радиоизображений [1]. Однако, для построения расширенных радиоизображений необходимо измерение не только обратного рассеяния, но и рассеяния при малых бистатических углах (до 15 градусов). На открытых измерительных полигонах это достигается разнесением приемной и передающей антенн на заданный угол. На компактных полигонах с использованием коллиматора бистатические измерения могут быть сделаны путем выноса приемного и/или передающего облучателя из фокуса [2]. Однако при этом возникают амплитудные и фазовые искажения в рабочей зоне компактного полигона, что приводит к уменьшению ее размера. В статье приведен анализ фазовых искажений в рабочей зоне и приведены зависимости максимального размера рабочей зоны от бистатического угла и частоты при использовании стандартного облучателя, вынесенного из фокуса коллиматора.

Расчет фазы электромагнитного поля в рабочей зоне при выносе облучателя из фокуса в геометрическом приближении

Используемый в компактных полигонах коллиматор представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения с облучателем, размещенным в фокусе. Фокусное расстояние обозначим F . Введем декартову систему координат UVW как показано на рис. 1.

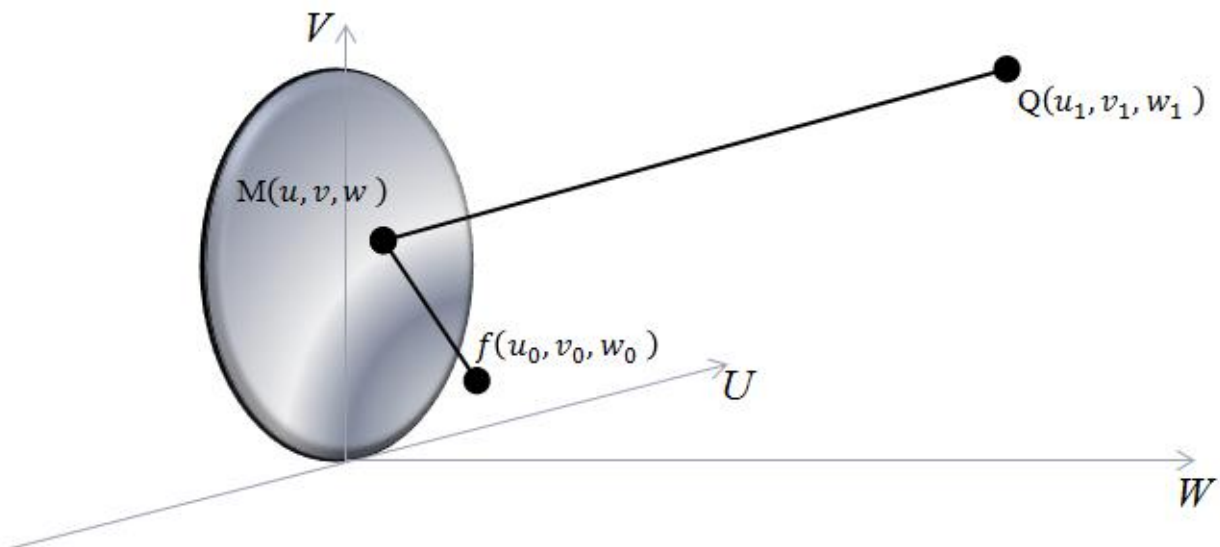


Рис. 1. Постановка задачи.

Ось W совпадает с оптической осью зеркала и начинается в вершине параболоида зеркала, направлена от зеркала к рабочей зоне камеры. Оси U и V составляют с W правую тройку векторов, при этом ось U параллельна плоскости пола камеры. Для анализа поля в рабочей зоне мы будем использовать подход, основанный на геометрическом приближении. Рассмотрим луч, идущий из точки f к зеркалу. Точку отражения этого луча от зеркала обозначим M . Точку рабочей зоны, куда попадает отраженный луч обозначим Q . Координаты этих точек обозначим соответственно:

$$f(u_0, v_0, w_0)$$

$$M(u, v, w)$$

$$Q(u_1, v_1, w_1)$$

Для длины пути луча на отрезке FM можно записать следующее выражение:

$$L_0(u, v, w) = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 + (w - w_0)^2}$$

Для длины пути луча на отрезке MQ можно записать следующее выражение:

$$L_1(u, v, w) = \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2 + (w - w_1)^2}$$

Запишем уравнение поверхности зеркала:

$$w = \frac{u^2 + v^2}{4F}$$

Подставляя это выражение в выражения для длины лучей, получаем:

$$L_0(u, v) = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 + \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_0\right)^2}$$

$$L_1(u, v) = \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2 + \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_1\right)^2}$$

Координаты облучателя F и точки рабочей зоны Q являются параметрами задачи, координаты точки отражения неизвестны. Определим суммарную длину пути от точки F до точки Q :

$$L = L_0 + L_1$$

Чтобы найти эту длину, запишем условие минимальности траектории, которую проходит луч:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(u, v)}{\partial u} = \frac{\partial L_0(u, v)}{\partial u} + \frac{\partial L_1(u, v)}{\partial u} = 0 \\ \frac{\partial L(u, v)}{\partial v} = \frac{\partial L_0(u, v)}{\partial v} + \frac{\partial L_1(u, v)}{\partial v} = 0 \end{cases}$$

Получим выражения для частных производных длин путей:

$$\frac{\partial L_{0,1}(u, v)}{\partial u} = \frac{1}{L_{0,1}(u, v)} \left(u - u_{0,1} + \frac{u}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_{0,1} \right) \right)$$

$$\frac{\partial L_{0,1}(u, v)}{\partial v} = \frac{1}{L_{0,1}(u, v)} \left(v - v_{0,1} + \frac{v}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_{0,1} \right) \right)$$

Получаем систему нелинейных уравнений относительно u, v :

$$\begin{cases} f_0(u, v) = \frac{1}{L_0(u, v)} \left(u - u_0 + \frac{u}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_0 \right) \right) + \frac{1}{L_1(u, v)} \left(u - u_1 + \frac{u}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_1 \right) \right) = 0 \\ f_1(u, v) = \frac{1}{L_0(u, v)} \left(v - v_0 + \frac{v}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_0 \right) \right) + \frac{1}{L_1(u, v)} \left(v - v_1 + \frac{v}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{4F} - w_1 \right) \right) = 0 \end{cases}$$

Для решения этой системы используем итерационный метод Ньютона.

Запишем элементы матрицы Якоби:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_0(u, v)}{\partial u} &= \frac{1}{L_0(u, v)} \left(1 + \frac{1}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{2F} - w_0 \right) + \frac{u^2}{4F^2} \right) + \frac{1}{L_1(u, v)} \left(1 + \frac{1}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{2F} - w_1 \right) + \frac{u^2}{4F^2} \right) \\ &\quad - \frac{1}{L_0(u, v)} \left(\frac{\partial L_0(u, v)}{\partial u} \right)^2 - \frac{1}{L_1(u, v)} \left(\frac{\partial L_1(u, v)}{\partial u} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f_0(u, v)}{\partial v} = \frac{\partial f_1(u, v)}{\partial u} = \frac{uv}{4F} \left(\frac{1}{L_0(u, v)} + \frac{1}{L_1(u, v)} \right) - \frac{1}{L_0(u, v)} \left(\frac{\partial L_0(u, v)}{\partial u} \right)^2 - \frac{1}{L_1(u, v)} \left(\frac{\partial L_1(u, v)}{\partial u} \right)^2$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(u, v)}{\partial v} &= \frac{1}{L_0(u, v)} \left(1 + \frac{1}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{2F} - w_0 \right) + \frac{v^2}{4F^2} \right) + \frac{1}{L_1(u, v)} \left(1 + \frac{1}{2F} \left(\frac{u^2 + v^2}{2F} - w_1 \right) + \frac{v^2}{4F^2} \right) \\ &\quad - \frac{1}{L_0(u, v)} \left(\frac{\partial L_0(u, v)}{\partial u} \right)^2 - \frac{1}{L_1(u, v)} \left(\frac{\partial L_1(u, v)}{\partial u} \right)^2 \end{aligned}$$

Итерационный процесс строится следующим образом:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial f_0}{\partial u} \right|_{(u,v)^{(i)}} \Delta u + \left. \frac{\partial f_0}{\partial v} \right|_{(u,v)^{(i)}} \Delta v = f_0(u^{(i)}, v^{(i)}) \\ \left. \frac{\partial f_1}{\partial u} \right|_{(u,v)^{(i)}} \Delta u + \left. \frac{\partial f_1}{\partial v} \right|_{(u,v)^{(i)}} \Delta v = f_1(u^{(i)}, v^{(i)}) \end{cases}$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta u$$

$$v^{(i+1)} = v^{(i)} + \Delta v$$

В качестве начального приближения положим:

$$u^{(0)} = u_2 + \frac{w_1}{w_0} u_1$$

$$v^{(0)} = v_2$$

Фазу в точке Q рабочей зоны зависит от найденной длины следующим образом:

$$\varphi_Q = k(L_0 + L_1),$$

где k – волновое число.

В качестве примера рассмотрим стандартный коллиматор МАК-5 [1]. Апертура зеркала этого коллиматора составляет 4.5x6.0 м, фокусное расстояние 3.5 м. Также рассмотрим более крупный коллиматор, входящий в состав АИК-КП в ИТПЭ РАН (12-метровый коллиматор) [3]. Апертура зеркала этого коллиматора – 12x13 м, фокусное расстояние – 12 м.

Для проверки обоснованности расчета фазы электромагнитного поля в рабочей зоне компактного полигона с использованием подхода геометрической оптики было проведено сравнение полученных результатов с расчетом в приближении физической оптики. Расчет методом физической оптики был выполнен для коллиматора МАК-5 на программе *FEKO*.

На рисунке 2 представлен результат расчета фазы электромагнитного поля в рабочей зоне коллиматора МАК-5 в геометрооптическом приближении. На рисунке 3 представлен результат расчета фазы электромагнитного поля в рабочей зоне коллиматора МАК-5 методом физической оптики. Результаты представлены для частоты 6 ГГц. Смещение облучателя по горизонтали составило 0.3 м, что соответствует величине азимутального бистатического угла 5° .

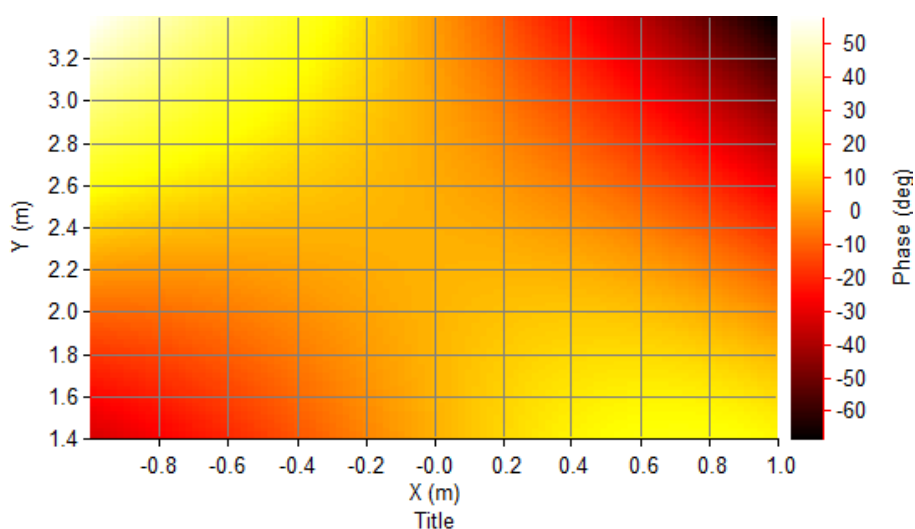


Рис. 2. Результат расчета фазы для коллиматора МАК-5 в геометрооптическом приближении (после компенсации линейного тренда).

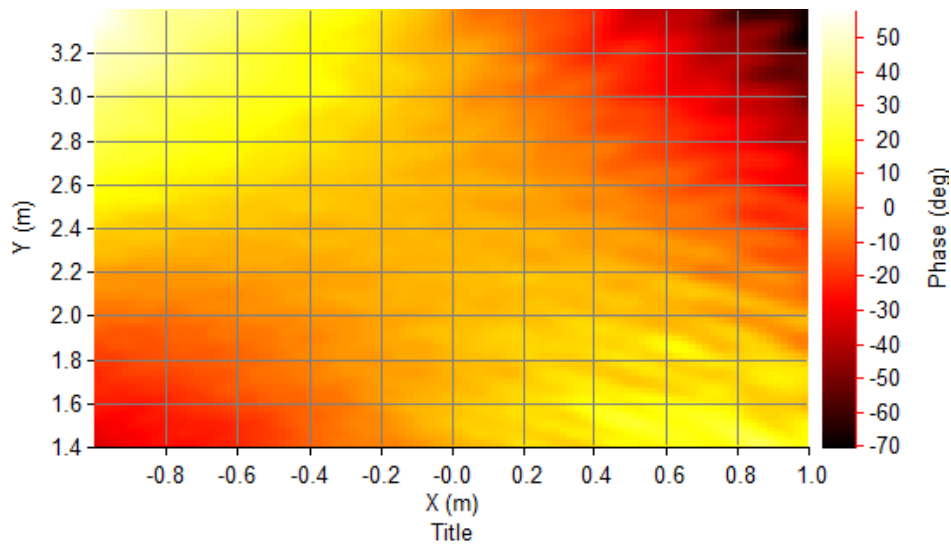


Рис. 3. Результат расчета фазы для коллиматора МАК-5 методом физической оптики (после компенсации линейного тренда).

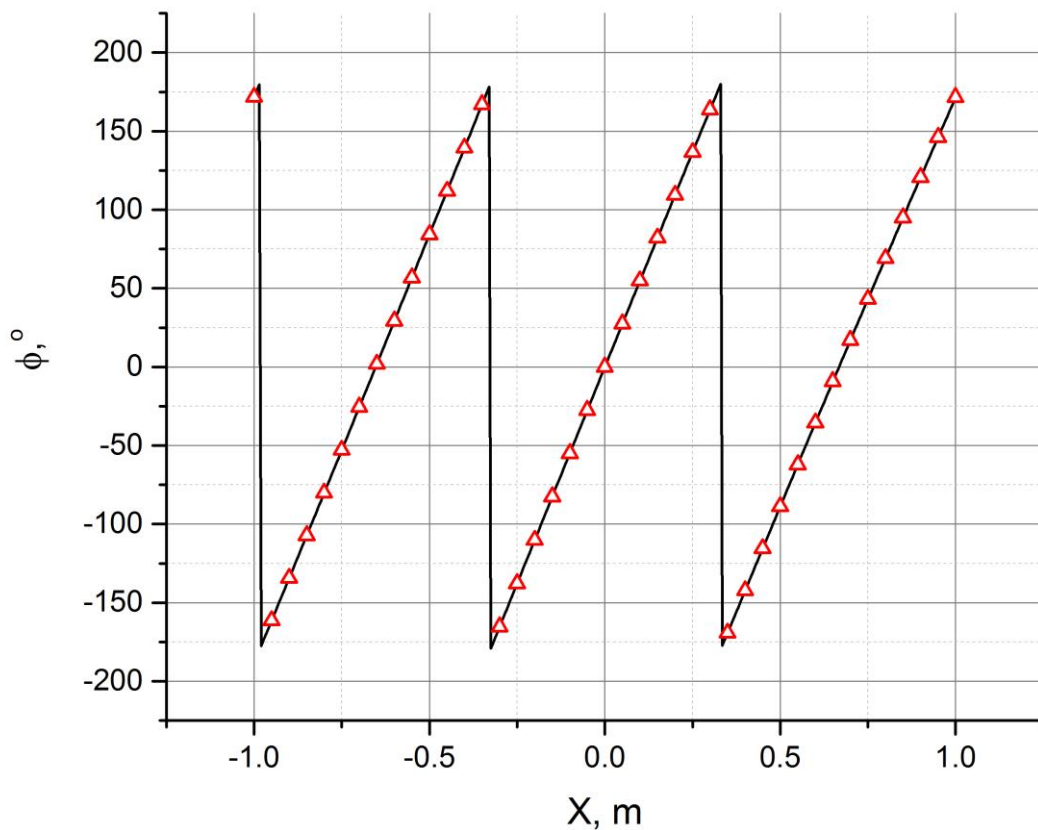


Рис. 4. Сравнение результатов расчета методом физической оптики (FEKO) (красные треугольники) и в геометрическом приближении (черная линия). Коллиматор МАК-5.

На рисунке 4 представлено распределение электромагнитного поля в центральном горизонтальном сечении плоскости рабочей зоны, рассчитанное обоими методами. Максимальная разница между результатами (в области рабочей зоны) составила не более 3° .

На рисунке 5 представлено сравнение результатов измерения фазы поля в рабочей зоне компактного полигона ИТПЭ РАН и расчета фазы в геометрическом приближении. Результаты представлены для частоты 10 ГГц. Смещение облучателя составило 1 м, что соответствует величине бистатического угла 5° . Хотя в одной точке разница составила 7° , среднее квадратичное отклонение рассчитанной кривой от экспериментально измеренной не превышает 2° .

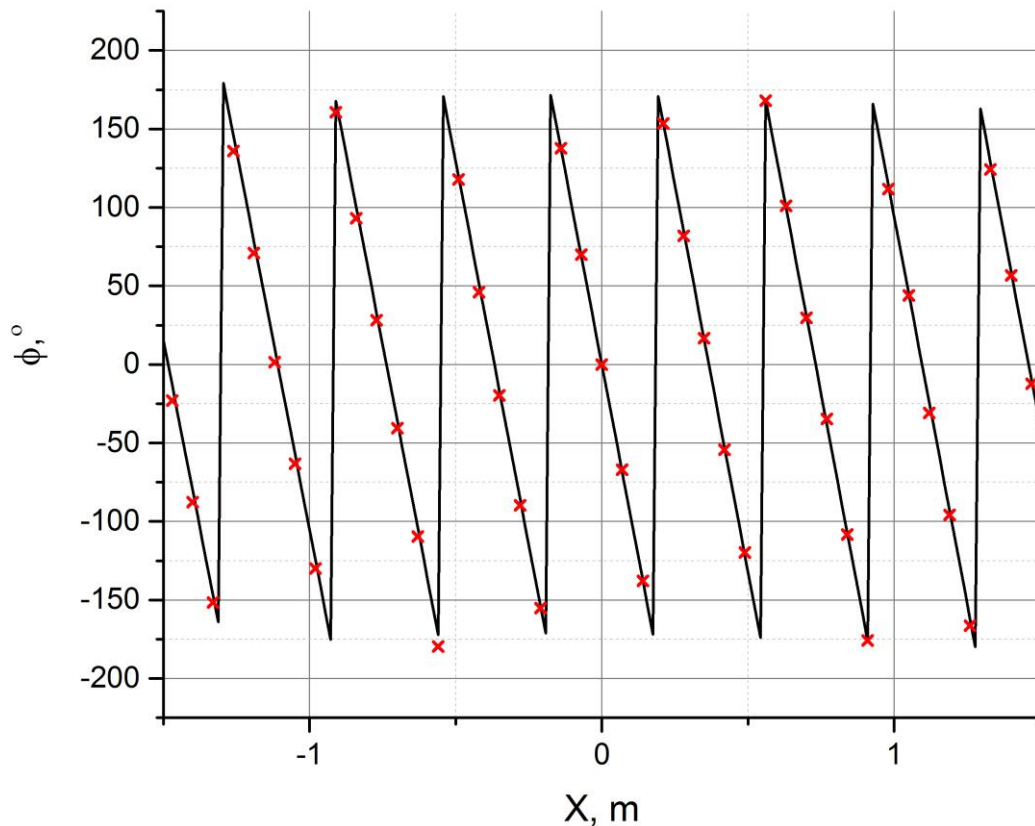


Рис. 5. Сравнение результатов расчета в геометрическом приближении (черная линия) и результатов измерения в компактном полигоне (красные крестики). 12-метровый коллиматор.

Как видно, отличие между расчетом геометрическим методом и методом физической оптики незначительное. Однако расчет в приближении геометрической оптики может быть выполнен гораздо быстрее. Для расчетов на частотах 10 ГГц и выше и апертуре зеркала 12 м время счета методом физической оптики на персональном компьютере становится слишком большим, и в данном случае геометрическое приближение может служить альтернативой.

С помощью геометрического метода была проведена оценка возможного размера рабочей зоны для 12-метрового коллиматора на различных частотах. На рис. 6 представлены зависимости размера рабочей зоны от бистатического угла на 6, 10 и 18 ГГц. Синей линией показана предельная величина рабочей зоны, обусловленная геометрическими размерами зеркала. Допустимая неравномерность распределения фазы в рабочей зоне считалась не более $\pm 10^\circ$.

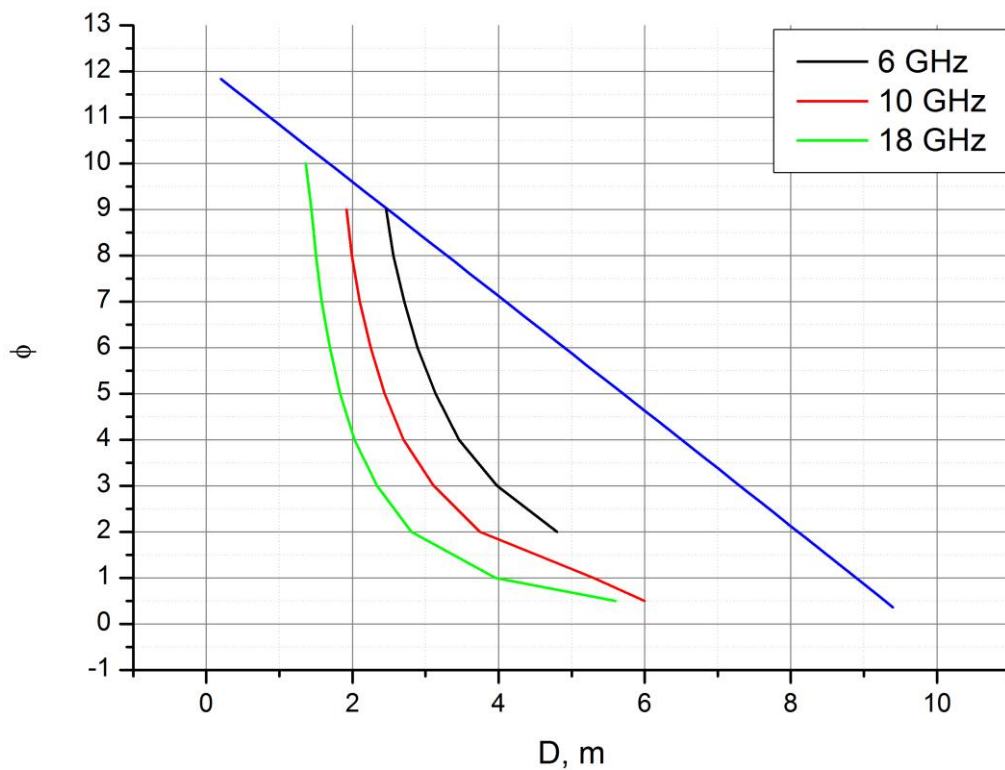


Рис. 6. Зависимость размера рабочей зоны 12-метрового коллиматора от бистатического угла.

Из представленных данных видно, что, например на частоте 18 ГГц, сдвигая облучатель лишь вдоль оси U , можно получить приемлемое распределение фазы в рабочей зоне диаметром 1.4 м при бистатическом угле не более 9° . Как видно из представленных данных, для ненулевых бистатических углов использование облучателя со стандартной апертурой (с размером меньше длины волны), не позволяет приблизиться к геометрическому пределу рабочей зоны.

Расчет смещения облучателя по вертикальной оси

Для изменения азимутального бистатического угла на практике удобно использовать перемещение облучателя вдоль горизонтальной прямой, используя линейный сканер. Однако, при таком перемещении происходит отклонение направления волны в рабочей зоне не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости. Для определения требуемого положения облучателя для отклонения волны только в горизонтальной плоскости решим в геометрическом приближении задачу по определению точек в фокальной плоскости при приходе волны, идущей с заданного направления.

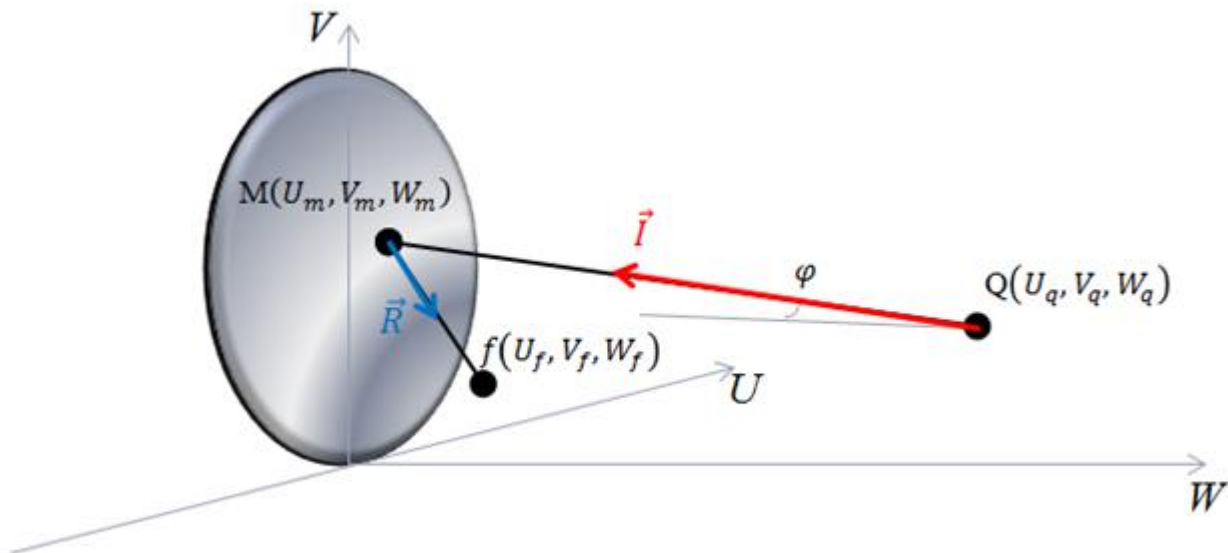


Рис. 7. Постановка задачи расчета смещения облучателя по вертикальной оси.

Рассмотрим поток параллельных лучей, идущих из рабочей зоны к зеркалу коллиматора (см. рис.7). Пусть лучи этого потока составляют

некоторый ненулевой угол φ с плоскостью VW . Потребуем, чтобы лучи были параллельны плоскости UW , ведь нам нужно, чтобы отсутствовали искажения направления волны в вертикальной плоскости. Рассмотрим луч I , идущий из точки Q рабочей зоны. Обозначим точку зеркала, в которую приходит луч, M , а точку в фокальной плоскости, куда приходит отраженный луч $R - f$.

Запишем координаты этих точек:

$$Q(U_q, V_q, W_q)$$

$$M(U_m, V_m, W_m)$$

$$f(U_f, V_f, W_f)$$

Из геометрических соображений имеем:

$$\begin{cases} \frac{U_m^2 + V_m^2}{4F} = W_m \\ \frac{U_m - U_q}{W_m - W_q} = \tan \varphi \\ V_m = V_q \end{cases}$$

Запишем координаты вектора I :

$$\vec{I} = (U_m - U_q, V_m - V_q, W_m - W_q)$$

Известно, что при отражении луча угол, который составляет падающий луч с нормалью к поверхности, равен углу, который составляет отраженный луч с нормалью к поверхности.

Нормаль к поверхности параболического зеркала имеет вид:

$$\vec{N} = \left(-\frac{U_m}{2F}, -\frac{V_m}{2F}, 1 \right)$$

Рассмотрим плоскость падения, т.е. плоскость, содержащую падающий луч и нормаль к поверхности зеркала. Найдем вектор, перпендикулярный этой плоскости:

$$\vec{P} = [\vec{I}, \vec{N}]$$

Далее рассмотрим декартову систему координат с центром в точке M . Ее орты положим коллинеарными соответственно нормали к плоскости падения и нормали к поверхности зеркала:

$$\vec{e}'_v = \frac{\vec{P}}{P}$$

$$\vec{e}'_w = \frac{\vec{N}}{N}$$

Третий орт должен составлять правую тройку в первыми двумя:

$$\vec{e}'_u = [\vec{e}'_v, \vec{e}'_w]$$

В полученной системе координат условие равенства угла падения и угла отражения может быть записано в виде выражения для вектора отраженного луча:

$$\vec{R} = (\vec{I}, \vec{e}'_u) \vec{e}'_u - (\vec{I}, \vec{e}'_w) \vec{e}'_w$$

Координаты точки в фокальной плоскости выражаются через вектор отраженного луча следующим образом:

$$U_f = U_m + KR_u$$

$$V_f = V_m + KR_v$$

$$K = \frac{W_f - W_m}{R_w}$$

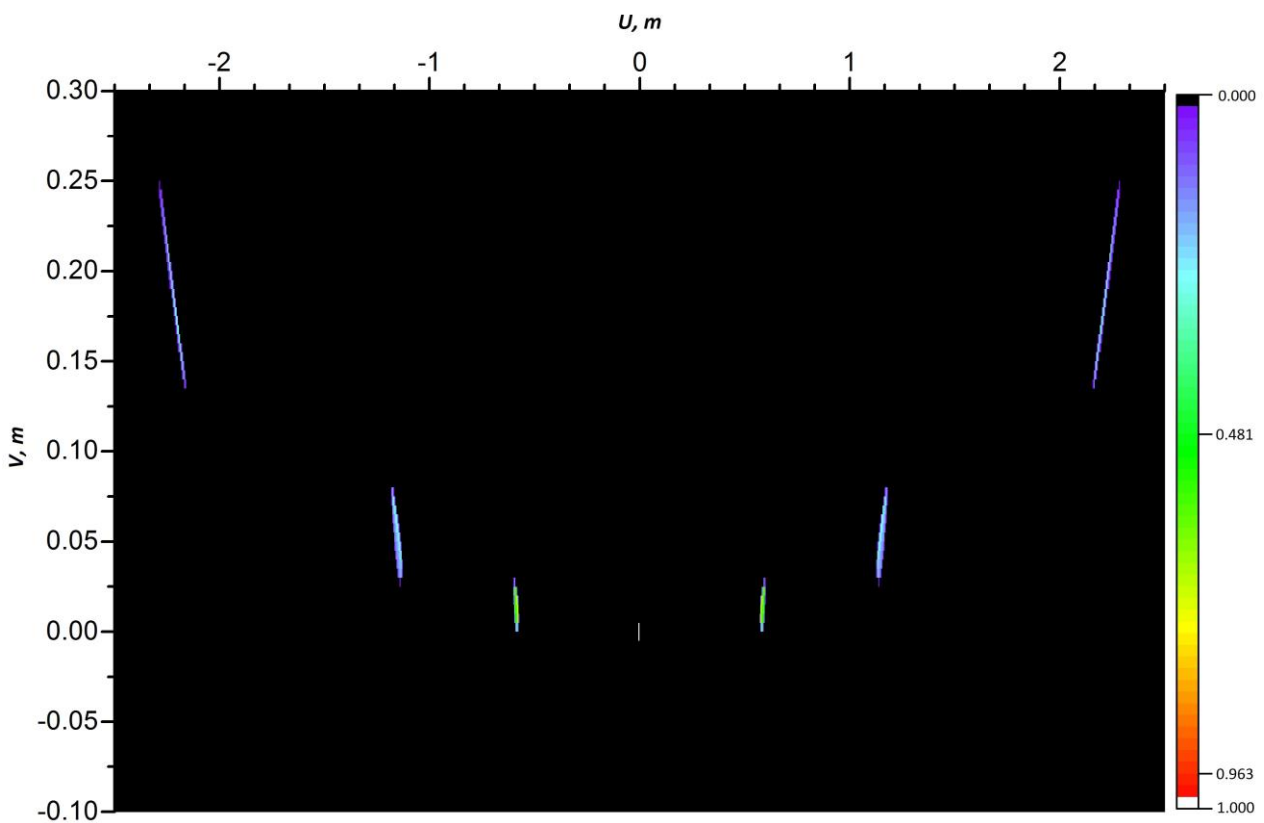


Рис. 8. К расчету смещения облучателя по вертикальной оси.

На рис. 8 приведены результаты расчета с помощью описанных формул. В качестве параметра задавалась плотность лучей, испущенных из рабочей зоны, затем рассчитывалась плотность лучей, пришедших в каждую точку фокальной плоскости, нормированная на плотность испущенных лучей. На рисунке изображены несколько полученных таким образом областей при разных углах φ .

Из рисунка видно, что чем больше бистатический угол, тем большую площадь занимает распределение плотности пришедших в фокальную плоскость лучей. В качестве оценки для смещения облучателя по вертикальной оси можно взять координаты точки с максимальной плотностью в данной области. Таким образом, рассмотренный метод позволяет оценить для заданного значения бистатического угла необходимое смещение облучателя по вертикальной оси.

Выводы

В работе рассмотрено влияние смещения облучателя относительно фокуса зеркала на распределение фазы поля в рабочей зоне компактного полигона. Рассмотрен метод оценки фазы поля, основанный на геометрикооптическом приближении. Проведенное сравнение результатов расчета геометрикооптическим методом с результатами расчета методом физической оптики и результатами измерений в компактном полигоне показало совпадение с точностью, достаточной для оценки фазовых искажений поля в рабочей зоне компактных полигонов, возникающих при смещении облучателя относительно фокуса зеркала коллиматора. Мы предполагаем, что для коррекции поля в рабочей зоне компактного полигона при заданном бистатическом угле понадобится большая область измеренных данных в фокальной плоскости, чем область, занимаемая лучами в фокальной плоскости, испущенными из рабочей зоны. В качестве приближения можно использовать рассмотренный метод расчета распределения плотности лучей в фокальной плоскости.

Литература

1. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.:Наука, 2007.
2. D.C. Chang, T.Z. Chang, R.C. Liu, I.J. Fu. Measurement of bistatic radar cross section in sa 5751 compact range // *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1993.
3. Солосин В.С., Балабуха Н.П., Зубов А.С. Компактный полигон ИТПЭ РАН. // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции “Метрология в радиоэлектронике”. Менделеево Московской обл., 20-22 июня 2016 г. с. 199-202.

Для цитирования:

Зубов А.С., Никитенко А.В. Анализ поля в рабочей зоне компактного полигона при выносе облучателя из фокуса. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/8/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.8