

УДК 537.87, 621.371

## РАСФАЗИРОВАННЫЙ РУПОРНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ С ИЗЛОМОМ ОБРАЗУЮЩЕЙ И СО СКОСОМ АПЕРТУРЫ ДЛЯ КОЛЛИМАТОРА МАК-5М

Н. П. Балабуха<sup>1</sup>, Н. Л. Меньших<sup>1,2</sup>, В. С. Солосин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН

<sup>2</sup> Московский Физико-Технический Институт

Статья поступила в редакцию 25 мая 2016 г.

**Аннотация.** В работе исследован расфазированный рупорный облучатель со скосом апертуры и изломом образующей, используемый для коллиматора МАК-5М. Численные расчеты показали, что использование данного облучателя позволяет расширить рабочую зону коллиматора примерно на 25% в полосе частот от 10 до 12 ГГц.

**Ключевые слова:** облучатель коллиматора, компактный полигон, моделирование с помощью FEKO.

**Abstract.** Misphased horn feed for compact range МАК-5М is investigated. The slant of the horn aperture in the vertical plane obtains the nonaxisymmetrical radiation pattern. The form of the diagram help to achieve uniform field distribution on the surface of the reflector. The radiation pattern has a region with approximately constant value of the amplitude of the field in the horizontal plane due to the fracture of lateral side of the horn. Angle of the slant and flare angle of the big horn are optimized for making the best form of radiation pattern.

Electrodynamic calculation was carried out by the method of the integral equations (method of moments) using FEKO. Using cluster of ITAE RAS allowed carrying out simulation of the field distribution in the quite zone of the compact range in all frequency range. The system of horn feed and reflector is considered in free space, the reflection from the chamber walls are not taken into account.

Compact range МАК-5М with misphased horn feed will be in the quit zone diameter of 2.5 m non-uniformity field not exceeding  $\pm 1$  dB, and the phase of the non-

uniformity of less than  $10^\circ$ . It is mean the compact range with misphased horn feed allows you to expand the quite zone of the about 25% in the frequency band from 9.8 to 12 GHz.

**Keywords:** feed reflector, compact range, computer modeling by FEKO.

## 1. Введение

Компактный полигон – сложная с инженерной точки зрения и дорогостоящая измерительная установка. Поэтому очень важно максимально использовать его возможности, а именно достичь приемлемых характеристик поля в наибольшем частотном диапазоне и на максимальной площади рабочей зоны.

Для измерений на компактном полигоне важно решить две основные проблемы: получить плоскую волну с равномерной амплитудой и фазой в рабочей зоне и выделить полезный сигнал. Неравномерность поля определяется диаграммой облучателя, дифракцией волны на кромках рефлектора коллиматора и отражением от элементов конструкции самой камеры. Чтобы уменьшить дифрагированное поле, края зеркала имеют зубчатую форму, поглощающий материал помогает заметно снизить фоновый сигнал от самой камеры. Преобразование сигнала во временную область позволяет вычистить помеховые сигналы, имеющие отличный оптический путь от пути полезного сигнала [1].

Для повышения эффективности работы компактного полигона целесообразно использовать облучатели со специальной формой диаграммы направленности, оптимизированной для данного коллиматора. В настоящей работе представлен облучатель, позволяющий расширить рабочую зону в некоторой полосе частот.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к облучателям коллиматора.

Неравномерность поля в рабочей зоне по амплитуде и фазе не должна превышать некоторых заранее заданных значений. Эти значения выбираются

исходя из того, какие измерения и с какой точностью планируется проводить на данном компактном полигоне.

Обратимся к рис. 1. Т.к. зеркало коллиматора представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения, а облучатель располагается в его фокусе, то из-за разности расстояний  $R_1$  и  $R_2$  для получения поля с постоянной амплитудой между точками 1 и 2 на зеркале коллиматора, необходимо увеличить сигнал в направлении на верхний край рабочей зоны. Диаграмма направленности идеального облучателя должна иметь несимметричность в вертикальном направлении: амплитуда должна возрасти в направлении верхнего края зеркала и быть симметричной в горизонтальном сечении. Вне рабочей зоны поле должно быстро спадать к краям зеркала коллиматора, чтобы уменьшить дифракцию на его кромках.

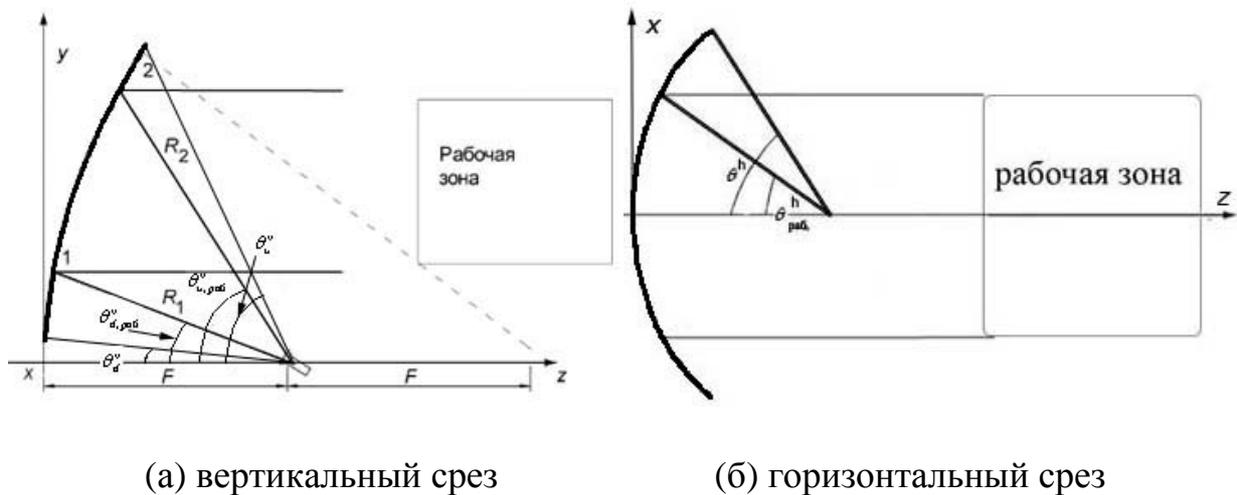


Рис. 1. Геометрия компактного полигона, вид с боку (а) и вид сверху (б).

Так же важно, чтобы облучатель сохранял диаграмму направленности в некоторой полосе частот и при этом положение его фазового центра оставалось постоянным.

Часто используются в качестве облучателей коллиматора рупорные антенны [2]. Однако их характеристики имеют ряд недостатков. Чтобы уложиться в заданные значения неравномерности поля, приходится увеличивать интенсивность облучения краев зеркала, что в свою очередь

приводит к увеличению дифракции на кромках зеркала. Кроме того, уровень бокового излучения также может быть весьма значительным.

Часть проблем удастся устранить, используя различные модификации рупоров. Так, например, для получения более равномерного поля в раскрыве рупора часто используют фланец различной модификации [1]. Также, для обеспечения более крутого спада поля к краям зеркала, можно использовать поглощающие насадки на рупор [3]. В работах [4, 5] показано, что если обеспечить плавный переход от краев рупора к свободному пространству (отогнуть кромки рупора), то можно заметно снизить влияние дифракции на краях и улучшить качество поля в рабочей зоне. Наиболее распространённым облучателем коллиматора со специальной формой диаграммы направленности является рупор с канавками внутри [6]. Четвертьволновые канавки позволяют заметно снизить уровень бокового излучения рупора. Исследовалась возможность использования таких рупоров в широком диапазоне частот за счет создания профиля с переменной глубиной канавок [7]. Диаграмма направленности такого рупора имеет область с постоянным значением амплитуды, спад к краям зеркала так же значительно больше, чем у обычного рупора.

Диэлектрические антенны позволяют сформировать наиболее оптимальную диаграмму направленности облучателя, но только в небольшой полосе частот. Например, в работе [8] рассматривается стержневой диэлектрический облучатель, у которого диаграмма направленности имеет область с примерно постоянной амплитудой. Однако, такая форма главного лепестка формируется в очень узкой полосе частот: 5% от диапазона. Этот облучатель был в дальнейшем модернизирован за счет фторопластовой вставки [9]. Это позволило расширить диапазон частот до 2 ГГц.

Исследовались направленные свойства рупора с изломом образующей [10]. Показано, что у такого рупора в диаграмме направленности есть область с почти постоянным значением амплитуды поля в некотором диапазоне углов, сохраняющаяся в некоторой полосе частот.

Все вышерассмотренные облучатели обладают осевой симметрией. Как уже отмечалось, диаграмма облучателя должна быть несимметричной в вертикальном направлении. Поэтому рупора с неосесимметричной диаграммой направленности представляют большой интерес в качестве облучателей зеркальных антенн и коллиматоров. В работе [11] рассматривался рупор со скосом апертуры и предложена методика разработки таких рупоров.

Результаты работ [10-11] позволили продвинуться дальше и исследовать структуру, имеющую одновременно и скос апертуры, и излом образующей [12]. Данные исследования показали, что, подобрав параметры антенны, можно сформировать требуемую диаграмму направленности. В качестве облучателя коллиматора расфазированный рупор с изломом образующей почти не исследован.

Для расчета диаграммы направленности рупора необходимо задать его размеры, способ возбуждения и граничные условия на стенках рупора. Рассмотрим эти пункты по порядку.

## 2. Геометрия коллиматора

Геометрия облучателя определяется требуемой шириной диаграммы направленности, которая в свою очередь определяется параметрами коллиматора. Исследуемый рупор оптимизируется для коллиматора МАК-5М [1]. Расстояние от вершины зеркала коллиматора до его фокуса 3.5 метра. Рабочая зона представляет собой горизонтально расположенный цилиндр длиной 1.8 метров, диаметром 1.5 метра. Укажем некоторые характерные направления для коллиматора (рис. 1):  $\theta^h = 30.7^\circ$  - направление по горизонтали между кромками зеркала в самом узком месте коллиматора,  $\theta_{раб}^h = 13.2^\circ$  - направление по горизонтали между краями рабочей зоны коллиматора; в вертикальной плоскости углы отсчитываются от оси параболоида вращения:  $\theta_1^v = 14.7^\circ$  - направление на нижний край зеркала по вертикали,  $\theta_2^v = 57.0^\circ$  - направление на верхний край зеркала по вертикали,  $\theta_{1раб}^v = 22.6^\circ$  - направление на нижний край рабочей зоны по вертикали,  $\theta_{2раб}^v = 49.1^\circ$  - направление на

верхний край рабочей зоны по вертикали.

Чтобы сформировать диаграмму направленности, имеющую область с примерно постоянной амплитудой, угол раскрыва большого рупора должен заметно превосходить угол, под которым видна рабочая зона. Однако, как уже отмечалось выше, для уменьшения амплитуды дифрагированных на кромках зеркала волн необходимо обеспечить заметный спад амплитуды поля вне рабочей зоны. Оптимальный угол выбирается так, чтобы выполнялись оба условия.

### 3. Геометрия рупора

Схема рупора представлена на рис. 2. Рупор состоит из трех частей: отрезка круглого волновода, малого конического синфазного рупора и большого сильно расфазированного рупора. Основные размеры:  $2R_1 = 36$  мм – диаметр раскрыва малого рупора,  $2\alpha = 10.2^\circ$  - угол раскрыва малого рупора,  $2R_2 = 164$  мм - диаметр раскрыва большого рупора,  $2\beta = 98.6^\circ$  - угол раскрыва большого рупора. Диаметр круглого волновода 23 мм.

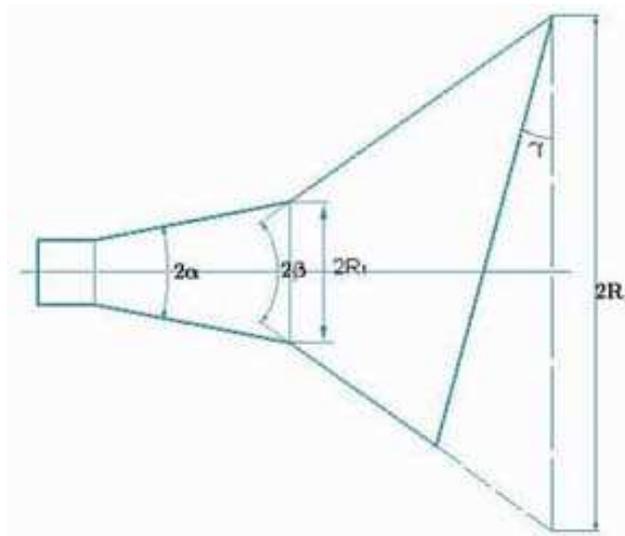


Рис. 2. Схема расфазированного рупора с изломом образующей и скосом апертуры.

Для нахождения оптимального радиуса раскрыва большого рупора использовалась приближенная формула, указанная в [12].

$$R_2 = \frac{n\lambda \cot\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}{2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $n = 1; 1.5; 2; 2.5; 3...$  причем четные номера обеспечивают воронкообразную форму диаграммы, полуцелые – плоскую, а нечетные – куполообразную. Радиус раскрыва рупора рассчитывался по формуле для плоской диаграммы и центральной частоты рабочего диапазона частот – 10 ГГц.

Для достижения равномерной засветки зеркала амплитуда в направлении на верхний край рабочей зоны должна быть в 1.18 раза больше чем в направлении на нижний край. Коническая часть большого рупора срезана плоскостью под углом  $9^\circ$  к горизонтали. Как показали дальнейшие расчеты, это позволяет получить необходимое отношение амплитуд на верхнем и нижнем крае рабочей зоны в широкой полосе частот.

#### 4. Расчет рупора

Расчет расфазированного рупора проводился методом моментов при помощи программы FEKO, который относится к точным методам, что позволяет учесть дифракцию волны в изломе рупора и на его кромке.

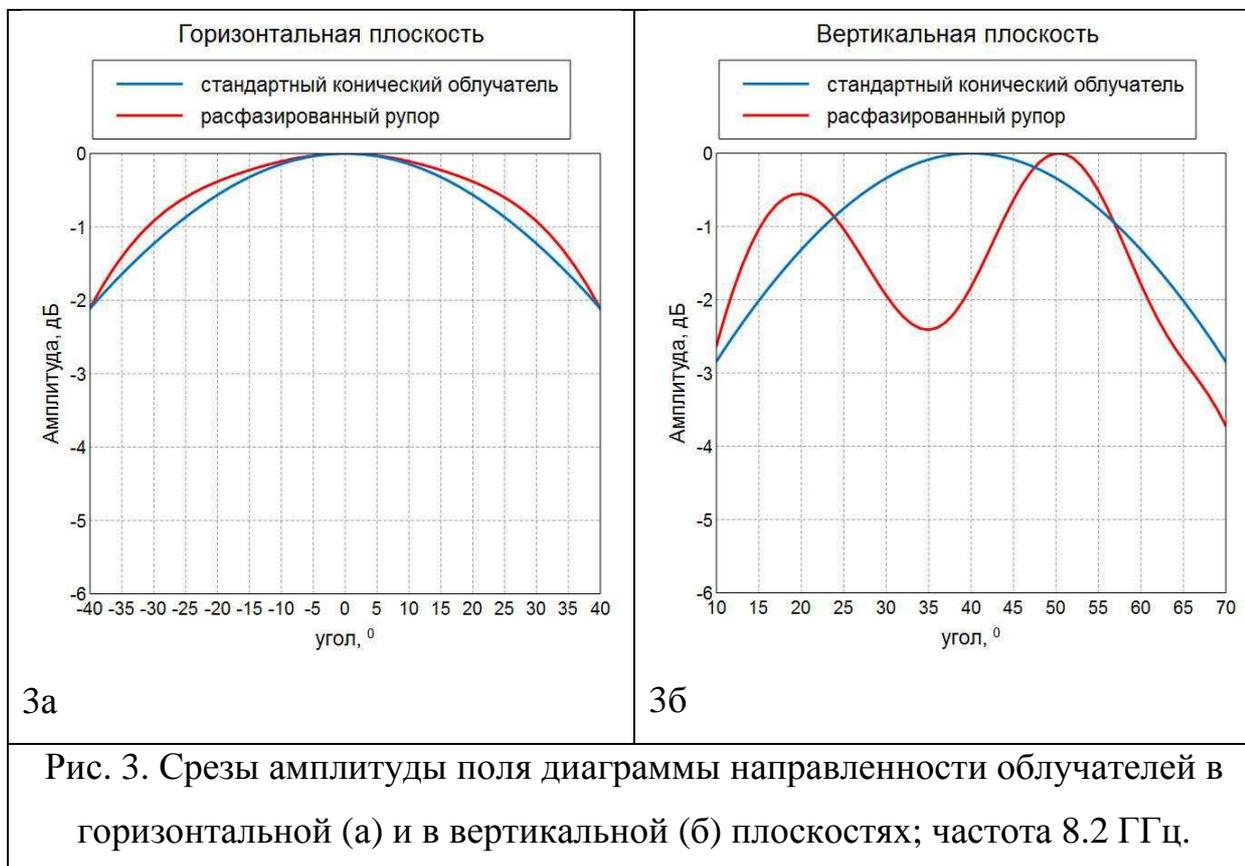
В математической модели рупора рассматривалось возбуждение только основной волноводной моды волны  $H_{11}$  круглого волновода. На стенках рупора и на поверхности коллиматора задавались граничные условия для идеального проводника, т.е. тангенциальные компоненты поля равны нулю. Рупорный облучатель устанавливался в фокусе коллиматора под углом в  $38^\circ$  над горизонтом (направление на центр рабочей зоны коллиматора) срезанной частью вверх. Исследовалось поле в рабочей зоне коллиматора, центр рабочей зоны находится в 7 метрах от вершины параболоида.

Система рупорный облучатель – коллиматор рассматривалась в свободном пространстве. При этом прямое попадание лучей из рупора в рабочую зону было исключено.

## 5. Результаты численных расчетов

Сравним характеристики направленности расфазированного рупора со стандартным коническим рупорным облучателем коллиматора МАК-5М.

Рабочий диапазон частот стандартного облучателя 8.2 – 12 ГГц. Сравнение проводилось на отдельных частотах с шагом 0.2 ГГц, ниже приведены результаты для начальной, центральной и конечной частот рабочего диапазона. На всех рисунках черная кривая – стандартный рупор, красная кривая – расфазированный рупор. Приведены результаты для вертикальной поляризации, где распределение поля наихудшее.



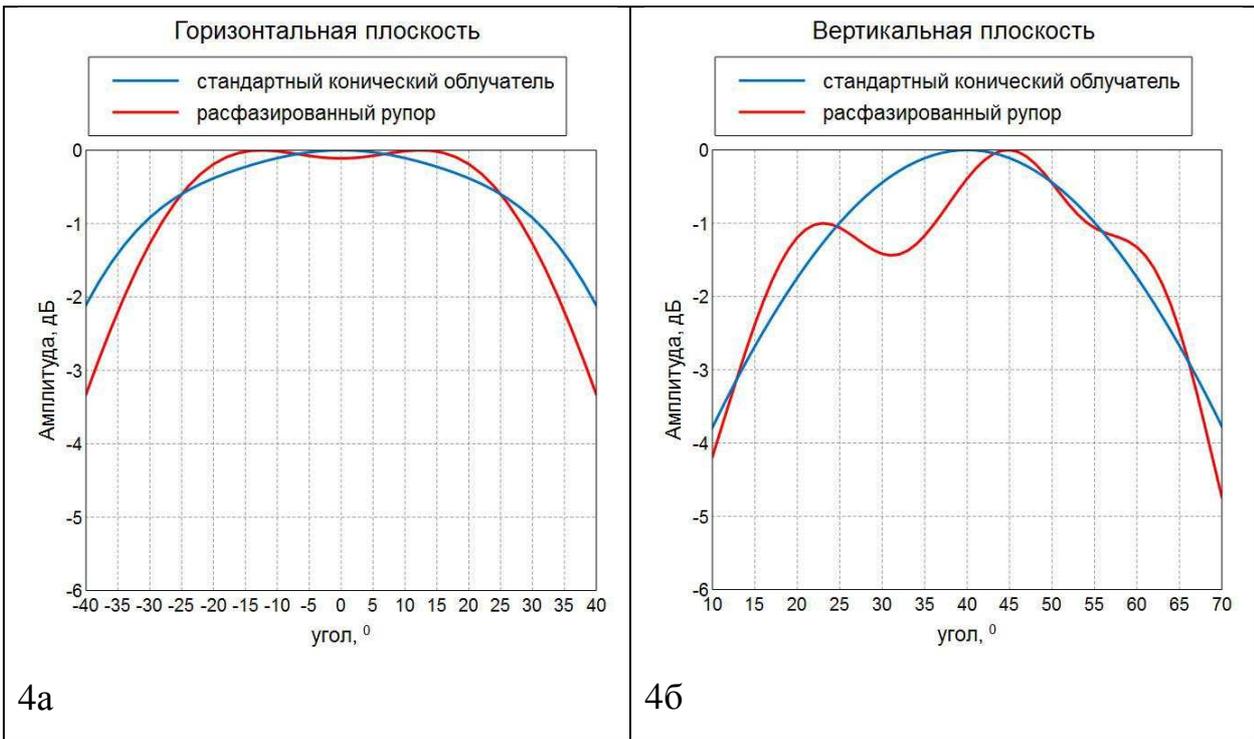


Рис. 4. Срезы амплитуды поля диаграммы направленности облучателей в горизонтальной (а) и в вертикальной (б) плоскостях; частота 10 ГГц.

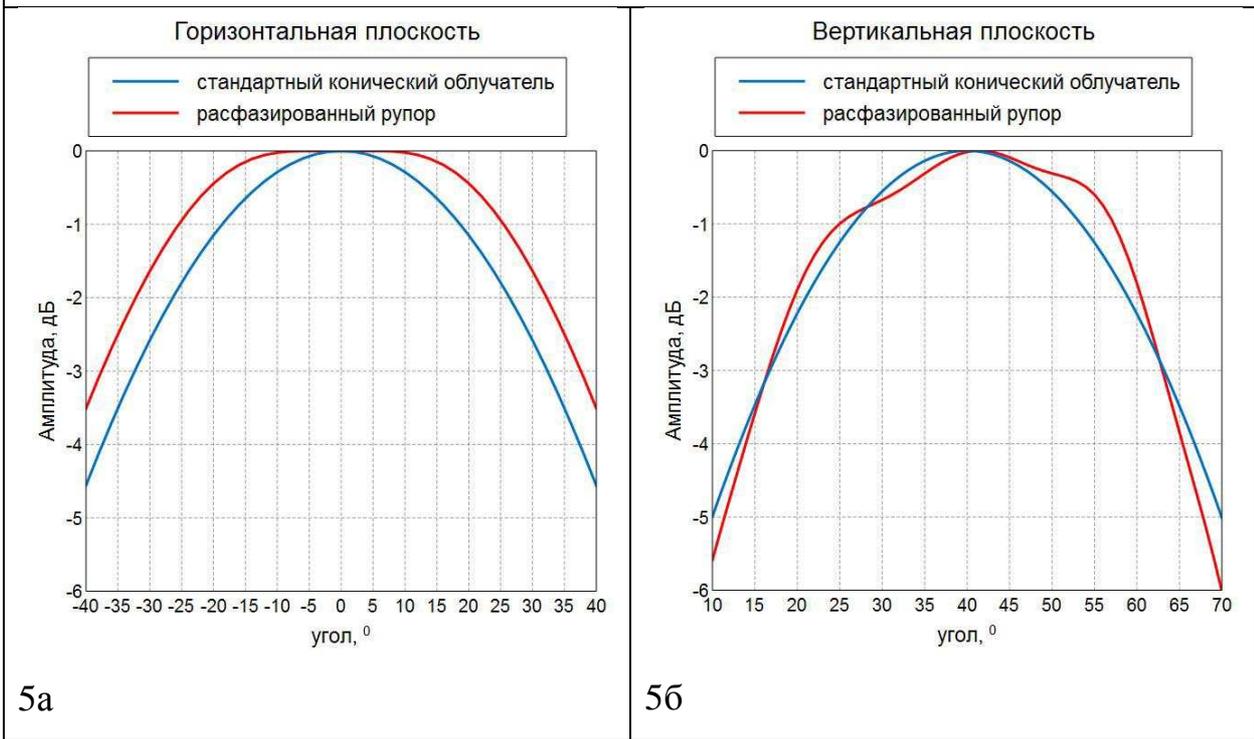


Рис. 5. Срезы амплитуды поля диаграммы направленности облучателей в горизонтальной (а) и в вертикальной (б) плоскостях; частота 12 ГГц.

В горизонтальной плоскости расфазированный рупор имеет более широкую диаграмму направленности, чем стандартный облучатель. В

вертикальной плоскости диаграмма несимметрична. Несимметричность диаграммы направленности на 10 ГГц примерно соответствует требуемой.

Сама форма диаграммы направленности меняется с частотой. На низких частотах диаграмма имеет воронкообразную форму с провалом в центре. В середине диапазона провал уменьшается, диаграмма выравнивается, появляется область с примерно постоянным значением амплитуды поля. На верхних частотах диаграмма начинает приближаться к диаграмме стандартного рупора, т.е. становится куполообразной. Отметим, что провал в центре на 8.2 ГГц составляет 2.3 дБ, поэтому расфазированный рупор на данной частоте будет формировать на зеркале коллиматора поле с провалом в центре. Однако, на частотах выше 9.8 ГГц поле коллиматора, облучаемого расфазированным рупором, может быть более равномерным, чем поле, сформированное стандартным коническим облучателем. Сравним непосредственно поля на частотах 9.8 – 12 ГГц сформированные стандартным и расфазированным коническими рупорными облучателями. Поляризация вертикальная, с наихудшим распределением поля.

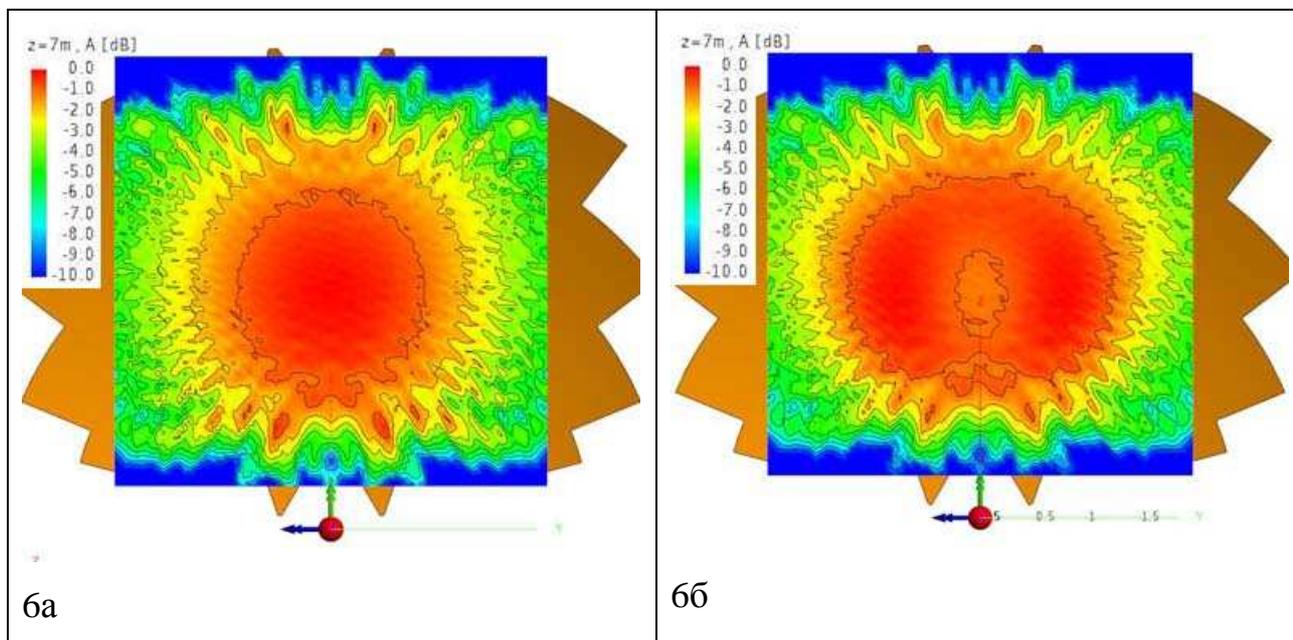


Рис. б: двумерная картина амплитуды поля в центре рабочей зоны в плоскости перпендикулярной оси зеркала. Частота 10 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

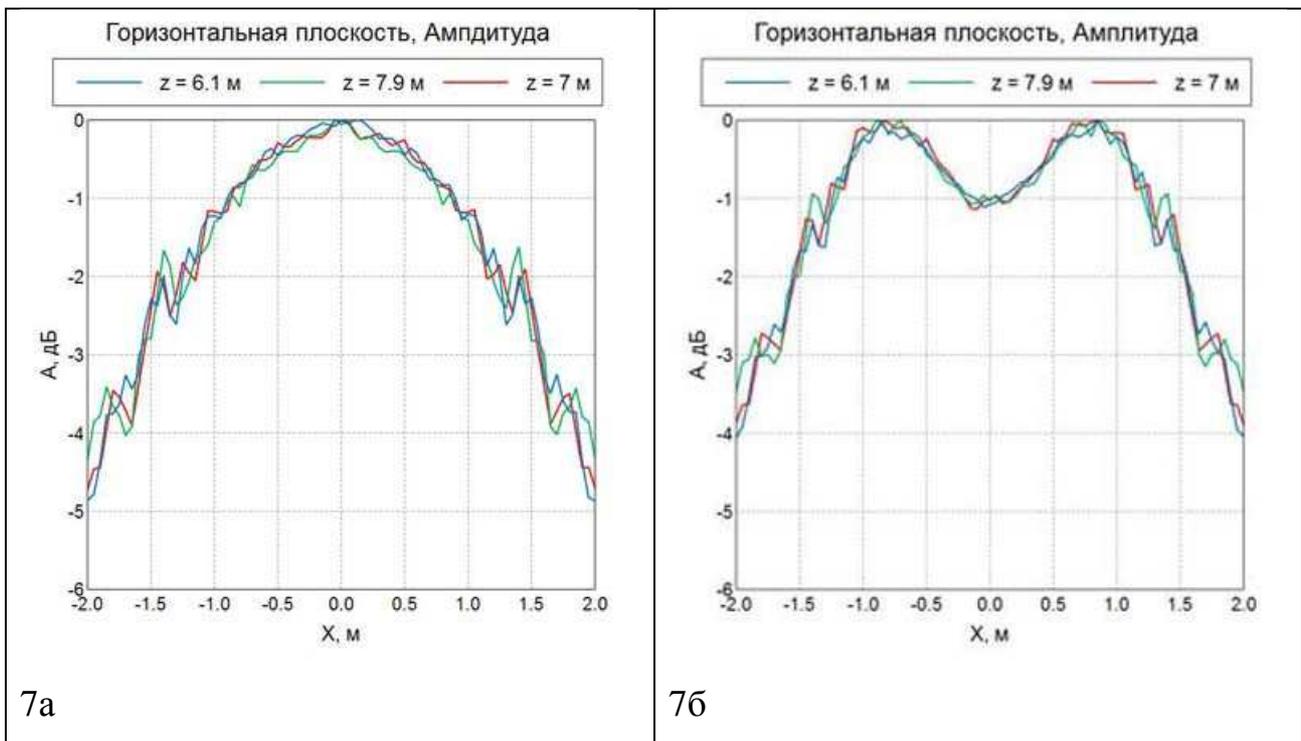


Рис. 7: горизонтальные срезы амплитуды поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 10 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

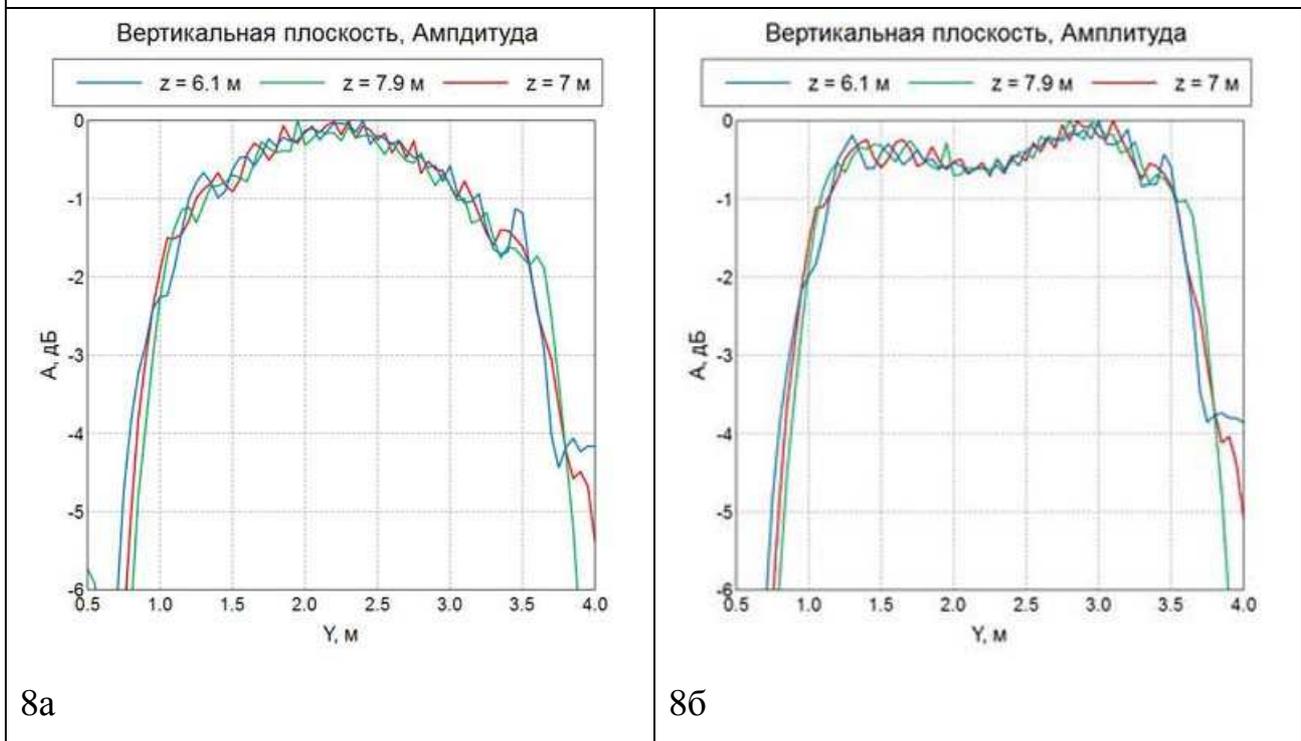


Рис. 8: вертикальные срезы амплитуды поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 10 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

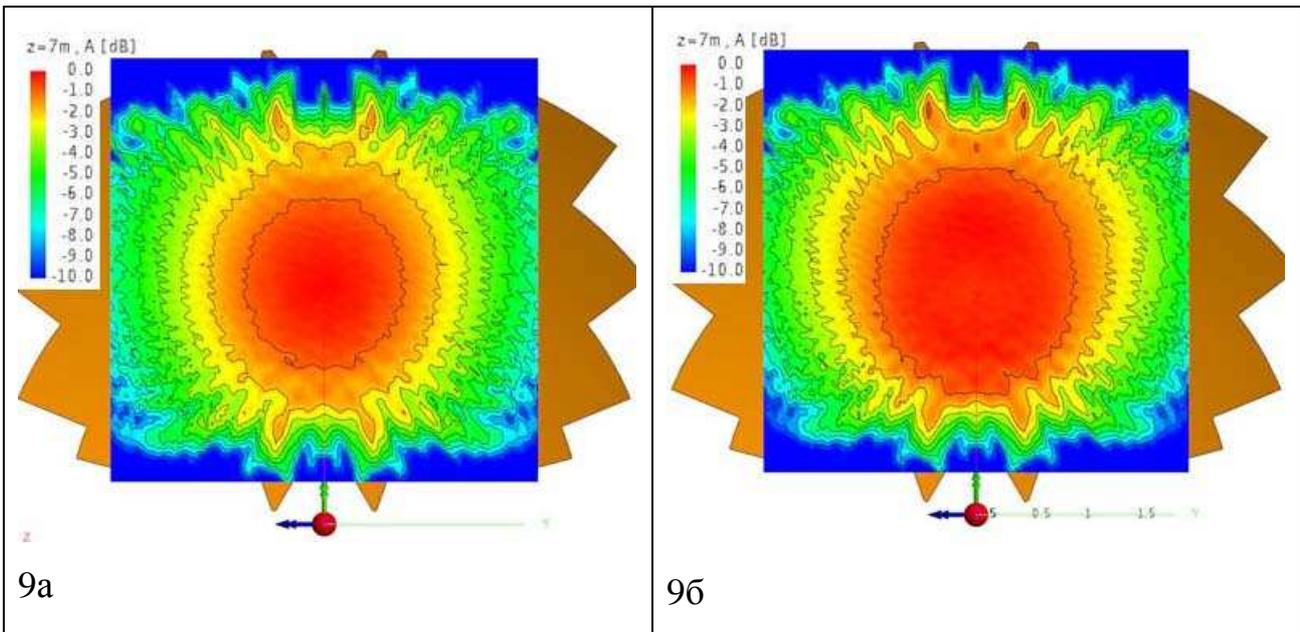


Рис. 9: двумерная картина амплитуды поля в центре рабочей зоны в плоскости перпендикулярной оси зеркала. Частота 12 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

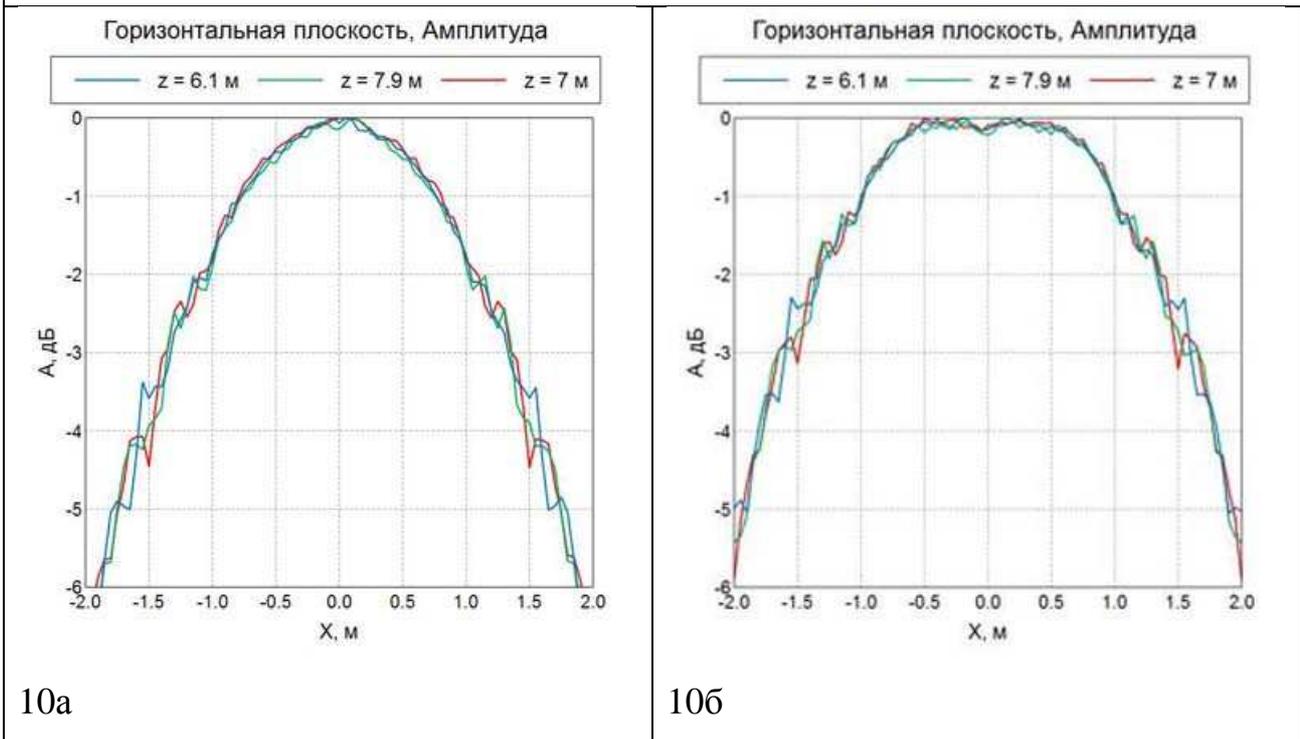


Рис. 10: горизонтальные срезы амплитуды поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 12 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

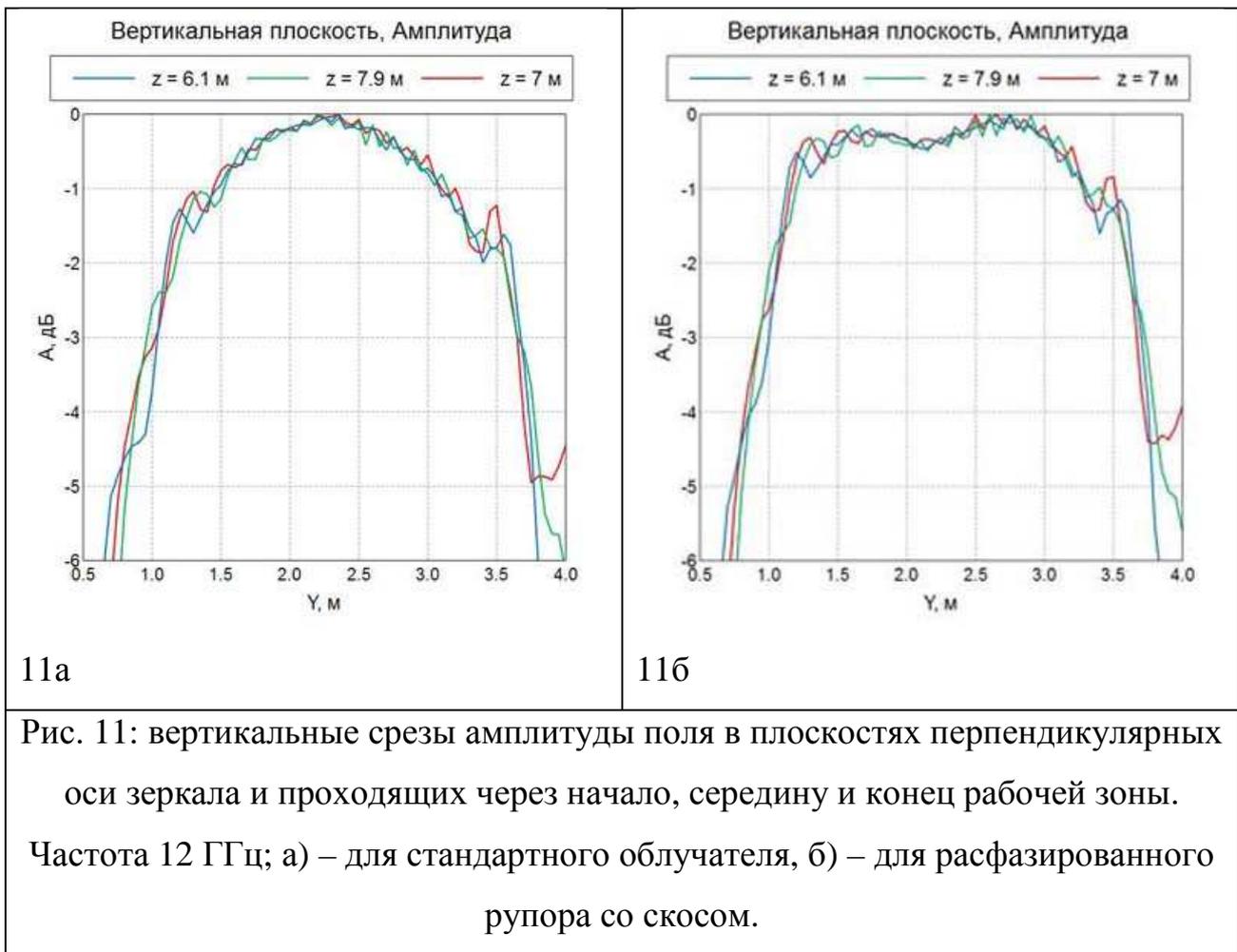


Рис. 11: вертикальные срезы амплитуды поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 12 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

На частотах выше 9.8 ГГц этот провал в центре становится 1 дБ и менее. По уровню 2 дБ для стандартного облучателя мы имеем рабочую зону 2 метра, а для рупорного облучателя со скосом образующей диаметр рабочей зоны составляет 2.5 метра. Таким образом, данный облучатель позволяет расширить рабочую зону в диапазоне частот 9.8 – 12 ГГц.

Расширение рабочей зоны достигнуто только в верхней половине рабочего диапазона частот.

Исследуем фазовые характеристики поля.

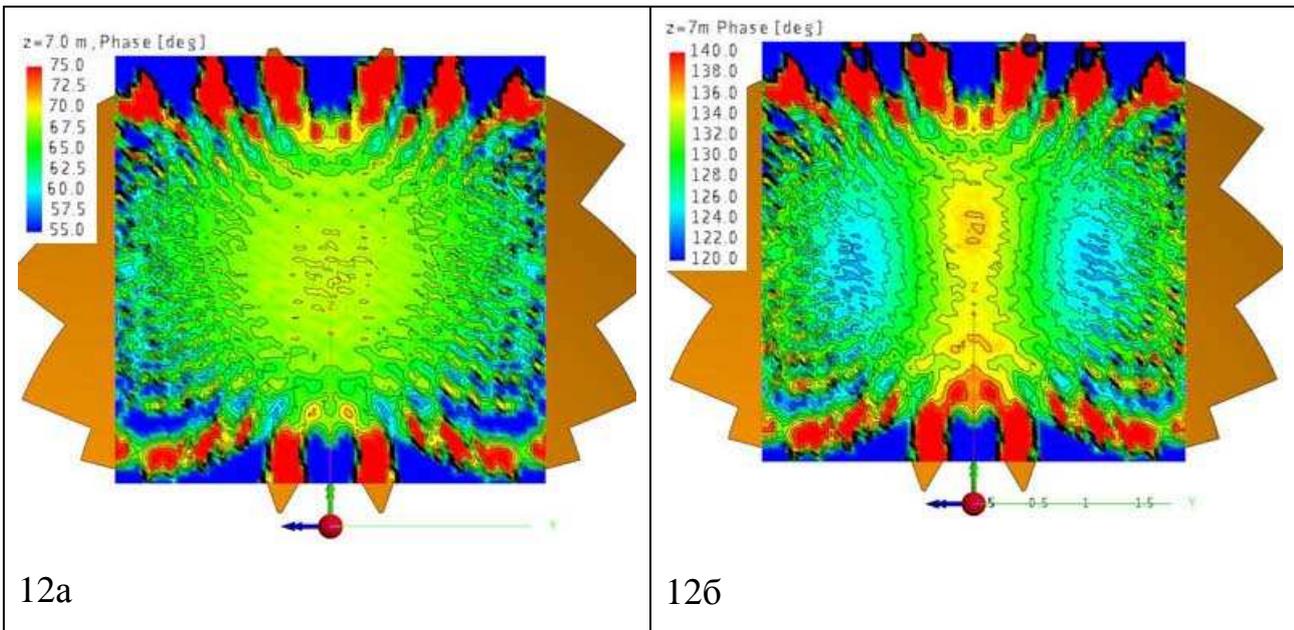


Рис. 12: двумерная картина фазы поля в центре рабочей зоны в плоскости перпендикулярной оси зеркала. Частота 10 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

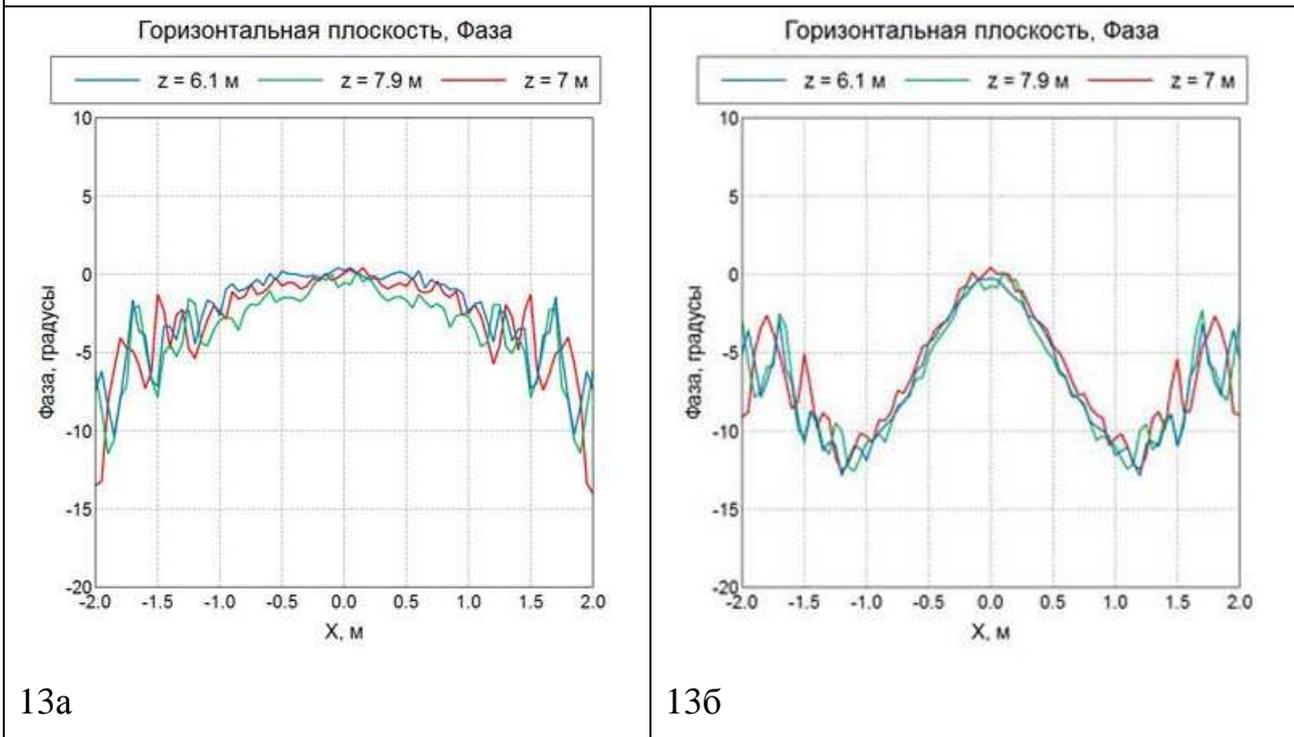


Рис. 13: горизонтальные срезы фазы поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 10 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

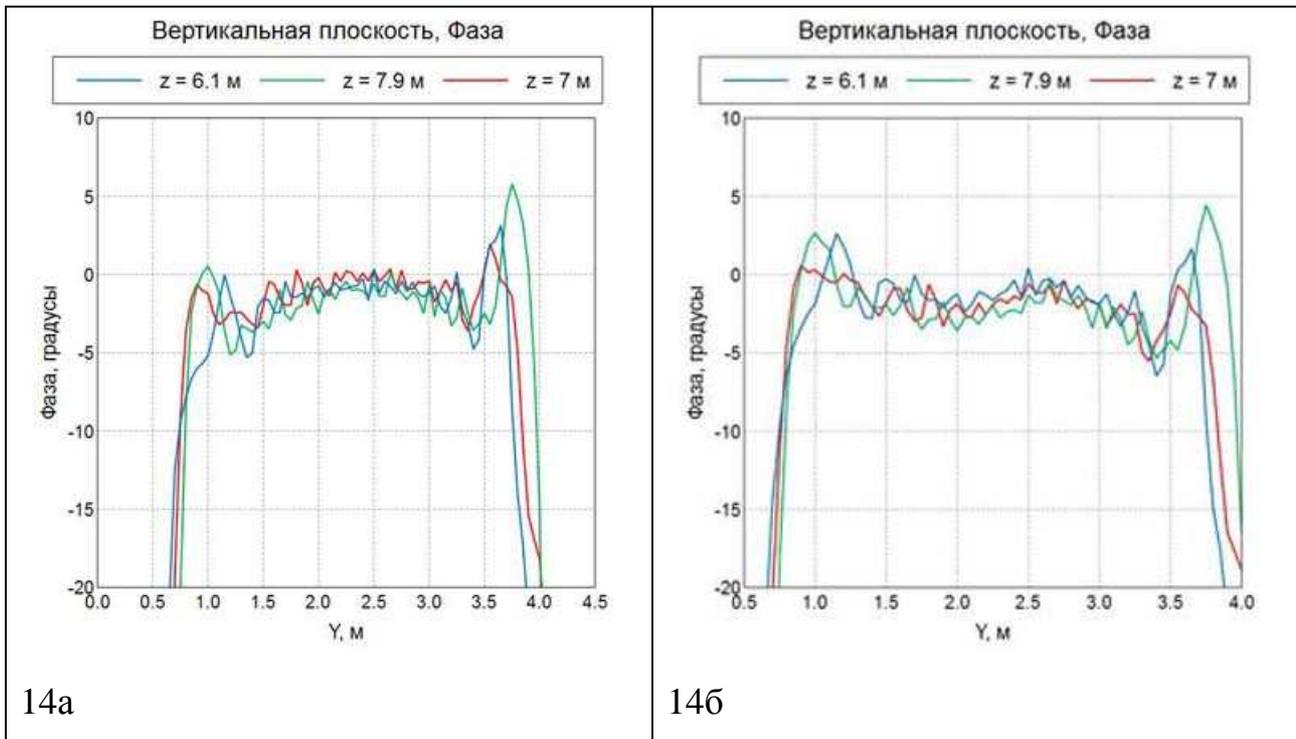


Рис. 14: вертикальные срезы фазы поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 10 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

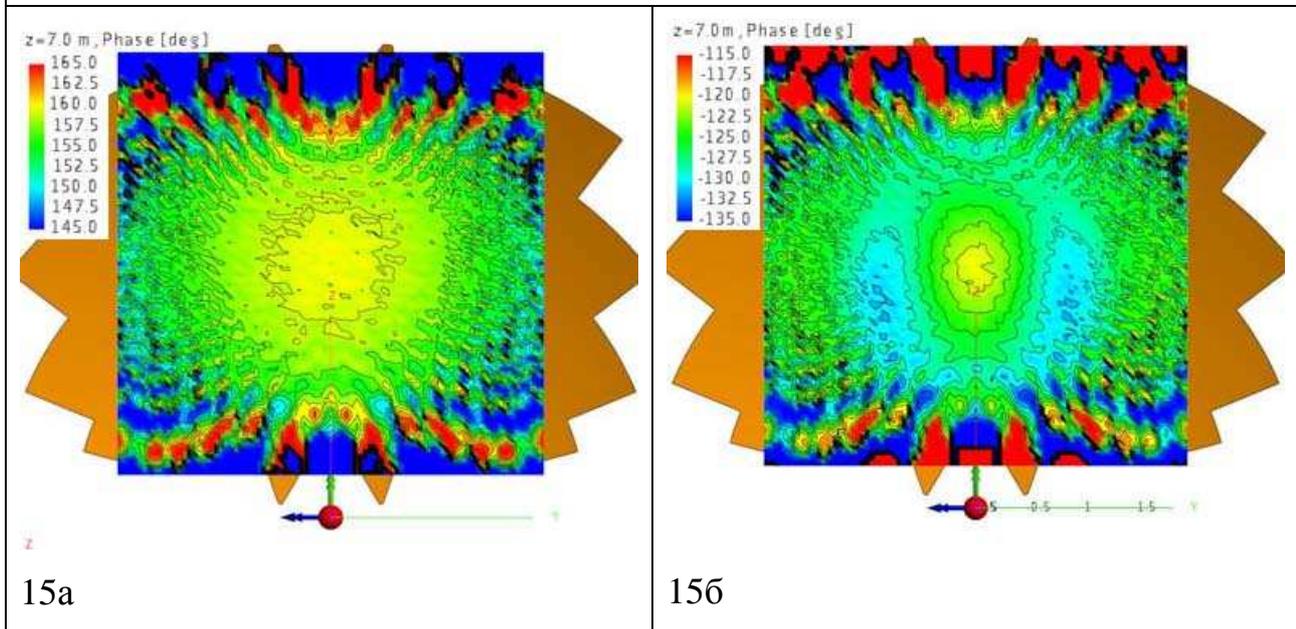


Рис. 15: двумерная картина фазы поля в центре рабочей зоны в плоскости перпендикулярной оси зеркала. Частота 12 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

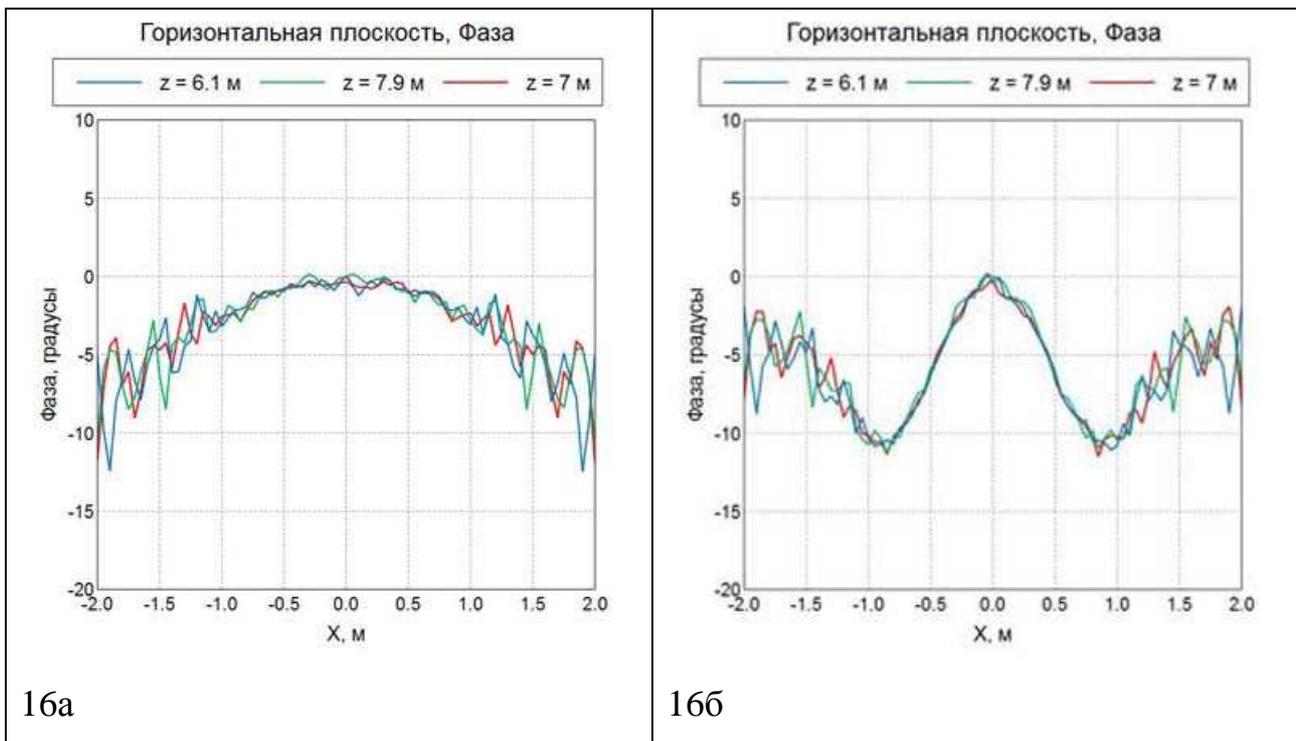


Рис. 16: горизонтальные срезы фазы поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 12 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

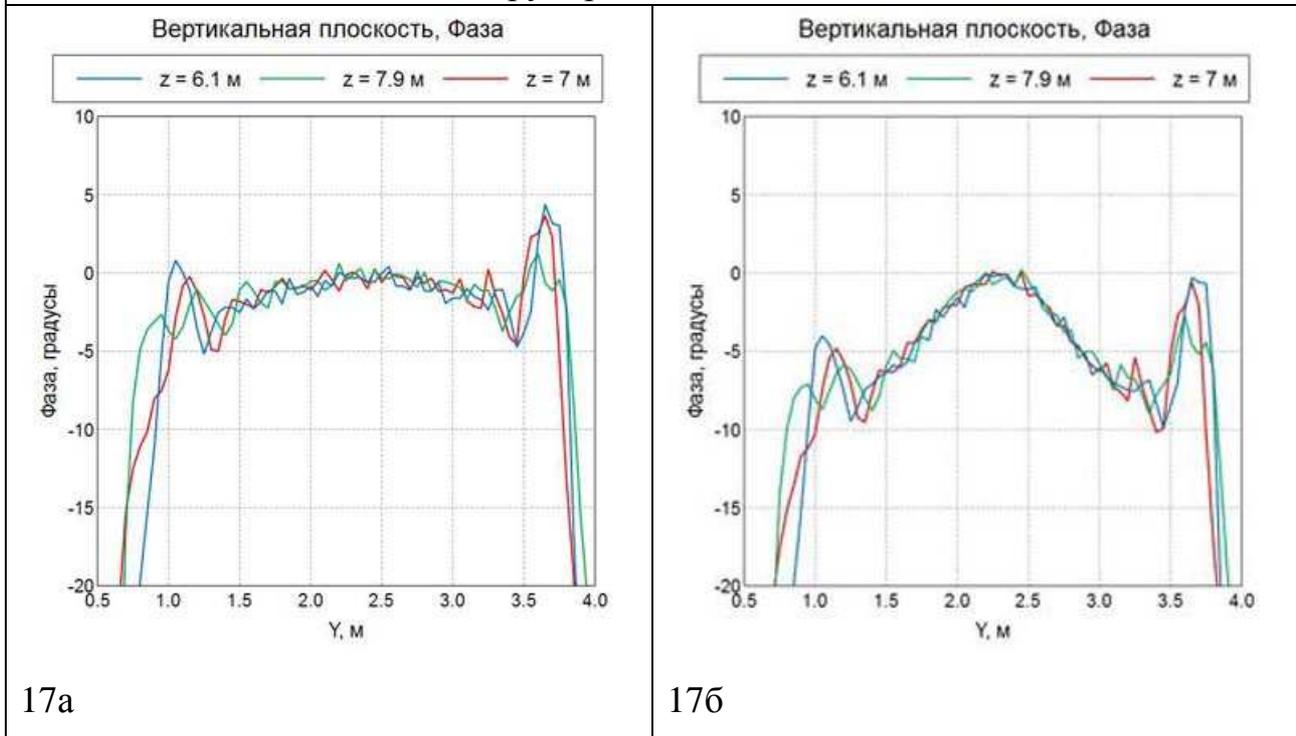


Рис. 17: вертикальные срезы фазы поля в плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через начало, середину и конец рабочей зоны. Частота 12 ГГц; а) – для стандартного облучателя, б) – для расфазированного рупора со скосом.

Фаза поля при использовании расфазированного рупора немного ухудшается. Но сильное искажение наблюдается только опять же на низких частотах, 8.2 ГГц, на частотах выше 9.8 ГГц неравномерность фазы составляет порядка 10 градусов, а это приемлемая неравномерность поля.

## 6. Заключение

Исследован расфазированный рупорный облучатель с изломом образующей и со скосом апертуры. Использование такого рупора в качестве облучателя коллиматора позволяет уменьшить неравномерность поля в рабочей зоне. Достигнута неравномерность поля  $\pm 1$  дБ в рабочей зоне диаметром 2.5 метра для диапазона частот 9.8 – 12 ГГц и неравномерность фазы  $\pm 5$  градусов. Это увеличивает диаметр рабочей зоны на 25%. Однако в нижней части рабочего диапазона частот происходит ухудшение распределения поля по сравнению со стандартным коническим рупорным облучателем, неравномерность составила 2.3 дБ в зоне диаметром 2.5 метра, что для ряда исследований еще считается приемлемой неравномерностью.

## Литература

1. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007. 266 с.
2. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. М.: "Связь", 1977. Ч. 1, 383 с.
3. Ерухимович Ю.А., Тимофеева А.А. Комбинированные рупорные облучатели для зеркальных антенн. // Труды НИИР, 1979. № 1.
4. Mather J. C. Broad-Band Flared Horn with Low Sidelobes. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981. V. AP-29, N. 6, November.
5. Burnside W. D., Chuang C. W. An Aperture-Matched Horn Design. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1982. V. AP-30, N. 4, July.
6. Olver A.D., Xiang J. Design of profiled corrugated horns. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1988. V. 36, N. 7, July.

7. James G.L., Clark P.R. Greene K.J. Diplexing feed assemblies for application to dual-reflector antennas. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003. V. 51, N. 5, May.
8. Балабуха Н. П., Григорьева М. И., Курочкин А. П. и др. Стержневой диэлектрический облучатель с диаграммой направленности специальной формы. // *Антенны*. 2001. №2.
9. Балабуха Н.П., Башарин А.А. Диэлектрический стержневой облучатель с расширенной полосой рабочих частот. // *Антенны*. 2008. № 12. 65-72 с.
10. Глазман Я. Д., Коршунова Н. В., Тимофеева А. А. Улучшение осевой симметрии главного лепестка и снижение уровня бокового излучения рупорных антенн. // *Труды НИИР*. 1990. № 3.
11. Дронова В. А., Козловская И. А., Тимофеева А. А., Хлопкова З. К. Выбор формы раскрыва неосесимметричных антенн в зависимости от диаграммы направленности облучателя. // *Труды НИИР*. 1987. № 3.
12. Тимофеева А.А. Определение геометрических размеров рупорных облучателей с диаграммами направленности близкими к оптимальным. // *Электросвязь*. 1977. №5.

### References

1. Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin V.S. *Kompaktnye poligony dlya izmerenii kharakteristik rasseyaniya ob'ektov*. [Compact range for measurements of object scattering characteristics]. Moscow, Nauka Publ. 2007. 266 p. (In Russian)
2. Aizenberg G.Z., Yampol'skii V.G., Tereshin O.N. *Antenny UKV*. [Antennas VHF]. Moscow, Svyaz' Publ. 1977. P. 1, 383 p. (In Russian)
3. Erukhimovich Y.A., Timofeeva A.A. *Kombinirovannye rupornye obluchately dlya zerkal'nykh antenn*. [Combine horn feed for reflectors]. *Trudy NIIR*. 1979. № 1. (In Russian)
4. Mather J. C. Broad-Band Flared Horn with Low Sidelobes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1981. V. AP-29, N. 6, November.
5. Burnside W. D., Chuang C. W. An Aperture-Matched Horn Design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1982. V. AP-30, N. 4, July.

6. Olver A.D., Xiang J. Design of profiled corrugated horns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1988. V. 36, N. 7, July.
7. James G.L., Clark P.R. Greene K.J. Diplexing feed assemblies for application to dual-reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003. V. 51, N. 5, May.
8. Balabukha N.P., Grigor'eva M.I., Kurochkin A.P. and others. Dielectric rod feed with radiation pattern of the special form. *Antenny – Antennas*. 2001. N.2. p. (In Russian)
9. Balabukha N.P., Basharin A.A. A rod dielectric wide-band feed. *Antenny – Antennas*. 2008. N.12. 65-72 p. (In Russian)
10. Glazman Y.D., Korshunova N.V., Timofeeva A.A. *Uluchshenie osevoi simmetrii glavnogo lepestka i snizhenie urovnya bokovogo izlucheniya rupornykh antenn*. [Improving the axial symmetry of the main lobe and the sidelobe reduction in the level of horn antennas]. *Trudy NIIR*. 1990. N3. (In Russian)
11. Dronova V.A., Kozlovskaya I.A. Timofeeva A.A., Khlopkova Z.K. *Vybor formy raskryva neosesimmetrichnykh antenn v zavisimosti ot diagrammy napravlenosti obluchatelya*. [Selection shape of an aperture nonaxisymmetric antennas depending on the radiation pattern of the feed]. *Trudy NIIR*. 1987. N3. (In Russian)
12. Timofeeva A.A. *Opredelenie geometricheskikh razmerov rupornykh obluchatelei s diagrammami napravlenosti blizkimi k optimalnym*. [Determination of the geometric dimensions of a feed horn antenna with radiation patterns close to optimal.]. *Electrosvyaz'*. 1977. N5. (In Russian)