

УДК 621.396.67

Исследование многоэлементного волноводного облучателя

Хандамиров В. Л.^{1,*}, Сергеев Д. А.¹

^{*}victor_kh@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассматривается многоэлементный облучатель, состоящий из круглых волноводов. Такой облучатель может быть использован для возбуждения антенн различного типа, когда необходимо сформировать многолучевую характеристику направленности, в которой лучи отстоят друг от друга на минимальное угловое расстояние. В работе впервые рассчитаны характеристики многоэлементного облучателя с учетом взаимного влияния элементов, изучены отличия в характеристиках направленности одиночного волновода и волноводов в многоэлементном облучателе. Исследование проводилось с помощью САПР на основе метода конечных разностей во временной области и метода конечных элементов.

Ключевые слова: облучатель, круглый волновод, диаграмма направленности, излучение, ширина диаграммы направленности

Введение

Космическая связь является одним из самых перспективных направлений в технике связи. Для покрытия территорий сложной конфигурации и обеспечения требований по электромагнитной совместимости необходимо формирование многолучевой диаграммы направленности. В [1] приведен достаточно подробный обзор состояния исследований в данной области. Такая диаграмма может быть создана с помощью линзовой антенны. В том случае, когда требуется создание группы лучей расположенных на близком угловом расстоянии, возникают достаточно жесткие ограничения на межцентровые расстояния между отдельными излучателями облучателя. Эти ограничения входят в противоречия с необходимостью создания диаграммы направленности облучателя нужной ширины. Во многих практических случаях используется гексагональная конфигурация расположения семи излучателей, показанная на рис.1. Здесь раскрыты излучателей находятся в плоскости xy и излучение направлено в направлении z , где расположена антенна достаточно больших электрических размеров, формирующая многолепестковую диаграмму направленности или сканирующая лучом при коммутации излучателей многоэлементного облучателя.

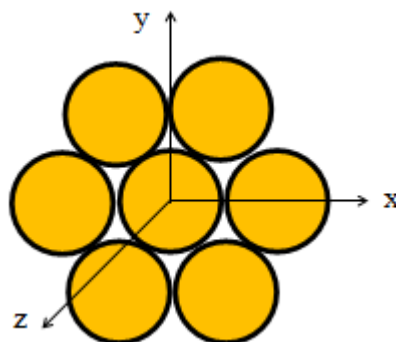


Рис. 1. Конфигурация системы волноводов или рупоров, используемых в качестве облучателей

Принцип функционирования антенны с многоэлементным облучателем поясним на примере облучателя в виде трех круглых волноводов (см. рис.2), расположенных в фокальной плоскости зеркальной или линзовой антенны [2 - 13]. В результате антенна формирует три различные диаграммы направленности, максимумы которых повернуты друг относительно друга на определенный угол. При этом для полного перекрытия зоны обслуживания или формирования пеленгационной характеристики необходимо, чтобы эти диаграммы пересекались на уровнях 3дБ, как это показано на рис.3.

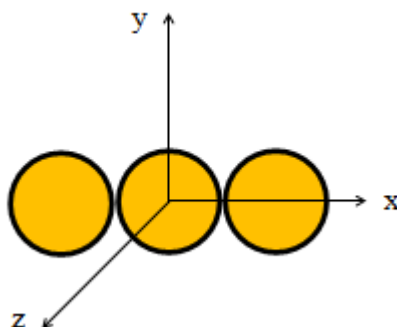


Рис.2. Облучатель из трех волноводных элементов

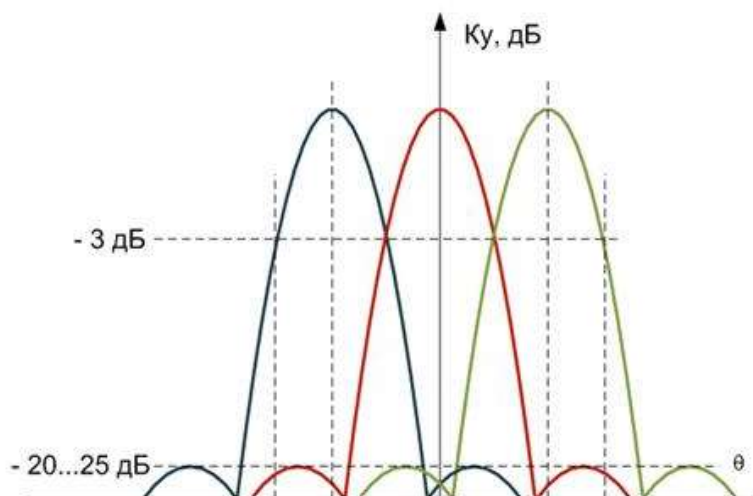


Рис.3. Результирующая многолучевая диаграмма направленности

В случае семиэлементного облучателя (рис.1) лучи антенны перекрывают некоторый пространственный сектор (зону обслуживания) см. рис.4.

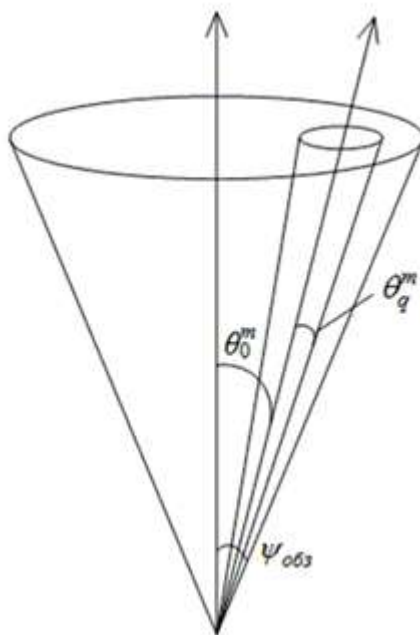


Рис. 4. Конус углов зоны обслуживания

Таким образом, очевидно, что характеристики антенны в целом в существенной степени зависят от характеристик облучателя.

Излучатели различных типов и построенные на их основе элементы антенн рассматривались в большом количестве работ, в частности, работах [1, 12, 13-21]. Однако данные по характеристикам многоэлементного облучателя с учетом взаимного влияния элементов практически отсутствуют. В данной работе впервые исследуется многоэлементный облучатель образованный круглыми волноводами с учетом их взаимного влияния.

Основные результаты, полученные в работе

Рассмотрим характеристики излучения открытого конца круглого волновода конечной длины l , имеющего поперечные размеры, обеспечивающие одноволновый режим. Выбор круглого волновода весьма удобен для формирования двухполяризационного канала или поля произвольной поляризации.

Примем вначале диаметр волновода равным $2a/\lambda=0,784$, где a радиус волновода, что обеспечивает одноволновый режим работы волновода. Это значение можно варьировать, в процессе оптимизации характеристик. Предполагается, что материалом облучателя при моделировании является идеальный проводник, а толщина стенки t составляет $0,083\lambda$. Для определения ДН облучателя будем использовать моделирование в программе CST Microwave Studio. На рисунке 5 показана модель одиночного волновода возбуждаемого волноводным портом.

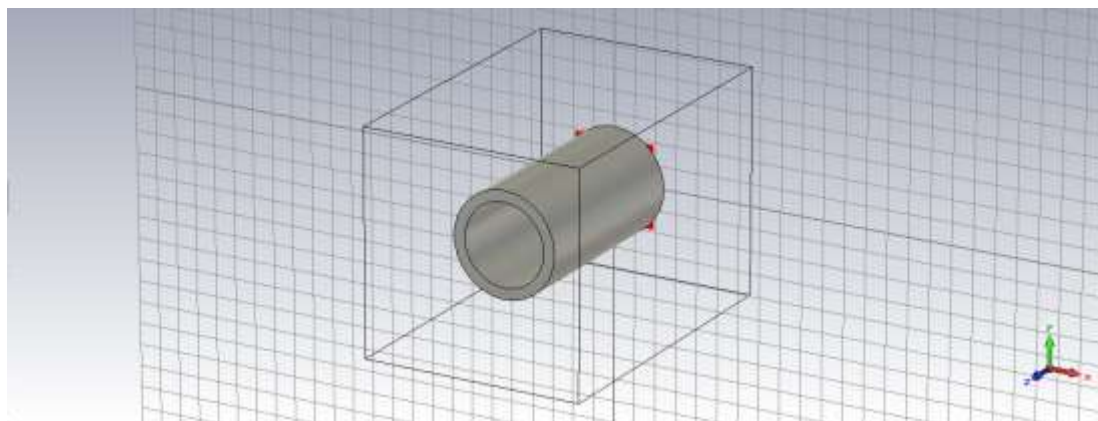


Рис. 5. 3D модель одиночного облучателя

Для данной модели рассчитаны диаграммы направленности в E (рис. 6) и H (рис. 7) плоскостях при возбуждении волновода полем горизонтальной поляризации. На рис. 8 показана структура возбуждающего поля в волноводном порте.

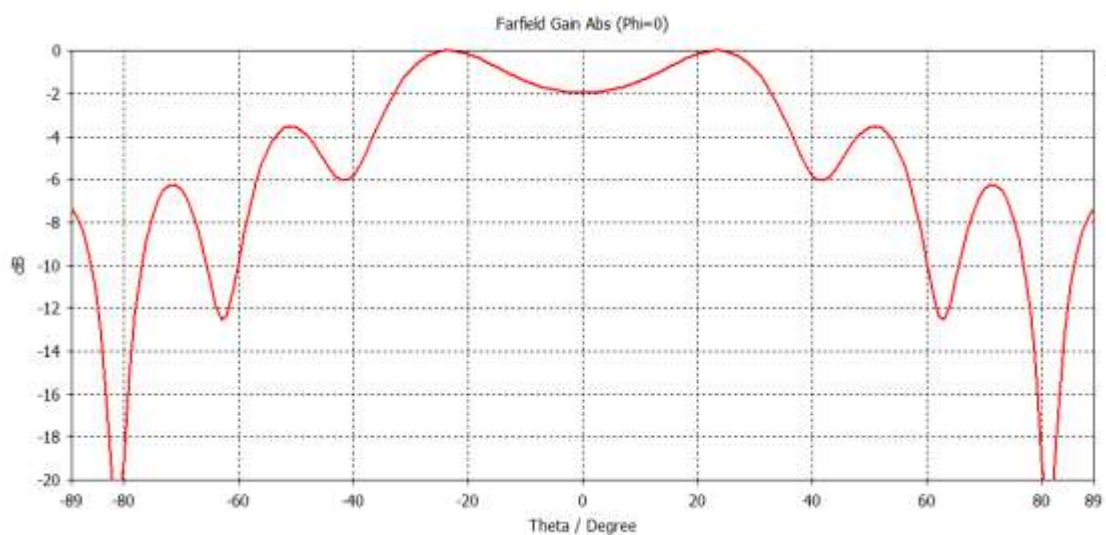


Рис. 6. ДН одиночного облучателя в плоскости E

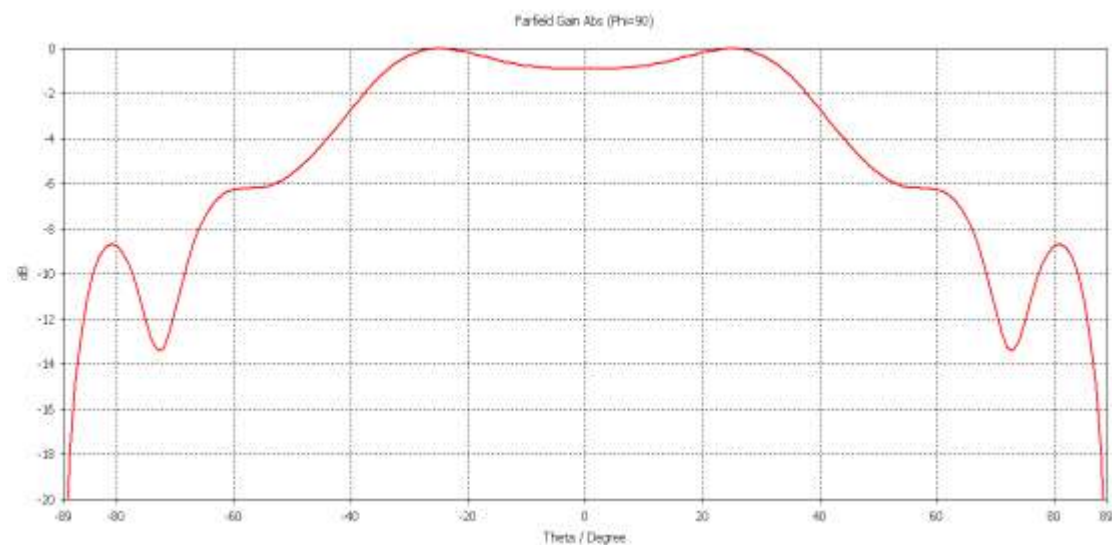


Рис. 7. ДН одиночного облучателя в плоскости H

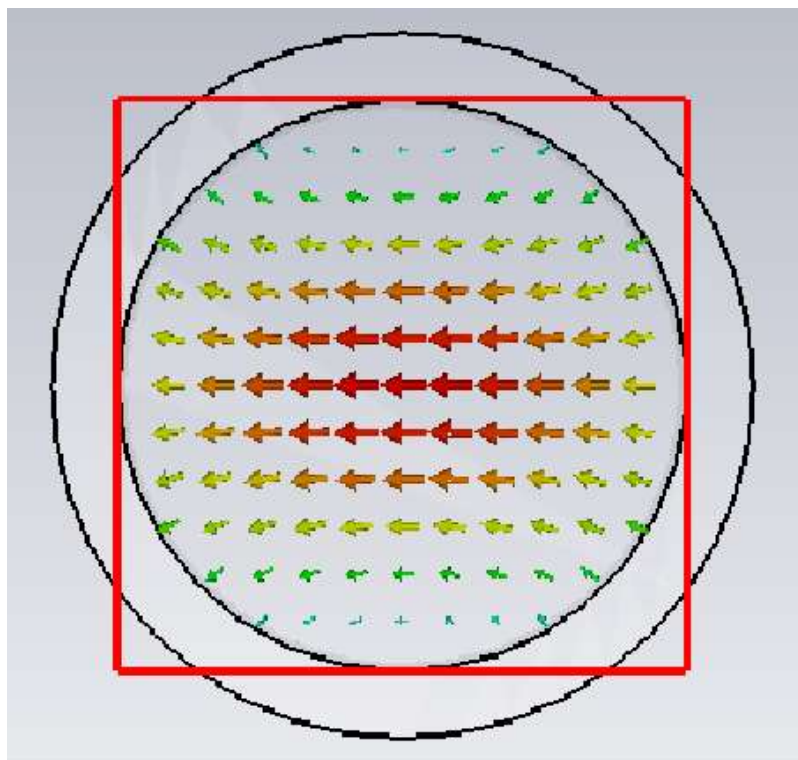


Рис. 8. Структура поля в волноводном порте.

Как видно из расчетов облучатель имеет ширину диаграммы направленности в плоскости E 70° и в плоскости H 82° . Уровень боковых лепестков выше в плоскости E , а в плоскости H диаграмма более гладкая.

Коэффициент отражения в полосе частот, где f_0 частота, на которой рассчитаны диаграммы, показан на рис.9.

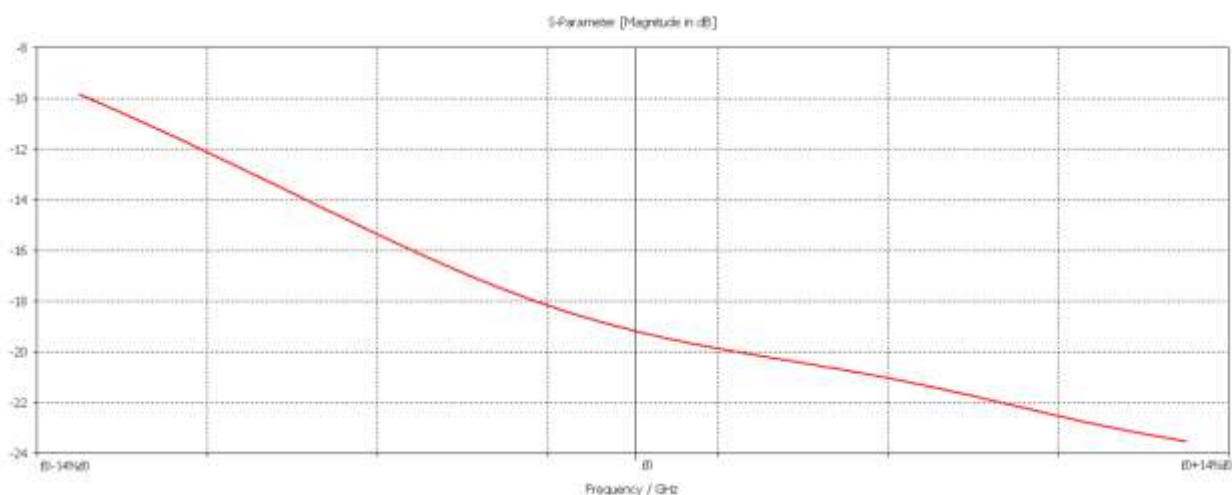


Рис.9. Величина модуля коэффициента отражения в полосе частот

Как видно он в пределах 5% полосы изменяется от -17дБ до -20дБ.

Представляет интерес исследование взаимного влияния излучателей составляющих многоэлементный облучатель, приводящее к изменению их характеристик по сравнению с характеристиками одиночного излучателя размещенного в свободном пространстве. Можно предположить, что эти характеристики будут зависеть также от положения конкретного излучателя в системе многоэлементного облучателя.

Модель 7-ми элементного облучателя показана на рис.10.

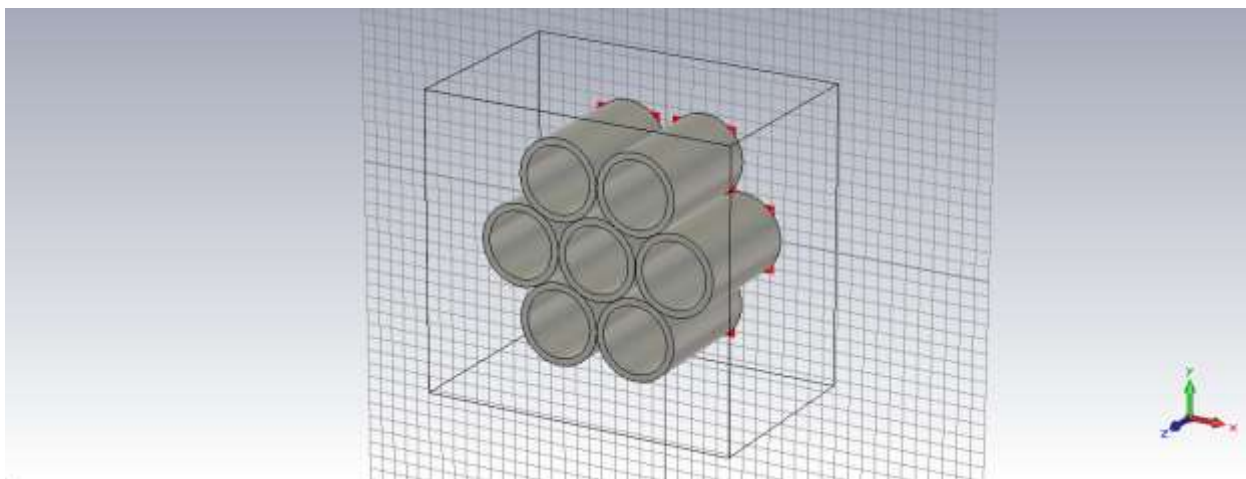


Рис. 10. 3D-модель 7-ми элементного облучателя

На рис. 11 показан вид сзади на многоэлементный облучатель с нумерацией портов. В дальнейшем при исследовании этой модели активным полагался лишь один из портов, а остальные порты играли роль согласованных нагрузок.

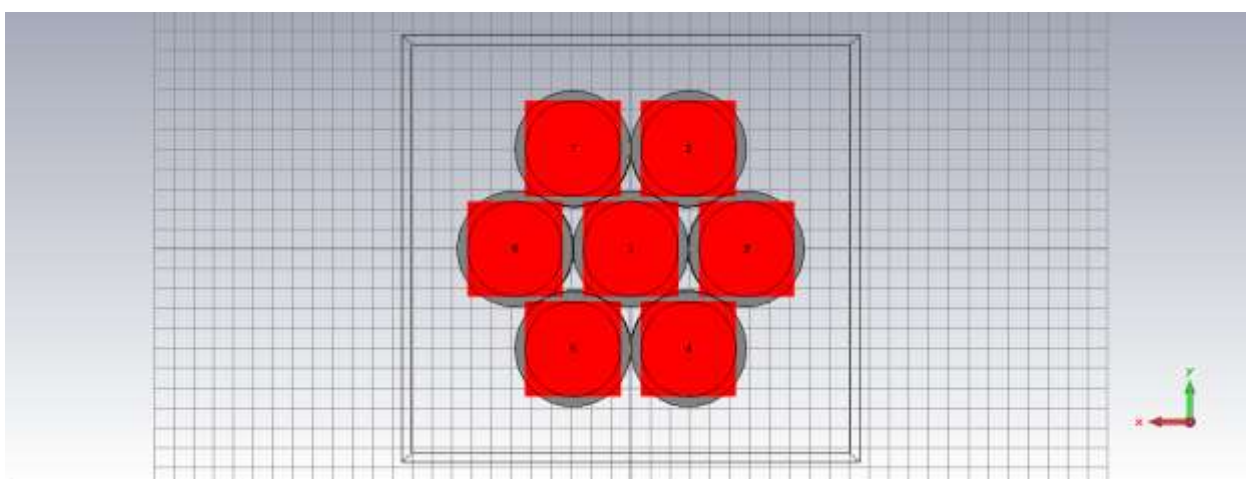


Рис. 11. Вид сзади на компьютерную модель с нумерацией портов.

На рис. 12 и 13 показаны диаграммы направленности, формируемые центральным излучателем 1 при остальных излучателях нагруженных на согласованную нагрузку в двух ортогональных плоскостях.

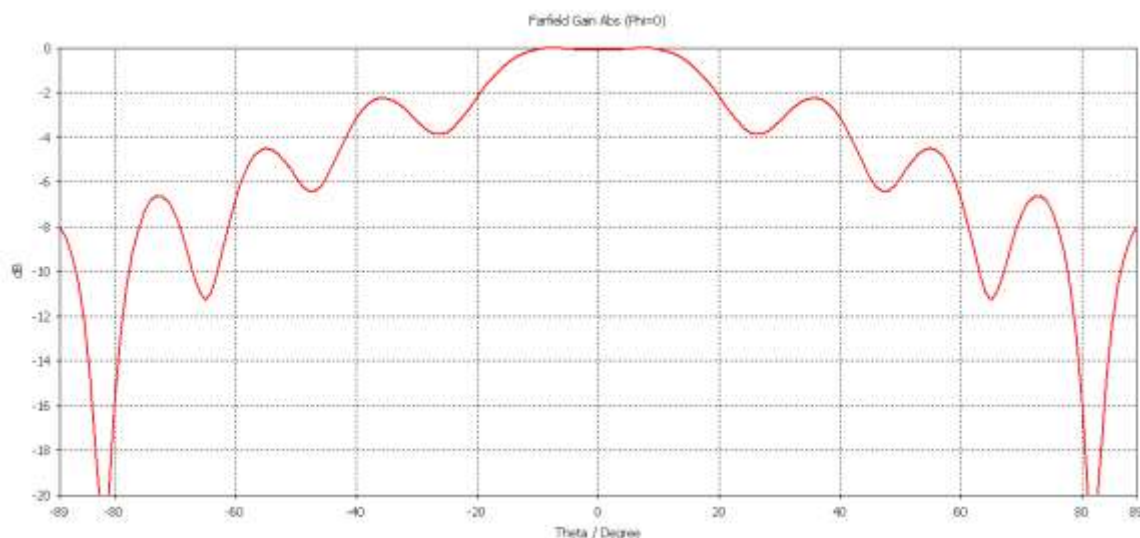


Рис. 12. – ДН центрального элемента 7-ми элементного облучателя в декартовых координатах в плоскости *E*

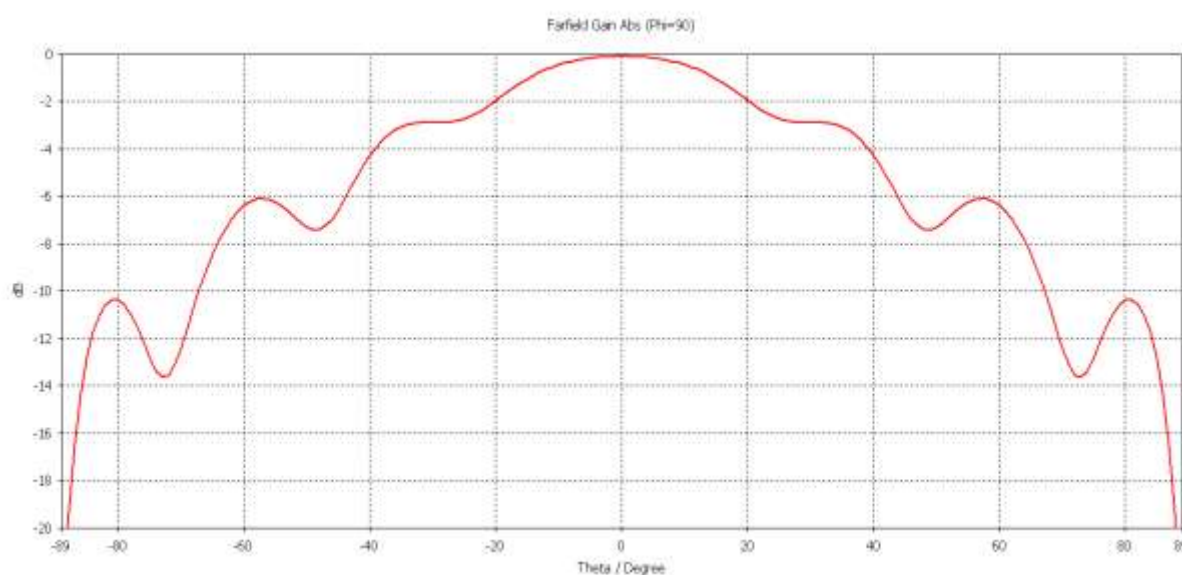


Рис. 13. – ДН центрального элемента 7-ми элементного облучателя в декартовых координатах в плоскости *H*

При возбуждении центрального волновода в окружении 6-ти волноводов, вид диаграммы направленности по сравнению с диаграммой направленности одиночного излучателя изменился. В плоскости *E* появились провалы до -3,9 дБ на углах $\pm 25^\circ$, а без учета этих провалов диаграмма расширилась до 80° . В плоскости *H* диаграмма напротив сузилась до 70° .

На рис. 14 и 15 представлены ДН волновода с номером 2 соответственно в *E* и *H* плоскостях.

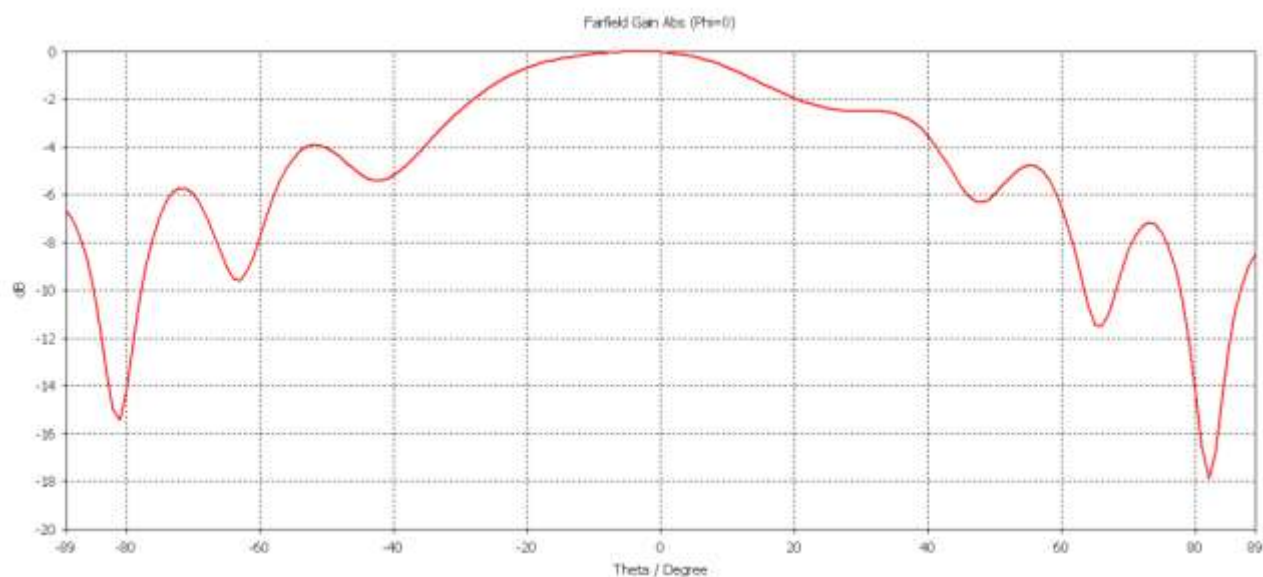


Рис. 14 – ДН волновода с номером 2 в E плоскости

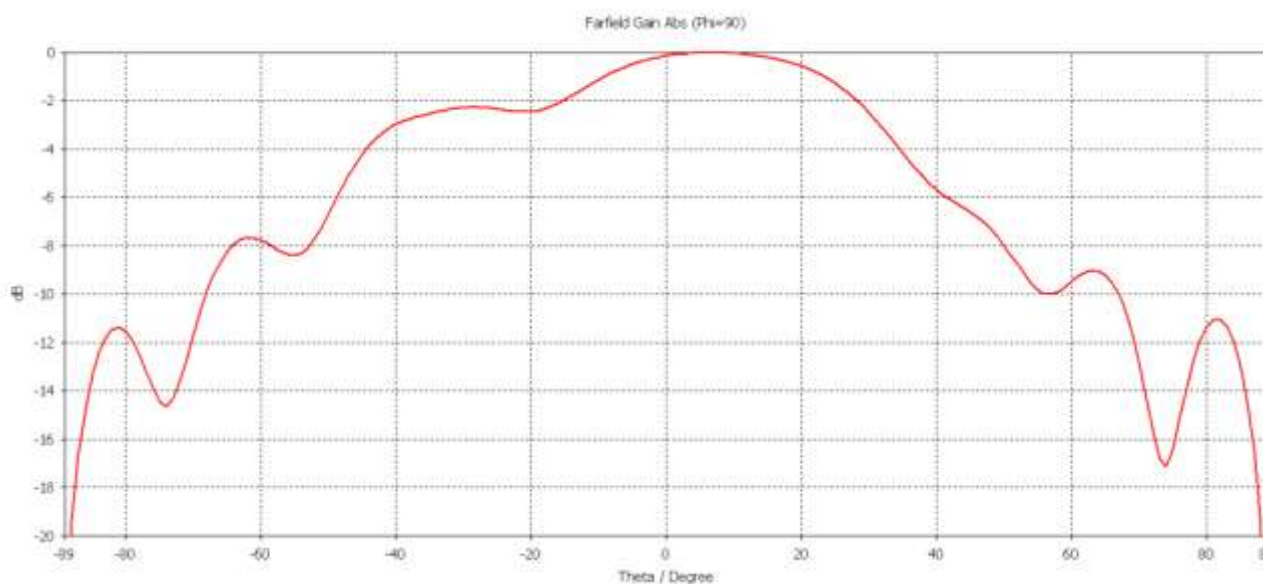


Рис. 15 – ДН волновода с номером 2 в H плоскости

Как видно из приведенных графиков диаграммы стали не симметричными. Максимум диаграммы в плоскости E сместился на -3° , ширина диаграммы направленности составляет 70° , а середина области выше -3 дБ ориентирована в направлении $+3^\circ$. Для плоскости H максимум ориентирован в направлении $+7^\circ$, ширина диаграммы направленности составляет 72° , а середина области выше -3 дБ ориентирована в направлении -4° .

На рис. 16 и 17 представлены ДН волновода с номером 3 соответственно в E и H плоскостях.

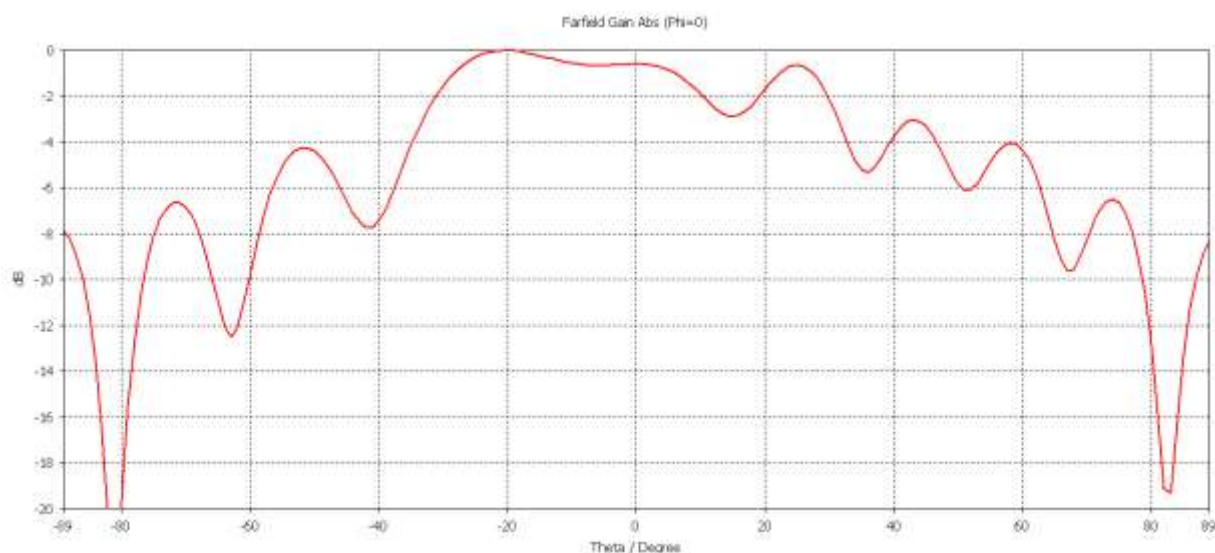


Рис. 16 – ДН волновода с номером 3 в E плоскости

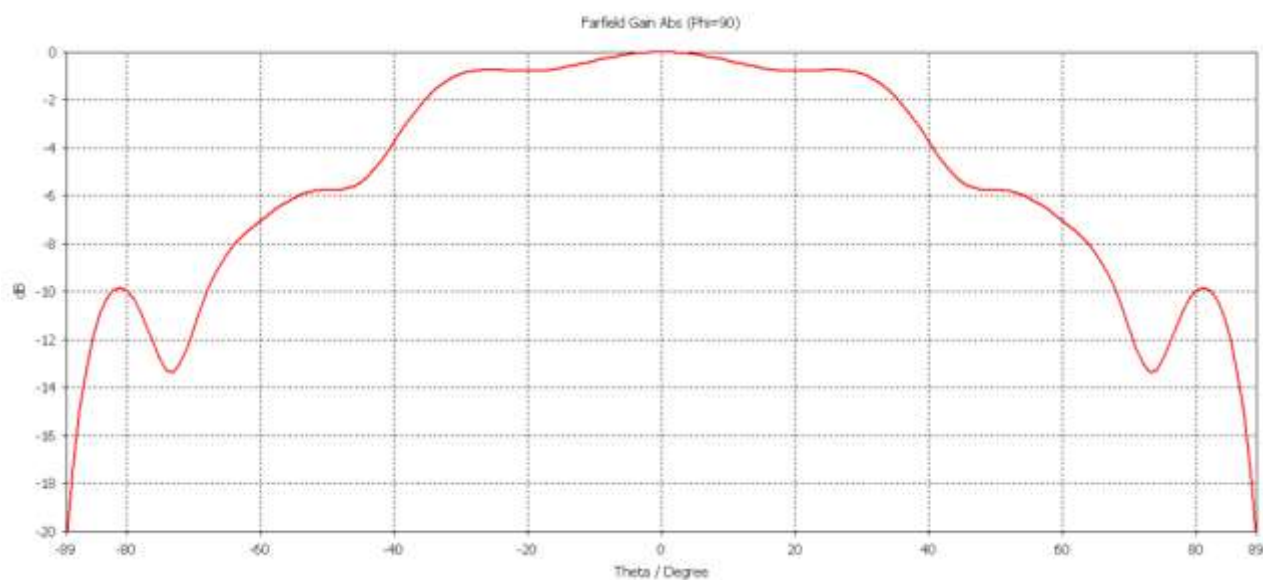


Рис. 17 – ДН волновода с номером 3 в H плоскости

Диаграмма направленности в E плоскости не симметрична. Максимум диаграммы в плоскости E сместился на -20° , ширина диаграммы направленности составляет 65° , а середина области выше -3 дБ ориентирована в направлении -2° . В плоскости H диаграмма направленности симметрична, что можно было предположить заранее в виду симметрии облучателя относительно плоскости xoz , при этом максимум ориентирован в нулевом направлении, а ширина диаграммы направленности составляет 77° .

На рис. 18 и 19 представлены ДН волновода с номером 4 соответственно в E и H плоскостях.

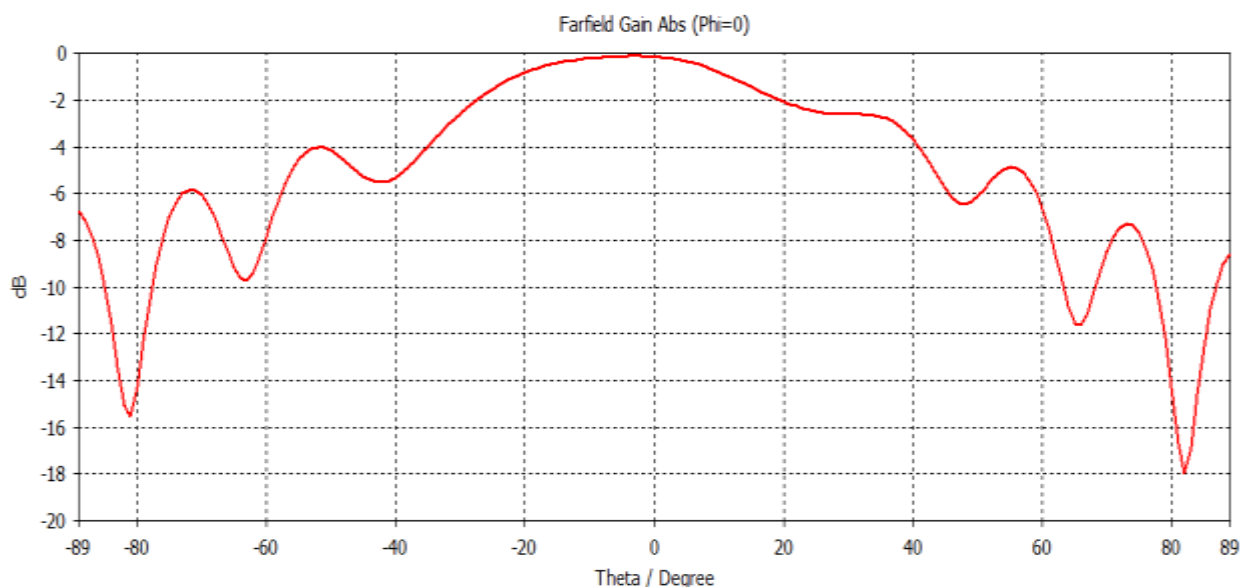


Рис. 18 – ДН волновода с номером 4 в E плоскости

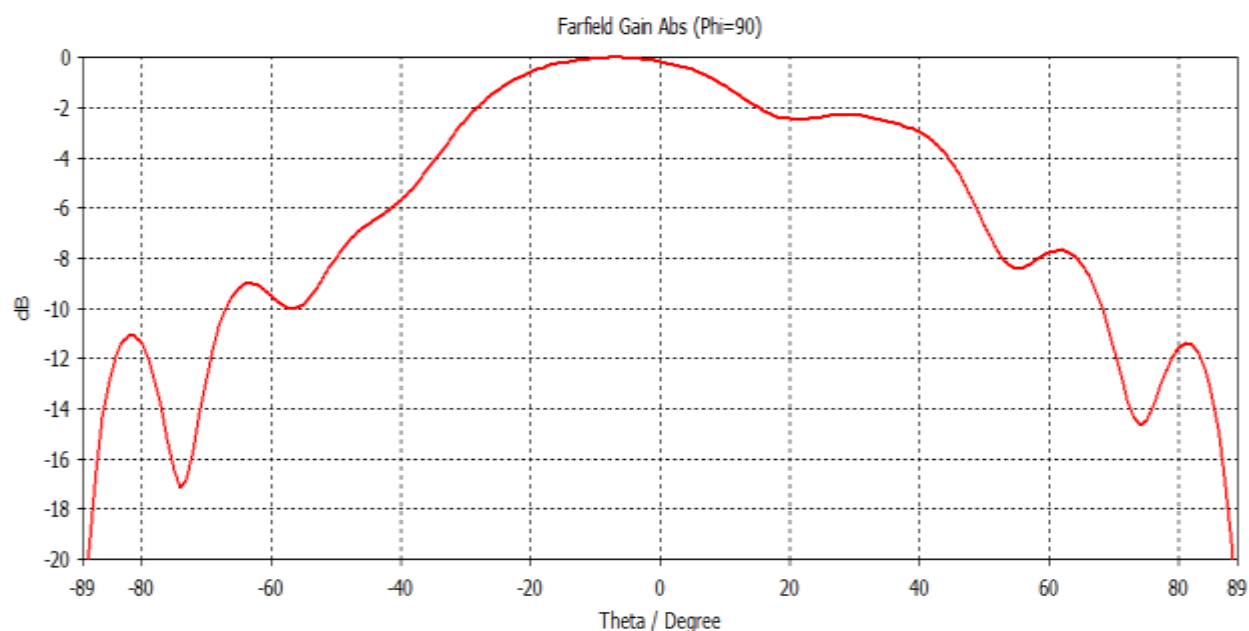


Рис. 19 – ДН волновода с номером 4 в H плоскости

Как не сложно заметить диаграмма направленности в плоскости E совпадает с диаграммой направленности в плоскости E элемента с номером 2, а диаграмма направленности в плоскости H является зеркальным отражением относительно вертикальной оси диаграммы направленности в плоскости H этого же элемента (см. рис.11). Максимум ориентирован в направлении -7° , ширина диаграммы направленности составляет 72° , а середина области выше -3 дБ ориентирована в направлении $+4^\circ$.

Как показали расчеты, диаграммы направленности элементов с номерами 5, 6, 7 имеют характеристики аналогичные характеристикам элементов 2, 3, 4 или зеркальные, что определяется симметрией конструкции.

Заключение

Впервые подробно исследованы характеристики многоэлементного облучателя образованного круглыми волноводами с учетом их взаимного влияния.

Основные параметры рассчитанных диаграмм направленности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номер излучателя	Ширина ДН в <i>Е</i> плоскости	Ширина ДН в <i>Н</i> плоскости	Ориентация ДН в <i>Е</i> плоскости	Ориентация ДН в <i>Н</i> плоскости
1	80°	70°	0°	0°
2	70°	72°	3°	-4°
3	65°	77°	-2°	0°
4	70°	72°	3°	4°
5	70°	72°	-3°	4°
6	65°	77°	2°	0°
7	70°	72°	-3°	-4°

В диаграмме направленности излучателя 1 имеются два провала на углах 26° и -26° до уровня -4 дБ. Под ориентацией понимается направление середины области выше -3дБ. Средняя ширина диаграммы направленности в плоскости *Е* составляет 70°, а в плоскости *Н* 73°, т. е. диаграммы направленности практически осесимметричны. Полученные данные могут быть использованы при выборе фокусного расстояния линзовой или зеркальной антенны. Полученные данные о повороте срединной области диаграммы направленности могут быть использованы для компенсации этого поворота путем поворота самого волновода в противоположном направлении.

Список литературы

1. Милосердов А.С. Бортовая многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи.// Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2014.
2. Вечтомов В.А., Бей Н.А., Зимин В.Н., Крылов А.В., Чурилин С.А., Ямашкин В.П. Многолучевая антенна геостационарного космического ретранслятора системы спутниковой связи. // Тезисы XVI Междунар. Научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2010, т. 2.
3. Вечтомов В.А., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А. Принципы построения многолучевой антенны для проектируемой Российской спутниковой системы высокоскоростного доступа //Матер.IV Всероссийской конф. «Радиолокация и радиосвязь».– Москва, 2010.

4. Вечтомов В.А., Пономарев Л.В., Милосердов А.С. Многолучевая антенна для системы спутниковой связи на основе решетки из крупноапертурных излучателей // «X Международный. Конф. «Авиация и космонавтика – 2011», 8-10 ноября 2011 г., (Тезисы докл.) – М.: МАИ, 2011.
5. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С., Воронов Р.Х. Бортовая антенная решетка из крупноапертурных излучателей с глобальным обслуживанием с геостационарной орбиты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостр.» 2012.- Спец. выпуск №7 «Радиооптические технологии в приборостроении». с. 29.
6. Вечтомов В.А., Зимин В.Н., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А. Бортовая многолучевая антенна Ка-диапазона для зонированного обслуживания территории РФ спутниковой связью с высокоскоростным доступом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостр.», 2012.- Спец. выпуск №7 «Радиооптические технологии в приборостроении». с. 70.
7. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Бей Н.А., Крицын В.А. Гибридные зеркальные антенны // В кн. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. 4-е, изд. перераб и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.: ил.
8. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Терехин О.В., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка системы спутниковой связи // Патент на изобретение №2509399 от 05.07.2012 г.
9. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Мешковский В.Е. Оптимизированная антенная решетка из крупноапертурных излучателей для бортового ретранслятора. // Тезисы докл. – Воронеж, XIX Междунар. НТК «Радиолокация, Навигация и связь», 16-18 апреля 2013 г., т.2.
10. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решётка системы спутниковой связи из крупноапертурных линзовых излучателей. // Антенны 2013 .- №9 (196), с. 23.
11. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С., Воронов Р.Х., Мешковский В.Е., Терехин О.В., Чурилин С.А. Оптимизированная антенная решетка из крупноапертурных излучателей для бортового ретранслятора. // XIX Междунар. НТК «Радиолокация, навигация, связь» 16-18 апр. 2013. г. Воронеж. Сб. докл. конф. «RLNC-2013» НПФ «САКВОЕЕ» ООО Том 2. с. 1107.
12. Пономарёв Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка системы спутниковой связи из крупноапертурных линзовых излучателей. // Антенны. 2013. №9. С.23.
13. Пономарёв Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи. // Н11 Научно-технические серии. Выпуск 3: Устройства СВЧ и антенные системы. Кн.1 Антенные системы локации, навигации и радио-

- связи. Коллективная монография/ под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2013,. – 176 с.: ил.
14. Виленский А.Р., Литун В.И., Коровушкина А.С. Исследование характеристик излучения антенных решеток с применением анализа во временной области. // XX Международная НТК«Радиолокация, навигация, связь». Сборник докладов.RLNC-2014. с. 714.
 15. Литун В.И., Прохорова В.В., Русов Ю.С., Фадеева Н.Ю. Печатная антенная решетка сантиметрового диапазона волн. // 21-я Международная Крымская конференция«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011)» Материалы конф. В 2т. с 559.
 16. Голубцов М.Е., Литун В.И., Вечтомов В.А. Принципы построения бортовых антенных систем для систем спутниковой связи на основе гибридно-линзовых антенн. // XX Международная НТК«Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2014. Сборник докладов. 2014 г., с. 720.
 17. Хандамиров В.Л., Николаев С.В., Литун В.И. Численное исследование элементов сканирующих антенн. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Приборостроение», Выпуск 3. 2013 г. с. 99.
 18. Крехтунов В.М., Будкин А.А., Комиссарова Е.В. Дифракция электромагнитных волн на двумерно-периодической антенной решетке волноводно-диэлектрических излучателей. // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. в 2 т. 2014. с. 536.
 19. Комиссарова Е.В., В.М. Крехтунов Обобщение опыта разработки элементной базы фазированных антенных решеток коротковолновой части миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями. // Антенны, Выпуск 4, 2014. с.38.
 20. Голубцов М.Е., Русов Ю.С., Овечкин В.С., Комиссарова Е.В., Крехтунов В.М. Разработка элементной базы для ФАР КВЧ диапазона. // Материалы XIX научно-технической конференции (аспирантов и молодых специалистов). 2008. с.430.
 21. Русов Ю.С., Костина Н.Ю. , Крехтунов В.М. Волноводно-диэлектрические излучатели для ФАР. Вопросы оптимизации. // Материалы XIX научно-технической конференции (аспирантов и молодых специалистов). ОАО «НИИП им. Тихомирова». 2008. с 439.

The Study of Multi-Element Waveguide Feed

V.L. Handamirov^{1,*}, D.A. Sergeev¹

^{*}victor_kh@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: feed, circular waveguide, radiation pattern, radiation, beam width

The article considers a multi-element feed consisting of the circular waveguides. This feed can be used to excite antennas of various types, for example a mirror, lens or phased antenna arrays with spatial excitation. The feed of this type should be used in cases when it is necessary to form a multi-beam radiation pattern in which there is a minimum angular distance between the beams. Besides, in some cases for reasons of design to use the weak radiation pattern antenna of other types is inappropriate. The paper for the first time provides calculating the multi-element feed patterns, obtaining the new results, and studies the differences in radiation pattern characteristics of a single waveguide and a waveguide in the presence of the similar ones. CAD was used to conduct the study based on the finite difference method in the time domain and on the finite element one.

References

1. Милосердов А.С. Бортовая многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи. // Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2014.
2. Вечтомов В.А., Бей Н.А., Зимин В.Н., Крылов А.В., Чурилин С.А., Ямашкин В.П. Многолучевая антенна геостационарного космического ретранслятора системы спутниковой связи. // Тезисы XVI Междунар. Научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2010, т. 2.
3. Вечтомов В.А., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А. Принципы построения многолучевой антенны для проектируемой Российской спутниковой системы высокоскоростного доступа // Матер. IV Всероссийской конф. «Радиолокация и радиосвязь». – Москва, 2010.
4. Вечтомов В.А., Пономарев Л.В., Милосердов А.С. Многолучевая антенна для системы спутниковой связи на основе решетки из крупноапертурных излучателей // «X Меж-

- дунар. Конф. «Авиация и космонавтика – 2011», 8-10 ноября 2011 г., (Тезисы докл.) – М.: МАИ, 2011.
5. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С., Воронов Р.Х. Бортовая антенная решетка из крупноапертурных излучателей с глобальным обслуживанием с геостационарной орбиты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостр.» 2012.- Спец. выпуск №7 «Радиооптические технологии в приборостроении». с. 29.
 6. Вечтомов В.А., Зимин В.Н., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А. Бортовая многолучевая антенна Ка-диапазона для зонированного обслуживания территории РФ спутниковой связью с высокоскоростным доступом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостр.», 2012.- Спец. выпуск №7 «Радиооптические технологии в приборостроении». с. 70.
 7. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Бей Н.А., Крицын В.А. Гибридные зеркальные антенны // В кн. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. 4-е, изд. перераб и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.: ил.
 8. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Терехин О.В., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка системы спутниковой связи // Патент на изобретение №2509399 от 05.07.2012 г.
 9. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Мешковский В.Е. Оптимизированная антенная решетка из крупноапертурных излучателей для бортового ретранслятора. // Тезисы докл. – Воронеж, XIX Междунар. НТК «Радиолокация, Навигация и связь», 16-18 апреля 2013 г., т.2.
 10. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решётка системы спутниковой связи из крупноапертурных линзовых излучателей. // Антенны 2013 .- №9 (196), с. 23.
 11. Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С., Воронов Р.Х., Мешковский В.Е., Терёхин О.В., Чурилин С.А. Оптимизированная антенная решетка из крупноапертурных излучателей для бортового ретранслятора. // XIX Междунар. НТК «Радиолокация, навигация, связь» 16-18 апр. 2013. г. Воронеж. Сб. докл. конф. «RLNC-2013» НПФ «САКВОЕЕ» ООО Том 2. с. 1107.
 12. Пономарёв Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка системы спутниковой связи из крупноапертурных линзовых излучателей. // Антенны. 2013. №9. С.23.
 13. Пономарёв Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи. // Н11 Научно-технические серии. Выпуск 3: Устройства СВЧ и антенные системы. Кн.1 Антенные системы локации, навигации и радиосвязи. Коллективная монография/ под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2013,. – 176 с.: ил.

14. Виленский А.Р., Литун В.И., Коровушкина А.С. Исследование характеристик излучения антенных решеток с применением анализа во временной области. // XX Международная НТК«Радиолокация, навигация, связь». Сборник докладов.RLNC-2014. с. 714.
15. Литун В.И., Прохорова В.В., Русов Ю.С., Фадеева Н.Ю. Печатная антенная решетка сантиметрового диапазона волн. // 21-я Международная Крымская конференция«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011)» Материалы конф. В 2т. с 559.
16. Голубцов М.Е., Литун В.И., Вечтомов В.А. Принципы построения бортовых антенных систем для систем спутниковой связи на основе гибридно-линзовых антенн. // XX Международная НТК«Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2014. Сборник докладов. 2014 г., с. 720.
17. Хандамиров В.Л., Николаев С.В., Литун В.И. Численное исследование элементов сканирующих антенн. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Приборостроение», Выпуск 3. 2013 г. с. 99.
18. Крехтунов В.М., Будкин А.А., Комиссарова Е.В. Дифракция электромагнитных волн на двумерно-периодической антенной решетке волноводно-диэлектрических излучателей. // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. в 2 т. 2014. с. 536.
19. Комиссарова Е.В., В.М. Крехтунов Обобщение опыта разработки элементной базы фазированных антенных решеток коротковолновой части миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями. // Антенны, Выпуск 4, 2014. с.38.
20. Голубцов М.Е., Русов Ю.С., Овечкин В.С., Комиссарова Е.В., Крехтунов В.М. Разработка элементной базы для ФАР КВЧ диапазона. // Материалы XIX научно-технической конференции (аспирантов и молодых специалистов). 2008. с.430.
21. Русов Ю.С., Костина Н.Ю. , Крехтунов В.М. Волноводно-диэлектрические излучатели для ФАР. Вопросы оптимизации. // Материалы XIX научно-технической конференции (аспирантов и молодых специалистов). ОАО «НИИП им. Тихомирова». 2008. с 439.