

# РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ИЗЛУЧАТЕЛЯ ФАР НА СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАГНЕТРОНАХ 3-ММ ДИАПАЗОНА.

Иванов И.М.<sup>1</sup>, Скрипкин Н.И.<sup>1</sup>, Ефремова М.В.<sup>1</sup>,  
Вагин А.И.<sup>2</sup>, Курушин А.А.<sup>3</sup>,

1-ОАО «Плутон» г. Москва, 2-ЗАО «РТИ-Радио» г. Москва, 3-НИУ «МЭИ» г. Москва.

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках проведенных ранее работ [1-5] была экспериментально определена возможность создания системы  $N$  синхронизированных импульсных магнетронных генераторов 3-мм аддитивно работающих на  $N + 1$  нагрузок. Были рассчитаны и изготовлены синхронизирующие электродинамические структуры (мосты, тройники, системы тройников). В общем случае наличие  $N+1$  синхронизированных по частоте и фазе выводов позволяет создать излучатель ФАР высокого уровня мощности с управлением режима сканирования с помощью ферритовых фазовращателей. В данной работе представлены результаты расчета и экспериментального исследования излучателя ФАР с питанием от 3-х синхронизированных магнетронов. Структурная схема объекта исследования представлена на Рис. 1., где  $M1, M2, M3$  – магнетроны.

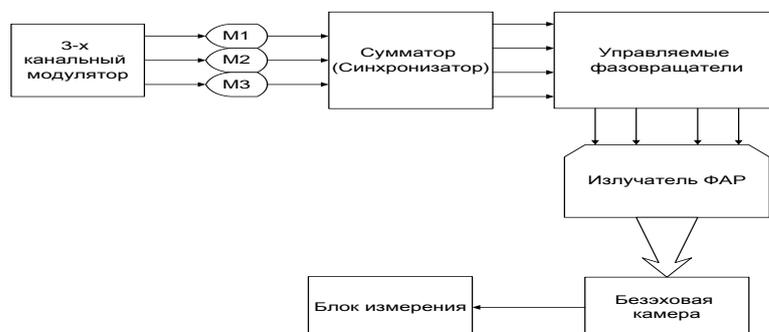


Рис. 1

## 1. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

### 1.1 СУММАТОР

В качестве базовой схемы для суммирования и синхронизации 3-х магнетронных генераторов была выбрана схема Е. Дейвида [6] на основе волноводов сечением 2,4x1,2 мм, представленная на рис. 2.

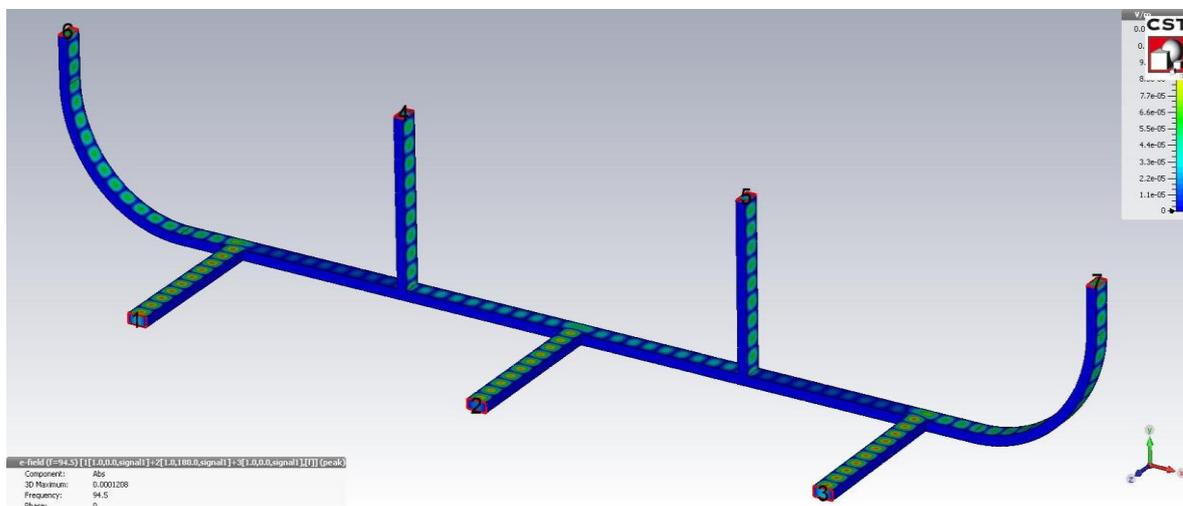


Рис. 2

Данная схема состоит из 3-х тройников Н-типа и 2-х тройников Е-типа, связанных между собой отрезками волноводов. При этом порты 1,2,3 являются входными, а порты 4,5,6,7 выходными. С помощью математического моделирования был выполнен расчет и оптимизация геометрических размеров сумматора для работы на частоте входных сигналов используемых генераторов. В результате проведения оптимизации:

- Обеспечено равномерное распределение мощности на выходных портах схемы ( $P_{\text{вых}1} \approx P_{\text{вых}2} \approx P_{\text{вых}3} \approx P_{\text{вых}4}$ , при этом разброс  $\Delta P_{\text{вых}}$  составил не более 5%)
- Обеспечено необходимое равномерное распределение отраженной мощности на входных портах схемы ( $P_{\text{отр}1} \approx P_{\text{отр}2} \approx P_{\text{отр}3}$ , при этом разброс  $\Delta P_{\text{отр}}$  составил не более 5%, при отражении  $\Gamma < -10$  дБ),
- Обеспечена необходимая рабочая полоса частот не менее 200 МГц
- Коэффициент суммирования ( $K_{\text{сум}} = \sum P_{\text{вых}} / \sum P_{\text{вх}}$ ) составил 0,8

По результатам расчета было принято решение о изготовлении оптимизированного сумматора

## 1.2 ИЗЛУЧАТЕЛЬ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

В качестве прототипа ФАР была выбрана система из четырех соединенных вместе рупорных излучателей с шагом около 1,5 длины волны в свободном пространстве. Рупорные излучатели имели прямоугольный раскрыв 5x5 мм (Рис3). В процессе расчета были определены: Распределение напряженностей полей в ближней зоне (Рис.4), Диаграмма направленности в дальней зоне (Рис 5.), КСВН по входам не хуже 1,2 в полосе частот  $F_0 \pm 1$  ГГц. Рупорные излучатели сопряжены с волноводом 2,4x1,2. Поляризация горизонтальная (по Y). В соответствии с расчетом в данной решетке реализована «ножевая» диаграмма направленности с шириной сектора сканирования по азимуту около 30 градусов. При этом для демонстрационного сканирования в секторе 6 градусов сдвиг фаз между соседними ячейками составляет около 60 градусов. По результатам моделирования было принято решение о изготовлении излучателя ФАР.

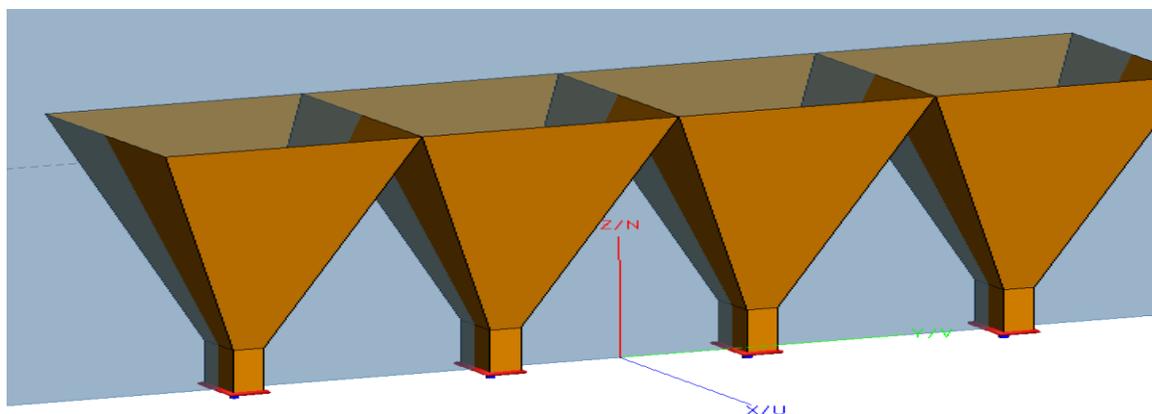


Рис. 3

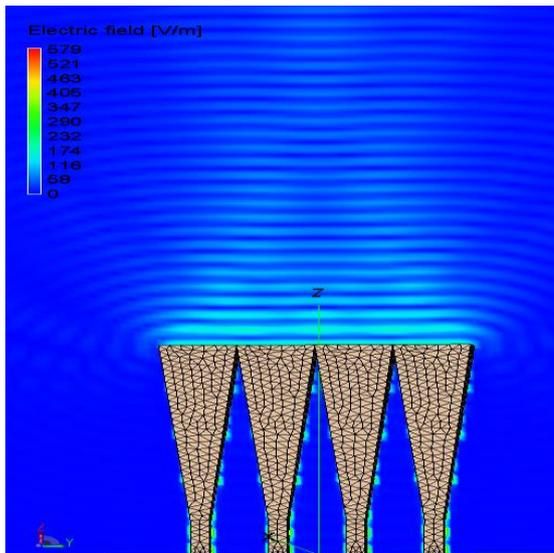


Рис. 4

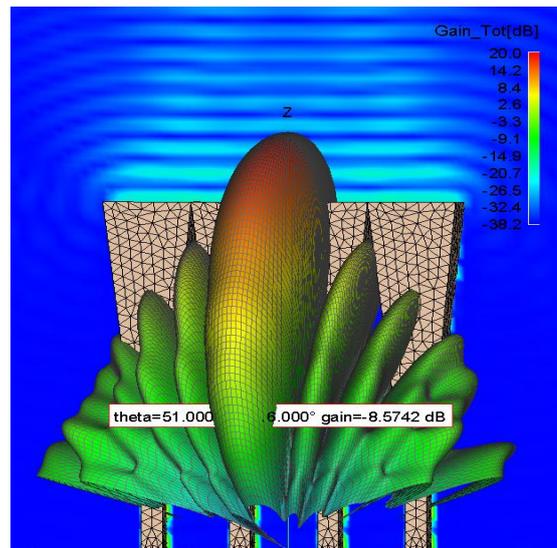


Рис. 5

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ИЗЛУЧАТЕЛЯ ФАР

### 2.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

- Собственные частоты 3-х магнетронов: F0-30 МГц, F0+10 МГц, F0+30 МГц
- Импульсные мощности 3-х магнетронов: 6,0 ; 7,1 ; 7,6 кВт
- Длительность импульса: 200 нс
- Частота посылок: 2000 Гц
- Производитель и разработчик магнетронов ОАО «ПЛУТОН».

### 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Экспериментальные работы проводились на стенде ЗАО «РТИ-РАДИО»

В процессе проведения работ были изготовлены и исследованы электродинамические структуры в соответствии с расчетными данными. Также осуществлен монтаж и пуск установки в соответствии со структурной схемой (Рис. 1). Для диагностики была изготовлена безэховая камера (300x300x400 мм) с поглощающим покрытием 3-мм диапазона, специально разработанным ЗАО «РТИ-РАДИО». Коэффициент ослабления (поглощения) составлял -40 дБ, коэффициент отражения около -20 дБ. Камера была оснащена детекторами ВЧ-огньющей, датчиком анализатора спектра со смесителем и гетеродином, тепловизором для визуальной регистрации двумерной проекции диаграммы направленности. Фотография установки приведена на Рис. 6. Магнетроны через волноводные тракты сечением 2,4x1,2 подсоединялись к сумматору. С 4-х выходов сумматора, через систему управляемых фазовращателей высокого уровня мощности, сигналы подавались на блок излучателя ФАР. Диапазон изменения фазы на каждом из фазовращателей составлял 180 градусов (в реальном устройстве для обеспечения максимального сектора сканирования требуется диапазон 360 градусов – увеличенные в 2 раза по сравнению с используемыми).

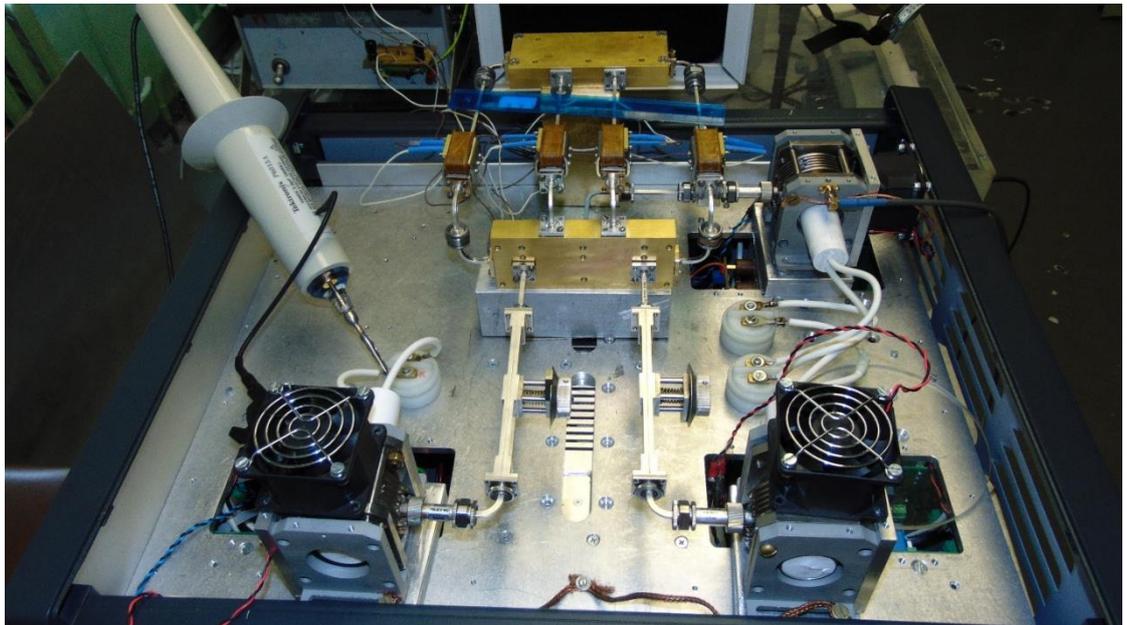


Рис.6

С другой стороны общие габаритные размеры модулятора, волноводных трактов, сумматора и излучателя могут значительно уменьшены по сравнению с экспериментальным прототипом. Получены следующие результаты:

- Синхронизированная частота -  $F_0$
- Коэффициент суммирования – не менее 0,7
- Мощность на выходе сумматора – не менее 14 кВт
- Мощность на выходе излучателя – не менее 10 кВт
- Стабильность частоты – не хуже  $1 \times 10^{-5}$
- Ширина сектора сканирования – в соответствии с расчетной.

На Рис. 7 представлена осциллограмма ВЧ-огibaющей (верхняя кривая – анодное напряжение магнетронов, средняя кривая – ВЧ-огibaющая, нижняя кривая – ток магнетронов).

На Рис. 8 представлен спектр сигнала (с учетом частоты гетеродина)

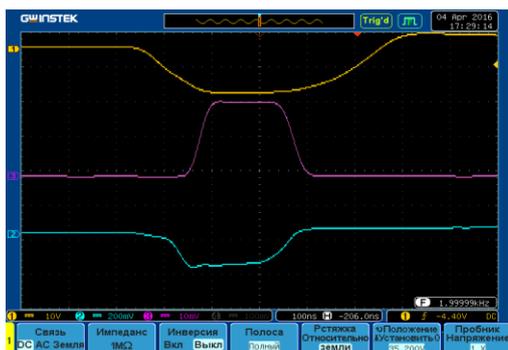


Рис. 7

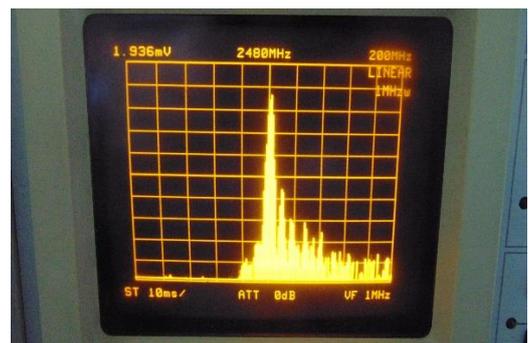


Рис. 8

На Рис. 9 представлена визуализация на тепловизоре двухмерной диаграммы направленности в безэховой камере на расстоянии 200 мм. На Рис. 10 – на расстоянии 500 мм. Виден «ножевой» характер диаграммы.

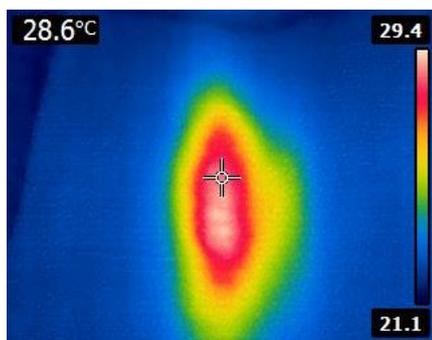


Рис. 9

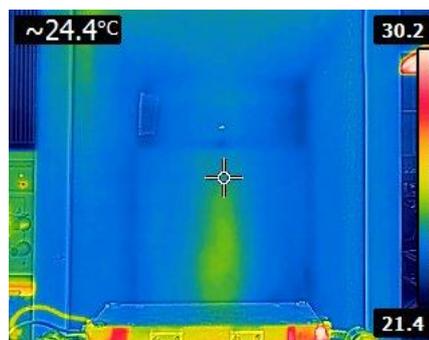


Рис. 10

Параметры установки обеспечивали стабильную непрерывную работу системы в течении не менее 3 часов.

## ВЫВОДЫ

Выполнение расчетных и экспериментальных работ показала возможность создания локационной системы 3-мм диапазона высокого уровня мощности с реализацией режима сканирования по азимуту на синхронизированных магнетронах. Возможно применение подобных устройств в режиме «псевдокогерентности». Конструкция приемного тракта в этом случае может использовать аналогичную излучателю структуру ФАР с применением фазового анализа приемного сигнала. Возможна перестройка сканирования от «импульса» к «импульсу». Требуется решение вопроса защиты приемного тракта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **С.Ф. Боев, А.И. Вагин, И.М. Иванов, Н.И. Скрипкин, К.В. Ходатаев.**  
«Экспериментальные исследования самосинхронизации магнетронов трехмиллиметрового диапазона». Журнал «Научно-технические технологии». №5, т.16, 2015г. стр.38-44.
2. **Р.В. Донецкий, И.М. Иванов, Н.В. Петюшин, Н.И. Скрипкин.**  
«Регенеративный усилитель на синхронизированных магнетронах трехмиллиметрового диапазона длин волн». Журнал «Научно-технические технологии». №11, т.16, 2015г. стр.51-55.
3. **М.В. Ефремова, А.И. Вагин, И.М. Иванов, Н.И. Скрипкин, К.В. Ходатаев.**  
«Расчет и экспериментальное исследование сумматора мощности магнетронов трехмиллиметрового диапазона с выводом энергии в свободное пространство тремя когерентными излучателями». Журнал «Электронная техника», серия 1, СВЧ-техника, Выпуск 3 (526), 2015г., стр. 22-26.
4. **И. М. Иванов, Н. И. Скрипкин, Н. В. Петюшин, В.А. Шашкова.**  
«Переходные процессы при фазировании импульсных магнетронных генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн». II всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ Инновационные решения Keysight Technologies Москва, 26 – 28 октября 2015 г.
5. **М.В. Ефремова, И.М. Иванов, Н.И. Скрипкин.**  
«Волноводные и квазиоптические способы суммирования генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн». II всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ Инновационные решения Keysight Technologies Москва, 26 – 28 октября 2015 г.
6. **Дейвид Э.**  
Фазирование высокочастотными сигналами. Сб. «Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями». Перевод под ред. М.М. Федорова. 1961. 327 с.