

УДК 621.396.67

МНОГОЭЛЕМЕНТНАЯ ФАР Ка ДИАПАЗОНА ВОЛН

Multielement Ka Band Phased Array Antenna

В.В. Денисенко, Ю.Б. Дубров, Ю.Б. Корчемкин, В.А. Макота, А.М. Николаев,
А.А. Толкачев, А.М. Шитиков, А.В. Шишлов, А.Г. Шубов

Описана радиолокационная антенна миллиметрового диапазона волн с фазированной решеткой из 3600 излучающих элементов; приведены технические характеристики антенны и ее составных частей; рассмотрены особенности работы.

This paper describes the millimeter wave antenna for radar with phased array of 3600 radiators. The technical performances of antenna and their components are presented, the operating features are considered.

Введение. На протяжении последних 20 лет продвижение радиолокационных средств в более высокочастотные диапазоны остается одной из устойчивых тенденций развития современной радиоэлектроники. Создание радиолокационных станций (РЛС) в миллиметровом диапазоне волн позволяет, с одной стороны, обеспечить высокую концентрацию энергии зондирующего сигнала в пространстве, расширить спектр излучающих сигналов, увеличить доплеровское смещение частоты и радикально улучшить на этой базе основные технические характеристики РЛС: дальность действия, избирательность и устойчивость к помехам различного типа [1-3]. С другой стороны, продвижение в миллиметровый диапазон открывает возможности уменьшения габаритов радиолокационных средств различного базирования, прежде всего за счет уменьшения размеров антенных систем. Наиболее сложным и дорогим элементом современных многофункциональных РЛС продолжает оставаться антенная система, включающая в себя в качестве основной составляющей фазированную антенную решетку (ФАР). Это характерно для РЛС, у которых размер антенного полотна превышает $(50-60)\lambda$, а количество излучающих элементов ФАР начинает исчисляться тысячами.

В статье рассмотрены технические проблемы, которые были решены при создании ФАР отражательного типа с коническим сектором электронного сканирования $\pm 25^\circ$, состоящей из 3600 излучающих элементов в раскрытие диаметром примерно 70λ [4]. ФАР обеспечивает сканирование и в более широком секторе углов (например, $\pm 35^\circ$) с несколько меньшим коэффициентом усиления и более высокими интерференционными лепестками.

Структурная схема и конструктивный облик антенны. Упрощенная структурная схема ФАР приведена на рис. 1, внешний вид показан на рис. 2. В основу схемы ФАР положено

модульное построение аппаратуры фазирования на базе 36 подрешеток с фазовращателями и схемами их управления и 36 цифровых ячеек расчета фаз (ЯРФ). Излучающие элементы ФАР расположены в общей несущей плите. Управление подрешетками и контроль их технического состояния осуществляют ЯРФ по командам ячейки управления лучом. В штатном режиме работы управление ФАР осуществляется от центральной ЭВМ РЛС. В режиме настройки и при детальном контроле ФАР с локализацией до одного неисправного канала фазирования управление осуществляется от персонального компьютера. Ячейка технического управления обеспечивает необходимые режимы включения аппаратуры, проводит контроль аппаратуры вторичного электропитания и блока терморегулирования. Возбуждение ФАР и формирование моноимпульсной связки диаграмм направленности (ДН) на прием осуществляются моноимпульсным облучателем и контррефлектором.

Рис. 1. Упрощенная структурная схема ФАР

Рис. 2. ФАР на измерительном стенде в безэховой камере

Аппаратура антенны размещена в двух связанных между собой корпусах: первый - в виде шестигранной призмы с диаметром описанной окружности 740 мм и высотой 340 мм, и второй - в виде параллелепипеда с размерами (1100×760×300) мм. Лицевая сторона шестигранного корпуса закрыта плоским радиопрозрачным укрытием из ударопрочного пластика. Внутри шестигранного корпуса расположена несущая плита с излучателями. На тыльной стороне несущей плиты закреплены 36 подрешеток. В центре несущей плиты установлен моноимпульсный облучатель. Контррефлектор прикреплен к корпусу с помощью трех штанг. Во втором корпусе размещены ячейки управления, волноводный тракт моноимпульсного облучателя, аппаратура вторичного электропитания и блок терморегулирования, обеспечивающий нормальную работу аппаратуры при температуре окружающей среды от минус 30 до плюс 60°С.

Излучающая структура ФАР. Излучающая структура ФАР включает в себя несущую плиту с излучающими элементами (рис. 3), диэлектрическую плиту согласующего слоя и радиопрозрачное укрытие. Излучающие элементы расположены по гексагональной сетке с шагом $1,1\lambda$. Относительно горизонтальной плоскости сетка развернута таким образом, что ряды элементов расположены в апертуре горизонтально и под углом 60° к горизонту.

Рис. 3. Плита с излучающими элементами в корпусе

Излучающий элемент представляет собой конический диэлектрический стержень, выступающий из волновода круглого сечения [5], выполненного в несущей металлической плите. Согласующий слой излучающей структуры представляет собой диэлектрическую плиту из вспененного материала ($\epsilon=1,1$) толщиной 25 мм с конусными каналами под стержневые излучатели. Синтез излучающего элемента ФАР и согласующего слоя излучающей структуры проводился из требования отсутствия эффекта ослепления ФАР в заданном секторе электронного сканирования при уменьшении коэффициента усиления антенны на краю сектора не более чем на 2 дБ. На рис. 4 приведена ДН излучающего элемента, измеренная в составе решетки. Благодаря достаточно сильной взаимной связи между излучателями [6], диаграмма имеет пологую вершину и резкий спад поля излучения в диапазоне углов от 25° до 50° . В отсутствие согласующего слоя наблюдалось ослепление ФАР (снижение коэффициента усиления на 8-10 дБ) в узком частотном диапазоне при направлении луча, близком к нормали. Введение согласующего слоя сдвинуло провал в область низких частот.

Рис. 4. Диаграмма направленности излучающего элемента ФАР в двух плоскостях

Так как шаг сетки расположения излучающих элементов равен $1,1\lambda$, в ДН ФАР присутствуют интерференционные лепестки. При отклонениях луча в секторе $\pm 25^\circ$ в видимую область могут входить до 3 интерференционных лепестков, расположенных в сечениях, перпендикулярных рядам элементов, то есть в вертикальной плоскости и в плоскостях, наклоненных под углом 30° к горизонтальной линии в апертуре. В центральном положении луча интерференционных лепестков нет, но они входят в видимую область уже при отклонении луча на $1,5^\circ$. В секторе сканирования $\pm 13^\circ$ интерференционные лепестки подавлены ДН излучающего элемента и не превышают величины -15 дБ. С ростом угла отклонения луча от 13° до 25° величина этих лепестков быстро возрастает, достигая в худшем случае значения -4 дБ. При сканировании в секторе $\pm 35^\circ$ в видимую область могут входить дополнительно интерференционные лепестки в сечениях, параллельных рядам элементов, а максимальная амплитуда интерференционного лепестка может на 3 дБ превышать амплитуду главного луча.

Аппаратура фазирования. Для фазирования антенны используются ферритовые фазовращатели ФВФН5-1 отражательного типа для волн круговой поляризации (рис. 5). Фазовращатели разработаны ОАО “Феррит-Домен”, г. Санкт-Петербург, совместно с ОАО “Радиофизика” и изготовлены на организованном по инициативе Г.Г. Бубнова

специализированном производстве Чистопольского часового завода. Фазовращатель ФВФН5-1 выполнен на круглом металлизированном стержне из литиевого феррита 1СЧ12 [7]. Два магнитопровода из феррита 107П и две обмотки обеспечивают гистерезисный характер намагничивания стержня и память фазовращателя. Дополнительная (третья) обмотка используется для контроля работы фазовращателя. Переключение фазовых состояний фазовращателя с дискретом 45° осуществляется вольт-секундным методом с помощью специализированной микросхемы 1109КТ5. Микросхема формирует ток сброса и импульсы набора переменной длительности с дискретом 1,2 мкс. Фазовращатель имеет в рабочей полосе частот $\pm 1.5\%$ средние по фазовым состояниям вносимые потери не более 1,2 дБ, время переключения не более 30 мкс, среднюю энергию переключения не более 80 мкДж.

Рис. 5. Ферритовый фазовращатель ФВФН5-1

Конструктивно фазовращатели и элементы их управления объединены в подрешетки двух типоразмеров: по 88 и 118 каналов фазирования [8]. Фазовращатели в подрешетках расположены в шести рядах по 15 и 20 элементов, а схемы управления расположены на примыкающих к ним печатным платам (см. рис. 6). На платах, кроме микросхем 1109КТ5, размещены:

- накопительные конденсаторы, обеспечивающие одновременное переключение фазовращателей без существенного изменения напряжения намагничивающих импульсов;
- дешифраторы, осуществляющие выбор соответствующего фазовращателя и запись кода фазы в регистр памяти микросхем 1109КТ5;
- регулируемый стабилизатор напряжения, позволяющий выбрать оптимальную величину напряжения импульса набора, обеспечивающую снижение ошибок установки фазовых сдвигов до $\pm 20^\circ$.

Схема расположения подрешеток в раскрыве ФАР показана на рис. 7 [9].

Рис. 6. Подрешетка, содержащая 118 каналов фазирования

Рис. 7. Расположение подрешеток в раскрыве ФАР

Система возбуждения ФАР. Возбуждение раскрыва ФАР осуществляется с помощью четырехрупорного облучателя с размером апертуры $(6,8 \times 6,8)\lambda$ и контррефлектора диаметром $14,7\lambda$. Каналы рупоров возбуждаются волноводным трактом, формирующим суммарные и

разностные ДН по схеме Пейджа. Облучатель обеспечивает излучение сигнала круговой поляризации правого направления вращения и прием сигнала круговой поляризации левого направления вращения. Угол облучения кромки контррефлектора составляет 8° . Для оптимизации суммарных и разностных ДН в раскрыве облучателя установлена квадратная бленда длиной 7λ . Экспериментальные ДН суммарного и разностных каналов облучателя показаны на рис. 8, общий вид облучателя приведен на рис. 9. Диаметр рабочей зоны контррефлектора составляет $13,6\lambda$, профиль рабочей зоны синтезирован под форму ДН излучающего элемента по критерию обеспечения максимального коэффициента усиления ФАР [10-12]. Нерабочая кольцевая зона края контррефлектора скруглена и покрыта тонким слоем поглотителя переменной толщины.

Рис. 8. Диаграммы направленности суммарного и двух разностных каналов облучателя в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Рис. 9. Моноимпульсный облучатель ФАР

Прямое поле облучателя (с учетом дифракции на кромках контррефлектора) формирует в передней полусфере ФАР паразитные несканирующие суммарные и разностные ДН системы возбуждения. Это поле интерферирует с полем излучения апертуры ФАР, что приводит к искажению формы суммарных и разностных ДН ФАР. Расчетная величина максимального углового смещения равносигнального направления от расчетного за счет прямого паразитного приема сигнала облучателем составляет 4,5 угловые минуты. Эта величина не является ошибкой установки луча, потому что может быть измерена заблаговременно и учтена в алгоритмах управления ФАР.

Система управления лучом. Система управления лучом построена по принципу распределенного вычислителя. Прием команд, поступающих в антенну от центральной ЭВМ по мультиплексному каналу MIL-STD-1553B, осуществляется ячейкой управления лучом. Плата сопряжения этой ячейки, выполненная на основе микроконтроллера PIC16C74 с аппаратной поддержкой на ПЛИС XC9572, обрабатывает поступившую команду, формирует соответствующий ей командно-информационный кадр и передает его по параллельному 8-ми разрядному каналу в 36 ячеек расчета фаз. ЯРФ выполняет функции расчета и передачи в подрешетку кодов фаз фазовращателей, ввода и хранения индивидуальных констант фазовращателей необходимых для этого расчета, организации контроля работоспособности фазовращателей и хранения результатов этого контроля. ЯРФ состоит из трех одинаковых каналов, в каждый из которых входят по одному

микроконтроллеру типа PIC17C44 и ЭСПЗУ на микросхеме 25LC160. Один канал ЯРФ управляет фазовращателями, расположенными в двух соседних рядах подрешеток. Таким образом, расчет производится 108 вычислителями одновременно. Полный расчет фазового распределения с учетом времен прохождения команд выполняется за 920 мкс.

Система управления позволяет также считывать фазовое распределение по основной магистрали в центральную ЭВМ, или по вспомогательной магистрали – в персональный компьютер со специализированным программным обеспечением. На рис. 10 показано фазовое распределение в раскрыве ФАР для центрального положения луча. Кружками на рисунке схематично показано расположение фазовращателей в раскрыве ФАР, степень насыщенности характеризует фазовое состояние фазовращателя. На левой половине экрана показаны фазовые состояния всех фазовращателей антенны, на правой, крупно, - состояния фазовращателей одной из подрешеток. Кольцевая структура фазового распределения обеспечивает преобразование квазисферического волнового фронта от системы возбуждения ФАР в плоский. Отклонения от равномерности кольцевой структуры объясняются индивидуальными свойствами фазовращателей. Фазовое распределение в центральном положении луча является по своей сути массивом начальных электрических длин каналов фазирования (начальное фазовое распределение). На рис. 11 показано фазовое распределение в раскрыве ФАР для отклоненного луча. Данное распределение представляет собой сумму начального фазового распределения и линейного набега для отклонения луча в заданном направлении.

Рис. 10. Фазовое распределение в раскрыве ФАР для центрального положения луча

Рис. 11. Фазовое распределение в раскрыве ФАР для луча, отклоненного на 25° в горизонтальной плоскости

Сквозное фазирование ФАР. Сквозное фазирование является ключевым звеном настройки многоэлементной ФАР. Оно позволяет записать в память системы управления лучом поле начальных электрических длин каналов фазирования. Неодинаковость начальных длин каналов фазирования обусловлена не только положением канала в апертуре, но и неидеальностью конструкции системы возбуждения и технологическим разбросом начальных электрических длин апертурных фазовращателей. Сквозное фазирование проводилось бесконтактным методом, описанным в [13,14], при этом геометрическая ось антенны была направлена на источник сигнала. Для того чтобы сигнал одного элемента был заметен на фоне суммарного сигнала антенны, производилась ее расфазировка. Фазирование

проводилось в два этапа: вначале последовательным переключением фазовращателей производилось фазирование фазовращателей внутри подрешеток, затем подрешеток между собой. По результатам измерений параметров антенны среднеквадратичная ошибка определения начальных фаз каналов оценивается величиной примерно 13° .

Контроль неисправности фазовращателей. Система управления лучом осуществляет контроль исправности каналов фазирования и антенны в целом, по команде, получаемой от центральной ЭВМ или персонального компьютера. Контроль производится независимо и параллельно для каждой подрешетки, результаты контроля помещаются в память ЯРФ. Система также обеспечивает получение подробной информации об исправности каналов фазирования каждой подрешетки, с указанием места неисправного канала. Один из вариантов карты неисправности каналов фазирования в раскрыве ФАР показан на рис. 12. Темным цветом на сером фоне выделены неисправные каналы, а также отсутствующие каналы в местах крепления подрешеток к несущей плите раскрыва ФАР. Точки крепления расположены в углах подрешеток.

Рис. 12. Карта неисправности каналов фазирования на экране дисплея персонального компьютера

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования характеристик излучения ФАР проводились на автоматизированном стенде с компьютерной обработкой результатов измерений. Основные параметры ФАР приведены в таблице 1. На рисунках 13 – 14 показаны сечения суммарной и разностной ДН ФАР горизонтальной плоскостью для центрального положения луча и для луча, отклоненного на 25° в этой же плоскости. В этом сечении ДН при отклонении луча 25° , как указывалось ранее, интерференционные лепестки отсутствуют. На рисунке 15 приведено сечение суммарной ДН ФАР вертикальной плоскостью для луча, отклоненного на 35° в этой же плоскости. Виден интерференционный лепесток в направлении -27° , по величине превосходящий главный луч. Все ДН нормированы к величине максимума суммарной ДН в центральном положении луча. Максимальное падение коэффициента усиления на краю сектора сканирования $\pm 25^\circ$ равно 2 дБ, на краю сектора сканирования $\pm 35^\circ$ составляет 5,5 дБ. Изменение ДН и коэффициента усиления ФАР в зависимости от угла отклонения луча от нормали иллюстрируется рисунком 16. На нем показаны средние части ДН в горизонтальной плоскости при разных отклонениях луча. Небольшие отличия угловой зависимости коэффициента усиления от ДН излучающего элемента обусловлены влиянием паразитного поля системы возбуждения ФАР

и погрешностями измерений.

Таблица 1. Основные параметры ФАР

| Технические характеристики | В центральном положении луча | В секторе электронного сканирования $\pm 25^\circ$ | |
|---|--|--|------|
| | | от | до |
| Частотный диапазон, ГГц | 33,75 – 34,25 | | |
| Поляризация | правая круговая на передачу левая круговая на прием | | |
| Коэффициент эллиптичности | 0,89 | 0,85 | 0,89 |
| Ширина луча по уровню –3 дБ, угл. мин: | | | |
| – на передачу | 49,8 | 47,3 | 56,8 |
| – на прием | 50,0 | 47,2 | 56,8 |
| Коэффициент усиления, дБ: | | | |
| – на передачу | 38,6 | 36,8 | 38,5 |
| – на прием | 38,6 | 36,9 | 39,0 |
| Макс. уровень первых боковых лепестков суммарной ДН, дБ | | | |
| – на передачу | -15,5 | -17 | -13 |
| – на прием | -16 | -17 | -13 |
| Глубина нуля разностной ДН, дБ | -23,5 | -27 | -14 |
| СВЧ мощность на входе, кВт | | | |
| импульсная | | 4 | |
| средняя | | 0.4 | |
| Развязка между передающим входом и приемными выходами, дБ | не менее 25 | | |

Рис. 13. Сечения суммарной и разностной ДН ФАР горизонтальной плоскостью для центрального положения луча

Рис. 14. Сечения суммарной и разностной ДН ФАР горизонтальной плоскостью для луча, отклоненного на 25° в горизонтальной плоскости

Рис. 15. Сечение суммарной ДН ФАР вертикальной плоскостью для луча, отклоненного на 35° в вертикальной плоскости

Рис. 16. Сечения суммарной ДН ФАР горизонтальной плоскостью при разных углах отклонения луча, пунктирной линией показана ДН излучающего элемента

Измерения ДН моноимпульсного облучателя и излучающего элемента ФАР, а также потерь в волноводном тракте облучателя и в подрешетках позволили уточнить величины составляющих потерь коэффициента усиления ФАР. В таблице 2 приведены составляющие потерь коэффициента усиления по суммарному каналу в центральном положении луча. Эффективность антенны при данных потерях коэффициента усиления равна 15,1%, что

типично для ФАР рассматриваемого класса.

Таблица 2. Потери коэффициента усиления ФАР по суммарному каналу

| Составляющая потерь коэффициента усиления | Величина потерь, дБ |
|--|----------------------------|
| Неравномерность амплитудного распределения и затенение апертуры контррефлектором | 1,0 |
| Затенение апертуры штангами фермы подвески контррефлектора | 0,32 |
| Перелив энергии облучателя за край контррефлектора | 1,6 |
| Перелив энергии за края апертуры | 0,2 |
| Рассогласование поля волны контррефлектора с ДН излучающих элементов | 0,92 |
| Удвоенный КИП излучающего элемента | 0,54 |
| Активные потери в фазовращателях, согласование фазовращателей с излучателями в подрешетках | 1,3 |
| Активные потери в тракте моноимпульсного облучателя | 1,0 |
| Случайные фазовые ошибки в раскрыве ФАР | 0,24 |
| Дискретность фазирования | 0,22 |
| Активные потери и отражения в радиопрозрачном укрытии при двукратном прохождении волн | 0,72 |
| Отражение энергии при КСВН на входе ФАР, равном 1.3 | 0,07 |
| Суммарные потери, дБ | 8,2 |

При эксплуатации ФАР удобным способом контроля ее работоспособности является измерение динамической ДН. Динамической ДН называют ДН, получаемую сканированием луча (обычно в какой-либо плоскости) при фиксированных положениях испытываемой ФАР и вспомогательной антенны. На рисунке 17 приведены ДН ФАР в центральном положении луча в горизонтальной плоскости и динамическая ДН, полученная электронным сканированием луча в этой же плоскости при расположении вспомогательной антенны по нормали ФАР. Главный и первые боковые лепестки ФАР обеих ДН практически совпадают.

Рис. 17. Суммарная ДН ФАР в горизонтальной плоскости (пунктирная линия) и динамическая ДН ФАР в этой же плоскости (сплошная линия).

Заключение. Разработана, изготовлена и испытана ФАР отражательного типа для многофункционального моноимпульсного радиолокатора Ка диапазона волн, базируемого на подвижном объекте. В антенне реализованы основополагающие технические решения по обеспечению максимального коэффициента усиления при использовании достаточно простого четырехрупорного облучателя. Разработанная ФАР обеспечивает работу в секторе

сканирования $\pm 25^\circ$ с падением коэффициента усиления к краю сектора не более 2 дБ и в секторе сканирования $\pm 35^\circ$ с падением коэффициента усиления к краю сектора не более 5,5 дБ. Для настройки антенны разработаны бесконтактные методы сквозного фазирования и компьютерной диагностики с точностью до одного неисправного излучающего элемента в раскрыве.

Разработка ФАР была выполнена большим коллективом сотрудников ОАО «Радиофизика» при участии специалистов ОАО «Феррит-Домен» и ФГУП НПТЦ «Спурт». Авторы благодарят всех участников работы за квалифицированный и добросовестный труд, обусловивший успешное завершение проекта.

Литература

1. *Толкачев А.А., Макота В.А., Павлова М.П., Николаев А.М., Денисенко В.В., Соловьев Г.К.* Большая радиолокационная ФАР миллиметрового диапазона волн. - Антенны, 1999, № 1 (42), с. 4-11.
2. *Tolkachev A.A., Denisenko V.V., Shishlov A.V., Shubov A.G.* High Gain Antenna Systems for Millimeter Wave Radar with Combined Electronical and Mechanical Beam Steering. - IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology Boston, Massachusetts, 15-18 October 1996, pp. 266-271.
3. *Толкачев А.А., Соловьев Г.К., Вейцель В.В.* АО «Радиофизика»: работают миллиметры. – Армейский сборник, 1999, № 3, с. 60-64.
4. *Толкачев А.А., Доминюк Я.В., Маркин Г.В., Епифанов М.А., Шишилов А.В., Шубов А.Г.* Промышленный образец модуля ФАР миллиметрового диапазона волн. – XXVII Научно-техническая конференция «Теория и техника антенн», Москва, 23-25 августа 1994, с. 69-72.
5. *Коротков В.Д., Скобелев С.П.* Диэлектрические излучатели антенных решеток. - Тезисы XXVI межотраслевой научно-технической конференции по теории и технике антенн, Москва, 27-29 ноября 1990 г., М.: НИИРФ, 1991, Часть II, с. 10.
6. *Skobelev S.P., Mukhamedov L.L.* Analysis of waveguide antenna arrays with protruding dielectric elements. - IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 41, No. 5, May 1993, p. 574-581.
7. *Tolkachev A.A., Korchemkin Yu.B., Majorov A.V., Milevsky N.P.* Phase shifters for millimeter-wave band multi-element phase arrays. - The Fourth International Symposium on Antennas&EM theory. Xi'an, China, August, 1997, pp. 583-586.
8. *Демидов А.В., Дронов Н.Н., Дубров Ю.Б., Корчемкин Ю.Б., Милевский Н.П.* Ячейка фазирования для антенных решеток ММДВ. - XXVII научно-техническая конференция «Теория и техника антенн», Москва, 23-25 августа 1994, с. 370-371.
9. *Толкачев А.А., Левитан Б.А., Ремизов Б.А., Колобов В.А., Маркин Г.В., Шишилов А.В., Шубов А.Г.* Фазированная антенная решетка отражательного типа. - Патент Р.Ф. № 2048699 /приоритет от 13 августа 1991.
10. *Вааз И.Л., Гусев П.И., Шишилов А.В.* Геометрооптический синтез зеркального распределителя мощности для возбуждения ФАР. – Тезисы докладов IX всесоюзного симпозиума по дифракции и распространению волн, том 1, Тбилиси, 1985, с. 465-468.
11. *Антипин А.Г., Полухин Г.А., Шубов А.Г.* О расчете пространственного возбудителя антенной решетки. – Антенны /сборник статей/, выпуск 33, М., «Радио и связь», 1986, с. 65-74.
12. *Антипин А.Г., Полухин Г.А., Шубов А.Г.* К анализу крупноапертурной антенной решетки отражательного типа. – Антенны /сборник статей/, выпуск 35, М., «Радио и связь», 1988, с. 14-24.
13. *Shitikov A.M., Bondarik A.V.* Multi-element PAA Calibration with REV Method. - IEEE Proceedings International Conference on Antenna Theory and Techniques, 9-12 September, 2003, Sevastopol, Ukraine, pp. 761-764.
14. *Бондарик А.В., Шитиков А.М., Шубов А.Г.* Опыт использования в многоканальных фазированных антенных решетках поэлементных методов калибровки без применения фазометрической аппаратуры. – Антенны, 2005, № 1 (в настоящем сборнике).

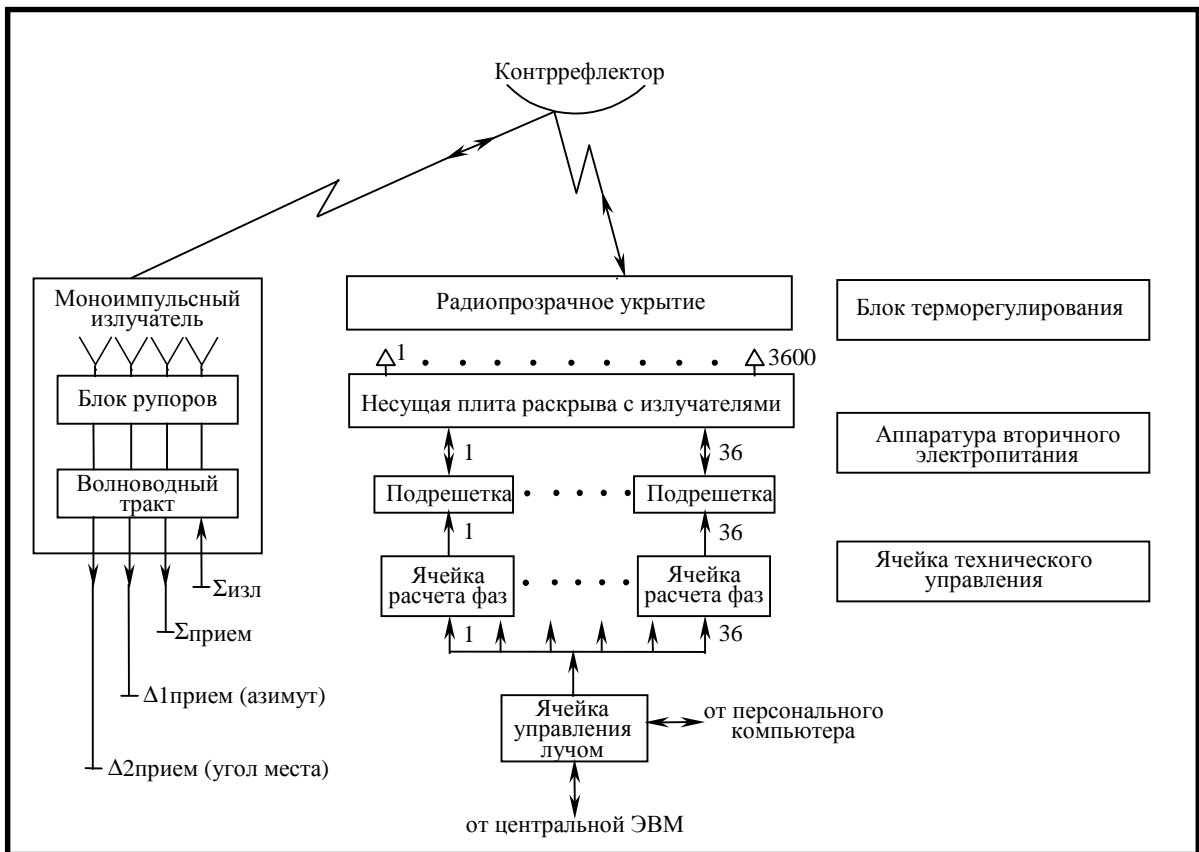


Рис. 1

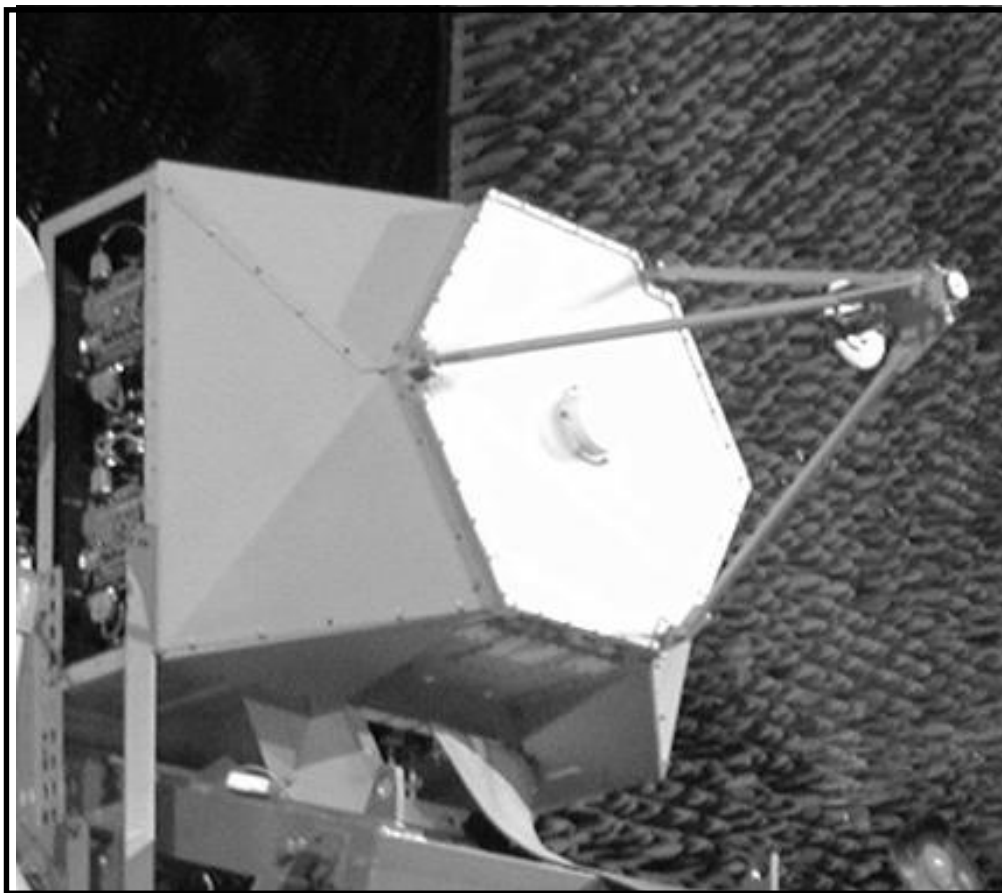


Рис. 2

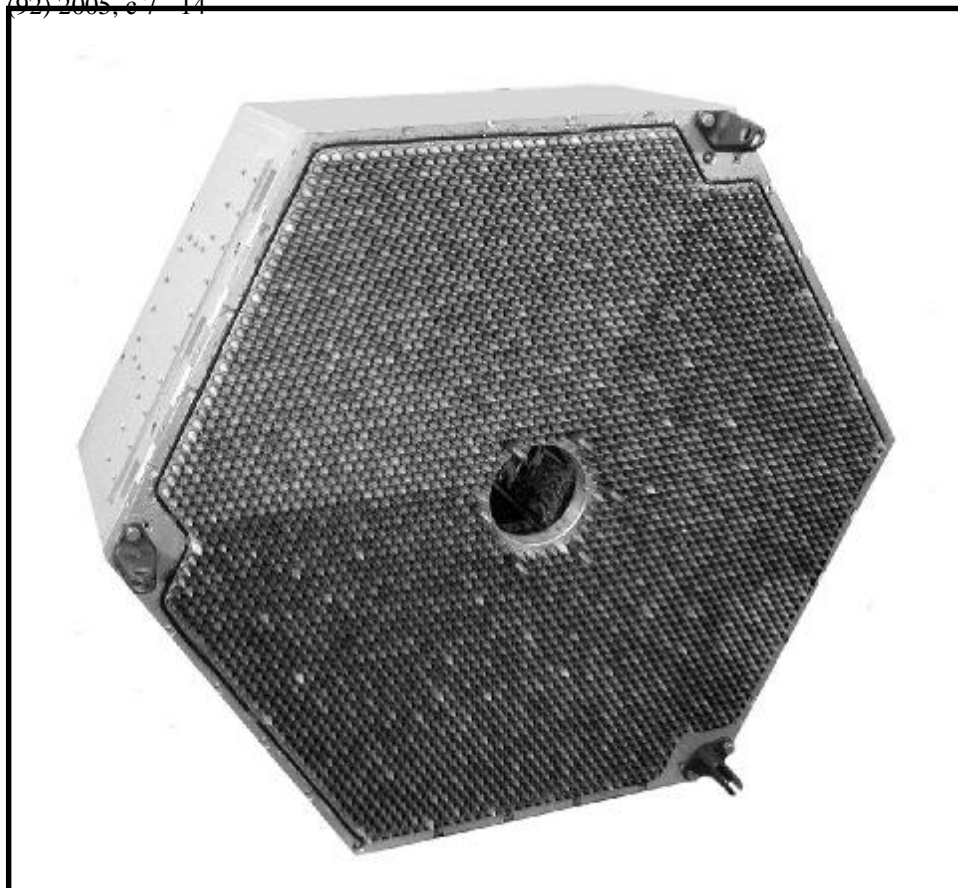


Рис. 3

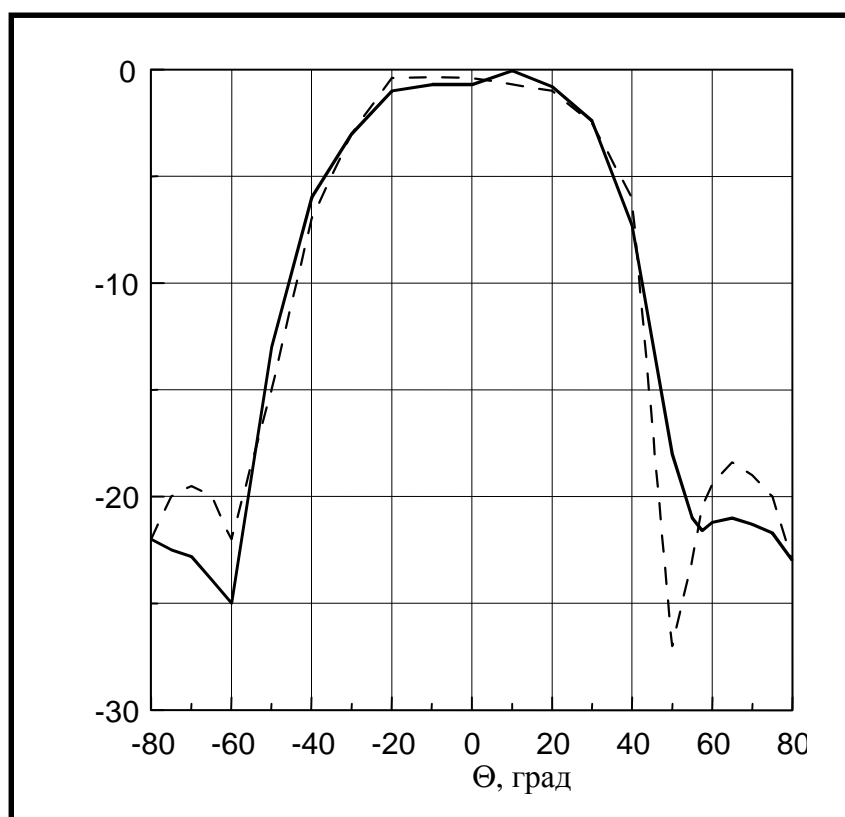


Рис. 4

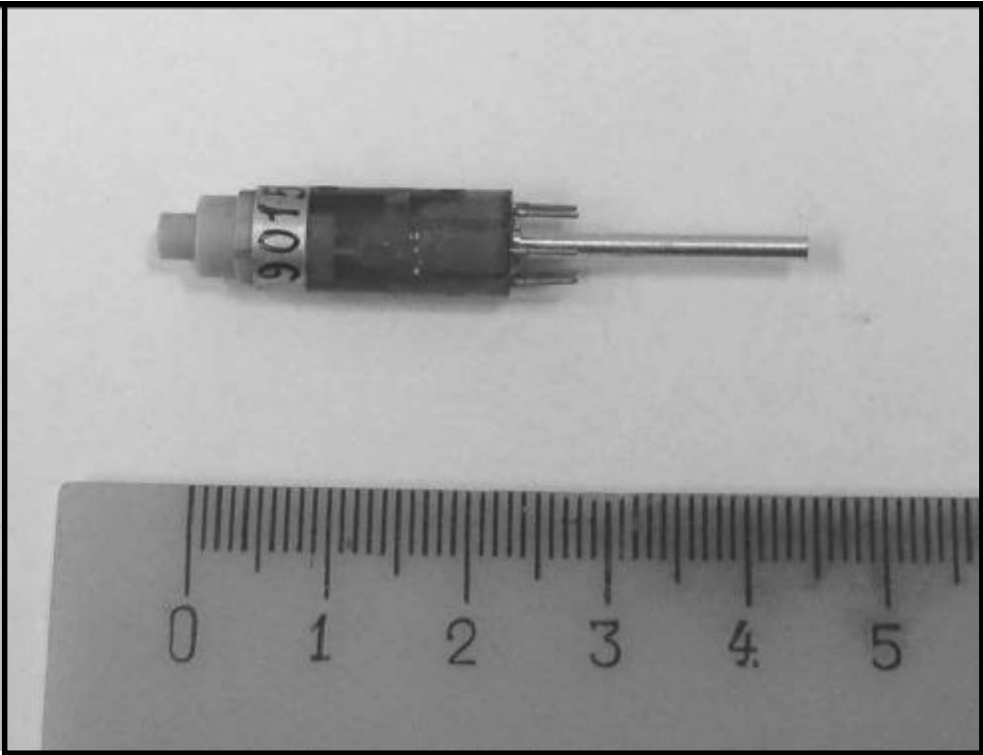


Рис. 5

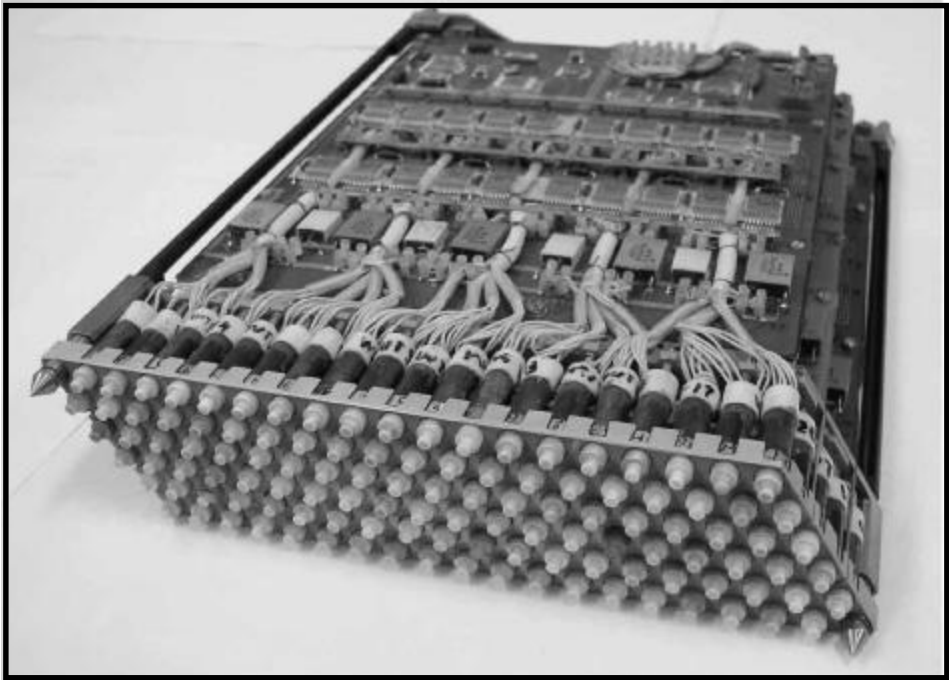


Рис. 6

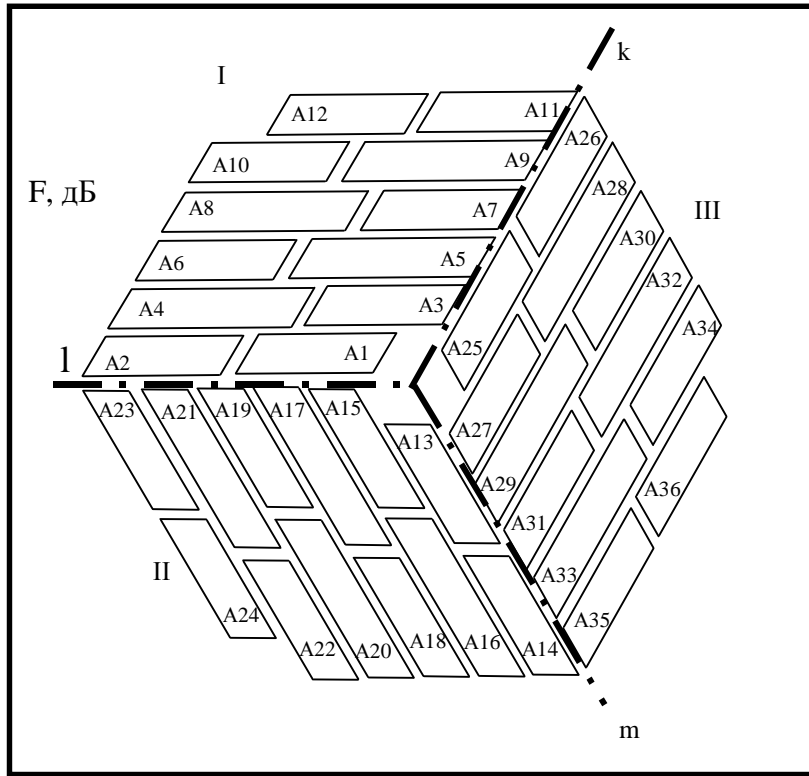


Рис. 7

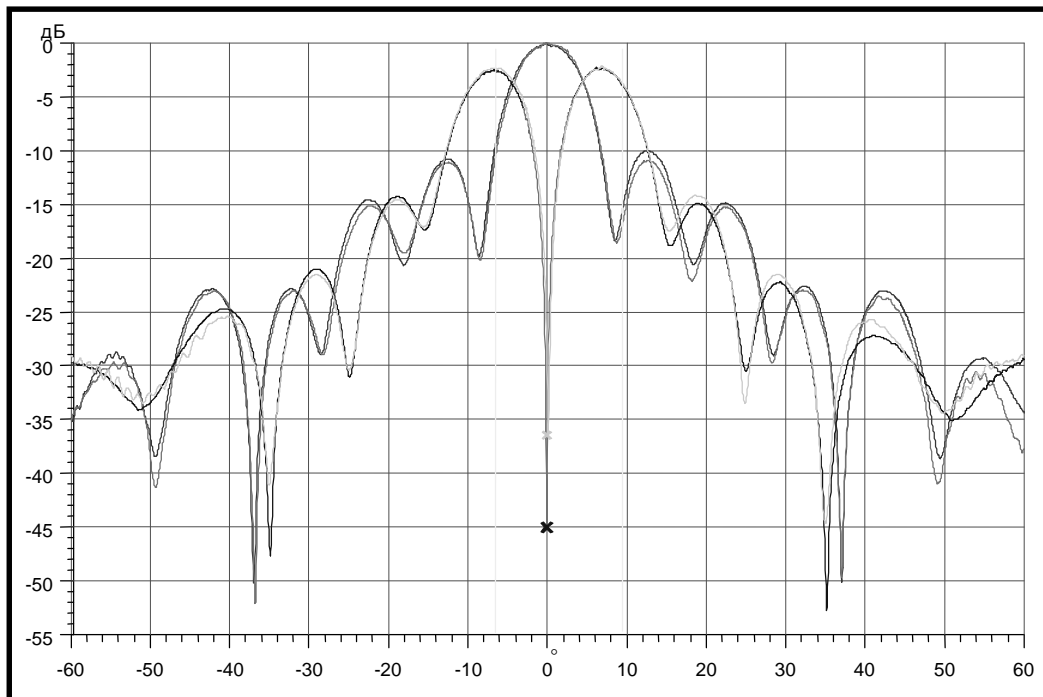


Рис. 8

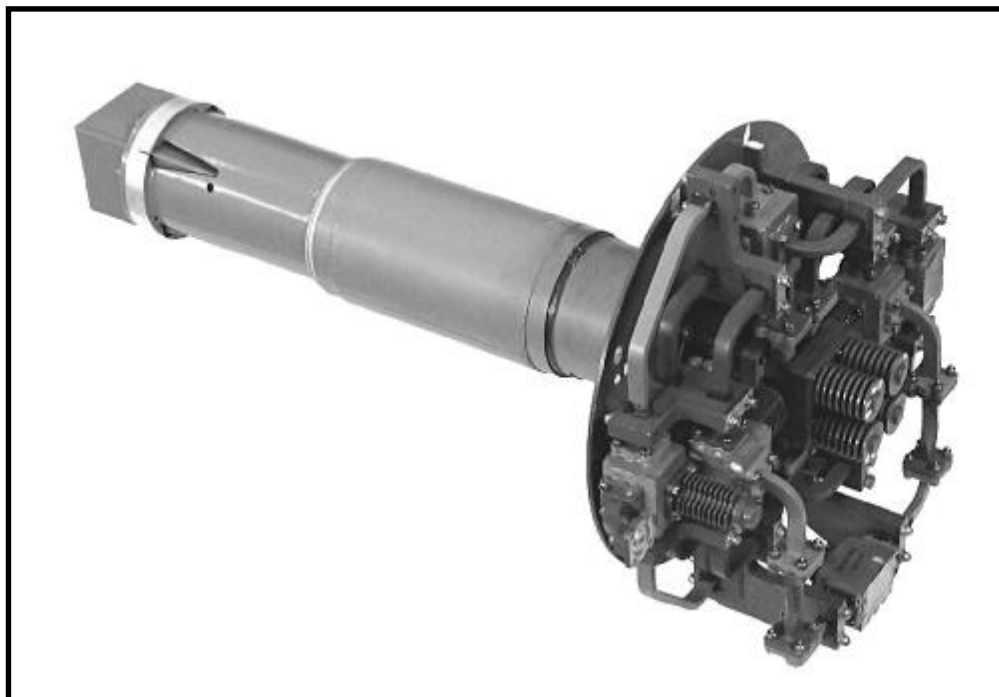


Рис. 9

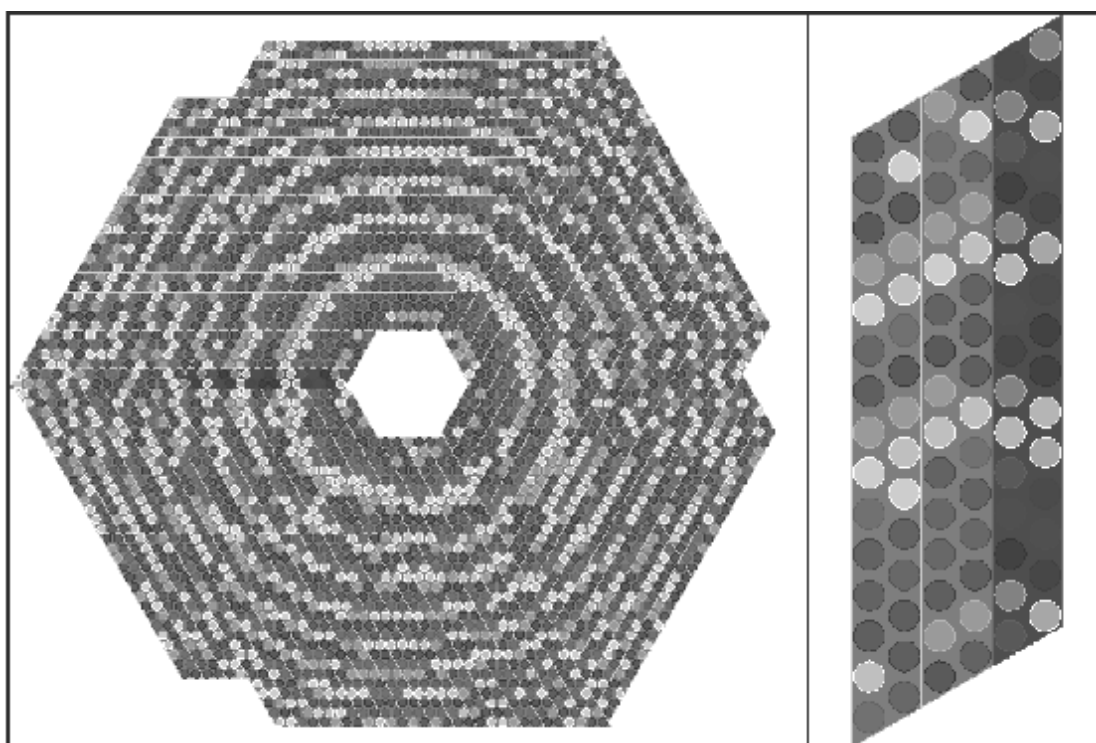


Рис.10

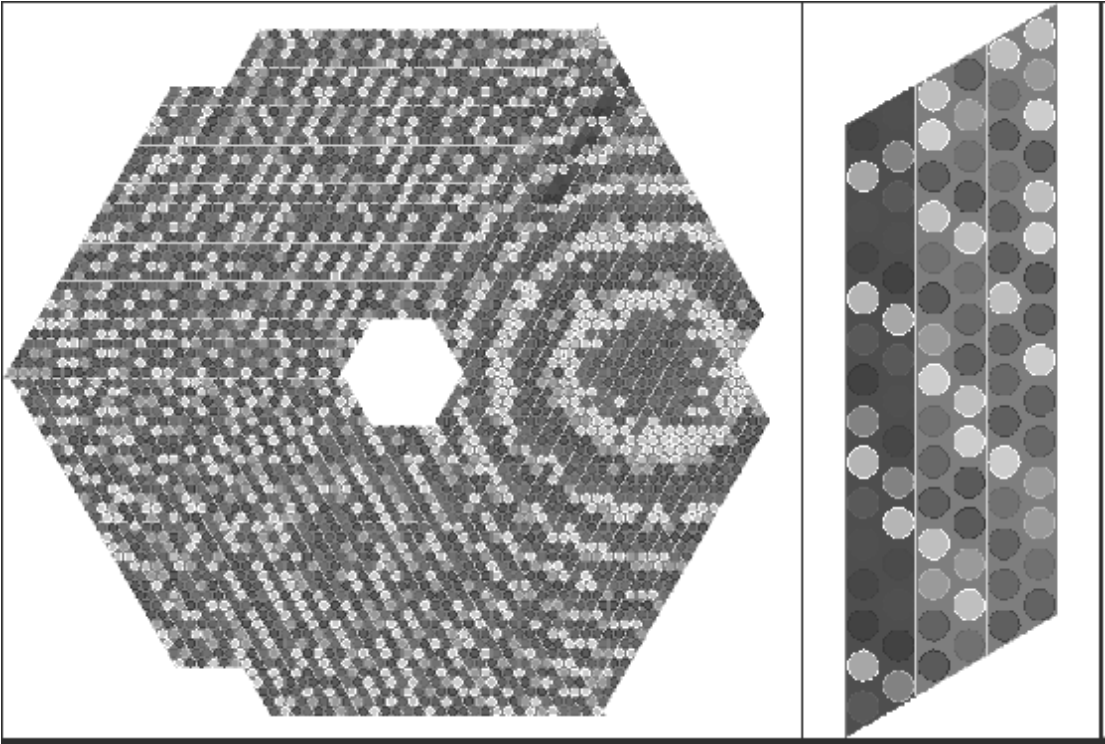


Рис.11

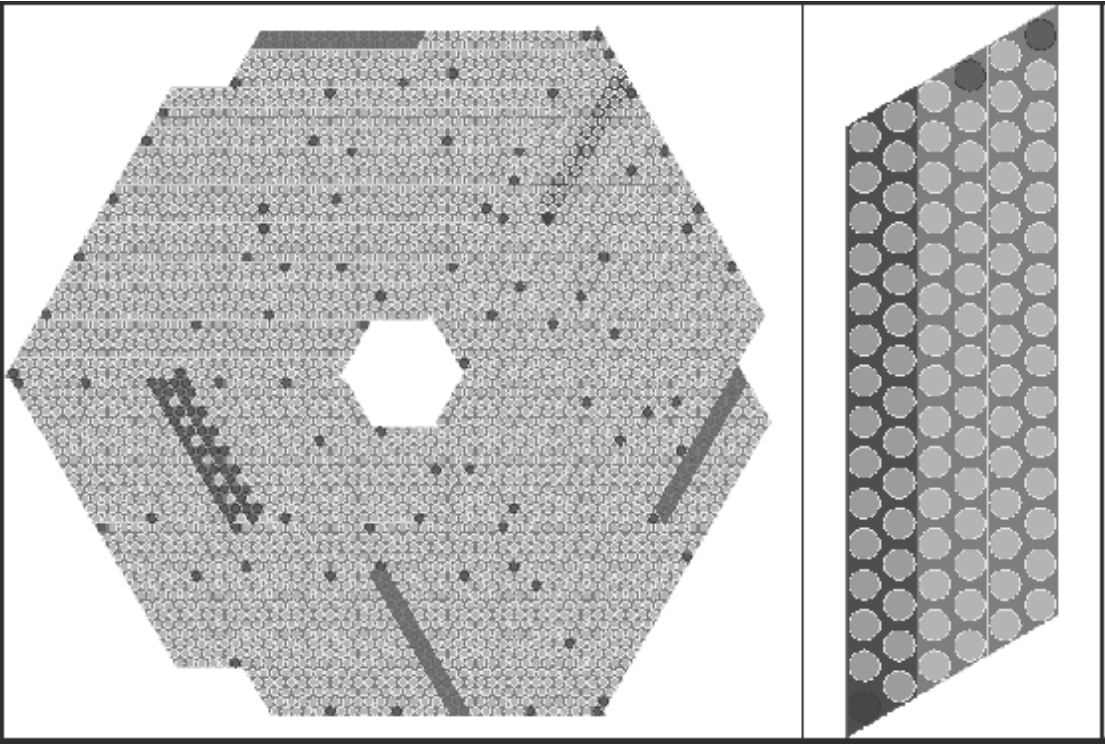


Рис.12

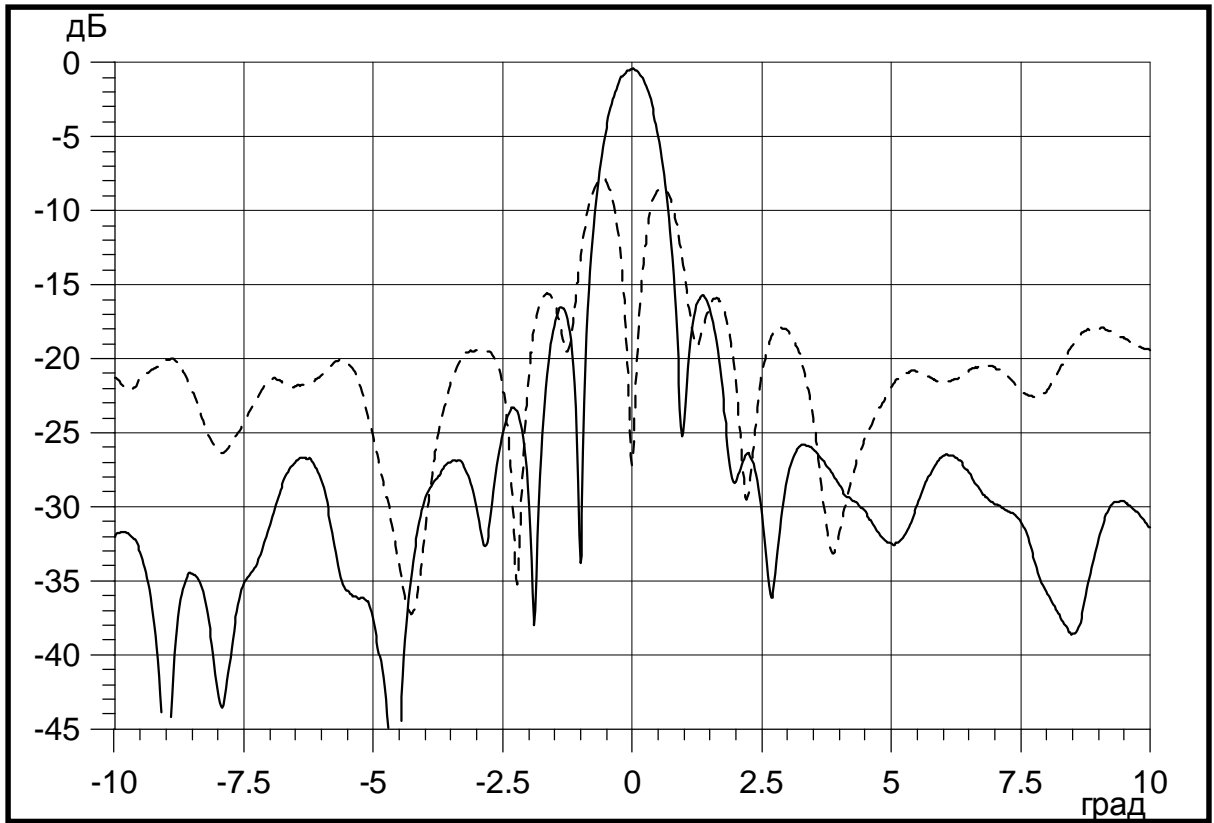


Рис.13

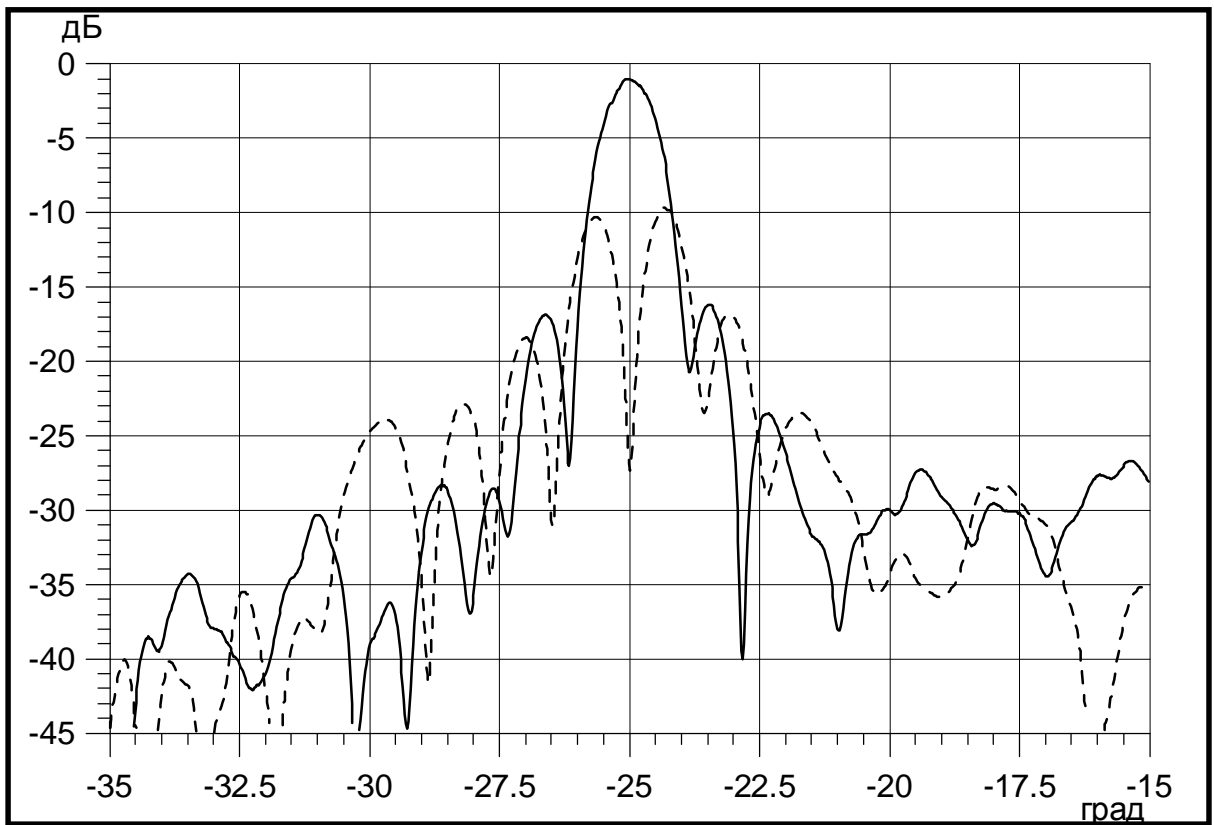


Рис.14

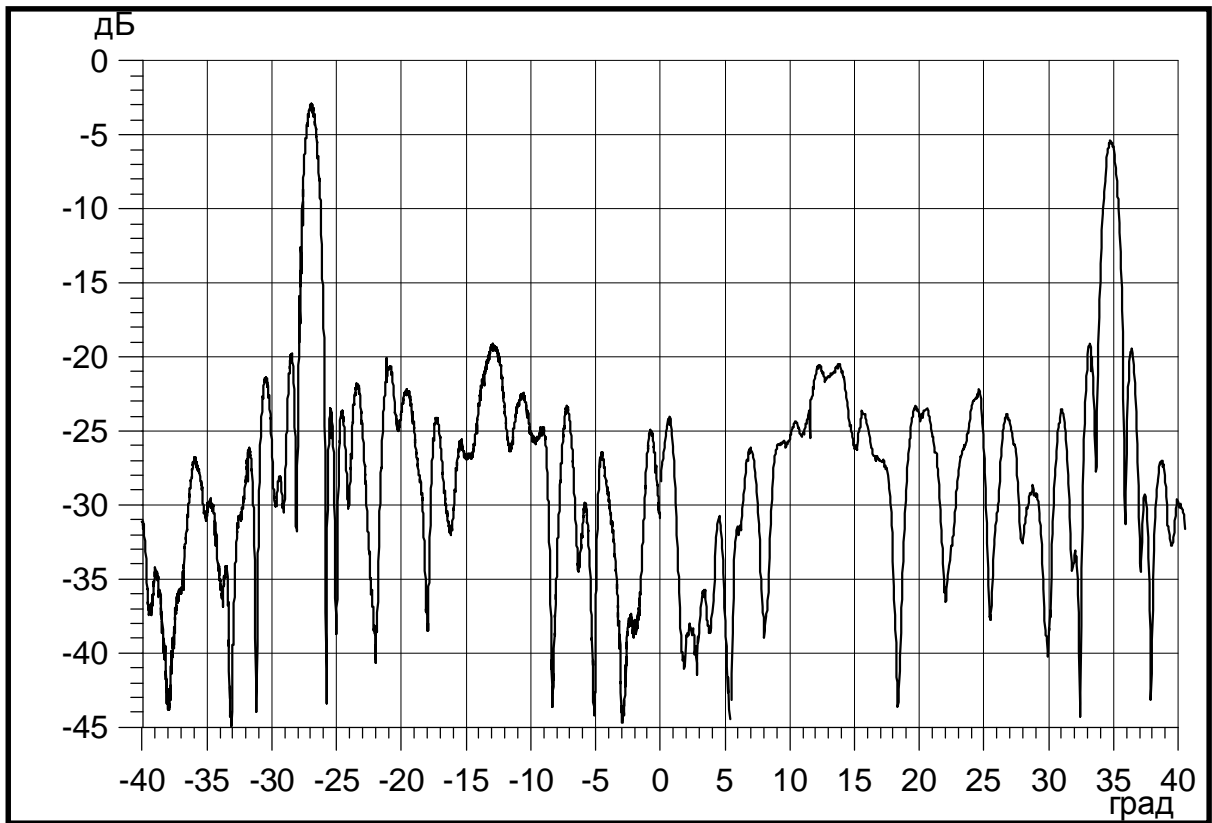


Рис.15

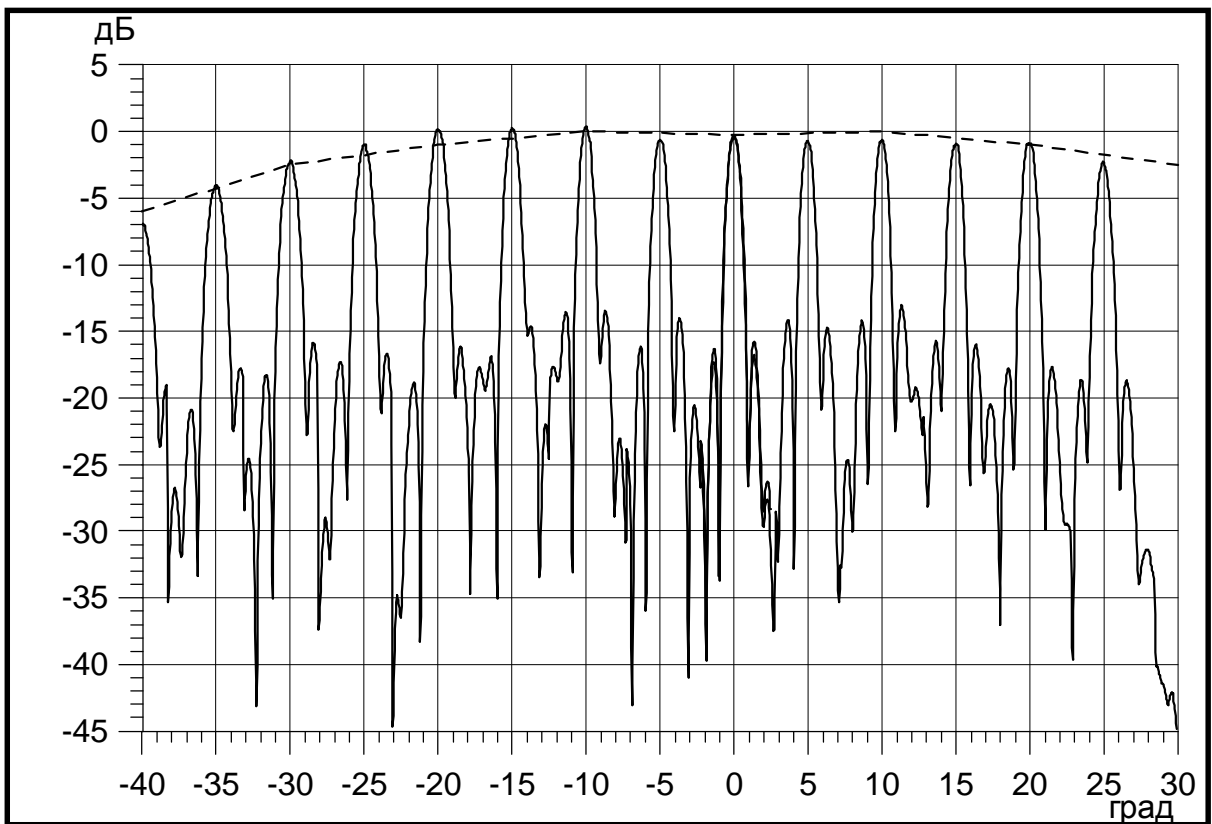


Рис. 16

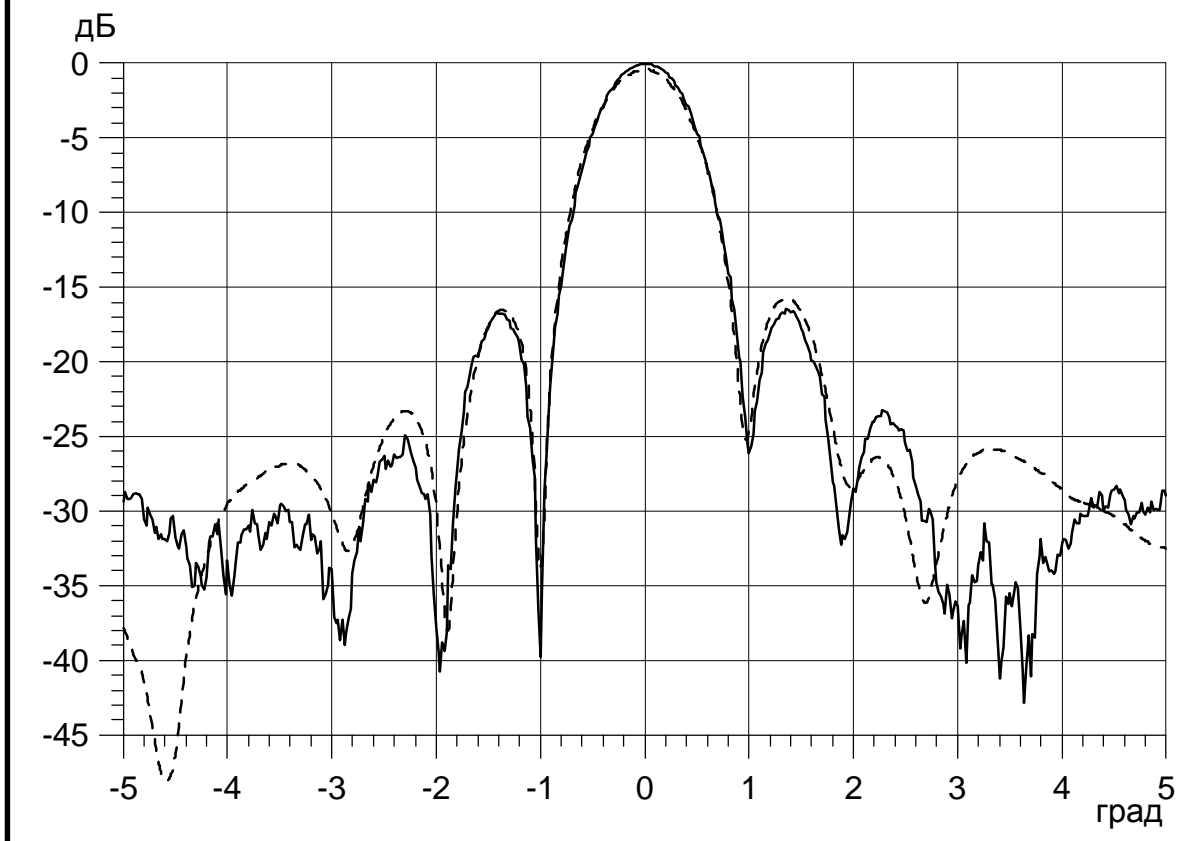


Рис. 17