

## **Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием**

**Сучков А.В.**

*Лианозовский электромеханический завод,  
Москва, Дмитровское шоссе, 110, 127411, Россия*

*e-mail: [avsu@bk.ru](mailto:avsu@bk.ru)*

### **Аннотация**

Показана возможность практической реализации технологичной конструкции моноимпульсной волноводно-щелевой антенной решетки с частотным сканированием. В предлагаемой конструкции антенны получено высокое качество технических характеристик. Исследованы особенности диаграммообразующей схемы с последовательной запиткой излучателей, приведены способы устранения характерных для нее недостатков. Разработаны эффективные методики численного анализа и оптимизации параметров электродинамической модели диаграммообразующей схемы. Рассмотрены технологические вопросы, позволяющие обеспечить требуемую точность изготовления.

**Ключевые слова:** моноимпульсная антенная решетка, частотное сканирование, диаграмма направленности, диаграммообразующая схема, электродинамическое моделирование, численный анализ.

### **I. Введение**

При выборе варианта построения антенной решетки [1], основной упор был сделан на максимальное заимствование технических, конструктивных и

технологических решений, реализованных в ранее разработанных [2], [3] антеннах, в том числе в антенном устройстве 125АС01 из состава трассового радиолокационного комплекса (ТРЛК) «Сопка-2», представляющим собой волноводно-щелевую решетку с частотным сканированием луча в вертикальной плоскости [3]. Это объясняется тем, что достигнутые в них электродинамические и эксплуатационные характеристики, а также их конструктивное исполнение, практически полностью соответствуют тактико-техническим требованиям, предъявляемым в настоящее время к радиолокационным системам (РЛС) управления воздушным движением и контроля воздушного пространства.

Однако, ужесточение требований к величине среднеквадратической ошибки измерения высоты исключает возможность полного заимствования для применения в составе новых модификаций РЛС ранее разработанных серийных антенн. Причиной этого является то, что их одноканальное построение, обеспечивающее при частотном сканировании формирование многолучевой диаграммы направленности в вертикальной плоскости, позволяет измерять высоту методом интерполяции углов места при одновременном сравнении амплитуд эхо-сигналов, принятых независимыми каналами смежных лучей. Известным недостатком этого метода в РЛС с частотным сканированием, является ограничение возможности увеличения точности измерения высоты вследствие наличия декорреляции сравниваемых эхо-сигналов в смежных лучах, формируемых на разнесенных частотах. Наряду с этим уровень боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) в плоскости частотного сканирования (порядка 20 дБ), обеспечиваемый распределительной системой на неразвязанных волноводных тройниках, в

настоящее время недостаточен для выполнения требований по защите от пассивных помех.

Устранить эти недостатки, сохранив при этом все основные достоинства предыдущих наработанных технических решений для одноканальных антенн в части волноводно-щелевых линейных излучателей и технологии производства волноводной линии задержки, представилось возможным за счет кардинальной переработки структуры вертикального делителя мощности, позволяющей реализовать в нем суммарно-разностную диаграммообразующую схему (ДОС) а, соответственно, моноимпульсный метод измерения высоты в пределах каждого луча на фиксированной частоте эхо-сигнала [4].

## **II. Схема построения антенного устройства**

На основе анализа требований к основным параметрам и характеристикам, имеющегося задела в части наработок по техническим, конструктивным и технологическим решениям и известных основных вариантов схем построения антенн (последовательной [1], [5] или параллельной, [1]) была предложена усовершенствованная последовательная схема моноимпульсной волноводно-щелевой антенной решетки с частотным сканированием, показанная на рис. 1.

Рассмотрим состав, принцип работы, технические и конструктивно-технологические особенности предлагаемого варианта схемы построения антенного устройства.

Проектируемое антенное устройство (АУ) представляет собой эквидистантную плоскую волноводно-щелевую антенную решетку, излучающая поверхность которой образована из 54-х строк волноводно-щелевых линеек (ВЩЛ),

которые установлены с шагом 70 мм и запитаны с помощью 54-канальной суммарно-разностной диаграммообразующей схемы (ДОС).

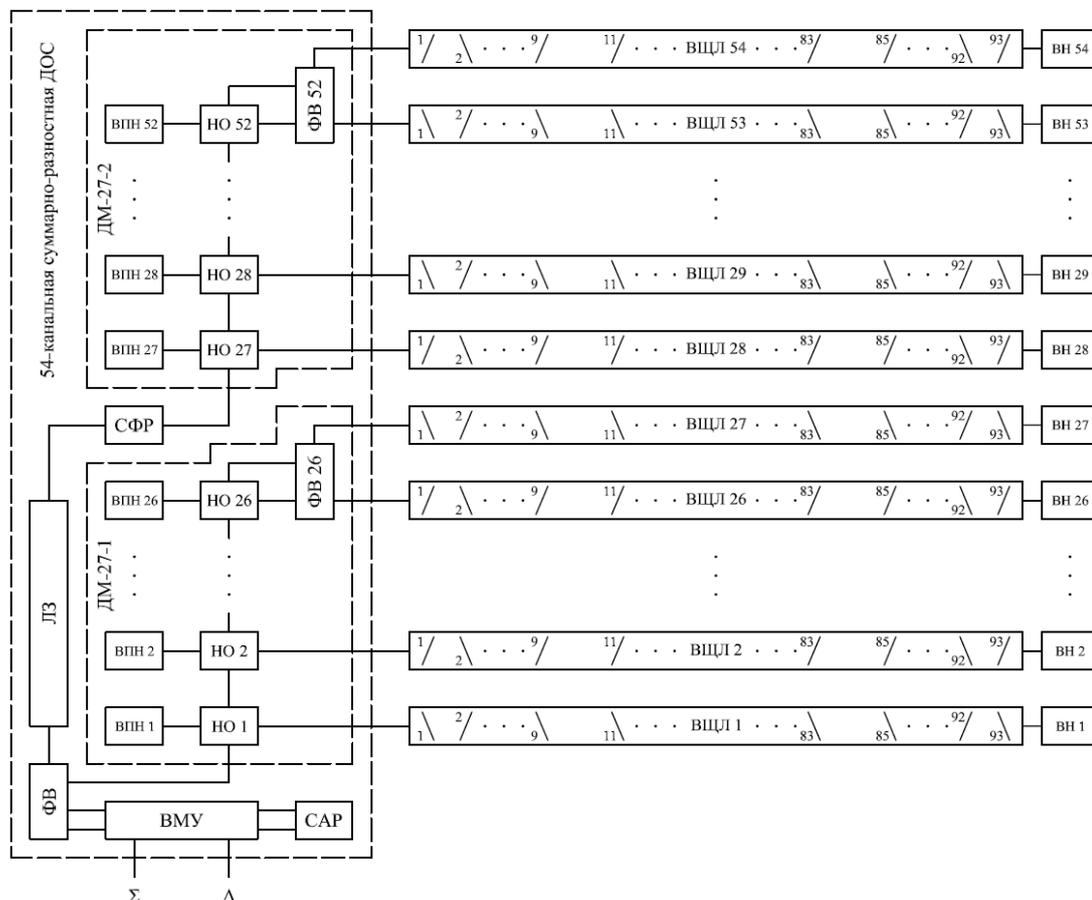


Рис. 1. Структурная схема моноимпульсной волноводно-щелевой антенной решетке с частотным сканированием.

### III. Волноводно-щелевые линейки

ВЩЛ выполнены по принципу антенны бегущей волны и формируют в горизонтальной плоскости модифицированное амплитудное распределение Хэмминга, обеспечивающее низкий уровень бокового излучения при заданной ширине луча ДН. Расчет параметров конструкции ВЩЛ выполнен по общепринятой методике, приведенной, например в [6], с учетом имеющегося опыта разработки специалистами АО «НПП «Салют» аналогичных линейных излучателей для серийной антенны 125АС01 в близком диапазоне частот. На основании результатов расчета и оптимизации электродинамической модели ВЩЛ была разработана ее

конструкция и изготовлены несколько опытных образцов. Результаты измерений характеристик ДН экспериментального образца на стенде ближнего поля представлены на рис. 2.

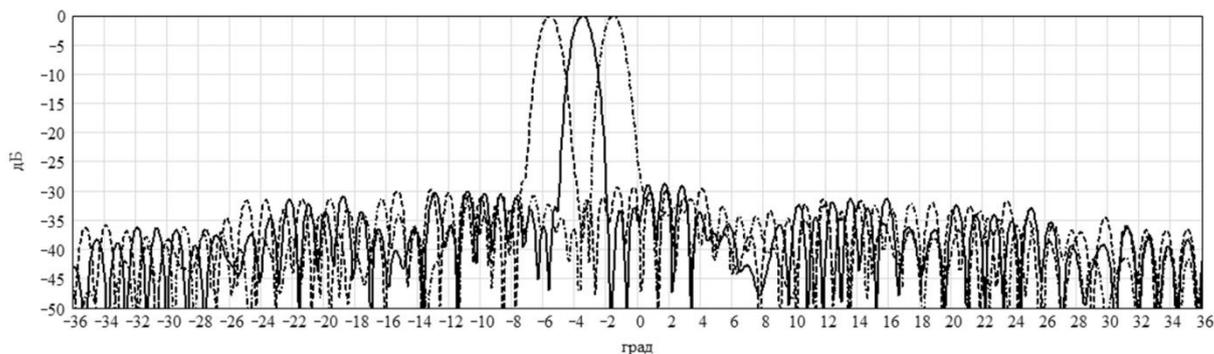


Рис. 2. ДН экспериментального образца ВЦЛ, измеренные на стенде ближнего поля.

#### IV. Диагностическая схема

ДОС представляет собой 54-канальную волноводную распределительную систему, построенную по усовершенствованной моноимпульсной схеме с последовательным питанием излучателей (рис. 1), которая спроектирована таким образом, чтобы обеспечить при работе в составе антенного устройства:

- формирование фазового распределения в раскрыве АУ, необходимого для управления положением луча ДН в 45-градусном рабочем секторе в вертикальной плоскости методом частотного сканирования;

- возможность синфазной и противофазной запитки половин раскрыва АУ (по 27 элементов каждая: ДМ-27-1 и ДМ-27-2) для формирования в вертикальной плоскости требуемых суммарной и разностной ДН;

- формирование в вертикальной плоскости «тейлоровского» амплитудного распределения, теоретически обеспечивающего по сравнению с другими при

заданном максимальном уровне боковых лепестков требуемую ширину ДН при наименьшем вертикальном размере раскрыва;

- минимизацию искажений амплитудно-фазового распределения в рабочем диапазоне частот в излучающем раскрыве АУ;

- минимизацию потерь мощности в схеме деления;

- необходимый уровень развязки между суммарным и разностным каналами;

- необходимый уровень согласования между составными элементами схемы.

Суммарно-разностная ДОС состоит из 2-х 27-канальных волноводных делителей мощности (ДМ-27-1 и ДМ-27-2), каждый из которых построен на базе 26-ти направленных ответвителей (НО), включенных с регулярным интервалом между изогнутыми волноводными участками специальной конфигурации (петлями), соединенными последовательно и образующими свернутую в Е-плоскости линию задержки, формирующую необходимый фазовый фронт на входах ВЦЛ (рис. 3). Переходные ослабления НО, приведенные на рис. 4, рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить формирование требуемого амплитудного распределения на выходах ДОС (рис. 3). К балансным плечам НО подключены волноводные поглощающие нагрузки (ВПН). Перед 2-м делителем мощности (ДМ-27-2) включена волноводная линия задержки (ЛЗ), создающая дополнительный фазовый набег на элементах с 28 по 54 для обеспечения равномерного нарастания фазового фронта в раскрыве АУ. Волноводное мостовое устройство (ВМУ) запитывает делители ДМ-27-1 и ДМ-27-2 синфазно при подаче сигнала на суммарный вход ( $\Sigma$ ) или в противофазе при подаче сигнала на разностный вход ( $\Delta$ ). В составе ДОС имеются также двухканальные волноводные фазовращатели (ФВ, ФВ26, ФВ52) и секции

амплитудной и фазовой регулировки (САР и СФР), о назначении которых будет сказано ниже.

Расчетные ДН в вертикальной плоскости, восстановленные на основании принятого к реализации теоретического АФР на верхней и нижней частотах рабочего диапазона, а также на частоте нормали показаны на рис. 5.

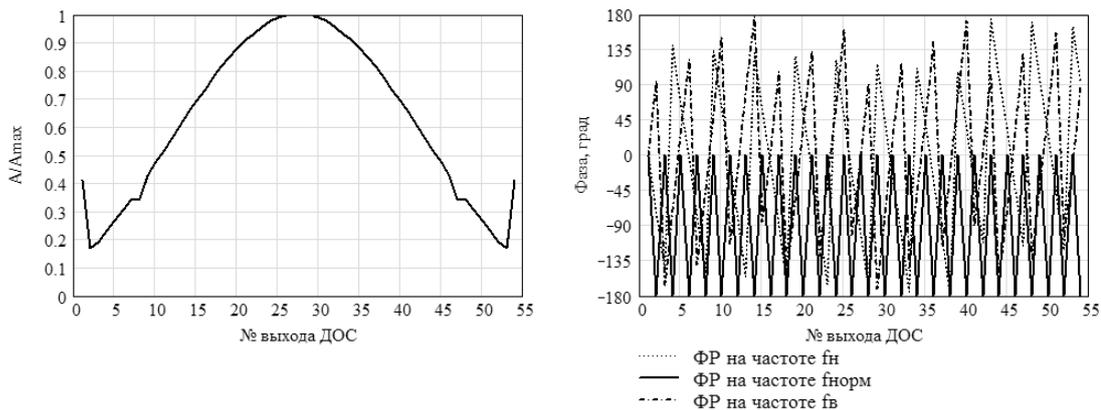


Рис. 3. Теоретическое АФР на выходах ДОС.

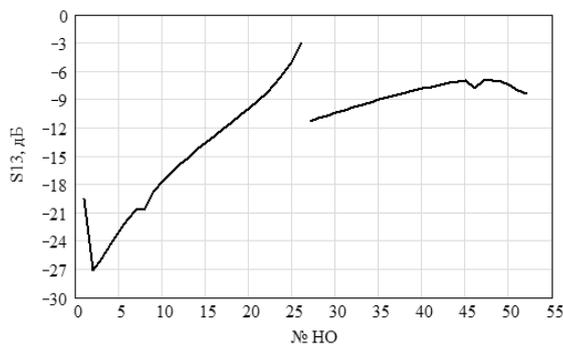


Рис. 4. График переходных ослаблений ( $S_{13}$ ) направленных ответвителей ДОС.

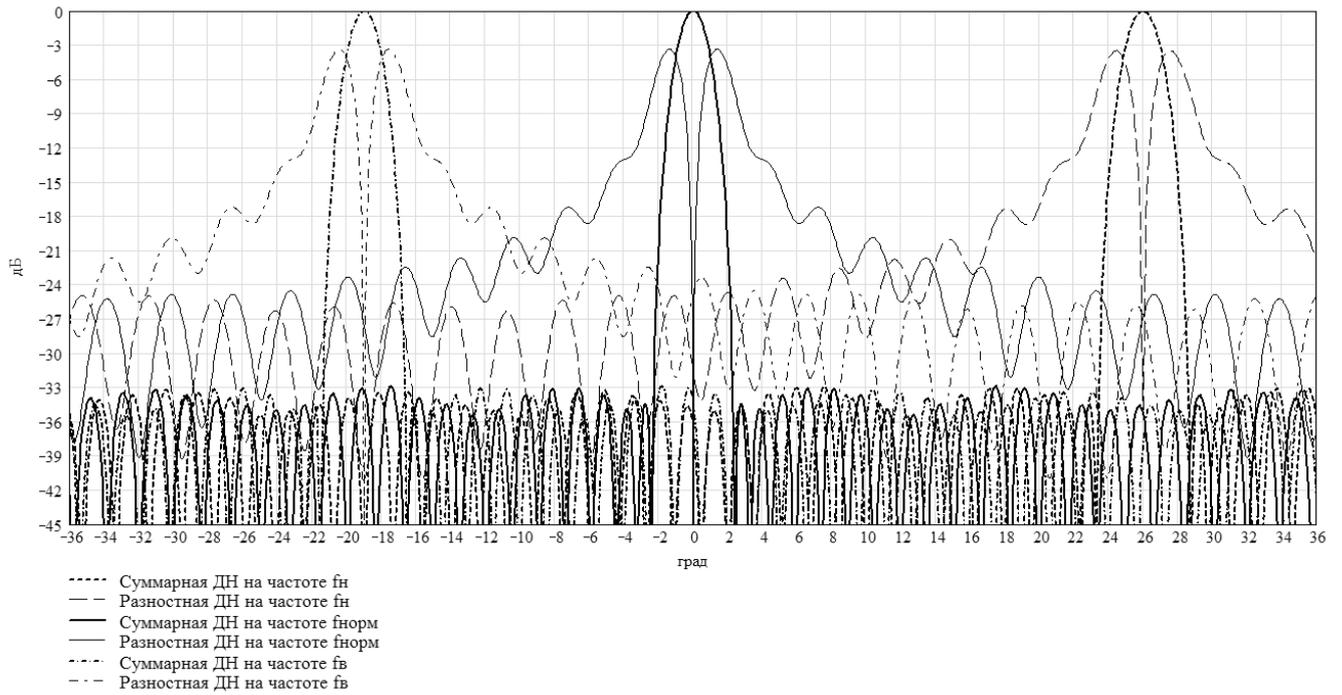


Рис. 5. Расчетные ДН, восстановленные по теоретическому АФР.

Расчет основных параметров замедляющей волноводной системы (линии задержки) был произведен исходя из требуемых ширины луча ДН в вертикальной плоскости, рабочего диапазона частот и сектора сканирования в соответствии с известным уравнением, связывающим угловое положение луча и частоту [1].

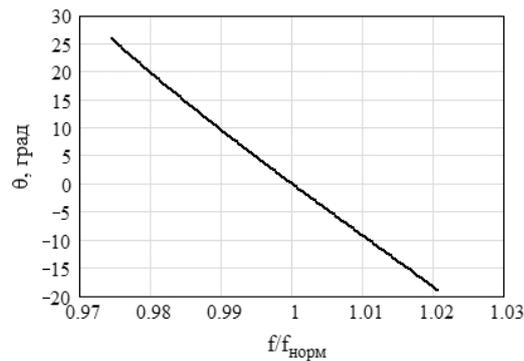


Рис. 6. График зависимости углового положения луча от частоты.

График зависимости углового положения луча в вертикальной плоскости от частоты при выбранных параметрах волноводной линии задержки приведен на рис.

6.

Применение направленных ответвителей при построении ДОС обусловлено необходимостью минимизации искажений амплитудно-фазового распределения, возникающих вследствие конечного согласования ВЦЛ и изгибов волновода линии задержки. Окна связи направленных ответвителей также имеют конечный уровень согласования, что может привести к т.н. «эффекту нормали» (синфазному сложению амплитуд, отраженных от неоднородностей волн, на входах системы деления вблизи рабочей частоты луча, расположенного по нормали к раскрыву АУ). С целью компенсации переотражений окна связи четных направленных ответвителей смещены на 40 мм (четверть длины волны на частоте нормали) к входам ВЦЛ. Набор недостающей фазовой длины осуществляется на прямолинейных волноводных участках вторичных линий нечетных НО. Таким образом производится компенсация отражений от четной и нечетной групп НО, что позволяет существенно снизить вероятность возникновения «эффекта нормали» и обеспечить требуемый уровень КСВН суммарного и разностного входов ДОС во всей полосе частот рабочего диапазона.

Исходя из соображений обеспечения приемлемой конструктивной реализации волноводной замедляющей системы, а также с целью снижения потерь мощности в ДОС при формировании требуемого спадающего АР в качестве типового распределительного элемента схемы было предложено использовать волноводный НО с Т-образным элементом связи. Конструкция такого НО представляет собой два параллельных прямоугольных волновода, связанных с помощью двух щелей, одна из которых расположена параллельно, другая – перпендикулярно продольной оси волноводов. Щели прорезаются в общей широкой стенке волноводов. На рис. 7

представлены результаты электродинамического расчета характеристик НО [7] в виде зависимости амплитуд и фаз проходящей (S12) и ответвляемой (S13) волн от длин поперечной (L1) и продольной (L2) щелей на нижней, средней и верхней частотах рабочего диапазона.

По рассчитанным значениям переходных ослаблений НО (рис. 4) и графиков рис. 7 были определены размеры поперечной и продольной щелей L1 и L2 по которым были вычислены представленные на рис. 8 амплитудные и фазовые характеристики проходящей и ответвленной волн в каждом НО ДОС.

На основании результатов электродинамического расчета характеристик НО в программной среде Mathcad был реализован алгоритм, позволяющий по известным амплитудным и фазовым характеристикам каждого НО восстановить электрические характеристики ДОС в рабочем диапазоне частот (см. рис. 9).

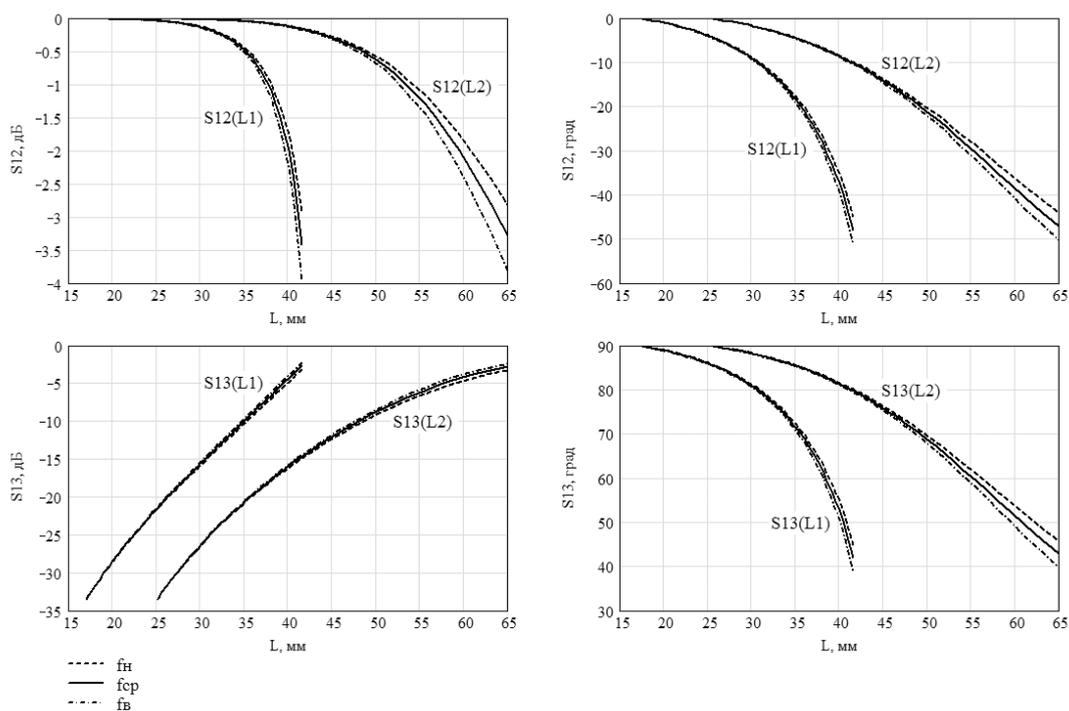


Рис. 7. Характеристики НО с Т-образным элементом связи.

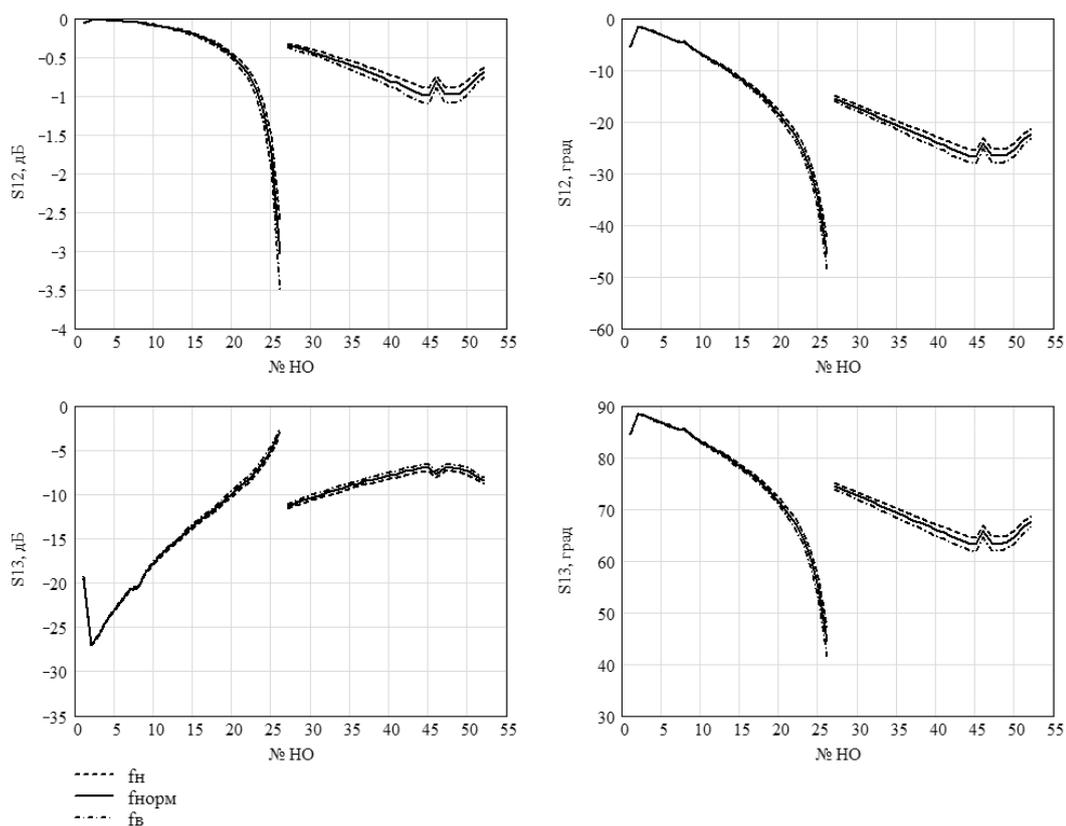


Рис. 8. Амплитудные и фазовые характеристики проходящей и ответвленной волн в НО ДОС.

Из рис. 7 и 8 видно, что одним из факторов, влияющих на качество диаграммных характеристик устройства антенного, является фазовая поправка, возникающая в окнах связи направленных ответвителей ДОС, имеющих различные коэффициенты связи с питающей линией. Для формирования в вертикальной плоскости спадающего амплитудного распределения выбранного типа требуется реализация переходных ослаблений направленных ответвителей в диапазоне от минус 27 дБ до минус 3 дБ. Соответственно, фазовая поправка, возникающая в окнах связи при реализации необходимых переходных ослаблений составит ориентировочно от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , как для проходящей, так и для ответвленной волн, что в свою очередь, при последовательной схеме питания НО, приведет к нелинейному нарастанию фазовой ошибки на половинах диаграммообразующей схемы до нескольких сотен градусов (рис. 9, в).

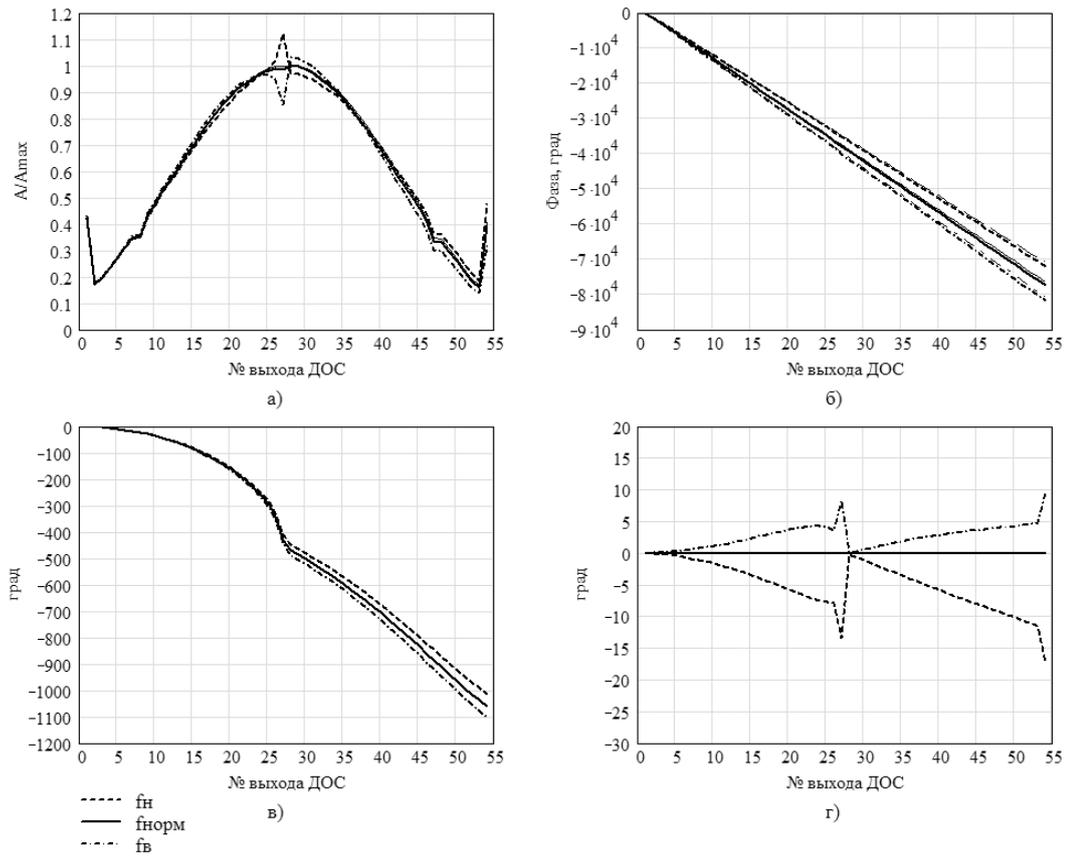


Рис. 9. Восстановленные характеристики ДОС:

а) АР; б) ФР (тонкими линиями показано теоретическое линейное ФР; в) отклонение восстановленного ФР от теоретического линейного; г) отклонение восстановленного ФР от теоретического линейного после коррекции длин петель линии задержки.

Поэтому для получения требуемого уровня боковых лепестков ДН в вертикальной плоскости итерационным способом была произведена коррекция длин регулярных участков волноводных петель замедляющей системы в соответствии с формулой (1), которая позволила скомпенсировать фазовые ошибки в половинах ДОС до уровня  $\pm 10^\circ$ .

$$S c_n = S - \frac{(\Delta\varphi_{n+1} - \Delta\varphi_n) \cdot \lambda}{0,36 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a}\right)^2}}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi_n = \varphi_n - \varphi l_n$  разность фаз между восстановленным ФР  $\varphi_n$  и теоретическим линейным ФР  $\varphi l_n$  на частоте нормали (рис. 9, в),  $\lambda$  – длина волны на частоте нормали,  $n = 1, 2 \dots 53$ . Отклонение восстановленного ФР от теоретического

линейного после коррекции длин петель линии задержки показано на рис 9, г. После восстановления ДН в вертикальной плоскости по данным рис. 9 было установлено, что «пилообразный» характер фазовой ошибки (рис. 9, г), а также выбросы на элементах 27 и 54 в рабочем диапазоне частот приводят к искажению формы разностной ДН (перепаду между максимумами главных лепестков до 1-2 дБ и ухудшению требуемого отношения уровня максимума ДН суммарного канала к уровню минимума ДН разностного канала) и увеличению до 2-3 дБ ближних боковых лепестков суммарной ДН. Рассмотрим методы компенсации фазовых ошибок.

В связи с проблематичностью реализации больших переходных ослаблений направленных ответвителей (от минус 3 дБ и более) для минимизации потерь мощности в ДОС последние элементы делителей, выполненные на НО 26 и НО 52, построены по схеме с полным выводом мощности на две ВЦЛ каждый. Добор фазовой поправки для выходов 27 и 54 ДОС, которая обусловлена изменением фазы ответвляемой волны в НО и составляет примерно  $+90^\circ$ , осуществляется на последнем витке замедляющей системы каждого из делителей мощности. Для устранения частотной неравномерности фазы в схеме ДОС применен двухканальный волноводный фазовращатель ФВ 26 (ФВ 52), обеспечивающий постоянство разности фаз проходящей и ответвленной волн в НО между выходами 26 и 27 (53 и 54) в рабочем диапазоне частот, без применения в составе его конструкции диэлектрических фазосдвигающих клиньев. Принцип работы такого фазовращателя пояснен в [8].

Из-за наличия частотной зависимости фазовой поправки, вносимой НО (рис. 7, 8) волноводная линия задержки, создающая дополнительный фазовый набег на элементах с 28 по 54 не может обеспечить равномерность нарастания фазового фронта на выходах ДОС во всей полосе частот рабочего диапазона. Для устранения этого существенного недостатка, приводящего в итоге к росту УБЛ суммарной ДН и неприемлемому искажению формы разностной ДН при сканировании в заданном секторе на выходах мостового устройства был применен рассчитанный в соответствии с формулами (3) и (4) двухканальный волноводный фазовращатель (ФВ), по исполнению аналогичный рассмотренным выше фазовращателям ФВ 26 и ФВ 52, которые были установлены на выходах НО 26 и НО 52. После фазировки ДОС с помощью фазовращателей ФВ, ФВ26 и ФВ52 нелинейность фазового фронта на выходах с 1 по 54 не превысила в рабочем диапазоне частот значения  $\pm 2^\circ$  (см. рис.10).

Для устранения скачка фазового фронта между половинами излучающего раскрыва, который связан с неидентичностью фазовых характеристик ДМ-27-1, ДМ-27-2 и волноводной линии задержки, обусловленных влиянием допусков изготовления на размер широкой стенки волновода, на входе второй половины ДОС включена волноводная секция фазовой регулировки (СФР), обеспечивающая необходимую регулировку при изменении электрической длины.

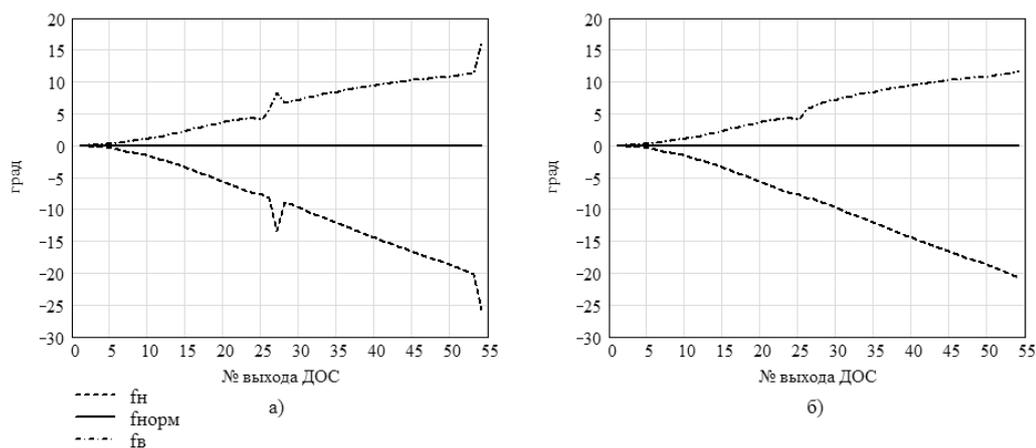


Рис. 10. Отклонение восстановленного ФР от теоретического линейного после коррекции длин петель линии задержки: а) с учетом включения в схему фазовращателя ФВ; б) с учетом включения в схему фазовращателей ФВ, ФВ26 и ФВ 52.

В волноводном мостовом устройстве, предназначенном для синфазно-противофазной запитки 27-канальных делителей ДСО реализована возможность перестройки коэффициента деления[10]. Это связано с тем, что для получения требуемого отношения уровня максимума ДН суммарного канала к уровню минимума ДН разностного канала (т.н. «глубины нуля» разностного канала) необходима балансировка амплитуд СВЧ-сигналов, подаваемых на ДМ-27-1 и ДМ-27-2, с точностью не хуже  $\pm 0,1$  дБ. Поэтому в составе ВМУ предусмотрена волноводная секция амплитудной регулировки (САР), которая при изменении электрической длины позволяет получить нужное соотношение амплитуд сигналов на выходах устройства с заданной точностью во всем рабочем диапазоне частот.

На основании проведенных расчетов, а также рассмотренных методов компенсации фазовых ошибок и балансировки амплитуд сигналов, подаваемых на ДМ-27-1 и ДМ-27-2 были определены основные геометрические размеры ДСО (см. рис. 13, показано сплошными линиями) и восстановлены диаграммные характеристики в вертикальной плоскости (рис. 11).

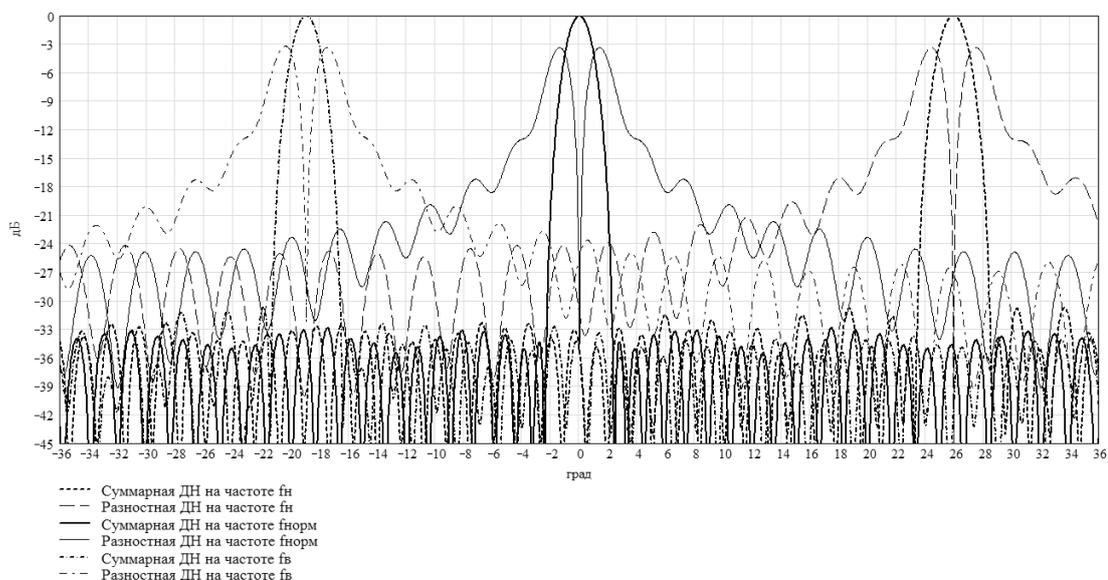


Рис. 11. ДН в вертикальной плоскости, рассчитанные на основании восстановленных рабочих характеристик ДОС.

В соответствии с рассчитанной конфигурацией основных элементов (петель ЛЗ, НО, ФВ, ВМУ, САР, СФР и типовых волноводных узлов) с целью анализа и оптимизации рабочих характеристик в программе Hfss была разработана электродинамическая модель ДОС, приведенная на рис. 12. С целью упрощения интерпретации фазового распределения запитка четных выходов (волновых портов) модели ДОС производилась в противофазе по отношению к нечетным выходам.

В процессе оптимизации для обеспечения необходимого положения сектора сканирования относительно расчетного положения луча, расположенного по нормали к раскрытию, а также компенсации случайных фазовых ошибок, связанных с конечным уровнем согласования отдельных элементов схемы, итерационным способом была произведена дополнительная коррекция длин регулярных участков волноводных петель замедляющей системы в соответствии с формулой (1). Геометрические размеры поперечных и продольных щелей НО также корректировались на каждой очередной итерации пересчета длин петель для

устранения искажений амплитудного распределения, связанных с взаимным влиянием НО по основной волне.

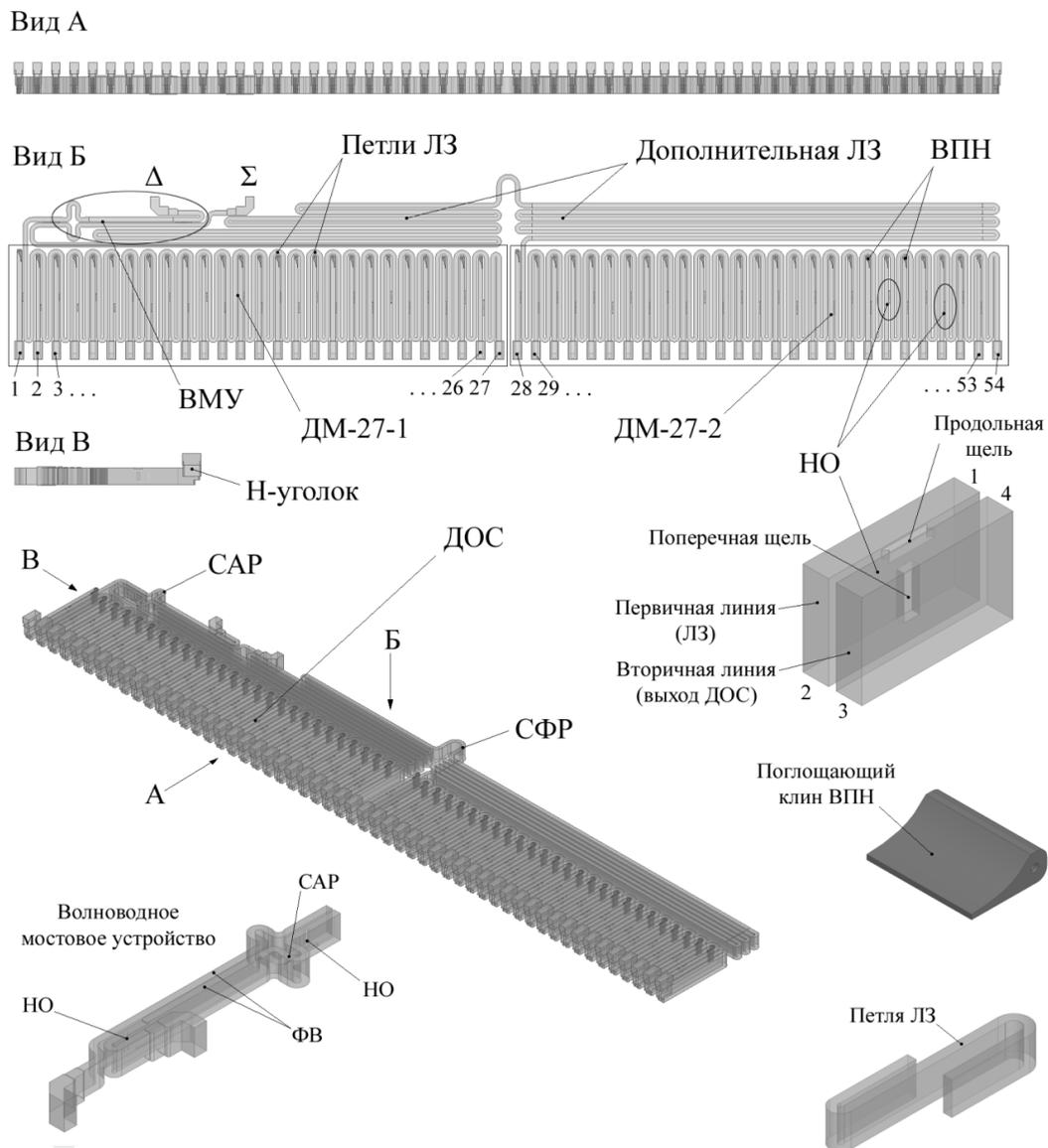


Рис. 12. Электродинамическая модель ДОС.

Критерием сходимости процесса являлось приближение с заданной точностью рассчитываемого при моделировании АФР на выходах ДОС к теоретическому амплитудному распределению, выбранному для реализации, что позволило минимизировать значения амплитудных и фазовых ошибок в излучающем раскрытии АУ до величин, обеспечивающих требуемые характеристики ДН.) Результаты расчета размеров поперечной и продольной щелей НО и приращений длин (dS)

регулярных участков волноводных петель замедляющей системы, полученные при оптимизации электродинамической модели ДОС в Hfss на последней итерации показаны точками на рис . 13.

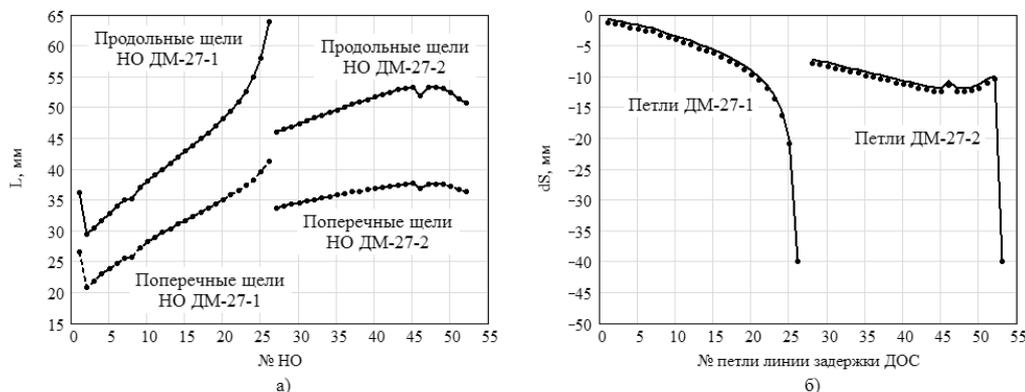


Рис. 13. Основные геометрические размеры конфигурации ДОС:  
 а) размеры поперечной и продольной щелей НО; б) приращения длин(dS) регулярных участков волноводных петель замедляющей системы.

Характеристики ДОС, достигнутые при оптимизации электродинамической модели в Hfss, а также восстановленные по ним ДН представлены соответственно на рис. 14 и 15. Расчетный уровень КСВН суммарного и разностного входов в рабочем диапазоне частот при анализе электродинамической модели ДОС в программе Hfss не превысил величины 1,27.

Анализируя данные, полученные по результатам электродинамического анализа ВЩЛ и суммарно-разностной ДОС, а также на основании опыта разработки антенны 125АС01, можно сделать вывод, что диаграммные характеристики антенного устройства в главных сечениях будут практически идентичны характеристикам ДН ВЩЛ в горизонтальной плоскости (рис. 2) и характеристикам ДН в вертикальной плоскости, которые были восстановлены на основании АФР ДОС, полученного при электродинамическом моделировании в Hfss (рис. 15).

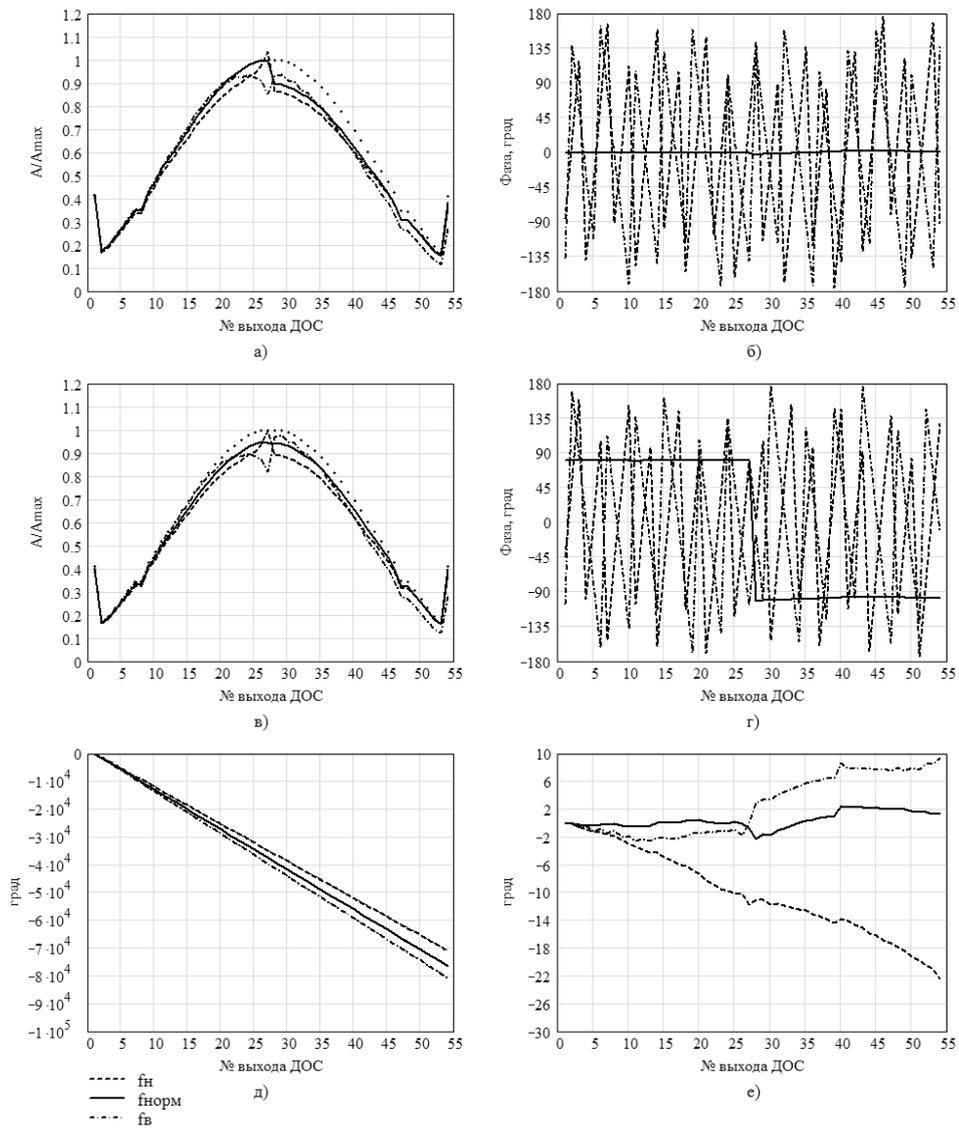


Рис. 14. Характеристики ДОС, полученные по результатам электродинамического моделирования в Hfss: а) АР суммарного канала (точками обозначено теоретическое АР); б) ФР суммарного канала; в) АР разностного канала (точками обозначено теоретическое АР); г) ФР разностного канала; д) ФР (тонкими линиями показано теоретическое линейное ФР; е) отклонение ФР от теоретического линейного.

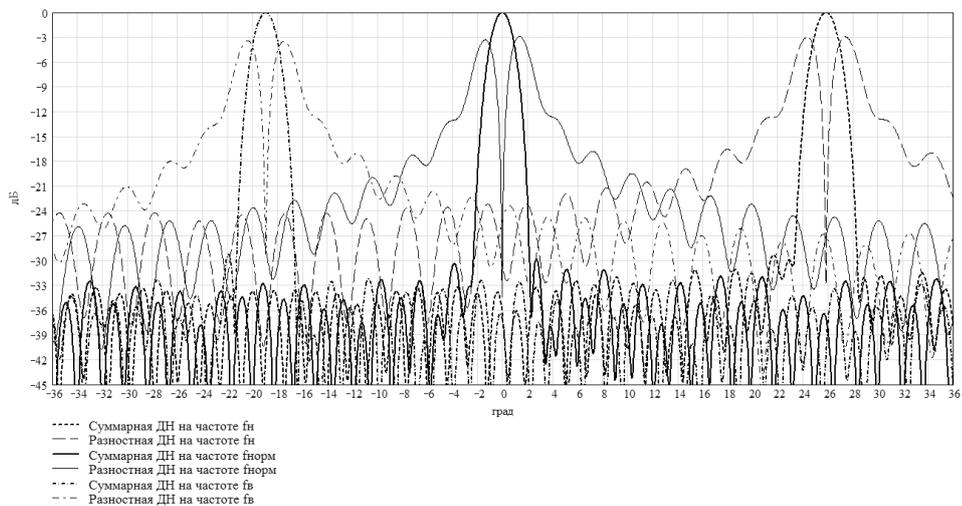


Рис. 15. ДН в вертикальной плоскости, восстановленные на основании АФР ДОС, полученного при электродинамическом моделировании в Hfss.

## V. Конструктивно-технологическое исполнение

Разработанное антенное устройство, представляющее собой плоскую волноводно-щелевую антенную решетку, конструктивно состоит из 54-х волноводно-щелевых линеек и волноводной распределительной системы (суммарно-разностной ДОС), собранных на несущей раме, которая представляет собой сварную конструкцию из гнутых алюминиевых профилей (рис. 16). Рама антенны изготавливается составной из 4-х сварных секций, соединенных болтами и штифтами. Размеры одной секции позволяют произвести механическую обработку всех посадочных поверхностей для установки ВЦЛ и соединения секций между собой. Все это позволяет изготовить раму, а затем и всю антенну с высокой точностью излучающей поверхности и опорных плоскостей. ВЦЛ изготовлены на базе стандартного прямоугольного проката волноводных алюминиевых труб сечением  $72 \times 34$  мм с прорезанными по узкой стенке переменными наклонными щелями. Нарезка щелей производится с использованием высокоточных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающих требуемые технологические допуски. ВЦЛ выполнены из 3-х составных частей, что определяется максимальной длиной поставляемого проката (5 м) и возможностями технологического оборудования. Каждая из частей загерметизирована с помощью единого радиопрозрачного защитного кожуха, выполненного на базе композиционных материалов. Части ВЦЛ соединяются стандартными волноводными фланцами, расположенными вне зоны максимального излучения (в области 10-й и 84-й щелей). Вход ВЦЛ выполняется в виде Н-плоскостного уголка, предназначенного для прямого подключения к волноводным выходам ДОС.

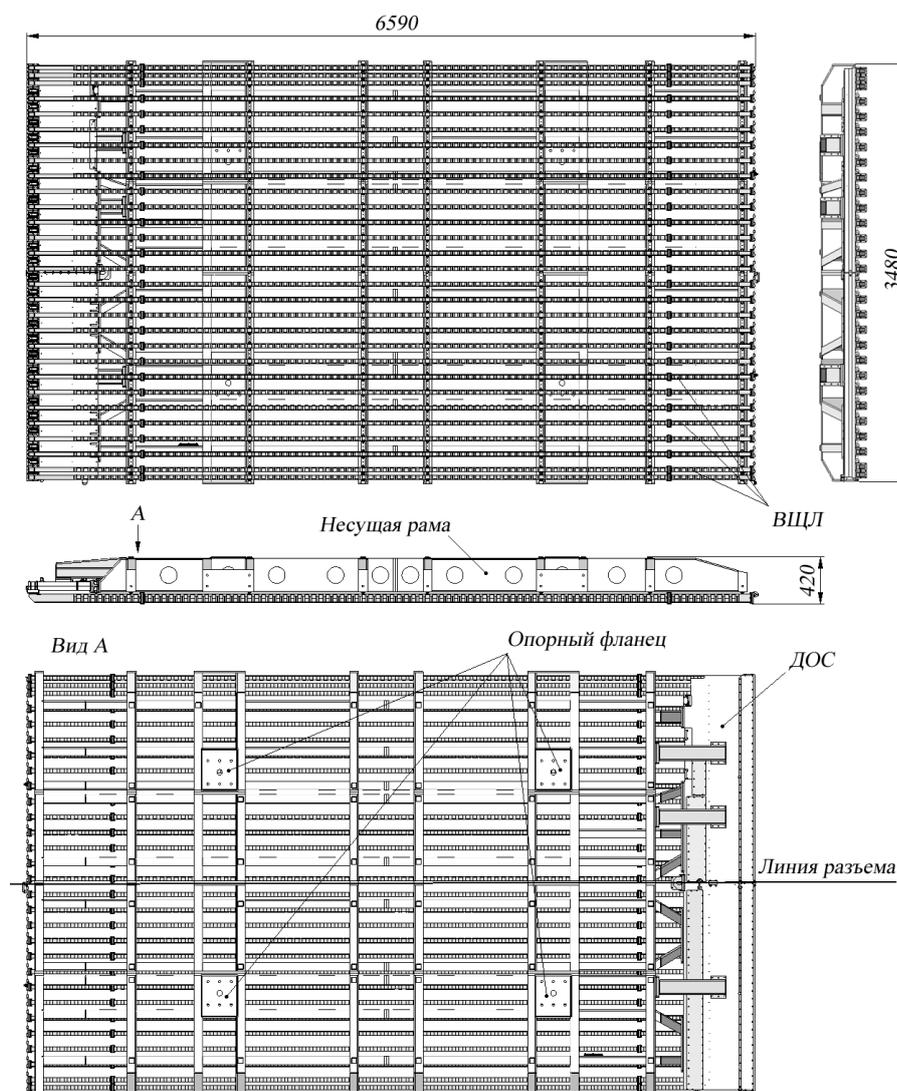


Рис. 16. Конструкция антенного устройства (для наглядности четные ВЩЛ с 4-й по 52-ю скрыты)

Конструкция 54-канальной ДОС состоит из 2-х последовательно соединенных 27-канальных секций, максимальные размеры которых определяются возможностями технологического оборудования. Каждая секция состоит из 2-х зеркально-симметричных алюминиевых плит, в которых на станках с ЧПУ соответствующим образом профрезерована волноводная топология устройства – профиль волновода, окна связи НО и прочие составные элементы схемы (рис. 17). Стыковка плит производится вдоль плоскости, являющейся плоскостью симметрии внутренних волноводных каналов перпендикулярной их широкой стенке. После сборки двух плит образуется свернутый в «змейку» волновод,

состыкованный по линии нулевых токов. Внутри секций расположены волноводное мостовое устройство, волноводная линия задержки змейкового типа (магистральная линия), которая связана через щелевые Т-образные окна связи с вторичными волноводными линиями, образуя 52 направленных ответвителя мощности, а также дополнительная волноводная линия задержки, равномерно распределенная по 2-м секциям ДОС. В балансных плечах направленных ответвителей установлены 52 клина, выполненных из поглощающего состава на основе карбонильного железа и разрезанных для обеспечения удобства сборки блока по линии стыковки алюминиевых плит. Волноводная топология ДОС выполнена на базе волновода с сечением  $64,7 \times 17$  мм. Входы и выходы устройства выполнены на базе волновода стандартного сечения  $72 \times 34$  мм. На узкой стенке волноводных каналов магистральной и дополнительной линий задержки блока имеются отверстия диаметром 3 мм, через которые производится отвод конденсата в систему слива. Система слива конденсата располагается на тыльной стороне ДОС и представляет собой 6 продольных трубок, распределенных по поверхности блока и собранных в нижних частях каждой из 27-канальных секций в единый канал. На выходе системы установлен сливной клапан. Секции ДОС соединены изогнутой волноводом, который отсоединяется перед транспортировкой антенны. Стыки плит после сборки герметизируются анаэробным герметиком, а стыки секций – контактными и резиновыми прокладками.

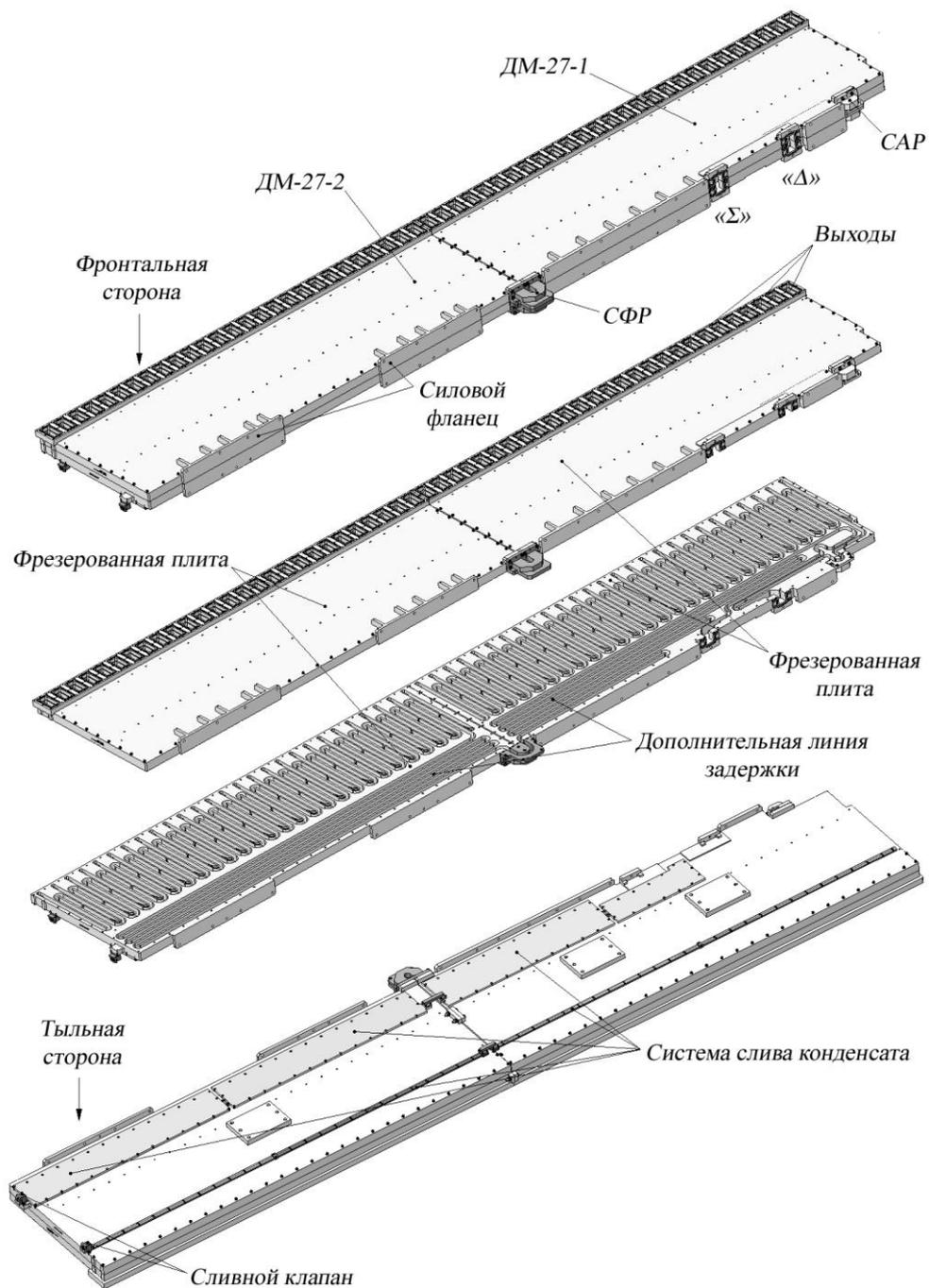


Рис. 17. Конструкция ДЭС.

## VI. Заключение

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что разработанная моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием удовлетворяет предъявляемым к ней техническим и конструктивным требованиям. Примененные в процессе разработки технические решения позволили

получить технологичную низкопрофильную конструкцию антенны с характеристиками улучшенными по сравнению с характеристиками известных аналогов, выполненных на базе последовательной схемы построения [1], [3], [5], в части эффективного коэффициента усиления, УБЛ, стабильности формы суммарной и разностной ДН в секторе сканирования и общего конструктива суммарно-разностной ДОС.

Следует отметить, что предложенные усовершенствования известной суммарно-разностной схемы с последовательным питанием излучателей [1] в части организации полного вывода мощности на крайние элементы ДМ-27-1 и ДМ-27-2, применения двухканальных фазовращателей и волноводного мостового устройства с регулируемым коэффициентом деления, позволили реализовать на практике плоскую конструкцию волноводной суммарно-разностной ДОС на базе двух фрезерованных половин и устранить необходимость применения в ней оконечных нагрузок, сохранив при этом и эффективный коэффициент усиления антенны (за счет снижения потерь в схеме) и требуемое качество ДН в секторе сканирования антенны.

Рекомендации по устранению известных недостатков моноимпульсной ДОС последовательного типа, рассмотренные ранее в [1] и [5], носят в основном теоретический характер и не затрагивают вопросов практической реализации приемлемой (с точки зрения технологии изготовления и габаритных размеров) конструкции антенны, а также специфику вопросов устранения фазовых ошибок и амплитудной балансировки половин ДОС, что с целью обеспечения требуемых

выходных характеристик необходимо учитывать при применении любых известных типов ответвителей мощности в подобных схемах.

### **Библиографический список**

1. Сколник М. Радиолокационные антенные устройства: Справочник по радиолокации. - М.: Советское Радио, 1977. Т.2. - 408 с.
2. Бородин Н.Д., Ковалев В.Т., Ленци Ю.И., Немоляев А.И. Волноводно-щелевые антенные решетки с частотным сканированием // Доклады XVII научно-технической конференции ВНИИРТ. - М.: ВНИИРТ, 2007. - 333 с.
3. Трассовый радиолокационный комплекс (ТРЛК) «Сопка-2» URL: <http://www.lemz.ru/views/solutions/orvd/trlkr/sopka2>. 2015.
4. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1984. - 312 с.
5. Моноимпульсная антенна с частотным сканированием Патент РФ № 2490760 / Бородин Н.Д., Исаков М.В. Бюл. № 23, 27.08.2013. 7 с.
6. Воскресенский Д.И., Грановская Р.А., Давыдова Н.С. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие. - М.: Радио и связь, 1981. - 432 с.
7. Сучков А.В. Волноводный направленный ответвитель с Т-образным элементом связи // Материалы 25-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо -15, Севастополь, 2015. С. 556-557.

8. Сучков А.В. Волноводное мостовое устройство с регулируемым коэффициентом деления // Материалы 25-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо'15, Севастополь, 2015. с. 564-565.