

Печатные дипольные фазированные антенные решетки (ФАР) широко применяются в радиотехнических и телекоммуникационных системах [1]. Расширение сфер использования ФАР и повышение несущих частот применяемых в них радиосигналов при жестких требованиях к габаритно-массовым и стоимостным показателям обуславливает необходимость выбора такой структуры антенной решетки, которая обеспечивала бы максимальную реализацию преимуществ интегрально-групповой технологии выполнения узлов ФАР, включая сами излучающие элементы [2]. Излучающим элементом дипольных ФАР является диполь, реализованный в печатном (травление медной фольги с пробельных мест на фольгированных листовых диэлектриках типа ФФ-4, ФАФ-4, ФЛАН и т.п.) или микронном (вакуумное тонкопленочное напыление меди на керамику типа 22ХС, Поликор, Ситалл и др.) исполнениях. Электромагнитное поле печатного диполя формируется осевыми токами проводимости, которые несут на себе его половины, запитанные от источника сигнала с ЭДС E_S и внутренним вещественным сопротивлением R_S . В случае несимметричного относительно «земли» источника сигнала, подключаемого к диполю коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением $\rho_0 = R_S$, существенное значение имеют способы согласования и симметрирования диполя и кабеля при условии простоты, надежности и технологичности соответствующего конструктивного решения. При этом печатный диполь и симметрирующее устройство объединяются в единую интегрированную структуру, которую принято считать базовым элементом многодипольной ФАР. Все фрагменты печатного рисунка базового элемента, который фактически является интегрированным дипольным излучающим модулем (ИДИМ), реализуются как на лицевой, так и на обратной сторонах диэлектрической подложки. Предпочтительными считаются такие ИДИМ, в структуре которых отсутствуют сквозные металлизированные переходные отверстия для

обеспечения гальванического контакта отдельных фрагментов лицевой и обратной сторон подложки.

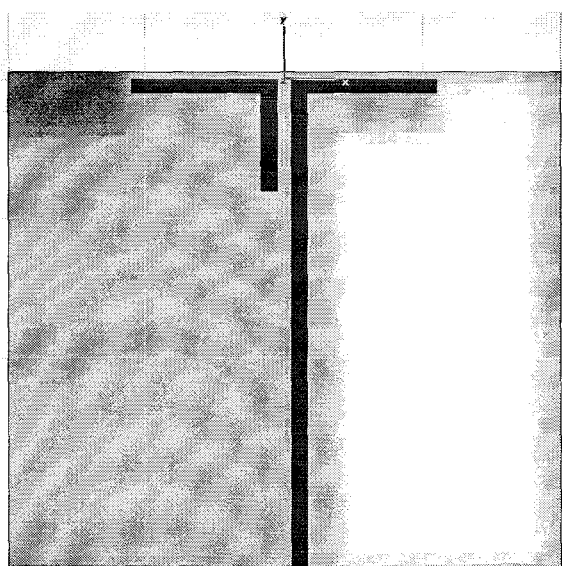
На современном этапе развития антенной техники уже невозможно вести эффективное проектирование (будь то курсовой, дипломный или коммерческий проект) без использования специализированных полно-волновых (full wave) систем автоматизированного проектирования (САПР). Их применение позволяет существенно уменьшить трудоемкость и стоимость процессов разработки и экспериментальной отработки печатных микроволновых устройств. На рынке предлагается множество САПР различных конфигураций и версий в зависимости от года модификации. Все они, теми или иными электродинамическими численными методами, позволяют рассчитать матрицу рассеяния или коэффициент отражения любого микроволнового узла, а также интенсивность электромагнитного поля вокруг этого узла в ближней и дальней зонах окружающего пространства.

В результате разработчик устройства освобождается от трудоемких вычислений и все его внимание сосредотачивается на формировании адекватного облика проектируемого узла и оценивании полученных результатов проектирования. Неудачный выбор облика начального приближения, как правило, не может быть компенсирован за счет оптимизации размеров и параметров диэлектрика подложки. Поэтому высокопрофессиональный, системный подход к выбору адекватного облика проектируемого узла и его компоновки в пространстве играет ключевую роль в компьютерном проектировании.

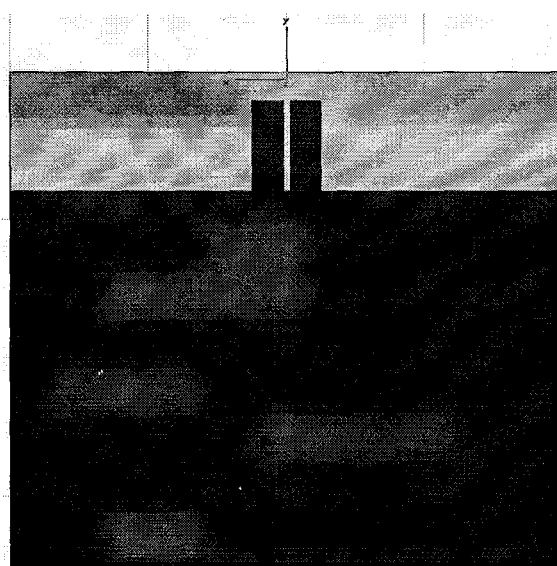
Ниже приводятся материалы, способствующие формированию облика уединенного ИДИМ и дипольных ФАР в целом, отличающиеся от ранее описанных в литературе печатных ФАР рядом конструктивно-технологических преимуществ. При этом детально описываются конкретные действия пользователя одной из самых производительных на сегодняшний день САПР «CST Microwave Studio» («CST MWS»), позволяющей существенно повысить эффективность проектирования.

2. СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЕДИНЕННОГО ИДИМ

Рассматриваемый ИДИМ, предложенный в [3], хорошо адаптируется как к печатному, так и к тонкопленочному микроэлектронному исполнению. При этом на обратной стороне подложки выполнен сплошной участок металлизации, являющийся локальной «землей» и подлежащий соединению с общим корпусом носителя ФАР. Кроме того, здесь же дополнительно сформирован пьедестал в форме «ласточкина хвоста» (то есть, с продольным зазором посередине вдоль всего пьедестала), гальванически соединенный со сплошным участком металлизации (рис. 1). На лицевой стороне подложки сформированы печатный диполь, питающая микрополосковая линия и четвертьволновый разомкнутый шлейф из несимметричной микрополосковой линии. При этом шлейф и питающая линия расположены над половинами «ласточкина хвоста» (питающая линия имеет продолжение еще и над сплошным участком металлизации до края установки коаксиально-полоскового разъема или пайки коаксиального кабеля) симметрично относительно продольной щели в пьедестале. В результате формируется компактный планарный ИДИМ без сквозных металлизированных отверстий в диэлектрической подложке.



а)



б)

Рис. 1.

Моделирование электромагнитного излучения проводится с использованием САПР «CST MWS» в определенной последовательности, которую целесообразно проиллюстрировать на примере более простого в конструктивном отношении излучателя.

Пусть необходимо исследовать печатный излучатель, реализованный на диэлектрической подложке 80×80 мм, толщиной 1.52 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3.38$. Излучателем является квадратный участок металлизации (фольги), размером 40×40 мм, толщиной 20 мкм, расположенный в центре лицевой стороны подложки. Обратная сторона подложки полностью облицована медной фольгой с той же толщиной 20 мкм. Питание излучателя осуществляется коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением $\rho_0 = 50$ Ом, центральный проводник (жила) которого пропускается с обратной стороны подложки в заранее просверленное отверстие, диаметром 0.8 мм, и припаивается к излучателю на лицевой стороне подложки. Внешний проводник коаксиального кабеля (оплетка) припаивается к металлизации обратной стороны подложки. Просверленное отверстие для подпайки жилы кабеля смещено от центра квадрата к одной из его сторон на 5.2 мм. Формализованное задание на моделирование этого излучателя составляется в следующей последовательности при уже включенном компьютере и развернутой программе.

*) В 1-ой сверху строке (1S) одним щелчком левой клавиши мыши (<1LK>) разворачивается меню символа [File]. В этом меню с помощью <1LK> выбирается строка "New".

*) В появившемся списке "Create a New Project" с помощью <1LK> выбирается строка "Antenna [on Planar Substrate]". Нажатием клавиши "Enter" (<OK>) подтверждается согласие с активизацией данного выбора.

*) Во 2-ой сверху строке (2S) с помощью <1LK> активизируется кнопка с изображением параллелепипеда ("Create Brick"). На экране появляется приглашение к прорисовке первого слоя многослойной структуры излучателя. Пусть первым слоем будет диэлектрик. Тогда двойным нажатием левой клавиши

мышь (<2LK>) в левом верхнем углу координатной сетки произвольно фиксируется первый (в данном примере – левый верхний) угол подложки. Перемещением мыши устанавливается произвольно правый нижний угол подложки и фиксируется его положение с помощью <2LK>. Затем лёгким смещением мыши устанавливается произвольно толщина подложки и её величина фиксируется с помощью <2LK>. На экране появляется красный параллелепипед подложки и меню с именем “Solid 1” для задания её геометрических размеров и параметров ε_r, μ_r .

Полагая, что начало декартовой системы координат будет в центре подложки, устанавливаем следующие размеры (в миллиметрах):

$$\left. \begin{array}{l} X_{\min} = -40; \quad X_{\max} = 40; \\ Y_{\min} = -40; \quad Y_{\max} = 40; \\ Z_{\min} = -1.52; \quad Z_{\max} = 0. \end{array} \right\}$$

Разворачиваем с помощью <1LK> (далее по умолчанию всегда при любом выборе того или иного раздела меню будет иметься ввиду однократное нажатие левой клавиши мыши <1LK>) окно “Material” и в нем [напоминание: с помощью <1LK>] выбираем строку [New Material...]. В появившемся окне “New Material Parameters” разворачиваем окно “Type” и в нем выбираем строку “Normal”. Устанавливаем значение $\varepsilon_r = 3.38$ в окне “Epsilon”, а окно “Mue” оставляем без изменений (то есть величина относительной магнитной проницаемости μ_r равна 1). Клавишей <OK> соглашаемся с активизацией выбора “New Material Parameters” и возвращаемся в меню “Solid 1”. Клавишей <OK> соглашаемся с активизацией и этого меню. Таким образом, завершается формирование 1-го слоя – диэлектрической подложки, и на экране появляется её изображение с осями координат, причём в данном случае подложка лежит в плоскости XOY.

*) Переходим к прорисовке излучателя на лицевой стороне подложки, ориентированной в положительном направлении оси Z [т.е. по орту ($+\vec{z}_0$)]. Последовательность действий аналогична прорисовке 1-го слоя (подложки). После появления на экране изображения красного параллелепипеда и меню второго слоя “Solid 2” можно задать его размеры и параметры. Поскольку

металлизация (фольга), толщиной $20 \text{ мкм} = 0.02 \text{ мм}$, плотно прилегает к лицевой поверхности подложки с координатой $Z_{\max} = 0$, то в меню “Solid 2” устанавливаем следующие размеры (в миллиметрах):

$$\left. \begin{array}{l} X_{\min} = -20; \quad X_{\max} = 20; \\ Y_{\min} = -20; \quad Y_{\max} = 20; \\ Z_{\min} = 0; \quad Z_{\max} = 0,02. \end{array} \right\}$$

Разворачиваем окно “Material” и выбираем строку “PEC” (Perfect electric conductivity – совершенная электрическая проводимость). Нажатием <OK> активизируем выбранные параметры металлизации излучателя.

*) Переходим к прорисовке металлизации обратной стороны подложки, ориентированной в отрицательном направлении оси Z [т.е. по орту $(-\vec{z}_0)$]. Последовательность действий аналогична прорисовке 2-го слоя. После появления на экране красного параллелепипеда и меню третьего слоя “Solid 3” можно задать его размеры и выбрать параметр “PEC”. Поэтому в меню “Solid 3” устанавливаются следующие размеры (в миллиметрах):

$$\left. \begin{array}{l} X_{\min} = -40; \quad X_{\max} = 40; \\ Y_{\min} = -40; \quad Y_{\max} = 40; \\ Z_{\min} = -1.54; \quad Z_{\max} = -1.52. \end{array} \right\}$$

Нажатием <OK> активизируем размеры и параметры металлизации обратной стороны подложки.

Готовое формализованное задание предъявляется для проверки преподавателю на консультации и с учетом его указаний запускается на счет. В данном конкретном примере результаты вычислений показывают, что резонансная частота антенны составляет $1,92 \text{ ГГц}$. Диаграмма направленности антенны на резонансной частоте представляет собой сигарообразное тело вращения с максимумом излучения в направлении положительных значений оси Z [то есть в направлении орта $(+\vec{z}_0)$].

Использование вышеописанной процедуры прорисовки слоев многократной активизацией кнопки «Create Brick» позволяет, после использования кнопки «Boolean Add», объединить соответствующие параллелепипеды-слои в один

сплошной рисунок (в общем случае – произвольной конфигурации) как на лицевой, так и на обратной сторонах подложки. Так, например, был спроектирован ИДИМ на центральную частоту $f_0 = 2.8$ ГГц, который имеет геометрические размеры, указанные на рис. 2, и частотную характеристику входного коэффициента отражения, представленную на рис. 3:

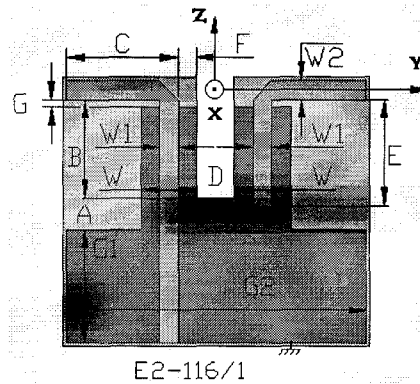


Рис. 2.

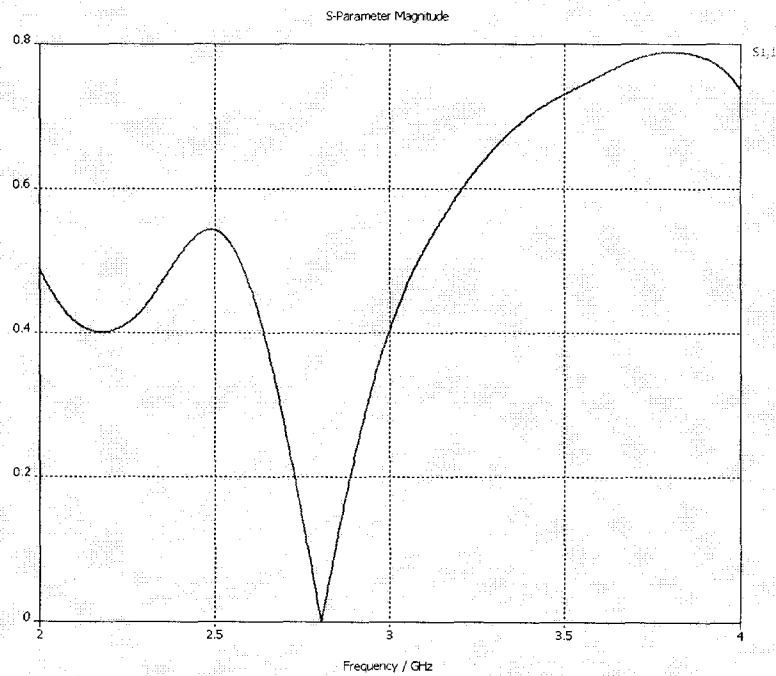


Рис. 3.

Приведенные результаты моделирования свидетельствуют о том, что трехмерная диаграмма направленности ИДИМ (рис. 4) имеет классическую форму,

характерную для дипольного излучателя с одной особенностью, а именно: в плоскости магнитного вектора \vec{H} ($Y0Z$) диаграмма имеет значительный спад в направлении «заднего» излучения в сторону орта « $-\vec{y}_0$ ». Это объясняется наличием заземленного участка металлизации в плоскости $X0Y$ на обратной стороне подложки и может только приветствоваться, так как улучшаются направленные свойства ИДИМ в главном направлении по орту « $+\vec{y}_0$ ». При этом геометрические размеры топологии (рис. 2) при волновом сопротивлении питающего кабеля, равном 75 Ом, составили (в миллиметрах):

$$A = 5; B = 13; C = 21; D = 1.2; E = 11.5; F = 1.5; G = 1; W = 5; W1 = 2; W2 = 2.$$

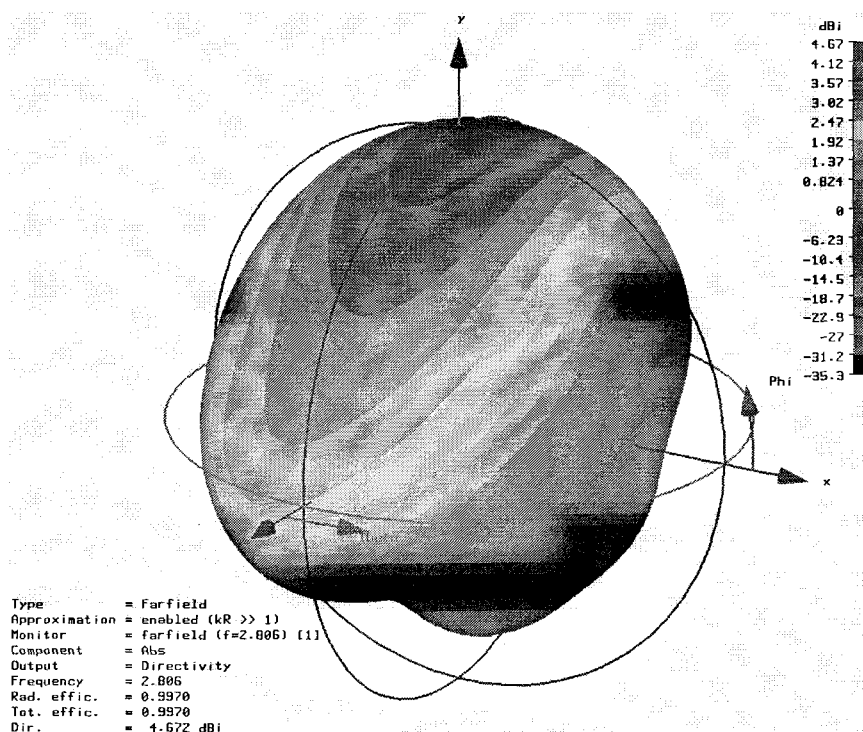


Рис. 4.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ЛИНЕЙНОЙ ЭКВИДИСТАНТНОЙ ДИПОЛЬНОЙ ФАР.

Пусть необходимо разработать топологию 9-элементной линейной эквидистантной дипольной ФАР с синфазным и равно-амплитудным возбуждением ИДИМ, описанных в разделе 2.

В результате печатная антенная решётка будет реализована на диэлектрической подложке с ориентировочными размерами 500×270 мм, толщиной 1.5 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2.5$. Излучатели будут расположены в верхней части лицевой стороны подложки. Обратная сторона подложки полностью облицована медной фольгой толщиной 35 мкм, кроме той части, где расположены излучатели. Пусть питание антенной решетки осуществляется коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом.

Поскольку все излучатели должны быть синфазны, то электрическая длина пути от входа антенной решетки до каждого излучателя должна быть одинакова. При этом следует иметь ввиду, что фазовращатели на полосковых линиях вносят только отрицательный фазовый сдвиг, и это следует учитывать при формировании фазового распределения вдоль излучателей.

В разрабатываемой ФАР целесообразно использовать синфазный 9-канальный делитель мощности, реализованный по схеме «ёлочка» при условии, что элементарные ячейки «ёлочки» делят сигнал не на две, а на три равные части. В этом случае понадобятся всего две «линейки» элементарных ячеек-тройников при общем их числе, равном 4. Таким образом, при проектировании 9-канального делителя возникает задача отработки топологии микрополоскового тройника с волновым

сопротивлением входа/выходов, равном 50 Ом. Отработанный тройник можно будет использовать для наращивания числа каналов.

Так как волновое сопротивление равно 50 Ом, выбирается полосковая линия шириной 4.5 мм. Для разведения сигнала на три ветви поровну надо от точки ветвления отвести три полосковые линии с шириной, примерно равной 0.5 мм, что соответствует волновому сопротивлению 140 – 150 Ом. Затем необходимо реализовать ступенчатый трансформатор к уровню 50 Ом. Каждая «ступенька» будет иметь длину, близкую к четверти длины волны, и ширину на 1 мм больше предыдущей. Это обеспечит плавность перехода от волнового сопротивления 150 Ом к волновому сопротивлению 50 Ом.

При реализации элементарной ячейки-тройника следует обеспечить расположение его выходов «в линию». Для этого необходимо добавить отрезки полосковых линий. Так как боковые каналы тройника получаются длиннее, то возникает расфазировка. Для исключения этого эффекта следует в центральный отрезок канал тройника добавить меандр, который будет выполнять роль компенсирующего фазовращателя (рис. 5).

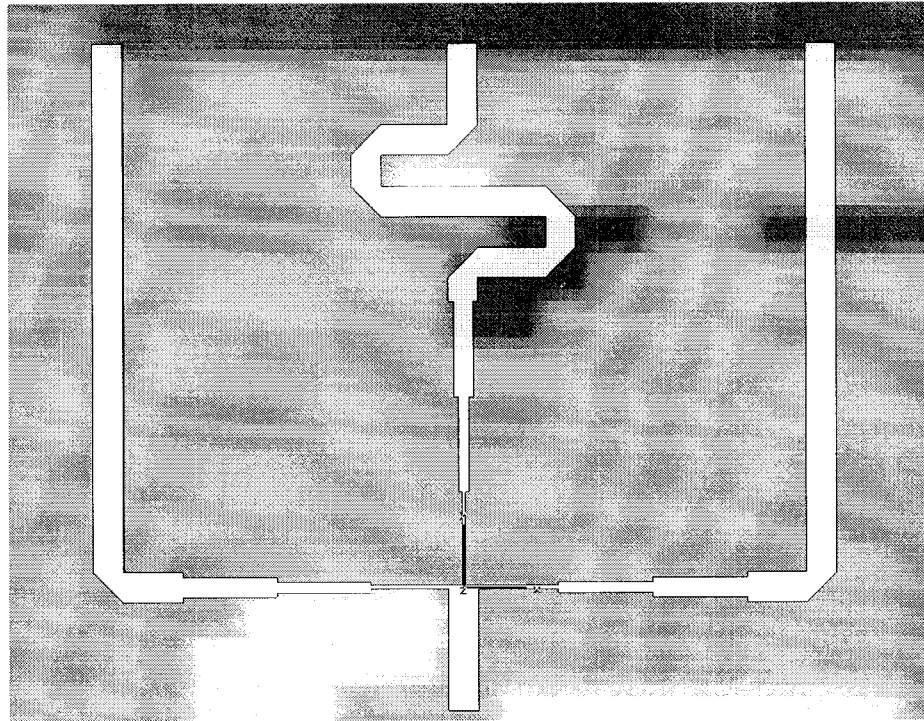


Рис. 5.

В результате, 9-канальный делитель формируется из четырех вышеописанных тройников с добавлением соответствующих соединительных 50-омных микрополосковых линий, что приводит к топологии, изображенной на рис. 6.

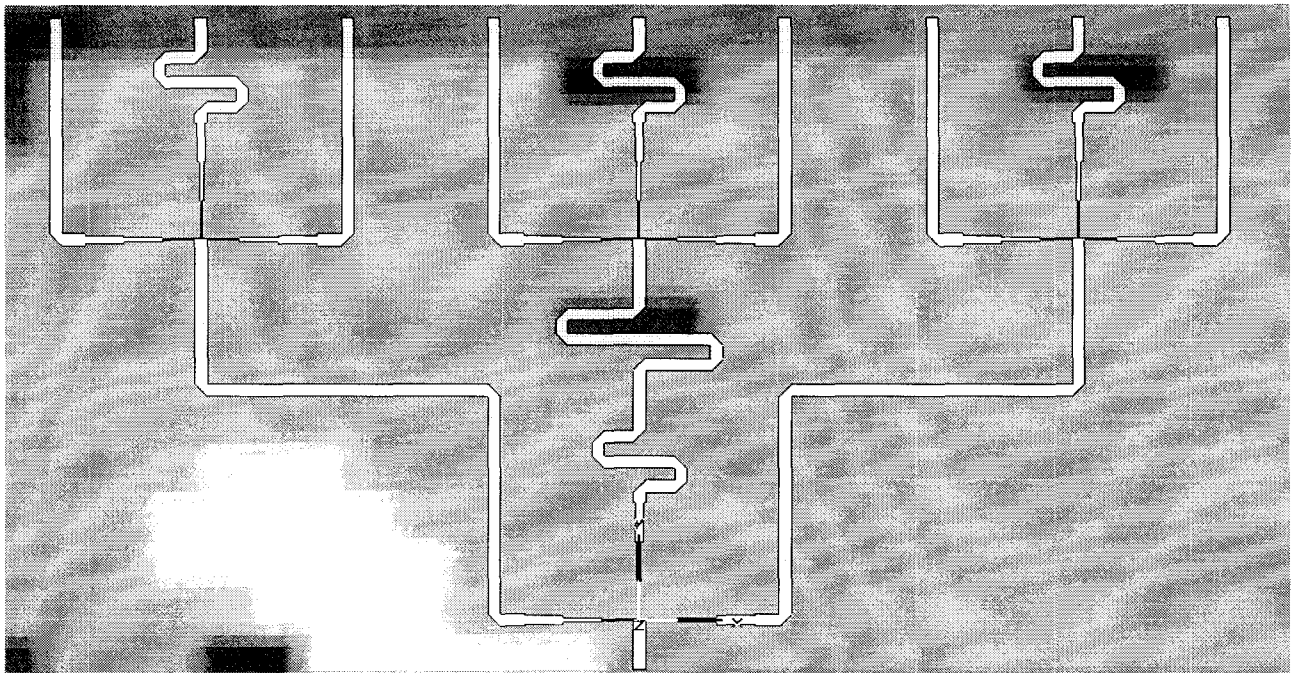


Рис. 6.

Поскольку входное сопротивление ИДИМ на резонансной частоте 2.8 ГГц равно 75 Ом, то на выходе каждого канала делителя следует предусмотреть установку одноступенчатого трансформатора. В результате топология лицевой стороны печатной платы всей ФАР примет вид согласно рис. 7.

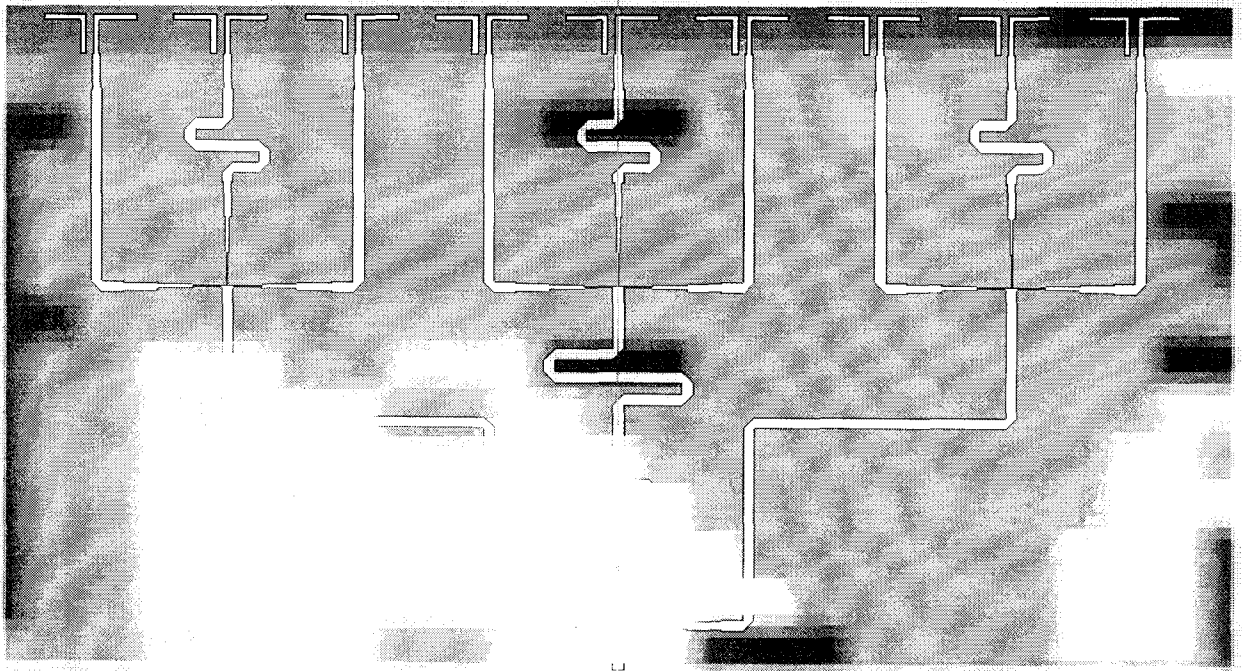




Рис. 7.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ 9-ЭЛЕМЕНТНОЙ ФАР В САПР «CST MICROWAVE STUDIO»


Моделирование электромагнитного излучения рекомендуется проводить с использованием данной программы в следующей последовательности при уже включенном компьютере и развёрнутой программе.

В 1-й сверху строке (1S) одним щелчком левой клавиши мыши (<1LK>) разворачивается меню символа [File]. В этом меню с помощью <1LK> выбирается строка «New».

В появившемся списке «Create a New Project» с помощью <1LK> выбирается строка «Antenna [on Planar Substrate]». Нажатием клавиши «Enter» (<OK>) подтверждается согласие с активизацией данного выбора.

Во 2-й сверху строке (2S) с помощью <1LK> активизируется иконка с изображением параллелепипеда  («Create Brick») или по другому сверху в строке (1S) с помощью <1LK> разворачивается меню надписи [Object]. В этом меню при наведении стрелки мыши на строку «Basic Shapes» разворачивается ещё одно меню, в котором с помощью <1LK> активизируем строку с изображением параллелепипеда  («Brick...»). На экране появится приглашение к прорисовке первого слоя многослойной структуры печатной антенны. Пусть первым слоем будет диэлектрик. Тогда двойным нажатием левой клавиши мыши (<2LK>) в левом верхнем углу координатной сетки произвольно фиксируется первый (в данном примере – левый верхний) угол подложки. Перемещением мыши устанавливается произвольный правый нижний угол подложки и фиксируется его положение с помощью <2LK>. Затем лёгким смещением мыши устанавливается произвольно толщина подложки и её величина фиксируется с помощью <2LK>. На экране появится красный параллелепипед подложки и окошко с именем «Solid

1» для задания её геометрических размеров (координат) и параметров ε_r , μ_r .


Для упрощения задачи прорисовки подложки можно сразу после того, как активизировали иконку с изображением параллелепипеда  («Create Brick») отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc» от прорисовки красного параллелепипеда, после чего появиться окошко с именем «Solid 1» для задания её геометрических размеров и параметров ε_r , μ_r .



Для удобства работы начало декартовой системы координат будет в центре делителя мощности, который одновременно включает в себя фазовращатели; соответственно размеры (в миллиметрах) будут симметричны относительно некоторых осей координат:

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = -249; \quad X_{max} = 249; \\ Y_{min} = -20; \quad Y_{max} = 250; \\ Z_{min} = -1.5; \quad Z_{max} = 0. \end{array} \right\}$$

Разворачиваем в этом же окошке с помощью <1LK> (далее по умолчанию всегда при любом выборе того или иного раздела меню будет иметься ввиду однократное нажатие левой клавиши мыши <1LK>) вложенное окно (окошко со стрелкой вниз) «Material», и в нём выбираем строку [New Material...]. В появившемся окне «New Material Parameters» разворачиваем вложенное окно «Type» и выбираем в нём строку [Normal]. Устанавливаем значение $\varepsilon_r = 2.5$ в окне «Epsilon», а окно «Mue» оставляем без изменений (т.е. величина относительной магнитной проницаемости μ_r равна 1). Согласившись с активизацией выбора (нажав <OK>) в окне «New Material Parameters», возвращаемся в окно с именем «Solid 1». Также, как и в прошлом окошке, нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров (координат и материала), которые указали в этом окне. Таким образом, завершается формирование 1-го слоя – диэлектрической подложки, и на экране появляется её

изображение с осями координат, причём в данном случае подложка лежит в плоскости XOY.

После завершения прорисовки диэлектрической подложки в левой части окна программы в разделе «Components» (если раскрыть его, нажав <1LK> на «+» рядом с именем «Components») наблюдаем, что автоматически создаётся компонент с именем «component1». Раскрыв «component1», наблюдаем созданный 1-ый слой с именем «solid1». Для того, чтобы изменить значения нашего созданного слоя, необходимо нажать на «solid1» правой кнопкой мыши (далее <1RK> - однократное нажатие правой клавиши мыши), после чего раскроется окно, в котором выбираем самую нижнюю строчку с изображением  и именем «Properties...». В открывшемся окне «History tree» выбираем строку [define brick], нажав на неё <1LK>, затем нажимаем в этом же окошке на кнопку с именем <Edit...>. В результате откроется окно, в котором можно изменить ранее заданные параметры (координаты) слоя «solid1» и согласиться с ними, нажав <OK>. Это справедливо для любого слоя многослойной структуры.

Переходим к прорисовке 2-го слоя ФАР на лицевой стороне подложки, ориентированной в положительном направлении оси Z [т.е. по орту $(+\vec{z}_0)$]. Для удобства и наглядности прорисовки в 3-ей сверху строке во вложенном окошке (окошко со стрелочкой вниз) по умолчанию стоит «Free». Развернув это меню, нужно выбрать строку с названием «Front» (т.е. мы выбрали вид передней стороны нашей подложки). Во 2-й сверху строке с помощью мыши активизируется иконка с изображением  («Extrude») или, по-другому, сверху в первой строке с помощью мыши разворачивается меню надписи [Object]. В этом меню активизируем строку с изображением  («Extrude...»). На экране появится приглашение к прорисовке второго слоя многослойной структуры печатной антенны.

Двойным нажатием левой клавиши мыши на подложке произвольно фиксируется первая точка прорисовки металлизации 2-го слоя. Перемещением мыши устанавливается вторая точка и фиксируется её положение с помощью <2LK>. Так как металлизация лицевой стороны подложки имеет сложную структуру (рис. 7), то нам понадобится сначала 4 параллелепипеда (размеры которых устанавливаются по заранее вычисленным координатам, так же, как до этого устанавливались размеры диэлектрической подложки), после чего для сохранения изначального значения волнового сопротивления нам потребуются еще 6 параллелепипедов, которые за счет своего постепенного, ступенчатого расширения приведут к нужной ширине полосковую линию делителя .

Поскольку металлизация (фольга), толщиной 35 мкм, плотно прилегает к лицевой поверхности подложки, то минимальная координата параллелепипеда по оси Z должна быть нулевой, что обеспечивает плотное прилегание металлизации к подложке. В окошке Brick (рис. 8)

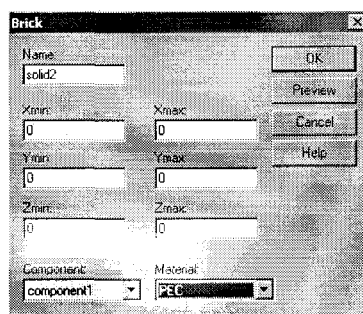


Рис. 8.

разворачиваем с помощью мыши вложенное окно (окошко со стрелкой вниз) «Material» и в нём выбираем строку [PEC] (Perfect electric conductivity – совершенная электрическая проводимость).

Для того, чтобы узнать, будет ли соответствовать введённые координаты желаемой прорисованной структуре излучателя, нужно в окне, в котором вводили координаты и параметры т.е. в данном случае в окне «Solid 2» нажать кнопку с именем <Preview>. Нажимаем <OK> ,

тем самым соглашаемся с активизацией параметров излучателя (координат и материала) которые указали в этом окне.

Таким образом, завершается формирование 2-го слоя металлизации, и на экране появляется изображение элементарной ячейки на три канала (тройника). Теперь необходимо проверить качество его согласования на нужной нам частоте (2.8 ГГц) и синфазность его выходных сигналов. Для этого надо подключить ко входу тройника рабочий порт (модель коаксиально-полоскового разъёма), на который подается сигнал, и по одному порту (разъёму) на каждый выход тройника. Для этого в левом

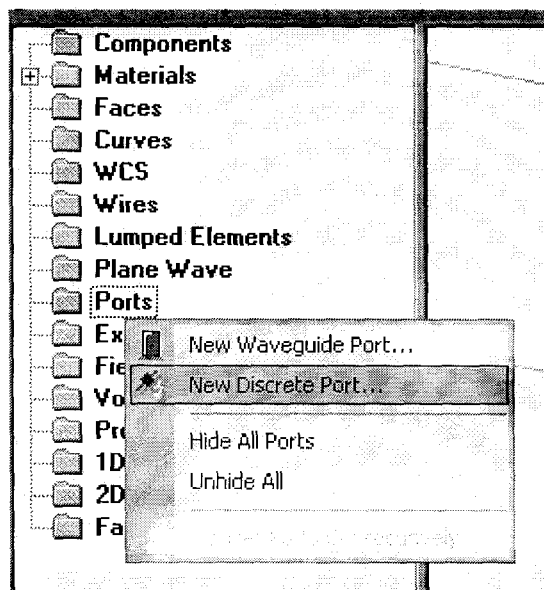


Рис. 9.

окне программы (рис. 9) <1RK> на папку «Ports» выбираем нужный нам новый дискретный порт и в появившемся окошке (рис. 10) задаем тип порта, входной импеданс и координаты порта.

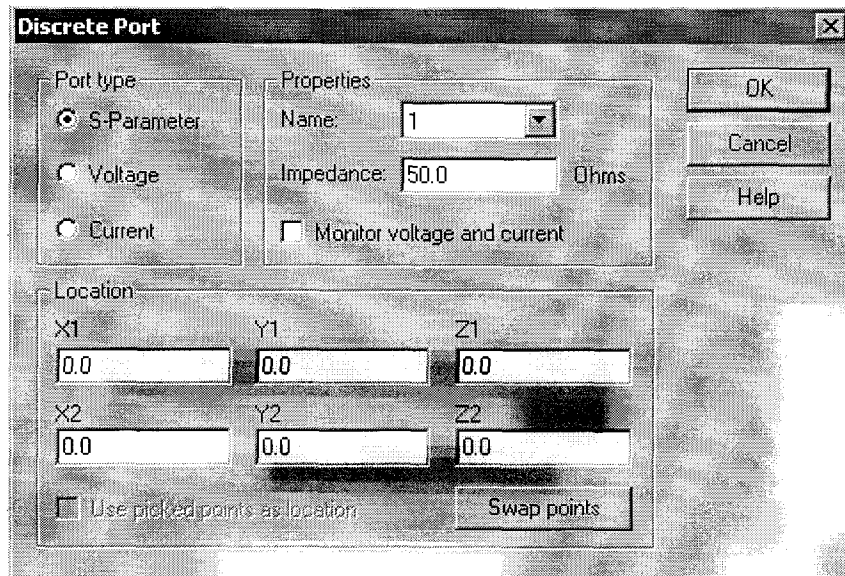


Рис. 10.

Подобным же образом задаем параметры оставшихся 3 портов. После задания параметров всех портов нужно металлизировать обратную сторону диэлектрической подложки. Это можно сделать параллелепипедом с высотой 35 мкм и размерами в плоскости XOY как у диэлектрика. Теперь можно запускать программу на расчет.

Для этого кнопкой «Solve» (рис. 11) вызываем плавающее окно.

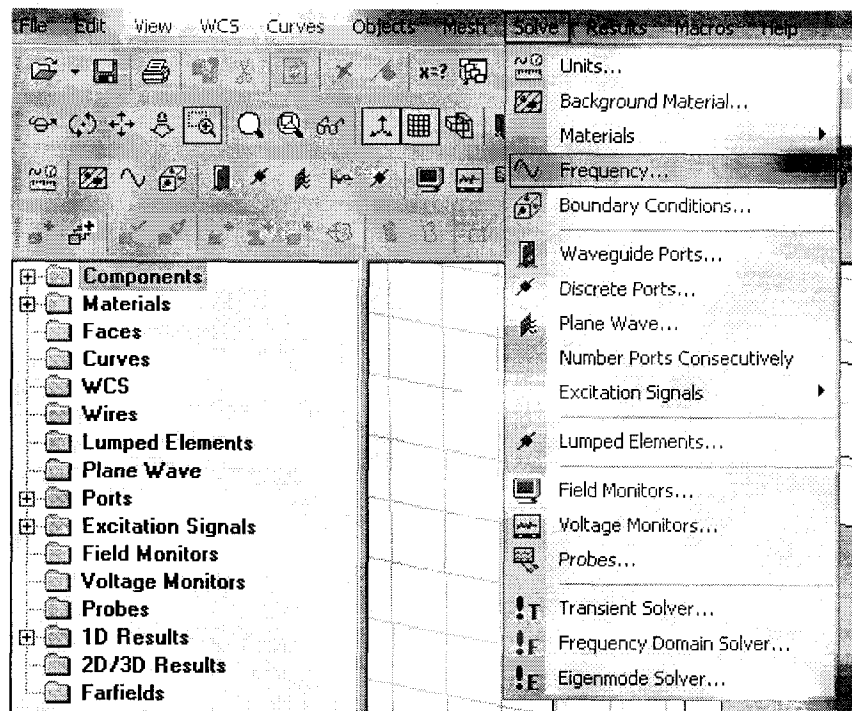


Рис. 11.

Выбираем нужный нам диапазон частот и вводим его в окошке «Frequency Range Settings» (рис. 12),

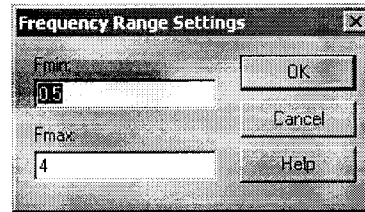


Рис. 12.

после чего <1LK> по кнопке «Transient Solver» в окошке «Solve» (рис. 11). В появившемся окне Solver Parameters (рис. 13) выбираем нужный

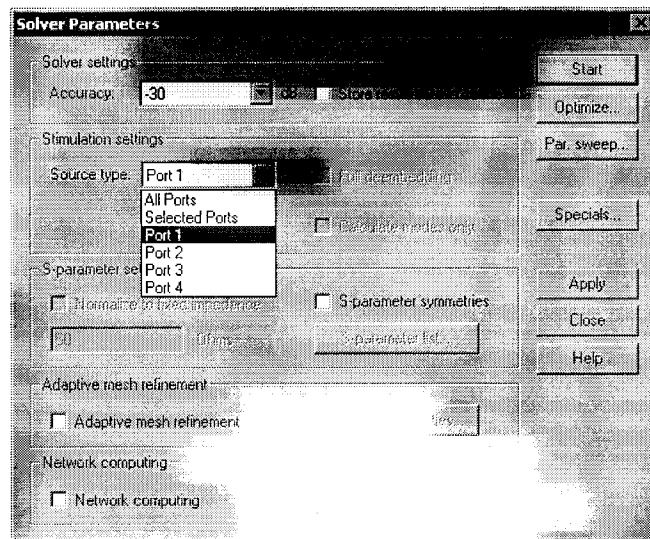


Рис. 13.

порт и нажимаем кнопку «Start». По окончании расчета в левой части программных окон (рис. 14)

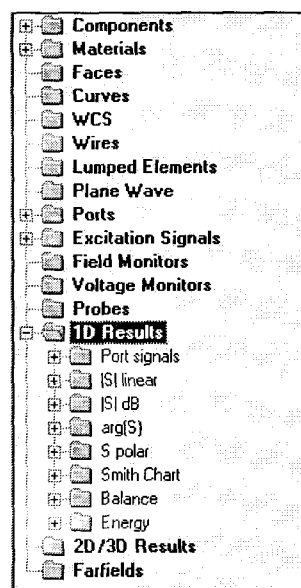


Рис. 14.

в папке «1D Results» появляются нужные нам файлы (рис. 15), по которым мы можем увидеть сдвиги фаз и s-параметры.

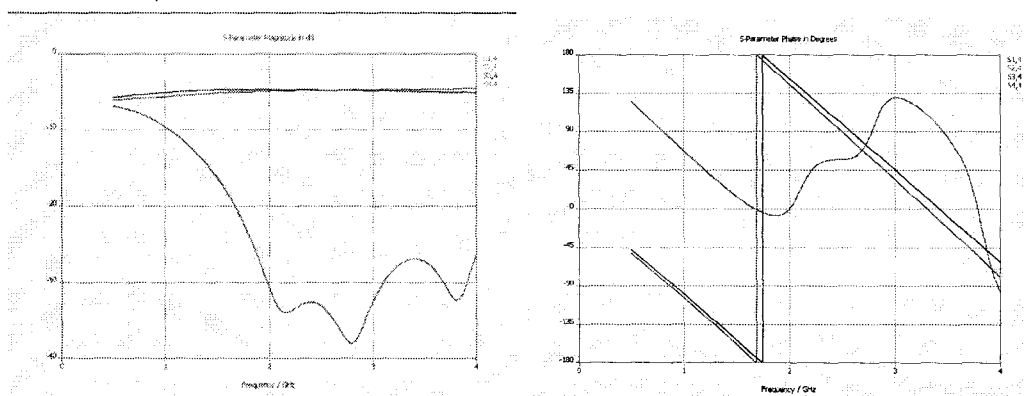


Рис. 15.

S-параметры (в частности, входной коэффициент отражения нас удовлетворяет (-30дБ), но геометрию тройника необходимо модифицировать. Зная длину одного диполя и их количество получаем, что нам нужен делитель, который состоял бы из 4-х таких тройников, но в ФАР надо все диполи расположить в одну линию. Для этого следует добавить отрезки полосковой линии соответствующей длины. С

помощью процедуры создания металлизации, описанной выше, формируем тройник на 3 выхода в одну линию (рис. 16).

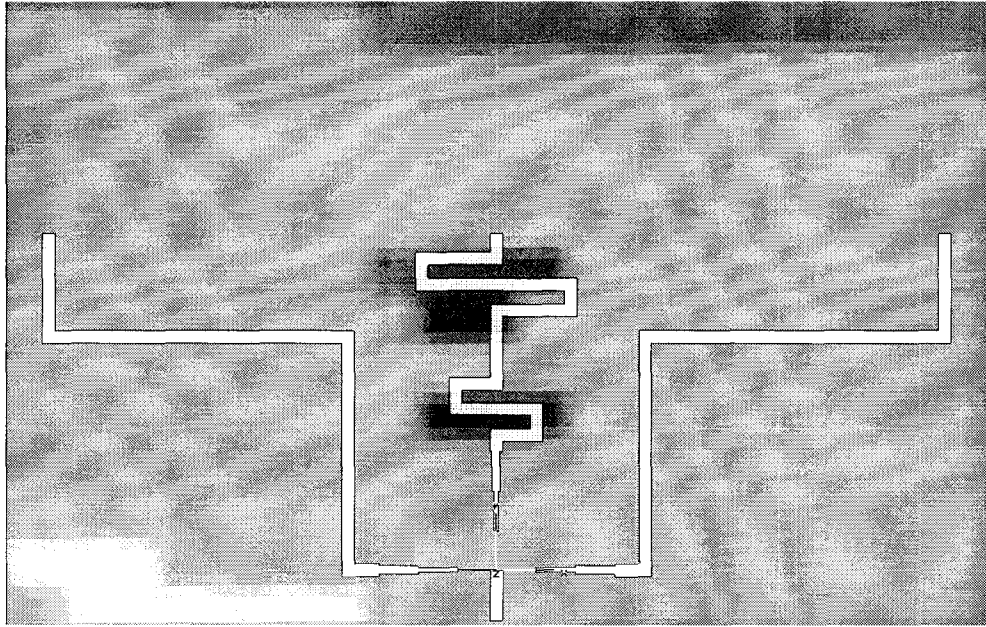






Рис. 16.

При этом необходимо сформировать скосы углов меандров фазовращателей, с помощью которых мы добивались синфазности.

Формирование скосов углов производится следующим образом. Сверху в третьей строке во вложенном окошке по умолчанию стоит «Free», развернув это меню нужно выбрать строку с названием «Perspective» (этим действием выбрали удобный вид). Приблизим колёсиком мышки покрутив его (если такое имеется) или активизировав в 3-ей сверху строке иконку с изображением  и именем «Activate zoom mode». Также можно воспользоваться функцией приближения активизировав иконку с изображением  и именем «Activate dynamic zoom mode». Приближаем нужный нам угол фазовращателя, пусть этим будет правый верхний угол первого изгиба меандра, так чтобы разборчиво видно было его ребро, толщина которого составляет 35 мкм. Приблизив угол, активизируем иконку с изображением  (красной прямой расположенной под наклоном) и именем «Select edge».

Активизировав её выбираем <2LK> приближенное ребро (ребро должно выделиться красным цветом). После чего во второй строке строке активизируем иконку с изображением  и именем «Chamfer edges». В появившемся окне с именем «Chamfer edges» в строке «Chamfer width» указываем значение, на которое нужно срезать угол, так как ширина полосы 4.5 указываем значение равное 4.5. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. И так со всеми углами. Таким образом, завершается формирование углов, на экране появляется изображение, показанное на рис. 17.

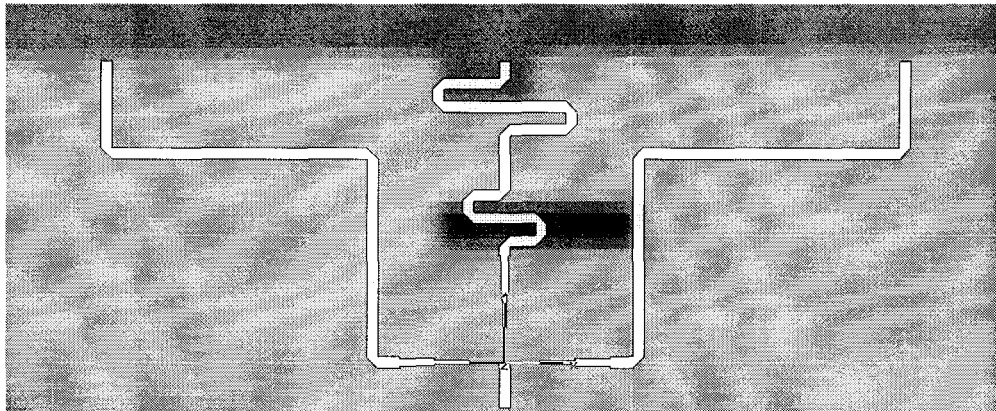


Рис. 17.

Для создания конечной модели 9-канального делителя необходимо на выходах получившегося тройника повторить его топологию с помощью всплывающего окна «Objects» (рис. 18).

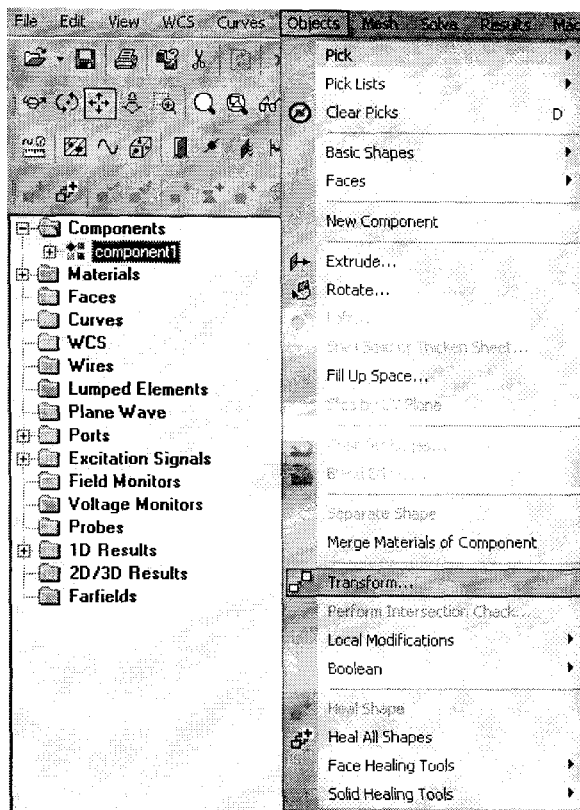


Рис. 18.

В этом окне, предварительно выбрав нужный нам элемент, нажимаем <1LK> на кнопку «Transform...». В появившемся окне «Transform Selected Object» (рис. 19)

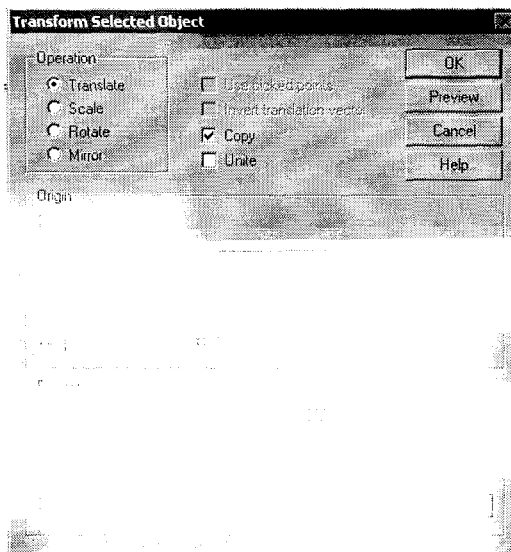


Рис. 19.

ставим галочку на “Сору”, задаем координаты того места, на которое должен встать элемент и нажимаем ОК. После этого нужно объединить всю металлизацию на лицевой стороне. Для этого в левой части программных окон, нажав «Ctrl», мышкой <1LK> выбираем все нужные нам слои (рис. 20).

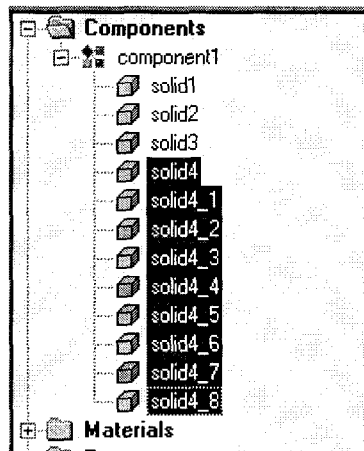


Рис. 20.

Во всплывающем окне «Objects» (рис. 21), в подокне «Boolean» нажимаем

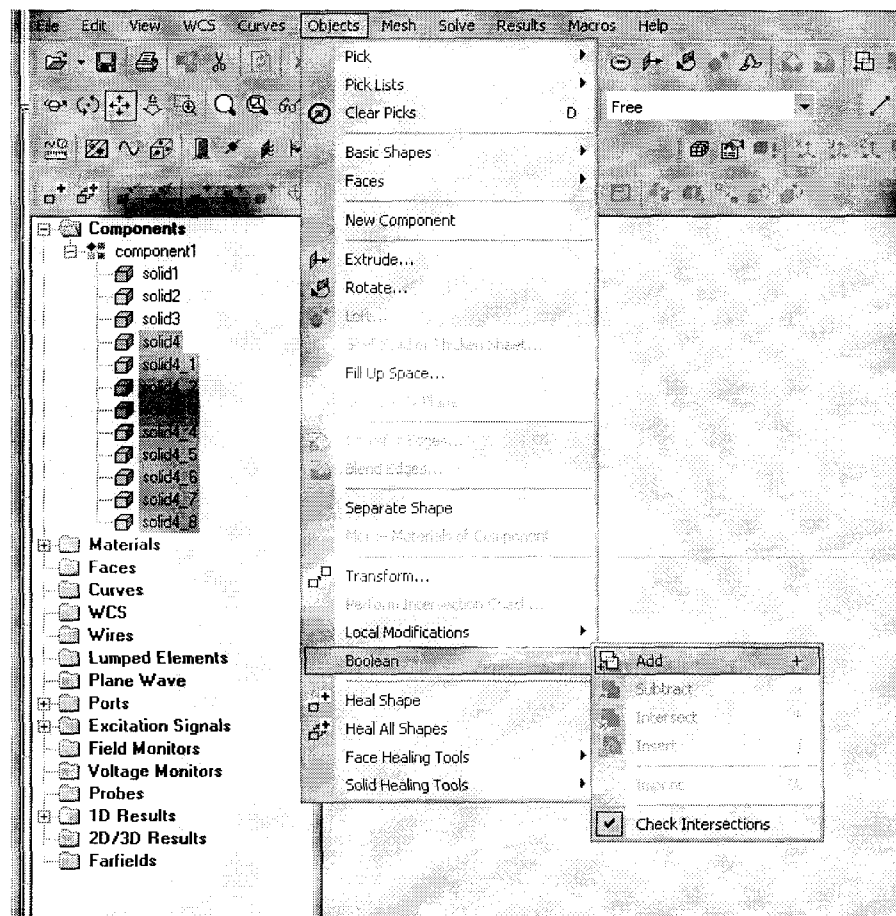





Рис. 21

<1LK> на кнопку «Add». Тем самым объединим все выделенные слои в один. Получился требуемый 9-канальный делитель мощности.

Переходим к прорисовке 3-го слоя металлизации, т.е., обратной стороны подложки, ориентированной в отрицательном направлении оси Z [т.е. по орту $(-\bar{z}_0)$]. Для удобства и наглядности прорисовки в третьей сверху строке во вложенном окошке (окошко со стрелочкой вниз) по умолчанию стоит «Free», развернув это меню нужно выбрать строку с названием «Back» (т.е. мы выбрали вид обратной стороны нашей подложки). Также, как и при прорисовке 2-го слоя, во 2-й сверху строке с помощью мыши активизируется иконка с изображением  («Extrude») или, по-другому, сверху в первой строке с помощью мыши разворачивается меню надписи [Object]. В этом меню активизируем строку с изображением  («Extrude...»). На экране появится приглашение к прорисовке третьего слоя многослойной структуры печатной антенны. Так как топология металлизации обратной стороны подложки имеет сложную структуру в виде «ласточкиных хвостов», то нам понадобится множество точек. Двойным нажатием левой клавиши мыши в левом верхнем углу подложки произвольно фиксируется первая точка прорисовки металлизации 3-го слоя. Перемещением мыши устанавливается вторая точка и фиксируется её положение с помощью <2LK>. Затем фиксируются все остальные точки структуры 3-го слоя. Последнюю точку двойным нажатием левой клавиши мыши устанавливаем в положение первой точки прорисовки. Затем лёгким смещением мыши устанавливается произвольно толщина подложки, её величина фиксируется <2LK>. На экране появится красный третий слой многослойной структуры и окошко с именем «Solid 4» для задания её геометрических размеров и параметров.

Также, как и при прорисовке 1-го и 2-го слоёв, для упрощения задачи прорисовки 3-го слоя можно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Extrude») отказаться,

нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек сложной структуры, после чего появиться окошко с именем «Solid 4» для задания его (т.е., 4-го слоя) геометрических размеров и параметров.

В появившемся окошке устанавливаем следующие значения: $Z_{min} = -1.5$ (начальное значение металлизации), в строке с именем «Height» устанавливаем значение равное -0.035 (толщина слоя по орту $(-\vec{z}_0)$), а в столбцах X и Y - заранее рассчитанные значения (в миллиметрах). Разворачивая в этом же окошке с помощью мыши вложенное окно «Material», выбираем в нём строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. Таким образом, завершается формирование слоя металлизации обратной стороны подложки, и на экране появляется его изображение с осями координат показанное на рис. 22.

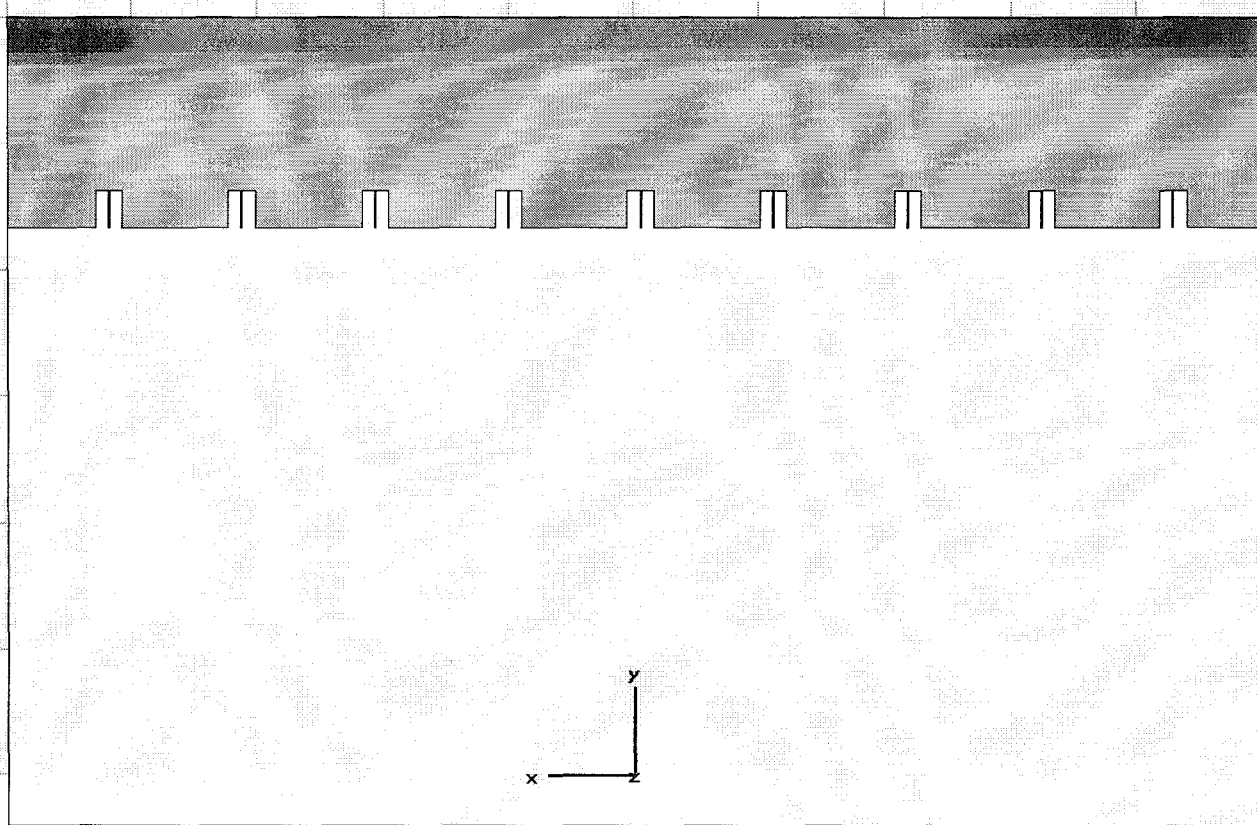
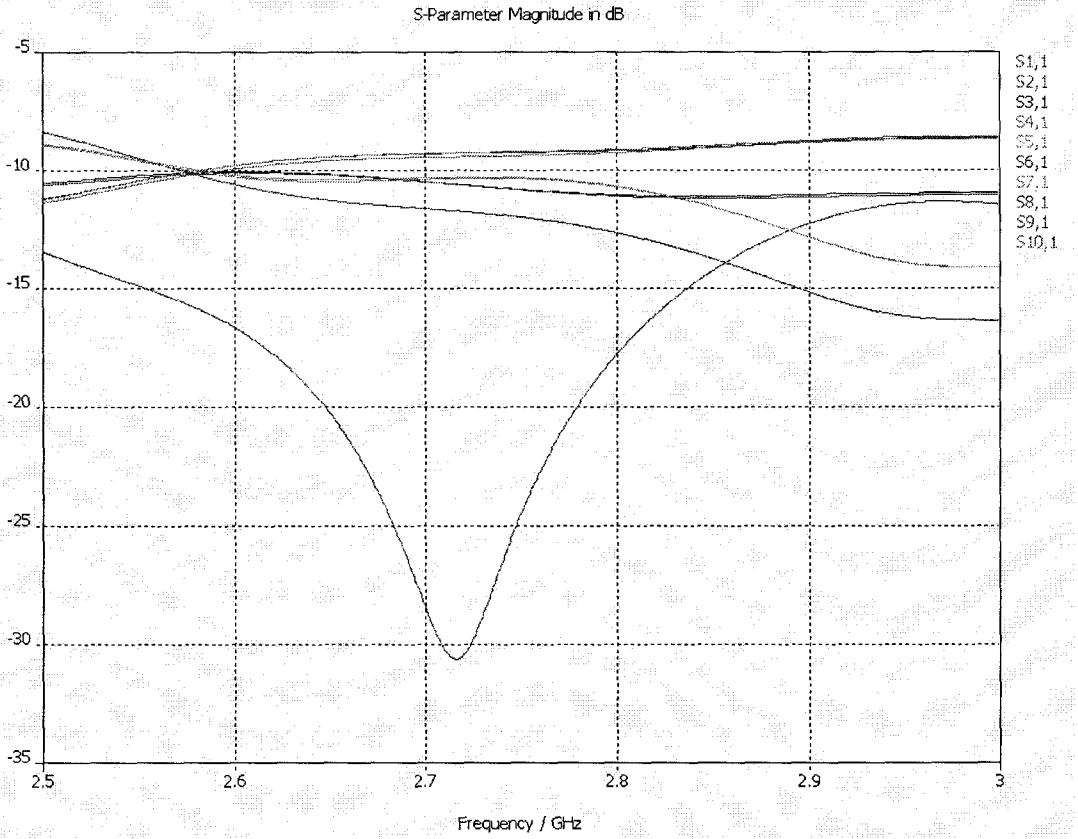


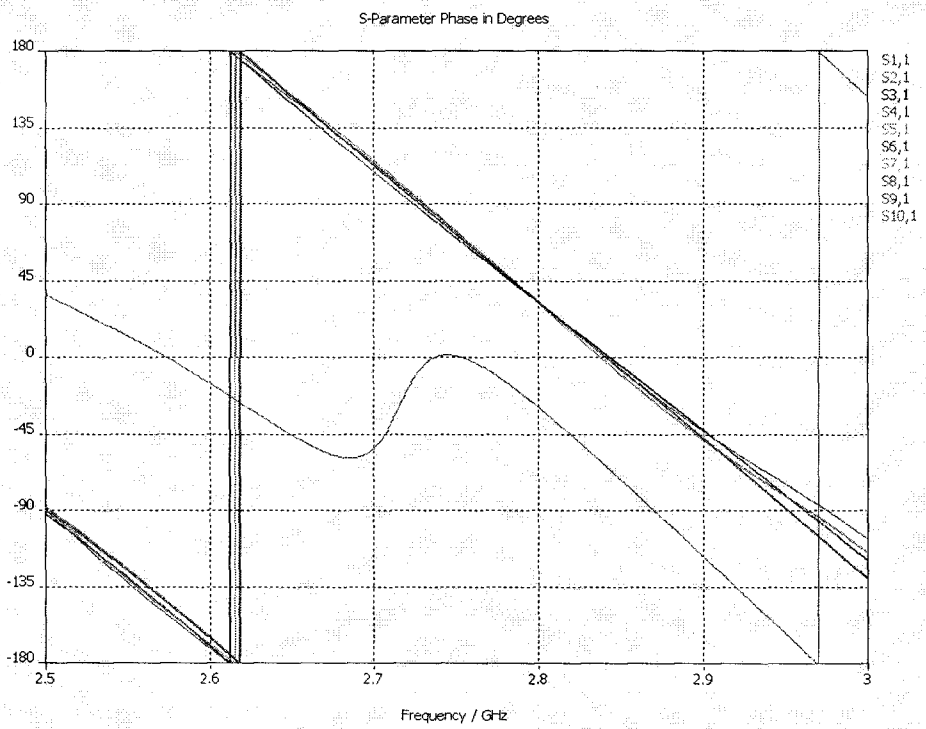
Рис. 22.

Прорисовав металлизацию обратной стороны, следует проверить получившийся делитель. По описанной выше методике формируем

порты и запускаем программу на счет. Получившиеся результаты (рис. 23, а, б) можно считать приемлемыми.



а



б

Рис. 23.

К получившемуся делителю мы должны добавить девять диполей. По описанной выше методике пририсует диполи, рассчитанные на частоту 2.8 ГГц. Получившаяся фазированная антенная решетка имеет вид, представленный на рис. 24.

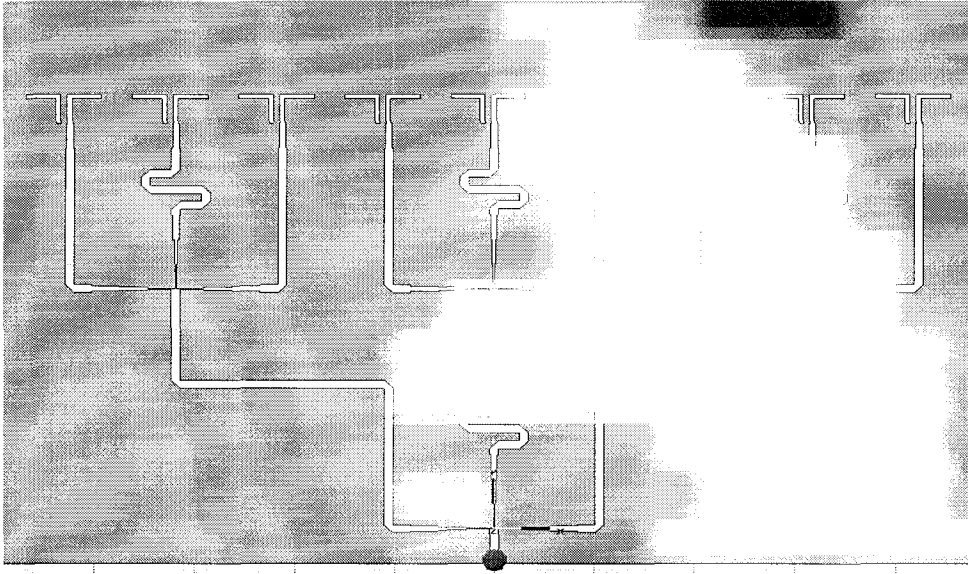


Рис. 24.

Для исключения влияния на делитель внешних воздействий и повышения безопасности при работе экранируем лицевую металлизацию, добавив по описанной выше методике лист проводящего материала. Получившаяся антенна имеет следующие характеристики (рис. 25, рис. 26) и вид (рис. 27).

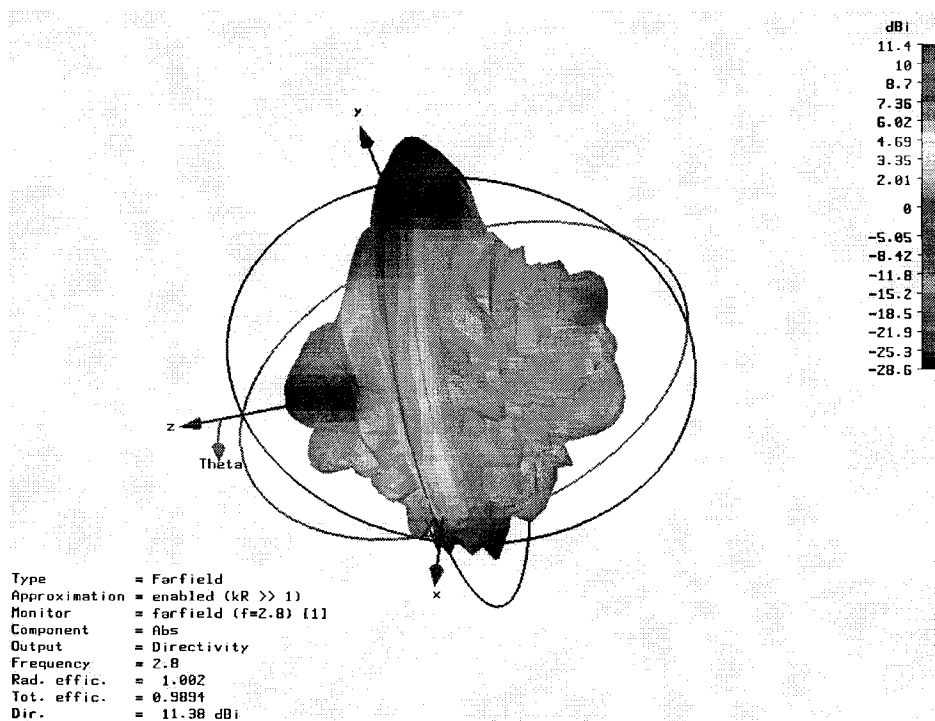


Рис. 25.

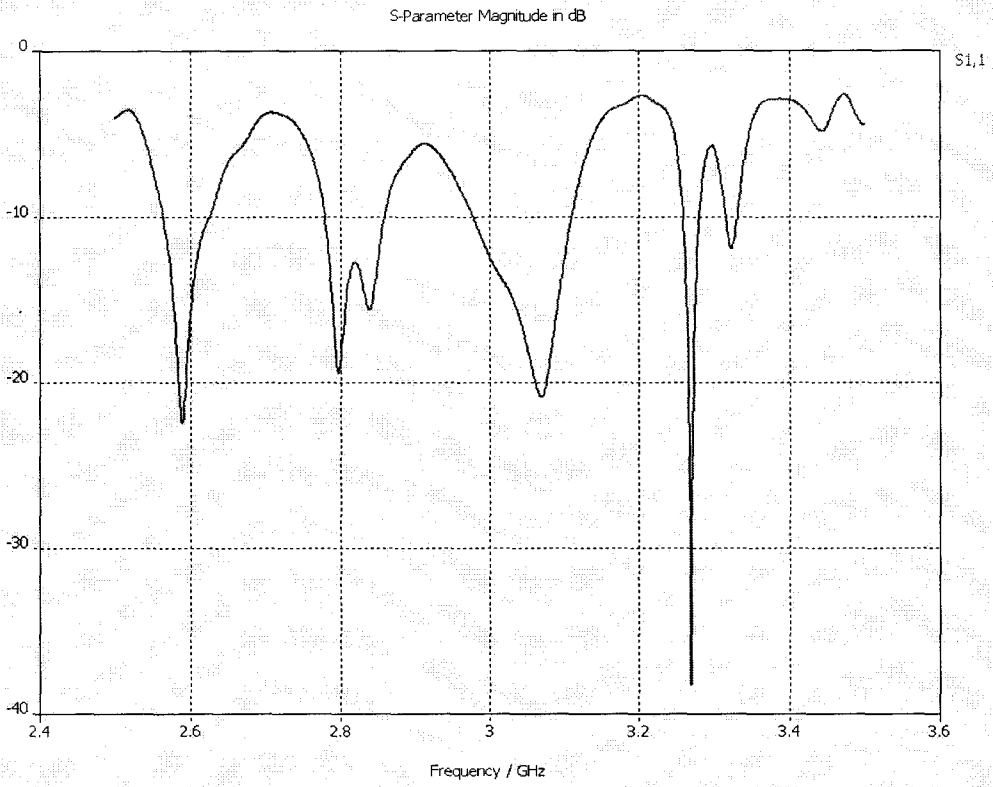


Рис. 26.

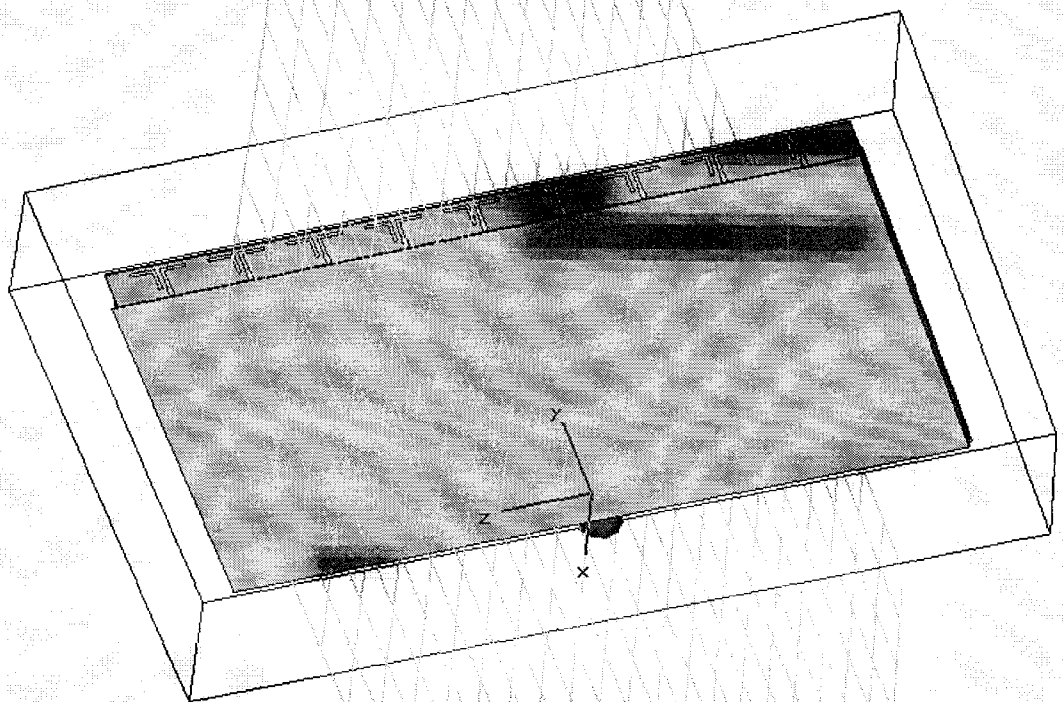


Рис. 27.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование ФАР/ Под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.: ил.
2. Устройства СВЧ и антенны/ Под ред. Д. И. Вокресенского. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.: ил.
3. Патент РФ № 2255393, Н 01 Р 1/04, 5/10 //Горбачев А. П., Чубарь Е. В. «Симметрирующее устройство», опубликовано 27.06.2005г., Бюл. № 18.