

УДК 621.396.677

**Печатная антенная решётка X-диапазона для короткоимпульсной радиолокации**

**# 05, май 2012**

Прохорова В.В.

*Студентка,  
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Литун В.И.,  
ассистент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[prohorova\\_vera@list.ru](mailto:prohorova_vera@list.ru)

В мобильных радиолокационных комплексах широкое применение находят апертурные антенны. В качестве альтернативы габаритным и тяжёлым зеркальным антеннам могут служить решётки планарных излучателей, в том числе и в короткоимпульсных (КИ) системах [1]. Основную сложность при их проектировании составляет система деления мощности сигнала, обеспечивающая требуемое амплитудное и фазовое распределение в раскрыве в полосе рабочих частот. Но стоит отметить, что расположение в одном слое системы деления и излучателей приводит к дополнительным потерям на паразитное излучение, а также к достаточно высокому уровню кросс-поляризационной составляющей в диаграмме направленности антенны.

Основу разработанной антенны составляет многослойная печатная плата (МПП), содержащая излучающие элементы и независимые системы деления мощности сигнала в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Независимые системы вертикального и горизонтального деления сигнала позволяют формировать в обеих ортогональных плоскостях диаграмму направленности (ДН) требуемой формы, включая специальные – для вертикальной плоскости.

Использование в системе КИ-сигналов накладывает конструкционные требования и ограничения, связанные с допустимым временем распространения фронта импульса по апертуре (временем установления амплитудно-фазового распределения). Вертикальная система деления мощности выполняется по параллельной схеме, горизонтальная – по последовательной. Это позволило скомпоновать систему деления в минимальном количестве слоёв МПП, выдержать необходимые расстояния между излучателями и обеспечить возможность формирования в вертикальной плоскости амплитудно-фазового распределения специального вида. При таком построении системы деления появляется ограничение на максимальную длину горизонтальной ветви последовательного деления. Длину

также ограничивает допустимый разбег фаз между излучателями строки в полосе частот, который в последовательных системах неизбежен [2].

Конструктивно антенна выполняется в виде шестислойной печатной платы и первичной волноводной системы деления, располагающейся за платой относительно антенного полотна и состоящей из тройника, направленных ответвителей, согласованных нагрузок и ортогональных волноводно-полосковых переходов (рис. 1 и 2).

Функциональное назначение слоёв МПП:

- 1 – излучающий раскрыв с системой излучателей;
- 2 – экран излучателей, содержащий отверстия для межслойных переходов между системой горизонтального деления и излучателями;
- 3 – система последовательных секций горизонтального деления, выполненная на симметричной полосковой линии (СПЛ);
- 4 – второй экран СПЛ системы горизонтального деления, содержащий отверстия кондуктивных переходов между вертикальной и горизонтальной системами деления мощности;
- 5 – система вертикального деления на СПЛ и элементы связи перехода "волновод-СПЛ";
- 6 – второй экран СПЛ системы вертикального деления с выполненными в нём отверстиями волноводно-полосковых переходов.

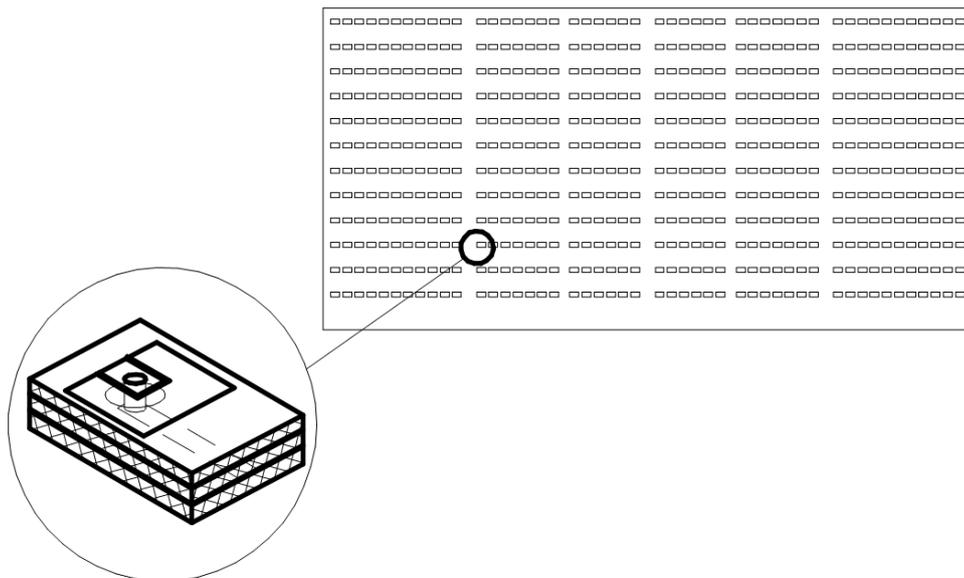


Рис. 1. Схема верхнего слоя МПП

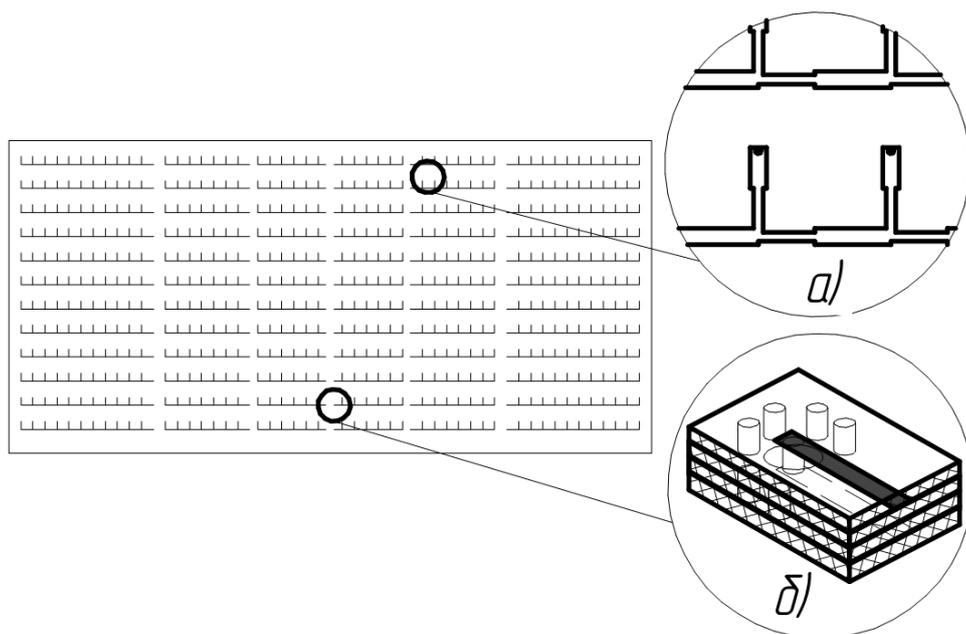


Рис. 2. Схема третьего слоя МПП

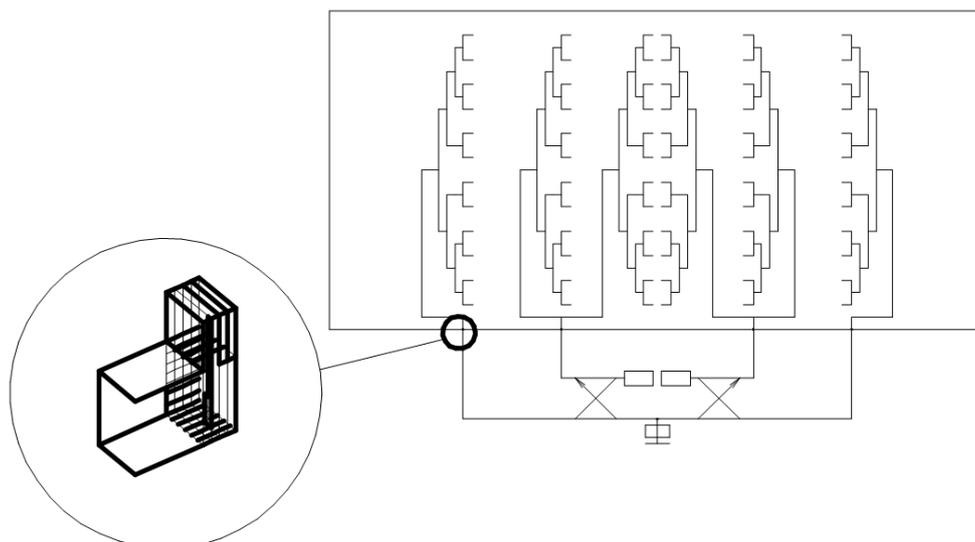


Рис. 3. Схема пятого слоя МПП и волноводного делителя мощности

Раскрыв антенны представляет собой решётку печатных излучателей (выноска на рис. 1). Каждый горизонтальный ряд (строка) излучателей с учетом описанных выше требований к системе деления мощности и требуемого значения коэффициента направленного действия (КНД) для конкретной реализации антенны разбит на 6 участков и имеет последовательную систему питания в слое 3, построенную на полосковых делителях мощности (выноска *a*) на рис. 2) с учётом заданного амплитудного распределения в горизонтальной плоскости. Стоит отметить, что наличие промежутков между участками в строке, вызванное необходимостью размещения межслойного перехода, связывающего две системы деления мощности, может существенно повысить уровень боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности антенны. Тем не менее, УБЛ на уровне -25 дБ в горизонтальной плоскости вполне достижим.

Материал подложек слоёв 1-3 и шаг между излучателями в горизонтальной плоскости выбираются из условия однолучевого режима работы с учётом дополнительных фазовых сдвигов, возникающих на делителях мощности. Условие

максимального КНД в направлении нормали к раскрытию антенны приводит к требованию синфазности излучателей горизонтальной строки, что выполняется при наличии между ними набега фазы, кратного величине  $2\pi$ . При минимальной кратности разброс значений фазы в полосе частот минимален, что определяет ограничения по выбору материала подложек слоёв 2 и 3. Данное требование выполняется для расстояния между элементами порядка  $0,7\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве) при использовании материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=(2\dots 2,5)$ . Среди многообразия марок диэлектрических материалов для работы в сантиметровом диапазоне волн, обладающих высокой стабильностью характеристик, полностью удовлетворяет сформулированным условиям только Rogers RT 5880 ( $\epsilon_r=2,2$ ,  $\text{tg}\delta_3=0,0009$ ). Материал подложки слоя 1 выбран аналогичным, что позволяет обеспечить минимум потерь на отражение в межслойном переходе 1-3 и облегчает согласование излучателей с окружающим пространством за счёт невысокой диэлектрической проницаемости. К подложкам слоёв 4 и 5 столь жёстких ограничений по фазовым характеристикам нет, т.к. СПЛ слоя 5 содержит только параллельные делители. Поэтому критериями выбора материала являются требования стабильности характеристик в полосе частот и температур, простоты обработки и невысокой стоимости. Для этих слоёв МПП использован материал Rogers RO 4003c ( $\epsilon_r=3,38$ ,  $\text{tg}\delta_3=0,0027$ ), удовлетворяющий этим требованиям.

Поперечное сечение разработанной МПП показано на рис. 4.

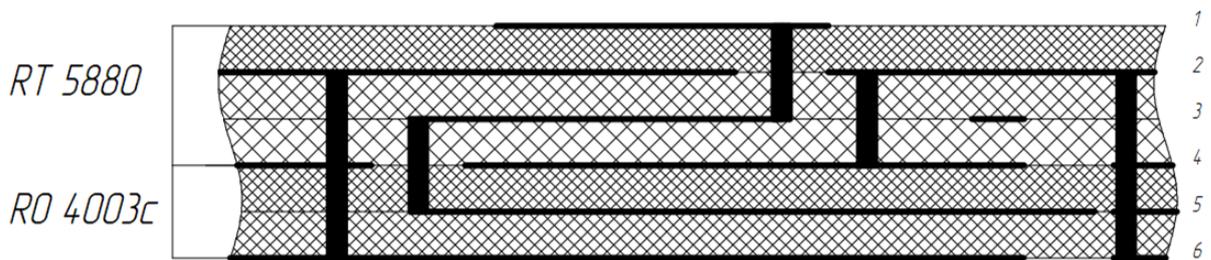


Рис. 4. Поперечное сечение МПП антенны

Блоки делителей горизонтального ряда запитываются от вертикальной системы деления мощности сигнала (рис. 3) с помощью кондуктивных межслойных переходов (выноска б) на рис. 2) сквозь отверстия в слое 4.

В представленной конструкции первые пары ветвей слева и справа относительно центра антенны имеют общий узел соединения с входной системой деления (рис. 3). Такое решение принято для минимизации количества элементов волноводного тракта. Ветви системы вертикальной разводки запитываются от входной волноводной системы деления мощности (рис. 3) с помощью ортогональных волноводно-полосковых зондовых переходов (выноска на рис. 3), структура которых подобна описанным в [3] и [4].

Симметричная в двух плоскостях структура системы деления позволяет обеспечить сохранение направления максимума ДН в полосе частот и упрощает процесс проектирования МПП. Кроме того симметрия в горизонтальной плоскости позволяет реализовать в режиме приёма суммарную и разностную ДН одновременно при использовании на входе устройства двойного волноводного тройника.

Построение систем вертикального и горизонтального деления сигнала на СПЛ позволяет выполнить их в одной МПП с излучателями, а также разместить входную волноводную систему деления мощности непосредственно за экранным слоем МПП.

Описанная выше конструкция с учётом жёсткости МПП может быть реализована в сантиметровом диапазоне волн в виде единой платы (ее габариты не превосходят максимально возможные для производимых листов материалов подложки) или может быть собранной из вертикальных секций, каждая из которых содержит один или несколько участков разбиения строки.

С точки зрения проектирования основные сложности заключаются в следующем:

- 1) прямоугольный печатный излучатель обладает ярко выраженной резонансной характеристикой коэффициента отражения в полосе частот, поэтому для расширения полосы рабочих частот конструкция излучателя может быть усложнена (например, введением U-образной щели [2]);
- 2) при построении последовательной горизонтальной системы деления мощности, обеспечивающей требуемое амплитудное и фазовое распределение в раскрыве, необходимо учитывать следующие факторы:
  - взаимное влияние делителей мощности, приводящее к различию матриц S-параметров для изолированного тройника и тройника в составе системы деления;
  - отражение от излучателей и их взаимовлияние;
- 3) УБЛ определяется не только формой огибающей амплитудно-фазового распределения решетки, но и зазорами между группами излучателей в строке;
- 4) наличие межслойных переходов с кондуктивной связью. Для ограничения области взаимодействия в конструкции могут быть использованы металлизированные отверстия, соединяющие оба экранных слоя СПЛ и располагающиеся вокруг места перехода (выноска б) на рис. 2).

Исследование влияния зазоров  $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$  (рис. 5) на УБЛ при фиксированной огибающей амплитудного распределения (АР) в строке показало, что при величине зазоров между участками строк не более  $\lambda_0$  для  $D1$  и  $0,8\lambda_0$  для  $D2$  и  $D3$  достигается УБЛ не хуже относительно системы, в которой зазоры равны шагу между элементами ( $D3=D2=D1=D0$ ).

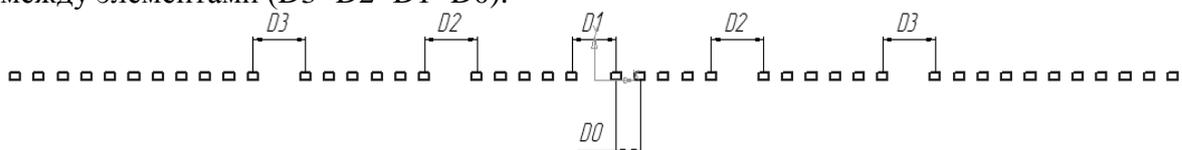


Рис. 5. Зазоры между группами излучателей в строке

Пример ДН для антенной решётки с габаритами  $30\lambda_0 \times 12\lambda_0$ , шагом между излучателями  $0,7\lambda_0$  в строке и  $0,7\lambda_0$  в столбце, зазорами между участками строк до  $\lambda_0$  приведён на рис. 7. Нормированное амплитудное распределение в раскрыве антенны описывается формулами:  $A(x) = \cos^{1,35}(0,5 \cdot \pi \cdot x/x_{\max})$  – в горизонтальном сечении,  $A(y) = 1 - 0,6 (y/y_{\max})^2$  – в вертикальном сечении (рис. 6). Различие фаз возбуждения соседних излучающих элементов в строке не более 4 градусов.

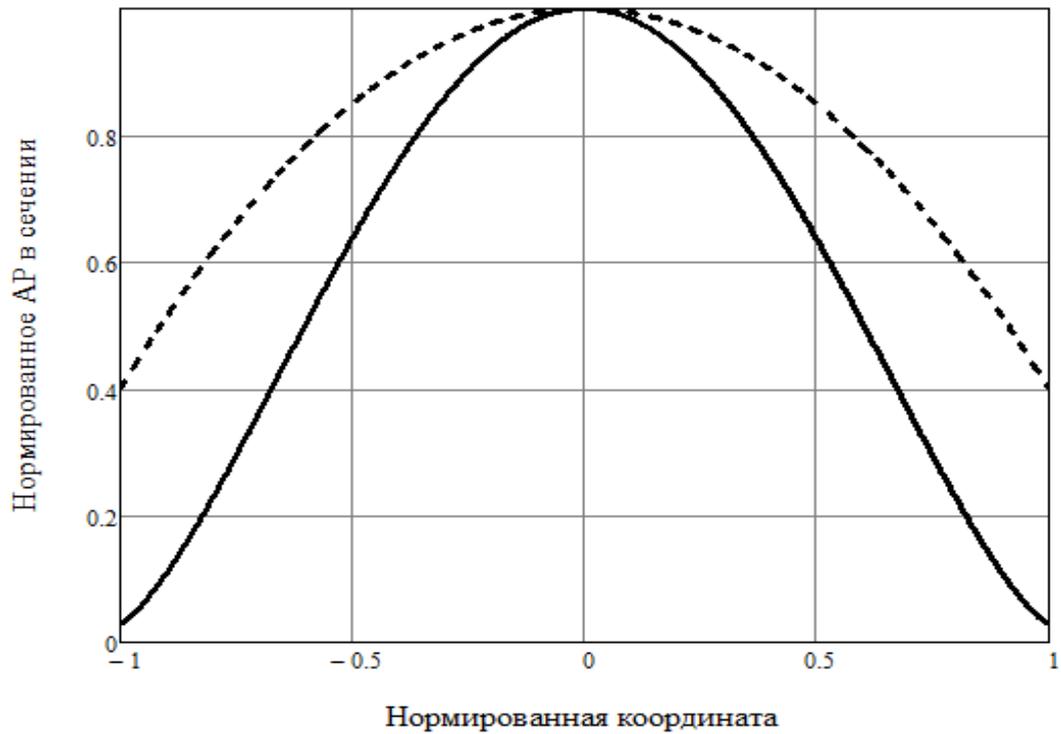


Рис. 6. Нормированное амплитудное распределение:

— - в горизонтальном сечении; - - - - в вертикальном сечении

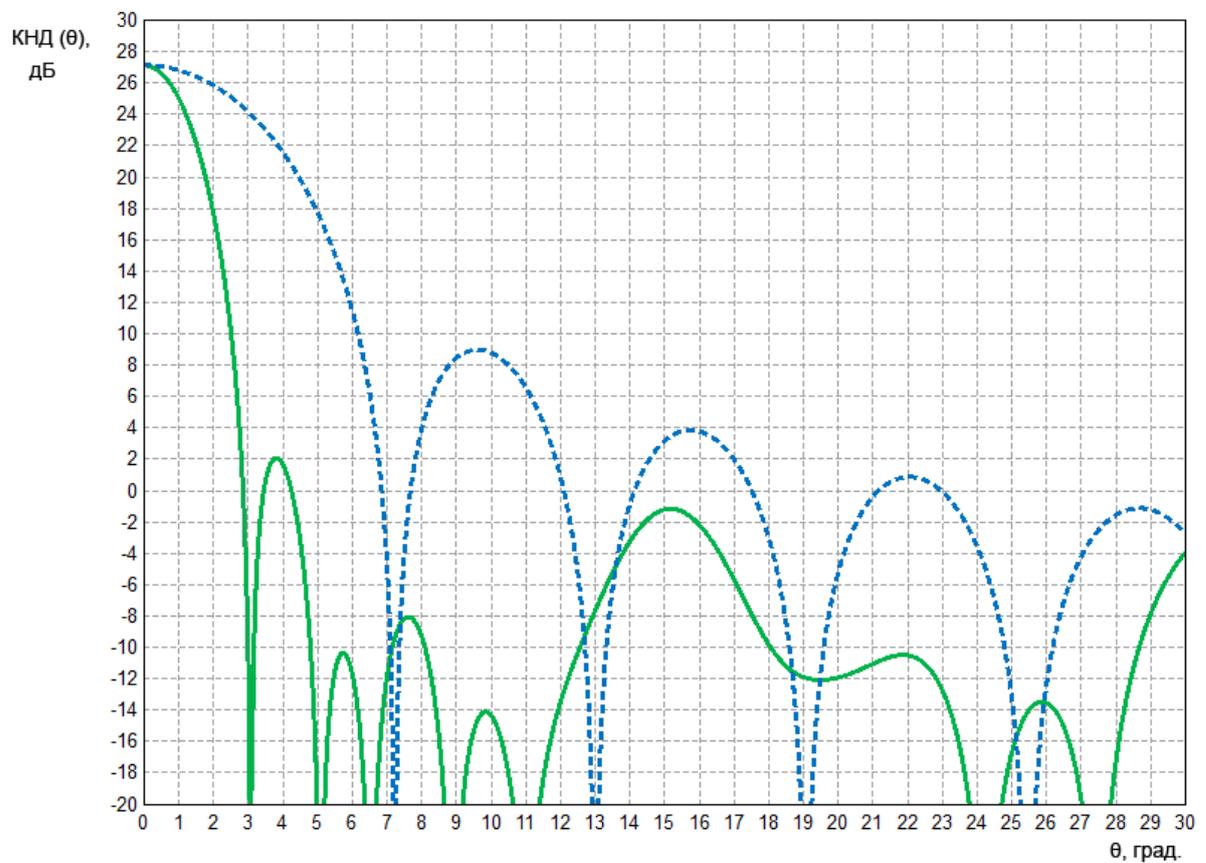


Рис. 7. КНД системы в вертикальном (---) и горизонтальном (—) сечениях

Предлагаемая конструкция обеспечивает формирование требуемой ДН независимо в горизонтальной и вертикальной плоскостях в полосе частот до 5 %,

обладая существенно меньшими массогабаритными показателями в сравнении с зеркальными аналогами и уровнем кросс-поляризационной компоненты ДН, сопоставимым с уровнем у полосковых излучателей антенной решётки. Достижимый УБЛ в горизонтальной плоскости при АР, описанном выше, составляет не более -25 дБ, в вертикальной плоскости – не более -18 дБ. Для линейки излучателей коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в полосе рабочих частот составляет не более 1,4.

В настоящее время проводятся работы по изготовлению и экспериментальному исследованию узлов систем деления мощности и фрагмента антенной решетки.

Список литературы:

1. Печатная антенная решётка сантиметрового диапазона волн / Литун В.И., Прохорова В.В., Русов Ю.С., Фадеева Н.Ю. // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. в 2 т., т. 2. Севастополь: Вебер, 2011. С. 559-560.
2. Lee K.F., Luk K.M. Microstrip Patch Antennas. Imperial College Press. 2011. 544 p.
3. Lait A.J. Waveguide to stripline transition. US patent № 4716386, cl. H01P 5/107. 1987.
4. Sakakibara K. Broadband and Planar Microstrip-to-Waveguide Transitions / Sakakibara K. // Microwave and Millimeter Wave Technologies: from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications / Edited by I. Minin. In-Teh. 2010. P. 257-272.