

Широкополосный излучатель планарной ФАР X-диапазона

А. А. Дяденко, В. С. Попов, Ю. В. Кривошеев, Д. А. Перов
АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»

Аннотация. Рассмотрен широкополосный излучатель (ширина полосы частот не менее 40 %) планарной фазированной антенной решётки для радиолокатора X-диапазона. Излучатель представляет собой многослойную патч-антенну, возбуждаемую щелью от полосковой линии на независимых линейных поляризациях. Система возбуждения патчей выполнена на многослойной печатной плате, а патчи, вспомогательные слои и укрытие выполнены на уложенных друг на друга диэлектрических листах. В работе рассмотрены особенности реализации излучателя, технологические особенности и полученные в результате моделирования радиотехнические характеристики.

Ключевые слова: многослойная патч-антенна, печатная плата

I. ВВЕДЕНИЕ

Достижения в области полупроводниковых технологий сделали возможным применение фазированных антенных решеток (ФАР) в широком спектре решений и отраслей. Для совместной работы с антенными решетками разработаны микросхемы с высокой степенью интеграции, низким энергопотреблением, высоким КПД. Это позволило расположить всю СВЧ аппаратуру ФАР на одной печатной плате, что делает решётку компактной, лёгкой, а также снижает её стоимость за счёт технологичности изготовления. К излучателям решётки такого типа предъявляются аналогичные требования: они должны обладать малыми размерами и должны быть технологичными в производстве.

Распространённым излучателем для планарных антенн являются патч-излучатели. Основные типы патч-излучателей, их характеристики и способы их возбуждения описаны в ряде работ, например, в [1, 2]. Наиболее широкой полосой частот обладают излучатели на основе многослойной патч-антенны. Такие излучатели имеют различные способы возбуждения и конструктивного исполнения. В частности, можно отметить широкополосные конструкции, описанные в работах [3–7]. Недостатком данных конструкций является необходимость использования дополнительных переходников (например, коаксиальных разъёмов) для подключения к излучателям.

Более технологичным подходом является использование конструкций, которые собираются из нескольких слоёв печатных плат и других плоских элементов, где активные элементы размещаются на тех же печатных платах, как описано, например, в работах [8, 9]. В [8] описаны антенны терминала спутниковой связи Ka-диапазона, в [9] описана антенна терминала Ku-диапазона. Более технологичной является конструкция, описанная в [9]. В данной антенне разработчикам удалось интегрировать излучатель в структуру многослойной печатной платы (МПП) и без

каких-либо дополнительных переходников подключиться к активным электронным компонентам антенны путём организации межслойных переходов. Это сделано за счёт интеграции щелевой системы возбуждения патчей в общую МПП. Патчи, вспомогательные слои и укрытие выполнены на уложенных друг на друга диэлектрических листах. В силу технологичности данного решения, в качестве прототипа разрабатываемого излучателя ФАР X-диапазона был использован излучатель, описанный в [9].

Цель работы – спроектировать широкополосный излучатель, предназначенный для работы в составе планарной ФАР X-диапазона с широким сектором электронного сканирования для радиолокатора, и исследовать характеристики этого излучателя. При этом излучатель должен быть интегрирован в структуру многослойной печатной платы и иметь возможность подключиться к активным электронным компонентам антенны путём организации межслойных переходов.

II. ВЫБОР ТОПОЛОГИИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Рассматриваемый излучатель проектировался для работы в X-диапазоне частот, а именно, $0,8f_c - 1,2f_c$. Для выполнения требований по широкополосности и технологичности, излучатель представляет собой многослойную патч-антенну, возбуждаемую щелью от полосковой линии. Радиотехнические особенности данного решения описаны, например, в [3]. Оптимальное расстояние между печатными платами с патчами выдерживается с помощью диэлектрических листов. Конфигурация слоёв проектируемого излучателя приведена на рис. 1.

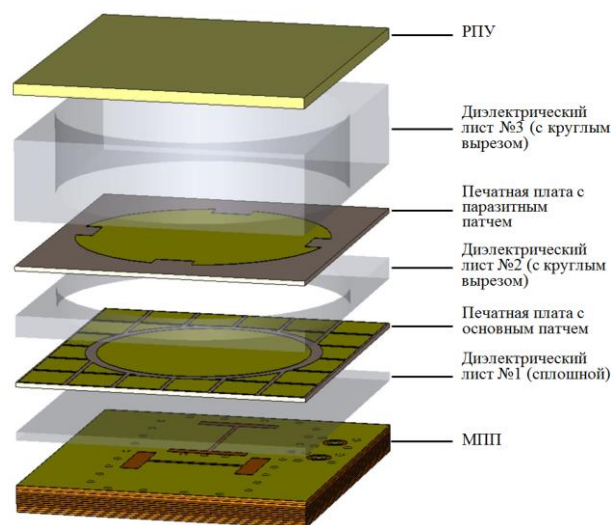


Рис. 1. Конфигурация слоёв излучателя

Из соображения отсутствия интерференционных максимумов и возможности согласования выбраны

следующие геометрические параметры излучателей в решётке:

- сетка расположения излучателей – треугольная;
- шаг расстановки излучателей по горизонтали – $0,5\lambda_c$;
- шаг расстановки излучателей по вертикали – $0,43\lambda_c$.

МПП представляет из себя 14-слойный стек, состоящий из 4 ядер и 9 препрегов. Материал МПП имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon=3,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,0036$.

14-слойная МПП спроектирована для изготовления по технологии послойного наращивания, и имеет симметричную структуру (рис. 2), что при соответствующе подобранных толщинах диэлектрика позволяет использовать межслойные переходы диаметром $0,1\text{ мм}$ и выполнить трассировку многовыводных микросхем с шагом между выводами до $0,4\text{ мм}$.

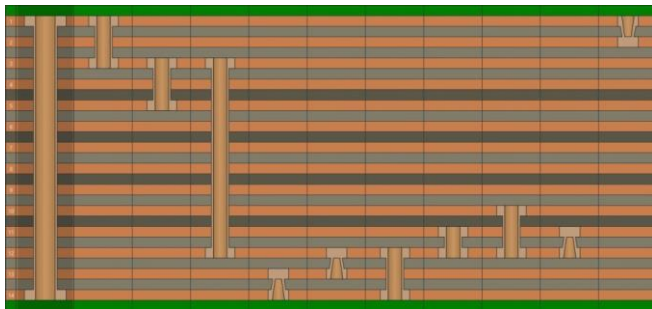


Рис. 2. Схематичное изображение 14-слойной МПП и возможные расположения переходных отверстий

На рис. 3 приведена конфигурация СВЧ-слоёв разработанной 14-слойной МПП. Сигнал от активных электронных компонентов антенны поступает на излучатель через межслойный переход коаксиального типа. Возбуждение патчей осуществляется на горизонтальной и вертикальной поляризациях с помощью полосковых линий и щелей в слоях L1 и L2.

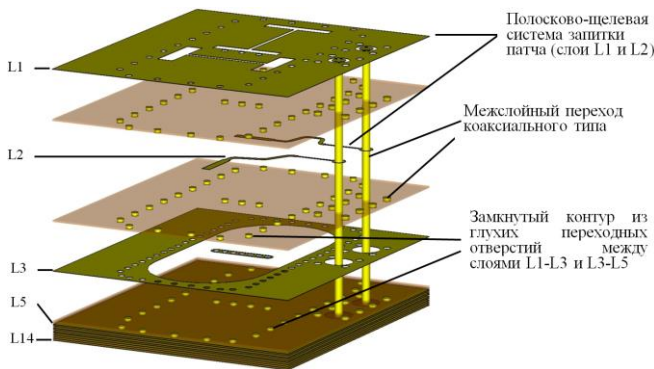


Рис. 3. Конфигурация слоёв 14-слойной МПП

На рис. 4 приведена топология слоёв L1, L2 и L3 из состава 14-слойной МПП. Настройка рабочей полосы частот излучателя и согласование выполнялось подбором оптимальных диаметров основного и паразитного патчей, расстояния между патчами и возбуждающих полосковых линий, показанных на рис. 4 ($l_1, l_2, l_3, l_4, w_1, w_2, w_3, w_4, l_{s1}, l_{s2}$).

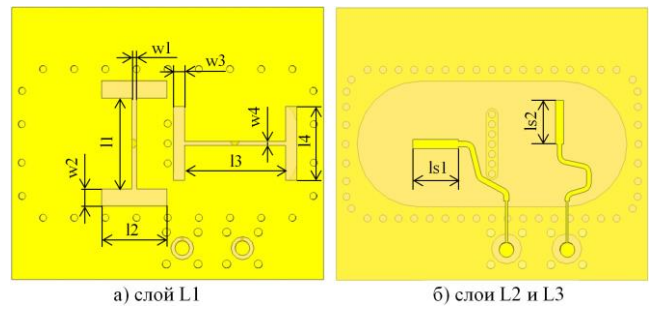


Рис. 4. Топология слоёв МПП: а – слой L1; б – слои L2 и L3

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

На рис. 5–8 показаны характеристики излучателя, полученные в результате моделирования в ячейке Флоке в центральном положении луча. Из рисунков видно, что в полосе частот $0,8f_c-1,2f_c$ величина коэффициента отражения в центральном положении луча не превышает -11 дБ , что соответствует $\text{КСВн} \leq 1,8$. Коэффициент передачи в основную моду канала Флоке не менее $-1,25\text{ дБ}$, в моду канала Флоке на кросс-поляризации – не более $-32,5\text{ дБ}$. Развязка между портом 1 и портом 2 не менее 34 дБ . Характеристики излучателя при сканировании требуют дальнейшего исследования.

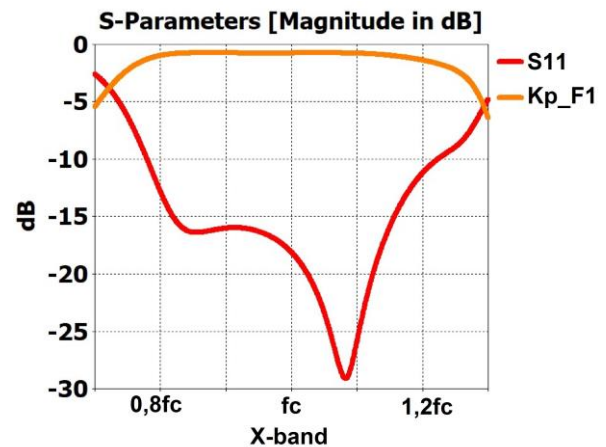


Рис. 5. На графике S11 – коэффициент отражения при подаче сигнала на порт №1; Kp_F1 – коэффициент передачи в основную моду канала Флоке при подаче сигнала на порт №1; f_c – центральная частота антенны. Центральное положение луча ($\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$)

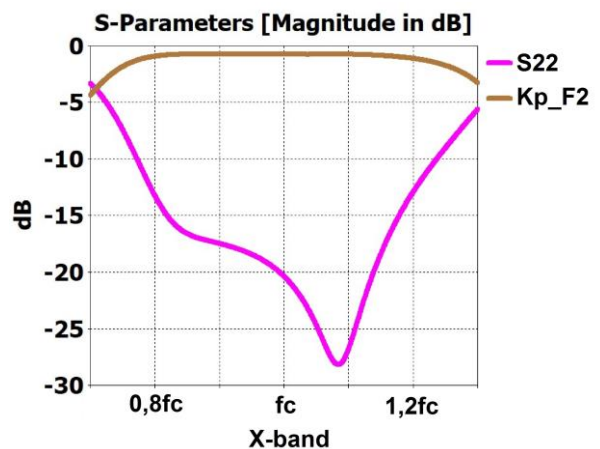


Рис. 6. На графике S22 – коэффициент отражения при подаче сигнала на порт №2; Kp_F2 – коэффициент передачи в основную моду канала Флоке при подаче сигнала на порт №2; f_c – центральная частота антенны. Центральное положение луча ($\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен излучатель планарной ФАР X-диапазона, который представляет собой многослойную патч-антенну, возбуждаемую щелью от полосковой линии. Система возбуждения патча выполнена на 14-слойной МПП, а патчи, вспомогательные слои и укрытие выполнены на уложенных друг на друга диэлектрических листах.

Данная конструкция является технологичной, т. к. на единой МПП выполнена и система возбуждения патчей, и установка активных элементов ФАР, а остальные элементы излучателя находятся на диэлектрических листах, которые укладываются друг на друга без необходимости обеспечения электрического контакта.

Как показало моделирование в ячейке Флоке в центральном положении луча, излучатель обеспечивает высокие радиотехнические характеристики. Ширина рабочей полосы частот излучателя составила не менее 40 %.

Предлагаемое решение может существенно сократить массо-габаритные характеристики и стоимость конечного изделия.

В продолжение работы планируется дальнейшее численное и экспериментальное исследование излучателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Waterhouse R. B. *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*. New York, Springer, 2003. 432 p.
- [2] Bancroft R. *Microstrip and Printed Antenna Design*, 3rd Edition. London, The Institution of Engineering and Technology, 2020. 320 p.
- [3] Hao L. Multilayer Circularly Polarized Planar Aperture-Coupled Antenna for Satellite Applications. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. July 2018. Pp. 349–350.
- [4] Díaz J. D. A cross-stacked radiating antenna with enhanced scanning performance for digital beamforming multifunction phased array radars. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 10, pp. 5258–5267, Oct. 2018.
- [5] Doganay D. A wide band, dual polarized patch antenna for wide angle scanning phased arrays. *2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. October 2013. Pp. 135-138
- [6] Su P., Sun D., Zhang Z. A low-profile dual-polarized ka-band antenna for wide angle scanning phased arrays. *2017 Sixth AsiaPacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Xi'an, 2017.
- [7] United States Patent №US 9,520,655 B2. Dual-Polarized Radiating Patch Antenna. Dec. 13, 2016.
- [8] Денисенко В.В., Козлов В.Н., Колесников Р.А., Корчемкин Ю.Б., Кривошеев Ю.В., Левитан Б.А., Шитиков А.М., Шишлов А.В., Янукьян З.А., Uhm M.S., Yun S.H. Принципы создания фазированной активной антенной решетки для терминалов спутниковой связи на основе многослойной печатной платы. *Радиотехника*. 2021. Т. 85. No 10. С. 42–52.
- [9] Алешин В.С., Догаев С.Г. Антенна Илона Маска – взгляд снаружи и изнутри. Сборник трудов XV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». М.: МТУСИ, 2021. С. 97–100.

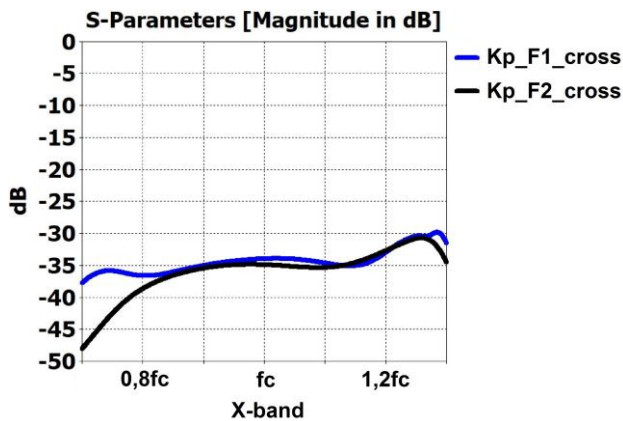


Рис. 7. На графике $K_{p_F1_cross}$ и $K_{p_F2_cross}$ – коэффициенты передачи в моду Флоке на кросс-поляризации; f_c – центральная частота антенны. Центральное положение луча ($\varphi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$)

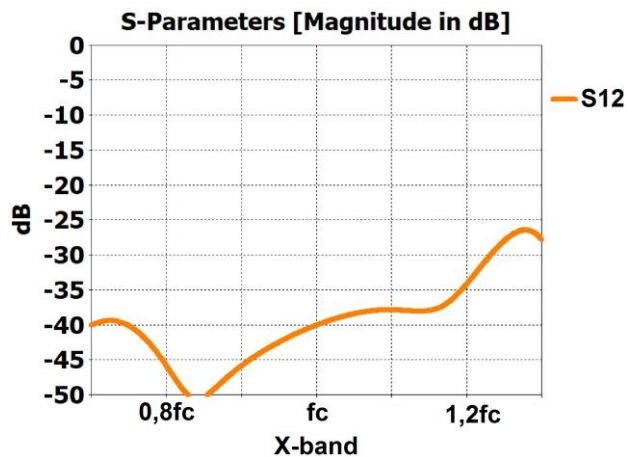


Рис. 8. На графике S_{12} – коэффициент передачи в порт кросс поляризации (развязка между портами ортогональных поляризаций); f_c – центральная частота антенны. Центральное положение луча ($\varphi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$)

На рис. 9 приведены графики коэффициента усиления на центральной частоте (f_c) полученные в результате моделирования в ячейке Флоке. Из рис. 9 видно, что на центральной частоте величина коэффициента усиления не менее 3,5 дБ.

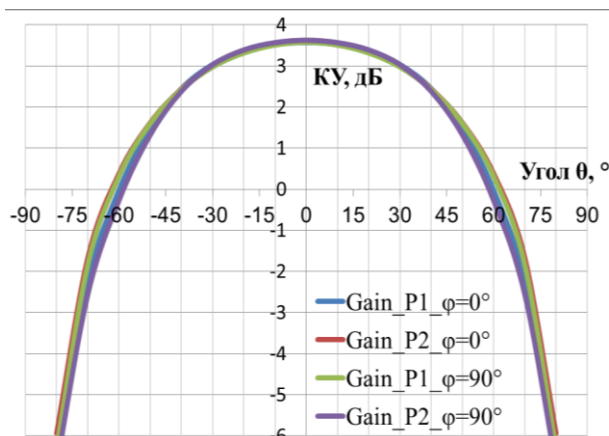


Рис. 9. На графике показаны коэффициенты усиления на центральной частоте (f_c) при возбуждении порта №1 и порта №2 для плоскостей сканирования $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=90^\circ$