

Особенности технологического процесса изготовления плоских спиральных антенн с дополнительным замедлением

М.А. Малахов^{1, 2}

¹ Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
² АО «НИИ “Экран”»
443022, Россия, г. Самара,
пр. Кирова, 24

Аннотация – Обоснование. Работа направлена на развитие и исследование технологических процессов и производственных операций изготовления печатных антенн. Частным случаем подобных антенн является плоская спиральная антенна с дополнительным замедлением в виде диэлектрической либо металлодиэлектрической пластины. **Цель.** В работе осуществляется разбор отличительных особенностей технологических процессов изготовления плоских спиральных антенн с дополнительным замедлением. Выделен ряд «узких» мест производственных операций, связанных с особенностями применяемых базовых материалов и базовых промышленных технологий. **Методы.** В основе исследований лежит практико-ориентированное сравнение технологических процессов изготовления плоских спиральных антенн с дополнительным замедлением с различными конструктивными решениями замедляющей структуры: планарная диэлектрическая пластина, планарная металлодиэлектрическая пластина с металлизированными отверстиями, планарная металлодиэлектрическая пластина с металлическими штырями. В качестве базовых технологий используются комбинированный позитивный метод производства печатных плат, технология прессования многослойных печатных плат, технология сборки и электромонтажа СВЧ-устройств. **Результаты.** Предложены варианты конструкции планарных замедляющих пластин и соответствующие технологические процессы их производства, определены их ключевые отличия: технологичность, степень автоматизации, длительность. **Заключение.** С практической точки зрения показано, что конструкция диэлектрической замедляющей пластины является наиболее технологичной и серийнопригодной при массовом производстве, что подтверждается изготовленными образцами. В случае необходимости интеграции в конструкцию замедляющей пластины дополнительных элементов более технологичным является вариант с металлизированными отверстиями.

Ключевые слова – спиральная антенна; дополнительное замедление; планарная замедляющая пластина; технологический процесс; технология изготовления печатных плат.

Введение

В современных радиоэлектронных системах активно применяются плоские спиральные антенны с равномерным шагом намотки (ПСА). Они используются в качестве самостоятельной антенны, облучателя зеркальных антенн, а также в составе фазированных антенных решеток. По диапазонным свойствам они относятся к квазичастотно-независимым антеннам [1–3].

С точки зрения приближенной теории описание процесса излучения в ПСА сводится к следующему [1]: на каждой частоте имеется рабочая группа витков, вносящая наибольший вклад в поле излучения. При увеличении частоты эта группа витков перемещается в сторону меньших радиусов, а при увеличении частоты – в сторону больших радиусов. Однако, как показывает строгое решение задачи о распределении тока на тонких спиральных проводниках [4–6], эти представления являются не совсем корректными. Ток в спиральном прово-

днике имеет вид смешанной волны, распространяющейся вдоль проводника, амплитуда которой экспоненциально уменьшается при удалении от точки питания.

Актуальной проблемой радиоэлектроники является необходимость миниатюризации радиоаппаратуры, в особенности бортовых станций самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов, в том числе в части антенн и их излучающих структур. Новые конструктивные решения при проектировании антенных систем требуют дополнительной технологической проработки и инновационного развития технологических процессов производства.

В статье представлен технологический процесс изготовления плоской спиральной антенны с дополнительным замедлением в виде планарной замедляющей пластины (ЗП). Проведен сравнительный практикоориентированный анализ трех вариантов технологического процесса изготовления ЗП. Обозначены технологические трудности,

возникающие в процессе производства подобных антенн. Показано, что конструкция диэлектрической замедляющей пластины является наиболее технологичной и серийнопригодной при массовом производстве, что подтверждается изготовленными образцами. В случае необходимости интеграции в конструкцию ЗП дополнительных замедляющих элементов более технологичным является вариант с металлизированными отверстиями.

1. Постановка задачи

В связи с тем, что нижняя граница рабочего диапазона плоской спиральной антенны преимущественно определяется таким ее волновым размером, при котором начинает преобладать режим бегущих волн тока, уменьшение ее волновых размеров ведет к образованию стоячих волн тока. Это усиливает зависимость характеристик излучения антенны и ее входного сопротивления от частоты. Поэтому решение задачи улучшения массогабаритных характеристик антенны путем прямого уменьшения размеров излучающего элемента приводит к значительному ухудшению функциональных параметров в нижней части рабочего диапазона частот.

Уменьшить диаметр спирали без ухудшения функциональных характеристик возможно в случае замедления скорости протекающей в проводнике электромагнитной волны. Минимизация отраженной от внешних концов излучателя волны тока будет способствовать ослаблению указанной ранее зависимости характеристик излучения структуры и ее входного сопротивления от частоты и приведет к расширению нижней границы рабочего диапазона частот. На высоких частотах энергия отраженной волны мала, так как при распространении прямой волны тока по спирали вследствие интенсивного излучения происходит быстрое уменьшение ее амплитуды, и на внешних витках спирали она существенно меньше, чем на внутренних. Происходит устранение источника обратных волн тока. Таким образом, для уменьшения нижней границы рабочего диапазона требуется тем или иным образом обеспечить приемлемую скорость снижения амплитуды прямой волны тока.

Известны следующие способы замедления электромагнитных волн в антеннах [7]:

- увеличение длины проводника (свертка);
- повышение сопротивления проводника (активной и реактивной составляющих);

- использование объемных диэлектрических резонаторов;
- использование многослойных структур;
- использование метаматериалов в подложке;
- применение гребенчатых структур;
- экранирование (плоские экраны, полостные отражатели);
- использование поглотителей энергии, в т. ч. ступенчатых;
- пропускание через среду с высокой диэлектрической проницаемостью, например стекло или металлодиэлектрик (в виде размещенных в пространстве пластин).

Одним из перспективных направлений замедления электромагнитных волн в плоских спиральных антеннах видится применение планарных диэлектрических и металлодиэлектрических ЗП. В целом использование диэлектрических и металлодиэлектрических пластин и линз, как объемных [8], так и плоских [9], позволяет улучшить параметры антенных систем.

Численное моделирование, проведенное на основе разработанных математических моделей [10; 11], и результаты натурных экспериментов показали значимое улучшение электрических параметров антенн в нижней части рабочего диапазона частот. В частности, улучшается согласование антенны и увеличивается КУ, при этом не оказывается существенного влияния на форму диаграммы направленности в интервале до $1,63 D_{\max} \backslash \lambda$ (где $D_{\max}$ – диаметр внешнего рукава спирали) в сравнении с эталонным образцом антенны.

В целях повышения серийнопригодности и технологичности конструкции, а также сохранения конформных свойств антенны целесообразно использовать для создания планарных ЗП высокочастотные материалы, применяемые для изготовления печатных плат. В этом случае ЗП представляет собой композицию из нескольких слоев диэлектрических подложек с разной диэлектрической проницаемостью, расположенных по мере ее убывания. Подложка с большей диэлектрической проницаемостью прилегает к излучающему элементу, подложка с наименьшей диэлектрической проницаемостью контактирует с внешней средой.

2. Технология производства

В проведенных исследованиях замедляющий элемент выполнен трехслойным с диэлектрической проницаемостью слоев, равной 10; 5 и 2,2 соответственно (рис. 1). В качестве базовых мате-

Внешний слой ЗП $\epsilon=2,2$
Центральный слой ЗП $\epsilon=5,0$
Внутренний слой ЗП $\epsilon=10,0$
Плата спиральной антенны $\epsilon=2,2$

Рис. 1. Схема расположения ЗП относительно платы спиральной антенны

Fig. 1. The layout of the LP relative to the spiral antenna board

риалов выбрана линейка фольгированных диэлектриков ФД СВЧ ТУ РЦНГ.22.21.110.01.82541694.20 22. Такой выбор материалов обусловлен задачами импортозамещения, а также повышения технологичности и серийнопригодности антенн: указанные материалы производятся серийно, активно применяются промышленностью и доступны к приобретению.

Также были рассмотрены варианты конструктивной модификации ЗП. В первом варианте модификации в диэлектрических слоях предусмотрены металлизированные отверстия, расположенные вдоль витков спирального излучающего элемента, имитирующих металлические «штырьки». Количество и расположение элементов определено в соответствии с результатами моделирования. Диаметр отверстий перед металлизацией составлял 0,3 мм. Во втором варианте модификации «штырьки» выполнены в виде проволоки, монтированной в отверстия. Диаметр отверстий в этом варианте конструкции составляет 0,5 мм. Координаты отверстий соответствуют первому варианту.

Изготовление плат плоского спирального излучателя, фидера и отдельных слоев ЗП осуществляется комбинированным позитивным методом (рис. 2). В общем виде топология каждого слоя формируется последовательным выполнением операций фрезерования заготовки, нанесения фоторезиста, формирования топологического рисунка и его проявления, наращивания меди, удаления фоторезиста, травления меди, лазерного фрезерования паза под питающий трансформатор.

Слои ЗП выполняются путем удаления металла с подложек, сборки пакета, при этом диэлектрические подложки прокладываются слоями препрега. Затем следует прессование, сверление сквозных отверстий, заполнение отверстий металлом. При этом в первом варианте модификации заполнение осуществляется методом химико-гальванической металлизации отверстий, а во втором в отверстия монтируется медная проволока (рис. 3).

Очевидно, что технологический процесс А проще, стабильнее, менее требовательный к технологической точности оборудования, соответственно, конструкция ЗП без дополнительных замедляющих элементов наиболее технологичная из представленных. Однако с точки зрения функциональных параметров такие пластины при определенных условиях обладают меньшим коэффициентом усиления.

Конструкции металлодиэлектрических пластин с металлизированными и заполненными металлом отверстиями позволяют добиться лучших электрических параметров. Но интеграция таких элементов приводит к усложнению производственного цикла. В случае технологического процесса Б добавляются операции сверления, химико-гальванической металлизации отверстий, а также повышаются требования по точности выполнения операции совмещения заготовок при сборке пакета. При наличии автоматизированного оборудования и стабильного технологического процесса изготовления печатных плат трудности носят локальный характер, технологию следует считать в достаточной мере масштабируемой и серийнопригодной.

Напротив, технологический процесс В, хоть и не требует дополнительных химико-гальванических операций для металлизации отверстий, в большей степени завязан на человеческий фактор – операция монтажа проволоки в отверстия выполняется вручную. Кроме того, в подобной конструкции металлодиэлектрической пластины из-за техно-



Рис. 2. Блок-схема технологического процесса изготовления плат трансформатора и спиральной антенны

Fig. 2. Block diagram of the technological process of manufacturing transformer and spiral antenna boards

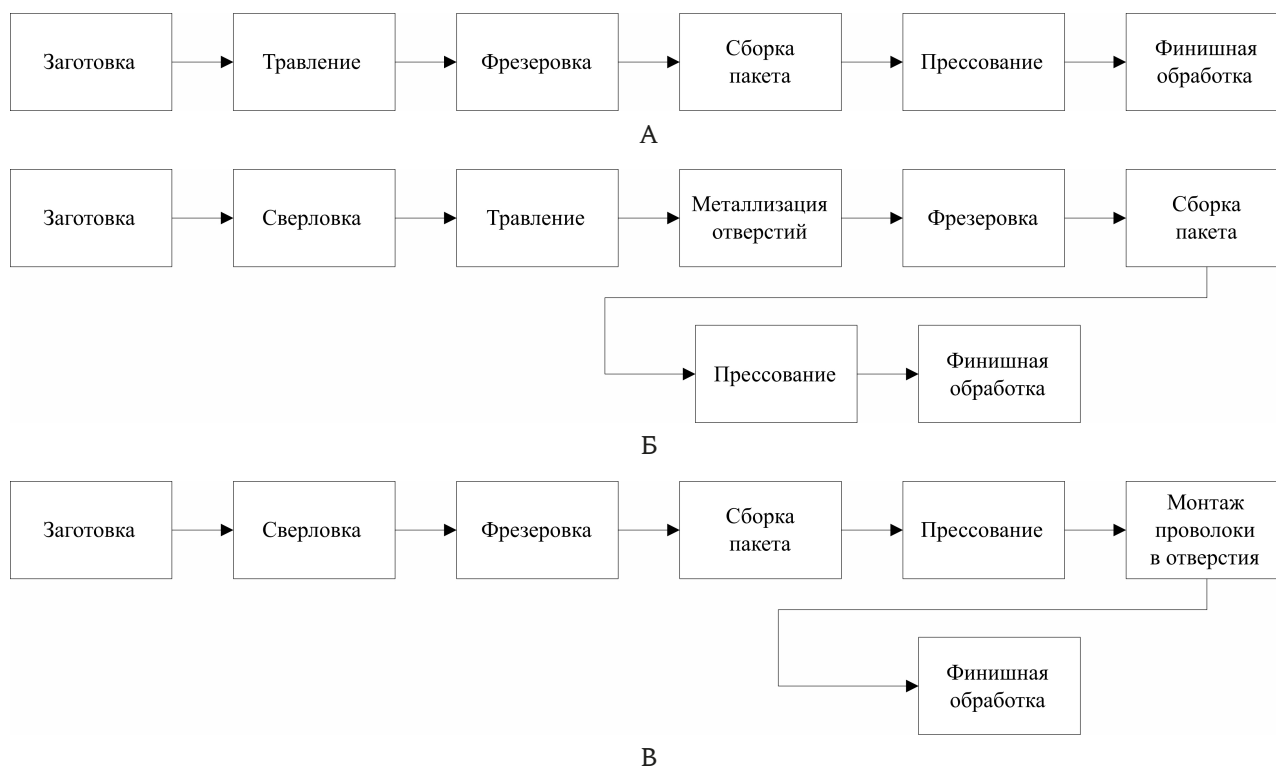


Рис. 3. Блок-схемы технологических процессов изготовления ЗП (А – диэлектрические пластины для Образца II; Б – диэлектрические пластины с металлизированными отверстиями для Образца III; В – диэлектрические пластины с заполненными отверстиями для образца IV)

Fig. 3. Block diagrams of technological processes for manufacturing LP (A – dielectric plates for Sample II; B – dielectric plates with metallized holes for Sample III; C – dielectric plates with filled holes for sample IV)

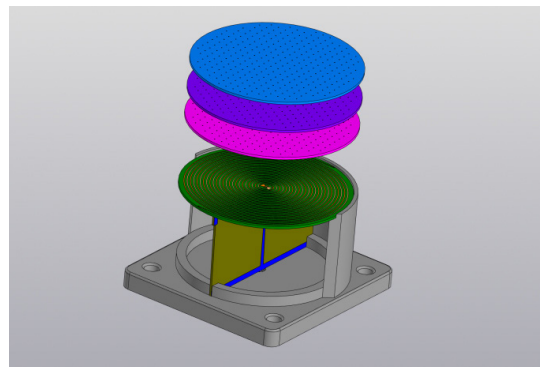
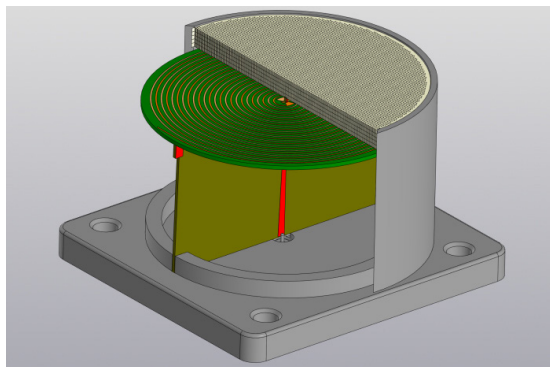


Рис. 4. Трехмерная модель макета плоской спиральной антенны с замедляющей пластиной

Fig. 4. Three-dimensional model of a layout of a flat spiral antenna with a planar loading plate

гических ограничений минимальный диаметр отверстий составляет 0,5 мм, что в 2 раза превышает теоретически рассчитанное значение.

Для единичной заготовки длительность технологического цикла изготовления по процессам Б и В практически идентична и составляет 16 часов, что в два раза превышает длительность цикла по технологическому процессу А. В случае серийного производства операция монтажа проволоки в отверстия приведет к увеличению длительности цикла на 2 часа за каждый экземпляр ЗП.

Сборка антенного прибора (рис. 4) выполнена по традиционной технологии: плата трансформатора

установлена в корпусе в пазы и распаяна ПОИН-52, для механической прочности проклеена клеем ВК-9. Центральная жила соединителя паяется ПОСК 50-18. Плата спирали оплавляется по контуру и расплавляется на трансформатор ПОИН-52.

3. Технологические особенности производственных операций

При отработке режимов резания и пайки были выявлены следующие дефекты и отклонения: задиры, расслоение материала при механической обработке, потемнение (плавление) диэлектрика

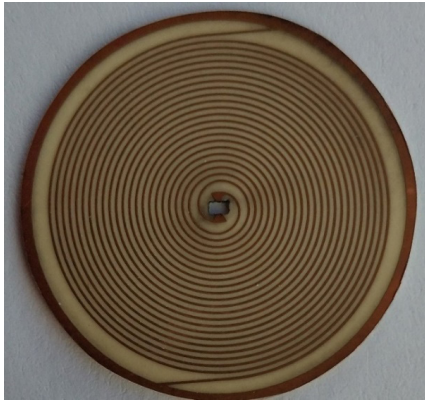


Рис. 5. Дефекты при обработке материала ФД СВЧ
Fig. 5. Defects in the processing of the FD SVCH material

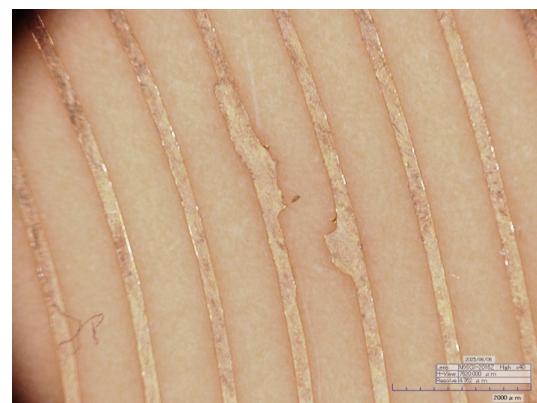
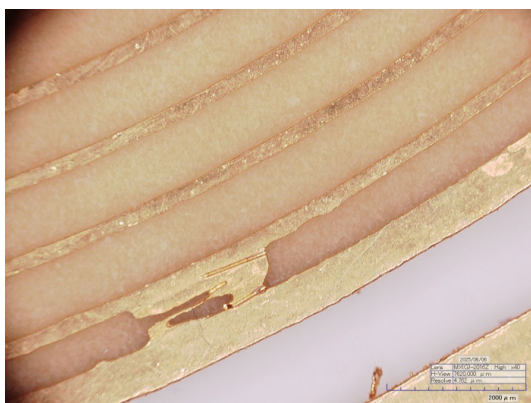


Рис. 6. Дефекты топологии при изготовлении спиральных антенн
Fig. 6. Topology defects in the manufacture of spiral antennas

при пайке, деформация (коробление) подложки после травления (рис. 5).

Ввиду того что указанный материал не содержит в себе тканевую стеклооснову, было установлено, что режимы сверления должны быть более щадящими по величине оборотов шпинделя и подаче по сравнению с обычными стеклопластиковыми.

Информация по выявленным дефектам была передана разработчику материала. Разработчик оперативно внес изменения в состав материала ФД СВЧ и передал образцы для повторной отработки.

Для обработки материала были подобраны специализированные фрезы для мягких диэлектриков. Отработка режимов сверления и фрезерования проводилась как с использованием тестовых программ сверления и фрезерования, которые имеются в станках, так и в более широком диапазоне режимов резания.

Отдельная сложная задача при изготовлении плоских спиральных антенн связана с контролем качества изготовления самого спирального излучателя. Технология должна обеспечивать равномерность ширины проводника и ширины зазора между рукавами спирали. Дефекты изготовления

(рис. 6) оказывают влияние на электрические параметры антенного прибора, ухудшают согласование, вносят неравномерности в верхней части рабочего диапазона частот. Системы автоматизированной оптической инспекции, применяемые при контроле печатных плат, осуществляют перевод изображения топологии в графические примитивы, однако в случае со спиралью в качестве примитива используется «точка». Обработка массива «точек» требует значительных вычислительных мощностей, что приводит к «зависанию» системы контроля. Ручной визуальный контроль не обеспечивает приемлемой точности измерения размеров топологии плоской спиральной антенны. Этот аспект накладывает дополнительные требования к стабильности технологического процесса производства, обеспечению параметров микроклимата в производственных помещениях и квалификации персонала.

При проектировании и изготовлении ЗП также следует учитывать технологические ограничения, связанные с трудностью обеспечения равномерной металлизации отверстий малого диаметра на всю глубину.

Заключение

Как видно, технологический процесс изготовления ЗП для модификации ПСА может в значительной степени увеличить длительность производственного цикла, требует наличия освоенной базовой технологии изготовления многослойных печатных плат (как минимум – прессования фольгированных диэлектрических материалов), повышает требования к квалификации персонала.

Диэлектрические ЗП наиболее просты в производстве, но использование дополнительных замедляющих элементов (металлические «штырьки», металлизированные отверстия) позволяет улучшить согласование и электрические параметры антенного прибора на определенных частотах. Технологический процесс изготовления ЗП с металлизированными отверстиями имеет большую степень автоматизации, чем процесс с ручным монтированием проволоки в отверстия, кроме того, позволяет реализовать замедляющие эле-

менты с меньшими габаритными размерами. Это делает процесс более гибким и приближает практические результаты к теоретическим расчетам.

Дальнейшие работы по развитию технологии изготовления ЗП планируется вести в двух основных направлениях.

Во-первых, целесообразно разработать технологию изготовления комбинированной ЗП, включающей диэлектрические и металлодиэлектрические области с разными типами дополнительных замедляющих элементов. Это позволит улучшить параметры антенн на отдельных участках частотного диапазона наиболее подходящим способом.

Во-вторых, следует проработать вопрос объединения платы спиральной антенны и ЗП и изготовления их в едином цикле по технологии многослойных печатных плат. Основной трудностью здесь видится обеспечение качественного и надежного соединения излучающей структуры с платой фидера.

Список литературы

1. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М.: Сов. радио, 1974. 223 с.
2. Сверхширокополосные антенны / под ред. Л.С. Бененсона. М.: Мир, 1968. 416 с.
3. Рамсей В. Частотно-независимые антенны / пер. с англ. М.: Мир, 1968. 176 с.
4. Неганов В.А., Табаков Д.П. Электродинамический анализ плоских и цилиндрических спиральных антенн // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430, № 6. С. 751–754. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13726906>
5. Неганов В.А., Табаков Д.П. Применение теории сингулярных интегральных уравнений к электродинамическому анализу цилиндрической спиральной антенны // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, № 2. С. 20–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12499892>
6. Неганов В.А., Табаков Д.П., Филиппов С.Б. Математические модели и экспериментальное исследование двухзаходной конической логоспиральной антенны с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров для малого космического аппарата «АИСТ-2» // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 3-1. С. 35–41. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7238>
7. Huang Y., Boyle K. Antennas: From Theory to Practice. Liverpool: John Wiley & Sons, 2008. 379 p.
8. Плоская линза Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы / К.А. Быков [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 1. С. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.48-57>
9. Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров / Ю.Г. Пастернак [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 1. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.32-38>
10. Табаков Д.П., Малахов М.А. Исследование характеристик модифицированного плоского спирального излучателя // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 54–62. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49995951>
11. Табаков Д.П., Малахов М.А. Математическая модель плоской спиральной антенны с прямоугольным сеточным рефлектором // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 11. С. 37–46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59403453>

Информация об авторе

Малахов Михаил Александрович, главный технолог АО «НИИ “Экран”», г. Самара, Россия; аспирант, доцент кафедры электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: устройства СВЧ и антенны и технология их производства.

E-mail: m.malakhov.2020@bk.ru

SPIN-код (eLibrary): 4942-1762

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 3, pp. 63–70

DOI 10.18469/1810-3189.2025.28.3.63-70
UDC 621.396
Original Research

Received 30 June 2025
Accepted 31 July 2025
Published 30 September 2025

Features of the manufacturing process of flat spiral antennas with additional deceleration

Mikhail A. Malakhov^{1, 2}

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya Street,
Samara, 443100, Russia

² JSC «Research Institute “Ekran”»
24, Kirov Avenue,
Samara, 443022, Russia

Abstract – Background. The work is aimed at the development and research of technological processes and production operations for the manufacture of printed antennas. A special case of such antennas is a flat spiral antenna with additional deceleration in the form of a dielectric or metal-dielectric plate. **Aim.** The paper analyzes the distinctive features of the manufacturing processes of flat spiral antennas with additional deceleration. A number of «bottlenecks» in production operations are identified, related to the specifics of the basic materials and basic industrial technologies used. **Methods.** The research is based on a practice-oriented comparison of technological processes for manufacturing flat spiral antennas with additional deceleration with various design solutions of the decelerating structure: planar dielectric plate, planar metal-dielectric plate with metallized holes, planar metal-dielectric plate with metal pins. The basic technologies used are the combined positive method of PCB production, the technology of pressing multilayer printed circuit boards, the technology of assembly and electrical installation of microwave devices. **Results.** Design options for planar deceleration plates and the corresponding technological processes of their production are proposed, their key differences are identified: manufacturability, degree of automation, duration. **Conclusion.** From a practical point of view, it is shown that the design of the dielectric retarding plate is the most technologically advanced and commercially suitable for mass production, which is confirmed by the manufactured samples. If it is necessary to integrate additional retarding elements into the design of the PO, the option with metallized holes is more technologically advanced.

Keywords – spiral antenna; additional loading; planar loading plate; technological process; printed circuit board technology.

✉ m.malakhov.2020@bk.ru (Mikhail A. Malakhov)

 © Mikhail A. Malakhov, 2025

References

1. O. A. Yurtsev, A. V. Runov, and A. N. Kazarin, *Spiral Antennas*. Moscow: Sov. radio, 1974. (In Russ.)
2. L. S. Benensona, Ed., *Ultra-Wideband Antennas*. Moscow: Mir, 1968. (In Russ.)
3. V. Rumsey, *Frequency Independent Antennas*, English trans. Moscow: Mir, 1968. (In Russ.)
4. V. A. Neganov and D. P. Tabakov, “Electrodynamic analysis of flat and cylindrical spiral antennas,” *Doklady Akademii nauk*, vol. 430, no. 6, pp. 751–754, 2010, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13726906>. (In Russ.)
5. V. A. Neganov and D. P. Tabakov, “Application of the singular integral equations theory to the electrodynamic analysis of the cylindrical spiral aerial,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 20–29, 2009, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12499892>. (In Russ.)
6. V. A. Neganov, D. P. Tabakov, and S. B. Filippov, “Mathematical models and experimental research of bifilar logospiral conical antenna with a thinwire finite size reflector of Small spacecraft «AIST-2»,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 35–41, 2015, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7238>. (In Russ.)
7. Y. Huang and K. Boyle, *Antennas: From Theory to Practice*. Liverpool: John Wiley & Sons, 2008.
8. K. A. Bykov et al., “Flat Luneberg lens based on a printed circuit with curved conductors,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 48–57, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.48-57>. (In Russ.)
9. Yu. G. Pasternak et al., “Study of a hemispherical metamaterial lens made of parallel printed circuit boards with metal diffusers of small electrical dimensions,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 32–38, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.1.32-38>. (In Russ.)
10. D. P. Tabakov and M. A. Malakhov, “Investigation of the characteristics of a modified planar spiral radiator,” *Radiotekhnika*, vol. 86, no. 11, pp. 54–62, 2022, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49995951>. (In Russ.)
11. D. P. Tabakov and M. A. Malakhov, “Mathematical model of a flat spiral antenna with a rectangular grid reflector,” *Radiotekhnika*, vol. 87, no. 11, pp. 37–46, 2023, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59403453>. (In Russ.)

Information about the Author

Mikhail A. Malakhov, chief technologist of JSC «Research Institute “Ekran”», Samara, Russia; postgraduate student, associate professor of the Department of Electronic Systems and Information Security, Samara State Technical University, Samara, Russia.

Research interests: microwave devices and antennas and their production technology.

E-mail: m.malakhov.2020@bk.ru

SPIN-code (eLibrary): 4942-1762