УДК 621.396.67

ЛИНЕЙНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ С АФАР

И.М. Аболдугев, А.В. Белолипецкий, В.М. Миннебаев,
А.В. Редька, И.А. Хабаров, А.В. Царев

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, д. 27

В статье представлены результаты проектирования и изготовления линейных микрополосковых антенных излучателей, предназначенных для работы в составе приёмо-передающих (ППМ) СВЧ трактов модулей антенных для РЛК с АФАР. В ходе проектирования микрополосковых антенных решёток (МАР) промоделированы две конструкции линейных излучателей, отличающиеся применяемыми материалами и технологией сборки. Измерены радиочастотные характеристики образцов в безэховой камере (БЭК) с целью определения наилучшего варианта для дальнейшего проектирования и изготовления МАР.

Ключевые слова: микрополосковая антенная решётка (МАР), линейный излучатель, активная фазированная антенная решётка (АФАР), приёмо-передающий модуль (ППМ), безэховая камера (БЭК), радиолокационный комплекс (РЛК)

Сведения об авторах: Аболдугев Игорь Михайлович, к.т.н., abolduev_im@pulsarnpp.ru; Белолипецкий Алексей Владимирович, belolipetskij_av@pulsarnpp.ru; Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., minnebaev_vm@pulsarnpp.ru; Редька Алексей Владимирович, redka_av@pulsarnpp.ru; Хабаров Иван Александрович, habarov_ia@pulsarnpp.ru; Царев Александр Владимирович, tsarev@pulsarnpp.ru

LINEAR MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR AESA RADAR APPLICATIONS

I.M. Abolduev, A.V. Belolipetskiy, V.M. Minnebaev,
A.V. Redka, I.A. Khabarov, A.V. Tsarev

S&PE «Pulsar» JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

Article contains the results of design and production of microstrip antenna radiators for microwave transceiver modules of AESA-radars. During the design of microstrip arrays, two linear radiator designs were simulated, which differ in assembly technology and the materials used. In order to determine the best option for future design and manufacturing of microstrip arrays, frequency characteristics of samples was measured in the anechoic chamber.

Keywords: microstrip array, linear radiator, active electronically steered antenna (AESA), transceiver module, anechoic chamber, radar system.

Authors: Abolduev Igor Mikhailovich, Ph.D., abolduev_im@pulsarnpp.ru; Belolipetskiy Aleksey Vladimirovich, belolipetskij_av@pulsarnpp.ru; Minnebaev Vadim Minkhatovich, Ph.D., minnebaev_vm@pulsarnpp.ru; Redka Aleksey Vladimirovich, redka_av@pulsarnpp.ru; Khabarov Ivan Aleksandrovich, habarov_ia@pulsarnpp.ru; Tsarev Aleksandr Vladimirovich, tsarev@pulsarnpp.ru

Введение

С развитием современной электронной компонентной базы, в частности, технологии изготовления СВЧ нитрид-галлиевых транзисторов на карбид-кремниевых подложках (GaN on SiC) [1, 2] все больший интерес представляют активные фазированные антенные решётки (АФАР). Отличие АФАР от фазированных антенных решёток (ФАР) заключается в том, что в случае ФАР фор-

мирование мощного сигнала происходит в одном усиливающем устройстве, зачастую в роли такого устройства выступает вакуумная лампа, а возбуждение излучателей реализуется пространственной системой коммутации, а в случае АФАР формирование мощного сигнала происходит в множестве ППМ, при этом имеется возможность управления фазой сигнала в отдельно взятом канале АФАР. Совершенствование характеристик современных твердотельных

транзисторных усилителей мощности на основе GaN транзисторов открывает широкий спектр возможностей для разработки АФАР в том числе космического базирования [3].

Постановка задачи

Разработка АФАР является сложной комплексной задачей, требующей для своего решения подхода, при котором задача разбивается на составные части. Исходя из технических требований к АФАР в целом, определяют требования, предъявляемые к её составным частям. Одним из базовых элементов любой АФАР является одиночный излучатель. Основными характеристиками одиночного излучателя являются:

- центральная частота СВЧ сигнала;
- коэффициент усиления антенны;
- ширина полосы излучаемого/принимаемого СВЧ сигнала;
- количество и тип поляризаций СВЧ сигнала;
- зависимость коэффициента усиления от угла сканирования;
- входной импеданс элемента.

Исходя из технических требований, предъявляемых к АФАР, определяется пространственное расположение одиночных излучателей друг относительно друга, другими словами, шаг решётки по обеим осям. Шаг решётки, в свою очередь, накладывает существенные ограничения на систему коммутации излучателей, подключаемых к одному приёмо-передающему модулю.

Разработка одиночного излучателя начинается с анализа типовых исполнений антенн с учётом доступности технологии изготовления и материалов. Одиночный излучатель условно можно разбить на следующие составные части: линию передачи, подводящую сигнал к излучателю; резонатор; систему, обеспечивающую электромагнитную связь резонатора и линии передачи. Как уже говорилось выше, требования ко взаимному пространственному расположе-

нию одиночных излучателей накладывают существенные ограничения на конструкцию входящих в состав АФАР одиночных излучателей и схем коммутации.

При разработке одиночного излучателя целесообразно учитывать электромагнитные эффекты связи с соседними излучателями. Реализовано это может быть несколькими способами: с использованием ячейки Флоке и при непосредственном расчёте матрицы (например 3х3) одиночных излучателей. При использовании ячейки Флоке в двух направлениях устанавливаются периодические граничные условия на расчётную область таким образом, чтобы поле на границе X_{min} соответствовало полю на границе X_{max} , по такому же принципу – и по второй оси Y . Кроме того, необходимо задавать множитель антенной решётки. В общем случае в расчёте участвует бесконечный массив одиночных излучателей. При оптимизации системы по параметрам одиночного излучателя по окончании оптимизации системы, состоящей из бесконечного числа одиночных излучателей, получаются характеристики одиночного излучателя без учёта краевых эффектов. При данном способе задания математическим аппаратом учитываются множители антенной решётки, но не учитываются паразитные электромагнитные эффекты связи между излучателями. Такие эффекты связи могут быть приняты во внимание при полноценном 3D моделировании матрицы одиночных излучателей. При таком подходе повышается сложность задачи, увеличивается время расчёта системы, однако могут быть учтены электродинамические эффекты и одновременно с этим снижена паразитная связь между элементами для увеличения коэффициента усиления антенны.

Практический результат

Исходя из изложенной теории, были рассчитаны 2 типа линеек микрополосковых антенных излучателей (рис. 1, 2).

Рис. 1

Линейный микрополосковый антенный излучатель на основе диэлектрического материала Rogers с использованием межплатного слоя из Rohacell HF51

Рис. 2

Линейный микрополосковый антенный излучатель на основе диэлектрического материала Rogers с использованием металлической сетки в качестве межплатного слоя

Основой первого варианта излучателей стали диэлектрические материалы фирмы Rogers трёх типов с различной толщиной. Первичный и вторичный патчи разделены между собой

вспененным материалом типа Rohacell HF51, обеспечивающим механическую жёсткость конструкции. Структурная схема линейного излучателя представлена на рис. 3.

Рис. 3

Структурная схема линейного излучателя типа 1

К достоинствам данного типа линейных излучателей можно отнести хорошую повторяемость технологических процессов изготовления топологии на диэлектрических пластинах и их последующей склейки, что в конечном счёте приводит к высокой повторяемости СВЧ характеристик изделия при серийном выпуске.

Линейные излучатели второго типа технологически выполнены как 3-слойная конструкция, где первичный и вторичный патчи разделены ячеистой металлической сеткой. Сборка многослойной платы в данном случае происходит посредством пайки. Для сборки такого типа излучателей требуется специализированная оснастка, позволяю-

щая совмещать слои между собой с высокой точностью, а технология пайки предъявляет серьёзные требования к температурному режиму сборки, что существенно осложняет процесс изготовления изделия.

С целью определения наиболее технологичного варианта микрополоскового антенного излучателя и для сравнения их диаграмм направленности были изготовлены опытные образцы обоих типов линейных излучателей.

Измерение радиочастотных характеристик опытных образцов осуществлялось в безэховой камере (БЭК) (рис. 5) на стенде, структурная схема которого приведена на рис. 4.

Рис. 4

Структурная схема измерительного стенда БЭК

а)

б)

Рис. 5

Безэховая камера (БЭК): а – измерительная рупорная антенна П6-59 в БЭК; б – опорно-поворотное устройство с размещённым на нем линейным излучателем типа 1

В измерительный стенд входят: опорно-поворотное устройство, на которое устанавливается измеряемая антенна; измерительная рупорная антенна П6-59, расположенная в дальней зоне; анализатор цепей с двумя портами – первый порт подключается к из-

меряемой антенне, а второй к антенне П6-59; компьютер с программным обеспечением для управления стендом и сбора данных.

Результат измерения диаграмм направленности антенн (ДНА) для опытных образцов представлен на рис. 6 и 7.

Рис. 6

ДНА в азимутальной плоскости, горизонтальная поляризация антенны типа 1

Рис. 7

ДНА в азимутальной плоскости, горизонтальная поляризация антенны типа 2

Диаграммы направленности линейных излучателей, как видно из результатов измерений, отличаются существенно. Боковые лепестки ДНА излучателей типа 2 несимметричны по сравнению с боковыми лепестками ДНА излучателей типа 1. ДНА излучателей типа 1 имеет более выраженные первые минимумы. На больших углах сканирования характеристики излучателей типа 1 и типа 2 расходятся.

Различия в ДНА излучателей связаны с погрешностью сборки антенн типа 2. При условии увеличения количества линейных излучателей в микрополосковой антенной решётке технологическая задача пайки становится сложнее. По результатам проведения экспериментальной отработки оптимальным вариантом для проведения дальнейших работ является вариант линеек типа 1.

Выводы

Изготовлено два типа линейных излучателей по различным технологиям, проведены измерения и сравнение радиочастотных характеристик обоих типов излучателей. В результате сравнения диаграмм направленности обоих типов антенн принято решение о дальнейшей разработке МАР на основе линейных излучателей типа 1.

Литература

1. Аболдуев И.М., Гарбер Г.З., Зубков А.М., Иванов К.А., Колковский Ю.В., Редька Ал.В., Ушаков А.В. Импульсный режим работы мощных

СВЧ гетеро-полевых AlGaIn/GaN транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1 (228). – С. 48-53.

2. Аболдуев И.М., Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М. Исследование мощных СВЧ GaN полевых транзисторов в импульсном режиме // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА «Пульсар-2008» / Материалы VII научно-технической конференции (7-8 октября 2008 г., Москва) – С. 24-25.
3. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторов для космических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2016. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 201-207.

References

1. Abolduev I.M., Garber G.Z., Zubkov A.M., Ivanov K.A., Kolkovskiy Yu.V., Redka Al.V., Ushakov A.V. Pulsed operating mode of microwave power AlGaIn/GaN FETs. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2012. Issue 1 (228). pp. 48-53.
2. I.M. Abolduev, A.G. Vasilyev, Yu.V. Kolkovskiy, V.M. Minnebaev. Research on pulsed mode microwave power GaN FETs. «Pulsar-2008». Solid-state electronics, complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of VI scientific and technological conference. Moscow. 2008. pp. 24-25.
3. V.V. Gruzдов, Yu.V. Kolkovskiy, V.M. Minnebaev. Microwave AlGaIn/GaN/SiC transistor-based electronic blocks for space applications. Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences. Iss.12. pt.2. Tula. Published by TulGU. 2016. pp. 201-207.