

Я.М. Парнес, И.Г Киселев, А.С. Комиссаров, В.В. Волков, А.Ф. Березняк, В.Н. Вьюгинов, М.И. Грозина, В.А. Добров, В.Е. Земляков, А.А. Зыбин, А.М. Савин, Р.Г. Шифман
ЗАО "Светлана-Электронприбор"

Конструктивно-технологические и метрологические особенности разработки мощных ППМ АФАР S- и С-диапазона

Описаны конструктивно-технологические особенности разработки ППМ АФАР. Представлены модули, разработанные ЗАО "Светлана-Электронприбор". Описаны некоторые метрологические проблемы ППМ и пути их решения.

Ключевые слова: *приемо-передающий модуль, активная фазированная антенная решетка, С-диапазон, S-диапазон, модуляция фазы, модуляция амплитуды, мощность.*

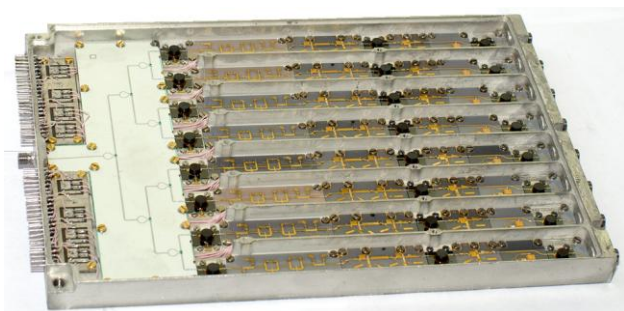
Приемо-передающий модуль (ППМ) является важнейшим конструктивным и функциональным элементом активной антенны с электрическим сканированием, более известной как активная фазированная антенная решетка (АФАР). ППМ АФАР производит обработку принимаемого и излучаемого сигнала по фазе и амплитуде в рабочем диапазоне частот. Как правило, ППМ АФАР включает в себя следующие основные функциональные части: передающий тракт в составе фазовращателя (ФВ) и усилителя мощности излучаемого сигнала; приемный тракт в составе малошумящего усилителя принимаемого сигнала, ФВ, аттенюатора (АТТ), а также переключатель, обеспечивающий работу приемного и передающего трактов ППМ на общий элемент антенного полотна. Дополнительно, в его состав могут входить устройства вторичного электропитания, управления, защиты от синхронной и несинхронной помехи, схемы контроля режима работы ППМ и другие.

Основной конструктивной особенностью ППМ является то, что они устанавливаются непосредственно в полотно АФАР и сопрягают отдельные элементы антенного полотна с блоками формирования сигнала. Таким образом, габаритные размеры ППМ АФАР ограничиваются возможностью их размещения в полотне антенной решетки. Для исключения побочных максимумов излучения АФАР при сканировании фазы шаг решетки не должен значительно превышать половину длины волны излучаемого сигнала, поэтому при разработке ППМ АФАР необходимо это учитывать. Например, для S- и С-диапазона длин волн шаг антенной решетки, а соответственно и поперечные размеры ППМ, меняется в пределах от 75мм до 18,7мм в зависимости от рабочей частоты. Столь малые габариты корпуса, а также требование его герметичности, стойкости к механическим и климатическим воздействиям, накладывают существенное ограничение на выбор элементной компонентной базы (ЭКБ), на схемотехнические и конструктивные решения при разработке конструкции ППМ АФАР. Существенно обостряется проблема обеспечения достаточного теплоотвода с активных элементов (транзисторов усилителей мощности) каждого ППМ в составе антенного полотна. Поэтому по результатам термодинамических расчетов формируются требования к минимально допустимому КПД ППМ, который и определяет выделяемую тепловую мощность. Исходя из этих соображений, ППМ разрабатывается с максимально

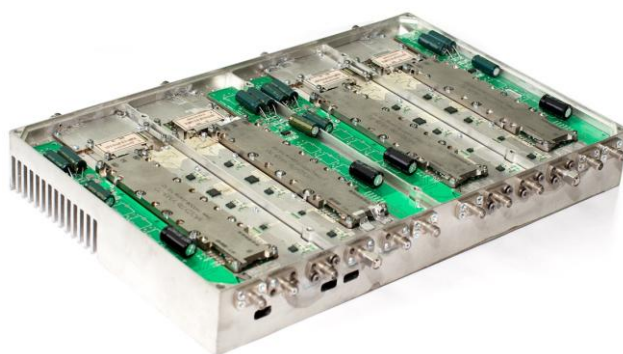
возможным КПД, то есть стремятся максимально снизить потребляемую мощность при сохранении требуемого уровня выходной мощности передающего тракта ППМ.

Еще одним немаловажным конструктивным ограничением при разработке мощных ППМ АФАР является внутреннее поперечное сечение СВЧ трактов в корпусе ППМ, которые в общем виде представляют собой прямоугольный волновод, по которому могут распространяться электромагнитные волны. Необходимо провести тщательный электродинамический расчет конструкции, чтобы убедиться в том, что этот волновод является «запредельным» для распространения СВЧ сигналов в диапазоне рабочих частот, или принять дополнительные меры, чтобы сигналы этого диапазона не распространялись по этому волноводу или затухали при распространении. В противном случае, отраженные электромагнитные волны нарушат нормальное функционирование ППМ и могут даже вывести чувствительный приемный тракт из строя.

Исходя из всех описанных выше ограничений и в соответствии с предъявляемыми потребителем техническими требованиями, ППМ АФАР могут быть разработаны в многоканальном исполнении. В ЗАО «Светлана-Электронприбор» на сегодняшний день уже разработаны и изготовлены опытные образцы передающего 8-ми канального модуля S-диапазона с общим СВЧ входом (рис. 1(а)) и ППМ S-диапазона, объединяющего в едином корпусе 4 приемо-передающих канала с вторичным источником питания и системой управления (рис.1(б)).



(а)



(б)

Рисунок 1.

В техническом задании на ППМ, как правило, задаются требования не менее чем к 15 значениям электрических параметров, которым он должен соответствовать. При серийном выпуске некоторые из них нужно контролировать на всей продукции, некоторые только на одном образце из партии, а некоторые параметры измеряются только на этапе разработки. Основными приборами для метрики ППМ являются векторные анализаторы цепей и измерители мощности. Важными для модулей являются также характеристики спектра выходного сигнала, которые могут быть измерены на анализаторе спектра. В приемном канале ППМ S-диапазона имеются 6-ти разрядные ФВ и АТТ. В общей сложности получается 4096 возможных комбинаций состояний и в каждом из них следует измерить

параметры ППМ. Кроме АЧХ и коэффициента шума МШУ, одним из самых важных параметров является модуляция коэффициента передачи (K_n) при изменении фазы и модуляция фазы при изменении амплитуды. Реальные ФВ и АТТ, как правило, имеют значительные неравномерности в различных состояниях. Из семейства кривых АЧХ рис. 2(а) видно, что изменение K_n в ППМ АФАР S-диапазона во всем частотном диапазоне не превышает 1.2 дБ, а из семейства кривых ФЧХ рис. 2(б) – фазовая ошибка не превышает 17 градусов. Модуль должен функционировать в широком температурном диапазоне ($-55^{\circ}\text{C} \div +85^{\circ}\text{C}$), в таких температурных условиях модуляция амплитуды и фазы может быть еще больше. Необходимо также принять во внимание возможное перераспределение СВЧ энергии в различных состояниях ФВ и АТТ из-за изменяющегося коэффициента отражения и вероятность возникновения стоячих волн.

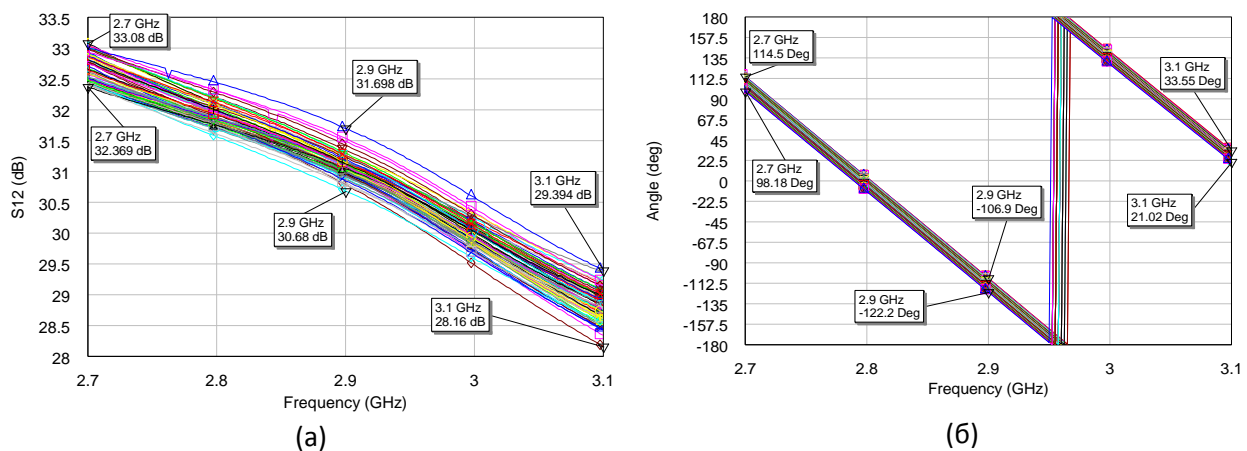


Рисунок 2.

Для того, чтобы решить все эти проблемы, можно применить метод калибровки с помощью современного измерительного оборудования и цифровое управление ППМ. Разработанный ППМ АФАР S-диапазона имеет датчики температуры и систему управления, способную выполнять множество задач и алгоритмов, а также имеется возможность записи данных об ошибке фазы или K_n и ее последующая корректировка.

Суть метода калибровки заключается в том, что с помощью измерительного стенда проводятся измерения характеристик ППМ, находящегося в управляемой камере теплехолода, во всех возможных состояниях ФВ и АТТ и во всем температурном диапазоне с выбранным шагом. Эти данные записываются в память устройства управления, чтобы во время эксплуатации можно было автоматически ввести корректировку по амплитуде и фазе. Возможность создания такого стенда и метода коррекции выяснялась на нашем предприятии, и был получен положительный результат.

При измерениях выходной мощности передающего канала требуется специальное оборудование, способное работать с высоким уровнем мощности – мощные аттенюаторы, направленные ответвители и согласованные нагрузки для снижения уровня сигнала и дальнейшей его обработки. Для проведения измерений требуется тщательно продумать

уровень мощности во всех измерительных блоках, иначе можно вывести из строя дорогостоящее оборудование.

Для настройки передающего тракта требуется контролировать уровень выходной мощности (рис. 3а) и отслеживать режим работы усилителей мощности во всем рабочем частотном диапазоне (рис. 3б).

На рис.3(а) приведены зависимости входной ($P_{вх}$) и выходной мощности ($P_{вых}$) передающего тракта от частоты. Рис.3(б) показывает измерения выходной мощности от входной для 3х частот рабочего диапазона, снятые при настройке модуля С-диапазона.

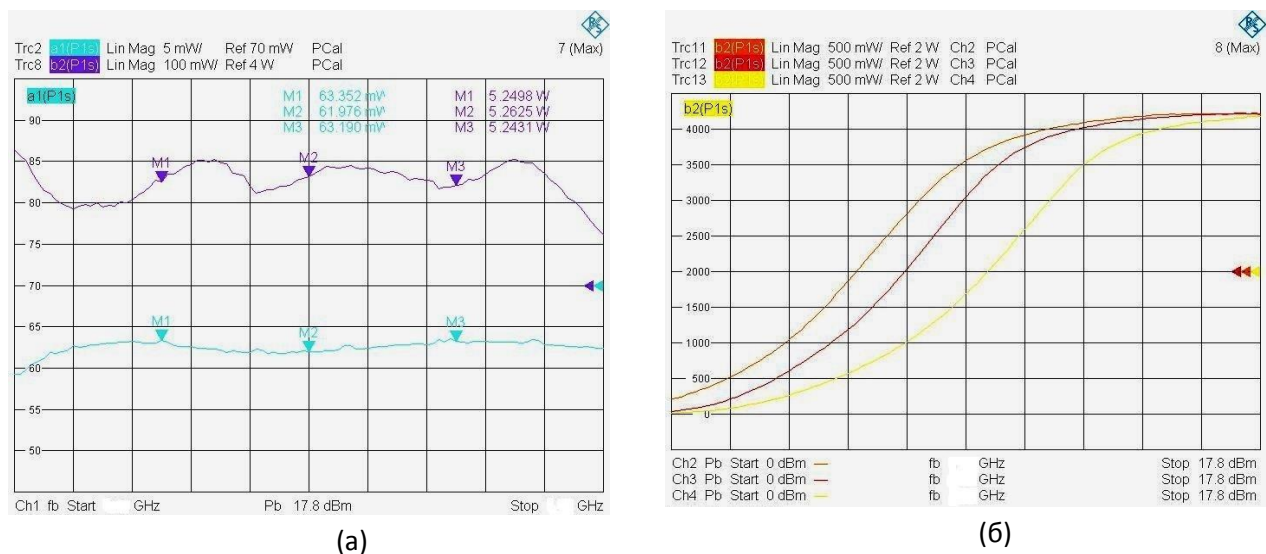


Рисунок 3.

В передающем канале имеется ФВ (на входе тракта). Измерение фазы в импульсном режиме довольно сложная задача, которая была решена синхронизацией измерений векторного анализатора цепей с импульсами передатчика (с его модуляцией). В современных измерителях предусмотрена такая возможность, но есть ограничение по времени измерения, ведь прибор должен успеть провести измерение, обработать его и вывести на экран. На нашем предприятии есть необходимое измерительное оборудование, способное проводить измерение за 1 мкс, а это, как правило, минимальная длительность импульса передатчика.

В техническом задании на ППМ S-диапазона есть требование об уровне спектральной плотности мощности шумов на выходе передающего тракта в паузе между импульсами, когда входной сигнал подавляется на 60 дБ. Он не должен превышать 10^{-20} Вт/Гц. При выборе типа усилителя этот параметр очень важен. Если модулировать питание стока транзистора, то в паузе между импульсами спектральная плотность мощности шумов будет близка к тепловому шуму. Данный параметр был измерен с помощью анализатора спектра. Если на выходе ППМ установить режим короткого замыкания, то весь сигнал из передатчика уйдет в приемник через циркулятор. Анализатор имеет достаточную чувствительность, чтобы измерять сигналы уровня -150 дБм в диапазоне, а 10^{-20} Вт = -170 дБм. Зная

коэффициент усиления приемника (~30 дБ), можно оценить спектральную плотность мощности шумов. В нашем модуле она составила ~-172дБм/Гц.

В РЛС с ФАР мощность передатчика величиной несколько киловатт делится между сотнями элементов, каждый из которых излучает десятки ватт мощности. Современный микроволновый транзисторный усилитель в ППМ может иметь на выходе тоже десятки ватт. В РЛС с АФАР имеется несколько сотен ППМ, создающих в целом излучение в несколько киловатт, также как в РЛС с ФАР.

В то время как мощность излучения ФАР и АФАР приблизительно одинаковы, последние существенно более надежны. Отказ одного элемента АФАР искажает диаграмму направленности антенны, что несколько ухудшает характеристики РЛС, но в целом она остаётся работоспособной. Катастрофического отказа передатчика, который является проблемой РЛС с ФАР, просто не может произойти. Дополнительная выгода — экономия веса передатчика и связанной с ним системой охлаждения и большого блока питания высокого напряжения.

В настоящее время стоимость ППМ АФАР в несколько раз больше ФАР. Для РЛС истребителя, требующей обычно от 1000 до 1800 ППМ, стоимость АФАР становится неприемлемой, если ППМ стоят больше ста долларов каждый. С развитием отечественной полупроводниковой промышленности стоимость модулей АФАР неуклонно уменьшается. Этот факт приводит к выводу, что РЛС с АФАР, в конечном счете, вытеснят РЛС с ФАР.

Список литературы

1. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электронным сканирование луча. – сайнс-пресс, 2002.
2. Вендик О.Г. Фазированная антенная решётка – глаза радиотехнической системы.- Соросовский образовательный ж-л, 1997, №2, с. 115 – 120.