

6. Антипов В. И., Меркулов В. И., Самарин О. Ф., Чернов В. С. Основные направления развития авиационных бортовых РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 10. С. 7–28.
7. Синани А. И., Грибанов А. Н., Позднякова Р. Д., Алексеев О. С., Старшинова Е. И. Математическая модель бортовой ФАР // Сб. докладов. XII Междунар. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь RLNC-2006». Воронеж: 2006. Т. 1. С. 386–389.

Опыт разработки и освоения в производстве приемо-передающих модулей АФАР в L-диапазоне

© Авторы, 2013

С. Н. СЕМЕНИН, И. А. СОКОЛОВ, В. Н. ФУНДА, Д. Ю. СКИЧКО, А. В. БАЦ

- Представлены результаты анализа и экспериментальных исследований четырехканальных приемо-передающих модулей, перспективных для построения АФАР самолетных РЛС.
- Дано описание функциональных и конструктивных особенностей модулей, способов регулировки.

Ключевые слова: АФАР, излучатель, приемо-передающий модуль, коэффициент усиления, коэффициент шума, производство, экспериментальные исследования.

The results of the analysis and experimental studies of four-channel transceiver modules, promising to build the AESA airborne radar system, a description of the functional and structural features of modules, methods of adjustment are given.

Keywords: AESA, emitter, transceiver module, gain, noise factor, production, experimental studies.

Введение

На борту летательных аппаратов имеется значительное число антенн различных радиосистем. Для обеспечения совместной работы различных бортовых радиосистем (радиоэлектронной борьбы (РЭБ), опознавания, РЛС, связи, навигации и пр.) применяются активные фазированные антенные решетки (АФАР). В отличие от пассивной фазированной решетки (ФАР) [1], в которой один передатчик большой мощности питает несколько сотен элементов антенны, в АФАР используется набор приемо-передающих усилительных модулей (МППУ), которые формируют в целом мощностью главный луч радара в несколько киловатт.

Построение совмещенных антенных систем на базе АФАР [2, 3]

- В АФАР, в отличие от ФАР, возможно осуществление широкоугольного сканирования с обзором более полусферы.
- Обеспечивается большая надежность системы, так как при отказе отдельных приемо-передающих модулей в составе АФАР возможно формирование необходимой диаграммы направленности за счет программной регулировки характеристик модулей, сохранивших работоспособность.
- Осуществляется независимая оптимизация характеристик в режиме передачи и приема, а также в помеховой обстановке, благодаря наличию в каждом элементе решетки МППУ с фазовращателем и аттенюатором.

Вместе с тем, проблема построения АФАР самолетных РЛС включает в себя конструктивные трудности, связанные с теплоотводом и размещением МППУ, их соединительной системой возбуждения и линиями управления, насчитывающими большое количество проводников.

Для приемо-передающих усилительных модулей предъявляются не менее сложные требования, чем к самой борто-

вой АФАР в целом. Одним из ключевых требований является минимизация разброса параметров между каналами МППУ и отдельными модулями, так как большой разброс параметров приводит к дополнительным внеполосным и побочным излучениям, а также к «развалу» диаграммы направленности решетки [4]. При сканировании происходит изменение входного сопротивления излучателей, в силу их взаимного влияния, что приводит к изменению нагрузочного сопротивления усилительного модуля, а это накладывает повышенные требования к работе выходного каскада усилителя мощности на рассогласованную нагрузку [5].

Требования к МППУ L-диапазона

Модуль приемо-передающий усилительный (МППУ) предназначен для усиления передаваемых и принимаемых радиоимпульсов в диапазоне частот 1,2...1,6 ГГц. Основная проблема при создании модуля заключается в необходимости реализации четырех высокоэффективных передающих каналов с суммарной выходной пиковой мощностью порядка 1600 Вт на четыре канала при полезном объеме модуля приблизительно 2,5 л. При этом помимо усиления входных радиоимпульсов до требуемого уровня предъявляется не менее важное требование наименьшего искажения (ухудшения) спектральных, временных и шумовых характеристик входных радиоимпульсов.

Основные технические требования к приемному и передающему каналам МППУ приведены в табл. 1, 2 соответственно.

В результате анализа технических требований к передающим каналам было показано, что для улучшения технических характеристик модуля (КПД, коэффициент усиления и устойчивость усилительных каскадов, спектр выходного сигнала в режиме передачи) весь диапазон рабочих частот передачи 1,2...1,6 ГГц необходимо разбить на два относительно узкополосных поддиапазона: 1,2...1,4 ГГц и 1,4...1,6 ГГц.

Таблица 1

| Наименование параметров | Технические требования |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Диапазон частот, ГГц | 1,2...1,6 |
| Коэффициент шума, дБ | не более 3,0 |
| Коэффициент передачи, дБ | 29...37 |
| Неравномерность коэффициента передачи в диапазоне рабочих частот, дБ | не более 2,0 |
| Глубина регулировки коэффициента передачи, дБ | -15,5 |
| Шаг регулировки коэффициента передачи, дБ | 0,5 |
| КСВН входа приемного канала | не более 2 |

Таблица 2

| Наименование параметров | Технические требования | Диапазон рабочих частот |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Выходная импульсная мощность, Вт | 350...490 | 1 |
| | 430...470 | 2 |
| Скол радиоимпульса, дБ | не более 0,3 | 1 |
| | не более 0,6 | 2 |
| Разброс выходной мощности между каналами, дБ | не более 1,0 | 1 |
| | | 1,2 |
| Глубина ступенчатой электронной регулировки уровня выходной мощности, дБ | 3...5 | 1,2 |
| Длительность фронта нарастания радиоимпульса, нс | не более 150 | 1 |
| | | 2 |
| Длительность фронта спада радиоимпульса, нс | не более 150 | 1,2 |
| КСВН по входу передающего канала | не более 1,5 | 1,2 |
| КПД передающего канала, % | не менее 20 | 1,2 |

Примечание: 1—1,2...1,4 ГГц; 2—1,4...1,6 ГГц.

Анализ функциональной схемы модуля

Функционально и конструктивно модуль делится на две части: в одной части расположены первый и второй приемо-передающие каналы, во второй — третий и четвертый. В каждой части расположены контроллер каналов, ячейки входного и выходного коммутатора, четыре усилителя, кросс-платы питания и две ячейки приемных каналов. Функциональная схема двух смежных каналов модуля представлена на рис. 1.

Для построения передающих каналов модуля были разработаны и изготовлены трехкаскадные усилительные паллеты 1267 (рис. 2, а), 1267М (рис. 2, б), 1268 и 1268М на базе биполярных транзисторов фирмы INTEGRA, работающие в диапазонах 1200...1400 МГц и 1400...1600 МГц соответственно.

Для реализации переключения поддиапазонов было использовано высокочастотное электромагнитное реле серии R596 (рис. 3) для поверхностного монтажа фирмы RADIALL. Потери в диапазоне частот 1...2 ГГц не превышают 0,2 дБ при значении КСВН, не более 1,2.

При создании модуля появилась проблема разработки оптимальных емкостных накопителей. При использовании традиционных алюминиевых электролитических конденсаторов габариты накопителей оказываются недопустимо большими. Это связано с тем, что для получения указанных в техническом задании характеристик выходных радиоимпульсов необходима емкость на один канал, не менее 4000 мкФ. Один конденсатор типа HITANO серии EXR (1000 мкФ, 63 В) цилиндрической формы имеет габариты: диаметр 16 мм, длина 31 мм. На один канал необходимо как минимум 4 таких конденсатора, а на весь модуль 16. Так как заданный объем модуля составляет всего 2,5 л, то расположить такое количество конденсаторов внутри этого объема не представляется возможным.

Успешно решить проблему емкостных накопителей позволило применение в модуле герметичных низкопрофильных

танталовых конденсаторов THQ1063402 емкостью 4000 мкФ, разработанных компанией Evans Cap (рис. 4; габариты конденсатора 35,6 × 7,9 мм).

Конструктивное исполнение модуля

Общий конструктив модуля представляет собой двухэтажную симметричную конструкцию с теплопроводными жидкостными каналами. Каждая сторона модуля, в свою очередь, имеет двухслойную конструкцию (нижний слой — передающие каналы, верхний слой — приемные каналы) и плату контроллера с емкостными накопителями.

Самые теплонагруженные усилительные паллеты (поддиапазон частот 1200...1400 МГц, так как длительность импульса составляет $\tau = 50$ мкс при скважности $Q = 10$) располагаются непосредственно над отверстиями канала жидкостного охлаждения.

Ячейки входных коммутаторов включают ферритовый циркулятор, входное реле HF356 фирмы AXICOM — переключатель поддиапазонов по входу, микросхему управляемого напряжением аттенюатора ALM-38140 фирмы AVAGO для программной регулировки выходной мощности передающего канала.

Платы контроллеров обеспечивают управление функциональными узлами модуля и связь с устройством управления модуля. Кроме набора микросхем контроллера на плате располагаются ключевые транзисторы, коммутирующие питание усилительных паллетов и накопительные конденсаторы (по одному на канал).

Устройство управления модуля (УУ) располагается на боковой стенке корпуса вне гермообъема модуля. Подключение ячейки УУ к модулю осуществляется через гермопереходы типа слезка. Линии питания, управления и телеметрии ячейки соединяются с платами контроллеров модуля через два 12-контактных гермоперехода.

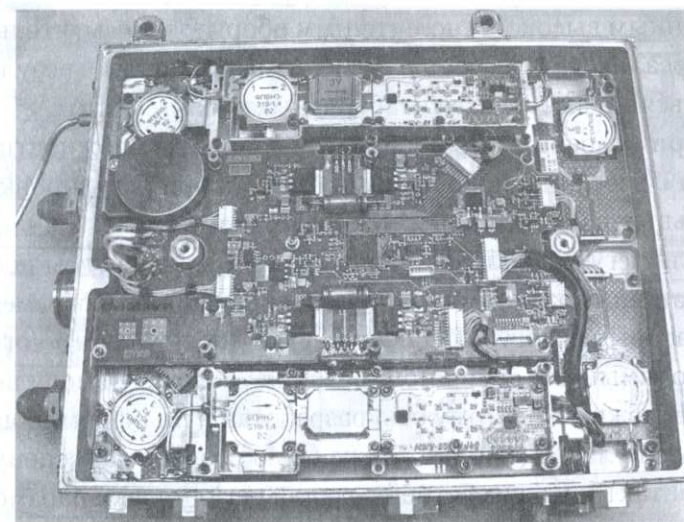


Рис. 5

В состав ячейки приемного канала входят ферритовый вентиль ФПВН 3–319–1,4, защитное устройство, МШУ. Четыре ячейки приемных каналов располагаются в верхнем слое над усилительными паллетами (рис. 5). По требованию заказчика была добавлена пятая ячейка МШУ, расположенная в ячейке управления модулем.

В силу жестких ограничений по уровню шумов приемного канала модуля (не более 3 дБ) и с учетом потерь высокочастотного тракта модуля непосредственно МШУ должен иметь уровень собственных шумов, не более 0,5 дБ. Анализ элементной базы показал, что согласованные по входу и выходу микросхемы с таким низким уровнем шумов в L -диапазоне отсутствуют. Поэтому двухкаскадный МШУ был разработан на основе дискретных GaAs-транзисторов.

Производство

Изготовление составных частей, сборка, регулировка произведены на ОАО «Завод «Компонент», который располагает со-

временным высокотехнологичным оборудованием, что позволило реализовать высокую степень интеграции и в результате добиться заданных массо-габаритных характеристик.

При освоении в производстве основные сложности возникли с работой на больших мощностях при регулировке как отдельных паллет, так и всего модуля в целом.

Для регулировки как паллет, так и блока в целом необходим источник радиоимпульсов заданной формы. Современные генераторы не могут обеспечить уровень выходного сигнала, необходимый для функционирования усилителей модуля в заданном режиме, поэтому был разработан пульт формирования радиоимпульсов (ФРИ). Также было разработано специальное контактирующее устройство для регулировки параметров усилительных паллет.

На рис. 6 приведена схема рабочего места для проверки и настройки ячеек МППУ.

Регулировка параметров усилительных паллет заключается в уменьшении или наращивании площади согласующих полигонов входных и выходных цепей транзисторов усили-

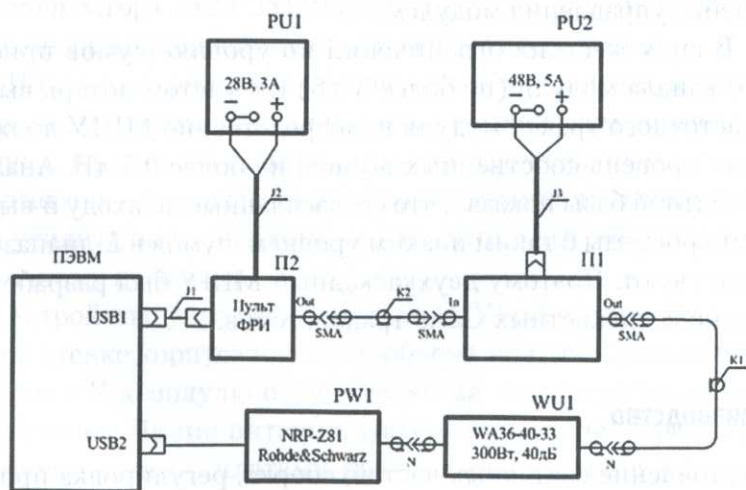


Рис. 6



Рис. 7

тельных каскадов. На рис. 7 показано расположение мест подстройки согласующих цепей ячеек 1268 и 1268М.

Серийный образец МППУ имеет герметичный корпус с отводом для откачки воздуха и закачки сухого азота. Для обеспечения герметизации в корпусе МППУ использовались гермопереходы типа слезка (рис. 8).

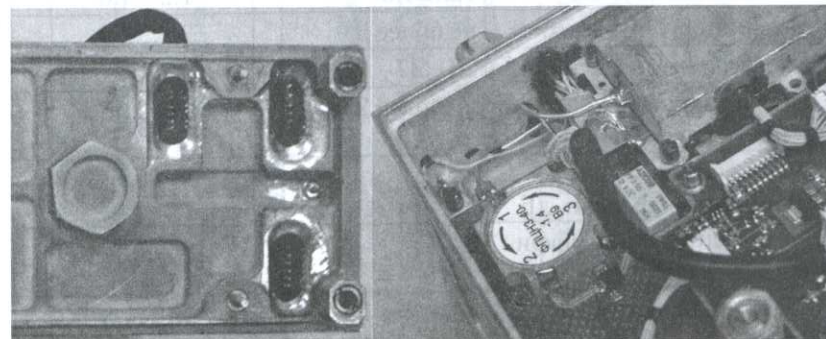


Рис. 8

Результаты экспериментальных исследований

Сравнение заданных и измеренных технических характеристик приемных и передающих каналов МППУ представлено в табл. 3 и 4 соответственно.

В результате анализа технических требований и результатов экспериментальных исследований показано, что разработанные модули полностью удовлетворяют поставленной задаче.

На рис. 9 приведены графики зависимости выходной мощности четырех каналов МППУ в диапазоне частоты 1,2...1,4 ГГц (1 – Канал 1; 2 – Канал 2; 3 – Канал 3; 4 – Канал 4).

Как видно из рис. 9, разброс выходной мощности между каналами не превышает 0,8 дБ, что соответствует заданным требованиям.

На рис. 10 показаны графики зависимости выходной мощности от частоты в диапазоне рабочей температуры (–40 °С...+70 °С). Разброс выходной мощности составляет не

Таблица 3

| Параметры | Технические требования | Измеренные характеристики МППУ в рабочем диапазоне температуры (–40...+70 °С) |
|-----------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Диапазон частот, ГГц | 1,2...1,6 | 1,2...1,6 |
| Коэффициент шума, дБ | не более 3,0 | 2,2...2,9 |
| Коэффициент передачи, дБ | 29...37 | 34...37 |
| Неравномерность коэффициента передачи, дБ | не более 2,0 | 0,6...1,8 |
| Глубина регулировки коэффициента передачи, дБ | –15,5 | –15,5 |
| Шаг регулировки коэффициента передачи, дБ | 0,5 | 0,5 |
| КСВН входа приемного канала | не более 2,0 | 1,1...1,8 |

Таблица 4

| Наименование параметров | Технические требования | Измеренные характеристики МППУ в диапазоне рабочих температур (–40...+70 °С) | Диапазон рабочих частот |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Выходная импульсная мощность, Вт | 350...490 | 360...450 | 1 |
| Скол радиоимпульса, дБ | 430...470 | 430...470 | 2 |
| Разброс выходной мощности между каналами, дБ | не более 0,3 | 0,2...0,3 | 1 |
| | не более 0,6 | 0,3...0,5 | 2 |
| Глубина ступенчатой электронной регулировки уровня выходной мощности, дБ | не более 1,0 | 0,8 | 1 |
| | 3...5 | 0,5 | 1,2 |
| Длительность фронта радиоимпульса, нс | не более 150 | 3...5 | 1,2 |
| | не более 150 | 100...140 | 1 |
| Длительность спада радиоимпульса, нс | не более 150 | 25...100 | 2 |
| | не более 1,5 | не более 30 | 1,2 |
| к.п.д. передающего канала, % | не менее 20 | 1,2...1,5 | 1,2 |
| | | 25...32 | 1,2 |

Примечание: в диапазоне частот 1,2...1,4 ГГц длительность импульса составляет $\tau = 50$ мкс при скважности $Q = 10$; в диапазоне частот 1,4...1,6 ГГц длительность импульса составляет $\tau = 1$ мкс при скважности $Q = 60$.

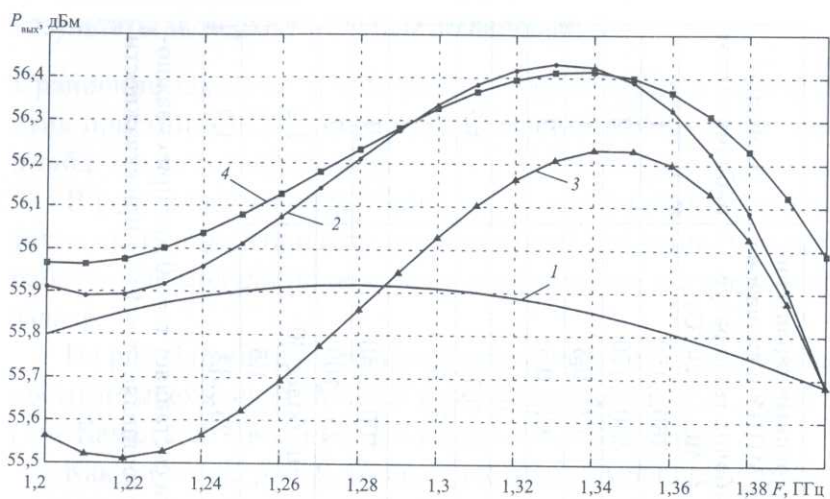


Рис. 9

более 1 дБ, что видно из рис. 10 (1 — +25 °С; 2 — -40 °С; 3 — +70 °С).

Зависимость коэффициента усиления приемных каналов от частоты в диапазоне рабочей температуры (-40...+70 °С) представлена на рис. 11 (1 — +25 °С; 2 — -40 °С; 3 — +70 °С).

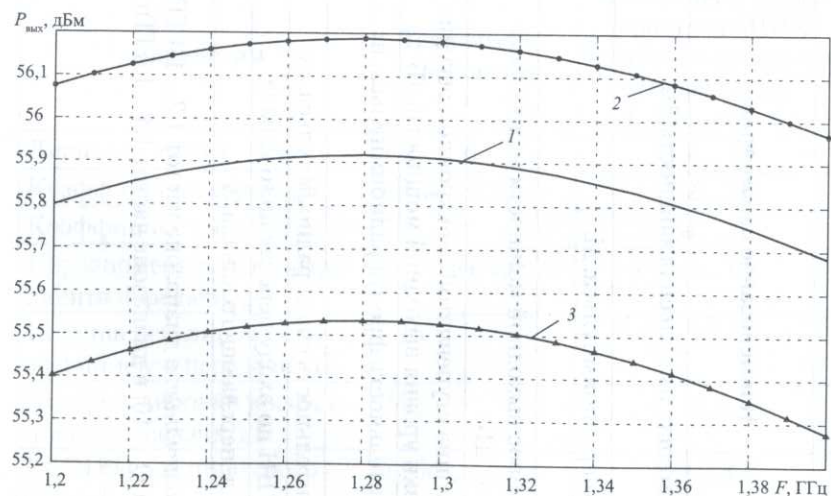


Рис. 10

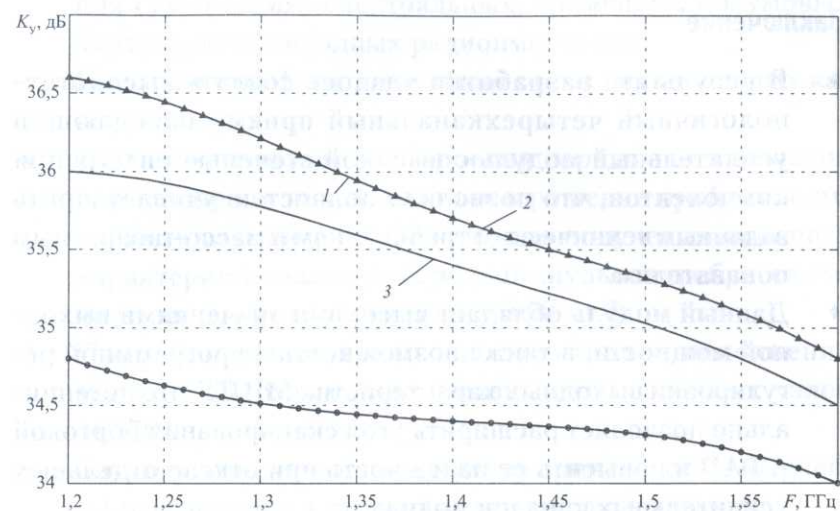


Рис. 11

На рис. 12 представлены графики зависимости коэффициента шума приемных каналов от частоты в диапазоне рабочей температуры (-40...+70 °С) (1 — +25 °С; 2 — -40 °С; 3 — +70 °С).

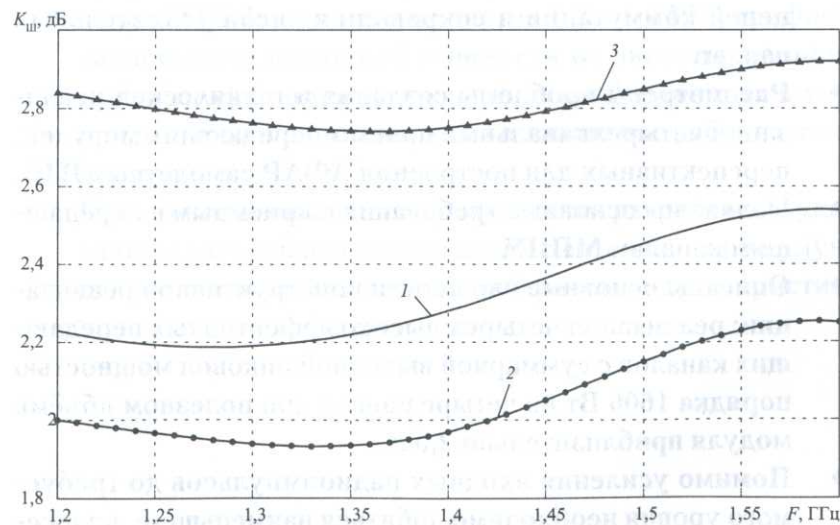


Рис. 12

Заключение

- ♦ В результате разработки удалось создать высокотехнологичный четырехканальный приемо-передающий усилительный модуль с высокой степенью интеграции компонентов, что позволило полностью удовлетворить заданным техническим требованиям и массо-габаритным показателям.
- ♦ Данный модуль обладает высокими значениями выходной мощности, а также возможностью программной регулировки выходных характеристик МППУ, что потенциально позволяет расширить угол сканирования бортовой АФАР и повысить ее надежность при отказе отдельных усилительных каналов модуля.
- ♦ Планируется создать усилительные каскады на базе LD MOS транзисторов, что позволит сохранить приемлемый КПД без деления на поддиапазоны и реализовать усилительный тракт на одном паллете.
- ♦ Переход на LD MOS технологию позволит уменьшить массо-габаритные характеристики за счет исключения цепей коммутации и сокращения числа усилительных паллет.
- ♦ Рассмотрены проблемы создания и технической реализации четырехканальных приемо-передающих модулей, перспективных для построения АФАР самолетных РЛС.
- ♦ Изложены основные требования к приемным и передающим каналам МППУ.
- ♦ Описаны основные сложности конструктивной реализации: реализация четырех высокоэффективных передающих каналов с суммарной выходной пиковой мощностью порядка 1600 Вт на четыре канала при полезном объеме модуля приблизительно 2,5 л.
- ♦ Помимо усиления входных радиоимпульсов до требуемого уровня необходимо добиться наименьшего искаже-

- ния (ухудшения) спектральных, временных и шумовых характеристик входных радиоимпульсов.
- ♦ Представлена функциональная схема двух смежных каналов модуля.
 - ♦ Описана реализация построения передающих каналов, переключения поддиапазонов и решение проблемы емкостных накопителей, так как для получения заданных характеристик выходных радиоимпульсов требуется емкость на один канал, не менее 4000 мкФ.
 - ♦ Подробно рассмотрено конструктивное исполнение модулей. Описан состав и назначение основных узлов МППУ.
 - ♦ Затронуты вопросы, касающиеся производства модулей:
 - а) регулировка и настройка усилительных паллет;
 - б) создание пульта формирования радиоимпульсов и контактирующего устройства;
 - в) герметизация блока.
 - ♦ Приведены сравнительные таблицы заданных и экспериментально полученных технических характеристик, графики зависимости выходной мощности четырех каналов МППУ в диапазоне частот 1,2...1,4 ГГц, графики зависимости выходной мощности от частоты, зависимости коэффициента усиления и коэффициента шума приемных каналов от частоты в диапазоне рабочих температур.
 - ♦ Представлены выводы по результатам разработки с указанием дальнейших направлений деятельности по улучшению технических и массо-габаритных характеристик.

Литература

1. Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В. Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2010.
2. Агеев П.А., Мосейчук Г.Ф., Ломовская Т.А., Балина И.А., Голиков И.В., Синани А.И. Бортовая линейная АФАР дециметрового диапазона // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. М.: Радиотехника, 2011.
3. Балина И.А., Ломовская Т.А., Мосейчук Г.Ф., Синани А.И. Излучающая система, размещенная в отклоняемом носке крыла // Антенны. 2008. № 9 (136). С. 65–69.
4. Семенов Э.А., Посадский В.Н., Бутерин А.В., Пряжников Д.А., Сергеев В.А. Задачи разработки приемо-передающего модуля АФАР бортовых РЛС // II Всероссийская научно-техн. конф. «Проблемы создания перспективной авионики». 2003. С. 55–56.
5. Аржанов С.Н., Баров А.А., Гюнтер В.Я. Проблемы создания приемо-передающих модулей АФАР // II Всероссийская научно-техн. конф. «Проблемы создания перспективной авионики». 2003. С. 56–57.

Ферритовые фазовращатели фар. Состояние технологии и производство

© Автор, 2013

А. И. ФИРСЕНКОВ

- Рассмотрены основные параметры фазовращателей, выпускаемых ОАО «Завод Магнетон».
- Обсуждены некоторые вопросы состояния технологии и производства фазовращателей различных типов.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, ферритовый фазовращатель, параметры фазовращателя, микроволновые ферриты, микроволновая керамика.

The main parameters of ferrites phase shifter, produced by JSC Magnetron are considered. Some questions of technology and production of ferrites phase shifter are discussed

Keywords: phased antenna arrays, ferrites phase shifter, parameters of ferrite phase shifter, microwave ferrites, microwave ceramics.