

Импульсная РЛС S диапазона.

А.А.Баров, В.И.Вальтер, А.Н.Гусев, А.В.Комендатенко, В.М.Коротаев, И.В.Романюк

Аннотация.

В статье приводится пример проектирования приемо-передающего устройства (ППУ) импульсной РЛС S диапазона. ППУ предназначено для использования в системах охраны периметра и других приложениях ближней радиолокации. Разработанное устройство является конструктивно и функционально законченным блоком, который может быть интегрирован в РЛС различного назначения.

Введение.

ППУ осуществляет формирование зондирующего импульса длительностью 50нс с выходной мощностью 3Вт по внешнему тактирующему биту управления. Частота излучения устанавливается программно внутренним синтезатором частот и может быть изменена с помощью внешнего цифрового интерфейса. Приемник построен по супергетеродинной структурной схеме. Частота гетеродина приемника устанавливается внутренним контроллером в линейной зависимости от частоты излучения передатчика. Переключение на прием осуществляется автоматически после излученного импульса. "Мертвое" время составляет не более 150нс. Принятый сигнал на промежуточной частоте усиливается в логарифмическом усилителе и детектируется, т.о. на выходе получается видеосигнал (огibaющая отраженного радиоимпульса) в логарифмическом масштабе. Динамический диапазон составляет не менее 80дБ. Структурная схема ППУ представлена на рис. 1.

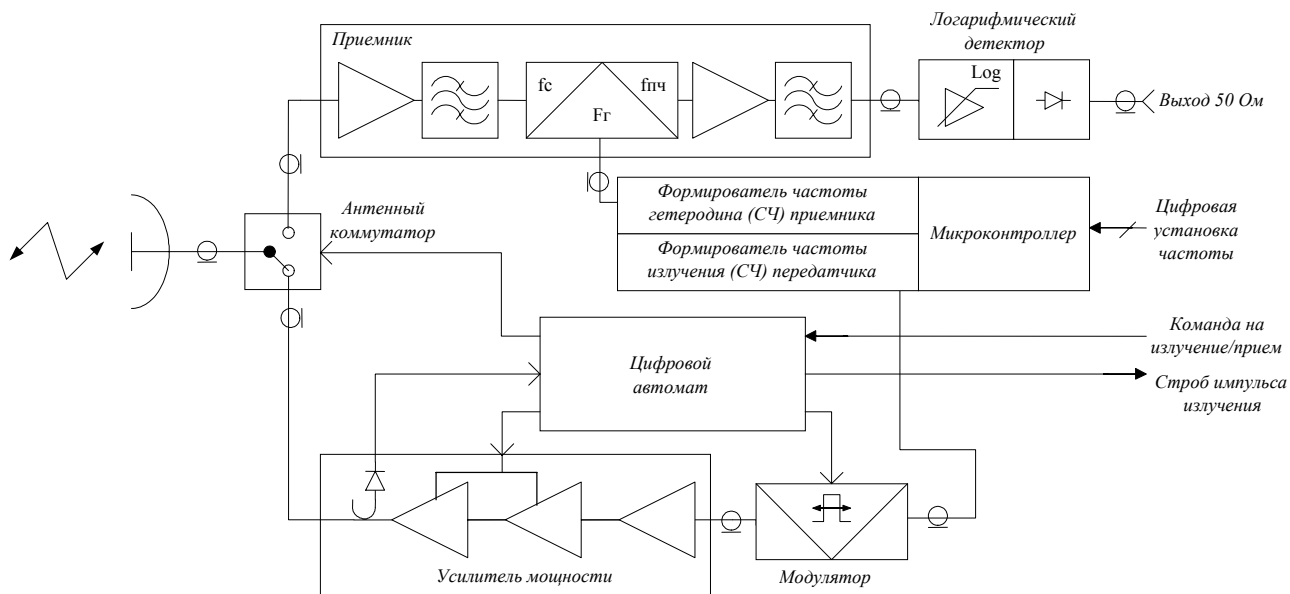


Рисунок 1. Структурная схема ППУ РЛС.

Для уменьшения потребляемой мощности, на время работы приемника, выключаются выходные каскады усилителя передатчика. Полное включение передатчика производится по заднему фронту бита управления за время 250нс, после чего в модуляторе формируется радиоимпульс, он излучается и передатчик выключается. Через 150нс антенный коммутатор

переключается на прием на время до перехода внешнего бита управления в высокое состояние. Временное сопряжение с внешним обрабатывающим устройством может производиться по цифровому импульсу синхронизации, формируемому в ППУ с помощью детектора, расположенного на выходе передатчика, по факту излучения. Временная работа ППУ поясняется на диаграмме рис.2. Все необходимые сигналы управления внутренних блоков ППУ вырабатываются цифровым автоматом построенным на основе ПЛИС.

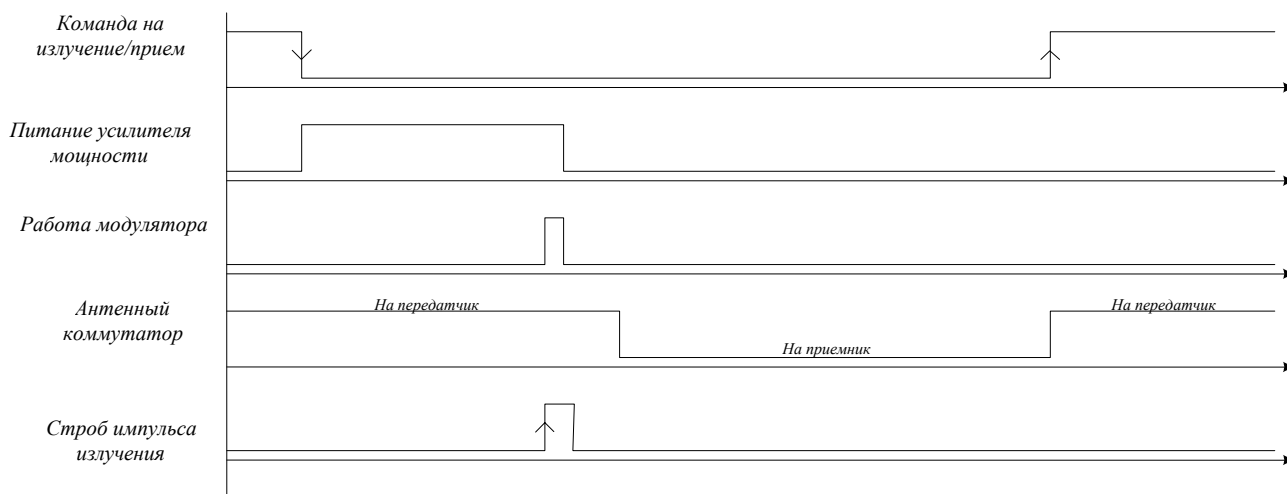


Рисунок 2. Временная диаграмма работы блоков ППУ.

В качестве излучающего элемента используется рупорная коническая антенна. Коэффициент усиления относительно изотропного излучателя составляет более 14дБ, диаграмма направленности порядка 35°.

Конструктивно ППУ выполнено в виде герметичного блока с элементами крепления. Габариты ППУ Ø210×310мм. Масса 3.7кг. Соединение с внешним устройством осуществляется гибким многожильным кабелем.

Технические требования к функциональным узлам ППУ РЛС.

Разработка ППУ начинается с анализа структурной схемы и выработки технических требований к функциональным узлам. На рис.3 приведена структурная схема радиотехнической части ППУ с указанием уровней поступающих сигналов.

Максимальным уровнем сигнала приемника был принят сигнал, отраженный от объекта (с бесконечной ЭПР) находящимся на расстоянии определенным мертвым временем РЛС:

$$P_{вх.нрм.макс} = P_{вых.нрд} + 2G_{ант} - L_{пр} \quad (1)$$

где $P_{вых.нрд}$ = 5дБВт – уровень излучения передатчика; $G_{ант}$ = 15дБ – коэффициент усиления антенны относительно изотропного излучателя; $L_{пр} = 20Lg(4\pi d/\lambda)$ – потери распространения электромагнитной волны в свободном пространстве, λ – рабочая длина волны, d – удвоенное расстояние до объекта.

Минимальный уровень приемника определяется выражением:

$$P_{вх.нрм.мин} = kT + F_{ш.нрм} + (C/Ш)_{вых.мин} + \Delta F \quad (2)$$

где $kT = -144дБВт/МГц$ – тепловая мощность шумов в полосе 1МГц; $F_{ш.нрм}$ = 3дБ – коэффициент шума приемника (включая потери в антенном коммутаторе); $(C/Ш)_{вых.мин}$ – минимально различимое соотношение сигнал/шум на выходе приемника; $\Delta F = 15дБ/МГц$ –

эффективная полоса пропускания приемника (определяется узкополосным фильтром ПЧ) выраженная в дБ относительно 1МГц. Как видно (2) минимально различимый уровень на входе приемника зависит как от параметров самого приемника, так и от аппаратуры обрабатывающей выходной видеосигнал. Допуская, что возможна техническая реализация обрабатывающей аппаратуры с дифференциальной чувствительностью по напряжению 20мВ, а также логарифмического детектирующего усилителя с крутизной преобразования 20мВ/дБ, примем $(C/Ш)_{вых.мин} = 1$ дБ.

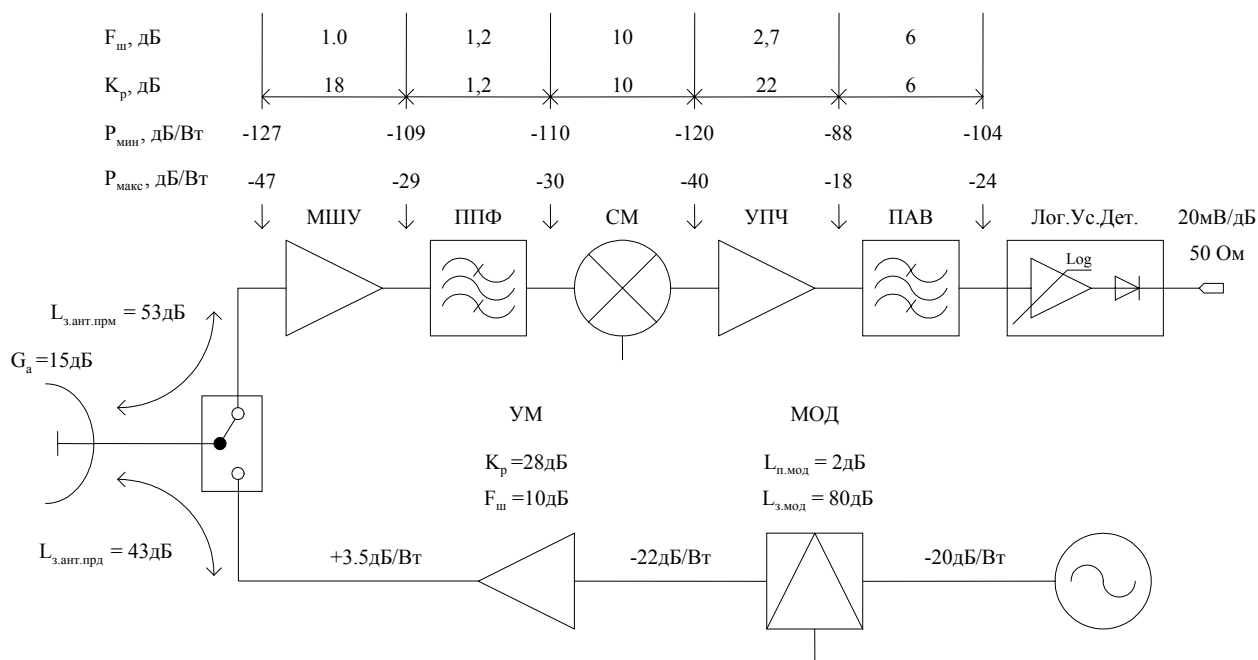


Рисунок 3 - Структура распределения коэффициента усиления в приемнике и диаграмма уровней мощности ППУ.

Распределение коэффициентов усиления в приемнике между функциональными узлами (рис.3) выбирается из компромисса обеспечения линейной работы на большом сигнале и сохранения требуемого коэффициента шума на малом сигнале. За верхнюю границу линейности принят критерий сжатия коэффициента передачи функционального узла на 1дБ.

Основной проблемой в ППУ РЛС является развязка между приемником и передатчиком. Требуемая развязка в антенном коммутаторе между приемником и передатчиком за время работы приемника обусловлена уровнем шума передатчика. Необходимо, чтобы уровень этого шума был ниже чувствительности приемника за время работы РЛС на прием. Отсюда требование к антенному переключателю по величине развязки между антенной и передатчиком должна составлять:

$$L_{з.ант.прд} \geq P_{вх.прм.мин} - P_{ш.прд} = P_{вх.прм.мин} - (kT + F_{ш.прд} + K_p прд + \Delta F) \quad (3)$$

Здесь $F_{ш.прд}$ - коэффициент шума передатчика; $K_p прд$ - коэффициент усиления по мощности передатчика. Все величины выражены в дБ. С другой стороны, обеспечение большой развязки влечет к увеличению вносимых потерь на проход и как следствие снижению эффективности всей системы. Второй причиной недостаточной развязки в выбранной структурной схеме является прямое прохождение на вход приемника частоты задающего генератора СВЧ. Необходимо, чтобы уровень просачиваемой мощности был ниже уровня шума приемника. Это требование выполняет модулятор передатчика. Условие величины необходимого запирающего модулятора можно записать как:

$$L_{з.мод} \geq P_{ген} + K_{р\text{прд}} - L_{ант.прд} - P_{вх.нрм.мин} + (C/Ш)_{вх.мин} \quad (4)$$

Входной каскад приемника выполняется на малошумящем транзисторе, который может быть выведен из строя импульсом излучения собственного передатчика. В данной реализации функцию защиты входа приемника выполняет антенный коммутатор. Если принять за допустимый уровень на входе приемника $P_{вх.нрм.макс}$, то условие вносимого запираания антенным переключателем между антенной и приемником на время работы передатчика:

$$L_{з.ант.нрм} \geq P_{вх.прд} - P_{вх.нрм.макс} \quad (5)$$

В режиме пропускания антенный коммутатор и модулятор должны вносить минимальные потери. Будем считать приемлемым потери на проход не более 1дБ для антенного коммутатора и не более 2дБ для модулятора.

Работа приемника и передатчика осуществляется на одной частоте, поэтому необходимо предусмотреть конструктивные решения, обеспечивающие экранизацию блоков между собой на величину большую, чем требуется от функциональных узлов по запираанию. Эти требования достаточно просто выполняются при построении радио тракта ППУ по модульному принципу с использованием технологии тонкопленочных ГИС.

Приемник.

Структурная схема приемника состоит из малошумящего усилителя (МШУ), фильтра по приему зеркального канала, балансного смесителя, усилителя ПЧ и фильтра промежуточной частоты. Расположение УПЧ перед фильтром обусловлено обеспечением требуемого коэффициента шума приемника, т.к. используемый на основе ПАВ фильтр ПЧ обладает большими вносимыми потерями. МШУ построен по однокаскадной схеме на ПТШ. Условия линейности работы на большом сигнале последующих узлов наложили ограничения на максимально допустимый коэффициент усиления МШУ.

Программная возможность изменения рабочей частоты РЛС накладывают определенные требования на фильтр зеркального канала и выбор промежуточной частоты. Высокая промежуточная частота нежелательна по причине трудности реализации логарифмического усилителя. Низкая промежуточная повышает требования к прямоугольности фильтра зеркального канала. Выбор промежуточной частоты был продиктован доступной стандартной элементной базой логарифмического усилителя и ПАВ фильтра ПЧ. Фирма Analog Devices выпустила в коммерческое использование микросхему AD8310 логарифмического усилителя удовлетворяющего нашим требованиям по быстродействию. Максимальная рабочая частота AD8310 440МГц. Ширина полосы пропускания фильтра промежуточной частоты должна составлять не менее ширины спектра излучаемого радиоимпульса (~30МГц) плюс запас на температурный уход фильтра по частоте. Указанным требованиям отвечает ПАВ фильтр ФПА1-365-35 Омского НИИ приборостроения с центральной частотой 365МГц и полосой 35МГц (прямоугольность по уровню минус 60дБ равна 2.6).

В большинстве случаев перестройка частоты излучения РЛС на ± 100 МГц (в приложении охраны периметра) и подавление зеркального канала не менее 35дБ может быть достаточной. Центральная частота излучения 2860МГц. Для облегчения реализации фильтра зеркального канала принято следующее решение. Спроектирован фильтр в микрополосковом исполнении на пяти четвертьволновых резонаторах по схеме включения "встречных стержней" (рис.4). Габариты поликоровой подложки фильтра 9×12×0.5мм. Такой фильтр обладает полюсом затухания вблизи верхней границы полосы пропускания. Частота гетеродина приемника устанавливается выше частоты излучения на величину ПЧ. Т.о.

обеспечивается подавление приема по зеркальному каналу не менее 35дБ во всей полосе перестройки РЛС.

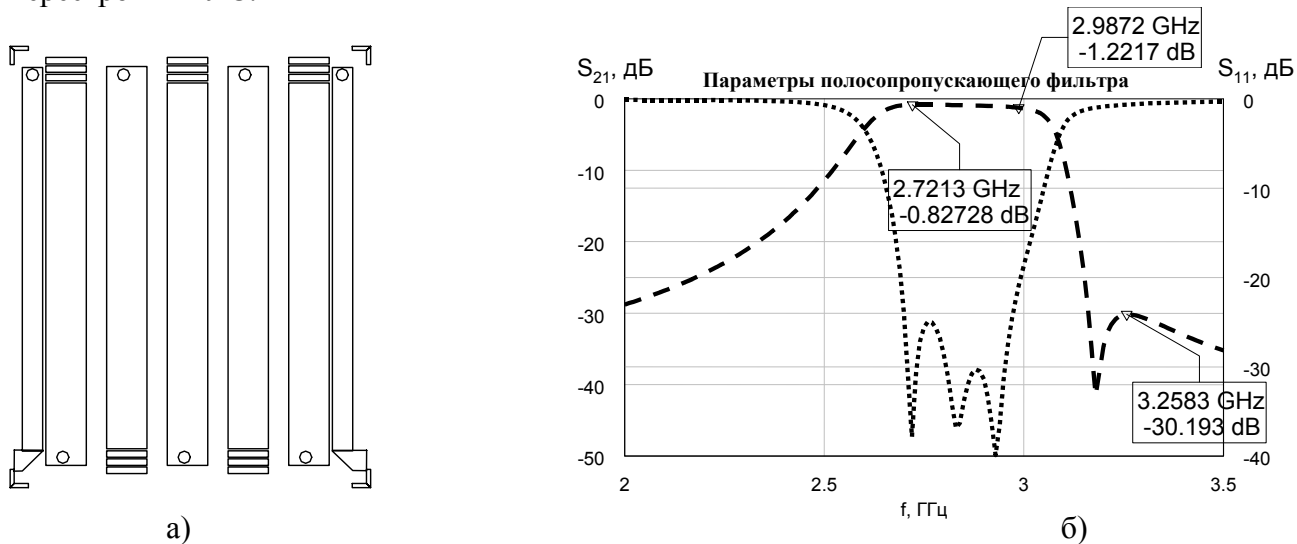


Рисунок 4 - ППФ зеркального канала: а) МПЛ топология фильтра (подложка: 9x12x0.5мм $\epsilon_r=9,6$); б) экспериментальные характеристики.

Смеситель приемника выполнен по балансной схеме на основе квадратурного моста Ланге. Балансная схема обладает достаточной линейностью и хорошим согласованием с фильтром зеркальной частоты [1].

Усилитель ПЧ построен на микросхеме SGA-3463 фирмы Stanford Microdevices. Усилитель ПЧ согласует тракт приемника с логарифмическим усилителем по уровням сигнала.

Приемник выполнен в виде отдельного герметичного модуля с СВЧ разъемами.

Передатчик.

Передатчик РЛС представляет функционально законченный модуль СВЧ усилителя мощности. Усилитель содержит три ступени балансных каскадов на основе ПТШ и выполнен по технологии тонкопленочных ГИС. Для получения заданного уровня мощности в третьей ступени используется параллельное суммирование двух балансных каскадов с помощью квадратурных мостов Ланге.

Особенностью применяемого усилителя является функция отключение потребления тока источника питания в паузах между импульсами излучения. Отключение производится путем запирающего транзисторов, при этом питающее напряжение не снимается. Более подробно с принятыми схемотехническими решениями можно ознакомиться в [2]. Отключение питания выходных каскадов существенно снижает коэффициент передачи по мощности передатчика (более 20дБ). На величину этого изменения можно снизить требования по вносимому запирающему $L_{з. ант. прд}$.

На выходе усилителя мощности находится линейный детектор, который может быть использован для индикации выходной мощности.

Модулятор.

Формирование импульсов радиочастоты длительностью 50нс производится СВЧ выключателем. В качестве коммутируемых элементов используются диоды. Как правило на СВЧ для этих целей применяют р-і-п диоды [3]. В данном случае можно использовать обычные р-п диоды, т.к. величина коммутируемой мощности не велика.

Мощности 10мВт соответствует амплитуда тока в тракте 50Ом равная $I_{амп} = \sqrt{2P/R_0} = \sqrt{2 \times 10 \times 10^{-3} / 50} = 20mA$, т.о. прямое смещение диода постоянным током более 20мА будет оставлять диод в открытом состоянии на протяжении всего периода воздействия СВЧ сигнала. Заметим, что току прямого смещения 20мА в р-п диодах соответствует низкое омическое сопротивление перехода, при этом максимальная амплитуда тока через переход будет составлять 40мА. Используя идеальную модель диода [4] и типовые характеристики диодов, можно показать, что для обеспечения величины запирания в СВЧ коммутаторе более 80дБ потребуется четыре ступеней элементарных ячеек выключателей.

Большую часть времени СВЧ коммутатор находится в выключенном состоянии. С целью уменьшения вероятности проявления паразитных эффектов (излучение, затягивание частоты гетеродина передатчика, возбуждение усилителя мощности), желательно сохранять постоянным нагрузочные сопротивления для подключаемых по СВЧ к коммутатору функциональных узлов. Для этих целей в модуляторе предусмотрены дополнительные цепи, подключающие согласованные нагрузки к коммутируемому тракту на время запирания.

Электрическая схема модулятора приведена на рис.5. Модулятор имеет две цепи управления, сигналы по которым должны подаваться инверсно.

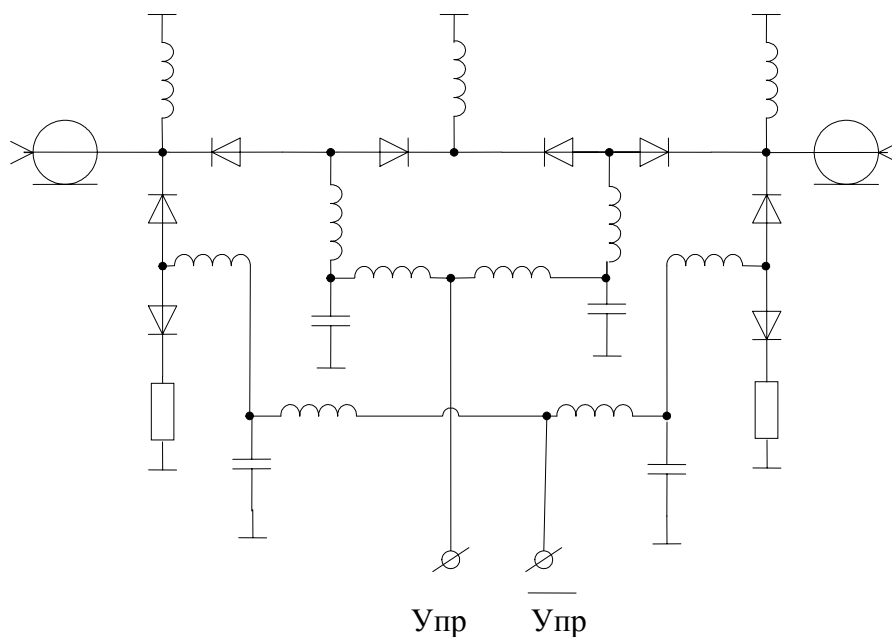


Рисунок 5 - Электрическая схема модулятора СВЧ

Модулятор выполнен по технологии ГИС с использованием безкорпусных р-п диодов (емкость перехода при нулевом смещении $C_0=0.04$ пФ, сопротивление структуры при прямом токе 20мА $R_s=50$ Ом). Большое ослабление в режиме запирания требует тщательности в проработке конструкции. Для исключения волноводного эффекта распространения внутри корпуса, тракт последовательно включенных диодов равномерно распределен в

прямоугольном желобе металлического корпуса, представляющим собой для рабочей частоты заперделный волновод с подавлением более 90дБ. Конструктивно модулятор выполнен в виде функционально законченного СВЧ модуля. Габариты 40×20×10мм. Экспериментальные испытания показали, что вносимые потери составляют менее 1дБ, потери запираения более 82дБ.

Антенный коммутатор.

Структура антенного коммутатора представляет собой двухпозиционный СВЧ выключатель. При схемотехническом проектировании требования по вносимым потерям в режиме пропускания оказываются первостепенными. Из коммутационных СВЧ элементов меньшими вносимыми потерями обладают р-і-п диоды [4]. Электрическая схема антенного коммутатора приведена на рис.6.

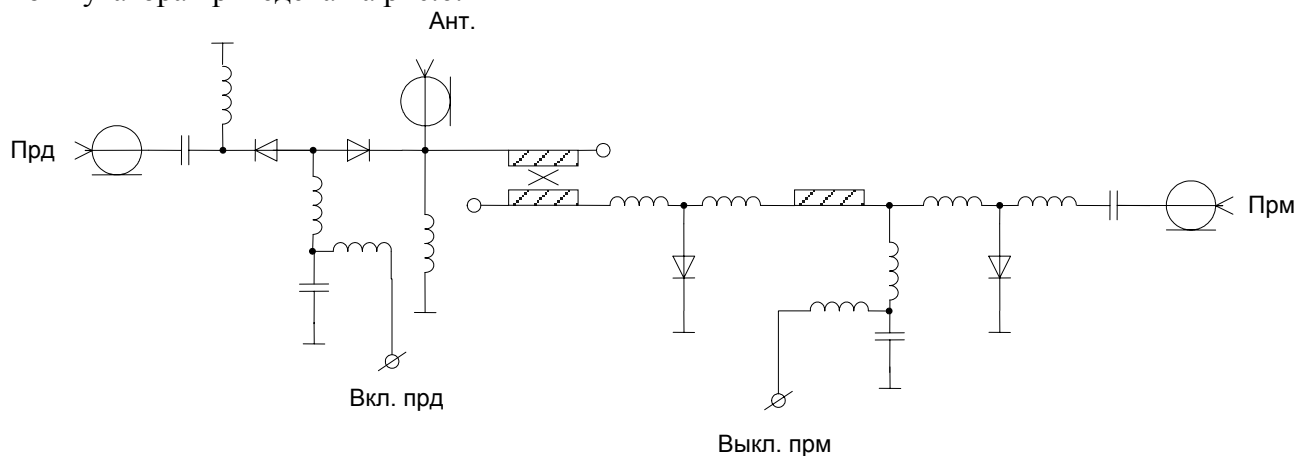


Рисунок 6 - Электрическая схема антенного коммутатора

Управление коммутатором производится по двум линиям. Включение тракта передатчик-антенна производится прямым током 30мА. Выключение тракта антенна-приемник производится также прямым током 30мА. Разделение линий управления сделано намеренно по следующим соображениям: во-первых, для переключения диодов можно использовать две маломощные схемы управления; во-вторых, на диоды ключа передатчика для надежного запираения со своей схемы управления можно подавать большее запирающее напряжение; в-третьих, независимость управления цепи передатчика и приемника.

Особенностью схемотехнического решения является использование четвертьволнового конденсатора в антенной цепи ключа приемника и двух встречно-последовательно включенных диодов в цепи передатчика.

Антенный коммутатор выполнен в виде функционально законченного СВЧ модуля по ГИС технологии с использованием бескорпусных переключающих р-і-п диодов ($C_{j0}=0.2\text{пФ}$, $R_s=20\text{Ом}$ при $I_d=10\text{мА}$, $U_{обр.пр}=50\text{В}$, $\tau=7\text{нс}$). Экспериментальные испытания показали потери на проход менее 1дБ. Запирание в тракте передатчика не менее 32дБ, в тракте приемника не менее 50дБ. Габариты 40×20×10мм.

Формирователи частоты

В ППУ используются формирователи частоты задающего генератора и гетеродина приемника. Формирователи построены на основе ИС синтезаторов частот. Управление

синтезаторами осуществляется внутренним микроконтроллером (МС) по цифровой шине. Конструктивно формирователи частоты и МС выполнены в одном блоке.

МС блока формирователя частоты выполняет следующие функции:

- Взаимодействие с внешним управляющим устройством;
- Хранение данных частоты излучения передатчика;
- Вычисление и хранение данных частоты гетеродина приемника;
- Загрузка данных в синтезаторы частот при включении питания;
- Слежение за захватом частоты синтезатором (в случае срыва частоты МС перегружает данные в синтезаторе частот).

Цифровой автомат.

Последовательность работы всех функциональных узлов ППУ РЛС циклична и жестко определена. В зависимости от приложения ППУ алгоритм его работы может быть изменен. Представляется разумным для синхронизации работы узлов ППУ использовать цифровой автомат. Гибкость применения ППУ достигается за счет возможности программирования и перепрограммирования цифрового автомата в лабораторных условиях.

Цифровой автомат выполнен на основе ПЛИС и имеет свой внутренний тактовый генератор. При включении питания автомат переводит все функциональные узлы в ждущий режим до поступления сигнала от внешнего управляющего устройства.

Сопряжение аналогового сигнала управления коммутационных компонентов СВЧ с цифровым сигналом ПЛИС производится в цифро-аналоговых модуляторах собранных на дискретных элементах. Модулятор (рис.7) формирует требуемое значение тока прямого смещения СВЧ диодов и ускоряющий импульс запирающего напряжения для уменьшения времени переключения.

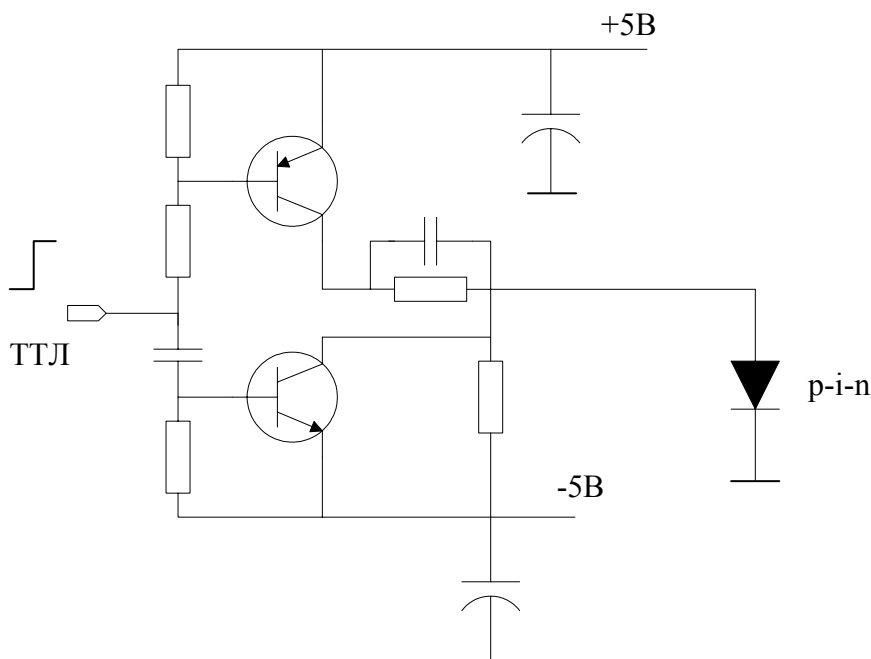


Рисунок 7 - Электрическая схема цифрово-аналогового модулятора p-i-n диодного СВЧ коммутатора.

Заключение.

Результатом проведенных работ были разработаны образцы ППУ РЛС. Основные характеристики ППУ сведены в таблицу.

Параметр	Номинал	Примечание
Мощность излучения, Вт	3	
Частота излучения, МГц	2860±100	Программно, шаг 1МГц
Длительность импульса, нс	50	
Частота повторения импульсов, кГц	10 ÷ 100	Внешнее управление
Чувствительность приемника, дБ/Вт	-126	(С/Ш) _{вых} >1дБ
Динамический диапазон, дБ	80	
Мертвое время, нс	150	
Выходной сигнал	Видео, логарифм	R _n =50Ом, 20мВ/дБ
Питание	+12В/0.7А, +8В/0.7А, -8В/0.11А	

В рамках статьи мы постарались показать взаимосвязь параметров функциональных узлов ППУ, особенности и обоснование принятых технических решений, а также взаимосвязь радиотехнических узлов с цифровыми схемами управления и контроля.

Литература

1. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи./Л.Г. Гассанов, А.А.Липатов, В.В.Марков, Н.А.Могильченко. – М.: Радио и связь, 1988. –288с.: ил.
2. Передающий тракт ППМ АФАР. Коротаев В.М., Комендатенко А.В., Игнатьев М.Г., Силютин А.И. Труды 2-ой Всероссийской научно-технической конференции по проблемам создания перспективной авионики. –Томск, 2003.
3. Автоматические устройства СВЧ: Справочник/ В.Т. Царенко, В.В.Имшенецкий, М.М. Борисов – К.: Техника, 1983. –152с., ил. – Библиогр.: с.149-151.
4. Вайсблад А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. - М.: Радио и связь, 1987. –120с.: ил. –(Массовая библиотека инженера "Электроника").