

УДК 621.396.61:621.396.43

## РАЗРАБОТКА ПЕРЕДАТЧИКА РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ КУ-ДИАПАЗОНА С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ QAM-16

Д.О. ИГНАТЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: dimai2o@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены особенности построения передатчиков СВЧ-диапазона для радиорелейных линий связи. Выполнен анализ гетеродинной схемы и схемы прямого преобразования, обоснован выбор гетеродинной структуры. Предложена структурная схема передатчика на диапазон частот 14,4–15,35 ГГц с выходной мощностью 25 Вт и использованием квадратурной амплитудной модуляции QAM-16. Разработана функциональная схема, включающая квадратурный модулятор LTC5589 ( $f=4$  ГГц), синтезатор частоты ECC15K ( $f=10,4-11,35$  ГГц), балансный смеситель SIM-24MH+, усилительные каскады на модулях AVA-24A+ и MAPW-060180. Выполнен расчет КПД передатчика, составивший 13,3 %.

### Введение

Радиорелейные линии связи (РРЛ) остаются востребованным решением для организации магистральных и локальных каналов передачи данных, особенно в условиях отсутствия волоконно-оптической инфраструктуры. Ключевым элементом РРЛ является передатчик, от характеристик которого зависит дальность, помехоустойчивость и спектральная эффективность связи. Современные требования к скорости передачи данных и энергопотреблению диктуют необходимость использования сложных видов модуляции (QAM) и высокостабильных синтезаторов частоты. В работе рассматривается проектирование передатчика Ку-диапазона с выходной мощностью 25 Вт и модуляцией QAM-16.

### Анализ структурных схем передатчиков

Для построения передатчиков СВЧ-диапазона применяют два основных подхода: прямое преобразование (Zero-IF) и гетеродинная (супергетеродинная) схема (рис. 1). В передатчике прямого преобразования модуляция осуществляется непосредственно на рабочей частоте, что упрощает схему, но требует высокой подавления составляющей гетеродина [1]. В гетеродинном передатчике формирование сигнала происходит на промежуточной частоте (ПЧ) с последующим переносом спектра вверх с помощью смесителя и синтезатора частоты. Это позволяет снизить требования к фильтрации и обеспечить лучшую спектральную чистоту.

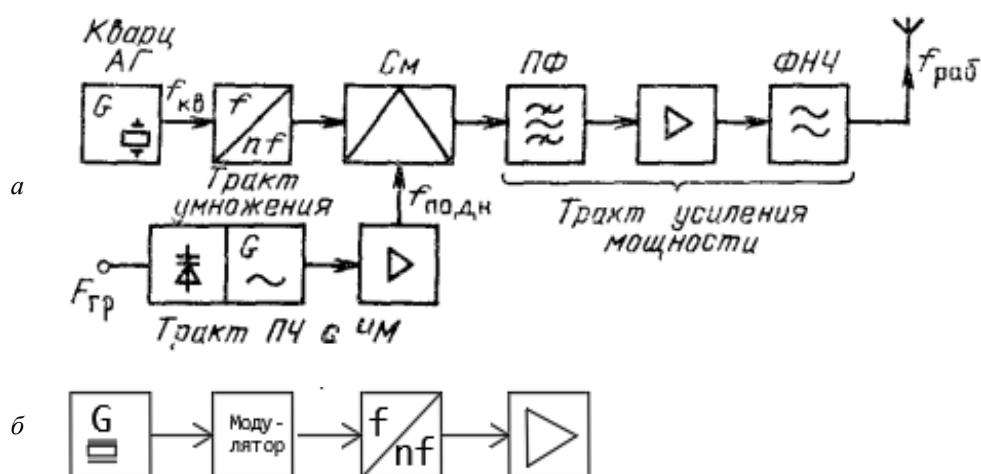


Рис. 1. Два основных подхода передатчиков СВЧ-диапазона а - схема гетеродинного передатчика б - схема передатчика прямого преобразования

Основные требования к проектируемому передатчику: диапазон рабочих частот 14,4...15,35 ГГц, выходная мощность 25 Вт (44 дБм), вид модуляции QAM-16, относительная нестабильность частоты не хуже  $1 \cdot 10^{-6}$ . Выбрана гетеродинная схема с промежуточной частотой 4 ГГц, формируемой квадратурным модулятором.

### Выбор структурной и разработка функциональной схемы передатчика

#### Выбор схемы передатчика

При расчетах тактов передатчиков и в справочной литературе часто используются коэффициенты усиления в дБ и мощность в дБм. При разработке структурной схемы применим формулы перевода (и онлайн сервис пересчета) [2]

Перевод осуществляется по следующим формулам:

1 дБм соответствует 1 мВт.

$$P(\text{дБм}) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) \text{ где } P_0 = 1\text{мВт}, \quad (1)$$

тогда в милливатах:

$$P = 10^{\frac{\text{дБм}}{10}}.$$

Службы ФСС обслуживают многоканальные системы связи с сигналами ИКМ

Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) широко используется в системах передачи данных для преобразования аналоговых сообщений (например, речи) в последовательный поток нулей и единиц. Процесс преобразования называется кодированием (encoding), и в простейшем случае состоит из следующих операций:

- равномерная во времени дискретизация аналогового сигнала с помощью устройства выборки и хранения
- сравнение каждого отсчета с набором опорных напряжений – уровнями квантования
- нахождение уровня квантования, наиболее близкого к уровню дискретизированного сигнала
- формирование двоичного числа, соответствующего найденному уровню квантования
- вывод двоичного числа в последовательном формате (бит за битом)
- повторение приведенных выше шагов для следующего отсчета и т.д.

Схема получения группового ИКМ сигнала показана на рисунке 2.

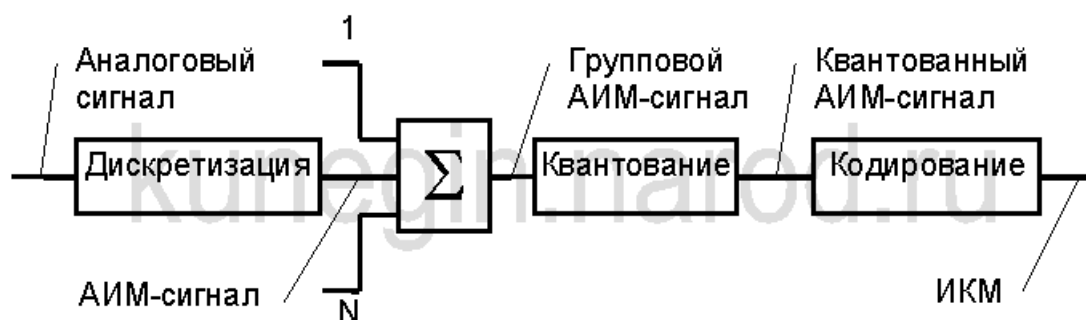


Рис. 2. Схема получения группового ИКМ сигнала

Особенность сигналов QAM — это возможность увеличивать количество сигнальных точек в обмен на помехоустойчивость. В результате в одной и той же полосе сигналов есть возможность увеличивать скорость передачи цифровой информации. Ограничение на увеличение пропускной способности канала накладывает только сложность реализации аппаратуры телекоммуникационных устройств. Для получения сигнала QAM-16 применим квадратурный модулятор рисунок 3.

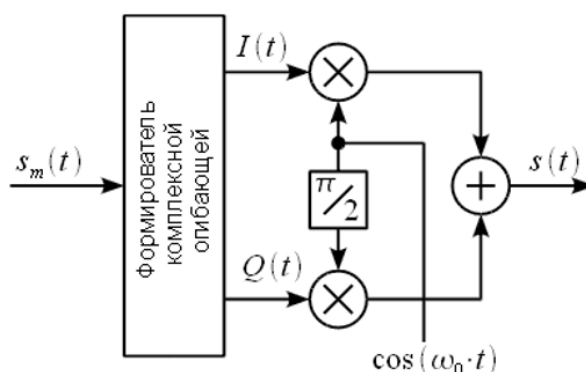


Рис. 3. Квадратурный модулятор сигнала QAM-16

Формирование комплексной огибающей, формирование ИКМ сигналов делегируем высокоскоростному микроконтроллеру с интерфейсом ЦАП.

Применим STM32F417 с 12 битным ЦАП.

Примененный микроконтроллер имеет ядро Cortex-M4F, процессор криптографии, контроллер цифровой видекамеры, порты Ethernet и USB FS/HS OTG, два порта CAN.

Ядро Cortex-M4F включает блок арифметики с плавающей точкой (FPU), блок защиты памяти (MPU), обеспечивает выполнение набора DSP-команд.

В микроконтроллере процессор и внутренняя память программ работают без тактов ожидания на всех частотах, вплоть до максимальной.

Это достигнуто за счет введения специального блока ART Accelerator™. На максимальной тактовой частоте 168 МГц быстродействие центрального процессора составляет 210 DMIPS.

FSMC-контроллер микроконтроллера STM32F417ZGT6 позволяет работать с оперативной памятью SRAM и PSRAM, flash-памятью NOR, NAND, Compact Flash и LCD 8080/6800.

Быстродействие трех 12-разрядных АЦП - 2,4 MSPS (7,2MSPS при групповой работе), имеется 12-разрядный ЦАП. Коэффициент энергопотребления равен 230 мкА/МГц.

Для получения QAM-16 сигнала требуются модулятор и генератор сигнала в соответствующем диапазоне частот. Поскольку серийные модуляторы имеют выходную частоту не выше 6 ГГц, применим схему с преобразованием частоты вверх. После модулятора спроектируем тракт промежуточной частоты с fпч, соответствующей выходному частотному диапазону модулятора. Применим Квадратурный модулятор LTC5589 [3].

LTC5589 — малопотребляющий I/Q модулятор с диапазоном рабочих частот от 700 МГц до 6 ГГц, специально разработан для высокопроизводительных широкополосных передатчиков с аккумуляторным питанием. Рабочее напряжение LTC5589 находится в диапазоне от 2,7В до 3,6В, а потребление составляет всего 29,5 мА, что на 50% меньше, по сравнению с конкурирующими решениями.

Новый модулятор обеспечивает подавление боковой полосы -50 дБн при типовой утечке несущей -43 дБм. Через SPI эти параметры улучшаются до -60 дБн и -60 дБм соответственно. Уровень собственных шумов составляет -158,8 дБм/Гц. LTC5589 поддерживает узкополосную и широкополосную передачу. Ширина полосы модулирующих частот достигает 92 МГц (неравномерность ±1 дБ), что обеспечивает полосу 184 МГц на частоте 1,8 ГГц. Технические параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические параметры LTC5589

| Наименование                                 | Значение   |
|--|------------|
| Выходная мощность сигнала на 4 ГГц, дБм      | -8,7       |
| Коэффициент передачи при PLO=0, дБ           | -12,7      |
| Максимальный ток потребления, мА             | 40         |
| Напряжение питания, В                        | 3,3        |
| Диапазон частот выходного сигнала, МГц       | 700...6000 |
| Входная мощность сигнала fLO= 4 ГГц, дБм     | -10...6    |
| Диапазон частот входного сигнала, МГц        | 0,05...600 |
| Подавление побочных составляющих, дБ         | 34,5 мин   |
| Диапазон мощностей задающего генератора, дБм | 0...20     |

И соответственно задающий генератор на частоту 4 ГГц SFS4000C-LF с параметрами. И назначением выводов рисунок 4.

| Performance Specifications            | Min  | Typ      | Max  | Units  |
|---------------------------------------|------|----------|------|--------|
| Frequency                             | 4000 |          | 4000 | MHz    |
| Phase Noise @ 10 kHz offset (1 Hz BW) |      | -102     |      | dBc/Hz |
| Harmonic Suppression (2nd)            |      | -12      |      | dBc    |
| Spurious Suppression                  |      | -65      |      | dBc    |
| Power Output                          | -3   | 0        | 3    | dBm    |
| Load Impedance                        |      | 50       |      | Ω      |
| Settling Time                         |      | 2        |      | mS     |
| Operating Temperature Range           | -40  |          | 85   | °C     |
| Package Style                         |      | PLL-V12C |      |        |

| Power Supply Requirements        | Min | Typ | Max | Units |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-------|
| Supply Voltage 1: PLL (Vcc, nom) |     | 3.3 |     | Vdc   |
| Supply Voltage 2: VCO (Vcc, nom) |     | 5   |     | Vdc   |
| Supply Current 1: PLL (Icc, typ) |     | 11  |     | mA    |
| Supply Current 2: VCO (Icc, typ) |     | 32  |     | mA    |

| Reference Oscillator Signal | Min | Typ  | Max | Units  |
|-----------------------------|-----|------|-----|--------|
| Frequency                   |     | 100  |     | MHz    |
| Phase Noise @1 kHz Offset   |     | -145 |     | dBc/Hz |

| SFS PIN CONFIGURATION |            |
|-----------------------|------------|
| 1                     | Vcc (VCO)  |
| 3                     | RF OUT     |
| 5                     | MUX OUT    |
| 6                     | Vcc (CHIP) |
| 8                     | N/C        |
| 10                    | REF IN     |
| REST                  | GROUND     |

| PVA PIN CONFIGURATION |            |
|-----------------------|------------|
| 1                     | Vcc (VCO)  |
| 3                     | RF OUT     |
| 5                     | MUX OUT    |
| 6                     | Vcc (CHIP) |
| 7                     | CLOCK      |
| 8                     | DATA       |
| 9                     | ENABLE     |
| 10                    | REF IN     |
| REST                  | GROUND     |

Рис. 4. Назначение выводов модуля SFS4000C-LF

### Синтезатор частот и смеситель

Для устойчивой работы модулятора применим усилитель сигнала задающего генератора что позволит получить на входе LO модулятора мощность.

$$P_{LO\ in} = P_{G1} + K_{yG} = -3 \dots 3 + 8 \dots 10 = 5 \dots 13 \text{ дБм.} \quad (2)$$

Для получения сигнала выходной частоты передатчика в диапазоне 14,4..15,35 ГГц применим синтезатор частоты ECC15K и балансный смеситель SIM-24MH+[4].

Синтезатор частот ECC15K [5]:

- коаксиальный выход в тракте 3,5 мм без фильтрации гармоник;
- программируемый двунаправленный коаксиальный порт опорного источника в тракте MCX для подачи или снятия сигнала опорной частоты;
- встроенный микроконтроллер с поддержкой;
- интерфейсов USB и SPI и выделенными линиями;
- цифровой синхронизации.

Уникальный ультракомпактный, экономичный, встраиваемый сверхширокополосный синтезатор частот с высокой фазовой стабильностью и разрешением по частоте.

ECC15K обладает уникальной совокупностью электрических и механических характеристик, превосходя все существующие аналоги по размерам, массе и энергопотреблению при сравнимом или лучшем качестве спектра.

ECC15K идеально подходит для встраивания в сложные системы, где предъявляются повышенные требования к энергопотреблению и габаритам узлов (SWaP). При этом ECC15K является безусловной альтернативой существующим на рынке решениям, так как обладает выдающимися электрическими характеристиками, достигаемыми другими производителями только с помощью дорогих и сложных систем синтеза частоты с изощренными техническими решениями.

В ECC15K использованы новые и уникальные технические решения, защищенные патентами, позволяющие по-новому взглянуть на синтез частот. В частности, использован нестандартный подход к ФАПЧ в виде «автосмещающейся» петли (по аналогии с традиционными маломощными офсетными схемами), исключая применение дорогого и «прожорливого» DDS. Накопленный опыт в термостатированных кварцевых генераторах MOXO-100 позволил реализовать компактный, экономичный и, одновременно, ультрамаломощный внутренний опорный источник. ECC15K обладает оптимальным набором функций для встраивания в систему:

- коаксиальный выход в тракте 3,5 мм без фильтрации гармоник;
- программируемый двунаправленный коаксиальный порт опорного источника в тракте MCX для подачи или снятия сигнала опорной частоты;
- встроенный микроконтроллер с поддержкой интерфейсов USB и SPI и выделенными линиями цифровой синхронизации.

**«ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2026»**

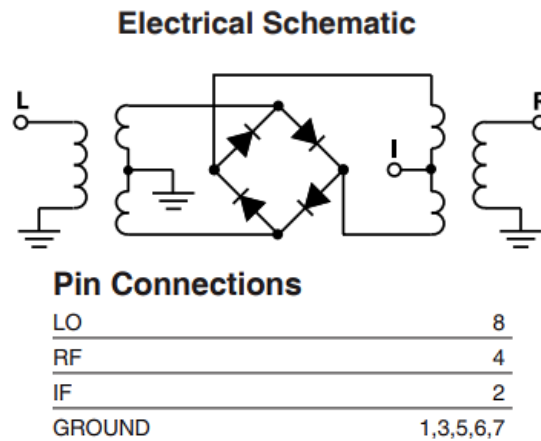
*Международная научно-техническая конференция, 9-10 июня 2026 г., Минск, Республика Беларусь*

Параметры показаны в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры ЕСС15К

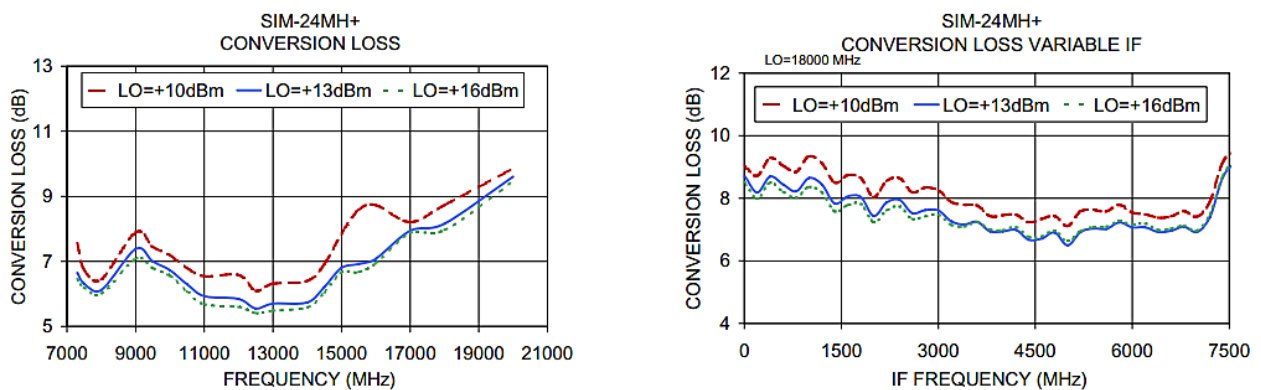
| Параметр  | Значение                    |
|---|-----------------------------|
| Выходная частота, МГц   | 10...15000                  |
| Шаг перестройки частоты, Гц   | 0,005                       |
| Мощность сигнала, дБм, не менее   | 5                           |
| Уровень гармоник, дБн, не более   | -10                         |
| Уровень субгармонических составляющих, дБн, не более  | -50                         |
| Уровень негармонических составляющих, дБн, не более   | -50                         |
| Относительная погрешность установки частоты, 10 <sup>-7</sup>   | 5                           |
| Относительный диапазон захвата внешней опорной частоты, 10 <sup>-6</sup>                                  | ± 1                         |
| Частота внешнего опорного генератора, МГц   | 1...100 с шагом 1           |
| Мощность внешнего опорного генератора, дБм  | 0...10                      |
| Выход внутреннего опорного генератора, МГц  | 1, 5, 10, 25, 50            |
| Мощность сигнала опорного генератора, дБм, не менее   | -6                          |
| Напряжение питания, с вентилятором / без вентилятора, В   | 5...5,5 / 5...8             |
| Потребляемая мощность, Вт   | 5,5                         |
| Скорость передачи данных по SPI, Мбит/с, не менее   | 10                          |
| Уровень СПМ ФШ на частоте 10 ГГц, дБн/Гц на отстройке:  |                             |
| 100 Гц  | -90                         |
| 1 кГц   | -115                        |
| 10 кГц  | -125                        |
| 100 кГц   | -125                        |
| 1 МГц   | -120                        |
| Сопротивление порта опорного генератора, Ом   | 50                          |
| Относительное изменение частоты за счет старения, 10 <sup>-7</sup> в год после 30 дней непрерывной работы | ± 5                         |
| Логические уровни цифровых сигналов «0»/«1», В  | 0/3,3                       |
| Система команд управления USB и SPI   | SCPI                        |
| Время готовности без учета прогрева опорного генератора, с  | 6                           |
| Типы соединителей: выходы СВЧ входы/выходы питания, управления и контроля                                 | 3,5 мм, розетка IDC2-10     |
| вход/выход опорного генератора  | MCX, розетка                |
| Диапазон рабочих температур, с вентилятором / с контактным охлаждением, °С                                | -10...+70 / -40...+70       |
| Температура хранения, °С  | -40...+80                   |
| Влажность воздуха, %, не более  | 90 без конденсации          |
| Атмосферное давление, мм рт. ст.  | 350...1000                  |
| Вибрация в диапазоне частот 20...500 Гц, g  | 30                          |
| Удары (полусинус 10 мс), g  | 30                          |
| Средняя наработка на отказ, с вентилятором / с контактным охлаждением, ч                                  | 8000 / 20000                |
| Габаритные размеры, с вентилятором / с контактным охлаждением, мм   | 58 × 53 × 25 / 58 × 53 × 16 |
| Масса, г, не более  | 95                          |

Электрическая схема и назначение выводов SIM-24MH+ показаны на рисунке 5.



**Рис. 5.** Электрическая схема и назначение выводов SIM-24MH+

Параметры SIM-24MH+ на рабочих частотах показаны на рисунке 6.

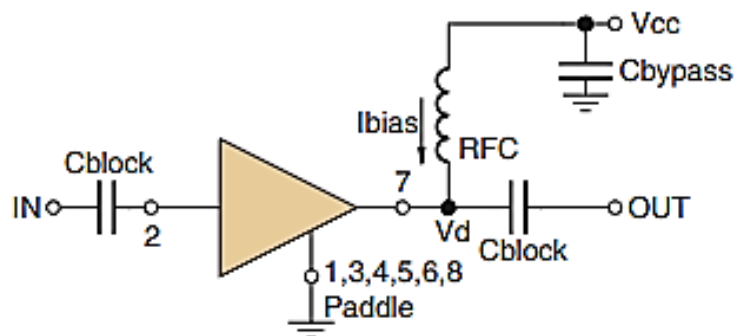


**Рис. 6.** Параметры SIM-24MH+ на рабочих частотах

Усилитель сигналов частот 4 ГГц (задающего генератора модулятора) СМА-81+ с параметрами:

- напряжение питания 5В;
- коэффициент усиления на частоте 4 ГГц  $K_u=8...10$  дБ.

Потребляемый ток при питании 5 В -160 мА и схема включения рисунок 7.



**Рис. 7.** Схема включения усилителя СМА-81+

Для усиления сигнала синтезатора частоты применим усилитель АВА-24А+ с параметрами:

- напряжение питания 5В;
- коэффициент усиления на частоте 14 ГГц  $K_u=10...11,5$  дБ;
- потребляемый ток при питании 5 В -160 мА.

Рекомендуемая схема включения рисунок 8.

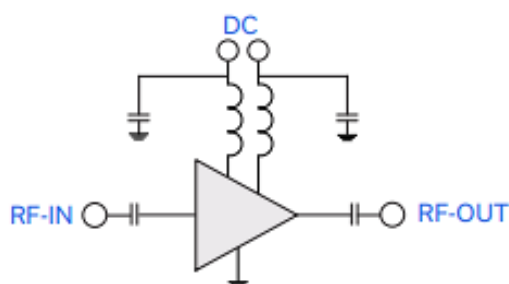


Рис. 8. Рекомендуемая схема включения усилителя AVA-24A+

После смесителя применим фильтр ППФ микрополосковые в таблице 3.

Конструктивное исполнение:

- многорезонаторные предельно компактные (при данном числе резонаторов) из отрезков многопроводных связанных микрополосковых линий.
- двухрезонаторные из отрезков связанных микрополосковых линий с полюсами затухания на выбранных частотах.

Таблица 3. Полосно-пропускающий фильтр (ППФ)

| Наименование | Полоса пропускания $\Delta F$ по уровню 1 дБ, в % от $F_0$ | Затухание в полосе пропускания, дБ | Затухание при отстройке от $F_0$ на $2\Delta F$ , дБ | КСВН вх/вых, не более, раз |
|--------------|--|------------------------------------|--|----------------------------|
| MFPD-14,9-02 | 10   | 2,0                                | -30  | 1,5/1,5                    |

Усилитель мощности MAPW-060180 — усилитель средней мощности, работающий в С, Х и Ku-диапазонах частот в трактах наземных станций спутниковой связи, навигации, а также в лабораторных установках рисунок 9. Коэффициент усиления по мощности составляет не менее 21 дБ при неравномерности в рабочем диапазоне не более 4 дБ. Усилитель имеет модульное исполнение и состоит из блока усилителя, платы питания и коммутации, радиатора, системы обдува. Такой подход позволяет гибко подходить к решению поставленных задач и подбирать конфигурацию под конкретные запросы заказчика. Предлагаемое исполнение позволяет использовать их как отдельно, так и в составе сложных систем. Благодаря универсальному корпусу блока замена усилителя может производиться без изменения габаритных и присоединительных разъемов. Основные параметры показан в таблице 4 и предельно допустимые режимы эксплуатации показан в таблице 5.

Таблица 4. Основные параметры

| Параметр  | Значение  |
|---|-----------|
| Диапазон рабочих частот, ГГц                                  | 6...18    |
| Коэффициент усиления по мощности, дБ, не менее                | 21        |
| Неравномерность коэффициента усиления в рабочем диапазоне, дБ | < 4       |
| Выходная мощность по сжатию на 1 дБ, дБм, не менее            | 29        |
| Максимальная выходная мощность, дБм, не менее                 | 30        |
| КСВН входа, не более  | 2         |
| Напряжение питания, В   | +12...+16 |
| Потребляемый ток, мА, не более                                | 500       |
| Тип разъема на входе и выходе                                 | 3,5 мм    |

Таблица 5. Предельно допустимые режимы эксплуатации

| Параметр                                   | Значение     |
|--|--------------|
| Максимальное напряжение питания, В         | 16           |
| Максимальная входная мощность, дБм         | 18           |
| Максимальная рабочая температура, °С       | 60           |
| Максимальная температура хранения, °С      | 35           |
| Чувствительность к статическому напряжению | ESD Class 1A |

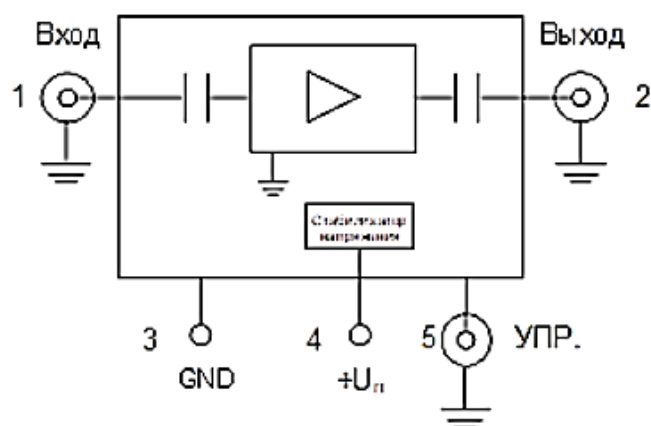


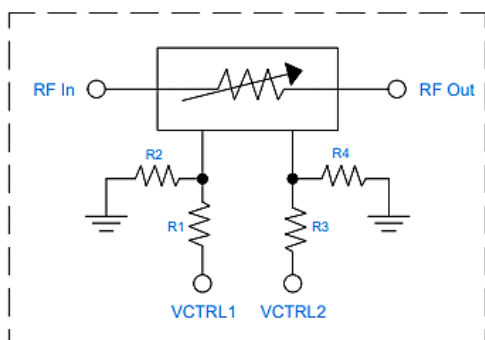
Рис. 9. Функциональная схема MAPW-060180

Для управления уровнем выходной мощности применим аттенуатор управляемый PVA-453-34+ [4] с параметрами:

- диапазон рабочих частот 10...20 ГГц;
- диапазон регулирования затухания 2,1...23,8 дБ;
- максимальный уровень входного сигнала 23 дБм.

Схема принципиальная и включения показаны на рисунке 10.

#### APPLICATION CIRCUIT & PAD DESCRIPTION



#### PAD CONNECTIONS

| NO CONNECTION | 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 13, 16 |
|---------------|---------------------------------|
| RF IN         | 7                               |
| VCTL1         | 10                              |
| VCTL2         | 12                              |
| RF OUT        | 15                              |
| GROUND        | 6, 14                           |

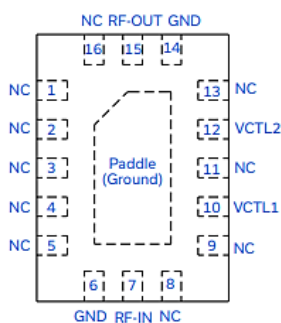


Рис. 10. Схема принципиальная и включения PVA-453-34+

Для ослабления отраженных волн от смесителя в тракте 4 ГГц, предварительного усилителя и делителя мощности в тракте 14,4...15,35 ГГц применим микрополосковые циркуляторы с параметрами таблица 6.

Таблица 6. Параметры СВЧ циркуляторов

| Диапазон частот, ГГц | Наименование по каталогу | Прямые потери, дБ | Непрерывная входная мощность, Вт/дБм |
|----------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 3,4...4,8            | ФПЦН 2-52 А              | 0,5               | 5                                    |
| 14,4...15,5          | ФПЦН2-160                | 0,7               | 2                                    |

### Расчет энергетических параметров

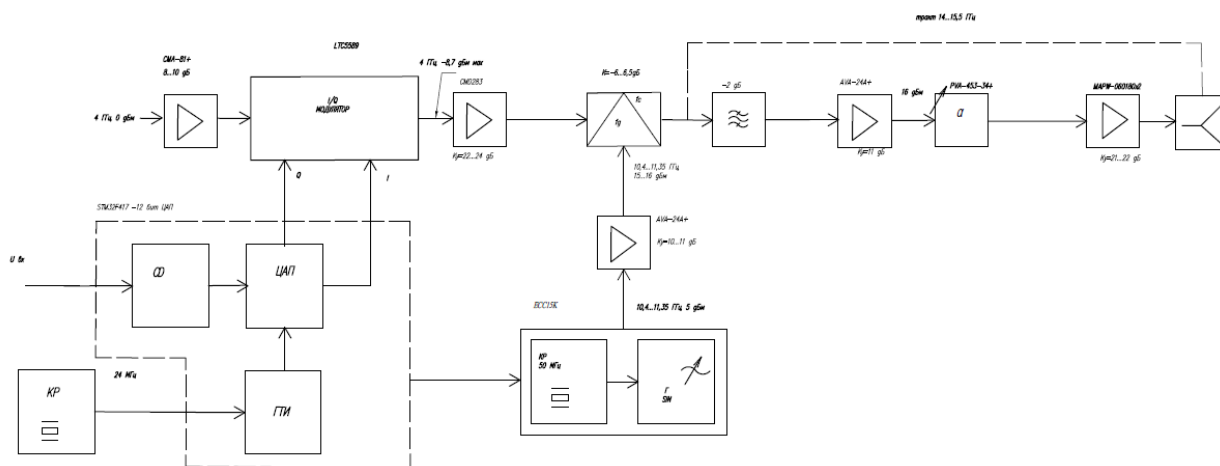
Расчет усиления и мощностей производился с учетом потерь в пассивных элементах (циркуляторы, фильтр, делитель). Основные результаты сведены в таблице 7.

**Таблица 7.** Энергетические параметры тракта

| Каскад                     | Коэффициент передачи, дБ | Входная мощность, дБм | Выходная мощность, дБм |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| Модулятор LTC5589          | -12,7                    | —                     | -8,7                   |
| Усилитель ПЧ CMD283        | 26                       | -8,7                  | 17,3                   |
| Синтезатор ECC15K          | —                        | —                     | 5                      |
| Усилитель LO AVA-24A+      | 11,5                     | 5                     | 16,5                   |
| Смеситель SIM-24MH+        | -4                       | IF=17,3, LO=16,5      | ≈6,5                   |
| Полосовой фильтр           | -2                       | 6,5                   | 4,5                    |
| Предварительный усилитель  | 11,5                     | 4,5                   | 16,0                   |
| Аттенуатор (регулировка)   | -2...-7                  | 16,0                  | 9...14                 |
| Усилитель MAPW-060180 (×2) | 21                       | 9...14                | 30...35 (каждый)       |
| Сумматор Уилкинсона        | -3                       | 30...35               | 27...32                |
| Выходные циркуляторы       | -0,7×2 = -1,4            | 27...32               | 25,6...30,6            |
| Итоговая выходная мощность | —                        | —                     | >44 дБм (25 Вт)        |

Общий КПД передатчика, определенный как отношение выходной СВЧ-мощности к суммарной потребляемой мощности, составил 13,3 %, что является приемлемым для Ku-диапазона при использовании твердотельных усилителей.

Передатчик радиорелейной линии связи Ku-диапазона с квадратурной амплитудной модуляцией QAM-16 схема функциональная показана на рисунке 11, схема принципиальная показана на рисунке 12.



**Рис. 11.** Схема функциональная

