

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА, ФОТОНИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396.13

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ S-ДИАПАЗОНА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2021 г. А.В. Ефремов, Г.Б. Гоглиашвили*, Д.С. Савельев

ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: Gosha986@rambler.ru

В данной статье рассматриваются вопросы, касающиеся принципа работы и внутреннего устройства современных передатчиков S-диапазона, устанавливаемых на малые космические аппараты. Был проведен сравнительный анализ технических характеристик различных передатчиков с описанием их преимуществ и недостатков.

ВВЕДЕНИЕ

С момента запуска первого космического аппарата возникла серьезная необходимость в использовании спутниковой радиосвязи для получения и передачи информации. В зависимости от назначения и особенностей передаваемых данных используют разные частоты радиосигнала.

S-диапазон представляет собой совокупность дециметровых и сантиметровых длин волн с частотным спектром от 2 ГГц до 4 ГГц.

Его чаще всего используют при работе метеорологических и научных спутников, морских радаров, управление воздушным движением, а также в системах цифрового радио и в мобильных телекоммуникациях. Для обработки и генерации сигнала с длиной волны 15–7.5 см применяют передатчики S-диапазона.

Данный диапазон по сравнению с Ku и Ka обладает следующими особенностями [1]: менее восприимчив к дождю, поддерживает более низкую пропускную способность, имеет узкополосный спектр, требует более крупные габариты антенны.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАТЧИКОВ S-ДИАПАЗОНА

Миссии CubeSat активно используют любительские полосы частот, ультравысокие частоты (UHF), из-за того, что проектирование радиочастотных систем проще и уровни затухания сигнала ниже по сравнению с более высокими частотами. До определенного времени, от большинства миссий CubeSat не требовалась высокая пропускная способность данных, следовательно, частоты

VHF/UHF были пригодны для достижения целей миссии.

Миссия Can-X2 использует частоты S-диапазона для передачи данных. Пропускная способность Can-X2 (до 1 Мбит/с) больше, чем у предыдущих миссий CubeSat, использующих UHF-частоты. Это значит, что использование передатчиков, рассчитанных на более высокие частоты, помогает добиться большей пропускной способности данных.

Передатчик s-диапазона в миссии AprizeSat-3 способен передавать данные со скоростью до нескольких Мбит/с. Обладая мощностью 1 Вт, он потребляет меньше энергии, чем UHF-передатчик мощностью 6 Вт. Это преимущество в сочетании с увеличенной скоростью передачи данных делает подсистему связи S-диапазона идеальным шлюзом для больших требований к данным полезной нагрузки (ПН) [2].

При необходимости более быстрой передачи данных используют передатчики X-диапазона, как, например, в миссии NigeriaSat-X. В ней данные ПН нисходят либо через высокоскоростной передатчик S-диапазона, работающий со скоростью 8 Мбит/с, либо через высокоскоростной передатчик X-диапазона, работающий со скоростью 20 Мбит/с [3].

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПЕРЕДАТЧИКОВ S-ДИАПАЗОНА

Для передачи информации по беспроводному каналу, она должна быть перенесена на несущую частоту с модуляцией. Чтобы модулировать информацию, в передатчике установлен модулятор, передающий данные в виде символов на несущую



Рис. 1. Схема типичного передатчика

частоту. Сигнал, по которому передаются символы, называется основной полосой. Локальный генератор (ЛГ) обеспечивает более высокие частоты, с которыми смешиваются сигналы основной полосы частот для получения модулированной несущей. После того, как сигналы основной полосы смешиваются с несущей частотой, модулированная несущая проходит через усилитель мощности (УМ). После усиления сигнала он передается по радиочастотной сигнальной линии на передающую антенну. В передатчике обычно используются фильтры для удаления нежелательных частот, вызванных нелинейностями радиочастотных компонентов. Схема типичного передатчика показана на рис. 1.

Информационные символы могут быть выражены как в виде амплитудных изменений на несущей частоте, так в виде изменения частоты или фазы несущей волны. Эти виды изменений называются амплитудной модуляцией (АМ), частотной модуляцией (ЧМ) и фазовой модуляцией (ФМ) соответственно.

Поскольку радиочастотные передачи с постоянной огибающей имеют менее строгие требования к линейности по сравнению с непостоянными огибающими передачами, предпочтительны схемы модуляции ФМ и ЧМ вместо АМ.

Рассмотрим особенности устройства на схеме передатчика S-диапазона МКА Aalto-1 2017 года. Он принимает передаваемые данные, генерирует из них исходный немодулированный сигнал, модулирует его на радиочастотную несущую и после этого усиливает. Существует возможность изменять скорость передачи данных и выходную мощность радиочастотного передатчика при помощи микроконтроллера. Он с помощью интерфейса взаимодействует с бортовым компьютером и передает данные на приемопередатчик. На рис. 2 показаны основные функциональные блоки для первоначальной конструкции передатчика S-диапазона [4].

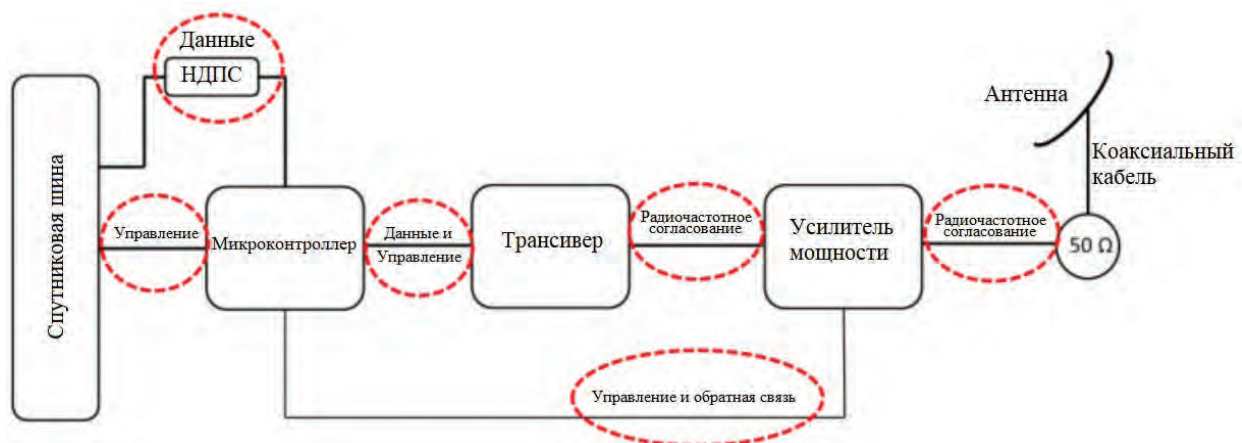


Рис. 2. Функциональные блоки исходной архитектуры передатчика S-диапазона

ПЕРЕДАТЧИК S-ДИАПАЗОНА DP-CRF-5615

DP-CRF-5615 основан на передающем модуле, специально используемом для высокой скорости передачи данных на нисходящей линии. Модуль работает с регулируемым питанием +5 В и +3.3 В. Его полная функциональность достигается за счет двух основных конструктивных блоков – цифрового контроллера и радиочастотного передатчика. Блок-схема передатчика представлена на рис. 3.

Цифровой контроллер включает в себя блок программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ) и блок цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) для сопряжения передающего модуля с бортовым компьютером (БК) или системой обработки данных. БК или система обработки данных собирает данные ПН через последовательный периферийный интерфейс или Serial Peripheral Interface (SPI). Кадрирование данных, кодирование и фильтрация основной полосы частот выполняются в ППВМ, а данные ПН доставляются в виде чередующихся цифровых данных I и Q к параллельному ЦАП. Конфигурационные команды для несущей частоты, уровня мощности, скорости передачи данных и схемы модуляции могут быть выбраны или запрограммированы через интерфейс Inter Integrated Circuit (I2C).

Радиочастотный передатчик включает в себя модулятор и радиочастотные усилители. Модулятор используется для генерации несущего сигнала квадратурной модуляции. Он модулирует входя-

щие данные I и Q от ЦАП с запрограммированным несущим сигналом. Модуль имеет встроенный контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и кварцевый генератор с температурной компенсацией (КГТК) для генерации несущей. Модулированный сигнал усиливается на выходе 1 Вт и проходит через фильтр низких частот (ФНЧ) для удаления гармонических сигналов. Выход усилителя мощности соединен через направленную муфту и контролируется с помощью логарифмического усилителя и АЦП [5].

ПЕРЕДАТЧИК S-ДИАПАЗОНА ISIS-TXS

ISIS-TXS – это модуль передатчика с высокой скоростью передачи данных и совместимый с CubeSat, разработанный для удовлетворения потребностей передачи данных по нисходящим каналам. Передатчик может использоваться как для нисходящей линии связи подсистемы слежения, телеметрии и передачи команд управления, так и для передачи данных ПН. Его блок-схема представлена на рис. 4.

Передатчик S-диапазона является очень гибким, реализует стандарты Международного Консультативного Комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS) в протоколах передачи данных и позволяет в полете настраивать ее скорость (до 100 кбит/с), схему модуляции, частоту (2100–2500 МГц) и выходную мощность при низком энергопотреблении [6].

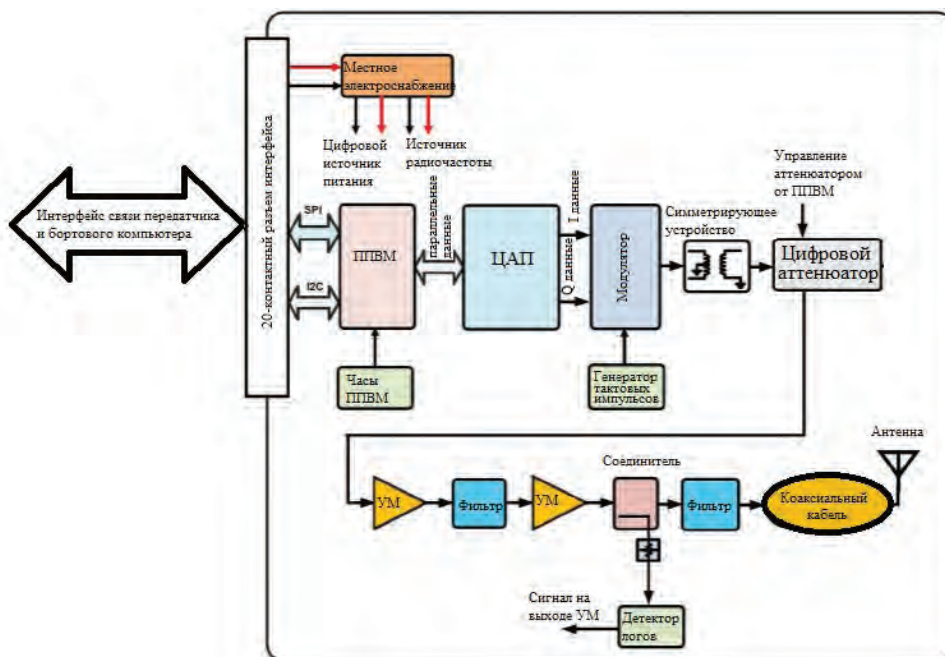


Рис. 3. Блок-схема передатчика S-диапазона DP-CRF-5615

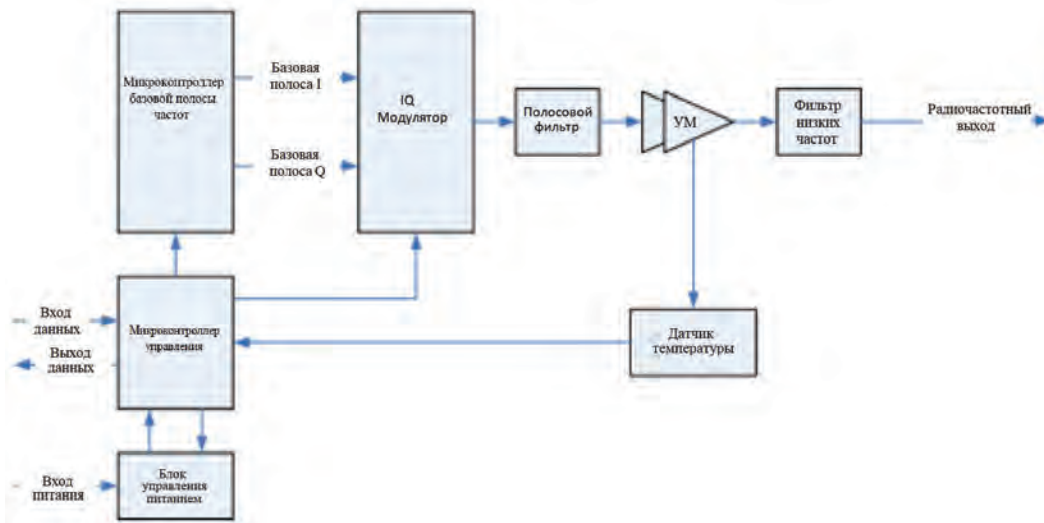


Рис. 4. Блок-схема передатчика S-диапазона ISIS-TXS

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Произведя анализ таблицы 1, был сделан вывод, что несмотря на больший вес, потребляемую мощность и меньший рабочий диапазон частот, передатчик DP-CRF-5615 позволяет развивать большую выходную мощность и скорость передачи данных. Если при проектировании малого космического аппарата нет жестких требований по массе аппарата и его потребляемой мощности, то целесообразней использовать передатчик DP-CRF-5615, для более быстрой передачи информации с ПН на приемное устройство. Это позволит оперативно обрабатывать телеметрические параметры, а в случае обнаружения аномальных ситуаций своевременно принимать меры по их устранению.

При рассмотрении блок схем передатчика DP-CRF-5615 можно сделать вывод о большей помехозащищенности от внутренних помех в отличие от ISIS-TXS. Это связано с наличием в нем симметрирующего устройства, которое предотвраща-

ет возникновение антенного эффекта на фидере радиопередатчика. Данный эффект заключается в излучении или приеме электромагнитных волн не предназначенными для этого проводниками электрического тока.

Также одним из преимуществ передатчика DP-CRF-5615 является наличие в нем пассивной автоматической регулировки усиления (APУ), что предотвращает искажения сигнала на приемнике. Причем именно пассивные APУ не потребляют электрическую энергию.

Допустим нам необходимо обладать более высокими значениями мощности сигнала для получения большей дальности действия устройства. Посмотрим, как изменятся внешние условия и возможности работы трансмиттера, если передатчик будет работать при температуре 55°C.

В начале определим площадь поверхностей блока:

Для верхней и нижней [7]:

$$S_{\text{бл.в}} = S_{\text{бл.н}} = l_{\text{бл}} b_{\text{бл}} = 0.01 \text{ м}^2, \quad (1)$$

где $l_{\text{бл}}$ – длина поверхности корпуса блока; $b_{\text{бл}}$ – ширина поверхности корпуса блока.

Для боковой [7]:

$$S_{\text{бл.б}} = 2(l_{\text{бл}} + b_{\text{бл}}) = 0.04 \text{ м}^2. \quad (2)$$

Задаем перепад температур между корпусом и окружающей средой:

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}} = 6.48^\circ\text{C}.$$

Таблица 1. Перечень основных характеристик передатчиков S-диапазона

| Передатчик | DP-CRF-5615 | ISIS-TXS |
|-----------------------|-------------------|-------------|
| Применение | CubeSat | CubeSat |
| Размеры | 96×90 мм | 96×90 мм |
| Вес | < 105 грамм | 62 грамм |
| Рабочие частоты | 2.2–2.5 ГГц | 2.1–2.5 ГГц |
| Выходная мощность | 27–30 дБм | < 28 дБм |
| Скорость передачи | 19.2–2000 Кб/с | До 100 Кб/с |
| Типы модуляций | BPSK, QPSK, OQPSK | BPSK, GMSK |
| Потребляемая мощность | до 4 Вт | до 6.5 Вт |

Определяем температуру корпуса блока [7]:

$$t_{\text{корп.бл}} = t_{\text{о.с.}} + \Delta t_{\text{корп-о.с.}} = 61.48^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где $t_{\text{о.с.}}$ – максимальная температура окружающей среды, °C.

Находим среднюю температуру между корпусом и окружающей средой [7]:

$$\bar{t}_{\text{корп-о.с.}} = \frac{t_{\text{корп.бл}} + t_{\text{о.с.}}}{2} = 58.24^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Определяем закон теплообмена [7]:

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}} \leq \left(\frac{0.84}{l_{\text{опри}}} \right)^3, \quad (5)$$

где $l_{\text{опри}}$ – определяющий размер поверхности, м. Так как $l_{\text{бл}} = b_{\text{бл}} = h_{\text{бл}}$, то:

$$\left(\frac{0.84}{b_{\text{бл}}} \right)^3 = 592.7^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}} = 6.48 \leq 592.7.$$

Так как условие выполняется, теплообмен проходит по закону $1/4$.

Рассчитываем коэффициенты конвективного теплообмена для каждой поверхности блока [7]:

$$\alpha_{\text{конв}i} = k_{\text{пов.бл}i} A_2 \sqrt[4]{\frac{t_{\text{корп.бл}} - t_{\text{о.с.}}}{l_{\text{опри}}}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{пов.бл}i}$ – коэффициент, учитывающий положение поверхностей корпуса блока (для нижней поверхности – 0.7, для боковой – 1, для верхней – 1.3); A_2 – коэффициент, зависящий от $\bar{t}_{\text{корп-о.с.}}$ [7].

Получим $\alpha_{\text{конв.в}} = 4.83$, $\alpha_{\text{конв.н}} = 2.6$, $\alpha_{\text{конв.б}} = 3.72$.

Определяем коэффициент лучистого теплообмена для каждой поверхности блока [7]:

$$\alpha_{\text{л}i} = \varepsilon_{\text{корп}i} \cdot 5.67 \cdot \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{t_{\text{корп.бл}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{о.с.}} + 273}{100} \right)^4}{t_{\text{корп.бл}} - t_{\text{о.с.}}}}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{корп}i}$ – коэффициент черноты корпуса блока.

$$\alpha_{\text{л.б}} = \alpha_{\text{л.в}} = \alpha_{\text{л.н}} = 10.36.$$

Рассчитываем тепловую проводимость между поверхностью корпуса и окружающей средой [7]:

$$\sigma_{\text{т.корп-о.с.}} = (\alpha_{\text{конв.н}} + \alpha_{\text{л.н}})S_{\text{бл.н}} + (\alpha_{\text{конв.б}} + \alpha_{\text{л.б}})S_{\text{бл.б}} + (\alpha_{\text{конв.в}} + \alpha_{\text{л.в}})S_{\text{бл.в}}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{конв.н}}$, $\alpha_{\text{конв.б}}$, $\alpha_{\text{конв.в}}$ – коэффициенты коллективного теплообмена для нижней, боковой и верхней поверхности корпуса блока соответственно; $\alpha_{\text{л.н}}$, $\alpha_{\text{л.б}}$, $\alpha_{\text{л.в}}$ – коэффициенты лучистого теплообмена для нижней, боковой и верхней поверхности корпуса блока соответственно.

$$\sigma_{\text{т.корп-о.с.}} = 5.91.$$

Рассчитываем перепад температур между корпусом и окружающей средой во втором приближении [7]:

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}}^* = \frac{Q_{\text{бл}}}{\sigma_{\text{т.корп-о.с.}}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{бл}}$ – мощность, рассеиваемая блоком, Вт.

$$\Delta t_{\text{корп-о.с.}}^* = 6.77.$$

Определяем ошибку (точность) расчета [7]:

$$\Delta_p = |\Delta t_{\text{корп-о.с.}}^* - \Delta t_{\text{корп-о.с.}}| = 0.29. \quad (10)$$

$\Delta_p \leq 1$, соответственно, ошибка не превышает допустимые пределы. В пересчете нет необходимости.

Определяем температуру корпуса с учетом перфорации и поправки на атмосферное давление окружающей среды [7]:

$$\Delta t'_{\text{корп-о.с.}} = \Delta t_{\text{корп-о.с.}} \cdot k_{\text{К перф}} \cdot k_{\text{Р о.с.}} \quad (11)$$

где $k_{\text{К перф}}$ – коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации блока $k_{\text{перф}}$ (рис. 2.7) [7]; $k_{\text{Р о.с.}}$ – коэффициент, зависящий от атмосферного давления окружающей среды $P_{\text{о.с.}}$ [7], а $k_{\text{перф}}$ определяется выражением:

$$k_{\text{перф}} = \frac{S_{\text{перф}}}{S_{\text{бл.н}} + S_{\text{бл.в}}} = \frac{0.0016}{0.01 + 0.01} = 0.08. \quad (12)$$

$$k_{P_{o.c.}} \Delta t'_{\text{корп-о.с.}} = 5.31^{\circ}\text{C}.$$

Определяем температуру корпуса блока [7]:

$$t_{\text{корп.бл}} = t_{o.c.} + \Delta t'_{\text{корп-о.с.}} = 60.31^{\circ}\text{C}. \quad (13)$$

При проведении расчета температуры электронных компонентов на печатной плате передатчика мы получим еще более высокие значения. Это значит, что при разработке приемопередатчика с такой мощностью потребуется использовать принудительное охлаждение. Выполнение такого же расчета для трансмиттеров DP-CRF-5615 и ISIS-TXS (при температуре 54°C) приводит к получению температуры корпуса равной 54.64°C и 54.91°C соответственно.

ВЫВОДЫ

Из проведенных расчетов видно, что при необходимости использовать приемники для передачи сигналов большей мощности стоит избегать простого увеличения потребляемой мощности приемника, так как это приводит к увеличению рассеиваемой мощности и повышению температуры внутри корпуса космического аппарата, а мощность на выходе приемника может практически не изменяться, что мы и видим при сравнении приведенных в данной статье устройств. Для увеличения отношения сигнал/шум лучше повышать помехозащищенность токопроводящих частей и изменять конструкцию подсоединяемой к приемопередатчику антенны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin, Chin-Yew. «Rouge: A package for automatic 1. Caum RF Wireless World (Home of RF and Wireless Vendors and Resources) [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <https://www.rfwireless-world.com> (дата обращения 24.03.2021).
2. Сайт eoPortal Directory [Электронный ресурс]. – 2000–2021 – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org> (дата обращения 24.03.2021).
3. Сайт eoPortal Directory [Электронный ресурс]. – 2000–2021 – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org> (дата обращения 24.03.2021).
4. Сайт Aalto University [Электронный ресурс]. – 2000–2021 – Режим доступа: <https://aaltodoc.aalto.fi> (дата обращения 24.03.2021).
5. Сайт satsearch [Электронный ресурс]. – 2015–2021 – Режим доступа: <https://satsearch.co/products/isis-isis-txs-s-band-transmitter> (дата обращения 24.03.2021).
6. Сайт satsearch [Электронный ресурс]. – 2015–2021 – Режим доступа: <https://satsearch.co/products/data-patterns-dp-crf-5615-s-band-transmitterx> (дата обращения 24.03.2021).
7. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры / Э.Н. Камышина, В.В. Маркелов, В.А. Соловьев. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.