

Высокоскоростной бортовой радиопередатчик космического аппарата S-диапазона. Описание системы и реализация прототипа

С.Д. Ивлев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Обоснование. С развитием технологий дистанционного зондирования Земли на сверхнизких околоземных орбитах (VLEO) возрастает спрос на специализированные сверхскоростные радиопередатчики. Существующие варианты передатчиков могут показывать ухудшение производительности в связи с особенностью орбиты. В статье описываются аппаратные компоненты и принципы кодирования, необходимые для разработки пользовательского модуля радиопередатчика.

Цель. Описанная в работе система должна стать частью будущего спутника наблюдения VLEO и, следовательно, должна быть оптимизирована для передачи высококачественных изображений за короткий промежуток времени, чтобы обеспечить оперативную службу гиперспектральных наблюдений в высоком разрешении. Описанные аппаратные средства и методы кодирования передатчика в X-диапазоне для спутников наблюдения VLEO должны обеспечить высокую скорость, надежность и энергоэффективность.

Методы. Порядок модуляции задает количество состояний в созвездии, определяя битрейт. Чем выше порядок (16, 64, 1024-QAM), тем больше скорость, но и выше вероятность ошибок (BER). Для минимизации BER требуются высоколинейные компоненты, особенно усилители мощности, и высокое ОСШ [1]. Такие схемы применяются в WiFi и спутниковой связи.

Приемопередатчик на ПЛИС TANG 20k подключен к бортовому компьютеру через Quad SPI (до 120 МГц), обеспечивая передачу до 480 Мбит/с через DMA STM32H743. Данные хранятся в FIFO-буфере, затем модулируются.

Первая версия использовала ЦАП AD9744 для генерации I/Q-сигналов ПЧ, преобразуемых в радиочастоту. Вместо LTC5548 (2.4 ГГц) в прототипе применен ADL5801 для экономии. Сигнал усиливается и передается. Планировалась антенна X-диапазона, возможен переход на фазированную решетку.

Прием через LNB-X3 (10,5 → 1,5 ГГц) и SDR-приемник. Антенна X-диапазона (10,5 ГГц) размещена в Центре космической информации Самарского университета.

Рассмотрим предложенную структуру пакета, который будет использоваться при общении с высокоскоростным радиопередатчиком:

- преамбула (2 байта) — начало передачи;
- метка длины (2 байта) — размер данных (до 4095 байт);
- данные.

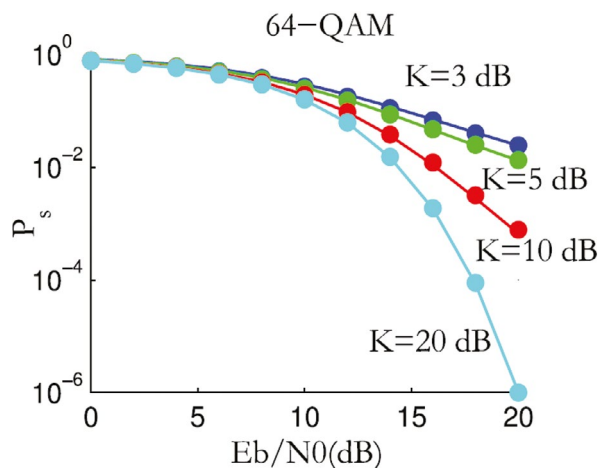


Рис. 1. Сравнение модуляций QAM по BER

Данные защищены кодом Хэмминга (исправляет 1 бит, обнаруживает 2). Контрольные биты растут логарифмически. Требуемое количество битов четности определяется неравенством (1):

$$2^r \geq k + r + 1, \quad (1)$$

где r — количество битов четности; k — количество битов данных.

Таким образом, каждый бит, позиция которого равна степени 2, является битом четности [2]. В наихудших случаях, когда длина данных далека от степени двойки, избыточность может составлять 35–40 %, но позволяет нам исправлять возникающие ошибки без повторной отправки всего пакета данных. Для данных, длина которых ближе к 2^n битам, эта избыточность будет еще меньше.

Результаты. Результатом проведенной работы стало представление прототипа радиопередатчика для VLEO-спутника с передачей до 480 Мбит/с через Quad SPI и DMA. Предполагается модуляция QAM на ПЛИС, передача через ЦАП AD9744 и ADL5801, прием — через LNB-X3 и SDR. Применен код Хэмминга для коррекции ошибок. Структура пакета оптимизирована для высокоскоростной передачи с минимальной избыточностью.

Выводы. Предложенный прототип радиопередатчика для спутников VLEO-орбиты показывает перспективность применения стандартных компонентов (ЦАП, модулятор, усилитель) в связке с простыми методами коррекции ошибок для построения энергоэффективной и достаточно надежной линии передачи данных. Несмотря на использование недорогих альтернатив в ряде компонентов, достигнуты рабочие характеристики, соответствующие целям передачи гиперспектральных изображений в условиях ограниченного окна связи.

Ключевые слова: SDR; DAC; ADC; основная полоса частот; передатчик; промежуточная частота; модуляция; QAM.

Список литературы

1. gaussianwaves.com [Электронный ресурс] QAM modulation: simulate in Matlab & Python. Режим доступа: <https://www.gaussianwaves.com/2012/10/qam-modulation-simulation-matlab-python> Дата обращения: 15.02.2025.
2. Kythe D.K., Kythe P.K. Algebraic and stochastic coding theory. Boca Raton: CRC Press, 2012. P. 95–116. doi: 10.1201/b11707

Сведения об авторе:

Сергей Дмитриевич Ивлев — инженер кафедры динамики полета и систем управления, инженер-электроник ПАО «РКК Энергия»; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: serejaivlev@gmail.com

Сведения о научном руководителе:

Иван Сергеевич Ткаченко — заместитель ректора, директор института авиационной и ракетно-космической техники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: tkachenko.is@ssau.ru