

ДЕМОДУЛЯЦИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЕ QPSK-РАДИОСИГНАЛА СТАНДАРТА CCSDS

М.А. Павлышко, С.Н. Семенович, В.А. Прохоров

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: pauyshka@bsu.by

Рассмотрены стандарты передачи данных CCSDS. Предложен граф для демодуляции QPSK-радиосигнала в GNU Radio. Предложено программное обеспечение для быстрого декодирования и анализа декодированного битового потока данных. Разработанные граф и ПО протестированы на записи QPSK-радиосигнала, переданного космическим аппаратом.

Ключевые слова: CCSDS; радиосвязь; QPSK; GNU Radio.

В настоящее время актуальна проблема быстрой и надежной передачи данных с космических аппаратов. Для оптимизации затрат на разработку и эксплуатацию систем приема данных ключевую роль играет применение установленных международных стандартов, таких как рекомендации «Консультативного комитета по космическим системам передачи данных» (CCSDS). Стандарты CCSDS обеспечивают необходимую унификацию технических процессов и интерфейсов, что позволяет сократить время и ресурсы, необходимые для интеграции различных компонентов систем передачи данных.

В частности, комитетом был разработан комплекс рекомендаций для обеспечения эффективной передачи телеметрической информации между космическими аппаратами и наземными станциями. Рекомендации включают в себя протоколы кодирования, форматы данных и методы синхронизации, которые способствуют надежной коммуникации в условиях открытого космоса [1].

Для модуляции битового потока данных, согласно рекомендации CCSDS, может применяться четырехпозиционная фазовая модуляция (QPSK). Для защиты данных от шумов физического канала битовый поток кодируется одним или двумя следующими кодами: блочный код Рида-Соломона (255, 233) или же сверточный код (7, 12) [2]. Для обеспечения обнаружения кодовых слов в передаваемом потоке данных на приемной стороне и их правильного декодирования при формировании кадра для передачи по физическому каналу применяется маркер синхронизации (ASM). Маркер синхронизации является постоянным, имеет длину 4 байта, добавляется в начало каждого кодового слова и принимает значение *1ACFFC1D* [3].

Для корректной демодуляции сигнала, принимающая система требует, чтобы входящий сигнал имел достаточную плотность битовых переходов для обеспечения синхронизации декодера. Входящий сигнал также

не должен содержать значительных спектральных линий и паттернов, мешающих синхронизации и проверке кодовых слов. Для достижения этих требований *CCSDS* рекомендует применение псевдослучайного рандомизатора [4]. Псевдорандомизатор обычно представляет собой регистр сдвига с линейной обратной связью (*LFSR*), полином которого задается следующей формулой:

$$h(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + 1 \quad (1)$$

В рамках проведенных экспериментов была проведена демодуляция и декодирование сигнала с космического аппарата с символьной скоростью 14,336 Мсимв/с и кодированием *QPSK*. Для синхронизации принимаемого потока и снятия сверточного кодирования алгоритмом Витерби использовался разработанный граф для ПО *GNU Radio* (рис. 1). Для синхронизации символов применен метод максимального правдоподобия.

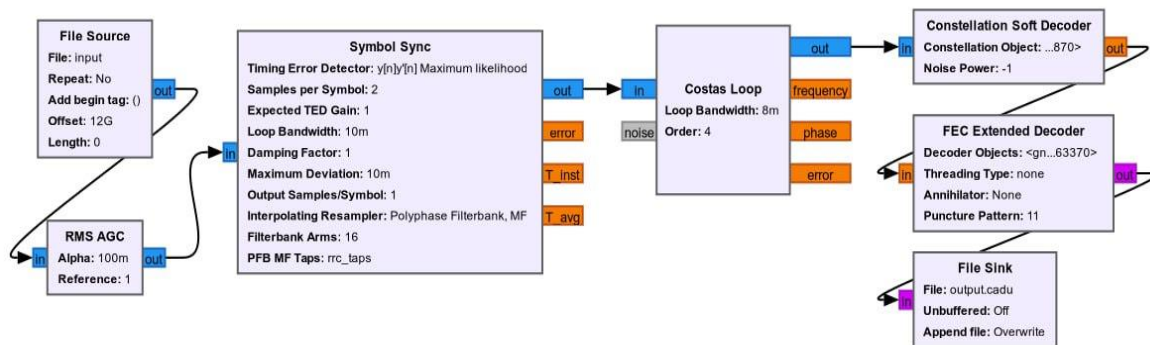


Рис. 1. Граф демодуляции и декодирования *QPSK*-радиосигнала для ПО *GNU Radio*

Для дальнейшей обработки принятого битового потока было разработано ПО на языке программирования C++. Конфигурация ПО происходит посредством соединения функциональных модулей в граф (рис. 2).

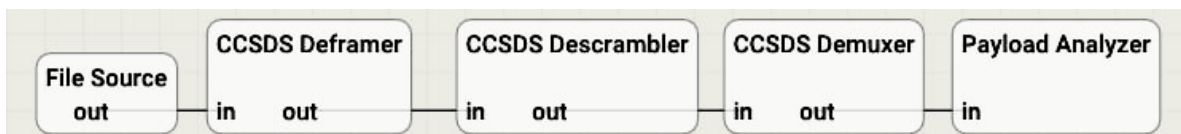


Рис. 2. Граф анализа сигнала в разработанном ПО

Модуль *CCSDS Deframer* обеспечивает синхронизацию битового потока и выделение информационного кадра посредством поиска в битовом потоке метки синхронизации (*ASM*) и последующим копированием заданного количества бит после нее. Блок *CCSDS Descrambler* выполняет сня-

тие псевдорандомизации с потока данных. Для оптимизации скорости выполнения вместо использования сдвигового регистра выполняется операция исключающего ИЛИ между битовым потоком и заранее рассчитанным массивом. Блок *CCSDS Demuxer* вычисляет контрольную сумму *CRC16* принятого кадра и сверяет ее с суммой, которая хранится в конце кадра. Также этот блок удаляет из дальнейшей обработки кадры, которые содержат специальный паттерн для заполнения радиоканала в случае отсутствия данных для передачи. Блок *Payload Analyzer* выполняет дальнейший разбор кадров в зависимости от конкретного космического аппарата (КА).

Разработанное ПО было успешно протестировано на сигнале КА с символьной скоростью 14,336 Мсимв/с, модуляцией QPSK и сверточным кодированием (рис. 3). Коэффициент битовых ошибок (BER) составил $<10^{-4}$.

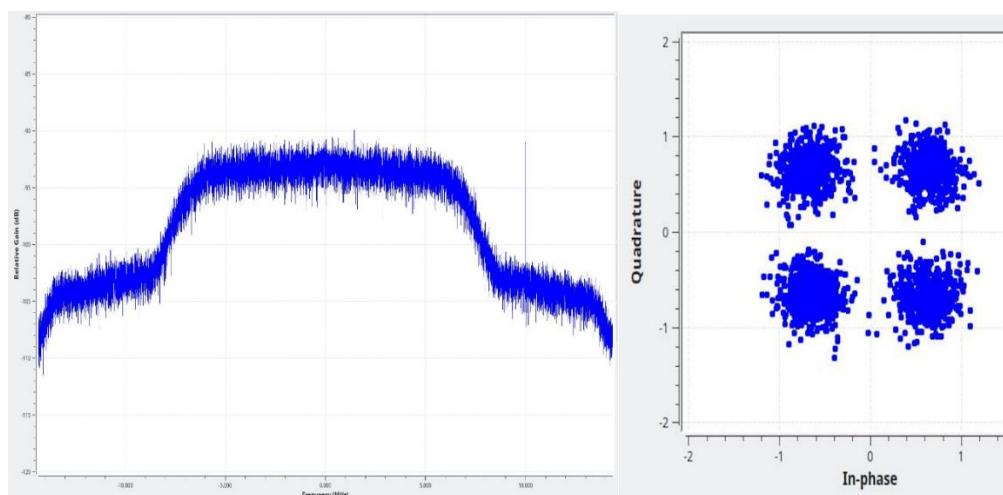


Рис. 3. Результат демодуляции принятого от КА сигнала разработанным ПО

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. CCSDS 130.3-G-0.2: CCSDS Draft Green Book. // Iss. 0.2. Sagamihara, Japan, 2004.
2. Минервин А. А., Поляков А. Ю. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОКОЛОВ CCSDS В СОВРЕМЕННОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ // Международный журнал экспериментального образования. 2010. № 3. С. 50;
3. Р.П. Богуш, И. Ю. Захарова, В.М. Чертков, Н.М. Наумович. Моделирование алгоритмов обработки данных радара с синтезированной апертурой космического аппарата для их передачи и формирования радиолокационного изображения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. 2018. № 12. С. 2–8.
4. CCSDS 131.0-B-5: TM Synchronization and Channel Coding // Iss. 5. Washington DC., USA, 2023.