

УДК 002.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА СВЯЗИ «УНИВЕРСИТЕТСКИЙ НАНОСПУТНИК – ЗЕМЛЯ»

А.А. Спиридонов, В.А. Саечников

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

Описывается архитектура построения бортового модуля системы университетского наноспутника. Рассматривается модель канала связи «университетский наноспутник – Земля».

В системе радиотехнической связи сверхмалых космических аппаратов (КА) используются УКВ-приемники и передатчики, а также малонаправленные антенны, работающие на передачу и прием. Для радиолюбительской связи выделены частоты 129–147 МГц и 442–450 МГц. Так как скорость передачи информации зависит от полосы пропускания канала, а с увеличением частотного диапазона появляется больше возможностей для расширения полосы пропускания, то для увеличения информативности канала переходят к высоким частотам, но здесь сталкиваются с проблемой аппаратной реализации канала связи. Для обеспечения устойчивого приема радиосигнала необходимо либо увеличить мощность передатчика, либо повышать чувствительность приемника. Но повышение мощности передатчика ограничивается энергетическими возможностями системы электроснабжения КА.

Ограничение массово-габаритных размеров КА затрудняет использование антенн большого диаметра. Поэтому на этих аппаратах используются небольшие антенны с широкой диаграммой направленности, например, простейшие монополюсные антенны. Бортовая система связи современных сверхмалых космических аппаратов осуществляет передачу сигналов радиомаяка, прием команд управления с наземного комплекса, и передачу телеметрической и научной информации. Сигнал радиомаяка передается кодом Морзе (CW модуляция – амплитудная манипуляция) в диапазоне частот 430–445 МГц. Для передачи телеметрии и команд, как правило, используется J-режим любительской радиосвязи, для передачи данных со спутника используется диапазон 430–445 МГц, а для передачи команд на спутник – диапазон 135–145 МГц. Формат принимаемых со спутника данных обычно открыт для широкой публики, что позволяет осуществлять слежение за спутником радиолюбителям по всему миру.

Для обмена информацией используется пакетная радиосвязь со скоростью от 1200 бит/с до 9600 бит/с. Используют обычно протокол пакетной передачи данных AX.25, который используется радиолюбителями в любительских пакетных сетях, или модифицированные собственные протоколы, так как недостатком AX.25 является отсутствие функции исправления ошибок. Передаваемый с КА на Землю сигнал обычно модулируют, применяя FSK модуляцию или GMSK модуляцию, которая используется в современных системах цифровой радиосвязи GSM, GPRS и обеспечивает высокое качество передачи в относительно узкой полосе, занимаемой сигналом. Реже используют BPSK модуляцию, так как хотя эта модуляция является самой помехоустойчивой из всех видов фазовой модуляции (при ее использовании вероятность ошибки при приеме данных наименьшая), но она обладает наименьшую при фазовой модуляции скорость передачи информации. Выходная мощность передатчика составляет от 0,1 Вт до 5 Вт. В последнее время разрабатываются малогабаритные передатчики для L и S диапазона со скоростью от десятков кбит/с до сотен кбит/с. Чувствительность приемников составляет от –100 до –126 dBm при коэффициенте ошибки на бит BER (Bit-Error), равной  $10^{-5}$ .

Рассматриваемая в этой работе архитектура бортового модуля системы университетского наноспутника обладает рядом преимуществ:

- использует передачу сигналов радиомаяка, так как за счет малого энергопотребления, даже в отсутствие основных каналов связи, на наземные станции кодом Морзе будет передаваться информация о КА и минимальная телеметрия;
- для передачи команд на КА и передачи данных с КА использует диапазоны частот любительской радиосвязи, по следующим причинам: проще получить разрешение на использование этого частотного ресурса; существует большое количество дешевых коммерческих комплектующих необходимых для разработки модуля связи именно в этом частотном диапазоне; данные с КА можно пере-

давать в открытом коде (программу-декодер можно выложить для свободного доступа с минимальной степенью регистрации в Интернет) и они будут приниматься большим числом радиолюбительских станций и по наземным каналам связи (чаще всего Интернет) передаваться разработчикам.

- имеет возможность перезагрузки системы связи и перепрошивки программного обеспечения в процессе полёта;
- предусмотрена возможность дублирования канала передачи командной и телеметрической информации.

Бортовая система связи состоит из: модуля радиомаяка, передающего минимальную информацию о КА и его бортовых системах кодом Морзе; модуля FM передатчика, работающего в диапазоне частот 435 до 438 МГц и формирующего модулированный сигнал пакетной связи телеметрической информации и данных целевой аппаратуры; модуля FM приёмника команд управления от наземного комплекса.

Модуль радиомаяка получает от бортового компьютера или напрямую от датчиков КА минимальную телеметрическую информацию о состоянии КА и его бортовых систем, данные преобразуются кодом Морзе и, подвергаясь амплитудной манипуляции, передаются с помощью дипольной антенны на частоте 435-438 МГц со скоростью 50 слов в минуту.

Контроллер пакетной связи модуля FM передатчика получает данные телеметрии и целевой аппаратуры, преобразует их в кадры по протоколу пакетной передачи данных AX.25. Кроме телеметрической и научной информации в кадре содержатся данные о назначении кадра, адресе отправителя и получателя, а также данные о контрольной сумме, позволяющей проверить правильность принятых кадров. Но как отмечалось выше недостатком AX.25 является отсутствие функции исправления ошибок, поэтому кадры, передаваемые в модем, разбиваются для лучшей передачи на меньшие по размеру и подвергаются блочному кодированию для коррекции ошибок. При этом коэффициент ошибки на бит BER можно существенно понизить (примерно в 100 раз для отношения сигнал-шум S/N= 8 дБ) по сравнению с обычной передачей без коррекции ошибок FEC. Кроме того новые кадры содержат биты для синхронизации процесса передачи информации между КА и наземным комплексом, а также данные о контрольной сумме, позволяющей проверить правильность принятых кадров. Последним этапом работы модема является GMSK модуляция, обладающая двумя особенностями, одна из которых – «минимальный сдвиг», другая – гауссовская фильтрация. Обе особенности направлены на сужение полосы частот, занимаемой GMSK-сигналом. FM передатчик обеспечивает наложение сигнала от модема на высокую частоту и последующую передачу с помощью дипольной антенны на частоте 435-438 МГц со скоростью не менее 9,6 кбит/с.

FM-приёмник команд управления от наземного комплекса с помощью монопольной антенны на частоте 145 МГц принимает моделированный сигнал команд управления или программное обеспечение и его демодуляцию на базовую частоту с последующей передачей сигнала на модем, где выделяются кадры, сформированные по протоколу AX.25, из которых с помощью декодера выдаются команды управления в бортовой компьютер.

Для данной архитектуры бортового модуля системы университетского наноспутника разработана модель канала связи КА – Земля. Эта модель представлена на рис.1 и построена по модульному принципу, каждый модуль может быть настроен или отключён, в зависимости от постановки задачи, положения КА на орбите, возможности его аппаратуры. Первый модуль – введение данных о параметрах орбиты КА, характеристиках АФУ и передатчика КА и приёмника наземной станции приёма, создание исходного файла передаваемых данных телеметрии и целевой аппаратуры. Второй модуль имитирует работу контроллера пакетной связи и формирования кадра по протоколу пакетной передачи данных. Третий модуль моделирует работу кодера по кодированию информации помехоустойчивым кодом и имеет возможность выбрать тип помехоустойчивого кода и параметры помехоустойчивых кодов. Четвёртый модуль предоставляет возможность выбора режима модуляции, имитирует процесс модуляции и формирование информационного сигнала. Информационный сигнал и сигналы помех поступают в пятый модуль, где формируется групповой пространственный сигнал путём суммирования информационного сигнала и сигналов помех с учётом углов их прихода на АФУ наземного комплекса, причем уровень суммарной мощности атмосферного и собственного шумов относительно мощности полезного сигнала, количество пространственных помех и их тип можно изменять.

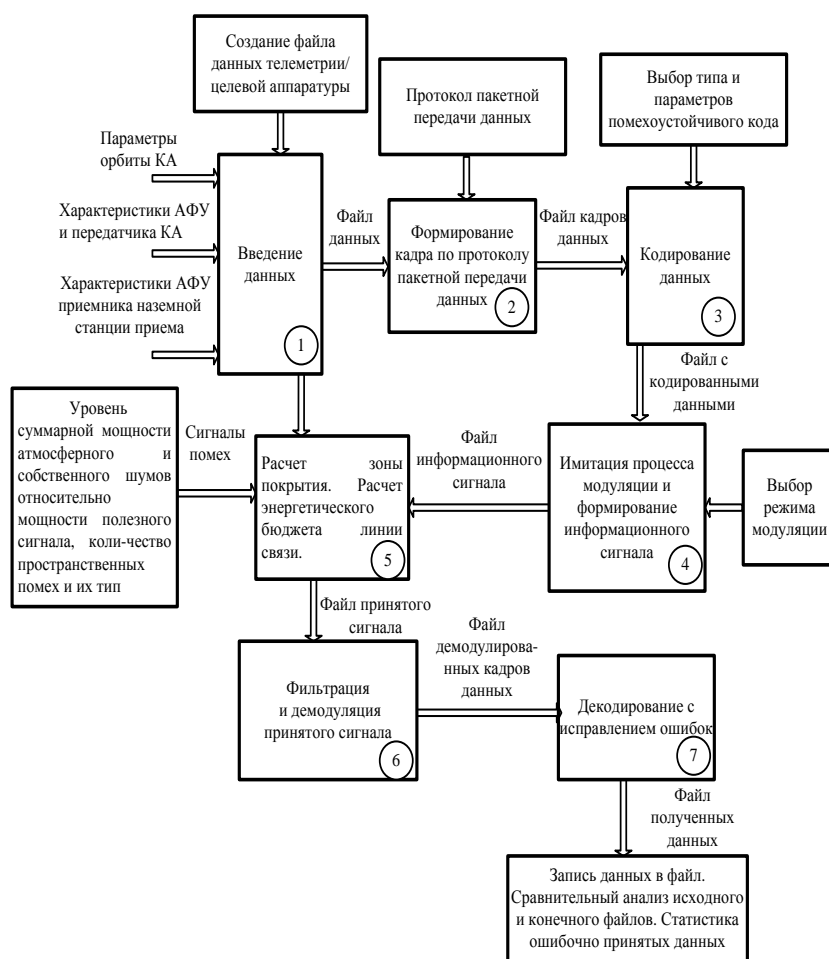


Рис. 1. Модель канала связи КА – Земля.

Данный модуль позволяет рассчитать зону покрытия, на которой выполняются условия радиовидимости и условия необходимого качества связи на линии КА – Земля, а также провести расчёт энергетического бюджета линии связи. В шестом модуле происходит фильтрация и демодуляция принятого сигнала. Информация из выходного файла этого модуля подвергается декодированию с исправлением ошибок в модуле декодера. Декодированные данные записываются в конечный файл, где производится сравнительный анализ исходного и конечного файлов, проводится статистика ошибочно принятых данных

Представленная бортовая система связи сверхмалого космического аппарата позволяет выполнять следующие функции: принимать команды управления и программное обеспечение с наземной станции; передавать радиосигнал с частотной модуляцией, содержащей пакеты кадров телеметрической информации и данных целевой аппаратуры; передавать сигнал радиомаяка, содержащий информацию о КА и минимальную телеметрию бортовых систем.