

Unified SPUTNIX protocol (USP)

Описание протокола

Версия документа 1.04

Протокол предназначен для использования на линиях космос--Земля и Земля—космос в системах передачи телеметрии и телекоманд (ТМ/ТС).

Протокол описывает физический и канальный уровни передачи.

Протокол в первую очередь предназначен для использования на сравнительно низкоскоростных (1200-115200 бит/с) полудуплексных каналах, учитывая потребности малых космических аппаратов на низкой околоземной орбите. Предусмотрена его реализация на устройствах, основанных на микроконтроллерах и интегральных приёмопередатчиках общего применения.

Общие соглашения

За исключением специально оговоренных случаев, действуют следующие соглашения:

- Все поля передаются в формате MSB first, то есть старший бит передаётся первым.
- Для многобайтных полей порядок байт всегда указан в соответствующем разделе документа.
- Все битовые последовательности, упомянутые в документе, передаются слева направо.

Параметры радиосигнала

Протокол не ограничивает использование какими-либо определёнными частотами. Однако, имеются рекомендуемые конфигурации, позволяющие линии передачи соответствовать требованиям регламента любительской радиосвязи, с целью использования на радиоперелиниях любительского диапазона частот.

В данный момент определено и рекомендовано использование GMSK – гауссовской частотной манипуляции с минимальным сдвигом. Однако, нет принципиальных ограничений, мешающих использовать другие типы манипуляции.

В случае использования частотной манипуляции нулю соответствует меньшее значение частоты, единице – большее значение.

Общая структура кадра

Общая структура кадра приведена на рисунке ниже

Преамбула	Синхропоследовательность	PLS-код	Тип	Пакет данных
>=32 бит	64 бита	64 бита	16 бит*	

Закрашенная часть кадра кодируется свёрточным кодом, скремблируется, кодируется кодом Рида-Соломона.

* Указана длина поля типа до наложения упомянутых кодов.

Преамбула

Рекомендуется использование 32-битной преамбулы из чередующихся нулей и единиц 55555555h.

Синхропоследовательность

Протокол использует 64-битную синхропоследовательность 5072F64B2D90B1F5h. На приёмной стороне рекомендуется считать корректной последовательность, которая отличается от указанной на 13 бит или менее. Вероятность ложной синхронизации на каждый бит при этом составляет $9,4 \cdot 10^{-7}$, что при скорости 9600 бит/с даёт в среднем одну ложную синхронизацию в 109 секунд.

При применении аппаратных трансиверов, как правило, обеспечивается автоматическое детектирование максимум 32-битной последовательности. Рекомендуется в этом случае устанавливать порог в 7 допустимых ошибок, вторую часть последовательности проверять программно с тем же порогом. Вероятность ложной синхронизации на каждый бит при этом составляет $1,1 \cdot 10^{-6}$, что при скорости 9600 бит/с даёт в среднем одну ложную синхронизацию в 94 секунды.

Кривая E_b/N_0 для каждого варианта приведена в разделе «Энергетические возможности протокола».

PLS-код

Непосредственно за синхропоследовательностью передаётся PLS-код (physical layer signaling). Код имеет длину 7 бит, закодирован кодом 64-7, в закодированном виде длина поля составляет 64 символа. Хэмингово расстояние кода составляет 32 бита.

Код является линейным блочным кодом со следующей порождающей матрицей:

$$G = \begin{pmatrix} 0011001100110011001100110011001100110011001100110011001100110011 \\ 0000111100001111000011110000111100001111000011110000111100001111 \\ 0000000011111111000000001111111100000000111111110000000011111111 \\ 00000000000000001111111111111100000000000000001111111111111111 \\ 00 \\ 11 \\ 01 \end{pmatrix}$$

Старший бит исходного значения умножается на первую строку матрицы, младший – на последнюю, получившиеся значения суммируются по модулю 2, или, иначе говоря, выполняется операция исключающее ИЛИ между всеми строками таблицы, напротив которых в кодируемом значении стоит единица.

Получившееся в итоге значение скремблируется сложением по модулю 2 (исключающим ИЛИ, XOR) с битовой последовательностью
0111000110011101100000111100100101010011010000100010110111111010

Применённый код полностью эквивалентен используемому в стандартах DVB-S2 (раздел 5.5.2) и CCSDS 131.2-B-1 (раздел 5.3.3), несмотря на другой способ определения.

PLS-код несёт информацию о типе и параметрах кодирования, размере передаваемого блока данных (FEC codeblock).

На данный момент реализован только один тип кодирования данных с двумя возможными размерами кодируемого блока данных:

PLS-код	Кодирование	Длина блока данных с заголовком, байты
0	Свёрточный код $\frac{1}{2}$ длины 7, код Рида-Соломона (255,223)	223
1	Свёрточный код $\frac{1}{2}$ длины 7, код Рида-Соломона (255,223)*	48

* При использовании блока данных более короткого, чем длина блока данных кода Рида-Соломона, производится виртуальное заполнение (см. ниже).

Все другие значения на данный момент являются зарезервированными.

Кадр данных

Далее передаётся кадр (фрейм) данных с заголовком, на передающей стороне последовательно подвергнутый следующим преобразованиям, соответствующим отдельным разделам CCSDS 131.0-B-3:

- Кодирование кодом Рида-Соломона;
- Скремблирование;
- Кодирование свёрточным кодом;

Кодирование данных

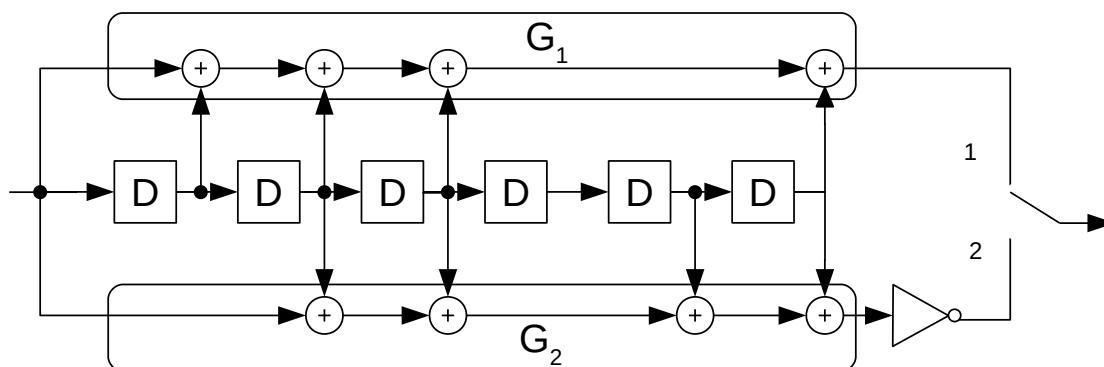
Свёрточный код

Используется свёрточный код, идентичный рекомендованному в книге CCSDS 131/0-B-3, пункт 3.3.1. Следует, однако, обращать внимание, что супс-последовательность, как и PLS-код, не кодируются свёрточным кодом, как рекомендует указанный документ.

Параметры кода:

тип: свёрточный код с декодированием методом наибольшего правдоподобия;
 относительная скорость кода (code rate) $r=\frac{1}{2}$;
 память кода (constraint length) $K=7$ bits;
 вектора соединений (connection vectors): $G_1 = 1111001$, $G_2=1011011$;
 инверсии: инвертируется выход G_2 .

Схема кодера приведена на рисунке ниже (CCSDS 131.0-B-3 Figure 3-1):



Квадраты с символом D обозначают задержку на 1 бит, сумматоры суммируют по модулю 2. Первый символ передаются при положении переключателя 1.

Скрэмблер

Используется скрэмблер в соответствии со стандартом CCSDS 131/0-B-3 раздел 10.4.1.

Скрэмблирование осуществляется выполнением операции исключающее или (сложение по модулю 2) с последовательностью, порождённой полиномом:

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

Это M-последовательность длины 255.

Первые 40 бит последовательности приведены ниже:

1111 1111 0100 1000 0000 1110 1100 0000 1001 1010

Код Рида-Соломона

Используется код Рида-Соломона (255,223) в варианте, описанном в стандарте CCSDS 131/0-B-3, раздел 4.

Укорочение кода Рида-Соломона

В случае, если длина блока данных (фрейма с заголовком), определяемого по PLS-коду, меньше, чем длина блока данных кода, производится укорочение кода путём дополнения блока данных нулями спереди до размера блока данных кода Рида-Соломона, кодирования и удаления дополненных нулей перед скремблированием и свёрточным кодированием. На приёмной стороне перед декодированием нули вновь добавляются. Эта процедура называется виртуальным заполнением и основана на том, что код Рида-Соломона является систематическим кодом и не изменяет блок данных при кодировании, а лишь дополняет его контрольными символами. Укорочение кода соответствует пункту 4.3.7 CCSDS 131/0-B-3.

175 байт	48 байт	32 байта
Дополнение нулями	Блок данных	Контрольные символы кода Рида-Соломона

Серым закрашена часть кодируемого блока, отбрасываемого при передаче перед скремблированием и восстанавливаемого при приёме после дескремблирования.

В случае, если кадр данных с заголовком короче блока данных, блок также дополняется справа нулями, но они передаются обычным образом и сокращением кода это не является.

Структура кадра данных

Кадр данных в общем случае предваряется двухбайтным заголовком, состоящим из поля типа, в качестве которого используется IEEE 802.3 EtherType.

Поле длины в общем случае не предусмотрено. При добавлении энкапсуляции в USP(с выделением EtherType) протоколов, опирающихся на внешнее кадрирование, то есть не включающих в себя поле длины, может возникнуть необходимость добавления заголовка с таким поле. Рекомендуется использовать для такого поля

два следующих за полем типа байта в формате little-endian. Длина должна включать в себя все данные, encapsулированные протоколом, но не включать никаких USP-заголовков, то есть в ней считаются данные, начиная со следующего за полем длины байта.

Поле длины кодирует длину полезных данных в байтах, включая все последующие заголовки, но не включая сам заголовок фрейма.

Суммарно блок данных имеет следующий вид:

EtherType	Данные пакета
16 бит	0...221 байт
Big endian	–

В случае encapsуляции протокола, требующего передачи длины, рекомендуется использовать такую структуру:

EtherType	Длина	Данные пакета
16 бит	16 бит	0...219 байт
Big endian	Little endian	–

Контроль целостности данных

USP не использует отдельной контрольной суммы для контроля целостности данных. Он полагается на контроль кода Рида-Соломона, который при указанных параметрах кода обеспечивает достаточную степень проверки.

Передача AX.25 пакетов с использованием USP

Encapsуляция протокола AX.25 выполняется аналогично, но не полностью идентично созданному для таких же целей протоколу AX.25 BPQ.

В поле EtherType в этом случае используется значение 08FFh (big-endian, FF08h в little-endian, выделен неофициально, но де-факто используется в существующих реализациях). Перед началом заголовка AX.25 помещается значение длины, которое несёт длину пакета AX.25, включая AX.25 заголовок. Следует обратить внимание, что такое значение длины не совпадает с реализациями AX.25 BPQ для EtherNet, добавляющими дополнительные 4 байта, во избежание путаницы и проблем, порождаемых несоответствием длины.

При этом не используется HDLC-кадрирование, то есть не передаются флаги и контрольная сумма, а также не используется bit stuffing. Задачу определения длины пакета играет длина из заголовка кадра, а контроль целостности осуществляется средствами USP.

Суммарно блок данных имеет следующий вид:

EtherType = 08FFh*	Длина	Заголовок AX.25	Данные пакета AX.25
16 бит	16 бит	15-31 байт**	0...203 байт
Big endian	Little endian	–	–

*FF08h в little-endian.

**в типичном для космической телеметрии случае применения unnumbered кадров длина заголовка составляет 16 байт. Указанное максимальное число байт данных

указано именно для этого случая. При другой длине заголовка максимальный размер данных должен быть скорректирован.

Для верификации HEX-дампа пакета можно воспользоваться свободной программой Wireshark в режиме dummy header или добавив произвольные 12 байт MAC-адресов в начале дампа.

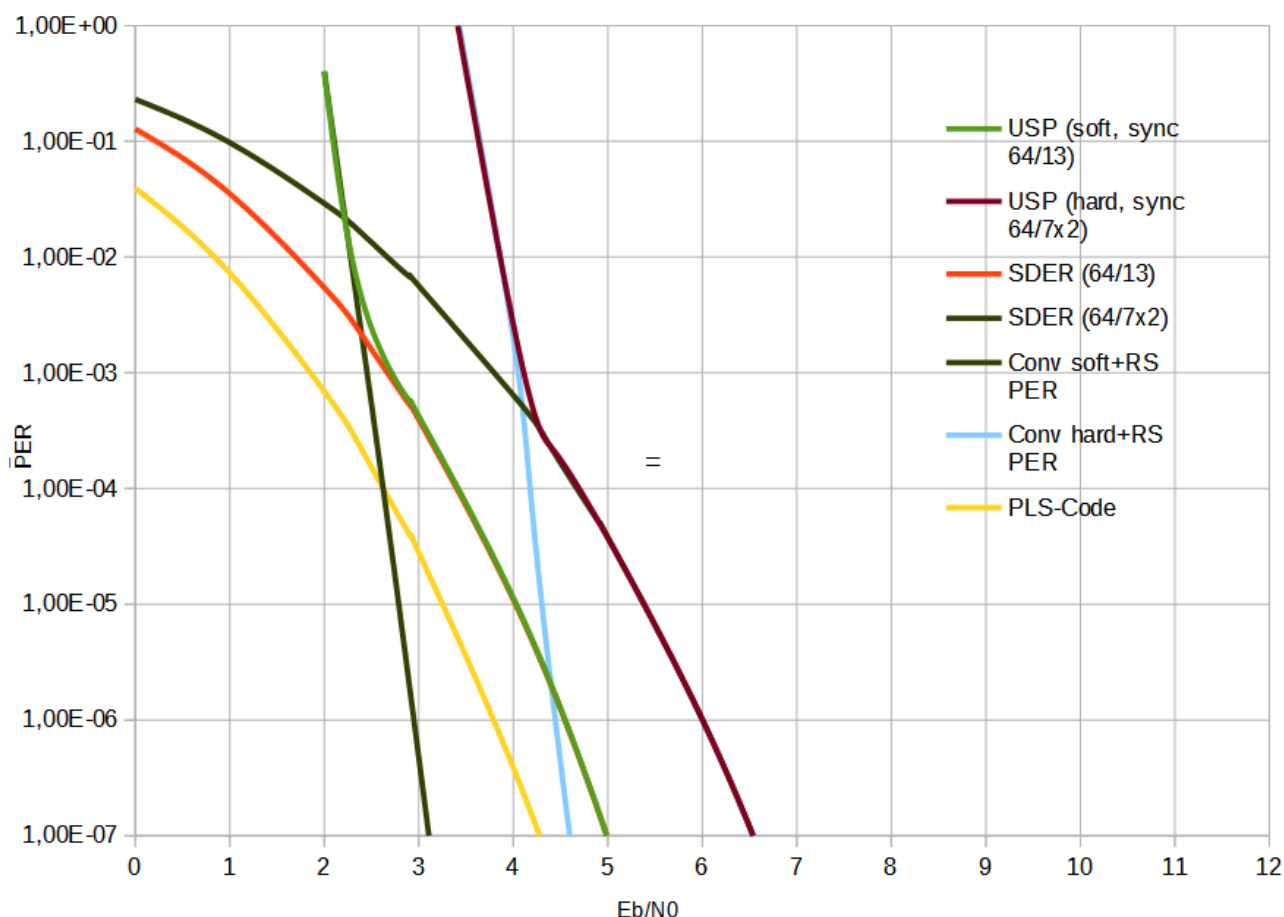
Приложение 1. Энергетические возможности протокола

Энергетические возможности протокола в виде графика E_b/N_0 приведены на графике ниже. График показан в двух вариантах – при применении «мягкого» алгоритма Витерби и детектирования синхропоследовательности с допущением 13 ошибок, и жесткого декодирования с допущением по 7 ошибок в каждой половине синхропоследовательности.

Также показан вклад отдельных составляющих – вероятности ошибки синхронизации, вероятности неправильного приёма PLS-кода и вероятности ошибки при декодировании пакета.

Из графика видно, что при мягком декодировании при $E_b/N_0 \approx 2,8$ обеспечивается вероятность успешного приёма фрейма 99,9% (т. е. $PER \leq 0,001$) для модели аддитивного Гауссова шума (AGWN).

При жестком декодировании та же вероятность успешного приёма обеспечивается при $E_b/N_0 \approx 4,1$, т. е. параметры ухудшаются примерно на 1,5 dB.

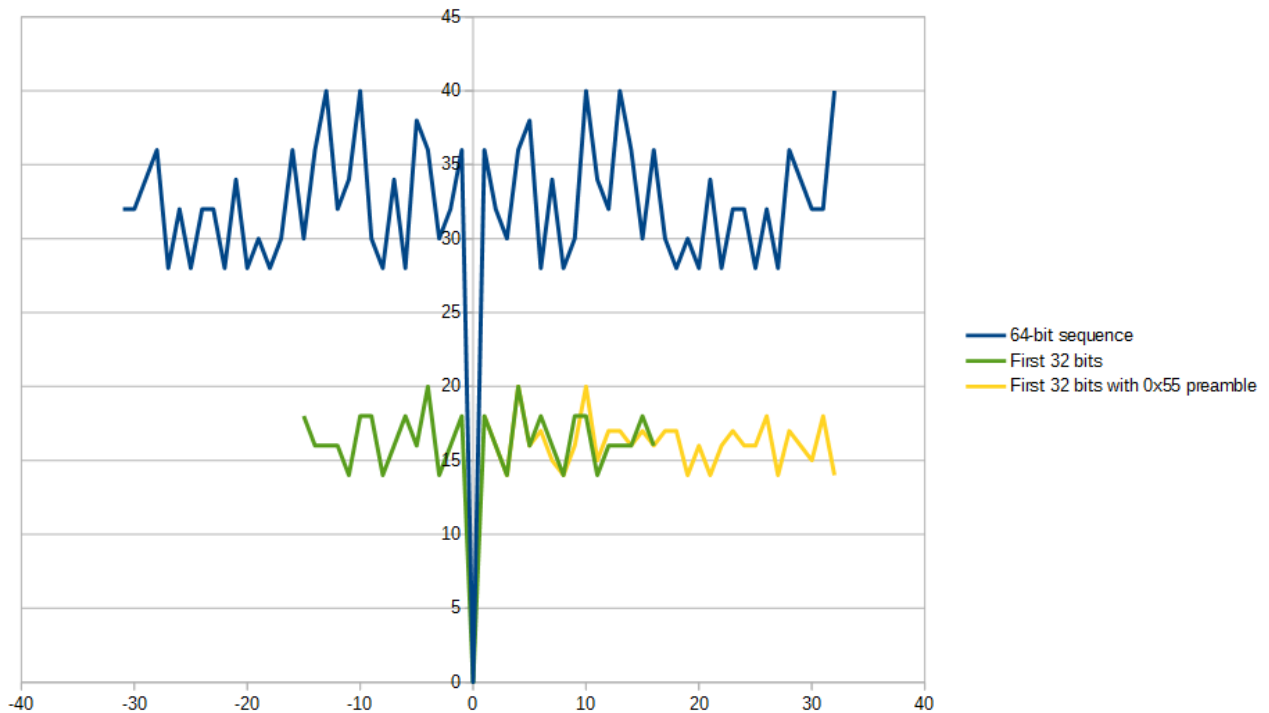


Приложение 2. Синхропоследовательность

Последовательность сбалансирована по числу нулей и единиц, имеет максимально 5 последовательных нулей и 5 последовательных единиц.

Последовательность оптимизирована таким образом, чтобы приемлемую автокорреляцию имела как она сама, так и её первая половина – сама по себе и с добавлением перамбулы.

График автокорреляционной функции для разных вариантов использования в пространстве расстояний Хэмминга приведён на рисунке.



Приложение 3. Обоснование принятых технических решений

Обзор существующих протоколов

Перед созданием собственного протокола были проанализированы уже существующие . В частности, были рассмотрены:

- CCSDS 131/0-B-3 TM synchronisation and channel coding
- Протокол УКВ-приёмопередатчика GOMspace NanoCom U482/AX100 в режиме ASM и ASM+Golay
- Протокол УКВ-приёмопередатчика GOMspace NanoCom U482/AX100 в режиме
- Протокол аппарата AAUSAT-4
- Семейство протоколов FEC аппарата АО-40 и его модификации

Все упомянутые протоколы используют помехоустойчивое кодирование. Ниже приведено краткое описание и причины, по которым протокол не был использован без изменений.

CCSDS 131/0-B-3 TM synchronisation and channel coding

<https://public.ccsds.org/Pubs/131x0b2ec1s.pdf>

Этот протокол лежит в основе USP. Основная проблема при использовании в полудуплексных низкоскоростных линиях – отсутствие возможности динамически менять длину фрейма, что приводит при работе многих протоколов к неэффективному использованию канала, большому раунд-трипу и, как следствие, к замедлению передачи.

Протокол УКВ-приёмопередатчика GOMspace NanoCom U482/AX100 в режиме ASM или ASM+Golay

Этот протокол имеет поле длины, что позволяет использовать короткие пакеты, когда это требуется. Однако, он имеет и недостатки. Протокол использует супс-слово небольшой длины, а также некодированное поле длины, что ограничивает энергетику радиоканала на значениях, далёких от возможностей используемого помехоустойчивого кодирования.

Семейство протоколов FEC аппарата АО-40 и его модификации

<https://www.amsat.org/articles/g3ruh/125.html>

Протокол хорошо оптимизирован с точки зрения работы в условиях замираний и имеет хорошие энергетические возможности. Проблемой является также отсутствие возможности динамически менять длину фрейма.

Изменения

Версия 1.01 Первая опубликованная версия

Версия 1.02 Изменена синхропоследовательность с целью улучшения автокорреляционной функции первой её половины. Это значительно улучшило приём при использовании аппаратных трансиверов.

Версия 1.03 Ещё улучшена синхропоследовательность. Теперь она оптимизирована как по полной автокорреляции, так и по двум частичным – с преамбулой и без.

Версия 1.04 Приложения перенумерованы. Дописано обоснование принятых технических решений.