

Особенности применения оптимальных сигналов в модемах малых космических аппаратов, работающих по стандарту DVB-S2X

А. А. Кузнецова

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

kuznetsova_aa@spbstu.ru

С. В. Завьялов

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

zavyalov_sv@spbstu.ru

А. С. Орлова

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

ovsyannikova_as@spbstu.ru

Аннотация. Широкое применение малых космических аппаратов требует повышения скорости передачи данных при ограниченном времени сеансов связи и сохранении близкой к теоретической помехоустойчивости приема. При использовании протокола DVB-S2X для передачи данных с низкой околоземной орбиты существенным ограничением становятся энергетические возможности бортовых радиотехнических систем, определяющие достижимые скорости передачи и используемое аппаратное обеспечение. В условиях увеличения объемов информации и ограничений на её передачу, технология FTN является одним из способов увеличения пропускной способности. Однако использование традиционных форм импульсов, таких как RRC, при увеличении символьной скорости приводит к заметным энергетическим потерям. Для повышения эффективности систем DVB-S2X в данной статье предлагается использовать оптимальные сигналы, синтезированные с учетом заданных критериев оптимизации. Показано, что применение оптимальных импульсов вместо RRC импульсов позволяет увеличить скорость передачи символов без расширения полосы частот при сохранении высокой помехоустойчивости приема

Ключевые слова: оптимальные сигналы; скорость передачи; малые космические аппараты; DVB-S2X

I. ВВЕДЕНИЕ

Малые космические аппараты (МКА) формата CubeSat активно используются для решения задач дистанционного зондирования Земли, передачи видеоинформации и обеспечения широкополосного доступа. В таких системах критически важно максимизировать скорость передачи данных в условиях ограниченной длительности сеансов связи и необходимости сохранения высокой помехоустойчивости приема. При этом МКА функционируют в условиях жестких ограничений по доступной мощности и аппаратным ресурсам.

Применение стандарта DVB-S2X, в котором используются сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией (APSK) и помехоустойчивое кодирование на основе LDPC, позволяет добиться более высокой спектральной эффективности по сравнению с предыдущей версией DVB-S2 [1]. Тем не менее, для МКА ключевым ограничивающим фактором остается энергоэффективность. Мощность, вырабатываемая солнечными батареями МКА, обычно не превышает 4–10 Вт [2], тогда как энергопотребление передатчиков X-диапазона в ходе сеанса связи может достигать 18–24 Вт

и более [3]. С учетом того, что полное энергопотребление МКА, включая системы обработки сигналов на базе ПЛИС, может приближаться к 50 Вт, достижимая скорость передачи данных существенно ограничена. По опыту эксплуатации спутников Polytech Universe скорость передачи на данный момент составляет 100–300 Мбит/с и требуется увеличение до значений 1 Гбит/с.

Одним из способов повышения пропускной способности является использование технологии FTN (faster-than-Nyquist). Однако при повышении символьной скорости применение классических импульсных форм, таких как RRC-импульсы приводит к энергетическим потерям. В связи с этим перспективным подходом становится использование оптимальных импульсов, синтезированных при различных ограничениях [4–6]. В настоящей работе предлагается заменить стандартные RRC-импульсы на оптимальные, что позволит вдвое увеличить скорость передачи символов без ухудшения помехоустойчивости (BER).

Цель работы – оценка возможности увеличения скорости передачи в пакетном режиме DVB-S2X за счёт использования оптимальных сигналов, обеспечивающих минимальные энергетические потери и построенных на основе амплитудных импульсов, длительность которых превосходит время передачи бита сообщения.

II. ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ОДНОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СТАНДАРТА DVB-S2X

Рассмотрим подход к построению оптимальных одночастотных сигналов для линий связи с малыми космическими аппаратами. В его основе лежит синтез амплитудного импульса $a(t)$, форма которого подбирается с учетом заданных требований к сигналу [7]. Пусть передается случайная последовательность из N амплитудно-модулированных сигналов, каждому из которых соответствует символ канального алфавита длительностью c_r . При длительности импульса $T_a = LT$, где $L \in \mathbb{N}$, амплитуде A_0 , несущей частотой f_0 и символьной скорости $R = 1/\xi T$, $0 < \xi \leq 1$, передаваемый сигнал может быть представлен выражением:

$$y(t) = \operatorname{Re} \left\{ A_0 \sum_{k=0}^{N-1} c_r^{(k)} a(t - k\xi T) \exp(j2\pi f_0 t) \right\}, \quad (1)$$

где $0 \leq t \leq NT$.

Форма импульса $a(t)$ является ключевым элементом исследования, поскольку от его формы зависят такие характеристики спектрально-эффективных сигналов, как вид энергетического спектра последовательности, их корреляционные свойства, влияющие на помехоустойчивость приема, временные характеристики, в частности пик-фактор.

В качестве критерия задачи синтеза оптимальных сигналов в работе используется критерий обеспечения заданной скорости спада внеполосных излучений [8]. Тогда задача оптимизации амплитудного импульса $a(t)$ формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} & \arg \min_{a(t)} J, \\ J &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) |S_a(\omega)|^2 d\omega, \\ S_a(\omega) &= \int_{-T_a/2}^{T_a/2} a(t) \exp(-j\omega t) dt, \end{aligned} \quad (2)$$

где J – оптимизационный функционал; $g(\omega)$ – весовая функция задающая значимость различных участков спектра [5–9] (в данной работе используется квадратичная форма); $S_a(\omega)$ – спектральное представление $a(t)$.

Как показано в работах [5–9], если рассматривать симметричный временной интервал и представлять функцию $a(t)$ в виде конечного ряда Фурье, исходная вариационная задача сводится к задаче поиска функции многих переменных:

$$\begin{aligned} J &= \frac{T_a}{2} \sum_{k=1}^{m-1} a_k^2 \left(\frac{2\pi}{T_a} k \right)^{2n}, \\ a(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{m-1} a_k \cos \left(\frac{2\pi}{T_a} kt \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Для решения задачи предлагается ввести граничные условия, обеспечивающие требуемый темп спада внеполосного излучения [7, 8]. Для дополнительного сужения занимаемой полосы частот целесообразно увеличивать длительность амплитудного импульса, то есть переходить к случаю $T_a > T$. Однако такой выбор приводит к появлению интерференции во времени при сохранении символьной скорости $R=1/T$, что, в свою очередь, ухудшает помехоустойчивость приема.

Для одного и того же размера канального алфавита могут использоваться различные сигнальные созвездия APSK. Они различаются радиусами окружностей r_i ($i = 1, \dots, N_r$), числом точек на каждой окружности $M^{(i)}$ и фазовыми смещениями θ_i . Если точки на i -ой окружности распределены равномерно, то k -ая точка сигнального созвездия APSK $c_k^{(i)}$ записывается в виде [9]:

$$c_k^{(i)} = r_i \exp \left[j \left(\frac{2\pi k}{M^{(i)}} + \theta_i \right) \right], \quad i = 1 \dots N_r, \quad k = 0 \dots M^{(i)} - 1. \quad (4)$$

Рассматривая проекции точек сигнального созвездия только на одну из координатных осей (например, на вещественную), для каждой окружности $M^{(i)}$ можно определить минимальное $c_{\min}^{(i)}$ и максимальное $c_{\max}^{(i)}$ значения вещественной части модуляционных символов.

Тогда коэффициент взаимной корреляции $K_0^{(i)}$ для каждой i -ой окружности, может быть описан как: [9]:

$$\begin{aligned} K_0^{(i)} &= \frac{c_{\max}^{(i)}}{c_{\min}^{(i)}} \max_{p=1 \dots \lfloor L/\xi \rfloor - 1} \{ K_{0,p} \}, \\ K_{0,p} &= \int_{-T_a/2+p\xi T}^{T_a/2} a(t) a(t-p\xi T) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

После преобразования коэффициентов взаимной корреляции для окружностей любого радиуса N_r , получим [9]:

$$\max_{i=1 \dots N_r} \{ K_0^{(i)} \} \leq K_0. \quad (6)$$

Известно, что при выборе $K_0=0,01$ можно обеспечить приём, близкий к потенциально достижимому: энергетический проигрыш в этом случае не превышает 0,5 дБ при вероятности ошибки 10^{-3} [8]. В дальнейшем моделировании использовались следующие параметры: длительность амплитудного импульса $8T$, $n = 2$, $R = 2/T$, $K_0 = 0,01$, $M = 2$ и $M = 64$. Схема модуляции 64-APSK предельный практически значимый вариант для реальных систем DVB-S2X, ориентированных на рост скорости передачи данных в сценарии передачи информации спутник – земля.

Полученные формы импульсов $a(t)$ приведены на рис. 1. Для оптимальных сигналов вида Optimal($M=64$) ширина полосы, измеренная по уровню -50 дБ, составляет $4,2/T$. Для сравнения, при использовании RRC-импульса с коэффициентом скругления 0,05 эта величина равна $5,6/T$. Это указывает на более эффективное использование спектра при применении синтезированных оптимальных импульсов.

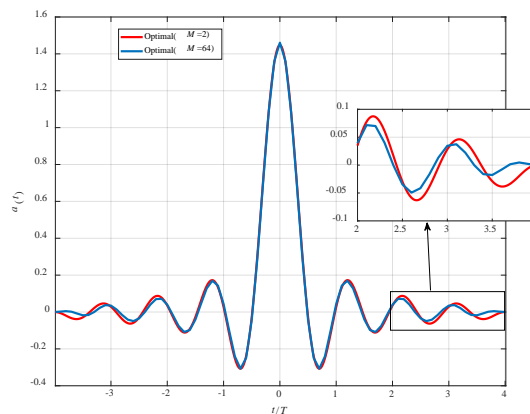


Рис. 1. Результирующие формы амплитудных импульсов

III. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ ПРОТОКОЛА DVB-S2X

Для всесторонней оценки эффективности передачи информации на базе протокола DVB-S2X при использовании оптимальных сигналов был разработан цифровой испытательный стенд в программной среде MATLAB. Блок-схема разработанного цифрового испытательного стенда представлена на рис. 2.

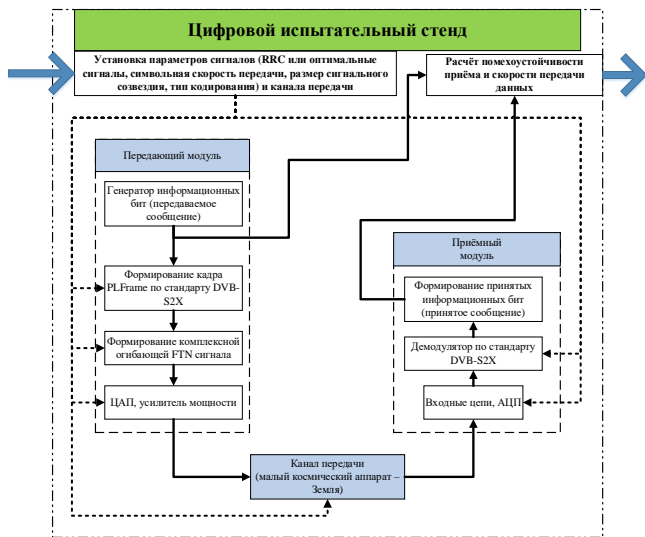


Рис. 2. Блок-схема разработанного цифрового испытательного стенда

Результаты оценки параметров разрабатываемого высокоскоростного модема для малых космических аппаратов при использовании оптимальных одночастотных сигналов стандарта DVB-S2X представлены на рис. 3–7.

Рассмотрим результаты анализа помехоустойчивости приёма для $M=2$ (рис. 3). Видно, что увеличение значения символьной скорости при использовании RRC-сигналов приводит к заметной деградации помехоустойчивости: уже при росте скорости от $R=1/T$ до $R=1,1/T$ энергетические потери составляют около 0,5 дБ. Дальнейшее увеличение скорости делает использование RRC-сигналов неэффективным. В отличие от них, оптимальные сигналы учитывают возникающую интерференцию на этапе синтеза. При $M=2$ и $N_{iter}=50$ энергетические потери не превышают 0,05 дБ при $BER=10^{-5}$, а при $N_{iter}=50$ достаточном для обеспечения скорости не менее 1 Гбит/с, – менее 0,15 дБ по сравнению с RRC-сигналами.

Показано также, что оптимальные сигналы могут применяться для схем модуляции от QPSK до 64APSK (рис. 4). При $R=2/T$ и переходе от $M=2$ к $M=64$ энергетические потери возрастают до 7,5 дБ при $BER=10^{-5}$, однако требуемое отношение E_b/N_0 остаётся ниже 15 дБ, что подтверждает работоспособность подхода.

Учет формы сигнального созвездия и скорости кодирования при синтезе оптимальных сигналов для $M=64$ позволяет получить дополнительный энергетический выигрыш более 0,5 дБ (рис. 5). В итоге переход от RRC-сигналов к оптимальным сигналам позволяет увеличить спектральную эффективность с 1,2 до 2,4 (бит/с)/Гц.

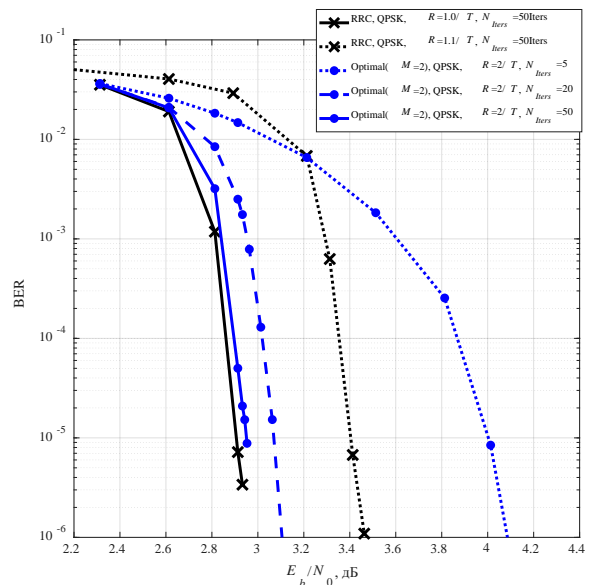


Рис. 3. Помехоустойчивость приёма ($M=2$)

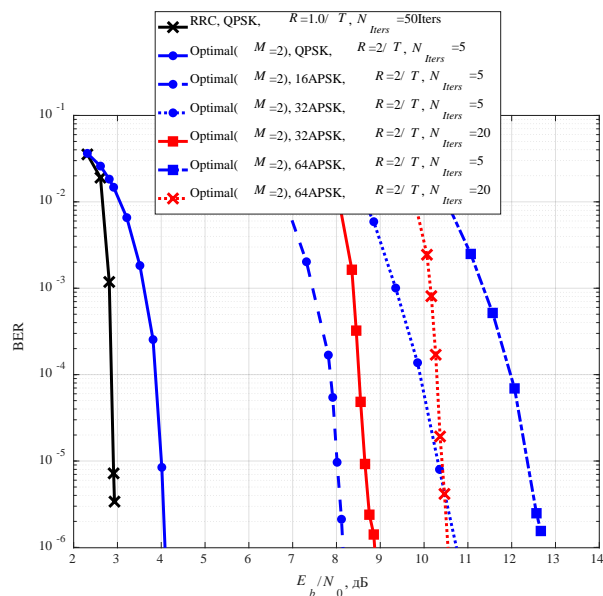


Рис. 4. Помехоустойчивость приёма для различных схем модуляций и разного количества итераций декодирования

На рис. 6 представлена помехоустойчивость приёма при различной ошибке в определении начала пакета. Показано, что допустима ошибка $0,03T$, что всё равно обеспечивает отношение сигнал-шум E_b/N_0 менее 15 дБ.

На рис. 7–8 приведены результаты анализа требуемой разрядности ЦАП/АЦП. Видно, что для обеспечения энергетического проигрыша не более 0,1 дБ относительно случая идеального ЦАП/АЦП требуется использовать значение разрядности более 6 бит. В то же время для обеспечения спектральных характеристик, которые будут укладываться в спектральные маски и не допускать увеличения уровня внеполосных излучений более чем на 3 дБ, требуется использовать разрядность ЦАП/АЦП более 10 бит. В итоге рекомендуемым значением разрядности ЦАП/АЦП для дальнейшего использования является 12–14 бит.

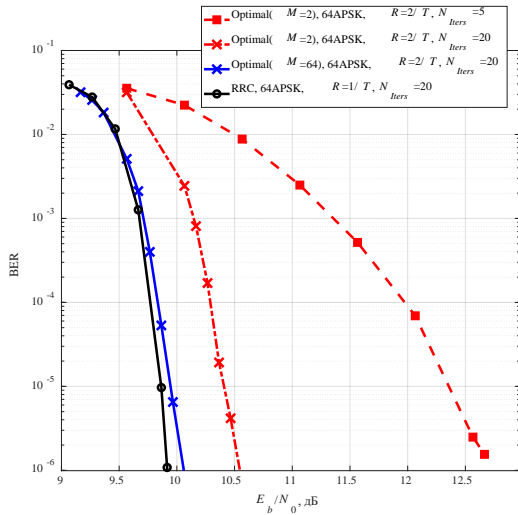


Рис. 5. Помехоустойчивость приёма для различных схем модуляций и разного количества итераций декодирования

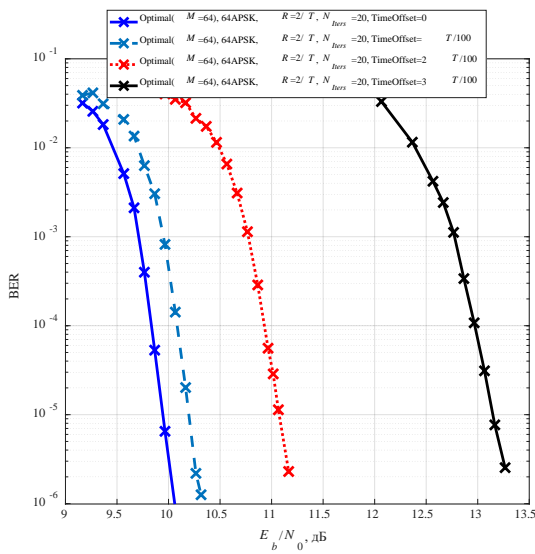


Рис. 6. Помехоустойчивость приёма при различной ошибке в определении начала пакета

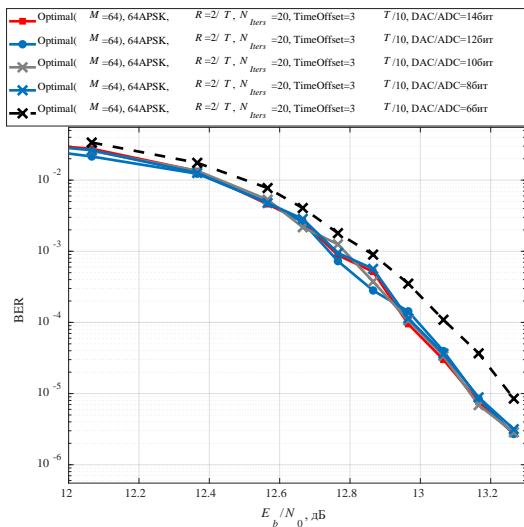


Рис. 7. Помехоустойчивость приёма при различной разрядности ЦАП/АЦП

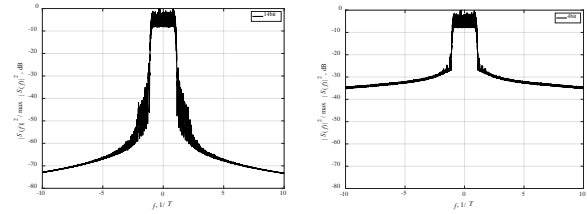


Рис. 8. Спектральные характеристики при различной разрядности ЦАП/АЦП

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показана возможность применения оптимальных сигналов в системе передачи данных в соответствии со стандартом DVB-S2X. Методом имитационного моделирования показано, что использование оптимальных сигналов приводит к возможности удвоения скорости передачи в отведенной полосе частот в два раза при минимальных энергетических потерях. Сформулированы требования к ЦАП/АЦП и по точности синхронизации при использовании предлагаемой сигнально-кодовой конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A.-F. B. Ali Bachir, M. Zhou and M. Ahmed, "Modeling and Design of a DVB-S2X system," 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), Kenitra, Morocco, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOA.2019.8727700.
- [2] S. S. Arnold, R. Nuzzaci and A. Gordon-Ross, "Energy budgeting for CubeSats with an integrated FPGA," 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2012, pp. 1-14, doi: 10.1109/AERO.2012.6187240.
- [3] A. Zeedan and T. Khattab, "CubeSat Communication Subsystems: A Review of On-Board Transceiver Architectures, Protocols, and Performance," in IEEE Access, vol. 11, pp. 88161-88183, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304419.
- [4] Гельгор А.Л. Повышение спектральной эффективности DVB-S2 путём применения сигналов с управляемой интерференцией и финитными импульсами // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 37-47.
- [5] S. V. Makarov et al., "Optimizing the Shape of Faster-Than-Nyquist (FTN) Signals with the Constraint on Energy Concentration in the Occupied Frequency Bandwidth," in IEEE Access, vol. 8, pp. 130082-130093, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009213.
- [6] Гельгор А.Л., Гельгор Т.Е. Новые формы импульсов для сигналов с частичным откликом, обеспечивающие выигрыш по отношению к сигналам faster-than-nyquist // Радиотехника. 2018. № 12. С. 39-48.
- [7] Овсянникова А.С., Макаров С.Б., Завьялов С.В., Волвенко С.В. Оценка степени приближения информационной системы к границам Шеннона путем использования оптимальных по критерию максимальной концентрации энергии в полосе частот сигналов // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 1. С. 5-22.
- [8] Макаров С.Б., Завьялов С.В., Овсянникова А.С. Оптимизация формы сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией с использованием критерия заданной скорости спада уровня внеполосных излучений // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 4. С. 6-22.
- [9] Овсянникова, А. С. Помехоустойчивость приема оптимальных сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией на концентрических окружностях / А.С. Овсянникова // Вopr. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2024. № 2. С. 3-15.