

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.23>

УДК: 621.39

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СИГНАЛА DVB-S2

С.А. Левичев, К.К. Янситов, С.В. Дорохин, А.В. Дворкович

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

Статья поступила в редакцию 26 октября 2023 г.

Аннотация. В работе исследуются схемы частотной синхронизации приема сигнала системы спутниковой связи на основе стандарта DVB-S2 с различными комбинациями алгоритмов грубой и тонкой частотной синхронизации, а именно, рассматриваются следующие пары алгоритмов: «Edge band» и «Delay & Multiply», «Delay & Multiply» и «L&R», «Edge band» и «L&R», где первый алгоритм в каждой паре выполняет задачу грубой, а второй – тонкой частотной синхронизации. Проводится оценка точности исследуемых схем частотной синхронизации по метрике среднеквадратичной ошибки (СКО) оценки частотного смещения в канале. Кроме того, в качестве параметра сравнения также используется оценка времени синхронизации. Частотный сдвиг в канале передачи сигнала задан постоянным и равным 20% от ширины полосы сигнала. Применение комбинаций Non-Data-Aided (NDA) алгоритмов для грубой оценки частотного сдвига и Data-Aided (DA) алгоритмов для тонкой частотной синхронизации позволяет добиться уменьшения времени синхронизации почти в 2 раза при сохранении высокой точности оценки по СКО.

Ключевые слова: спутниковая связь; физический уровень; DVB-S2; частотная синхронизация.

Финансирование: Работа выполнена в Московском физико-техническом институте при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-11-2021-047.

Автор для переписки: Левичев Сергей Алексеевич, levichev.sa@phystech.edu

Введение

На сегодняшний день спутниковые системы связи становятся все более привлекательными для организации доступа населения к сети Интернет в труднодоступных регионах из-за проблемного ландшафта или из-за сложности эксплуатации базовых станций в выбранной местности [2,3]. Для таких регионов перспективным решением было бы наладить широкополосный доступ к сети Интернет через спутниковые группировки, тем самым решая проблему цифрового неравенства в доступе к сети Интернет [4]. Наряду с этим геостационарная орбита становится все более дорогим ресурсом для размещения спутников, из-за чего фокус смещается в сторону негеостационарных орбит, таких как низкая околоземная орбита, средняя околоземная орбита и высокая эллиптическая орбита. Использование подобных орбит для организации связи влечет за собой дополнительные требования к системе синхронизации сигнала на приеме, особенно к подсистеме частотной синхронизации из-за наличия существенного доплеровского смещения в канале.

Наиболее распространенным в настоящее время стандартом для систем спутниковой связи является стандарт DVB-S2 [5] и его расширение DVB-S2X [6]. Данный стандарт стал популярным вследствие поддержки связи в широком диапазоне скоростей передачи данных и отношений сигнал-шум (ОСШ): от -10 дБ до 30 дБ и выше.

Целью данного исследования является анализ различных схем частотной синхронизации для обеспечения быстрой и точной компенсации частотного сдвига в приемной аппаратуре в совокупности с другими блоками синхронизации, такими как символьная и кадровая синхронизация.

1. Общее описание схемы синхронизации приемника

Рассматривая схему синхронизации [7] на рисунке 1, необходимо отметить особенности архитектуры синхронизации стандарта DVB-S2 [8,9]. Блок-схема синхронизации включает блоки согласованного фильтра, символической синхронизации с передискретизацией сигнала, кадровой синхронизации, грубой частотной синхронизации, дескремблера физического уровня (Physical Layer – PL), фазовой синхронизации и тонкой частотной синхронизации.



Рис. 1. Блок-схема синхронизации, согласно стандарту DVB-S2 [8]

Главной проблемой данной системы синхронизации является полная зависимость блока частотной синхронизации от наличия кадровой синхронизации и корректности работы PL дескремблера, так как без этих этапов обработки нет возможности использовать заголовки и пилот-сигналы для частотной и фазовой синхронизации. Кроме того, при наличии большого частотного смещения сигнала в канале качество принятого сигнала существенно снижается, что приводит к дополнительным ошибкам при демодуляции этого сигнала. Причина ухудшения сигнала при наличии частотного смещения в принятом сигнале заключается в подавлении полезной полосы сигнала и в просачивании вне полосовых шумов внутрь полосы пропускания фильтра. Иллюстрация данного эффекта представлена на рисунке 2.

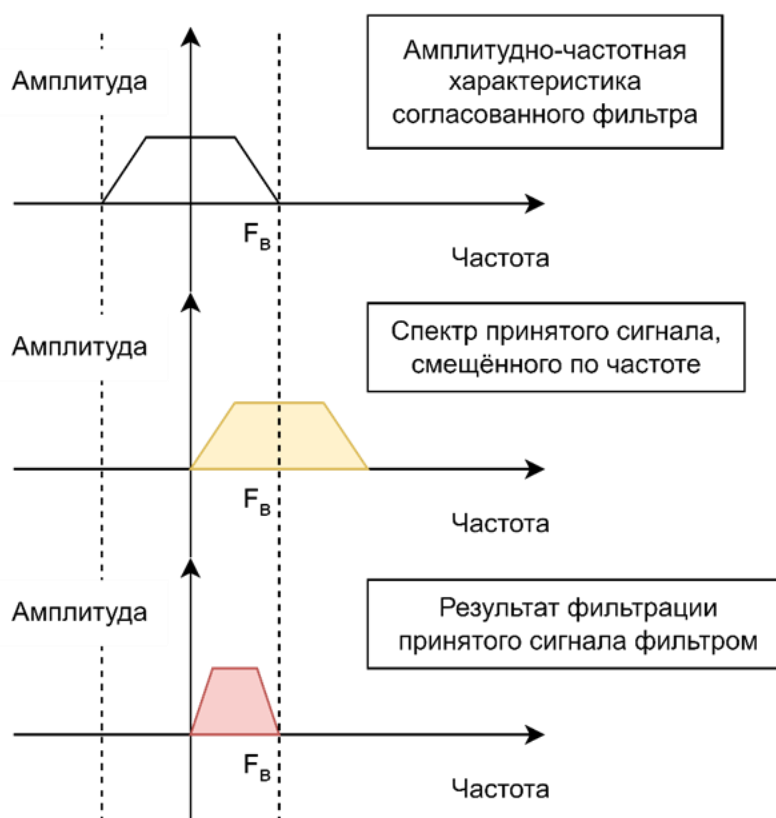


Рис. 2. Работа блока согласованной фильтрации при обработке сигнале с частотным смещением

Большой частотный сдвиг (более 20% полосы сигнала) приводит к существенному снижению ОСШ после фильтрации [8], что, в свою очередь, приводит к ухудшению работы всех блоков синхронизации.

Стандарт предусматривает встраивание пилот-сигнала в полезный сигнал, состоящий из символов данных и заголовка. Правила встраивания пилотов и заголовков определены кадровой структурой стандарта физического уровня DVB-S2 [5]. Алгоритмы грубой и тонкой частотной синхронизации в стандарте DVB-S2 и DVB-S2X основаны на использовании априорно известного сигнала, которым может выступать как заголовок кадра, так и пилот-сигнал. Семейство алгоритмов, которые для оценки используют заведомо известные параметры сигнала, называется Data-Aided (DA) алгоритмами [1].

2. Символьная синхронизация

Для символьной синхронизации был выбран режим без обратной связи (FeedForward – FF) с детектором Ли частотной ошибки (Timing Error Detector Lee

– TED Lee) [1], блок-схема представлена на рисунке 3. При такой работе блока символьной синхронизации после согласованной фильтрации необходимо оценить временное смещение принятого сигнала. Эту оценку выполняет блок детекции временной ошибки. Так как используется система с прямой связью, то здесь не требуется наличие петлевой фильтрации, таким образом сигнал оценки временной ошибки поступает на блок исправления временной ошибки. Задача этого блока состоит в осуществлении контроля работы блока интерполяции, что приводит к исправлению временного смещения сигнала и, как следствие, к обеспечению символьной синхронизации.

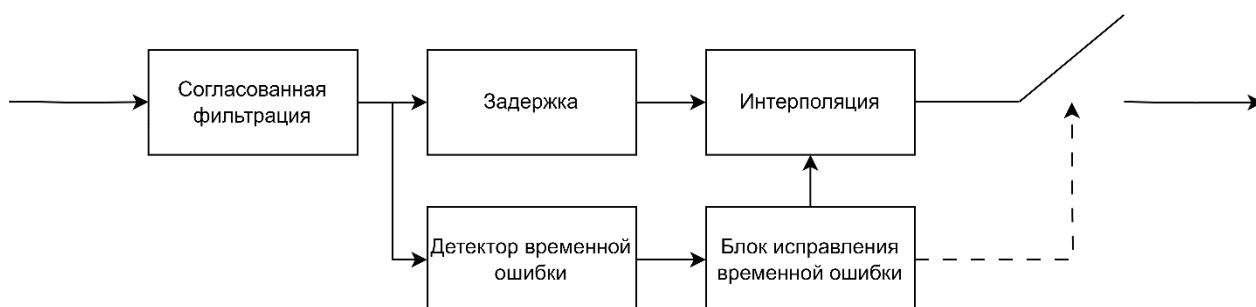


Рис. 3. Блок-схема символьной синхронизации при использовании петли прямой связи [1]

Основное требование для работы детектора Ли – обрабатываемый сигнал должен иметь в 2 раза большую частоту дискретизации, чем полоса сигнала, то есть на 1 символ должно приходиться 2 отсчета. Преимуществом детектора Ли является то, что он не требует наличия пилот-сигнала, так как он работает в «слепом» (blind) режиме, также называемом NDA (Non-Data-Aided). Оценка временной ошибки $e(m)$ на детекторе описывается следующей формулой [1]:

$$e(m) = \frac{1}{2\pi} \arg \left\{ \sum_{k=mLN+1}^{(m+1)LN} |r(k)|^2 e^{-jk\pi} + \operatorname{Re}\{r(k)r^*(k-1)\} e^{-j(k-0,5)\pi} \right\}, \quad (1)$$

где $r(t) = x(t - \tau)e^{j(2\pi\Delta ft + \theta)} + v(t)$ – сигнал на приемнике после согласованной фильтрации, $x(t)$ – выходной сигнал передатчика, $v(t)$ – аддитивный гауссовский шум, сигналы дискретизируются в моменты времени $t = k \frac{T_s}{N}$, τ – временная задержка сигнала, которая может определена в диапазоне $\left(-\frac{T_s}{2}; \frac{T_s}{2}\right]$, T_s – длительность одного символа, N – параметр передискретизации

исходного сигнала, θ – фаза принятого сигнала, Δf – частотное смещение сигнала, L – параметр, определяющий работу детектора.

3. Кадровая синхронизация

Кадровая синхронизация использует пиковый детектор и расстояние между корреляционными пиками соседних кадров. Корреляция принятого сигнала с SOF-последовательностью (Start-of-Frame) и PLSCODE (Physical Layer Signaling Code) производится по дифференциальным коэффициентам в скользящем окне [10]. Основная проблема подобной синхронизации заключается в накоплении 2 кадров IQ символов, что приводит к существенным задержкам между блоком оценки частоты (Frequency Error Detection – FED) и компенсацией частотного смещения перед согласованной фильтрацией.

4. Определение точности частотной синхронизации на основе алгоритмов «Delay & Multiply» и «L&R»

В соответствии со стандартами DVB-S2 и DVB-S2X одной из первых рассматриваемых моделей частотной синхронизации является комбинация грубой частотной синхронизации на основе алгоритма «Delay & Multiply» («D&M») и тонкой частотной синхронизации на основе алгоритма «L&R». Блок-схема представлена на рисунке 4.

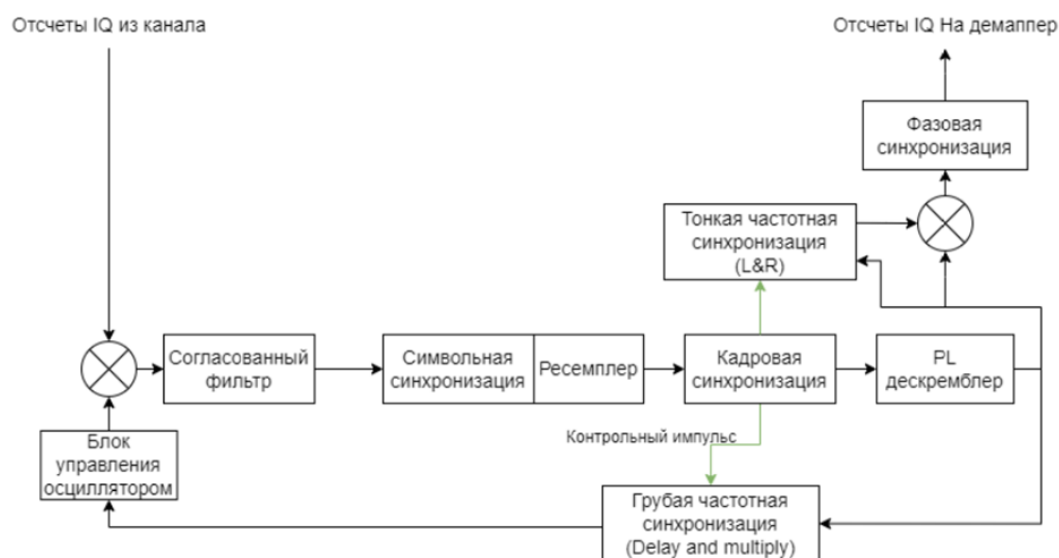


Рис. 4. Блок-схема синхронизации на основе алгоритмов из стандарта DVB-S2 [7, 1]

Алгоритм «D&M» относится к классу DA алгоритмов оценки частотного сдвига, имеет слабую устойчивость при низких ОСШ и способен компенсировать частотное смещение в диапазоне $|\hat{f}| < \frac{1}{2D}$, где D – расстояние между отсчетами, которые участвуют в расчете разности, $\Delta f = \frac{\hat{f}}{B}$ – нормированная оценка частотная сдвига, B – полоса занимаемая отправленным сигналом. Формула для оценки частотного сдвига имеет вид [1]:

$$\hat{f} = \frac{1}{2\pi D} \arg \left\{ \sum_{k=D}^{L-1} z(k)z^*(k-D) \right\} \quad (2)$$

где $z(k) = r(k)s^*(k)$ – сигнал с удаленной несущей, $r(k)$ – принятый пилот-сигнал или заголовок, $s(k)$ – исходные пилот-сигнал или заголовок, L – количество символов, задействованных в расчетах, иначе говоря, длина усреднения оценки.

В свою очередь «L&R» тоже является DA алгоритмом, который широко используется в системах связи благодаря широкому диапазону захвата частоты $|\hat{f}| < \frac{1}{N+1}$, где N – количество элементов автокорреляции, задействованных в оценке частоты. Для расчета этой оценки используется формула [1]:

$$\hat{f} = \frac{1}{\pi(N+1)} \arg \left\{ \sum_{m=1}^N R(m) \right\} \quad (3)$$

где $R(m) = \frac{1}{L-m} \sum_{k=m}^{L-1} z(k)z^*(k-m)$ – функция автокорреляции.

Так как оба алгоритма работают на основе априорно известной информации (DA-алгоритмы), пилот-сигнала или заголовков, то момент начала работы оценок совпадает с появлением кадровой синхронизации и проведением PL-дескреблирования принятого сигнала. Только в таком случае можно получить пилот-сигнал или заголовок. При нахождении начала кадра начинает использоваться результат оценки частотного смещения с помощью «D&M» [11], в то время как оценка с «L&R» не учитывается при компенсации частотного сдвига до тех пор, пока основной частотный сдвиг не будет скомпенсирован при помощи «D&M». Как только результат оценки «D&M» при обратной связи

становится ниже $5 \cdot 10^{-2}$ от нормированной полосы сигнала, выход грубой частотной синхронизации фиксируется, и дальнейшая компенсация частотного смещения производится при помощи тонкой частотной синхронизации «L&R». Такое условие на переключение между режимами работы системы необходимо, чтобы добиться устойчивости схемы частотной синхронизации. Результаты работы данной схемы показаны на рисунке 5. Здесь представлено среднеквадратичное отклонение ошибки оценки частотного сдвига в единицах нормированной частоты от номера символа.

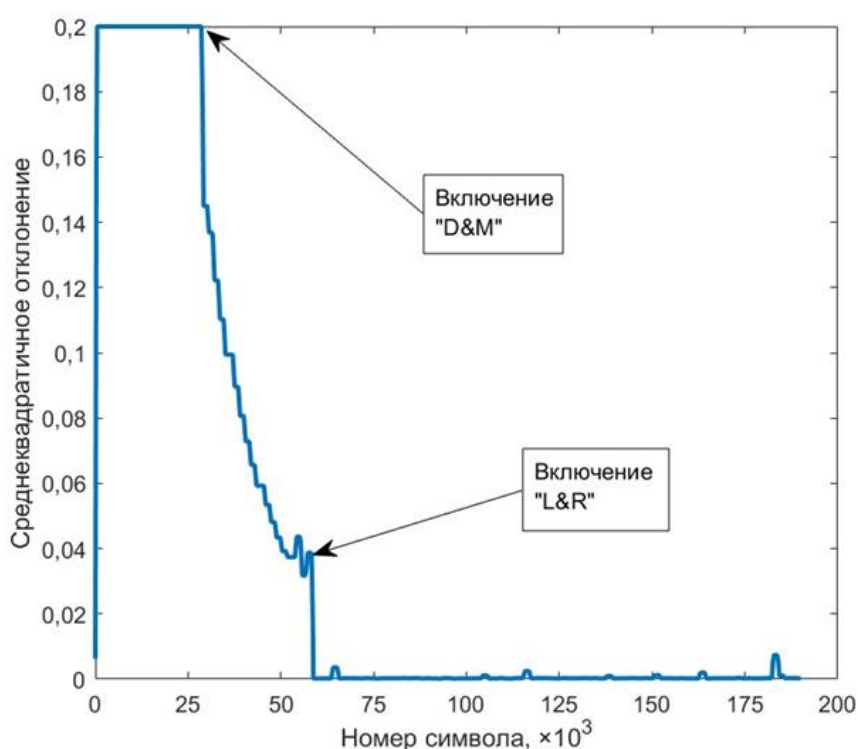


Рис. 5. Среднеквадратичное отклонение оценки частотного сдвига на основе алгоритмов синхронизации «D&M» и «L&R» при $E_s/N_0 = 33$ дБ

Из графика видно, что начало компенсации происходит с запозданием: момент активации грубой частотной синхронизации происходит в районе 28 630 символов. Как было сказано ранее, такая задержка является следствием наличия в общей схеме синхронизации задержки кадровой синхронизации. Приблизительно за 29 590 символов алгоритм «D&M» компенсирует основной частотный сдвиг. После этого происходит активация тонкой частотной синхронизации. Ей требуется приблизительно 505 символов, чтобы понизить

среднеквадратичную ошибку до уровня $2 * 10^{-4}$ относительно нормированного частотного сдвига.

5. Определение точности частотной синхронизации на основе алгоритмов «Edge band» и «Delay & Multiply»

Одним из вариантов сокращения времени синхронизации является применение системы оценки частотного смещения на основе NDA алгоритмов, например «Edge Band», как элемента грубой оценки частотного смещения в канале. Встраивание NDA алгоритмов для оценки частотного смещения в канале может способствовать сокращению задержки сигнала между блоками оценки частотного сдвига и его компенсации и позволит сократить время синхронизации для системы в целом. Иными словами, такой подход позволяет сократить задержку петли обратной связи от выхода компенсатора до входа компенсатора. В данном случае в расчете задержки участвуют только блоки согласованной фильтрации, операция взятия арктангенса комплексного числа, петлевой фильтр и цифровой генератор управления. В то же время для схемы синхронизации такая петля содержит в себе следующую цепочку блоков с задержками: согласованная фильтрация, символьная синхронизация, кадровая синхронизация, дескремблер физического уровня, расчет фазового детектора «D&M», петлевой фильтр, генератор, управляемый напряжением. Таким образом встраивание алгоритма «Edge Band» как элемента грубой частотной синхронизации позволяет сократить цепь задержки.

Сам алгоритм «Edge Band» основывается на подсчете энергии в положительной и отрицательной части спектра сигнала. Для этого подсчета используется фильтр, параметры которого напрямую зависят от параметров согласованной фильтрации [12]. Блок-схема работы алгоритма представлена на рисунке 6.

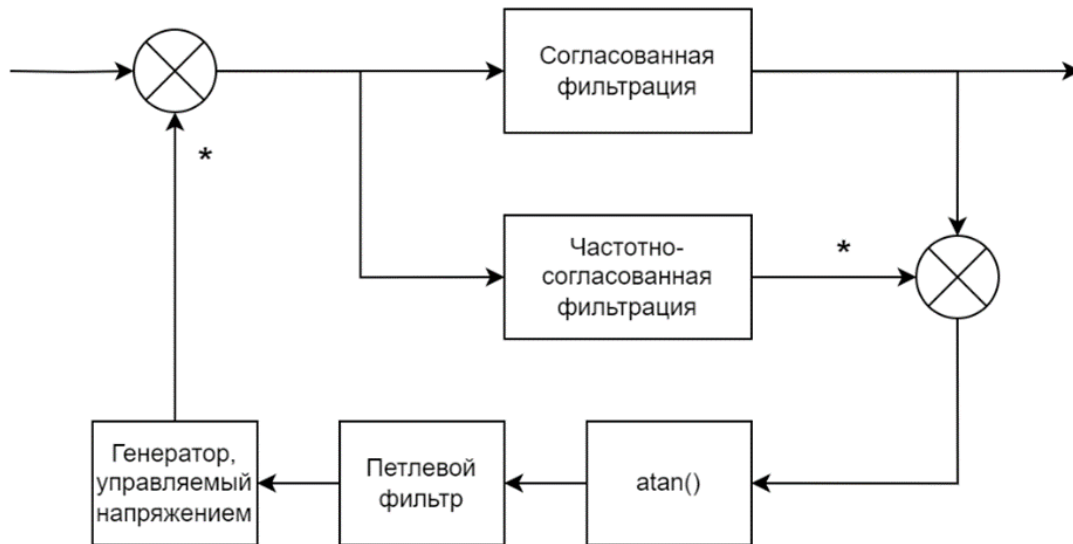


Рис. 6. Блок-схема частотной синхронизации на основе алгоритма «Edge-band» [12]

Одной из предлагаемых схем для частотной синхронизации является комбинация алгоритма «Edge Band», используемого для грубой частотной синхронизации, и «D&M», применяемого для тонкой частотной синхронизации. Блок-схема такой комбинации алгоритмов представлена на рисунке 7.

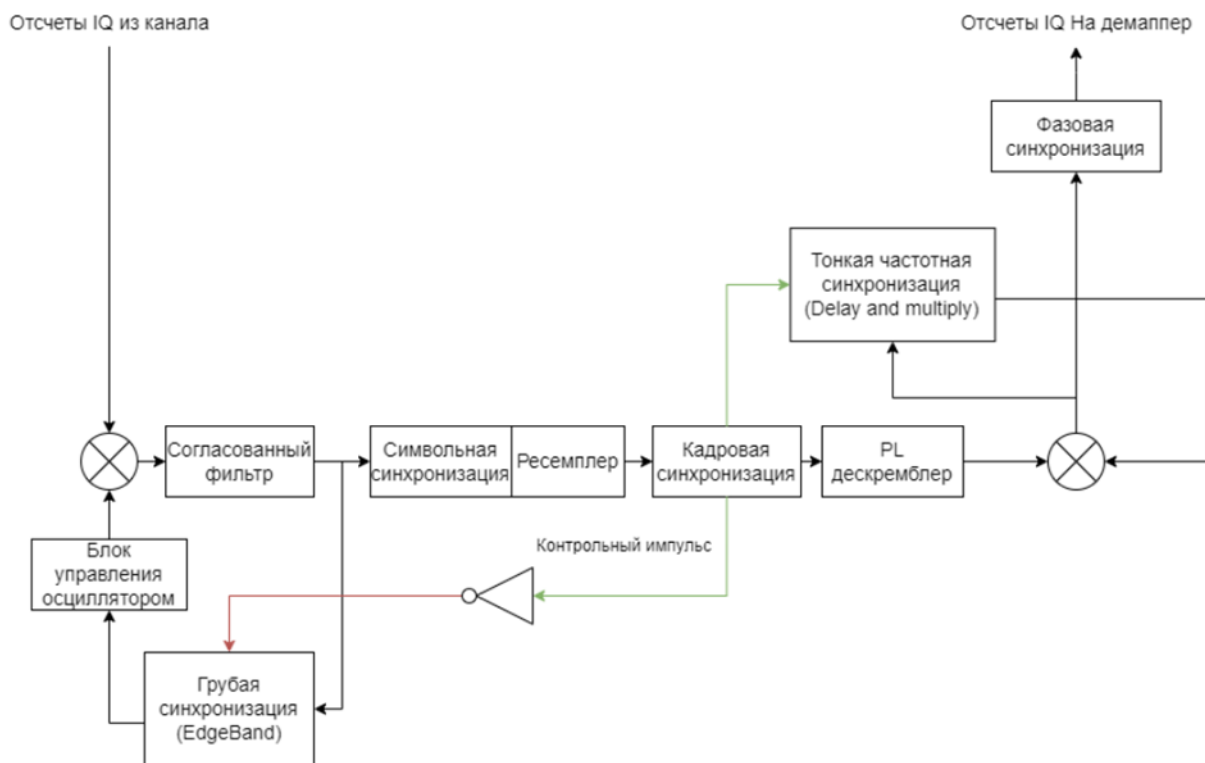


Рис. 7. Блок-схема синхронизации на основе алгоритмов «Edge Band» и «D&M»

Принцип активации грубой или тонкой частотной синхронизации зависит от состояния кадровой синхронизации. Если кадровая синхронизация еще не

осуществилась в системе, значит оценка частотного смещения используется на основе алгоритма «Edge band». Как только кадровой синхронизации удастся определить позицию начала кадра и успешно проводится PL-дескремблирование, то оценка на выходе «Edge Band» фиксируется и компенсация частотного сдвига осуществляется на основе «D&M» алгоритма. Такое решение позволяет ускорить частотную синхронизацию и при этом сохранить высокую точность оценки. На рисунке 8 представлен график зависимости среднеквадратичной ошибки оценки частоты в единицах нормированной частоты от номера символа. Алгоритм «Edge Band» начинает предоставлять оценку почти сразу после запуска приемника.

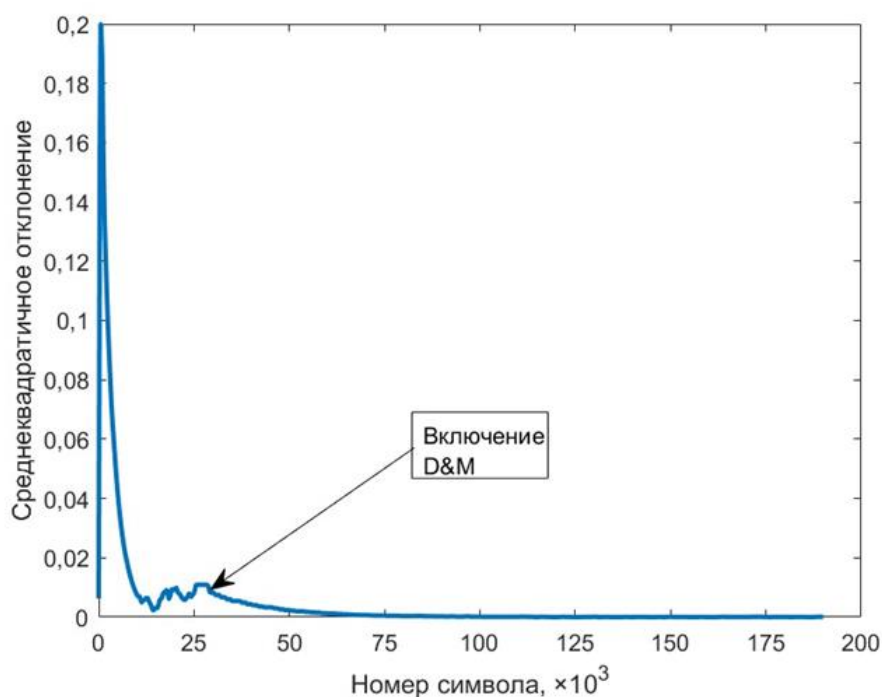


Рис. 8. Среднеквадратичное отклонение частотного сдвига на основе алгоритмов синхронизации «Edge Band» и «D&M» при $E_s/N_0 = 33$ дБ

Так как алгоритм «Edge Band» начинает работать сразу после начала приема сообщения, заметен выигрыш по времени синхронизации. Частотный сдвиг в 20% от ширины полосы был скомпенсирован за 28 550 символов, что примерно в 2 раза быстрее аналогичной схемы на основе сочетания алгоритмов «D&M» и «L&R». Но точность такой синхронизации довольно низкая, ошибка составила 1% от ширины полосы. С другой стороны, последующее включение алгоритма «D&M» позволило понизить ошибку до 10^{-3} за 34 695 символов.

6. Определение точности частотной синхронизации на основе алгоритмов «Edge-band» и «L&R»

Следующей парой алгоритмов для исследования выбрана пара «Edge-band» и «L&R». Блок-схема устройства синхронизации представлена на рисунке 9. Как и в случае с реализацией алгоритмов «Edge-band» и «D&M», «Edge-band» является NDA алгоритмом и работает до кадровой синхронизации. После кадровой синхронизации алгоритм «L&R» выступает в качестве тонкой частотной синхронизации.

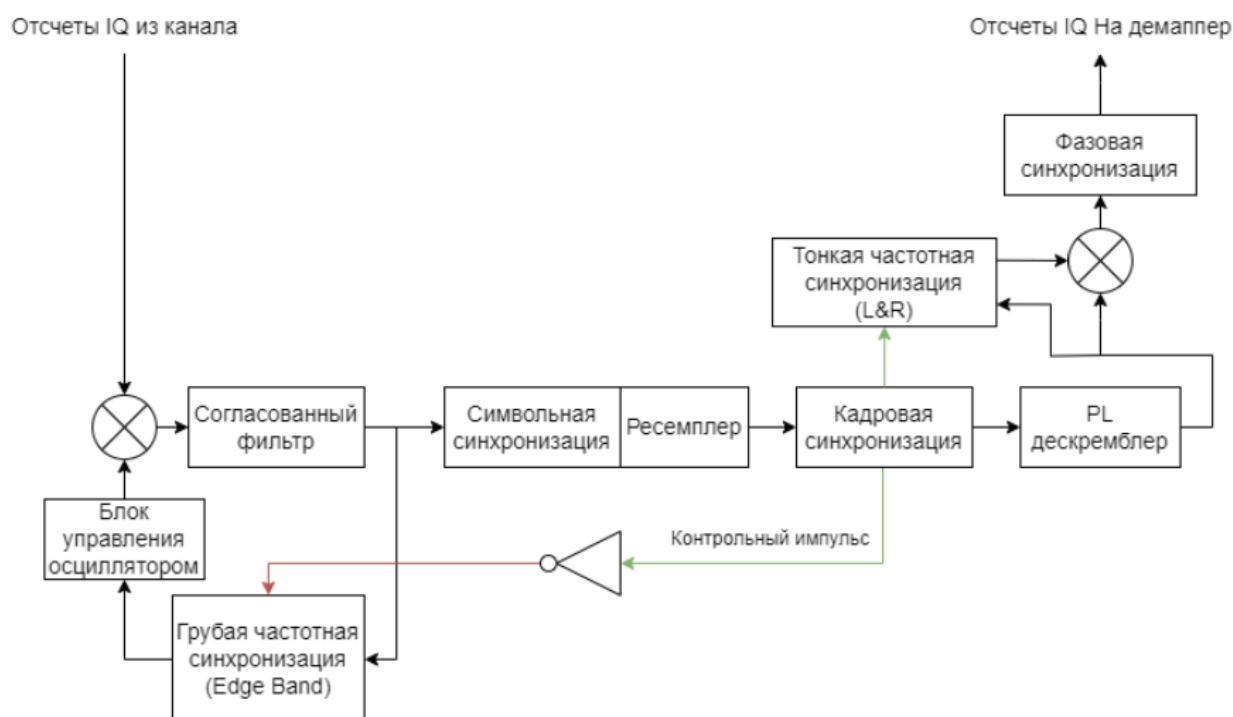


Рис. 9. Блок-схема синхронизации на основе алгоритмов «Edge Band» и «L&R»

Такой подход должен позволить обеспечить высокую скорость синхронизации и высокую точность оценки. Результаты можно наблюдать на рисунке 10. Как видно на графике, суммарное время синхронизации с выходом на плато на уровень в $5 * 10^{-5}$ составляет 29 095 символов. Такой результат одновременно демонстрирует и высокую скорость синхронизации, и высокую точность синхронизации по сравнению с остальными рассмотренными методами.

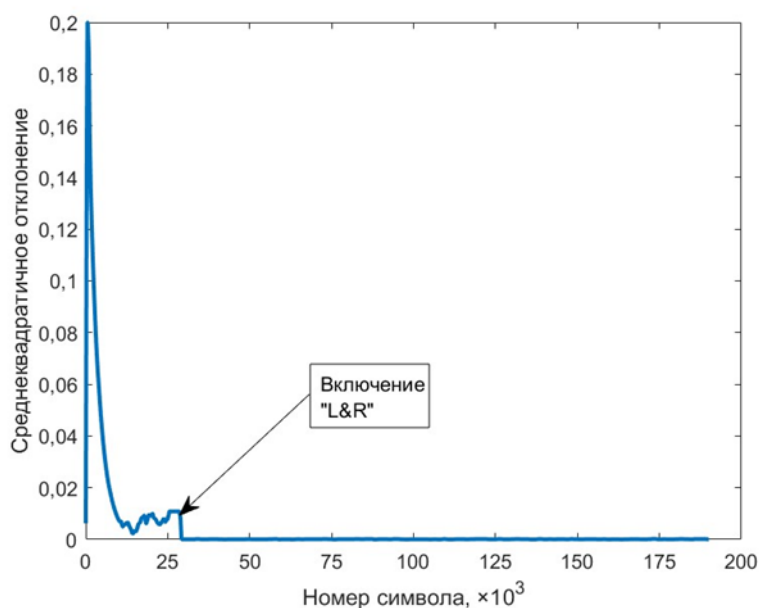


Рис. 10. Среднеквадратичное отклонение частотного сдвига на основе алгоритмов синхронизации «Edge Band» и «L&R» при $E_s/N_0 = 33$ дБ

7. Сравнение алгоритмов частотной синхронизации

Одним из критериев для сравнения эффективности работы схем частотной синхронизации является сопоставление времени, которое было затрачено на синхронизацию. В таблице 1 представлено время работы системы на каждом этапе синхронизации: от ожидания кадровой синхронизации до времени завершения тонкой частотной синхронизации и суммарное время, затраченное на частотную синхронизацию.

Таблица 1. Сводная таблица, времени и точности частотной синхронизации при различных схемах синхронизации

	Время активации грубой частотной синхронизации, $\times 10^3$ символов	Время работы грубой частотной синхронизации, $\times 10^3$ символов	Время работы тонкой частотной синхронизации, $\times 10^3$ символов	Суммарное время синхронизации схемы, $\times 10^3$ символов	Точность синхронизации, доля нормированной полосы
«D&M» и «L&R»	28,6	29,6	0,5	58,7	$2 * 10^{-4}$
«Edge- band» и «D&M»	0	28,5	34,7	63,2	$1 * 10^{-3}$
«Edge- band» и «L&R»	0	28,5	0,5	29	$5 * 10^{-5}$

Наличие грубой частотной синхронизации, основанной на NDA алгоритмах, позволяет ускорить синхронизацию за счет того, что алгоритмы работают независимо от кадровой синхронизации. Также время будет зависеть от параметров алгоритмов. Так, по результатам таблицы 1 можно утверждать, что наиболее быстрая частотная синхронизация была достигнута с помощью схемы «Edge-band» и «L&R» и составила 29 тыс. символов. Одновременно с тем, данная схема показала лучшую точность синхронизации по среднеквадратичному отклонению оценки смещения частоты в канале, что делает эту схему наиболее перспективной для дальнейшего исследования.

Кроме того, в работе было проведено сравнение точности исследуемых схем частотной синхронизации по СКО ошибки оценки частотного смещения от мощности шума в канале, нормированной на полосу сигнала (E_s/N_0). Результаты данного сравнения представлены на рисунке 11.

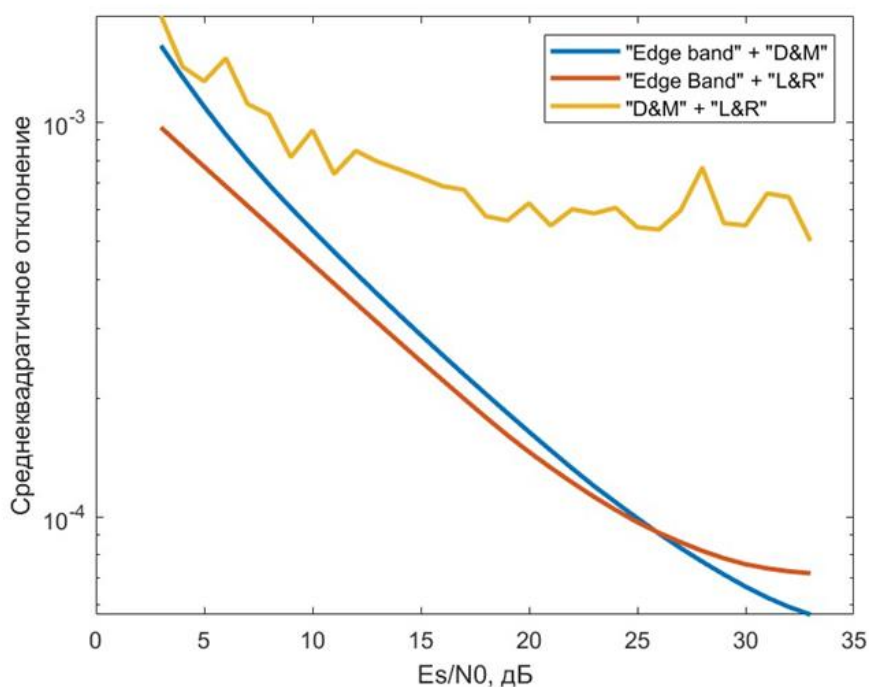


Рис. 11. СКО оценки частотного смещения различных схем частотной синхронизации в диапазоне E_s/N_0 от 3 дБ до 33 дБ

Как следует из графика на рисунке 11, использование схемы частотной синхронизации, в которой для грубой частотной синхронизации применяется алгоритм «Edge Band», дает серьезные преимущества по сравнению со стандартным решением в виде схемы, использующей алгоритмы «D&M» и

«L&R». В области высоких ОСШ, выше 20дБ, наблюдается выигрыш в 10 раз по СКО по сравнению с системой, использующей DA алгоритмы «D&M» и «L&R». Наилучший результат в диапазоне E_s/N_0 от 3 дБ до 25 дБ показала комбинация алгоритмов «Edge Band» и «L&R». В среднем выигрыш по сравнению с «Edge Band» и «D&M» составляет 1,5 дБ. С другой стороны, при E_s/N_0 от 25 дБ заметно выигрывает «Edge Band» и «D&M», что обусловлено выбором неоптимальных параметров для алгоритма «D&M».

Заключение

1. Схема частотной синхронизации на основе алгоритмов «Edge-band» и «L&R» позволяет в 2 раза сократить общее время синхронизации при сохранении высокой точности оценки частотного сдвига и при наличии других этапов синхронизации.

2. С точки зрения точности частотной синхронизации в зависимости от ОСШ, наилучшие результаты продемонстрировала также схема «Edge-band» и «L&R», выигрыш составил 1,5 дБ по сравнению с «Edge-band» и «D&M» и свыше 10 дБ по сравнению с «D&M» и «L&R».

3. Совокупность алгоритмов частотной синхронизации на основе «Edge-band» и «L&R» является наиболее перспективной для дальнейшей модификации и исследования.

Финансирование: Работа выполнена в Московском физико-техническом институте при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-11-2021-047.

Литература

1. Bertolucci M., Cassettari R., Fanucci L. On the frequency carrier offset and symbol timing estimation for CCSDS 131.2-B-1 high data-rate telemetry receivers //Sensors. – 2021. – V. 21. – №. 9. – P. 2915. <https://doi.org/10.3390/s21092915>

2. Стрелец В. Перспективы спутниковой связи в свете решений ВКР-2019 //Электросвязь. – 2020. – №. 2. – С. 5-9.
<https://doi.org/10.34832/ELSV.2020.3.2.001>
3. Бабышева Е. Е. Перспективы развития спутниковой связи //Экономика и качество систем связи. – 2017. – №. 3 (5). – С. 38-45.
4. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, Проект стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года., Москва, 15 августа 2023 года.
<https://digital.gov.ru/ru/documents/9120/>
5. ETSI E. N. 302 307 V1. 3.1 (2013-03) Digital Video Broadcasting (DVB) //Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.03.01_60/en_302307v010301p.pdf
6. ETSI E. 302 307-2 v1. 3.1 (2021-07) digital video broadcasting (dvb) //Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications. – 2021.
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.03.01_60/en_30230702v010301p.pdf
7. ETSI T. R. 102 376-1 V1. 2.1 (2015-11) «Digital Video Broadcasting (DVB) //Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications. Part. – V. 1.
https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102300_102399/10237601/01.02.01_60/tr_10237601v010201p.pdf
8. Antiufrieva L, Iansitov K., Ivchenko A., Dvorkovich A. Features of frequency synchronization algorithms DVB-S2 (X) for LEO satellites //2021 23rd

International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA).
– IEEE, 2021. – P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/DSPA51283.2021.9535822>

9. Антюфриева Л. А., Янситов К. К., Дворкович А. В. Алгоритмы синхронизации физического уровня для сигнально-кодовой конструкции, повышающей помехоустойчивость режима v1-snr стандарта dvb-s2x //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.9>
10. Li Qing, Zeng Xiaoyang, Wu Chuan, Zhang Yulong, Deng Yunsong, J. Han Optimal frame synchronization for DVB-S2 //2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2008. – С. 956-959. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2008.4541578>
11. Iansitov K., Dorokhin S., Levichev S., Antiufrieva L., Dvorkovich A. Low complexity DVB-S2X frequency synchronization for LEO satellites //2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). – IEEE, 2021. – P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EnT50460.2021.9681762>
12. Harris F. Band edge filters: Characteristics and performance in carrier and symbol synchronization //WPMC-2010. – 2010. – P. 11-14.
13. Rice M. Digital Communications: A Discrete-Time Approach. Upper Saddle River, N.J., Pearson Prentice Hall. 2009, 778 p.

Для цитирования:

Левичев С.А., Янситов К.К., Дорохин С.В., Дворкович А.В. Сравнительный анализ точности алгоритмов частотной синхронизации для системы спутниковой связи на основе сигнала DVB-S2. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.23> (In Russian)