

УДК 621.396.96

Автономное частотно-временное обеспечение КА на базе сигналов одночастотной сети цифрового телевидения

Чекунов Илья Владимирович¹ onip4@mail.ru
Петров Сергей Дмитриевич² s.d.petrov@spbu.ru
Ермаков Василий Игоревич^{3(*)} viermakov@stud.etu.ru
Смирнов Сергей Сергеевич² s.s.smirnov@spbu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматривается подход к формированию региональной наземной навигационной подсистемы для космических аппаратов на основе использования сигналов одночастотной сети цифрового эфирного телевидения ФГУП «Российская телевизионная и радиовещательная сеть» («РТРС») Пермского края. Показано, что при известной геодезической привязке передающих центров и обеспечении межузловой частотно-временной согласованности такая сеть может выступать в качестве совокупности наземных навигационных реперов для реализации пассивных методов без модификации вещательного сигнала. По результатам полевых испытаний с применением модуля хранения времени и частоты подтверждена корректность режимов удержания и восстановления синхронизации, а также устойчивость основных показателей качества эфирного сигнала в реальных условиях эксплуатации. Полученные данные позволяют оценить достижимость требуемого уровня точности навигационных определений для космических аппаратов и служат основой для дальнейших исследований, направленных на моделирование навигационных характеристик и отработку алгоритмов обработки сигналов DVB-T2.

Ключевые слова: пассивная радионавигация, одночастотная сеть, РТРС, Пермский край, TDOA, FDOA, DVB-T2

Введение. Одночастотная сеть (ОЧС) цифрового эфирного телевидения (DVB-T2 – Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) — образец промышленной критической инфраструктуры, где частотно-временная синхронизация является частью технологического процесса [1]. Этот предоставляет возможность на базе сети передающих центров ФГУП («РТРС») организовать высокоточную систему беззапросного координатно-временного обеспечения (навигации) космических аппаратов. Если координаты наземных объектов известны, а межузловая согласованность по частоте и времени выдержана, регулярная OFDM-структура (OFDM — Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) (кадры, суперкадры, пилоты) превращается в набор квази-маркеров, по которым на борту оцениваются задержки и доплеровские сдвиги (TDOA — Time Difference of Arrival / FDOA — Time Difference of Arrival), а затем восстанавливаются положение и скорость космических аппаратов (КА) — без какого-либо вмешательства в вещательный эфир [2].

Методы и материалы; результаты. Ключевой практический вопрос сводится к следующему: обеспечивает ли реальная эксплуатация межузловую временную когерентность на уровне десятков наносекунд, необходимом для корректной работы методов TDOA [3]? Для ответа на этот вопрос были проведены полевые испытания на действующем тракте DVB-T2 в Пермском краевом радиотелевизионном передающем центре (КРТПЦ). На передающей станции был установлен модуль хранения времени и частоты (МХВЧ) производства ПАО «ПНППК» с режимом удержания (holdover), согласованный с модулятором. В эксперименте воспроизводились реальные сценарии: работа по внешнему эталону, его отключение с переходом в holdover и последующее восстановление. Измерения велись как по телеметрии модулятора, так и внешним частотомером; дополнительно контролировалось качество эфирного сигнала. Переходы «ГНСС → holdover → ГНСС» проходили без ступенчатых фазовых скачков, а рассогласование 1 PPS относительно временных меток транспортного потока оставалось в пределах допусков ОЧС. В ходе всех контрольных измерительных сессий параметры качества эфира оставались стабильными: показатель MER (Modulation Error Ratio — отношение мощности идеального модулированного сигнала к мощности ошибки модуляции) находился в диапазоне 25,8–28,4 дБ при нулевом BER (Bit Error Rate — доля ошибочных битов в принятом потоке данных), а структура многолучевости не демонстрировала признаков деградации [4].

Сигнальная база DVB-T2 благоприятствует задаче. Полоса 8 МГц задает фундаментальную разрешающую способность по задержке порядка ≈ 125 нс (эквивалент дальности ≈ 37 м) [5]. Пилотные поднесущие и регулярная кадровая структура обеспечивают возможность когерентной межкадровой корреляции и корректной компенсации доплеровских и временных смещений, характерных для динамики низкоорбитальных аппаратов [5]. На практике точность ограничивается тремя факторами: межузловой синхронизацией, сквозными трактовыми задержками разных типов передатчиков и геометрией базы. В условиях Пермского края пространственное распределение объектов РТРС формирует благоприятную геометрию наблюдений: на высотах порядка 400–800 км в поле зрения одновременно оказываются несколько передающих центров, а межстанционные расстояния сотен километров обеспечивают хорошо обусловленную конфигурацию базы для методов TDOA/FDOA.

Подход не требует модификации вещательного сигнала и не затрагивает частотный план — речь идет о пассивном использовании уже существующей инфраструктуры [6]. На узлах достаточно обеспечить устойчивую выдачу 1 PPS/10 МГц, корректную обработку режимов удержания и формирование журнала параметров синхронизации; остальное переносится на борт, где многочастотный коррелятор выполняет грубую и тонкую оценку задержек/доплеров с последующим объединением в фильтре траекторной динамики [7].

Полученные результаты мы рассматриваем как обоснование технической реализуемости региональной наземной навигационной подсистемы для КА на базе инфраструктуры ФГУП «РТПС». Следующий шаг — детализированное моделирование навигационной точности с учетом реально достигнутых параметров синхронизации ОЧС, анализ видимости и анализа параметров радиолинии для КА над Пермским краем, а также постановка стендовых испытаний с имитацией работы бортового приемника DVB-T2 и обработкой записанных эфирных сигналов в условиях задаваемых орбитальных конфигураций. Ограничения, связанные с направленностью диаграмм антенн в нижнюю полусферу и пространственной вариативностью уровней принимаемого сигнала, поддаются формализованной оценке и учету и могут быть компенсированы статистическим анализом измерений и корректным планированием орбитальных конфигураций наблюдения.

Заключение. Полевые испытания на базе Пермского КРТПЦ показали, что одночастотная сеть DVB-T2 ФГУП «РТПС» при оснащении передающих станций устройствами класса модулей хранения времени и частоты (МХВЧ) обеспечивает требуемую частотно-временную согласованность и качество эфирного сигнала для задач пассивной навигации КА. Зафиксированы стабильные значения MER при нулевом BER и отсутствие фазовых скачков при переходах «ГНСС → holdover → ГНСС», что подтверждает корректную работу ОЧС в качестве временной опорной инфраструктуры. Дальнейшее моделирование навигационной точности, анализ радиолинии «передающий центр — КА» и стендовая отработка бортовых алгоритмов обработки сигналов DVB-T2 представляются достаточными шагами к практической реализации региональной наземной навигационной подсистемы.

Список источников

- [1] ГОСТ Р 58912–2020. *Телевидение вещательное цифровое. Система эфирного наземного цифрового телевизионного вещания второго поколения DVB-T2. Общие технические требования*. Москва, Стандартинформ, 2020, 73 с.
- [2] Lopez-Arreguin A.J.R., Montenegro S. Signals of opportunity for space navigation: An application-oriented review. *Results in Engineering*, 2024, vol. 21, art. no. 101778. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101778>
- [3] Fan G., Chen X., Zhang R. et al. Toward Massive Satellite Signals of Opportunity Positioning: Challenges, *Methods and Experiments*. *Space: Science & Technology*, 2024, vol. 4, art. no. 0191. <https://doi.org/10.34133/space.0191>
- [4] Бучатский А.Н., Гузенко О.А., Куликов С.П. Особенности измерений в одночастотных сетях цифрового эфирного телевидения второго поколения на примере анализа сигналов передающих станций Ленинградской области. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2019, т. 7, № 3, с. 7–12. <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2019-7-3-7-12>
- [5] Карякин В.Л. *Технология эксплуатации систем и сетей цифрового телевидения стандарта DVB-T2*. Москва, СОЛОН-Пресс, 2020, 384 с.

- [6] Esmailkhah A., Landry R.J. Spatial Sensitivity of Navigation Using Signal-of-Opportunity (SoOP) from Starlink, Iridium-Next, GlobalStar, OneWeb, and Orbcomm Constellations. *Engineering Proceedings*, 2025, vol. 88, no. 1, art. no. 29. <https://doi.org/10.3390/engproc2025088029>
- [7] Бучатский А.Н., Куликов С.П. Особенности контроля параметров одночастотных сетей системы цифрового телевизионного вещания второго поколения. *Вестник СПбГУТ*, 2024, т. 2, № 1, с. 27–32. EDN: TTLPPR