

МОНИТОРИНГ СПУТНИКОВОГО СИГНАЛА • EUTELSAT 16A • 16,0°В.Д.

Научный отчёт (кейс-стади)

Стабильность приёма радионесущих с чрезвычайно низкой символьной скоростью ($SR = 100-176$ кСимв/с) в Ku-диапазоне со спутника Eutelsat 16A в условиях зоны «In-Footprint Reception»

Пункт приёма: Лученец, южная часть Средней Словакии | Антенна: прямофокусный рефлектор Prodelin, D = 450 см | Измерительная система: TBS 5927 + EBS Pro

Автор исследования:

Roman Dávid, www.dxsatcs.com

1. Введение и цель исследования

Предметом настоящего исследования является анализ и интерпретация результатов долгосрочного мониторинга сигнала трёх радионесущих, транслируемых в Ku-диапазоне с геостационарного спутника Eutelsat 16A, расположенного в орбитальной позиции 16,0° восточной долготы. Общим знаменателем всех трёх наблюдаемых несущих является чрезвычайно низкое значение символьной скорости (Symbol Rate, SR) – в диапазоне от 100 до 176 кСимв/с, то есть на нижней границе того, что бытовая приёмная техника на практике способна надёжно демодулировать в непрерывном, долгосрочном режиме.

Несущие с настолько низкой символьной скоростью занимают чрезвычайно узкую полосу занимаемого спектра (порядка сотен кГц) и, с точки зрения теории цифровой обработки сигналов, значительно более чувствительны к фазовому шуму, частотной нестабильности местного гетеродина приёмного конвертера (LNB) и точности настройки приёмника, чем обычные несущие DVB-S/S2 со значениями SR порядка нескольких мегасимволов в секунду. Цель исследования поэтому состоит не только в документировании результатов, измеренных автором измерений – господином Roman Dávid (www.dxsatcs.com), – но и в объяснении физической и технической природы явлений, которые обеспечивают, либо, напротив, ставят под угрозу стабильность такого приёма.

Анализируемый пункт приёма – город Лученец на юге Средней Словакии – находится в заявленной зоне покрытия Eutelsat 16A с гарантированной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ, EIRP) в диапазоне приблизительно от 49 до 50 дБВт (зоны Europe A и Europe B покрытия спутника), что автор в представленном анализе классифицирует термином «In-Footprint Reception» – приём в пределах главного лепестка покрытия, в отличие от приёма на краю или за пределами гарантированной зоны обслуживания («Out-of-Footprint Reception»), где требуется существенно больший диаметр рефлектора и более длительная единица доказательства стабильности приёма.

2. Геометрические параметры приёмной станции в Лученце

Точный расчёт азимута, угла места (элевации) и угла поворота конвертера (скью) является необходимым условием любого серьёзного технического анализа спутникового приёма, поскольку неправильно ориентированная антенна вносит в систему дополнительную деполяризацию и затухание, которые особенно заметно проявляются при приёме несущих с узким спектром и низким отношением сигнал/шум. Для точности настоящего исследования были использованы проверенные данные сервиса dishpointer.com для координат города Лученец (широта 48,3331° с. ш., долгота 19,6664° в. д.) и спутника Eutelsat 16A в позиции 16,0° в. д.:

Параметр	Значение
Широта пункта приёма (Лученец)	48,3331°; с. ш.
Долгота пункта приёма (Лученец)	19,6664°; в. д.
Азимут (истинный / географический север)	184,9°;

Азимут (магнитный)	178,8°;
Угол места антенны (элевация)	34,4°;
Угол поворота конвертера (скью)	3,3°;

Таблица 1. Геометрические параметры наведения антенны для приёма Eutelsat 16A в пункте Лученец (источник данных: dishpointer.com).

Угол места 34,4° представляет собой относительно благоприятное значение для центральноевропейской широты – траектория сигнала проходит через атмосферу под достаточно крутым углом, благодаря чему эффективная толщина атмосферного слоя (а значит, и затухание, вызванное осадками, так называемое дождевое замирание, rain fade) не достигает экстремальных значений, в отличие от приёма спутников с заметно более низкой наблюдаемой траекторией по углу места. Скью 3,3° – это значение, близкое к нулю, что означает лишь минимальную коррекцию поворота конвертера относительно вертикального опорного положения – для поляризационно-чувствительного приёма (а несущие с низким SR однозначно относятся к этой категории) точное соблюдение данного угла важно для максимизации кросс-поляризационной развязки (XPD) и минимизации взаимных помех между несущими вертикальной и горизонтальной поляризации, расположенными близко по частоте.

3. Техническая конфигурация приёмного тракта

Приёмная система состоит из прямофокусного параболического рефлектора Prodelin диаметром $D = 450$ см, конвертера (LNB) с высокостабильным гетеродином на основе PLL (заявленная стабильность гетеродина ± 10 кГц) и цифрового измерителя/анализатора TBS 5927, управляемого программным обеспечением EBS Pro. В представленном анализе автор подчёркивает, что в зоне «In-Footprint Reception» с гарантированной ЭИИМ около 49–50 дБВт с чисто энергетической точки зрения для стабильного приёма стандартных несущих было бы достаточно рефлектора диаметром уже от приблизительно 80 см. Тот факт, что в данном случае использовался значительно избыточный по размеру рефлектор диаметром 450 см, служит поэтому иной цели, нежели простое увеличение принимаемой мощности – его главный вклад заключается в сужении главного лепестка диаграммы направленности антенны (а значит, в повышении пространственной избирательности по отношению к соседним спутникам) и, прежде всего, в существенном запасе отношения несущая/шум (C/N), которое в данном исследовании оказывается ключевым фактором демодуляции несущих с чрезвычайно узкой полосой спектра.

Здесь важно подчеркнуть момент, который автор верно определяет: при приёме несущих с низким SR первичным ограничивающим фактором является не диаметр рефлектора (энергетический баланс), а качество и стабильность сигнального тракта за антенной – в первую очередь гетеродин конвертера и точность цифровой настройки. Большой рефлектор в этом контексте служит не для того, чтобы «уловить сигнал, который иначе был бы неразличим», а для создания достаточного запаса C/N, который позволяет, чтобы даже небольшие остаточные частотные и фазовые нестабильности гетеродина проявлялись лишь в виде незначительного колебания показателя качества (Q), а не в виде потери синхронизации (Lock).

4. Влияние стабильности гетеродина (LOF) на демодуляцию несущих с низким SR

Частота местного гетеродина (LO) в спутниковом конвертере служит для переноса принятого высокочастотного сигнала из Ku-диапазона (10,7–12,75 ГГц) в полосу промежуточной частоты, обрабатываемую тюнером приёмника (как правило, 950–2150 МГц). Любое отклонение фактической частоты гетеродина от номинального значения – обозначаемое как смещение LOF (Local Oscillator Frequency) – линейно переносится на положение принимаемой несущей в спектре промежуточной частоты. Для обычных несущих с высоким значением SR (например, несколько МСимв/с) даже смещение в несколько десятков кГц представляет собой пренебрежимо малую долю занимаемой полосы. Однако для несущей с $SR = 100$ кСимв/с ситуация принципиально иная.

Занимаемая полоса несущей в первом приближении (для модуляции QPSK с типичным коэффициентом сглаживания спектра, roll-off) оценивается как произведение символической скорости на коэффициент $(1 + \text{roll-off})$. Автор указывает для несущей Radio Wrocław измеренную ширину полосы (Carrier Width) 0,120 МГц, то есть 120 кГц – значение, полностью согласующееся с несущей $SR = 100$ кСимв/с при коэффициенте roll-off, близком к 0,20 (типичном для несущих DVB-S данного типа). В таком случае смещение частоты гетеродина порядка от единиц до нескольких десятков кГц уже представляет собой десятки процентов занимаемой полосы несущей – и демодулятор (петля Костаса или аналогичная фазо-частотная петля в приёмной микросхеме) должен быть способен отслеживать и компенсировать это смещение в реальном времени без потери синхронизации.

Заявленная стабильность LOF используемого гетеродина на основе PLL на уровне ± 10 кГц является с этой точки зрения ключевым техническим параметром. Для несущей с полосой 120 кГц смещение ± 10 кГц составляет примерно 8–9 % занимаемой ширины спектра – значение, которое надёжно укладывается в центральный диапазон, который частотная петля современного демодулятора DVB-S (включая набор микросхем, используемый в приёмнике TBS 5927) способна отслеживать в установившемся режиме без риска потери Lock. Для сравнения, более дешёвые или устаревшие конвертеры с диэлектрическим резонаторным генератором (DRO) вместо PLL обычно демонстрируют стабильность LOF порядка от ± 500 кГц до ± 2 МГц, причём с выраженной температурной зависимостью (дрейф при изменении температуры окружающей среды днём и ночью). При таком уровне нестабильности смещение частоты несущей с полосой всего 120 кГц могло бы полностью «вытолкнуть» окно настройки приёмника за пределы диапазона поиска демодулятора, и потеря Lock была бы практически неизбежной, особенно при изменениях температуры конвертера в ходе длительного мониторинга.

С этой точки зрения использование конвертера с гетеродином на основе PLL и стабильностью LOF ± 10 кГц представляет собой не просто качественное улучшение, а при приёме несущих с SR ниже примерно 200 кСимв/с – техническое предварительное условие, без которого долгосрочный стабильный, безобрывный приём реально не достигим, независимо от диаметра используемого рефлектора.

5. Сверхузкая полоса несущей (Carrier Width = 0,120 МГц) и её последствия

Узкая занимаемая полоса спектра имеет два противоположных следствия. С одной стороны, она концентрирует излучаемую мощность несущей в узком частотном интервале, что при заданной ЭИИМ спутника повышает спектральную плотность мощности (мощность на единицу полосы) и, следовательно, теоретически достижимое отношение несущая/шум – это физическая причина того, почему даже несущие с относительно низкой абсолютной излучаемой мощностью могут при достаточно большой апертуре приёма демодулироваться с неожиданно высоким отношением сигнал/шум (SNR) (автор указывает измеренное пиковое значение $SNR = 17,7$ дБ – значение со значительным запасом над порогом, необходимым для стабильного удержания Lock DVB-S, который при модуляции QPSK и среднем кодовом отношении обычно находится в диапазоне 4–7 дБ).

С другой стороны, узкая полоса предъявляет существенно более высокие требования к точности настройки и к качеству фазового шума (phase noise) используемого гетеродина, поскольку любой фазовый шум вблизи частоты несущей занимает относительно большую долю общей ширины спектра, чем в случае широкополосной несущей. Аналогичным образом, доплеровские по своей природе эффекты, вызванные незначительным дрейфом геостационарного положения спутника (на практике порядка единиц – десятков Гц при типовом домашнем приёме), для столь узкой несущей относительно более существенны, чем для широкополосных несущих DVB-S2 порядка единиц – десятков МСимв/с.

6. Необходимость точной ручной настройки частоты в программе EBS Pro

Из предыдущего анализа непосредственно вытекает практическое следствие, которое автор в своей методике правомерно учитывает: ручной ввод частоты несущей в EBS Pro с точностью до трёх десятичных знаков (то есть на уровне кГц, например 12 590,540 МГц вместо округлённого значения 12 590,5 МГц или 12 591 МГц). Для несущей с полосой 120 кГц разница между округлённым и точным значением частоты порядка сотен Гц – нескольких кГц представляет собой немаловажную долю окна поиска демодулятора. Точный ввод частоты с тремя десятичными знаками на практике означает, что демодулятору не требуется «прочёсывать» более широкий частотный диапазон вокруг номинального значения при инициализации Lock, что сокращает время до достижения синхронизации и снижает вероятность того, что петля частотной синхронизации «зацепится» за соседний шумовой или интермодуляционный продукт вместо самой несущей.

Этот шаг является типичным примером того, как теоретические параметры (полоса несущей, стабильность LOF конвертера) должны также воплощаться в практической настройке измерительно-приёмного программного обеспечения – без такого сочетания (качественный гетеродин на основе PLL плюс точный ручной ввод частоты) даже теоретически достаточный энергетический баланс сигнала не гарантировал бы стабильного результата.

7. Обзор анализируемых несущих

В следующей таблице приведены три радионесущие спутника Eutelsat 16A, которые были предметом долгосрочного мониторинга сигнала автора в пункте Лученец, с использованием минимальной единицы доказательства стабильности приёма $t = 48$ часов для зоны «In-Footprint Reception»:

Частота	Поляризация	SR (кСимв/с)	Программа
12 590,540 МГц	V (вертикальная)	100	Radio Wrocław
12 589,555 МГц	V (вертикальная)	146	Radio Gdańsk
10 972,126 МГц	H (горизонтальная)	176	BNR Nieuwsradio

Таблица 2. Обзор мониторируемых радионесущих на спутнике Eutelsat 16A.

8. Расширенная 72-часовая единица мониторинга для несущей SR = 100 кСимв/с (Radio Wrocław)

Наименьшее из рассматриваемых в настоящем исследовании значений символьной скорости - $SR = 100$ кСимв/с несущей Radio Wrocław на частоте 12 590,540 МГц (V) - представляет собой технически наиболее сложный случай среди всех трёх анализируемых несущих - именно поэтому автор подверг её расширенному мониторингу продолжительностью $t = 72$ часа, вместо стандартной базовой единицы $t = 48$ часов, действующей для зоны «In-Footprint Reception». Продлив мониторинг ещё на 24 часа (то есть ещё на 86 400 точек измерения при обычном периоде дискретизации одна точка в секунду), автор увеличил общий объём непрерывного набора данных до 259 200 последовательных точек измерения.

По данным автора, в этом наборе из 259 200 точек измерения не было зафиксировано ни одной точки с потерей синхронизации (Lock), а параметр качества приёма Q в программе EBS Pro оставался в течение всего измерения на постоянном уровне $Q = 100$ %. Зафиксированное пиковое значение отношения сигнал/шум $SNR = 17,7$ дБ представляет собой существенный запас над пороговым значением, необходимым для удержания Lock, что согласуется с приведённым выше объяснением благоприятной спектральной плотности мощности узкополосной несущей в сочетании с большой апертурой рефлектора $D = 450$ см.

По данным автора, период измерения также включал эпизоды повышенной интенсивности осадков 11 и 12 сентября 2026 года в районе города Лученец, документированные данными Словацкого гидрометеорологического института (shmu.sk). Тот факт, что, согласно представленной документации, непрерывность Lock и значение Q оставались неизменными во время этих эпизодов осадков, согласуется с ожидаемым поведением системы с большой апертурой антенны: затухание, вызванное осадками (rain fade), в Ku-диапазоне при средней центральноевропейской интенсивности осадков и угле места около 34° обычно составляет порядка 1–3 дБ, тогда как измеренный запас SNR (до 17,7 дБ на пике) обеспечивает достаточный резерв для компенсации такого кратковременного затухания без снижения показателя ниже порога потери Lock.

Примечание к интерпретации статистического веса данных: число 259 200 непрерывных точек измерения значимо с точки зрения доказательства непрерывности состояния

(отсутствия обрыва в рамках данного конкретного, единственного наблюдаемого временного окна), однако его следует интерпретировать корректно – речь идёт не о 259 200 независимых, статистически раздельных экспериментах, а об одной непрерывной временной записи с высокой частотой дискретизации. Научная ценность такой записи заключается в доказательстве того, что в рамках данного 72-часового окна, при данной конфигурации и данных погодных условиях обрыва не произошло – а не в том, что вероятность обрыва равна нулю при всех мыслимых будущих условиях.

9. Обсуждение и обобщённая интерпретация

Результаты представленного мониторинга можно свести к трём взаимосвязанным техническим выводам. Во-первых, энергетический баланс в зоне «In-Footprint Reception» с ЭИИМ 49–50 дБВт не является ограничивающим фактором для несущих данного типа – диаметр рефлектора $D = 450$ см обеспечивает существенный запас C/N , который для стандартных несущих DVB-S/S2 был бы избыточным, но для чрезвычайно узкополосных несущих с SR ниже 200 кСимв/с выполняет функцию страховки от кратковременных явлений затухания (осадки, атмосферная сцинтилляция). Во-вторых, в данном диапазоне SR ключевым ограничивающим фактором становится качество сигнального тракта за антенной – прежде всего стабильность LOF конвертера, которая для несущих с полосой порядка 100–300 кГц должна находиться на уровне единиц – низких десятков кГц, чтобы демодулятор мог надёжно отслеживать частотное смещение. В-третьих, точность ручного ввода частоты в измерительно-приёмном программном обеспечении на уровне кГц – это не просто формальность, а необходимый практический шаг, снижающий нагрузку на петлю частотной синхронизации приёмника.

Представленные автором данные тем самым дают убедительное, хорошо задокументированное эмпирическое доказательство того, что при правильно спроектированном сочетании большой апертуры приёма, высокостабильного гетеродина конвертера на основе PLL и точной программной настройки долгосрочный стабильный, безобрывный приём несущих с SR от 100 кСимв/с со спутника Eutelsat 16A в Центральной Европе реально достижим, в том числе при кратковременных неблагоприятных погодных условиях. Для полного обобщения данного вывода на другие пункты приёма, другие типы конвертеров или более экстремальные осадочные явления (например, интенсивные грозы с высоким содержанием влаги в атмосфере) было бы желательно дополнить настоящее исследование сопоставимыми измерениями с других независимых станций, а также более долгосрочной климатической статистикой рассматриваемого пункта.

10. Заключение

Настоящее исследование подтверждает, что приём радионесущих с чрезвычайно низкой символьной скоростью ($SR = 100\text{--}176$ кСимв/с) со спутника Eutelsat 16A в зоне гарантированного покрытия «In-Footprint Reception» технически надёжно достижим при правильно спроектированной приёмной системе. Измерительная документация автора, Roman Dávid – в частности, непрерывная 72-часовая запись с 259 200 точками измерения без единого обрыва Lock для несущей Radio Wrocław ($SR = 100$ кСимв/с) – представляет собой качественный и хорошо задокументированный вклад в практическое понимание пределов возможностей современной бытовой спутниковой приёмной техники при приёме узкополосных несущих в Ku-диапазоне.

11. Использованная литература и источники

Технические нормы и стандарты

- ETSI EN 300 421 V1.1.2: «Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services». European Telecommunications Standards Institute.
- ETSI EN 302 307: «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)». European Telecommunications Standards Institute.
- Рекомендация МСЭ-R P.618: «Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems». Международный союз электросвязи – раздел, посвящённый затуханию из-за осадков в диапазонах выше 10 ГГц.
- Рекомендация МСЭ-R S.465: «Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment». Международный союз электросвязи.

Специальная литература

- Pratt, T., Bostian, C. W., Allnutt, J. E.: Satellite Communications, 2-е изд., John Wiley & Sons, 2003. (Главы, посвящённые энергетическому бюджету линии связи, затуханию в Ку-диапазоне и влиянию фазового шума гетеродина на демодуляцию.)
- Maral, G., Bousquet, M.: Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, 5-е изд., John Wiley & Sons, 2009.
- Tomasi, W.: Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, 5-е изд., Pearson Prentice Hall, 2004. (Глава о петлях фазовой автоподстройки частоты – PLL и синтезе частоты в конвертерах.)
- Rice, M.: Digital Communications: A Discrete-Time Approach, Pearson Prentice Hall, 2009. (Теоретическая основа связи между символьной скоростью, коэффициентом roll-off и занимаемой полосой.)

Источники данных и онлайн-инструменты, использованные в исследовании

- www.dxsatcs.com – собственный портал автора, Roman Dávid, содержащий исходные данные мониторинга сигнала, описание аппаратно-программной конфигурации (TBS 5927, EBS Pro) и методику единиц доказательства стабильности приёма ($t = 48$ ч / $t = 72$ ч).
- www.dishpointer.com – онлайн-инструмент для расчёта азимута, угла места и угла поворота конвертера (скью) для заданного географического положения и выбранного спутника; источник геометрических данных, приведённых в таблице 1.
- www.shmu.sk – Словацкий гидрометеорологический институт; источник метеорологических данных об интенсивности осадков в районе города Лученец 11 и 12 сентября 2026 года, использованных при оценке влияния дождевого замирания на ход мониторинга.
- Lyngsat (www.lyngsat.com) – общедоступная база данных частотных планов и занятости транспондеров спутника Eutelsat 16A, использованная в качестве ориентировочного