

УДК: 621.391

DOI: 10.53816/23061456_2022_3-4_41

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНОЙ РАССТРОЙКИ
И УРОВНЯ ФАЗОВОГО ШУМА НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАНАЛОВ
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

**STUDY OF THE EFFECT OF FREQUENCY DETUNING AND PHASE NOISE LEVEL
ON THE NOISE IMMUNITY OF SATELLITE COMMUNICATION CHANNELS
WITH AMPLITUDE-PHASE SHIFT KEYING**

Канд. техн. наук П.А. Маслаков¹, канд. техн. наук А.В. Пилков²

Ph.D. P.A. Maslakov, Ph.D. A.V. Pilkov

¹ВКА им. А.Ф. Можайского, ²АО РТИ

В спутниковых радиопереносах вариации фазы или частоты выходных сигналов, описываемые с помощью фазового шума, могут приводить к возникновению ошибок в демодуляторе. В статье представлена модель, позволяющая проводить исследования влияния фазового шума и расстройки по частоте на качество функционирования спутниковых каналов связи с амплитудно-фазовой манипуляцией. Особенностью данной модели является возможность формирования видов модуляции, используемых при передаче сигналов в стандарте DVB-S2x. Определены границы снижения помехоустойчивости при использовании манипуляции с кратностью от 16 до 256 при различных параметрах частотной расстройки и фазового шума.

Ключевые слова: канал спутниковой связи, амплитудно-фазовая манипуляция, помехоустойчивость, вероятность битовых ошибок, фазовый шум, расстройка по частоте.

On satellite radio links, variations in the phase or frequency of the output signals, described by phase noise, can lead to errors in the demodulator. The article presents a model that makes it possible to study the effect of phase noise and frequency detuning on the quality of functioning of satellite communication channels with amplitude-phase shift keying. A feature of this model is the ability to form the types of modulation used when transmitting signals in the DVB-S2x standard. The boundaries of the reduction of noise immunity when using manipulation with a multiplicity from 16 to 256 at various parameters of frequency detuning and phase noise are determined.

Keywords: satellite communication channel, amplitude-phase shift keying, noise immunity, probability of bit errors, phase noise, frequency offset.

Введение

В последние годы отрасль спутниковой связи (СпС) претерпела существенные изменения, что вызвано расширившимися потребностями пользователей и развитием новых технологий. Одной из таких технологий является стандарт

DVB-S2 и его модернизированная версия со значительно улучшенными характеристиками DVB-S2x. Использование стандарта DVB-S2x позволяет обеспечить возможность функционирования радиопереноса при низком (до -10 дБ) отношении сигнал-шум (ОСШ), гибкое изменение режимов модуляция-кодирование и высокую

спектральную эффективность [1, 2]. Возросшие возможности DVB-S2x по организации высокой пропускной способности базируются в первую очередь на улучшенной технологии фильтрации и применении устойчивой к нелинейным искажениям амплитудно-фазовой манипуляции (АФМн), известной также как APSK (amplitude and phase-shift keying) [3, 4]. Высокая кратность манипуляции M , вплоть до 256, особенно актуальна для профессиональных спутниковых приложений. Примером тому может служить передача высокоскоростных потоков в режиме «точка-точка», когда частотный ресурс ограничен, но имеется некоторый энергетический запас на передающей и приемной стороне.

Вместе с тем сигналы АФМн с высокой кратностью обладают значительно меньшей помехоустойчивостью в сравнении с фазовой манипуляцией, поэтому увеличивается влияние факторов искусственного и естественного происхождения на качество их приема. Генераторы, формирующие сигналы, в том числе и с АФМн, имеют кратковременную нестабильность, вызванную вариациями фазы или частоты выходного сигнала. Такие вариации, описываемые с помощью фазового шума, при определенном его уровне могут оказывать модулирующий эффект на сигнал, формируемый генератором, и повлиять на помехоустойчивость каналов связи [5]. В качестве показателя помехоустойчивости в статье выбрано приращение ОСШ для обеспечения требуемого в стандарте коэффициента битовых ошибок (bit error rate — BER). Под ОСШ в работе понимается отношение энергии одного единичного бита E_b к спектральной плотности мощности шума в канале передачи N_0 (E_b/N_0).

Целью настоящей статьи является оценка влияния уровня фазового шума и расстройки по частоте на помехоустойчивость каналов СпС с видами АФМн, использующимися в стандарте DVB-S2x.

Модель канала спутниковой связи с амплитудно-фазовой манипуляцией

Для описания каналов СпС широко применяется модель с аддитивным белым гауссовским шумом (additive white Gaussian noise — AWGN). Шум в такой модели обладает постоянной спектральной плотностью, а оценивание потерь принимаемого сигнала может осуществляться по коэффициенту BER. В работах [6–8] представлены графики зависимостей BER от ОСШ, однако опубликованные результаты не учитывают влияния фазового шума. Для расчета помехоустойчивости спутниковых радиолиний на этапе их проектирования целесообразно использовать имитационное моделирование, которое позволяет изучать эффекты и явления, исследование которых в реальных условиях по различным причинам может быть затруднительным.

Для проведения исследований по оцениванию помехоустойчивости канала СпС с АФМн, структура которого представлена на рис. 1, в программной среде Matlab/Simulink разработана имитационная модель.

Особенностью данной модели является DVBS-APSK-модулятор и демодулятор, позволяющие сформировать виды модуляции, используемые при передаче сигналов в стандарте DVB-S2x.

Модель включает в себя источник сообщений, DVBS-APSK-модулятор (со спецификой формирования сигнальных созвездий, как в DVB-S2x), AWGN-канал, блок формирования фазового шума, DVBS-APSK-демодулятор и калькулятор ошибок BER. В модели отсутствуют высокочастотные цепи (малошумящий усилитель, смесители, гетеродины), что подразумевает их идеальную работу по переносу спектра из области видеочастот в область радиочастот и обратно.

Модулятор преобразовывает поток информационных бит от источника сообщений в модуляционные символы, которые представляют

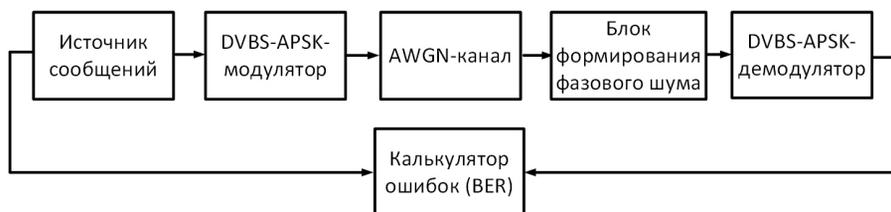


Рис. 1. Структурная схема канала спутниковой связи с амплитудно-фазовой манипуляцией

ся в виде сигнального созвездия, состоящего из нескольких концентрических окружностей. Число этих окружностей зависит от числа позиций манипуляции и выбирается из расчета максимизации среднего расстояния ошибки при фиксированной максимальной амплитуде сигнала.

Созвездия M-APSK состоят из N_c окружностей l , на каждой из которых находятся равноудаленные друг от друга сигнальные точки. Точки сигнального созвездия x являются комплексными числами из множества X :

$$X = \begin{cases} R_1 \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{M_1}i + \theta_1\right)\right), i = 0, \dots, M_1 - 1, \\ R_2 \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{M_1}i + \theta_1\right)\right), i = 0, \dots, M_2 - 1, \\ R_{N_c} \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{M_{N_c}}i + \theta_1\right)\right), i = 0, \dots, M_{N_c} - 1, \end{cases}$$

где R_l — радиус l -й окружности;

M_l — количество точек в сигнальном созвездии;

N_c — количество окружностей ($N_c \geq 2$);

θ_l — относительный фазовый сдвиг для окружности l .

Ввиду того, что для разных видов АФМн нормальное функционирование обеспечивается при разном ОСШ, в настройках блока AWGN-канала значение параметра E_b/N_0 задается в зависимости от кратности манипуляции M .

В блоке формирования фазового шума задается частотная расстройка (в Гц) и его спектральная плотность мощности в одиночной боковой полосе $L(f_m)$. Данная величина измеряется в логарифмическом масштабе в децибелах относительно несущей (или относительно сигнала) на Гц (дБн/Гц) и определяется в соответствии с выражением [9, 10]:

$$L(f_m) = \frac{P_{SSB}}{P_{TOTAL}},$$

где P_{SSB} — спектральная плотность мощности шума на заданной отстройке от несущей в одиночной боковой полосе, пересчитанная в полосу 1 Гц;

P_{TOTAL} — полная мощность сигнала.

Ввиду того, что на характеристики фазового шума влияет полоса захвата системы фазовой автоподстройки частоты, в статье исследовались

два поддиапазона спектра фазового шума: близкий к несущей (смещение по частоте $\Delta f < 1$ кГц) и до верхней границы полосы захвата ($\Delta f > 1$ кГц).

При моделировании комплексный фазовый шум добавляется к комплексному сигналу, что при его большом уровне приводит к «размазыванию» точек фазы на диаграмме состояний и увеличению количества неправильно распознанных символов в демодуляторе.

В калькуляторе ошибок BER число принятых с ошибкой битов делится на общее число переданных битов и выдается результат в виде значения BER. Результаты очередного цикла моделирования представляются в виде графика зависимости BER от ОСШ.

Результаты моделирования влияния расстройки по частоте и уровня фазового шума на помехоустойчивость каналов спутниковой связи с амплитудно-фазовой манипуляцией

С помощью разработанной модели с целью оценивания влияния расстройки по частоте и уровня фазового шума на помехоустойчивость каналов СпС были построены графики зависимости BER от ОСШ для сигналов с АФМн из стандарта DVB-S2x. Моделирование проводилось при заданном уровне фазового шума (–76 дБн/Гц), для следующих сигналов: 16-APSK 9/10, 32-APSK 140/180, 64-APSK 128/180, 128-APSK 135/180, 256-APSK 116/180. Полученные графики зависимости BER от ОСШ приведены на рис. 2–4. Степень снижения помехоустойчивости при разных значениях расстройки по частоте Δf оценивалась по уровню BER = 10^{-4} .

Представленные зависимости показывают, что максимальное снижение помехоустойчивости для сигналов с $M = 16$ составляет от 0,1 дБ ($\Delta f = 1$ кГц) до 1,7 дБ ($\Delta f = 5$ кГц), а при значении $M = 32$ — от 0,5 дБ ($\Delta f = 1$ кГц) до 1,3 дБ ($\Delta f = 3$ кГц).

Анализ кривых помехоустойчивости, приведенных на рис. 3, показывает, что при значении $M = 128$ отмечается снижение помехоустойчивости от 0,5 дБ ($\Delta f = 200$ Гц) до 2 дБ ($\Delta f = 500$ Гц).

Исходя из графиков, представленных на рис. 4, видно, что степень снижения помехоустойчивости для $M = 64$ составляет от 0,1 дБ ($\Delta f = 500$ Гц) до 1 дБ ($\Delta f = 2$ кГц), а для $M = 256$ от 0,6 дБ ($\Delta f = 500$ Гц) до 4,5 дБ ($\Delta f = 2$ кГц).

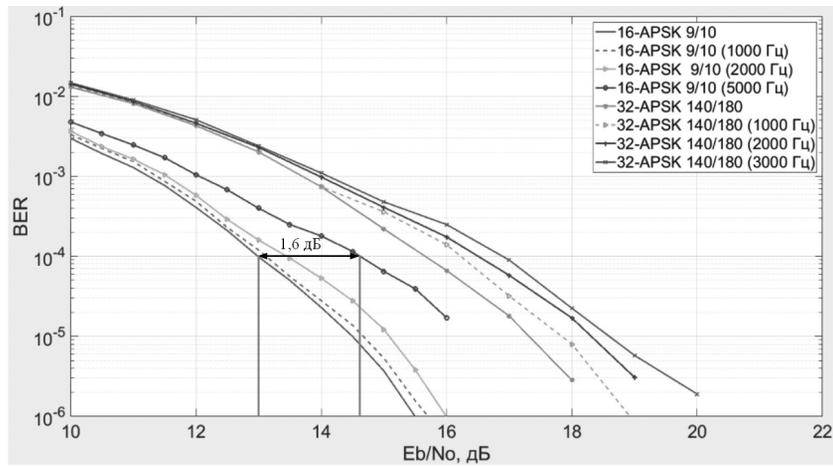


Рис. 2. Зависимость BER от ОСШ для сигналов с модуляцией 16-APSK 9/10 и 32-APSK 140/180 и соответствующим смещением частоты

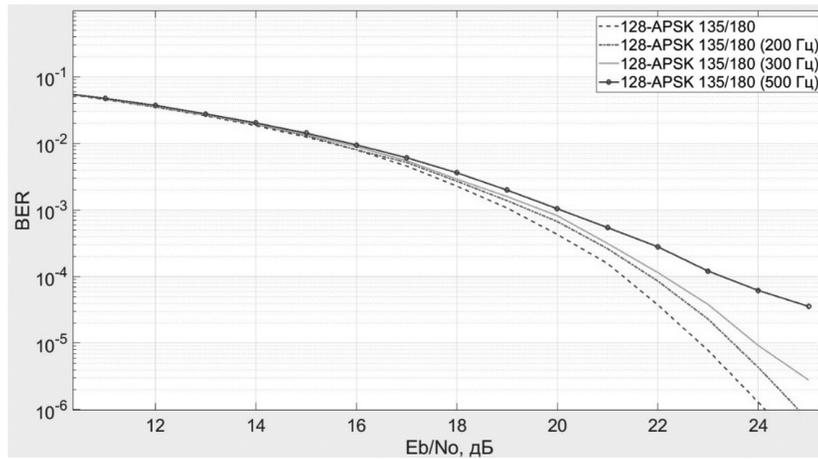


Рис. 3. Зависимость BER от ОСШ для сигнала с модуляцией 128-APSK 135/180 и соответствующим смещением частоты

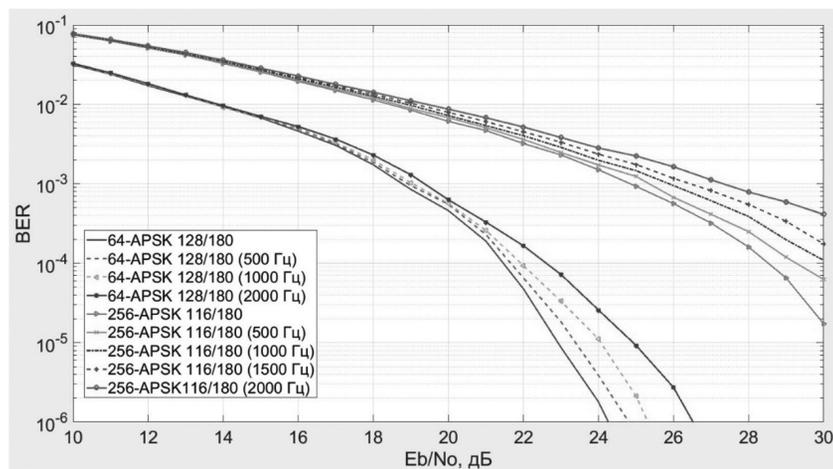


Рис. 4. Зависимость BER от ОСШ для сигналов с модуляцией 64-APSK 128/180 и 256-APSK 116/180 и соответствующим смещением частоты

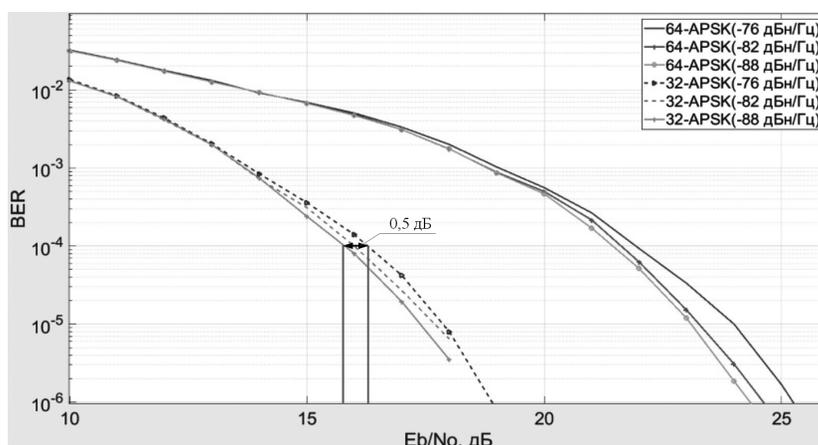


Рис. 5. Зависимость BER от ОСШ для сигналов с манипуляцией 32 и 64-APSK и разного уровня фазового шума

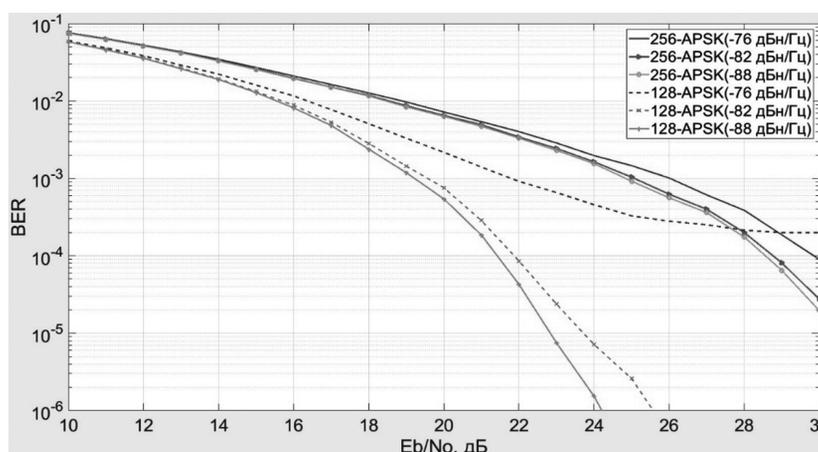


Рис. 6. Зависимость BER от ОСШ для сигналов с манипуляцией 128 и 256-APSK и разного уровня фазового шума

Кроме того, с помощью разработанной модели было проведено моделирование влияния фазового шума с параметрами $(-76; -82; -88 \text{ дБн/Гц})$ на канал СпС при фиксированном значении $\Delta f = 1 \text{ кГц}$. Соответствующие зависимости для $M = 32, 64, 128$ и 256 приведены на рис. 5 и 6.

Как видно на рис. 5 и 6, степень снижения помехоустойчивости по уровню $\text{BER} = 10^{-4}$ достигает около 0,5 для $M = 32, 64$ и 128 и 1,2 дБ для $M = 256$. При этом уровень шумов — 76 дБн/Гц является неприемлемым для $M = 128$, поскольку в данном случае значение BER превышает значение 10^{-4} , являющееся пороговым для систем DVB [11].

Выводы

Современные высокоскоростные каналы СпС могут функционировать в условиях повы-

шенного уровня фазового шума как в передающих, так и в приемных устройствах.

Разработана модель канала СпС с АФМн с помощью которой проведены исследования влияния фазового шума и расстройки по частоте на помехоустойчивость. Показано, что, с ростом уровня фазового шума и расстройки по частоте для достижения BER, равного 10^{-4} , требуется большее ОСШ (от 0,1 до 5 дБ) в сравнении с AWGN-каналом. Влияние данных факторов на помехоустойчивость возрастает с ростом кратности манипуляции M , что необходимо учитывать при расчете бюджета радиолинии.

Литература

1. Бучинский Д.И., Паршуткин А.В. Модель функционирования канала спутниковой связи в

условиях искажений служебной части кадров нестационарными помехами // Информатика и автоматизация. 2020. № 5. С. 967–990.

2. Миноли Д. Инновации в технологиях спутниковой связи. — М.: Техносфера. 2019. 449 с.

3. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи / Под ред. М.С. Немировского. — М.: Горячая линия — Телеком. 2019. 432 с.

4. ETSI Standard EN 302 307-1 V1.4.1 (2014-11). 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).

5. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа: пер. с англ. С.М. Смольского / под редакцией Ю.А. Гребенко. — М.: Горячая линия — Телеком. 2006. 224 с.

6. Струков А.П. Метод аналитического расчета вероятности символьной и битовой ошибки сигнала с амплитудно-фазовой манипуляцией в нелинейном канале // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4, Вып. 4. С. 83–88.

7. Атыева И.Р., Зыкин А.А., Хворенков В.В. Имитационная модель спутникового канала связи // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. № 1. С. 100–107.

8. Маслаков П.А., Паршуткин А.В. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 159–177.

9. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology — Random Instabilities: IEEE Standards 1139–1999. Vig J.R.

10. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology: IEEE Standard 1139–1988. Hellwig H.

11. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01). — Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. // EBU/CENELEC/ETSI JTC. <http://www.etsi.org>

References

1. Buchinsky D.I., Parshutkin A.V. A model of the functioning of a satellite communication channel under conditions of distortions of the service part of frames by non-stationary interference // Informatics and avtomation. 2020. № 5. Pp.967–990.

2. Minoli D. Innovations in satellite communication technologies. — М.: Technosphere. 2019. 449 p.

3. Nemirovsky M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. Basics of building satellite communication systems / Ed. M.S. Nemirovsky. — М.: Hot line — Telecom. 2019. 432 p.

4. ETSI Standard EN 302 307-1 V1.4.1 (2014-11). 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).

5. Rauscher K., Janssen F., Minyhold R. Fundamentals of spectral analysis: trans. from English S.M. Smolsky / edited by Yu.A. Grebenko — М.: Hotline — Telecom. 2006. 224 p.

6. Strukov A.P. Method of analytical calculation of the probability of symbolic and bit errors of a signal by amplitude-phase manipulation in a nonlinear channel // Rocket and Space Instrument Engineering and Information Systems. 2017. Vol. 4, Issue. 4. Pp. 83–88.

7. Atyeva I.R., Zykin A.A., Khvorenkov V.V. Simulation model of a satellite communication channel // Bulletin of the Kalashnikov ISTU. 2019. № 1. Pp. 100–107.

8. P.A. Maslakov, A.V. Parshutkin Investigation of the noise immunity of modern satellite communication standards to the effect of non-stationary interference // Proceedings of SPIIRAS. 2017. № 4 (53). Pp. 159–177.

9. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology — Random Instabilities: IEEE Standards 1139–1999. Vig J.R. (chair).

10. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology: IEEE Standard 1139–1988. Hellwig H. (chair).

11. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01). — Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. // EBU/CENELEC/ETSI JTC. <http://www.etsi.org>