

**ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ РЕТРАНСЛЯТОРА
НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛИНИЙ
С КОГЕРЕНТНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ****INFLUENCE OF REPEATER POWER AMPLIFIER NONLINEARITY
ON NOISE IMMUNITY OF SATELLITE RADIO LINES
WITH COHERENT PHASE MODULATION***Канд. техн. наук П.А. Маслаков¹, А.В. Солнцева²**Ph.D. P.A. Maslakov, A.V. Solntsev**¹ВКА им. А.Ф. Можайского, ²Войсковая часть 03523*

В спутниковых радиоприемах нелинейность усилителя мощности вызывает амплитудно-фазовые искажения, которые приводят к возникновению ошибок при приеме сигналов. В статье представлен программный комплекс, позволяющий проводить исследования по оцениванию возможности подсистемы фазовой синхронизации снижать вероятность возникновения битовых ошибок, вызванных влияниями искажений амплитуды и фазы сигнала в усилителе мощности спутникового ретранслятора. В качестве модели нелинейности в программном комплексе используется модель нелинейности Салеха. Для различных сигнально-кодовых конструкций стандарта спутниковой связи DVB-S2 определены результаты снижения помехоустойчивости. **Ключевые слова:** спутниковая радиоприемная линия, фазовая модуляция, нелинейные искажения, помехоустойчивость, вероятность битовых ошибок.

In satellite radio links, the nonlinearity of the power amplifier causes amplitude-phase distortions, which lead to errors in signal reception. The article presents a software package that allows one to study the effect of distortions of the amplitude and phase of a signal in a repeater power amplifier on the ability of the phase synchronization subsystem to reduce the likelihood of bit errors. The Saleh nonlinear model is used as a nonlinearity model in the software package. For various signal-code structures of the DVB-S2 satellite communication standard, the results of reducing the noise immunity are determined.

Keywords: satellite radio link, phase modulation, nonlinear distortion, noise immunity, bit error probability.

Введение

В последние годы наблюдается рост количества спутников с высокой пропускной способностью HTS (High Throughput Satellites) [1, 2]. Высокая скорость передачи информации в каналах (прежде всего на нисходящей линии) в интересах различных пользователей (стационарных,

подвижных) обеспечивается путем использования многоручевых антенн с узкими лучами диаграммы направленности, сокращением времени ожидания передачи за счет использования спутников на средних орбитах и применения передовых стандартизированных решений для широкополосных спутниковых приложений. Одним из таких решений является стандарт DVB-S2 и его

расширение DVB-S2X, позволяющий достигать максимальную гибкость и производительность передачи.

Для обеспечения широкополосности в передатчиках спутниковых ретрансляторов (СР) применяются в основном усилители мощности (УМ) на лампах бегущей волны, ширина полосы которых может достигать 50 % ее средней частоты [3]. Однако нелинейность УМ СР, порождающая нелинейные характеристики преобразования амплитуды на входе усилителя в амплитуду на выходе и амплитуды на входе в паразитный сдвиг фазы на выходе, называемые АМ/АМ и АМ/ФМ преобразованиями, существенно снижают помехоустойчивость спутниковых радиолиний, организованных через ретранслятор [4].

Вопросы влияния нелинейности УМ СР на помехоустойчивость спутниковых радиолиний для сигналов с квадратурной амплитудной и амплитудно-фазовой модуляциями достаточно широко опубликованы в научной печати [5–9]. В тоже время вопрос влияния нелинейности УМ на помехоустойчивость сигналов с когерентной фазовой модуляцией, которые требуют наличие качественной системы синхронизации, практически не исследован.

Целью статьи является оценивание влияния АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований, возникающих в нелинейном УМ СР, на помехоустойчивость спутниковой радиолинии, использующей сигналы с когерентной фазовой модуляцией стандарта DVB-S2.

**Программный комплекс
оценивания помехоустойчивости
спутниковых радиолиний
с нелинейным усилителем мощности
и когерентной фазовой модуляцией**

Важное место среди сигналов спутниковой связи занимают сигналы с фазовой модуляцией, одним из которых является двоичная фазовая модуляция BPSK, отличающаяся наиболее высокой помехоустойчивостью и простотой реализации модема. В стандарте DVB-S2X модуляция BPSK в сочетании с помехоустойчивым кодированием с большой избыточностью применяется для обеспечения приёма сигнала при отношениях сигнал/шум порядка — 9,9 дБ при скорости помехоустойчивого кодирования 1/5 [10].

Современные системы спутниковой связи, использующие когерентную фазовую модуляцию, требуют наличие подсистемы фазовой синхронизации. Синхронизация достигается путем подачи фильтрованной версии разности фаз между входным и выходным сигналом, что усложняет структуру радиоэлектронных средств. Кроме того, при использовании в спутниковой связи множественного доступа с частотным разделением каналов из-за наличия участка насыщения в усилительных выходных каскадах СР возникают следующие эффекты: потеря выходной мощности бортового ретранслятора в многосигнальном режиме; подавление слабых сигналов сильными сигналами; интермодуляционные искажения из-за нелинейности амплитудной характеристики; интермодуляционные искажения из-за АМ/ФМ-преобразования. Амплитудно-фазовые преобразования, свойственные СВЧ усилительным приборам, обусловлены тем, что напряжение на управляющем электроде влияет на интенсивность потока носителей и на скорость их движения. В этом случае уровень сигнала, усиливаемого в УМ СР, непосредственно влияет на задержку сигнала и на его фазовую характеристику.

Для оценивания помехоустойчивости спутниковых радиолиний с когерентной фазовой модуляцией и нелинейным усилителем мощности в среде моделирования Matlab/Simulink разработан программный комплекс, структурная схема которого представлена на рис. 1.

В состав программного комплекса входит: модель передающей земной станции, модель приемной земной станции с модулем синхронизации, модель УМ СР, а также канал с аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN).

В качестве модели нелинейности УМ в программном комплексе использована модель нелинейности Салеха, отличающаяся простотой, высокой точностью аппроксимации и универсальностью. Показателем оценивания помехоустойчивости спутниковой радиолинии в работе принята вероятность символьной ошибки (BER — Bite Error Rate), определяемая как отношение количества неправильно принятых символов к их общему количеству при заданном нормированном отношении сигнал/шум (E_s/N_0). Сигнал на входе такого нелинейного усилителя $x(t)$ представляется в виде:

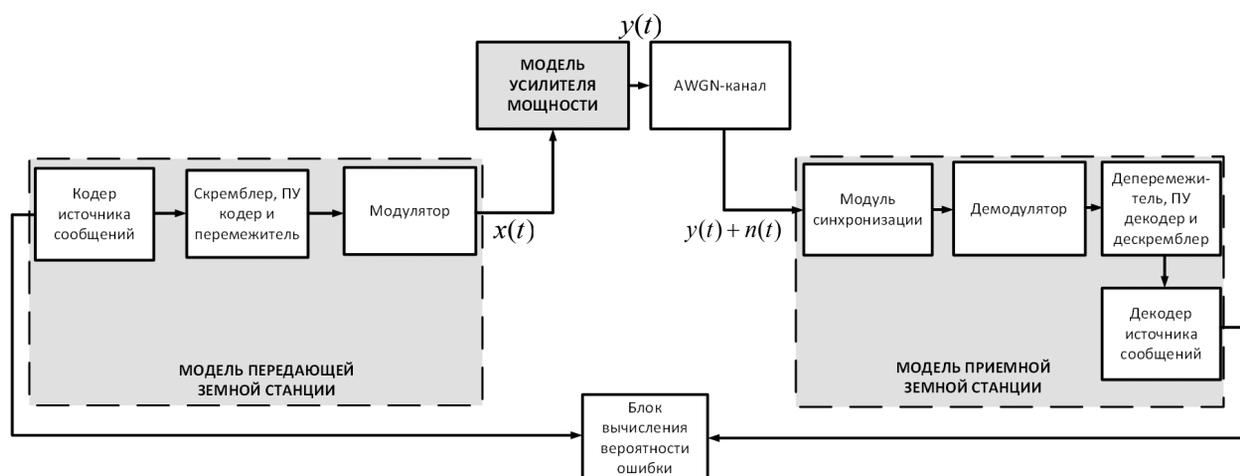


Рис. 1 Структурная схема программного комплекса оценивания помехоустойчивости спутниковых радиолиний с нелинейным усилителем мощности и когерентной фазовой модуляцией

$$x(t) = r(t) \cos[\omega_0 t + \psi(t)],$$

где $r(t)$ — угловая частота несущей;
 ω_0 — мгновенное значение огибающей модулированного сигнала;
 $\psi(t)$ — мгновенное значение фазы модулированного сигнала.

Сигнал на выходе нелинейного усилителя $y(t)$ будет иметь вид:

$$y(t) = A[r(t)] \cos\{\omega_0 t + \psi(t) + \Phi[r(t)]\},$$

где $A(\bullet)$ — нечетная функция, представляющая АМ/АМ преобразование, а $\Phi(\bullet)$ — четная функция, представляющая АМ/ФМ преобразование.

Модель Салеха описывает функциональную зависимость $A(\bullet)$ и $\Phi(\bullet)$:

$$A(r) = \frac{\alpha_a \cdot r}{1 + \beta_a \cdot r^2}; \quad \Phi(r) = \frac{\alpha_\phi \cdot r}{1 + \beta_\phi \cdot r^2},$$

где r — нормированная амплитуда входного сигнала относительно максимального значения; α_a , β_a — параметры АМ/АМ-преобразований; α_ϕ , β_ϕ — параметры АМ/ФМ-преобразований.

В настоящее время практически всегда в бортовых передатчиках осуществляется коррекция амплитудной и амплитудно-фазовой характеристик путем соответствующего выбора этих характеристик предварительных каскадов усиления.

В настройках модели нелинейности УМ используются следующие оптимизированные

параметры: $\alpha_a = 2,1587$; $\beta_a = 1,1517$; $\alpha_\phi = 4,033$; $\beta_\phi = 9,1040$.

Аддитивная смесь сигнала и аддитивного белого гауссовского шума на приемной земной станции описывается выражением:

$$y(t) = x(t) + n(t),$$

где $x(t)$ — полезный сигнал; $n(t)$ — белый гауссовский шум.

Результаты исследования нелинейности усилителя мощности ретранслятора на помехоустойчивость спутниковых радиолиний с когерентной фазовой модуляцией

На основе разработанного программного комплекса проведен ряд исследований по оцениванию возможности подсистемы фазовой синхронизации устранять ошибки, вызванные влияниями искажений амплитуды и фазы сигнала в УМ СР. Так, при прохождении ВРСК сигнала через АWGN-канал при достижении ошибки в определении фазы, составляющей 86–88°, система синхронизации не позволяет устранять фазовую ошибку. Если в канал добавить нелинейный УМ, то срыв синхронизации будет уже наступать при 67–70°. Для QPSK сигналов срыв синхронизации наступает при ошибке в 41–43° в АWGN-канале и 18–21° для канала с нелинейным усилителем. Таким образом фазовая ошибка для сигналов с фазовой модуляцией увеличивается на 20–25°.

На рис. 2–5 приведены графики зависимости вероятностей символьных ошибок от нормированных отношений сигнал/шум (отношение энергии символа к спектральной плотности мощности шума) для различных вариантов сигнально-кодовых конструкций стандарта спутниковой связи DVB-S2.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о существенном ухудшении помехоустойчивости спутниковых радиолиний, вызванных нелинейностью УМ. С ростом спектральной эффективности сигнально-кодовых конструкций увеличивается и величина деградации помехоустойчивости, достигающая около 6 дБ для сигналов 8-PSK 5/6, что превышает допустимые уровни.

Выводы

Разработан программный комплекс, с помощью которого проведены исследования по оцениванию помехоустойчивости спутниковых радиолиний с нелинейным усилителем мощности и когерентной фазовой модуляцией.

Выявлено, что нелинейные явления, возникающие в УМ, существенно снижают возможности подсистемы фазовой синхронизации устранять ошибки — фазовая ошибка для сигналов с модуляцией BPSK и QPSK увеличивается примерно на 20–25 градусов.

При исследовании помехоустойчивости стандарта спутниковой связи DVB-S2 показано, что с ростом спектральной эффективности сигналь-

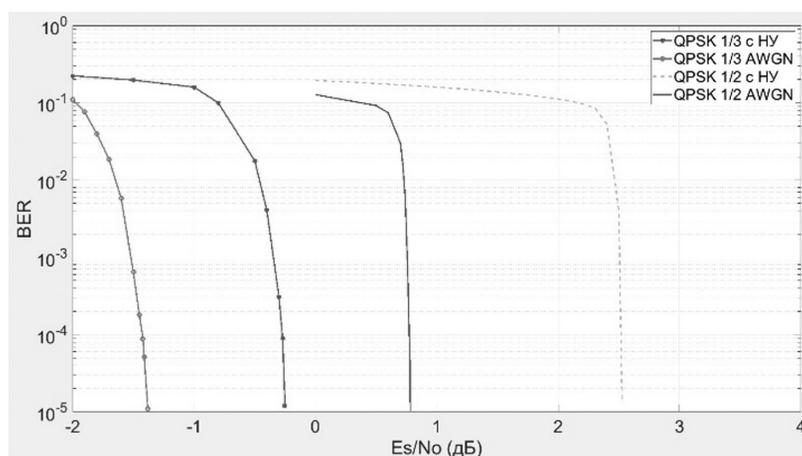


Рис. 2. График зависимости вероятности символьной ошибки от нормированного отношения сигнал/шум для вида модуляции QPSK 1/3 и QPSK 1/2 стандарта DVB-S2 с линейным усилителем и нелинейным усилителем по модели Салеха

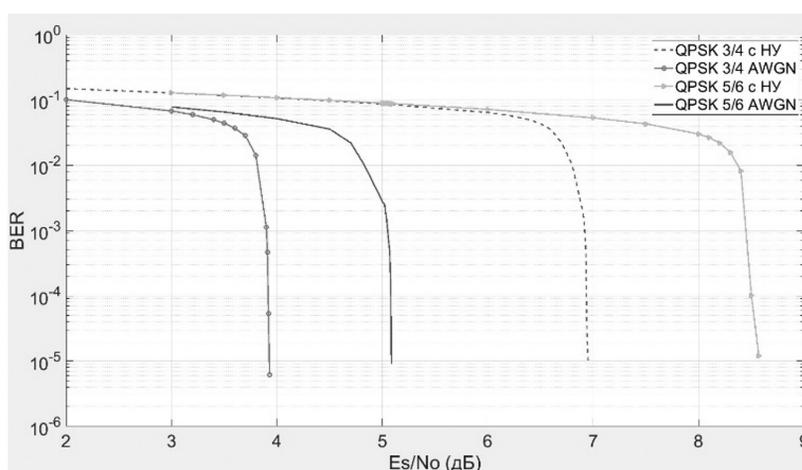


Рис. 3. График зависимости вероятности символьной ошибки от нормированного отношения сигнал/шум для вида модуляции QPSK 3/4 и QPSK 5/6 стандарта DVB-S2 с линейным усилителем и нелинейным усилителем по модели Салеха

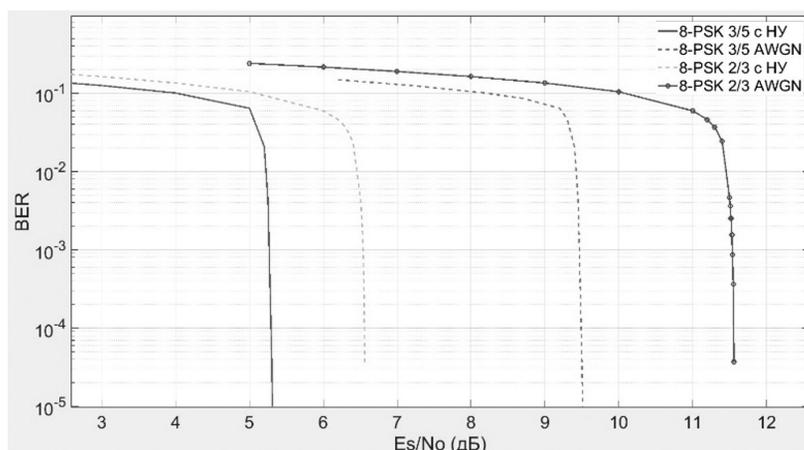


Рис. 4. График зависимости вероятности символьной ошибки от нормированного отношения сигнал/шум для вида модуляции 8PSK 3/5 и 8PSK 2/3 стандарта DVB-S2 с линейным усилителем и нелинейным усилителем по модели Салеха

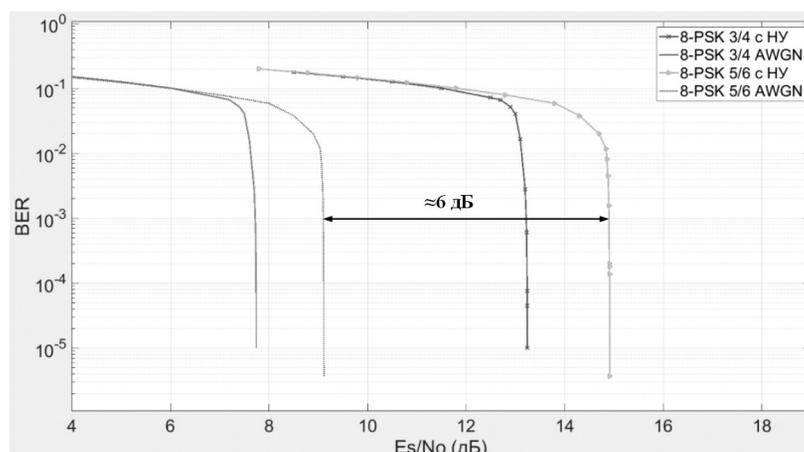


Рис. 5. График зависимости вероятности символьной ошибки от нормированного отношения сигнал/шум для вида модуляции 8PSK 3/4 и 8PSK 5/6 стандарта DVB-S2 с линейным усилителем и нелинейным усилителем по модели Салеха

но-кодовых конструкций увеличивается и величина деградации помехоустойчивости, вызванная нелинейностью УМ. Так, для сигналов 8-PSK 5/6 по уровню вероятности символьной ошибки 10^{-3} , помехоустойчивость примерно на 6 дБ ниже, что превышает допустимые уровни. Для нивелирования негативного эффекта, необходимо уменьшать входной сигнал на входе УМ СР по отношению к уровню входного сигнала, при котором УМ достигает насыщения, что приводит к существенному снижению эффективной изотропной излучаемой мощности ретранслятора (ствола).

Литература

1. Чепурнов П.А., Петриченко А.В., Яковлев Р.С., Мишуков А.Н. Анализ развития систем

спутниковой связи ведущих зарубежных стран с космическими аппаратами на геостационарной орбите на период до 2025 года // Информатика и космос. 2020. № 3. С. 34–41.

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. Крылов Г.М., Пруслин В.З., Богатырев Е.А. и др. Амплитудно-фазовая конверсия / Под ред. Г.М. Крылова. — М.: Связь. 1979. 256 с.

5. Кукк К.И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. — М.: Горячая линия–Телеком. 2019. 256 с.

6. Дегтярев С.С., Носов В.И. Анализ помехоустойчивости спутниковой линии связи с модуляцией M-APSK при учёте нелинейных искажений // *Естественные и технические науки*. 2017. № 6. С. 14–22.

7. Дегтярев С.С., Носов В.И. Исследование влияния амплитудной конверсии на помехоустойчивость приёма сигналов с модуляцией M-APSK // *Телекоммуникации*. 2017. № 4. С. 6–16.

8. Вознюк В.В., Маслаков П.А. Методика оценивания шумовой добротности приемных систем наземных комплексов радиомониторинга спутниковой связи // *Вопросы оборонной техники*. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 9–10. С. 18–23.

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

10. Исмаилов Н.А., Айнакулов Э.Б. Помехоустойчивые коды цифрового телевизионного стандарта DVB-S2X // *Интернаука*. 2017. № 20 (24). С. 13–14.

References

1. Chepurnov P.A., Petrichenko A.V., Yakovlev R.S., Mishukov A.N. Analysis of the development of satellite communication systems of leading foreign countries with spacecraft in geostationary orbit for the period up to 2025 // *Information and Space*. 2020. № 3. P. 34–41.

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

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

4. Krylov G.M., Pruslin V.Z., Bogatyrev E.A. and other Amplitude-phase conversion / Ed. G.M. Krylova. — M.: Communication. 1979. 256 p.

5. Kuk K.I. Satellite communications: past, present, future. — M.: Hotline–Telecom. 2019. 256 p.

6. Degtyarev S.S., Nosov V.I. Analysis of noise immunity of a satellite communication line with M-APSK modulation taking into account nonlinear distortions // *Natural and technical sciences*. 2017. № 6. P. 14–22.

7. Degtyarev S.S., Nosov V.I. Investigation of the effect of amplitude conversion on the noise immunity of receiving signals with M-APSK modulation // *Telecommunications*. 2017. № 4. P. 6–16.

8. Voznyuk V.V., Maslakov P.A. Methodology for evaluating the noise figure of merit of receiving systems of ground complexes for radio monitoring of satellite communications // *Military Engineering*. Issue 16. Counter-terrorism technical devices. 2019. № 9–10. P. 18–23.

9. 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. P. 83–88.

10. Ismailov N.A., Ainakulov E.B. Noise-resistant codes of the digital television standard DVB-S2X // *Internauka*. 2017. № 20 (24). P. 13–14.