

УДК 621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_23

МОДЕЛЬ ПРИЕМА ШИРОКОПОЛОСНЫХ РЕТРАНСЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

MODELING THE RECEPTION OF WIDEBAND RELAYED SIGNALS IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS SUBJECT TO UNINTENTIONAL ANGLE-MODULATED INTERFERENCE

Канд. техн. наук Д.А. Комлык, А.Г. Маслик, канд. техн. наук. С.А. Святкин

Ph.D. D.A. Komlyk, A.G. Maslik, Ph.D. S.A. Svyatkin

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье приведены результаты моделирования процесса воздействия на приемные устройства дискретных ретранслированных сигналов систем спутниковой связи непреднамеренных помех с угловой модуляцией с учетом несовпадения помехи и сигнала по несущей частоте. Модель учитывает канальное кодирование, модуляцию, скорость кодирования, аддитивный скремблер, гаммирование, непрерывные помехи с угловой модуляцией и шумовые помехи. Определены значения вероятности ошибки на бит в зависимости от отношения сигнал/помеха при использовании сверточного кодера. Исследовано влияние прицельной и неприцельной по частоте непреднамеренной помехи с угловой модуляцией на приемное устройство сигнала с модуляцией BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM. Проведено сравнение воздействия непреднамеренной помехи с угловой модуляцией и шумовой помехи на широкополосную спутниковую систему связи.

Ключевые слова: непреднамеренная помеха, помеха с угловой модуляцией, вероятность ошибки на бит, фазовая модуляция.

The article presents the results of modeling the impact of unintentional angle-modulated interference on receiving devices of discrete relayed signals from satellite communication systems, considering the frequency offset between the interference and the signal. The model incorporates channel coding, modulation, coding rate, an additive scrambler, gamma encoding, continuous angle-modulated interference, and noise interference. Bit error rate values were determined as a function of the signal-to-interference ratio when employing a convolutional encoder. The impact of targeted and untargeted unintentional angle-modulated interference on receiving devices with BPSK, QPSK, 8PSK, and 16QAM modulated signals was investigated. A comparison was made between the effects of unintentional angle-modulated interference and noise interference on a wideband satellite communication system.

Keywords: unintended interference, angle-modulated interference, bit error probability, phase modulation.

Одними из самых распространенных видов модуляции сигналов систем спутниковой связи являются сигналы с дискретной фазовой модуляцией, которые являются частным случаем сигналов с угловой модуляцией. В связи с широким распространением систем спутниковой связи, увеличивается загруженность радиочастотного спектра, а одним из факторов, усугубляющих проблему электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, является воздействие на приемные устройства дискретных сигналов непреднамеренных помех с угловой модуляцией, создаваемых аналогичными радиоэлектронными средствами [1]. В связи с чем исследования помехоустойчивости радиолинии с фазовой модуляцией с учетом воздействия помех с угловой модуляцией являются актуальными.

Известны выражения для получения вероятности ошибки на бит при воздействии на радиоэлектронные средства связи помех с угловой модуляцией и белого гауссовского шума [2]. Однако данные выражения справедливы только для сигналов, использующих сигналы с BPSK и QPSK модуляцией, а также для случая совпадения полосы частот сигнала и непреднамеренной помехи. Кроме того, данные аналитические выражения не учитывают использование помехоустойчивого кодирования. Для решения задачи исследования воздействия на приемные устройства дискретных сигналов систем спутниковой связи смещенной по несущей частоте помехи с угловой модуляцией необходимо использование имитационной модели.

Математическое описание модели приема широкополосных ретранслированных сигналов систем спутниковой связи в условиях непреднамеренных помех с угловой модуляцией

При построении имитационной модели воздействия помех с угловой модуляцией на приемное устройство дискретных сигналов систем спутниковой связи введены ряд ограничений и допущений.

1. Модель включает реализацию процесса канального кодирования (помехоустойчивое кодирование, перемежение и скремблирование) и модуляции (BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM) [3, 4].

2. Задана скорость кодирования R .

3. С учетом того, что скремблирование в некоторых случаях может привести к размножению ошибок, рассматривается аддитивный скремблер, не влияющий на помехоустойчивость [5].

4. С учетом того, что шифрование битовых потоков информации в некоторых случаях может привести к ухудшению помехоустойчивости, рассматривается симметричное шифрование — гаммирование, не влияющее на помехоустойчивость [6].

5. В качестве помех используются непрерывные помехи с угловой модуляцией ξ_{ym} [7]

$$\xi_{\text{ym}}(t) = U_{\text{n}} \sin \left(2\pi f_{\text{n}} t + 2\pi \int_0^t \xi_{\text{n}}(t) dt + \varphi_0 \right),$$

где U_{n} — амплитуда помехи;

f_{n} — несущая частота помехи;

$\xi_{\text{n}}(t)$ — модулирующий шум, сформированный по нормальному закону распределения;

φ_0 — начальная фаза помехи;

и, для сравнения, шумовая помеха [8]

$$\xi_{\text{ш}}(t) = \sum_{k=1}^m U_k \cos \left(2\pi \left(f_{\text{n}} + (f_{\text{в}} - f_{\text{n}}) \frac{k}{m} \right) \frac{t}{2f_{\text{в}}} + \varphi_k \right),$$

где U_k — амплитуда, распределенная по закону Релея, $k = 1, 2, \dots, m$;

φ_k — фаза, распределенная по равномерному закону $(0-2\pi)$;

$f_{\text{n}}, f_{\text{в}}$ — нижняя и верхняя частоты спектра шумовой помехи.

Модель приема широкополосных ретранслированных сигналов систем спутниковой связи в условиях непреднамеренных помех с угловой модуляцией представлена на рис. 1 [9], где K — количество двоичных символов в информационной последовательности.

Информационная последовательность с количеством двоичных символов K_0 (рис. 2, а), проходя через блок канального кодирования, поступает на модулятор. При этом избыточность информационной последовательности с выхода блока канального кодирования K_1 (рис. 2, б) определяется скоростью кодирования R .

Далее с использованием выбранного вида модуляции (BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM) итоговая последовательность переносится на несущую частоту линии, и сформированный сигнал $s(t)$ излучается в направлении приемника (рис. 2, в) [10].

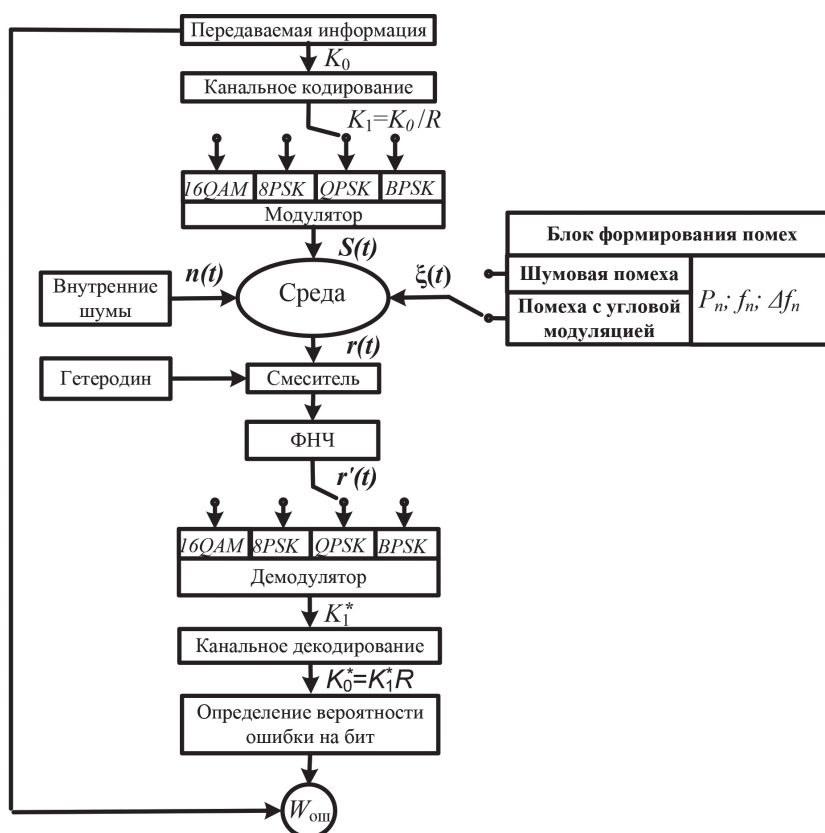


Рис. 1. Структура имитационной модели воздействия помех с угловой модуляцией на приемное устройство дискретных сигналов

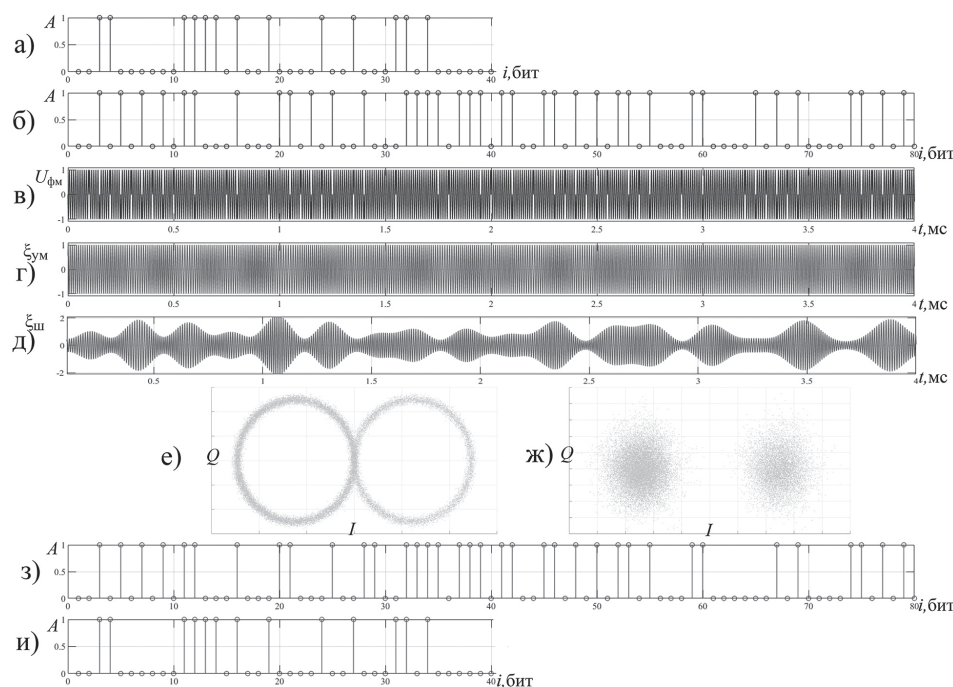


Рис. 2. Временная диаграмма: а — передаваемая информация; б — канальное кодирование; в — BPSK; г — помеха с угловой модуляцией; д — шумовая помеха; е — созвездие принятой смеси BPSK+ помеха с угловой модуляцией; ж — созвездие принятой смеси BPSK+ шумовая помеха; з — результат демодуляции; и — принятая информация

На приемник поступает смесь $r(t)$ информационного сигнала $s(t)$ и выбранной либо помехи с угловой модуляцией (рис. 2, *з*), либо шумовой помехи (рис. 2, *д*) $\xi(t)$, а также пересчитанных ко входу шумов приемника $n(t)$ [10]:

$$r(t) = s(t) + \xi(t) + n(t).$$

После смесителя смесь $r'(t)$ на промежуточной частоте поступает на фильтр нижних частот и далее на демодулятор (рис. 2, *е, жс*) [11]. В блоке канального декодирования с извлеченной смесью сигнала и помехи последовательностью K_1^* (рис. 2, *з*) производится дегерережевание и декодирование (рис. 2, *и*).

В блоке определения вероятности ошибки на бит вероятность ошибки $W_{\text{ош}}$ определяется как отношение количества ошибочно принятых дво-

ичных символов к общему числу передаваемых двоичных символов последовательности K_0 [12].

Спектрограммы сигнала и помех представлены на рис. 3, где f_n — несущая частота, ΔF — ширина спектра.

Кроме того, имитационная модель учитывает воздействие внутренних шумов приемника, которое определяется в соответствии с выражением:

$$P_{\text{ш}} = k_B T_{\Sigma} \Delta f_{\text{ш}},$$

где k_B — постоянная Больцмана;

T_{Σ} — эквивалентная температура приемной системы, учитывающая эквивалентную температуру шумов антенны, абсолютную температуру среды, коэффициент передачи волноводного тракта, эквивалентную температуру приемника;

$\Delta f_{\text{ш}}$ — эквивалентная полоса шумов.

Эквивалентная температура шумов антенны учитывает составляющие, обусловленные космическими шумами, излучением атмосферы, приемом излучения земной поверхности, приемом атмосферного излучения, отраженного от земной поверхности. В имитационной модели принято значение эквивалентной температуры, равное $-0,63$ дБ.

Результаты исследования помехоустойчивости приемных устройств дискретных сигналов систем спутниковой связи к помехам с угловой модуляцией

С применением предложенной имитационной модели определено значение вероятности ошибки на бит в зависимости от отношения сигнал/помеха. При этом в качестве помехоустойчивого кодирования в имитационной модели используется сверточный кодер со скоростью кодирования $1/2$.

На рис. 4 представлен график зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал-помеха с учетом внутреннего шума при воздействии на приемное устройство сигнала с модуляцией BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM прицельной по несущей частоте и по занимаемой полосе частот непреднамеренной помехи с угловой модуляцией.

На рис. 5 и 6 представлен график зависимости вероятности ошибки на бит от отношения

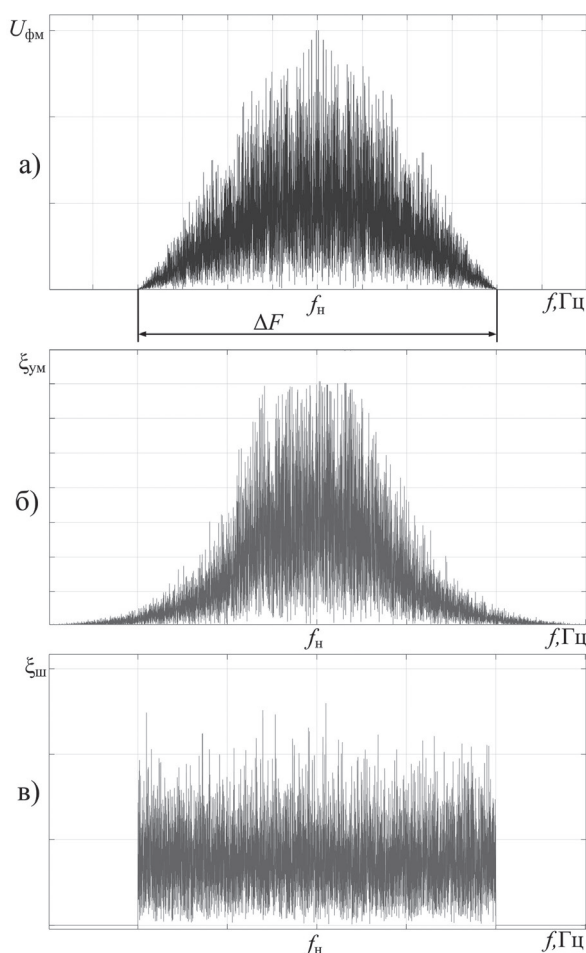


Рис. 3. Спектрограмма: а — сигнала BPSK; б — помехи с угловой модуляцией; в — шумовой помехи

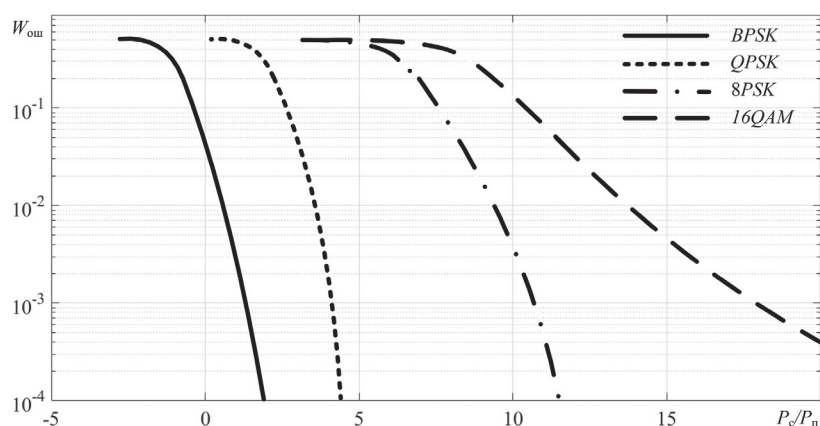


Рис. 4. Вероятность ошибки на бит от отношения сигнал/помеха при воздействии непреднамеренной помехи с угловой модуляцией

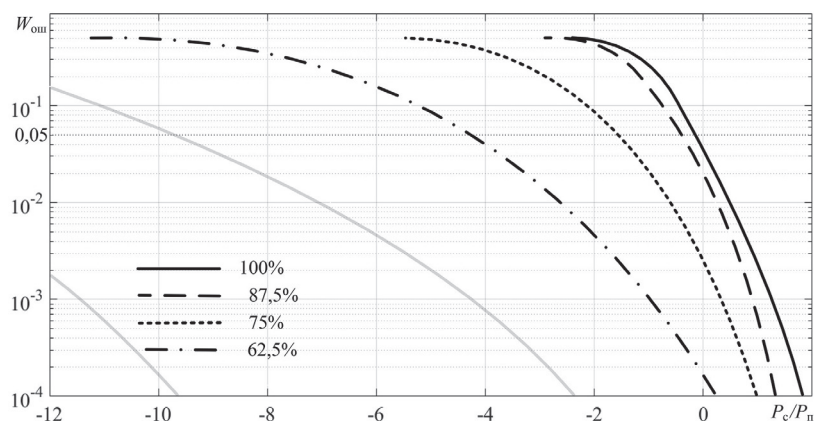


Рис. 5. Вероятность ошибки на бит от отношения сигнал/помеха при воздействии неприцельной по частоте непреднамеренной помехи с угловой модуляцией с долей перекрытия помехи и сигнала по частоте на 62,5–100 %

сигнал-помеха с учетом внутреннего шума при воздействии на приемное устройство сигнала с модуляцией BPSK непреднамеренной помехи с

угловой модуляцией с занимаемой полосой частот, равной полосе частот сигнала и смещенной по несущей частоте.

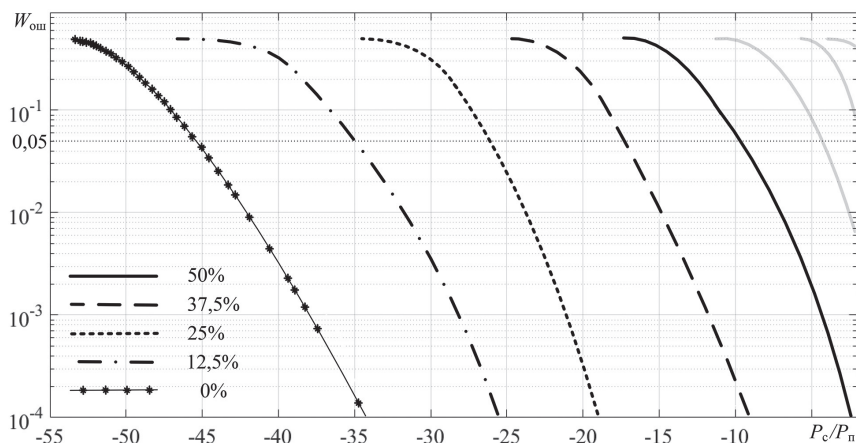


Рис. 6. Вероятность ошибки на бит от отношения сигнал/помеха при воздействии неприцельной по частоте непреднамеренной помехи с угловой модуляцией с долей перекрытия помехи и сигнала по частоте на 62,5–100 %

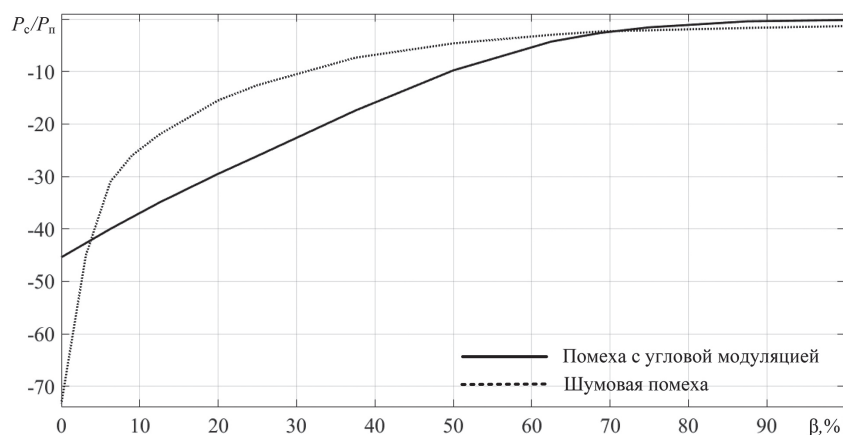


Рис. 7. Значение отношения сигнал/помеха от доли перекрытия помехи и сигнала по частоте при воздействии на сигнал с модуляцией BPSK непреднамеренной помехи с угловой модуляцией и шумовой помехи

Смещение несущей частоты непреднамеренной помехи относительно несущей частоты сигнала характеризуется долей перекрытия помехи и сигнала по частоте. При этом долей перекрытия 100 % является полное совпадение по частоте помехи и сигнала.

При фиксированном значении вероятности ошибки на бит, равном 0,05, являющемся пороговым значением отношения сигнал/помеха, при котором радиоэлектронное средство не может передавать информацию с заданным качеством, построен график зависимости отношения сигнал/помеха в зависимости от процентного соотношения совпадения по частоте сигнала и непреднамеренной помехи. На рис. 7 представлено сравнение значений отношения сигнал/помеха при воздействии на сигнал с модуляцией BPSK непреднамеренной помехи с угловой модуляцией и шумовой помехи. При этом полосы занимаемых частот помехи с угловой модуляцией и шумовой помехи равны.

Анализ графика, приведенного на рис. 7, показал, что на промежутке процента совпадения по частоте сигнала и помехи от 70,83 % до 100 %, а также на промежутке от 3,76 % до 0 % непреднамеренная помеха с угловой модуляцией оказывает более существенное деструктивное воздействие на сигнал, чем шумовая помеха. Преимущество помехи с угловой модуляцией при совпадении сигнала и помехи менее 3,76 % обусловлено тем, что шумовая помеха имеет четко выраженные границы спектра (рис. 3, в).

Таким образом, полученные результаты имитационного моделирования позволяют сде-

лать вывод, что воздействие непреднамеренных помех с угловой модуляцией может оказать значительное влияние на работоспособность канала спутниковой связи. По результатам имитационного моделирования проведено сравнение непреднамеренной помехи с угловой модуляцией и шумовой помехи и установлено, что наибольшее воздействие на широкополосную систему спутниковой связи оказывает непреднамеренная помеха с угловой модуляцией при совпадении по частоте сигнала и помехи.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке качества функционирования радиоэлектронных средств в условиях непреднамеренных взаимных помех с угловой модуляцией в интересах анализа электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

Список источников

- Куликов Г.В., Данг Суан Ханг. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 11. 16 с.
- Паршуткин А.В., Бучинский Д.И., Комлык Д.А. Исследование помехоустойчивости приемников сигналов с дискретной фазовой модуляцией в условиях помех с угловой модуляцией и шумов // Труды МАИ. 2023. № 129. 28 с.
- Маслаков П.А., Копалов Ю.Н. Путь развития систем спутниковой связи в условиях совершенствования телекоммуникационных технологий // Вопросы оборонной техники. Серия 16.

Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 9–10 (183–184). С. 39–46.

4. Жирнов А.И., Селезнев А.В., Таиров Р.З., Горанько С.А. Принцип и особенности применения помехоустойчивого кодирования в системах передачи многоканальной радиосвязи // Научно-исследовательские публикации. 2024. № 1. С. 34–39.

5. Мешальникова А.А., Мирянова А.Д., Мирянова В.Н. Анализ методов скремблирования // Дневник науки. 2022. № 5 (65). 9 с.

6. Штанько С.В. Ограничение несанкционированного доступа в радиотехнических системах с широкополосной передачей информации // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5 (96). С. 57–65.

7. Программный комплекс моделирования воздействия помехи с угловой модуляцией на спутниковый канал ретрансляции и передачи данных: программа для ЭВМ № 2022664803 Рос. Федерация. № 2022664303; № 2022663653; заявл. 18.07.2022; опубл. 27.07.2022.

8. Вознюк В.В., Копалов Ю.Н., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости приема сигналов с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) в условиях воздействия внутренних шумов и внешних помех с угловой модуляцией // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2023. № 688. С. 22–31.

9. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: пер. англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

10. Сиротин И.Н., Паршуткин А.В., Левин Д.В. Аппаратурный анализ сигналов: учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. 224 с.

11. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 337 с.

12. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.

sence of phase-shift keying interference // Journal of Radio Electronics. 2021. No 11. 16 p.

2. Parshutkin A.V., Buchinsky D.I., Komlyk D.A. Study of noise immunity of receivers for discrete phase-modulated signals under angle-modulated interference and noise // Proceedings of MAI, 2023. No 129. 28 p.

3. Maslakov P.A., Kopalov Yu.N. Development path of satellite communication systems in the context of telecommunication technology advancements // Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Counter-Terrorism Means. 2023. No 9–10 (183–184). Pp. 39–46.

4. Zhirnov A.I., Seleznev A.V., Tairov R.Z., Goranko S.A. Principle and features of error-correcting coding in multichannel radio communication systems // Research Publications. 2024. No 1. Pp. 34–39.

5. Meshalnikova A.A., Miryanova A.D., Miryanova V.N. Analysis of scrambling methods // Science Diary. 2022. No 5 (65).

6. Shtanko S.V. Restricting unauthorized access in radio systems with broadband data transmission // Information and Control Systems, 2018. No 5 (96). Pp. 57–65.

7. Software package for modeling the effects of interference with angular modulation on a satellite data relay and transmission channel: computer program No. 2022664803 Russian Federation. No. 2022663653; application dated 18.07.2022; published on 27.07.2022.

8. Voznyuk V.V., Kopalov Yu.N., Fomin A.V. Noise immunity of OFDM signals under internal noise and external angle-modulated interference // Proceedings of the Mozhaysky Military-Space Academy, 2023. No 688. Pp. 22–31.

9. Sklar B. Digital communications: Theoretical foundations and practical applications (2nd ed.). Moscow: Williams Publishing, 2003. 1104 p.

10. Sirotin I.N., Parshutkin A.V., Levin D.V. Hardware signal analysis: A textbook. St. Petersburg: Mozhaysky Military-Space Academy, 2021. 224 p.

11. Makarenko S.I. Communication system models under deliberate destabilizing effects and reconnaissance: A monograph. St. Petersburg: High-Tech Publishing, 2020. 337 p.

12. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. Noise immunity of spread-spectrum radio systems with carrier modulation by pseudo-random sequences. Moscow: Radio i Svyaz, 2003. 640 p.

Resources

1. Kulikov G.V., Dang, S.Kh. Noise immunity of signals with amplitude-phase keying in the pre-