

УДК 004: 621. 396 (045)

DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-100-107

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СПУТНИКОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ

**И. Р. Атыева**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**А. А. Зыкин**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**В. В. Хворенков**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Разработана компьютерная модель спутникового канала связи с учетом влияния доплеровского сдвига по частоте и стороннего спутника связи. Компьютерная модель построена в графической среде имитационного моделирования Simulink, которая входит в программный пакет MATLAB. В статье рассматривается имитационная модель спутникового канала связи с использованием сигнала MSK (Minimum Shift Keying).*

*В ходе работы изучены и применены алгоритмы цифровой обработки сигналов при разработке компьютерной модели спутникового канала связи. По заданным параметрам принимаемого сигнала определены основные параметры цифрового демодулятора сигнала MSK, такие как частота повторения бита, частота дискретизации, минимальная разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), количество уровней квантования, частота среза цифрового фильтра-дифференциатора.*

*В результате компьютерного моделирования спутникового канала связи было исследовано влияние отстройки по частоте сигнала MSK и уровня мешающего сигнала (стороннего спутника) на помехоустойчивость модема. По результатам моделирования получены графики зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня мешающего сигнала и вероятности ошибки от отстройки по частоте.*

*Разработанная компьютерная модель существенно расширяет круг задач, связанных с оперативной оценкой параметров электромагнитной совместимости (ЭМС) и радиоподавления в группировках подвижных РЭС.*

**Ключевые слова:** моделирование, спутниковый радиоканал, MSK – Minimum Shift Keying, MATLAB, SIMULINK.

### Введение

**А**ктивное использование спутниковых каналов для радиосвязи, радионавигации, телеуправления, дистанционного зондирования земли и решения других задач привело к тому, что помеховая обстановка существенно усложнилась. Кроме того, существенную роль играет так называемый космический мусор. Поэтому актуально на стадии проектирования устройств и систем космической связи исследование параметров проектируемых объектов при воздействии различных мешающих факторов как естественного, так и искусственного происхождения. В современных условиях такие исследования целесообразно проводить путем компьютерного моделирования. Различные аспекты компьютерного моделирования широко освещены в литературе [1–3].

Подобное исследование спутникового канала связи при воздействии на спутниковый канал связи помеховых сигналов, создаваемых передатчиками подвижных радиоэлектронных средств (РЭС) на заданном временном интервале, изложено в работе сотрудников концерна «Созвездие» [4]. В статье приведена модель на базе пакетов компьютерной математики

MATHCAD и MATLAB и разработан метод оценки параметров электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой трехмерной группировкой подвижных радиоэлектронных средств (РЭС), с учетом приемопередающих трактов [5].

На рис. 1 представлена функциональная модель воздействия трех подвижных РЭС на спутниковый канал связи.

В данной модели воздействие трех подвижных РЭС на спутниковый канал связи задается с помощью блоков, которые ссылаются на заранее подготовленные mat-файлы (созданные в математическом пакете MATHCAD). Данное действие неудобно и требует наличие сторонних файлов, разработанных в других математических пакетах.

Поэтому с целью соответствующего моделирования всего комплекса помех была разработана модель спутникового канала связи, которая учитывает стороннее влияние на передачу сигнала, а также учитываются влияния отстройки по частоте, уровень передаваемого сигнала и фазовый сдвиг сигнала. При этом стороннее воздействие на спутниковый канал связи имитируется с помощью блоков, входящих в пакет SIMULINK.

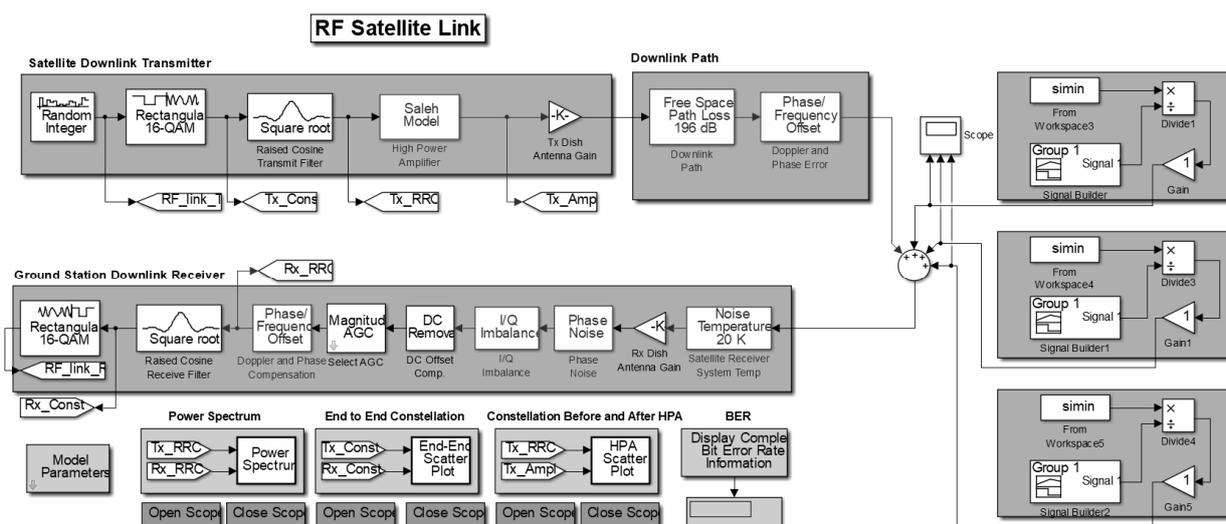


Рис. 1. Функциональная модель воздействия трех подвижных радиоэлектронных средств (ПЭС) на спутниковый канал связи

Fig. 1. Functional model of the impact of three mobile radio-electronic equipment on a satellite communication channel

### Методика моделирования спутникового канала

Предлагаемая модель ориентирована на каналы связи, которые используются в низкоорбитальных спутниковых системах типа отечественной системы «Гонец». В этих системах одним из основных видов модуляции является частотная модуляция минимального фазового сдвига MSK (Minimum Shift Keying). Этот сигнал является типичным для сигналов класса частотной модуляции с непрерывной фазой [6].

Для разработки компьютерной модели использована графическая среда имитационного моделирования Simulink, которая входит в программный пакет MATLAB. Это обусловлено тем, что Simulink является графической средой имитационного моделирования, позволяющей при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [7].

Для моделирования спутникового канала связи были определены следующие параметры: техническая скорость 19200 бит/с; входной сигнал – квадратурный. Нестабильность частоты  $10^{-6}$  от частоты сигнала. Вид модуляции – MSK. Диапазон изменения входного сигнала 60 дБ. Минимальное отношение сигнал/шум 10 дБ. Максимальная амплитуда входного сигнала 1 В. Тип сигнала – спутниковый с удалением 1500 км. Частота работы 240 МГц.

В разрабатываемой имитационной модели спутникового канала связи учитывается влия-

ние стороннего спутника и естественных помех.

### Описание компьютерной модели

Передачики стороннего и полезного спутника описываются следующими блоками: Random Integer Generator – генератор случайных чисел, создает случайный поток данных [8]. MSK Modulator Baseband – блок для формирования сигнала с модуляцией MSK (полезный сигнал). Rectangular QAM Modulator Baseband – блок для формирования сигнала с модуляцией QAM-16 (мешающий сигнал). Блок Zero-Order Hold выполняет дискретизацию входного сигнала по времени. Блок dB Gain задает уровень сигнала в дБВ.

Блок-схема представлена на рис. 2.

Блок имитирующий канал передачи:

Doppler and Phase Error – блок расстройки фазы/частоты, моделирует доплеровские искажения фазы и частоты сигнала.

Блок Satellite Receiver System Temp добавляет белый гауссовский шум, соответствующий эффективной системной температуре получателя.

Блок I/Q Imbalance вводит нестабильность постоянного смещения из-за неустойчивости амплитуды или фазы к сигналу [9].

Блок Downlink Path рассчитывает по заданным параметрам (высота орбиты, рабочая частота) потери сигнала в свободном пространстве.

Блок Sum суммирует входные сигналы.

Блок Phase Noise вносит фазовый шум.

Блок dB Gain2 задает уровень сигнала в дБВ.

Блок-схема представлена на рис. 3.

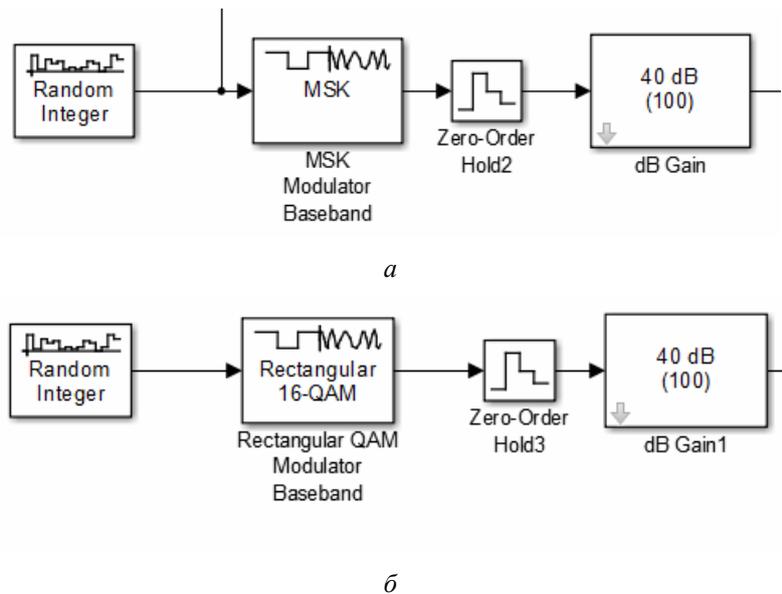


Рис. 2. Блок-схема формирования сигнала MSK (а – полезный сигнал) и сигнала QAM-16 (б – сторонний сигнал)

Fig. 2. Block diagram of the MSK signal generation (а - friendly signal) and QAM-16 signal generation (б - alien signal)

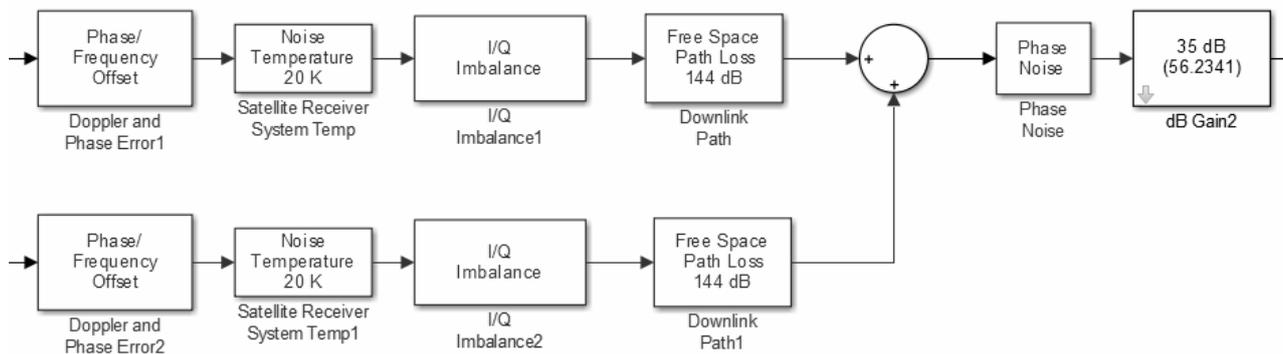


Рис. 3. Блок-схема спутникового канала связи

Fig. 3. Block diagram of satellite communication channel

Для описания модели цифрового демодулятора сигнала MSK используются следующие модули.

Doppler and Phase Error – блок моделирования доплеровских искажений фазы и частоты сигнала.

Complex to Real Image – блок вычисления действительной и мнимой части комплексного числа.

Quantizer – блок обеспечения квантования входного сигнала с одинаковым шагом по уровню.

Block Digital Filter Design – отдельная модифицированная библиотека для создания цифровых фильтров с заданными характеристиками.

Pulse Generator – блок формирования прямоугольных импульсов.

Block Compare To Constant – сравнение с константой.

Data Type Conversion – блок преобразования сигнала логического типа к числовому.

Block Error Rate Calculation используется для сравнения передаваемых и принимаемых данных, расчета числа символьных ошибок. При необходимости данный блок может быть настроен для автоматической остановки процесса моделирования при достижении заданного числа ошибок передачи информации.

Block Display отображает значение сигнала в виде числа.

На рис. 4 представлена модель цифрового демодулятора сигнала MSK.

Оценка влияния доплеровского сдвига частоты на помехоустойчивость демодуляции MSK-сигнала

ла была проведена следующим образом. Процесс моделирования начинается с нажатия кнопки Run.

Сигнал с блока Random Integer Generator поступает на блок MSK Modulator Baseband, который осуществляет модуляцию сигнала с выхода блока Random Integer Generator.

Пример задания исходных данных для моделирования приведен на рис. 5. С помощью блока Zero-Order Hold осуществляется дискретизация сигнала MSK. Блок фиксирует значение

входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации [11]. С выхода блока Zero-Order Hold дискретизированный сигнал MSK поступает на вход блока dB Gain. Потом сигнал поступает на блок Doppler and Phase Error. Данный блок моделирует доплеровские искажения фазы и частоты сигнала. Далее сигнал поступает на вход блока Satellite Receiver System Temp.

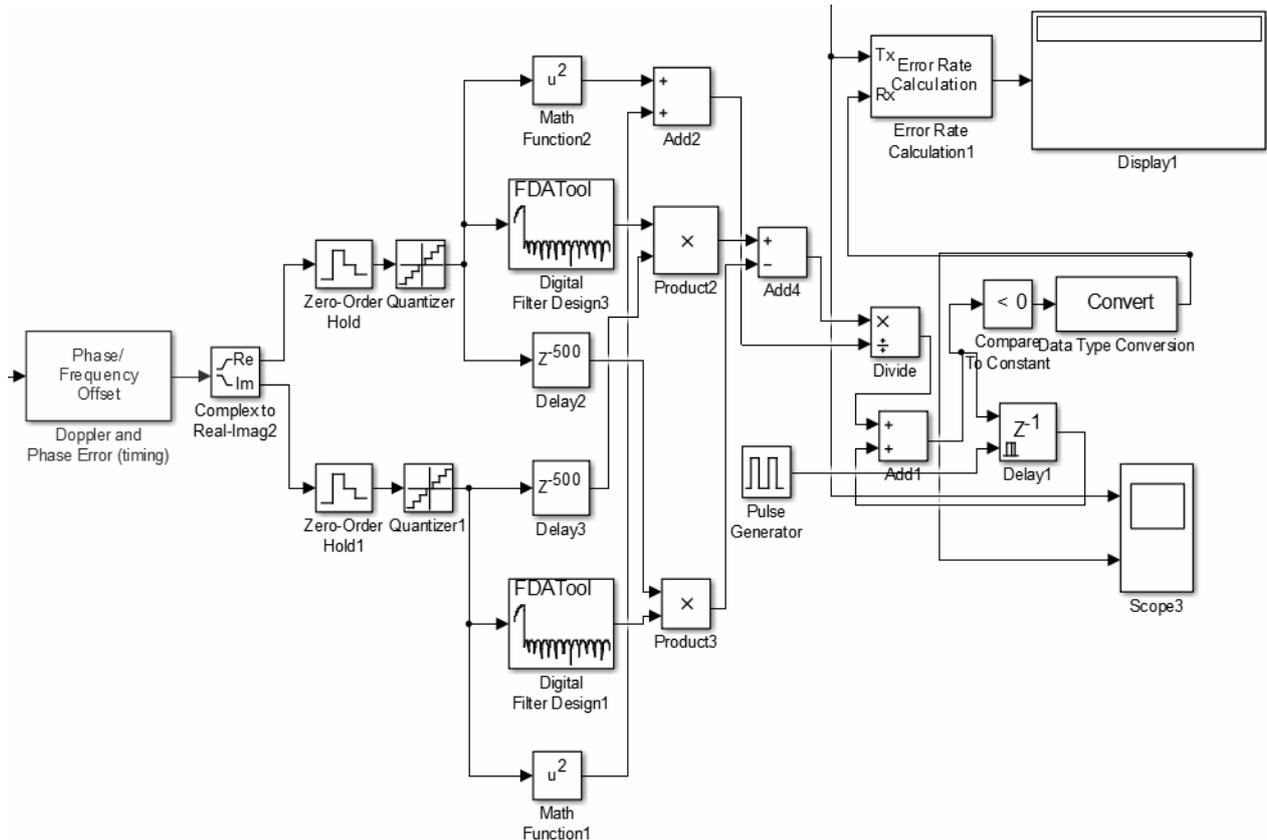


Рис. 4. Блок-схема цифрового демодулятора сигнала MSK

Fig. 4. Block diagram of the digital demodulator signal MSK

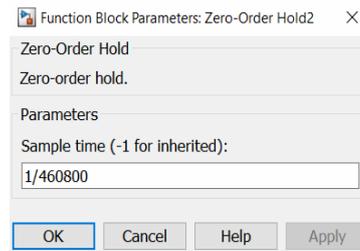
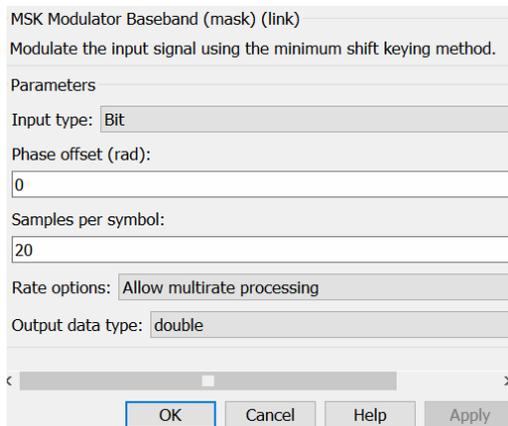


Рис. 5. Пример заданных параметров блока MSK Modulator Baseband и Zero-Order Hold

Fig. 5. Example of the specified parameters of the MSK Modulator Baseband and Zero-Order Hold

Блок добавляет белый гауссов шум, соответствующий эффективной системной температуре получателя. Для этого необходимо установить параметры модуля Specification method (спецификация метода) путем выбора пункта Noise temperature (шумовая температура) и установлением значения 20 К.

Выход блока Satellite Receiver System Temp – сигнал подключен к входу блока I/Q Imbalance. Блок I/Q Imbalance вводит нестабильность постоянного смещения из-за неустойчивости амплитуды или фазы к сигналу. Сигнал поступает на вход блока Downlink Path. В данном блоке по заданным параметрам (высота орбиты, рабочая частота) учитывается потери сигнала в свободном пространстве. Потом сигнал поступает на вход блока Phase Noise. Далее сигнал поступает на вход блока dB Gain, в котором устанавливается уровень передаваемого сигнала. После сигнал попадает на вход блока Doppler and Phase Error (timing). Данный блок предназначен для учета сдвига передаваемого по радиозфиру сигнала по частоте.

#### Определение основных параметров цифрового демодулятора MSK-сигнала

Сигнал поступает на вход блока dB Gain2, где происходит усиление принимаемого сигнала. Значение усиления составляет 35 дБВ. Усиленный сигнал поступает на вход блока Doppler and Phase Error (timing). Блок предназначен для учета сдвига передаваемого по радиозфиру сигнала по частоте (синхронизация приемника с передатчиком) [12, 13]. Далее сигнал поступает на блок Complex to Real-Imag (выделяет реальную и комплексную часть сигнала). В данном блоке выбираем тип сигнала (Real – действительная часть; Image – мнимая часть). При этом усилен-

ный сигнал сначала поступает на блок дискретизации (Zero-Order Hold), где производится его дальнейшая дискретизация. Сигнал после дискретизации квантуется в блоке Quantizer. Блоки Zero-OrderHold и Quantizer имитируют работу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [14].

Одним из основных устройств, входящих в цифровой демодулятор MSK-сигнала, является АЦП. Разрядность АЦП составляет 12 бит. Тогда количество уровней квантования будет равно  $2^{12} = 4096$ . Полученное значение уровней квантования указываем в блоке Quantizer в строке Quantization interval:1/4096.

После АЦП сигнал подвергается выделению фазы и огибающей. В качестве дифференцирующего звена использовался фильтр-дифференциатор. Цифровой фильтр-дифференциатор должен иметь необходимый наклон АЧХ в рабочей полосе частот. Для нашего примера максимальная частота (частота среза фильтра) определяется как  $F_{\text{среза}} \geq \alpha F_{\text{мод}} = 1,2 \cdot 19200 = 23040$  Гц. С выхода интегратора сигнал идет на логическую схему сравнения с 0, получаем битовую последовательность (информационная посылка).

#### Влияние отстройки по частоте на помехоустойчивость модема

В результате исследования проведена оценка вероятности битовой ошибки в зависимости от отстройки по частоте. При этом влияние стороннего источника (источник помех с модуляцией QAM-16) не учитывалось. В блоке dB Gain задается значение уровня сигнала, передаваемого с помощью спутника, равного 40 дБВ, что соответствует 200 Вт.

В табл. 1 приведены результаты исследования вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте.

Таблица 1. Результаты исследования битовой ошибки от отстройки по частоте

Table 1. The results of the study of from the bit-error-rate the frequency offset

Отстройка по частоте, кГц	2	2,5	3	3,5	4	4,5
BER	0	$3,574 \cdot 10^{-2}$	$5,099 \cdot 10^{-2}$	$9,239 \cdot 10^{-2}$	$1,331 \cdot 10^{-1}$	$1,712 \cdot 10^{-1}$
Отстройка по частоте, кГц	5	5,5	6	6,5	7	7,5
BER	$2,124 \cdot 10^{-1}$	$2,395 \cdot 10^{-1}$	$2,502 \cdot 10^{-1}$	$2,983 \cdot 10^{-1}$	$3,425 \cdot 10^{-1}$	$3,745 \cdot 10^{-1}$

На рис. 6 представлен график зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте.

По результатам исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте видим, что при увеличении значения отстройки по частоте вероятность битовой ошибки возрастает. Например, при значении отстройки по частоте 2,7 кГц вероятность битовой ошибки составляет  $3,125 \cdot 10^{-4}$ , при частоте

3 кГц вероятность битовой ошибки составляет  $4,833 \cdot 10^{-2}$ .

#### Оценка воздействия уровня сигнала мешающего спутника на достоверность принятой информации

При моделировании сделано предположение, что в полосе исследуемого канала связи имеется источник помех с модуляцией QAM-16. Пусть это сигнал стороннего мешающего спутника.

Уровень сигнала MSK составляет 40 дБВ (задаются в блоке dB Gain) в процессе моделирования не изменяется. При исследовании вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника изменяли уровень мешающего сигнала параметр блока dB Gain1. В нем задается уровень сигнала в дБ в диапазоне 10...55 дБВ с шагом 5 дБВ.

В табл. 2 приведены результаты исследования вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника.

На рис. 7 представлен график зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника.

При исследовании зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника видим, что с увеличением уровня мешающего сигнала вероятность битовой ошибки возрастает. При значении уровня сигнала QAM-16 180 дБ вероятность битовой ошибки составляет  $1,917 \cdot 10^{-2}$ , при 194 дБ –  $4,165 \cdot 10^{-1}$ .

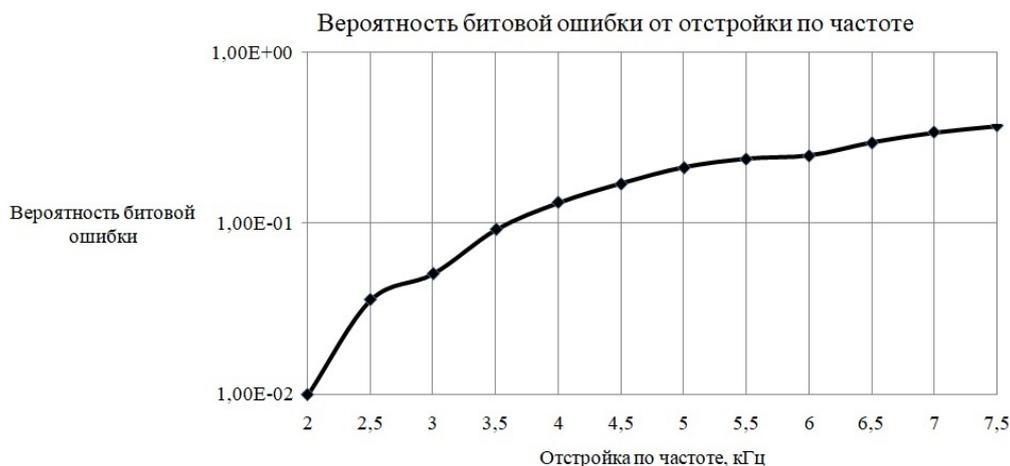


Рис. 6. График возрастания вероятности битовой ошибки от увеличения отстройки по частоте

Fig. 6. Graph build up the bit-error-rate from increasing the frequency offset

Таблица 2. Результаты исследования вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника

Table 2. The results of the study of the probability BER from the signal level of the interfering satellite

Уровень сигнала QAM-16, дБВ	10	15	20	25	30
BER	0	$3,125 \cdot 10^{-4}$	$1,406 \cdot 10^{-3}$	$2,917 \cdot 10^{-3}$	$5,161 \cdot 10^{-3}$
Уровень сигнала QAM-16, дБВ	35	40	45	50	–
BER	$1,299 \cdot 10^{-1}$	$3,019 \cdot 10^{-1}$	$4,199 \cdot 10^{-1}$	$4,811 \cdot 10^{-1}$	$4,95 \cdot 10^{-1}$



Рис. 7. График возрастания вероятности ошибки приема бита от увеличения уровня сигнала, передаваемого с помощью стороннего спутника

Fig. 7. Dependency graph of the probability BER from the signal level of the interfering satellite

### Вывод

В ходе работы была разработана модель спутникового канала связи, которая учитывает стороннее влияние на передачу сигнала, а также учитываются влияния отстройки по частоте, уровень передаваемого сигнала и фазовый сдвиг сигнала.

При моделировании спутникового канала связи были учтены влияния отстройки по частоте и зависимость битовой ошибки от уровня мешающего сигнала спутника.

В результате компьютерного моделирования спутникового канала связи получены следующие результаты. По результатам исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте видим, что при увеличении значения отстройки по частоте вероятность битовой ошибки возрастает. Например, при значении отстройки по частоте 2,7 кГц вероятность битовой ошибки составляет  $3,125 \cdot 10^{-4}$ , при частоте 3 кГц –  $4,833 \cdot 10^{-2}$ . При исследовании зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника видим, что с увеличением уровня мешающего сигнала вероятность битовой ошибки возрастает. При значении уровня сигнала QAM-16 180 дБ вероятность битовой ошибки составляет  $1,917 \cdot 10^{-2}$ , при 194 дБ –  $4,165 \cdot 10^{-1}$ . По полученным значениям построены графики зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте, а также график зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника. Полученные результаты компьютерного моделирования не противоречат современному пониманию сути исследуемых вопросов, это говорит о том, что разработанная модель спутникового канала связи является корректной.

Разработанная компьютерная модель существенно расширяет круг задач, связанных с оперативной оценкой параметров электромагнитной совместимости (ЭМС) и радиоподавления в группировках подвижных РЭС. Включение в состав моделируемой группировки реальных РЭС позволит осуществлять прогнозирование критических ситуаций и принимать упреждающие меры для их предотвращения. Таким образом, компьютерная модель спутникового канала связи с учетом влияния стороннего спутника, разработанная в графической среде имитационного моделирования Simulink, который входит в программный пакет MATLAB, позволяет оперативно решать сложные задачи ЭМС и радиоподавления. При этом учитываются:

- современные модели трактов формирования и обработки сигналов;
- частотные характеристики приемников и передающих трактов;
- мощности передатчиков, чувствительности приемников;
- характеристики затухания радиотрасс;
- траектории и скорости движения РЭС.

### Библиографические ссылки

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 2008. 408 с.
2. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 1997. 53 с.
3. Галкин В. А. Мобильные системы радиосвязи: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2003. 124 с.
4. Коробова А. Д. Моделирование электромагнитной обстановки в группировках РЭС в трехмерной области // Теория и техника радиосвязи. 2008. Вып. 3. С. 71–78.
5. Коробова А. Д., Хромых Е. А. Моделирование ЭМО-группировок подвижных РЭС с учетом трактов формирования и обработки сигналов // Теория и техника радиосвязи. 2008. Вып. 3. С. 64–65.
6. Fuqin Xiong. Digital Modulation Techniques. Second Edition. ARTECHHOUSE, INC. Canton Street Norwood, 2006, 207 p.
7. Simulink. URL: <https://matlab.ru/products/Simulink> (дата обращения: 27.12.2018).
8. Бояршинов М. А., Зыкин А. А. Методика моделирования радиолинии, использующей сигналы с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех // Сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства»: Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. С. 525–532.
9. Система численно-математического моделирования MatLab. Math – блоки математических операций. URL: <http://bourabai.ru/cm/simulink096.htm> (дата обращения: 28.12.2018).
10. Библиотека MATLAB 6.1 Simulink. 2019. URL: <https://vunivere.ru/work74489> (дата обращения: 03.01.2019).
11. Там же.
12. Cariolaro G.L., Trouca G.P. Spectra of Block Coded Digital Signals. *IEEE Trans. Commun*, 1974, vol. 22, no. 10, pp. 1555-1564.
13. Gudz S.M. Shurenok V.A. Rodionov A.V. Zhitomir Military S.P. Mathematical model of satellite communication systems' radiomonitring means distribution. *Korolyov Institute of State Telecommunication University*, 2013. no. 4, pp. 119-123.
14. Хворенков В. В., Батурич И. С., Савельев А. В. Автоматизированное рабочее место главного конструктора радиоэлектронных средств на основе теории многоагентных систем // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 4. С. 77–81.

## References

1. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio circuits and signals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008, 408 p. (in Russ.).
2. Gromakov Yu.A. *Standarty i sistemy podvizhnoi radiosvyazi* [Standards and mobile radio systems]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 1997, 53 p. (in Russ.).
3. Galkin V.A. *Mobil'nye sistemy radiosvyazi* [Mobile radio systems]. Moscow, MIET, 2003, 124 p. (in Russ.).
4. Korobova A.D. [Modeling of the electromagnetic environment in the RES constellations in the three-dimensional region]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2008, no. 3, pp. 71-78 (in Russ.).
5. Korobova A.D., Khromykh E.A. [Simulating the electromagnetic environment for radio-electronic means groups taking into consideration waveform shaping and processing paths]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2008, no. 3, pp. 64-65 (in Russ.).
6. Fuqin Xiong. *Digital Modulation Techniques*. Second Edition. ARTECHHOUSE, INC. Canton Street Norwood, 2006, 207 p.
7. Simulink. URL: <https://matlab.ru/products/Simulink> (accessed 27.12.2018).
8. Boyarshinov M.A., Zykin A.A. [Modeling of the Operation of Radio Countermeasures Devices and Their Impact on the Information Transfer Process]. *Sb. materialov XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Priborostroenie v XXI veke - 2017. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva»* [Proc. XIII International scientific and technical conf. "Instrument making in the XXI century - 2017. Integration of science, education and production"]. Izhevsk, IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova Publ., 2018, pp. 525-532 (in Russ.).
9. MatLab system of numerical and mathematical modeling. Math - blocks of mathematical operations. 2001. Available at: <http://bourabai.ru/cm/simulink096.htm> (accessed 28.12.2018).
10. Library MATLAB 6.1 Simulink. 2019. Available at: <https://vunivere.ru/work74489> (accessed 03.01.2019).
11. Library MATLAB 6.1 Simulink. 2019. Available at: <https://vunivere.ru/work74489> (accessed 03.01.2019).
12. Cariolaro G.L., Trouca G.P. Spectra of Block Coded Digital Signals. *IEEE Trans. Commun*, 1974, vol. 22, no. 10, pp. 1555-1564.
13. Gudzh S.M., Shurenok V.A., Rodionov A.V., Zhitomir Military S.P. Mathematical model of satellite communication systems' radiomonitoring means distribution. *Korolyov Institute of State Telecommunication University*, 2013, no. 4, pp. 119-123.
14. Khvorenkov V.V., Baturin I.S., Saveliev A.V. [Engineering Workstation for the Chief Designer of Radio Electronic Means Based on the Theory of Multi-Agent Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 77-81 (in Russ.).

## Simulation Model of Satellite Communication Channel

I.R. Atyeva, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
 A.A. Zykin, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
 V.V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper presents the developed computer model of a satellite communication channel, taking into account the influence of the Doppler frequency shift and a third-party communication satellite. The computer model was developed in the Simulink graphical simulation environment, which is included in the MATLAB software package. The paper discusses a simulation model of a satellite communication channel using the MSK (Minimum Shift Keying) signal.*

*In the course of the work, digital signal processing algorithms were studied and applied when developing a computer model of a satellite communication channel. The specified parameters of the received signal are determined by the basic parameters of the digital demodulator of the MSK signal, such as: repetition frequency, sampling frequency, minimum analog-digital converter bit depth, number of quantization levels, cutoff frequency of the digital differentiator.*

*As a result of computer simulation of a satellite communication channel, the effect of the frequency offset of the MSK signal and the level of an interfering signal (third-party satellite) on the modem interference immunity was studied, in the absence of the influence of a third-party communication satellite. According to the simulation results, graphs of the probability of a bit reception error on the level of an interfering signal and the probability of error on frequency offset are obtained.*

*The developed computer model significantly expands the range of tasks related to the operational evaluation of the parameters of electromagnetic compatibility (EMC) and radio suppression in the groups of mobile radio-electronic systems.*

**Keywords:** simulation, satellite radio channel, MSK – Minimum Shift Keying, MATLAB, SIMULINK.

Получено 12.02.2019

## Образец цитирования

Атыева И. Р., Зыкин А. А., Хворенков В. В. Имитационная модель спутникового канала связи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 100–107. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-100-107.

## For Citation

Atyeva I.R., Zykin A.A., Khvorenkov V.V. [Simulation model of satellite communication channel]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 100-107 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-100-107.