

УДК 623.626

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИГНАЛОПОДОБНОЙ ПОМЕХИ НА КАНАЛ РАДИОСВЯЗИ С ДВОИЧНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

С.В. Дворников, Д.М. Наасо, В.В. Севидов (Санкт-Петербург)

Научные и инженерные исследования в области связи широко рассматривают вопрос влияния преднамеренной радиопомехи на канал связи. Преднамеренная радиопомеха включает в себя действия, направленные на вредоносное искажение или блокирование радиосигнала с целью нарушить работу системы радиосвязи.

Для оценки битовой ошибки радиосигнала в цифровых радиоканалах в качестве воздействия помехи, как правило, выступает белый гауссовский шум [1-4]. Такое воздействие хорошо изучено и формализовано. Однако воздействие на цифровые каналы передачи данных сигналоподобной помехи труднее формализовать, и по этой причине для его оценки приходится прибегать к имитационному моделированию.

Имитационное моделирование – метод исследования явлений, процессов с использованием имитационных моделей, как класса математических моделей, характеризующихся возможностью оценивать последствия различных решений без необходимости проведения реальных экспериментов.

Целью исследования являлось сравнение эффективности деструктивного воздействия сигналоподобных радиопомех с различными видами модуляции (*16QAM* – *quadrature amplitude modulation*, *QPSK* – *quadrature phase-shift keying*, *BPSK* – *binary phase shift keying*) на канал радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *BPSK* с эффективностью воздействия на тот же канал связи белого гауссовского шума, обладающего той же энергией, что и указанные сигналоподобные радиопомехи. Моделирование проведено в среде программирования Matlab. В качестве показателя эффективности деструктивного воздействия радиопомехи на канал радиосвязи выбрана вероятность битовой ошибки [5, 6].

Для достижения цели сформулированы и решены четыре задачи:

1. построение модели – создание модели цифрового радиоканала, включающей его основные параметры и переменные;
2. определение сценариев – задание различных начальных условий и параметров, которые могут варьироваться в процессе моделирования;
3. запуск симуляции – проведение симуляций с использованием созданной модели для получения данных о том, как система будет вести себя при различных условиях;
4. анализ результатов – оценка полученных данных, интерпретация их для принятия решений или улучшения системы.

На рисунке 1 показана схема взаимосвязи основных элементов канала радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *BPSK*. Элементы канала радиосвязи представлены блоками, назначение которых раскрыто ниже.

Блок 1 «*Bernoulli Binary*» используется для генерации последовательности случайных бинарных чисел с заданной вероятностью успеха – генерирует передаваемые данные, которые необходимо получить на принимающей стороне.

Блок 2 «*BPSK Modulator Baseband*» представляет собой модулятор сигнала с фазовой манипуляцией *BPSK* для базовой полосы – принимает входной цифровой поток данных (обычно последовательность бит) и модулирует его, изменяя фазу несущего сигнала в соответствии с этими битами.

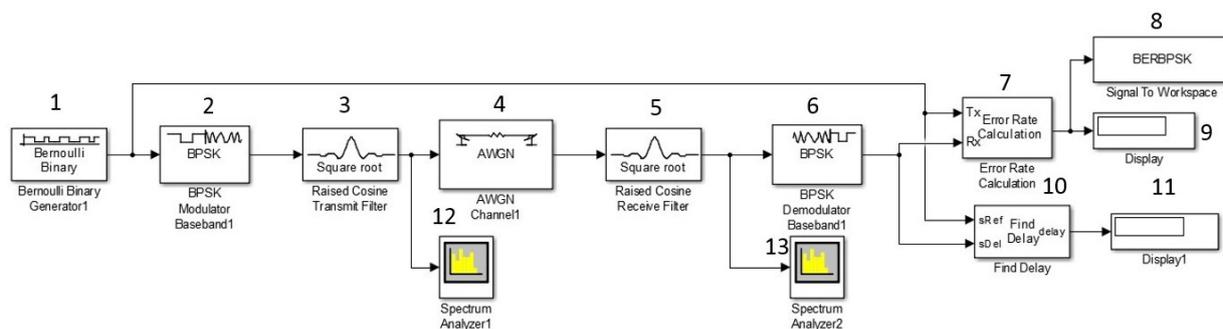


Рис.1 – Схема взаимосвязи основных элементов канала радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *BPSK*

Блок 3 «*Raised Cosine Transmit Filter*» представляет собой фильтр передачи с поднятым косинусом, который обычно используется в цифровых модуляторах для формирования формы импульсов передаваемого сигнала. Этот тип фильтра часто применяется в системах радиосвязи, таких как модуляция с разными фазовыми ключами (*PSK*), амплитудной модуляции (*ASK*) и квадратурной амплитудной модуляции (*QAM*).

Блок 4 «*AWGN Channel*» представляет собой модель канала с аддитивным белым гауссовским шумом. Этот блок используется для моделирования шумового воздействия на сигналы в системах радиосвязи, где шум играет роль влияющего фактора.

Блок 5 «*Raised Cosine Receive Filter*» представляет собой фильтр приема с поднятым косинусом, который часто используется в цифровых системах радиосвязи для обработки принятых сигналов. Этот тип фильтра широко применяется для компенсации искажений, вызванных пропуском сигналов через канал передачи данных, а также для ограничения спектра радиосигнала и уменьшения межсимвольных радиопомех.

Блок 6 «*BPSK Demodulator Baseband*» представляет собой демодулятор двоичной фазовой манипуляции *BPSK* для работы в базовой полосе – используется для демодуляции модифицированного сигнала и получения данных, которые были отправлены от передатчика (выход блока 1).

Блок 7 «*Error Rate Calculation*» представляет собой инструмент для оценки ошибок в системе передачи данных. Этот блок позволяет оценить различные параметры ошибок, такие как битовая ошибка (*BER – Bit Error Rate*) или символьная ошибка (*SER – Symbol Error Rate*), а также провести анализ производительности системы радиосвязи. Он сравнивает данные, отправленные от передатчика, с данными, полученными на приемнике, и подсчитывает возникающие ошибки (первый вход блока — это выход передатчика, а второй вход — данные, полученные на принимающей стороне).

Блок 8 «*Signal To Workspace*» представляет собой инструмент для сохранения сигналов из модели Simulink в рабочее пространство Matlab. Блок позволяет сохранить сигналы, сгенерированные или обработанные в модели Simulink, в переменные Matlab для дальнейшего анализа, визуализации или использования в Matlab скриптах или функциях. Данные используются в качестве входных данных для блока анализ частоты ошибок по битам (*bit error rate analis*), что, в свою очередь, строит кривую вероятности битовой ошибки с соотношением сигнал/шум.

Блок 9 «*Display*» – это инструмент, который позволяет выводить данные или сообщения на панели вывода Simulink или в командную строку Matlab во время выполнения модели. Он отображает выходные данные блока 7.

Блок 10 «*Find Delay*» представляет собой инструмент для оценки временной задержки между двумя сигналами в модели Simulink. Он позволяет определить разницу во времени между сигналами и вывести эту задержку как выходное значение. Блок вычисляет время задержки между выходным сигналом блока 1 и выходным сигналом

блока 6, чтобы использовать его в качестве параметра в блоке 7 для обеспечения правильного сравнения двух сигналов на его входе.

Блок 11 «*Display1*» – это инструмент, который позволяет выводить данные или сообщения на панели вывода Simulink или в командную строку Matlab во время выполнения модели. Он отображает выходные данные блока 10.

Блок 12 «*Spectrum Analyzer1*» представляет собой инструмент для анализа спектра сигнала в модели Simulink. Этот блок позволяет визуализировать спектральные характеристики сигнала в частотной области, что помогает в анализе его частотного содержания и выявлении различных компонентов спектра. Он используется для отображения спектра выходного сигнала передатчика (выход блока 3).

Блок 13 «*Spectrum Analyzer1*» представляет собой инструмент для анализа спектра сигнала в модели Simulink. Этот блок позволяет визуализировать спектральные характеристики сигнала в частотной области, что помогает в анализе его частотного содержания и выявлении различных компонентов спектра. Этот блок используется для отображения спектра входного сигнала приемника (выход блока 5).

Теоретическая зависимость вероятности битовой ошибки радиосигнала *BPSK* в канале радиосвязи с белым гауссовским шумом [1] определяется формулой:

$$P_B = \int_{\sqrt{2E_b/N_0}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (1)$$

где u – амплитуда сигнала; E_b/N_0 – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума; $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок.

На рисунке 2 показаны зависимости от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0) вероятностей битовой ошибки радиосигнала *BPSK* в канале радиосвязи с белым гауссовским шумом полученные теоретически и в результате моделирования.

Первая кривая – синяя сплошная линия, полученная с помощью формулы (1), показывает теоретическую зависимость вероятности битовой ошибки в канале от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0).

Вторая кривая – последовательность зеленых точек, показывает зависимость вероятности битовой ошибки в канале от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0), полученную с помощью разработанной модели.

Анализ рисунка 2 показывает, что теоретические результаты совпадают с результатами моделирования, что свидетельствует об адекватности разработанной модели. Поэтому ее можно использовать и при исследовании влияния сигналоподобных радиопомех на канал радиосвязи.

На рисунке 3 показаны спектры радиосигнала на выходе передатчика и входе приемника.

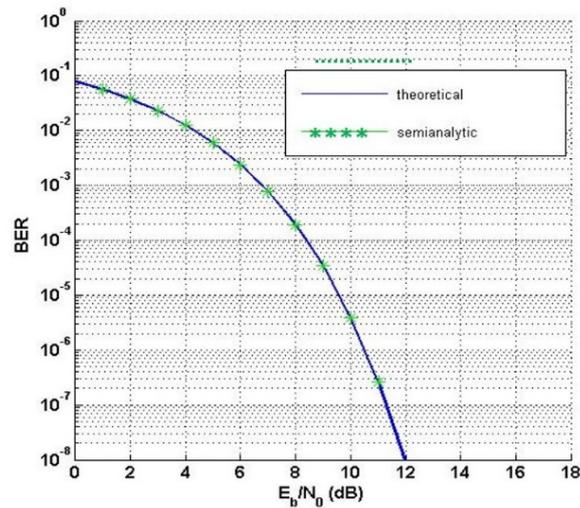


Рис. 2 – Зависимости вероятностей битовой ошибки радиосигнала *BPSK* от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0) в канале радиосвязи с белым гауссовским шумом, полученные аналитически и с помощью разработанной модели

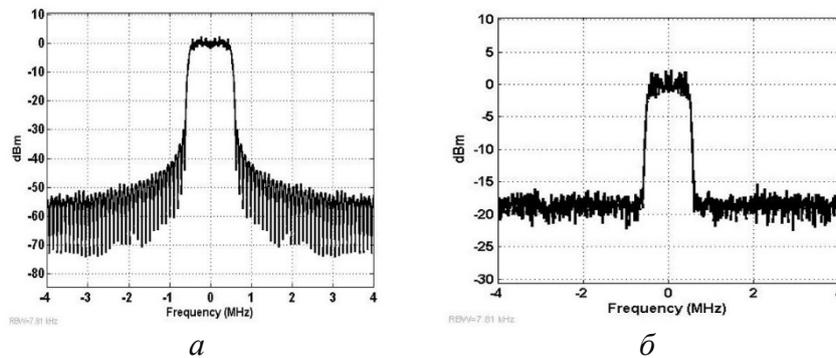


Рис.3 – Спектры радиосигнала: *а* – на выходе передатчика, *б* – на входе приемника

На рисунке 4 показана схема взаимодействия основных блоков канала радиосвязи, использующего двоичную фазовую манипуляцию *BPSK*, с каналом деструктивного воздействия (ДВ) сигналоподобных радиопомех.

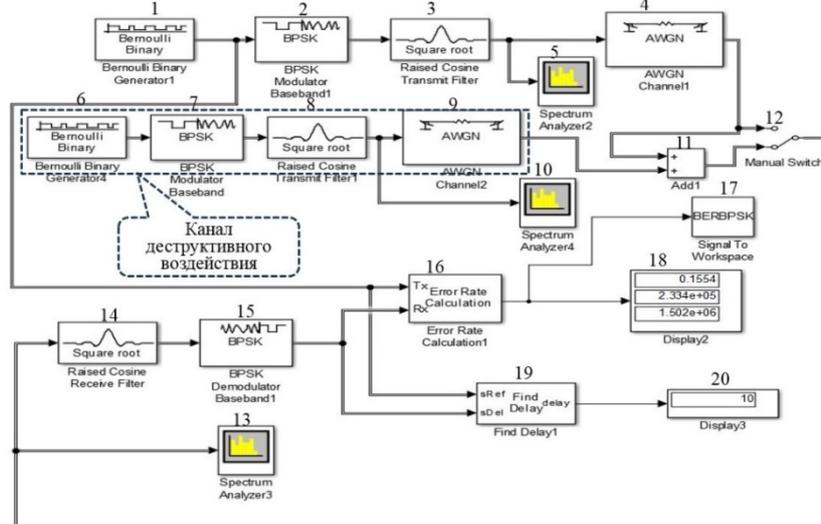


Рис. 4 – Схема взаимодействия основных блоков канала радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *BPSK* с каналом подавления

Схема, отображенная на рисунке 4, содержит новые блоки, назначение которых раскрыто ниже.

Блок 6 «*Bernoulli Binary*» используется для генерации последовательности случайных бинарных чисел с заданной вероятностью успеха. Этот блок используется при моделировании случайных процессов, таких как каналы передачи данных, обработка сигналов или событийные системы. Он предоставляет данные, необходимые для модуляции несущего сигнала, чтобы получить сигнал, подобный помехе вида *BPSK*.

Блок 7 «*BPSK Modulator Baseband*» представляет собой модулятор сигнала с фазовой манипуляцией *BPSK* для базовой полосы. Он принимает входной цифровой поток данных (обычно последовательность бит) и модулирует его, изменяя фазу несущего сигнала в соответствии с этими битами. На выходе этого блока получают сигнал, подобный помехе типа *BPSK*, которая используется для подавления канала связи, использующего сигнал типа *BPSK*.

Блок 8 «*Raised Cosine Transmit Filter*» представляет собой фильтр передачи с поднятым косинусом, который обычно используется в цифровых модуляторах для формирования формы импульсов передаваемого сигнала. Этот тип фильтра часто применяется в системах радиосвязи, таких как модуляция с разными фазовыми ключами (*PSK*), амплитудной модуляции (*ASK*) и квадратурной амплитудной модуляции (*QAM*).

Блок 9 «*AWGN Channel*» представляет собой модель канала с аддитивным белым гауссовским шумом. Этот блок используется для моделирования шумового воздействия на сигналы в системах радиосвязи, где шум играет роль влияющего фактора – используется для моделирования эффектов шума на модулированный сигнал (сигнал, подобный помехе (выход блока 7)).

Блок 10 «*Spectrum Analyzer*» представляет собой инструмент для анализа спектра сигнала в модели *Simulink*. Этот блок позволяет визуализировать спектральные характеристики сигнала в частотной области, что помогает в анализе его частотного содержания и выявлении различных компонентов спектра – используется для получения спектра сигнал, подобной помехи (выход канала деструктивного воздействия).

Блок 11 «*Add*» представляет собой элемент модели, который выполняет операцию сложения над входными радиосигналами и создает выходной радиосигнал, который является суммой входных радиосигналов. Этот блок аналогичен операции сложения в математике: он берет два или более значения и складывает их вместе для получения итогового результата – добавляет сигнал, подобную помеху (выход блока 9) к сигнал канала связи (выход блока 4), так что его выход представляет собой сумму сигнал, подобной помехи и полезного сигнала (сигнал канала связи).

Блок 12 «*Manual Switch*» представляет собой элемент управления, который позволяет переключать между двумя или несколькими входными радиосигналами в зависимости от значения управляющего радиосигнала. Этот блок аналогичен переключателю или выключателю в электрических схемах и может использоваться для изменения потока данных в модели *Simulink* в зависимости от определенных условий или событий – подключает к своему выходу один из двух сигналов: либо сигнал канала связи (выход блока 4), либо сумма сигнал, подобной помехи и полезного сигнала (выход блока 11).

На рисунке 5 показаны спектры сигнал, подобной радиопомех, используемых для деструктивного воздействия на канал радиосвязи.

На рисунке 6. показаны зависимости вероятностей битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0) при деструктивном воздействии на канал радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *AWGN* и сигнал, подобной помех 16*QAM*, *QPSK*, и *BPSK*.

Сравнительный анализ зависимостей вероятностей битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0), представленных на рисунке 6 показывает, что сигналоподобная радиопомеха *BPSK* более эффективна, чем *AWGN* и сигналоподобные радиопомехи *16QAM*, *QPSK* при деструктивном воздействии на канал радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *BPSK*.

В таблице 1 показана потеря отношения сигнал/шум при деструктивном воздействии сигналоподобной радиопомехой *BPSK* по сравнению с *AWGN* и другими типами сигналоподобных радиопомех.

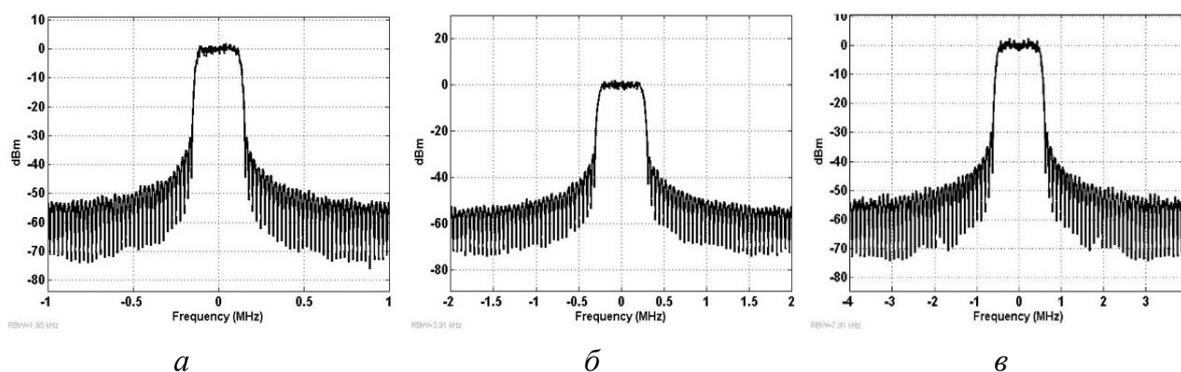


Рис.5 – Спектры сигналоподобных помех, используемые для деструктивного воздействия на канал радиосвязи: *a* – *16QAM*, *б* – *QPSK*, *в* – *BPSK*

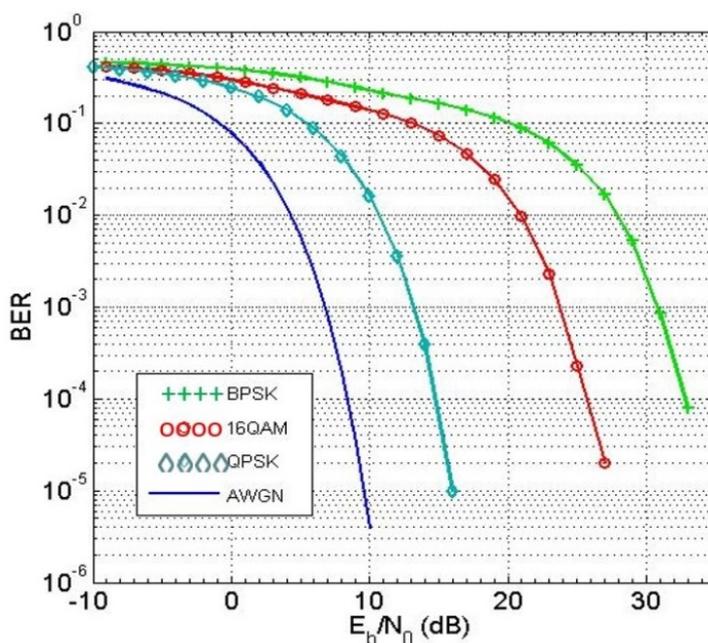


Рис.6 – Зависимости вероятностей битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности (E_b/N_0) при деструктивном воздействии на канал радиосвязи с двоичной фазовой манипуляцией *AWGN* и сигналоподобных помех *16QAM*, *QPSK* и *BPSK*

Таблица 1 – Потеря отношения сигнал/шум при деструктивном воздействии сигналоподобной радиопомехой *BPSK* по сравнению с *AWGN* и другими типами сигналоподобных радиопомех

Вероятность битовой ошибки	Отношение сигнал/шум, требуемое при использовании сигнала радиопомехи, дБ				Потеря ОСШ при ДВ сигналоподобной радиопомехой <i>BPSK</i> по сравнению с <i>AWGN</i> и другими типами сигналоподобных радиопомех, дБ		
	<i>AWGN</i>	<i>QPSK</i>	<i>16QAM</i>	<i>BPSK</i>			
10^{-2}	4	14,5	21	27	23	12,5	6
10^{-3}	7	16	23	30	23	14	7
10^{-4}	8,5	19	24,5	33	24,5	14	8,5

Анализ результатов, представленных в таблице 1, показывает, что для того, чтобы обеспечить вероятность битовой ошибки 10^{-4} в канале радиосвязи, использующем сигнал типа *BPSK* в условиях шума, а также под воздействием сигналоподобных помех, необходимо обеспечить отношение сигнал/шум не менее значения, указанного следующим образом:

– в случае канала радиосвязь с белым гауссовским шумом необходимое отношение сигнал/шум $\geq 8,5$ дБ;

– в случае канала радиосвязь под воздействием сигналоподобной помехи типа *QPSK* необходимое отношение сигнал/шум ≥ 19 дБ;

– в случае канала радиосвязь под воздействием сигналоподобной помехи типа *16QAM* необходимое отношение сигнал/шум $\geq 24,5$ дБ;

– в случае канала радиосвязь под воздействием сигналоподобной помехи типа *BPSK* необходимое отношение сигнал/шум ≥ 33 дБ.

Следовательно, требуемое отношение сигнал/шум в канале радиосвязи варьируется в зависимости от типа сигналоподобной радиопомехи, воздеющей на канал.

Потеря отношения сигнал/шум в канале радиосвязи, использующем сигнал *BPSK*, является наибольшей под воздействием сигналоподобной помехи *BPSK*. В силу этого влияние преднамеренной сигналоподобной радиопомехи типа *BPSK* на канал радиосвязи, использующий сигнал *BPSK* больше, чем влияние преднамеренных сигналоподобных радиопомех типа *QPSK* и *16QAM*.

В ходе исследования установлено, что влияние преднамеренной сигналоподобной радиопомехи типа *BPSK* на канал радиосвязи, использующий сигнал *BPSK*, больше, чем влияние преднамеренных сигналоподобных радиопомех типа *QPSK* и *16QAM* и, следовательно, потеря отношения сигнал/шум в канале радиосвязи, использующем сигнал *BPSK* под воздействием сигналоподобной помехи *BPSK* по сравнению с другими типами радиопомехами больше.

Результаты исследования могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих средств деструктивного воздействия, а также в образовательном процессе для подготовки соответствующих специалистов.

Данная статья не закрывает рассматриваемое направление исследований. Направлением дальнейшего исследования может стать оценка влияния сигналоподобных помех на другие каналы связи.

Литература

1. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. под ред. А.В. Азаренко. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1100 с.
2. **John G. Proakis, Masoud Salehi** «Digital Communication» 2008. –1150 с.
3. **Andreas F. Molisch** «Wireless Communications» 2005. – 827 с.

4. **Herbert Taub and Donald L. Schilling** «Principles of Communications Systems». 1986. –759 с.
5. **Куприанов А.И., Шустов Л.Н.** Радиоэлектронная борьба Основы теории 4-е издание Москва, Вузовская книга. 2022. – 800 с.
6. **Cory Beard and William Stallings** «Wireless Communication Networks and Systems» 2016. – 608 с.