

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ИНВАРИАНТНАЯ АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ И ДЕМОДУЛЯЦИЯ С ДВУМЯ ОПОРНЫМИ СИГНАЛАМИ

Павлов Иван Иванович,
Павлова Мария Сергеевна,
Абрамова Евгения Сергеевна,
Абрамов Сергей Степанович,
 ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", г. Новосибирск, Россия,
iipavlov02@mail.ru, mspavlova@ngs.ru,
evgenka_252@mail.ru, abramov@sibsutis.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-6-13-22

Manuscript received 12 May 2023;
 Accepted 07 June 2023

Хан Валерий Алексеевич,
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия, nt.centre@mail.ru

Хан Валерий Алексеевич,
 ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", г. Новосибирск, Россия,
ampal55@mail.ru

Ключевые слова: модифицированная инвариантная амплитудная модуляция, модифицированная инвариантная амплитудная демодуляция, амплитудная модуляция, аддитивный белый гауссовский шум, среднеквадратичное отклонение, вероятность битовой ошибки, отношение сигнал/шум

Рассматриваемая в статье модель модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами относится к области систем, сетей и устройств телекоммуникаций и радиотехники и может быть использована в радиопередающих устройствах, телекоммуникационных системах и устройствах, где требуется амплитудно-модулированный передаваемый сигнал для передачи через канал связи. Достижимый технический результат модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами направлен на возможность формирования амплитудно-модулированного передаваемого сигнала с повышенными характеристиками помехозащищенности к конкретному виду помех. Предложены алгоритмы модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами и на основании этих алгоритмов были разработаны структурные схемы модифицированного инвариантного амплитудного модулятора и демодулятора с двумя опорными сигналами. Чтобы получить экспериментальные данные для анализа модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами при воздействии на нее помехи в канале связи, было проведено моделирование системы

связи и расчет необходимых данных в среде Matlab. В качестве помехи в канале связи был выбран аддитивный белый гауссовский шум. В статье представлена упрощенная структурная схема системы связи экспериментальной модели. Для сравнения результатов в качестве модулятора и демодулятора будут использоваться в первом случае – модифицированная инвариантная амплитудная модуляция и демодуляция с двумя опорными сигналами, а во втором случае - амплитудная модуляция и демодуляция. В результате были получены оценки зависимости среднеквадратичного отклонения от значений отношения сигнал/шум и вероятности битовой ошибки от значений отношения сигнал/шум. Среднеквадратичное отклонение для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами обладает существенно меньшими значениями, чем среднеквадратичное отклонение для амплитудной модуляции и демодуляции. Передача информации с одинаковой надежностью через канал связи с использованием модифицированной инвариантной амплитудной модуляцией и демодуляцией с двумя опорными сигналами требует значительно большего отношения сигнал/шум, чем передача через канал связи с амплитудной модуляцией [1].

Информация об авторах:

Павлов Иван Иванович, ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", доцент кафедры радиотехнических устройств и техносферной безопасности, доцент, к.т.н., академик МАС, г. Новосибирск, Россия
Павлова Мария Сергеевна, ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", доцент кафедры радиотехнических устройств и техносферной безопасности, к.т.н., г. Новосибирск, Россия
Абрамова Евгения Сергеевна, ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", доцент кафедры радиотехнических устройств и техносферной безопасности, доцент, к.т.н., г. Новосибирск, Россия
Абрамов Сергей Степанович, ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", заведующий кафедрой радиотехнических устройств и техносферной безопасности, доцент, д.т.н., академик МАС, г. Новосибирск, Россия
Хан Валерий Алексеевич, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
Щербаков Юрий Сергеевич, ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", доцент кафедры радиотехнических устройств и техносферной безопасности, доцент, к.т.н., г. Новосибирск, Россия

Для цитирования:

Павлов И.И., Павлова М.С., Абрамова Е.С., Абрамов С.С., Хан В.А., Щербаков Ю.С. Модифицированная инвариантная амплитудная модуляция и демодуляция с двумя опорными сигналами // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №6. С. 13-22.

For citation:

Pavlov I.I., Pavlova M.C., Abramova E.S., Abramov S.S., Khan V.A., Shcherbakov Yu.S. (2023) Modified invariant amplitude modulation with two reference signals. T-Comm, vol. 17, no.6, pp. 13-22. (in Russian)

Введение

В современном обществе потребность в передаче сообщений (фото, видео) за последние года значительно повысилась, это привело к росту объема информации отправляемой по каналам связи. Данное обстоятельство заставляет операторов связи взглянуть на рынок мобильной связи с новой стороны и поэтому возникает необходимость в повышении скорости передачи данных и соответственно улучшения качества передаваемых данных.

Если учитывать, что фактический канал связи – это канал с изменяющимися параметрами, а обычно современные системы связи применяют адаптивные схемы приема-передачи, то эта сложная проблема, которая может быть решена с помощью комбинированных мер, в которые входит такие мероприятия как устранение избыточности передаваемой информации, помехоустойчивое кодирование, увеличение скорости передачи информации за счет улучшения схем модуляции и т.д.

Вышеперечисленные комбинированные меры изменения в параметрах каналов связи во время сеанса связи может привести к следующим существенным недостаткам:

- за промежуток времени между соседними отсчетами в масштабе времени потребуется внушительный объем операций умножения и сложения;

- для хранения уже ранее найденных и вычисленных всех вероятных вариации сигналов потребуется значительный объем памяти [2, 3].

Про анализируемые алгоритмы нуждаются в большом количестве сверточных операций, являющиеся очень сложными для выполнения, и учитывая, что устройства, на которых будет реализовываться их выполнение являются носителем достаточно высокого уровня собственных помех. Влияние помех в канале связи и шумов в среде распространения также не рассматривается должным образом.

Рассмотренные недостатки послужили стимулом для исследования новых способов в организации систем связи. Возможным вариантом из рассматриваемых способов может быть метод, который нашел применение нового математического аппарата, использующего теорию групп преобразования, для представления преобразования сигналов по каналам связи [2, 3].

На сегодняшний день отмечено, что влияние канала связи на проходящий через него сигнал возможно отразить соответствующей группой преобразований [4, 5, 6]. В качестве примера рассмотрим группу ортогональных преобразований с подгруппой аффинных преобразований, с помощью которой представляется описание изменения сигналов, проходящих через линейные каналы связи.

Применение инвариантов группы преобразований, то есть применение характерных соответствий между параметрами сигналов, проходящих через канал связи, и при этом остающимися постоянными, несмотря на то что сами сигналы подверглись изменению в канале связи, позволяют рассматривать новый способ безыскаженной передачи информации [4, 7, 8].

Если рассмотреть использование инвариантов в «классических» модуляциях, таких как амплитудная, частотная и ортогональная фазовая модуляция, то можно сказать, что за счет сохранения длины векторов и разности углов между

передаваемыми сигналами в них происходит использование обычной ортогональной группы преобразований.

Рассматриваемая в статье модель модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами относится к области систем, сетей и устройств телекоммуникаций и радиотехники и может быть использована в радиопередающих устройствах, телекоммуникационных системах и устройствах, где требуется амплитудно-модулированный передаваемый сигнал для передачи через канал связи.

Достижимый технический результат модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами направлен на возможность формирования амплитудно-модулированного передаваемого сигнала с повышенными характеристиками помехозащищенности к определенной категории помех, не говоря уже о скрытности отправляемой информации в сравнении с прототипом и аналогами [1, 9, 10, 11].

Это достигается тем, что в модифицированном инвариантном амплитудном модуляторе используются два опорных сигнала из которых, формируется амплитудно-модулированный передаваемый (информационный) сигнал, в котором возможно содержание большого многообразия форм использованных сигналов, по сравнению со знакомой ранее инвариантной амплитудной модуляцией, где используются сигналы подобной формы. А в векторном представлении линия, на которой расположены концы векторов опорных сигналов и вектора информационного сигнала, в системе координат рассматриваемого сигнального пространства может принимать любое положение относительно начала координат рассматриваемой системы координат (рис. 1).

В модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами предложен следующий подход для передачи значений информационных элементов, была взята ранее известная инвариантная амплитудная модуляция, где концы векторов опорных сигналов и вектора информационного сигнала расположены на одной прямой, и эта прямая обязательно должна проходить через начало системы координат рассматриваемого сигнального пространства, а для передачи значений информационных элементов используем отношение длин векторов, которые лежат на этой прямой [4, 9]. Рассматриваемая модифицированная инвариантная амплитудная модуляция и демодуляция с двумя опорными сигналами позволяет передавать значения информационных элементов с использованием отношения длин векторов, которые находятся на одной прямой, но данная прямая не обязательно должна проходить через начало системы координат рассматриваемого сигнального пространства [1].

Синтез модифицированной инвариантной амплитудной модуляции.

При процессе синтеза модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами для того, чтобы создать большую ясность картинки будем использовать двумерное сигнальное пространство. В данном рассматриваемом двумерном сигнальном пространстве координатные оси будут соответствовать определенным ортонормированным базисным функциям времени, в частности,

можно представить функциями Котельникова $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$, характеризующимися временным сдвигом, который должен гарантировать их ортогональность [1]. Таким образом в рассматриваемом двухмерном сигнальном пространстве сигналы могут быть описаны двумя временными отсчетами, значения величин можно определить по координатам концов векторов данных сигналов.

На рисунке 1 в пространстве входных сигналов представлена прямая линия, на которой расположены концы векторов сигналов. Представленная прямая линия принимает любое положение в системе координат рассматриваемого сигнального пространства и при этом не проходит через начало координат данной системы координат. Из рисунка 1 видно, что концы векторов трех входных сигналов $\bar{S}_1$, $\bar{S}_2$ и $\bar{S}_3$ задаются с помощью точек A, B, и C [4, 7, 10, 11].

Ранее в работах [1, 9, 12, 13] описывалось, что с помощью группы ортогональных преобразований с подгруппой аффинных преобразований входные сигналы можно преобразовать в выходные сигналы.

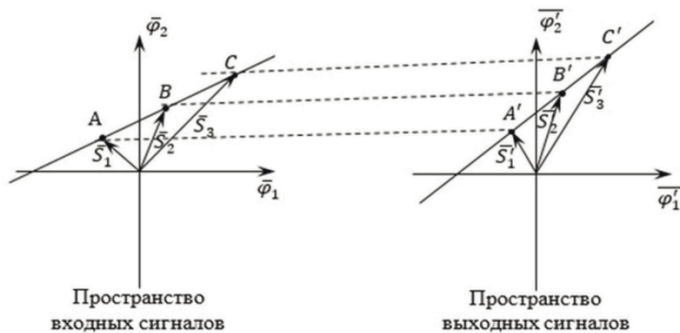


Рис. 1. Схема аффинного преобразования входных сигналов в выходные сигналы для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами

Группы ортогональных преобразований с подгруппой аффинных преобразований обладают следующими свойствами [7, 14].

1. В процессе передачи информации по каналам связи сигналы подвергаются аффинным преобразованиям в результате чего прямые линии преобразуются в прямые линии.
2. То же самое происходит с плоскостями они преобразуются в процессе преобразования в другие плоскости.
3. В процессе передачи информации по каналам связи сигналы подвергаются аффинным преобразованиям в результате чего сохраняются отношение длин отрезков, лежащих на одной прямой.
4. То же самое происходит с отношением площадей треугольников в результате аффинного преобразования.
5. То же самое происходит с отношением объемов многогранников в результате аффинного преобразования [9, 15].

Все вышеперечисленные свойства аффинных преобразований считаются инвариантами группы ортогональных преобразований с подгруппой аффинных преобразований [7, 14]. Постоянство значений величин инвариантов касательно группы ортогональных преобразований с подгруппой аффинных преобразований может быть применено в качестве неискажаемого переносчика информации через канал связи.

На рисунке 1 можно увидеть схему аффинного преобразования концов векторов входных сигналов $\bar{S}_1$, $\bar{S}_2$ и $\bar{S}_3$ в концы векторов аналогичных выходных сигналов $\bar{S}'_1$, $\bar{S}'_2$ и $\bar{S}'_3$, которая представлена в виде пунктирных линий [9].

Из рассматриваемого в этом примере инварианта аффинного преобразования с использованием конфигурации «отношения трех точек», можно будет записать одну из возможных форм в следующем виде:

$$J = \frac{BC}{AB} = \frac{B'C'}{A'B'} = \frac{|\bar{S}_3 - \bar{S}_2|}{|\bar{S}_2 - \bar{S}_1|} = \frac{|\bar{S}'_3 - \bar{S}'_2|}{|\bar{S}'_2 - \bar{S}'_1|}. \quad (1)$$

Таким же образом, если использовать другие концы векторов сигналов, то можно записать инвариант в следующем виде:

$$J = \frac{AC}{AB} = \frac{A'C'}{A'B'} = \frac{|\bar{S}_3 - \bar{S}_1|}{|\bar{S}_2 - \bar{S}_1|} = \frac{|\bar{S}'_3 - \bar{S}'_1|}{|\bar{S}'_2 - \bar{S}'_1|}. \quad (2)$$

В рассматриваемом выражении (1) сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ можно сказать осуществляют функцию «опорных сигналов», а сигнал $S_3(t)$ – информационного сигнала $S_i(t)$. Заменяя соответствующие сигналы и произведя математические преобразования в выражении (1), можно получить первый алгоритм модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами [1, 9, 12, 13]: $\bar{S}_i = J_i (\bar{S}_2 - \bar{S}_1) + \bar{S}_2$ – первый алгоритм модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами, где J_i – величина значения отправляемого информационного элемента; $\bar{S}_i$ – вектор информационного сигнала $S_i(t)$, который одновременно с опорными сигналами $S_1(t)$ и $S_2(t)$ передает величину значения информационного элемента J_i ; $\bar{S}_1$ – вектор первого опорного сигнала $S_1(t)$; $\bar{S}_2$ – вектор второго опорного сигнала $S_2(t)$; i – номер временных интервалов, за период которого производится передача величины значения информационного элемента J_i .

Из выражения (2) также заменив соответствующие сигналы и произведя математические преобразования, как с выражением (1) можно получить второй алгоритм модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами [1, 9, 12, 13]: $\bar{S}_i = J_i (\bar{S}_2 - \bar{S}_1) + \bar{S}_1$ – второй алгоритм модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами.

Далее из найденного алгоритма модуляции выражения (1) с помощью математических преобразований получаем первый алгоритм модифицированной инвариантной амплитудной демодуляции с двумя опорными сигналами [1, 9, 12, 13]:

$$\hat{J}_i = \frac{|\hat{\bar{S}}'_i - \hat{\bar{S}}'_2|}{|\hat{\bar{S}}'_2 - \hat{\bar{S}}'_1|} \quad \text{– первый алгоритм модифицированной}$$

инвариантной амплитудной демодуляции с двумя опорными сигналами, где $\wedge$ – знак означает оценку принимаемой величины; $\hat{J}$ – оценка величины значения принимаемого

информационного элемента; $\hat{S}'_i$ – оценка величины вектора информационного сигнала; $\hat{S}'_1$ – оценка величины вектора первого опорного сигнала; $\hat{S}'_2$ – оценка величины вектора второго опорного сигнала;

i – номер временных интервалов, за период которого производится передача величины значения информационного элемента J_i .

Аналогично вышеизложенному методу из выражения (2) получаем второй алгоритм модифицированной инвариантной амплитудной демодуляции с двумя опорными сигналами [1, 9, 12, 13]:

$$\hat{J}_i = \frac{\left| \hat{S}'_i - \hat{S}'_1 \right|}{\left| \hat{S}'_2 - \hat{S}'_1 \right|} - \text{второй алгоритм модифицированной ин-}$$

вариантной амплитудной демодуляции с двумя опорными сигналами.

Структурная схема модифицированного инвариантного амплитудного модулятора с двумя опорными сигналами

Структурная схема модифицированного инвариантного амплитудного модулятора с двумя опорными сигналами представлена на рисунке 2.

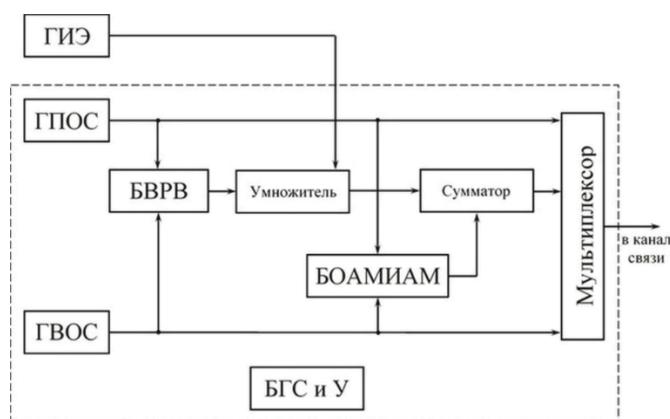


Рис. 2. Структурная схема модифицированного инвариантного амплитудного модулятора с двумя опорными сигналами

Схема состоит из:

ГИЭ – генератор информационных элементов;

ГПОС – генератор первого опорного сигнала;

ГВОС – генератор второго опорного сигнала;

БВРВ – блок вычисления разности векторов;

БОАМИАМ – блок определения алгоритма модифицированной амплитудной модуляции;

БГС и У – блок групповой синхронизации и управления;

Умножителя;

Сумматора;

Мультиплексора.

Работа модулятора начинается с формирования двух опорных сигналов разных форм генераторами первого и второго опорных сигналов. Опорные сигналы с выходов

генераторов поступают на блок вычисления разности векторов, далее полученный результат от блока вычисления разности векторов поступает на умножитель. Одновременно на умножитель поступают информационные элементы с генератора информационных элементов, которые необходимо передать в канал связи. Параллельно с поступлением опорных сигналов на блок вычисления разности векторов, опорные сигналы поступают на вход блока определения алгоритма модифицированной инвариантной амплитудной модуляции.

В блоке определения алгоритма модифицированной инвариантной амплитудной модуляции определяется алгоритм, по которому будет производиться модуляция по выражению (1) или (2). Если будет выбран 1 алгоритм модуляции, то с выхода блока определения алгоритма модифицированной инвариантной амплитудной модуляции будет подан второй опорный сигнал, если будет выбран 2 алгоритм модуляции, то с выхода блока определения алгоритма модифицированной инвариантной амплитудной модуляции будет подан первый опорный сигнал.

Выбранный опорный сигнал с блока определения алгоритма модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и результат с умножителя поступают на сумматор, на выходе которого получаем информационный сигнал для передачи в канал связи. Для последовательной передачи в канал связи первого и второго опорного сигнала, а также информационного сигнала используется мультиплексор [12, 13].

Согласованная работа всех блоков модифицированного инвариантного амплитудного модулятора обеспечивается блоком групповой синхронизации и управления. Для наглядности на рисунке 2 от блока групповой синхронизации и управления до всех блоков модифицированного инвариантного амплитудного модулятора не показаны соединительные линии [12, 13].

Структурная схема модифицированного инвариантного амплитудного демодулятора с двумя опорными сигналами

Структурная схема модифицированного инвариантного амплитудного демодулятора с двумя опорными сигналами представлена на рисунке 3.

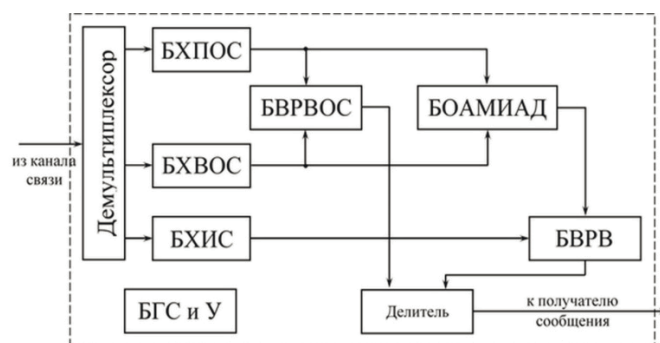


Рис. 3. Структурная схема модифицированного инвариантного амплитудного демодулятора с двумя опорными сигналами

Схема состоит из:

БХИС – блок хранения информационного сигнала;

БХПОС – блок хранения первого опорного сигнала;

БХВОС – блок хранения второго опорного сигнала;

БВРВОС – блок вычисления разницы векторов опорных сигналов;

БОАМИАД – блок определения алгоритма модифицированной амплитудной демодуляции;

БВРВ – блок вычисления разности векторов;

БВВО – блок вычисления вероятности ошибки;

БГС и У – блок групповой синхронизации и управления;

Делителя;

Демультимплексора.

Работа демодулятора начинается с приема из канала связи оценки информационного сигнала, оценки первого и оценки второго опорного сигналов, которые последовательно поступают на вход демультимплексора. Со входа демультимплексора оценки информационного сигнала, оценки первого и оценки второго опорного сигналов поступают на входы блоков хранения информационного сигнала, блок хранения первого опорного сигнала и блок хранения второго опорного сигнала. Далее оценки первого и второго опорного сигналов поступают на блок вычисления разности векторов опорных сигналов и блок определения алгоритма модифицированной амплитудной демодуляции.

В блоке определения алгоритма модифицированной амплитудной демодуляции определяется алгоритм, по которому будет производиться демодуляция по выражению (1) или (2). Если будет выбран 1 алгоритм модуляции, то с выхода блока определения алгоритма модифицированной амплитудной демодуляции будет подан второй опорный сигнал, если будет выбран 2 алгоритм модуляции, то с выхода блока определения алгоритма модифицированной амплитудной демодуляции будет подан первый опорный сигнал. Выбранный опорный сигнал с блока определения алгоритма модифицированной амплитудной демодуляции и оценка информационного сигнала поступают на блок вычисления разности векторов.

Полученный результат с блока вычисления разности векторов одновременно с результатом из блока вычисления разности векторов опорных сигналов поступает на делитель. Полученное частное из делителя поступает на блок вычисления вероятности ошибки, в котором определяется правильность информационного элемента и принимается решение о передаче принятого информационного элемента получателю сообщения или о запросе повтора у передающей части [12, 13].

При получении первой оценки информационного сигнала на БОАМИАД из блока групповой синхронизации и управления (БГС и У) поступает сигнал о том, что модифицированная инвариантная амплитудная демодуляция производится по 1 алгоритму. Во время приема оценок информационного сигнала с БВВО о каждом неправильно принятом информационном элементе информация передается в БГС и У, где ведется подсчет неверно принятых информационных элементов и полученное количество неверно принятых информационных элементов сравнивается с пороговым значением, хранящимся в БГС и У. Когда количество неверно принятых информационных элементов превысит пороговое значение из БГС и У на БОАМИАД и на передающую сторону

отправляется сигнал о том, что модифицированная инвариантная амплитудная демодуляция меняется с 1 алгоритма на 2 алгоритм и счетчик неверно принятых информационных элементов обнуляется. Далее работа модифицированного инвариантного амплитудного демодулятора осуществляется по 2 алгоритму пока количество неверно принятых информационных элементов не превысит пороговое значение, хранящегося в БГС и У. В этом случае БГС и У отправляет сигнал на БОАМИАД и на передающую сторону о том, что модифицированная инвариантная амплитудная демодуляция меняется со 2 алгоритма на 1 алгоритм и счетчик неверно принятых информационных элементов обнуляется. Работа продолжается пока не будет закончен сеанс связи.

Согласованная работа всех блоков модифицированного инвариантного амплитудного демодулятора обеспечивается блоком групповой синхронизации и управления. Для наглядности на рис. 3 от блока групповой синхронизации и управления до всех блоков модифицированного инвариантного амплитудного демодулятора не показаны линии [12, 13].

Оценка зависимости среднеквадратичного отклонения от значений отношения сигнал/шум

Для получения экспериментальных данных, которые необходимы для анализа модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами при воздействии на нее помехи в канале связи, проведено моделирование системы связи и расчет необходимых данных в среде Matlab.

В качестве помехи в канале связи возьмем аддитивный белый гауссовский шум.

На рисунке 4 представлена упрощенная структурная схема системы связи экспериментальной модели, которая была смоделирована в среде Matlab. Для сравнения результатов в качестве модулятора и демодулятора будет использоваться, в первом случае – модифицированная инвариантная амплитудная модуляция и демодуляция с двумя опорными сигналами, а во втором случае – амплитудная модуляция и демодуляция.



Рис. 4. Упрощенная структурная схема системы связи экспериментальной модели

Чтобы убедиться, что смоделированная экспериментальная модель работает правильно, рассмотрим влияние значений отношения сигнал/шум на сигналы с выхода модулятора, проходящие через канал связи.

На рисунках 5, 6 и 7 можно увидеть, как с увеличением значений отношения сигнал/шум, изменяется «зашумление» сигналов, проходящих через канал связи. В качестве модулятора используется модифицированная инвариантная модуляция с двумя опорными сигналами.

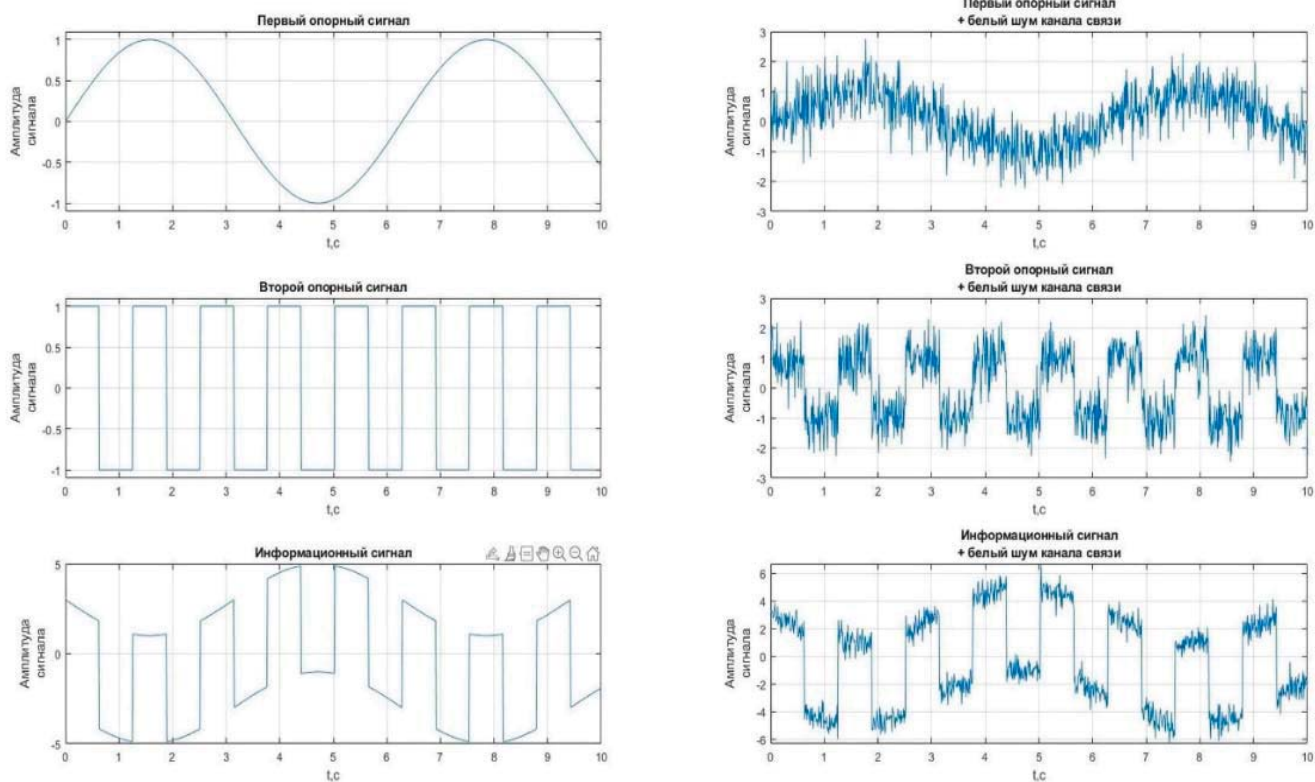


Рис. 5. Графики зависимости при прохождении сигналов через канал связи, при значениях отношения сигнал/шум равным 5 дБ

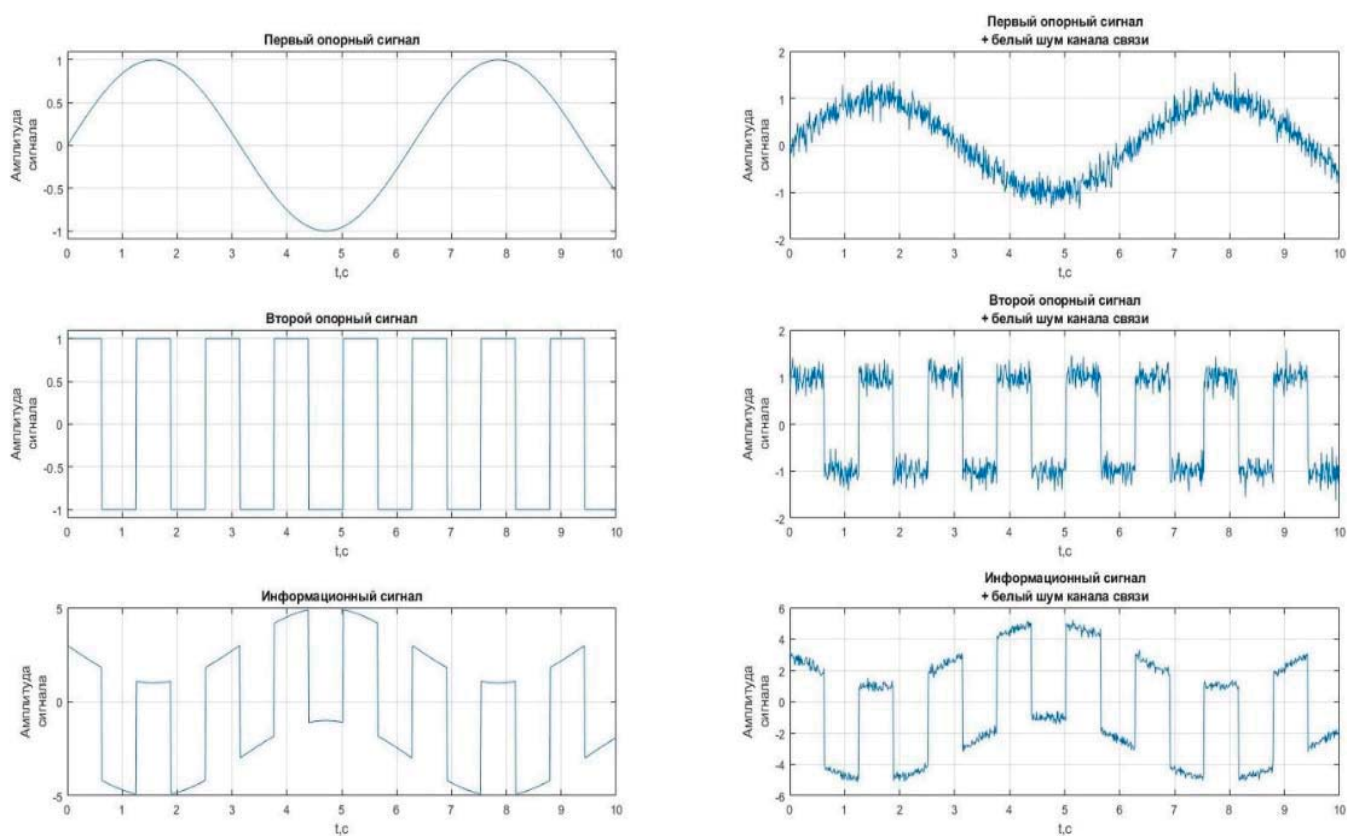


Рис. 6. Графики зависимости при прохождении сигналов через канал связи, при значениях отношения сигнал/шум равным 15 дБ

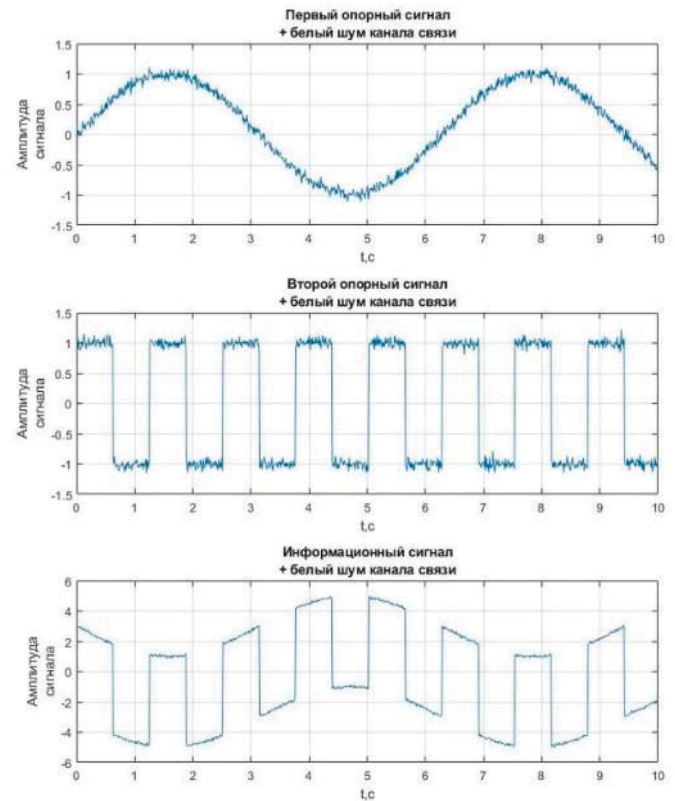
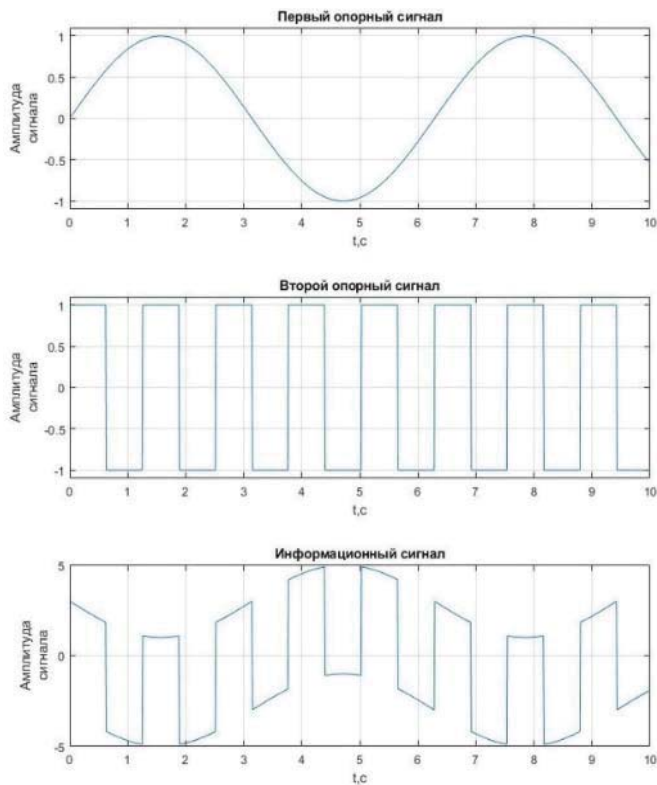


Рис. 7. Графики зависимости при прохождении сигналов через канал связи, при значениях отношения сигнал/шум равным 25 дБ

На верхних графиках показан первый опорный сигнал, в качестве которого используется синусоидальный сигнал. На средних графиках показан второй опорный сигнал, в качестве которого используется прямоугольный сигнал. И на нижних графиках представлен модифицированный инвариантный амплитудный сигнал с двумя опорными сигналами.

Итак, из рисунков 5-7 можно увидеть, что при увеличении значений отношения сигнал/шум в канале связи, «зашумленность» сигналов, проходящих через канал связи, уменьшается. Это свидетельствует о том, что основы теории связи для экспериментальной модели работают правильно.

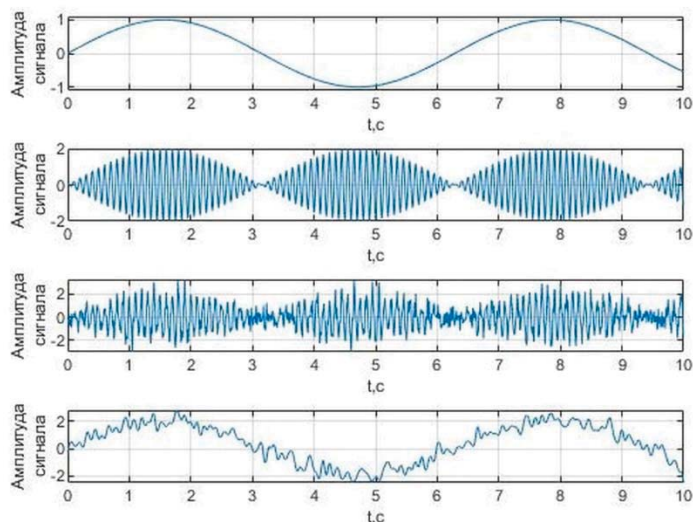


Рис. 8. Графики зависимости при прохождении сигналов через канал связи, при значениях отношения сигнал/шум равным 5 дБ

Далее рассмотрим влияние значений отношения сигнал/шум на сигналы с выхода модулятора, проходящие через канал связи для амплитудной модуляции. На рисунках 8, 9 и 10 можно увидеть, как с увеличением значений отношения сигнал/шум, изменяется «зашумленность» сигналов, проходящих через канал связи для амплитудной модуляции.

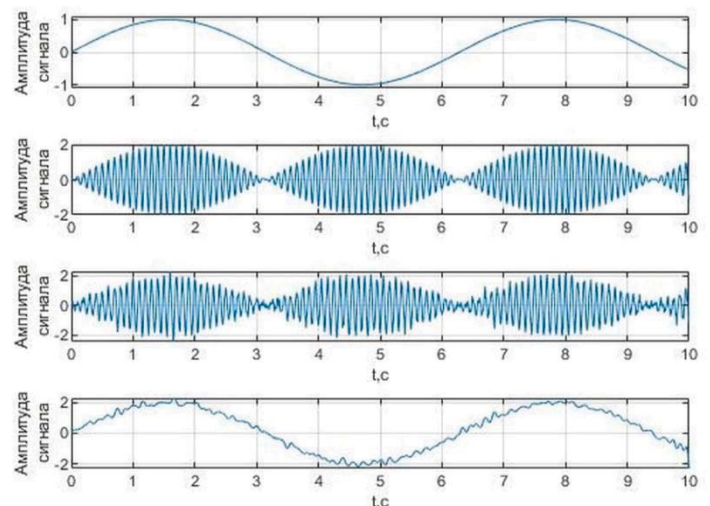


Рис. 9. Графики зависимости при прохождении сигналов через канал связи, при значениях отношения сигнал/шум равным 15 дБ

Также из рисунков 8-10 можно увидеть, что при увеличении значений отношения сигнал/шум в канале связи, «зашумленность» сигналов, проходящих через канал связи уменьшается. Это свидетельствует о том, что основы теории связи для экспериментальной модели работают правильно.

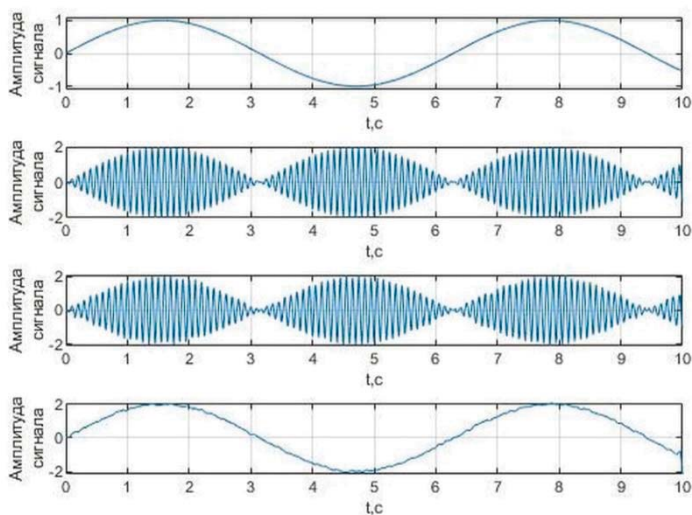


Рис. 10. Графики зависимости при прохождении сигналов через канал связи, при значениях отношения сигнал/шум равным 25 дБ

Далее в среде Matlab через экспериментальную модель от источника сообщений запустим 10000 информационных символов до получателя сообщений. На рисунке 11 представлены графики зависимости среднеквадратичного отклонения (СКО) от значений отношения сигнал/шум. В нашем случае СКО было рассчитано для системы связи с амплитудной модуляцией и модифицированной инвариантной амплитудной модуляцией с двумя опорными сигналами.

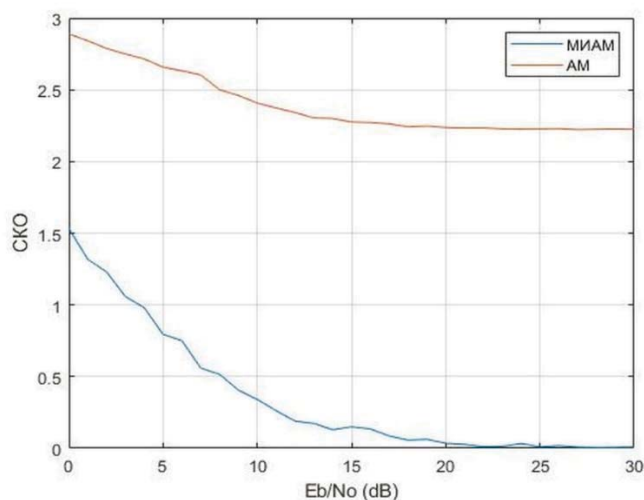


Рис. 11. Зависимость СКО от значений отношения сигнал/шум

Из рисунка 11 следует, что при значениях отношения сигнал/шум равной 5 дБ СКО для амплитудной модуляции равен 2,69, а для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами равен 0,81. При значениях отношения сигнал/шум равной 10 дБ СКО для амплитудной модуляции равен 2,43, а для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами равен 0,37. И при значениях отношения сигнал/шум равной 15 дБ СКО для амплитудной модуляции равен 2,26, а для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами равен 0,13.

Таким образом, СКО для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами

обладает существенно меньшими значениями, чем СКО для амплитудной модуляции. При меньших значениях отношения сигнал/шум до 10 дБ разница составляет примерно 3-6 раз. При значениях отношения сигнал/шум от 10-25 дБ разница составляет более 10 раз. При значениях отношения сигнал/шум более 25 дБ модифицированная инвариантная амплитудная модуляция с двумя опорными сигналами стремится к нулю.

Оценка зависимости вероятности битовой ошибки от значений отношения сигнал/шум

В заключении рассмотрим в смоделированной экспериментальной модели влияние значений отношения сигнал/шум на вероятность появления битовой ошибки (BER) для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами и для амплитудной модуляции. На рисунке 12 показана зависимость BER от значений отношения сигнал/шум.

Из рисунка 12 следует, что при значениях отношения сигнал/шум равной 5 дБ BER для амплитудной модуляции равен 0,29, а для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами равен 0,35. При значениях отношения сигнал/шум равной 10 дБ BER для амплитудной модуляции равен 0,07, а для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами равен 0,21. И при значениях отношения сигнал/шум равной 15 дБ BER для амплитудной модуляции равен 0,0001, а для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами равен 0,007.

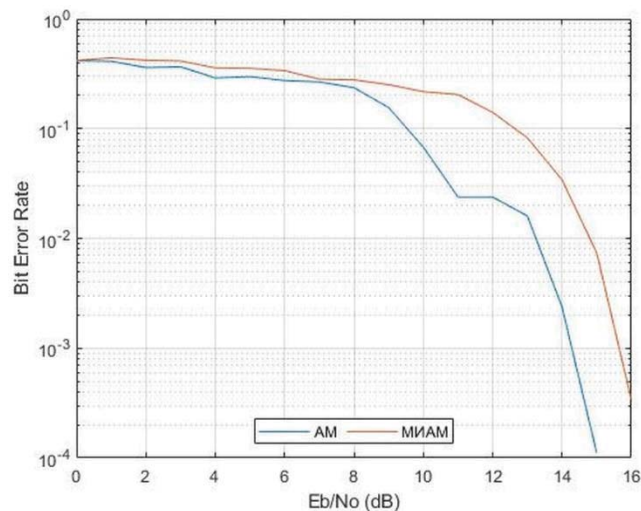


Рис. 12. Зависимость BER от значений отношения сигнал/шум

Видно, что передача информации с одинаковой надежностью через канал связи с модифицированной инвариантной амплитудной модуляцией с двумя опорными сигналами требует значительно большего отношения сигнал/шум, чем передача через канал связи с амплитудной модуляцией. При меньших значениях отношения сигнал/шум до 10 дБ разница BER между модифицированной инвариантной амплитудной модуляцией с двумя опорными сигналами и амплитудной модуляцией составляет примерно до трех раз. При больших значениях отношения сигнал/шум от 10 дБ разница BER составляет более трех раз.

Заключение

Модифицированный инвариантный амплитудный модулятор и демодулятор с двумя опорными сигналами для системы связи с модифицированной инвариантной модуляцией и демодуляцией считается последующим универсальным итогом работы над известной системой с инвариантной амплитудной модуляцией [13].

Преимуществом данной экспериментальной модели, модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами, заключается в том, что нет необходимости использования сигналов с подобными формами. В данном методе возможно содержание большого многообразия форм использованных сигналов. Линия, на которой располагаются концы векторов передаваемых опорных сигналов и информационного сигнала может занимать произвольное положение в системе координат рассматриваемого сигнального пространства. Данный положительный фактор экспериментальной модели, модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами, может быть применено для увеличения степени секретности отправляемых сообщений [1, 9, 12, 13].

В модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляции с двумя опорными сигналами в отличие от инвариантной амплитудной модуляции используются сигналы не одной формы, а трех разных форм – два разных опорных сигнала и информационный, также отличающийся по форме от опорных. Это означает, что для перехвата сообщений, передаваемых системой связи от источника сообщений к получателю с использованием модифицированной инвариантной амплитудной модуляции и демодуляцией с двумя опорными сигналами, задача противника усложняется втрое. Для вычисления значения величины передаваемого информационного элемента, перехватчику сообщений, необходимо будет обнаружить и оценить параметры трех заранее неизвестных сигналов разной формы, а не одной формы, как в случае системы передачи с инвариантной амплитудной модуляцией. Таким образом, можно утверждать о втрое больших вычислительных затратах по перехвату сообщений в системе связи, которая использует модифицированную инвариантную амплитудную модуляцию и демодуляцию с двумя опорными сигналами по сравнению с системой-прототипом или, другими словами, о трехкратном увеличении информационной безопасности (скрытности) передачи.

Хотелось бы отметить и тот факт, что СКО для модифицированной инвариантной амплитудной модуляции с двумя опорными сигналами обладает существенно меньшими значениями, чем СКО для амплитудной модуляции. При меньших значениях отношения сигнал/шум до 10 дБ разница составляет примерно 3-6 раз. При значениях отношения сигнал/шум от 10-25 дБ разница составляет более 10 раз. При значениях отношения сигнал/шум более 25 дБ модифицированная инвариантная амплитудная модуляция с двумя опорными сигналами стремится к нулю.

Передача информации с одинаковой надежностью через канал связи с использованием модифицированной инвариантной амплитудной модуляцией и демодуляцией с двумя опорными сигналами требует значительно большего отношения сигнал/шум, чем передача через канал связи с амплитудной модуляцией. При меньших значениях отношения сигнал/шум до 10 дБ разница BER между модифицированной

инвариантной амплитудной модуляцией с двумя опорными сигналами и амплитудной модуляцией составляет примерно до 3 раз. При больших значениях отношения сигнал/шум от 10 дБ разница BER составляет более трех раз.

Литература

1. Лебедев В.В., Абрамов С.С., Павлов И.И. и др. Модифицированная инвариантная амплитудная модуляция // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 6. С. 13-19.
2. Павлов И.И. Анализ теории и практики существующих инвариантных систем связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14, № 6. С. 27-34.
3. Павлов И.И., Павлова М.С., Абрамова Е.С., Абрамов С.С. Применение теории групп преобразований в инвариантных системах связи. Монография. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. 181 с.
4. Лебедев В.В. Разработка и исследование методов анализа и синтеза инвариантных систем связи : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лебедев Валерий Васильевич. Новосибирск, 1995.
5. Лебедев В.В. Разработка и исследование инвариантной системы связи по нелинейному каналу : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лебедев Максим Валерьевич. Новосибирск, 2019. 136 с.
6. Абрамов С.С. Повышение помехозащищенности дуплексных систем на основе инвариантной адаптивной эккомпенсации : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Абрамов Сергей Степанович. Новосибирск, 2016.
7. Ефимов Н.В. Высшая геометрия. М.: Наука, 1978. 576 с.
8. Лебедев В.В., Лебедев В.В., Андреев Н.В. Применение тензорной модели канала связи для исследования его энергетических характеристик // Современные проблемы телекоммуникаций : Материалы конференции, Новосибирск, 21-22 апреля 2016 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. С. 59-64.
9. Павлов И.И. Оценка помехоустойчивости системы связи с МИАМ // Вестник связи. 2020. № 5. С. 5-8.
10. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. Пер. с англ. М.: Советское радио, 1969. 752 с.
11. Левин Б.Р. Теоретические основы статической радиотехники. Книга первая. М.: Советское радио, 1969. 752 с.
12. Патент на полезную модель № 216552 U1 Российская Федерация, МПК H03C 1/02. Модифицированный инвариантный амплитудный модулятор с двумя опорными сигналами : № 2022129088 : заявл. 08.11.2022 : опубл. 14.02.2023 / И.И. Павлов, В.В. Лебедев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики».
13. Абрамов С.С., Абрамова Е.С., Павлов И.И., Павлова М.С. Методы синтеза инвариантных систем передачи сообщений с постоянными параметрами и инвариантных к аддитивной помехе // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022) : XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, Санкт-Петербург, 15-16 февраля 2022 года. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. С. 54-61.
14. Звездный А.М. Основы расчетов по статической радиотехнике. М.: Связь, 1969. 448 с.
15. Лебедев В.В., Лебедев В.В. Теория инвариантных систем связи и перспектива ее развития // Актуальные проблемы электронного приборостроения : Труды XIII Международной научно-технической конференции. В 12-ти томах, Новосибирск, 03-06 октября 2016 года. Том 7. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. С. 83-85.

MODIFIED INVARIANT AMPLITUDE MODULATION WITH TWO REFERENCE SIGNALS

Ivan I. Pavlov, Maria S. Pavlova, Evgenia S. Abramova, Sergey S. Abramov,
Siberian State University of Telecommunications and Information Science", Novosibirsk, Russia,
iipavlov02@mail.ru, mspavlova@ngs.ru, evgenka_252@mail.ru, abramov@sibsutis.ru

Valery A. Khan, Laboratory of Optical Location V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS;
Division for Nuclear-Fuel Cycle Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, nt.centre@mail.ru

Yuriy S. Shcherbakov, Siberian State University of Telecommunications and Information Science", Novosibirsk, Russia, ampal55@mail.ru

Abstract

The model of modified invariant amplitude modulation and demodulation with two reference signals considered in the article belongs to the field of systems, networks and devices of telecommunications and radio engineering and can be used in radio transmitting devices, telecommunication systems and devices where an amplitude-modulated transmitted signal is required for transmission through a communication channel. The achieved technical result of the modified invariant amplitude modulation and demodulation with two reference signals is aimed at the possibility of forming an amplitude-modulated transmitted signal with increased noise immunity characteristics to a specific type of interference. Algorithms of modified invariant amplitude modulation and demodulation with two reference signals are proposed, and based on these algorithms, block diagrams of a modified invariant amplitude modulator and a demodulator with two reference signals were developed. In order to obtain experimental data for the analysis of a modified invariant amplitude modulation and demodulation with two reference signals when it is affected by interference in the communication channel, the communication system was simulated and the necessary data calculated in Matlab. Additive white Gaussian noise was chosen as an interference in the communication channel. The article presents a simplified block diagram of the communication system of the experimental model. To compare the results, modified invariant amplitude modulation and demodulation with two reference signals will be used as a modulator and demodulator, in the first case, and in the second case, amplitude modulation and demodulation. As a result, estimates of the dependence of the standard deviation on the value of the signal-to-noise ratio and the probability of a bit error on the value of the signal-to-noise ratio were obtained. The standard deviation for modified invariant amplitude modulation and demodulation with two reference signals has significantly lower values than the standard deviation for amplitude modulation and demodulation. The transmission of information with the same reliability through a communication channel with a modified invariant amplitude modulation with two reference signals requires a significantly higher signal-to-noise ratio than transmission through a communication channel with amplitude modulation.

Keywords: modified invariant amplitude modulation, modified invariant amplitude demodulation, amplitude modulation, additive white Gaussian noise, standard deviation, bit error probability, signal-to-noise ratio

References

1. V.V. Lebedyantsev, S.S. Abramov, I.I. Pavlov et al. Modified invariant amplitude modulation. *T-Comm*. 2020. Vol. 14, No. 6. P. 13-19.
2. I.I. Pavlov. Analysis of the theory and practice of existing invariant communication systems. *High-tech technologies in space research of the Earth*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 27-34.
3. I.I. Pavlov, M.S. Pavlova, E.S. Abramova, S.S. Abramov. Application of the theory of transformation groups in invariant communication systems. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2022. 181 p.
4. V.V. Lebedyantsev. Development and research of methods of analysis and synthesis of invariant communication systems: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Novosibirsk, 1995.
5. M.V. Lebedyantsev. Development and research of an invariant communication system via a nonlinear channel: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Novosibirsk, 2019. 136 p.
6. S.S. Abramov. Increasing the noise immunity of duplex systems based on invariant adaptive echo compensation : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Novosibirsk, 2016.
7. N.V. Efimov. Higher Geometry. Moscow: Nauka, 1978, 576 p.
8. V.V. Lebedyantsev, M.V. Lebedyantsev, N.V. Andreev. Application of the tensor model of a communication channel for the study of its energy characteristics. *Modern problems of telecommunications: Conference Materials*, Novosibirsk, April 21-22, 2016. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2016, pp. 59-64.
9. I.I. Pavlov. Evaluation of the noise immunity of the MIAM communication system. *Bulletin of Communications*. 2020. No. 5. P. 5-8.
10. R. Horn, C. Johnson. Matrix analysis. Translated from English. Moscow: Soviet Radio, 1969, 752 p.
11. B.R. Levin. Theoretical foundations of static radio engineering. The first book. Moscow: Soviet radio, 1969, 752 p.
12. Utility model Patent No. 216552 U1 Russian Federation, IPC H03C 1/02. Modified invariant amplitude modulator with two reference signals : No. 2022129088 : application 08.11.2022 : publ. 14.02.2023 / I.I. Pavlov, V.V. Lebedyantsev ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Informatics".
13. S.S. Abramov, E.S. Abramova, I.I. Pavlov, M.S. Pavlova. Methods of synthesis of invariant message transmission systems with constant parameters and invariant to additive interference. *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2022) : XI International Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference*, St. Petersburg, February 15-16, 2022. Volume I. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruевич, 2022, pp. 54-61.
14. A.M. Zaezdny. Fundamentals of calculations for static radio engineering. Moscow: Svyaz, 1969, 448 p.
15. V.V. Lebedyantsev, M.V. Lebedyantsev. Theory of invariant communication systems and the prospect of its development. *Actual problems of electronic instrumentation : Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference*. In 12 volumes, Novosibirsk, 03-06 October 2016. Volu. 7. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016, pp. 83-85.