

5. Гринчук П.С., Стетюкевич Н.И., Шевцов В.Ф. Термодиагностика качества теплоизоляции производственного нагревательного оборудования// Неразрушающий контроль и диагностика. - 2014. № 4, С. 38-43.
6. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений - М: Техносфера. - 2005. 1007 с.
7. Petr Klapetek, David Necas, Christopher Anderson. Руководство пользователя (wyddion.<http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/index.htm>/
<http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-en.pdf>)
8. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов// Успехи физических наук. т. 177, №8, 2007. С. 859-876
9. Piotr Baranowski, Jaromir Krzyszczak, Cezary Slawinski and other. Multifractal analysis of meteorological time series to assess climate impacts// Climate research. Vol. 65. - 2015. p. 39 – 52
10. MikroScan 7600PRO Thermal Imager. Operator's Manual. Mikron Infrared, Inc. A LumaSense Technologies Company. 258 p. (<http://www.mikroninfrared.com>)

Сведения об авторах

Ахметханов Расим Султанович – заведующий лабораторией ИМАШ РАН, тел. 8(495)623-57-55, e-mail: mibsts@mail.ru

Юдина Ольга Николаевна – научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). E-mail: mibsts@mail.ru. Тел. +7(495)624-25-88

УДК 621.396

DOI: 10.36535/0869-4176-2021-02-4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Доктор техн. наук **В.Б. Малинкин**, кандидат техн. наук **А.В. Малинкин**,
кандидат техн. наук **Е.В. Малинкин**
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Доктор техн. наук **М.Н. Петров**
Сибирский государственный университет науки и технологии
им. М.Ф. Решетнева

Объектом исследования будет система радиорелейной связи, работающей в условиях Крайнего Севера. Для повышения эффективности работы таких систем предложен метод двусторонней одновременной передачи информационных сигналов в одной полосе частот, а также инвариантный метод обработки принимаемых сигналов.

Ключевые слова: радиорелейные системы связи; эффективность, надёжность, проблема передачи сигналов, инвариантный метод обработки информационных сигналов, мультипликативная помеха, АЧИ – амплитудно-частотные искажения, ФЧИ – фазо-частотные искажения.

HIGH EFFICIENCY OF OPERATING DIGITAL RADIO RELAY SYSTEMS IN EXTREME NORTH CONDITIONS

Dr. (Tech.) V.B. Malinkin, Ph.D. (Tech.) A.V. Malinkin, Ph.D. (Tech.) E.V. Malinkin
Siberian State University of Telecommunications and Information, Russian Federation

Dr. (Tech.) M.N. Petrov
Siberian State University of Science and Technology them. M.F. Reshetnev

The subject of the study will be a radio relay communication system operating in the Far North. To increase the efficiency of such systems, a method of two-way simultaneous transmission of information signals in one frequency band is proposed, as well as an invariant method of processing received signals.

Keywords: radio relay communication systems; efficiency, reliability, signal transmission problem, invariant method of processing information signals, multiplicative interference, АСН – amplitude-frequency distortions, АСН – phase-frequency distortions.

Введение

В условиях Крайнего Севера на телекоммуникационные сигналы воздействует комплекс помех. Одной из помех является мультипликативная помеха, порождённая Северным Сиянием.

Передача информационных сигналов в сети структуры «Точка-Точка» в цифровых радиоканалах осуществляется с помощью классических видов модуляции в разных частотных диапазонах.

Однако, эффективность работы подобной цифровой радиосети можно существенно улучшить, организовав обмен информационными сигналами между соседними станциями в одном частотном диапазоне. Таким образом, если для передачи информационных сигналов в направлении станций $A \rightarrow B$ используется частотный диапазон от f_1 до f_2 , то в направлении $B \rightarrow A$ используется такой же частотный диапазон. При этом, на входе приёмного устройства включаются адаптивные эхокомпенсаторы, а для борьбы с мультипликативной помехой используется инвариантная амплитудная модуляция.

Постановка задачи: Имеется радиоканал с гладкими замираниями и комплексной мультипликативной помехой. На каждой станции сформированы стандартные транспортные модули STM-N. Требуется разработать алгоритм функционирования, позволяющий организовать передачу информационных сигналов в направлении $A \rightarrow B$ и приём информационных сигналов в направлении $B \rightarrow A$ в одном частотном диапазоне. Кроме того, необходимо, чтобы в разрабатываемом алгоритме использовался метод борьбы с замираниями среды распространения и мультипликативной помехой.

Решение поставленной задачи

При организации двусторонней одновременной передачи информационных сигналов в радиостволах необходимо решить две актуальные задачи.

Первая задача заключается в организации передачи сигналов между станциями в одной полосе частот. Для решения этой задачи требуется создать инвариантный эхокомпенсатор. Такой эхокомпенсатор должен работать таким образом, чтобы компенсировать сигналы собственного передатчика (модулятора) в тракте своего приёмника. По-

добная структура должна быть адаптивной, устойчивой в работе и не сложный в конструктивном исполнении.

Вторая задача заключается в организации помехоустойчивого канала при воздействии комплексной помехи. На сигналы противоположной стороны воздействует шум, мультипликативная помеха, искажения, вносимые средой распространения (амплитудно-частотные искажения и фазо-частотные искажения). Для передачи информационных сигналов используются три вида модуляции – амплитудная модуляция, частотная модуляция и фазовая модуляция. Известно [2], что при воздействии белого шума наиболее помехоустойчивым видом модуляции является фазовая модуляция. Немного в помехоустойчивости при воздействии белого шума ей проигрывает частотная модуляция. Однако, эти виды модуляции оказываются не эффективными при воздействии мультипликативной помехи. В данной статье предлагается в качестве модулирующего сигнала использовать инвариантную относительную амплитудную модуляцию (ИОАМ). Такой вид модуляции при воздействии комплексной помехи оказывается наиболее помехоустойчивой, хотя при воздействии белого шума этот вид модуляции проигрывает классической ЧМ-модуляции и ФМ-модуляции. Структура, позволяющая организовать два независимых радиоствола, представлена на рис. 1.

При организации двустороннего одновременного обмена информационными сигналами необходима синхронность и синфазность между двумя станциями. На сети связи используют цифровые технологии. При использовании такой технологии используются стандартные модули STM-N.

Алгоритм работы обмена STM-N будет рассмотрен на примере Точка-Точка. При использовании технологии Точка-Многоточка (кольцевые структуры) каждая станция должна включаться «Спина к спине». Эта технология будет рассмотрена в следующих научных статьях.

Обмен информационными блоками STM-N состоит из периода обучения оборудования к параметрам среды распространения и рабочего режима работы.

В процессе обучения сформированные информационные модули STM-N (на рис. 1 не показаны) поступают на станции А на вход модулятора инвариантной относительной амплитудной модуляции (ИОАМ) и далее по радиоканалу передаётся на противоположную станцию В. Структура станции «В» аналогична структуре станции «А» и в данной статье не приводится. В режиме обучения передача информационного сигнала STM-N осуществляется от станции «А» к станции «В» в одностороннем режиме.

При обучении необходимо запустить в работу генераторное оборудование циклового синхросигнала обеих станций.

С этой целью сигналы собственного ИОАМ, одновременно с передачей в сторону станции «В» поступают в собственный демодулятор ИОАМ. Коммутатор станции «А» по сигналу окончного оборудования данных (ООД) поочерёдно переключает выход демодулятора ИОАМ на вход накопителя 1 или на вход накопителя 2, в которых формируется как информационная часть STM-N, так и опорный сигнал. Сигналы с выхода накопителя 1 и накопителя 2 запускают в работу генераторное оборудование на станции «А» и станции «В». Информационный сигнал STM-N с выхода накопителя 1 и опорный сигнал с выхода накопителя 2 с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ1 и БПФ2) преобразуются в комплексный спектр. С помощью эхокомпенсатора 1 и эхокомпенсатора 2 производится компенсация сигналов собственного передатчика в тракте собственного приёмника. Управление работой эхокомпенсатора 1 и эхокомпенсатора 2 производится с помощью вычислителя $\mu_i(z)$. В отличие от алгоритмов эхокомпенсации, работающих на основе, к примеру, минимума среднеквадратической ошибки, эхокомпенсатор 1 и эхокомпенсатор 2 использует в своей работе инвариантное равенство.

Для адаптации к параметрам радиотракта требуется не более 3-х блоков STM-N. Длительность стандартных блоков равна 125 мкс, следовательно, период обучения эхокомпенсаторов не должен превышать 500 мкс.

После того, как на станции А заполнены накопители 1 и 2, включены в работу эхокомпенсаторы 1 и 2, а также БПФ1 и БПФ2, включаются в работу генераторное оборудование циклового синхросигнала, вычислитель $\mu_i(z)$, модулятор ИОАМ и демодулятор ИОАМ и процесс обучения станции «А» заканчивается.

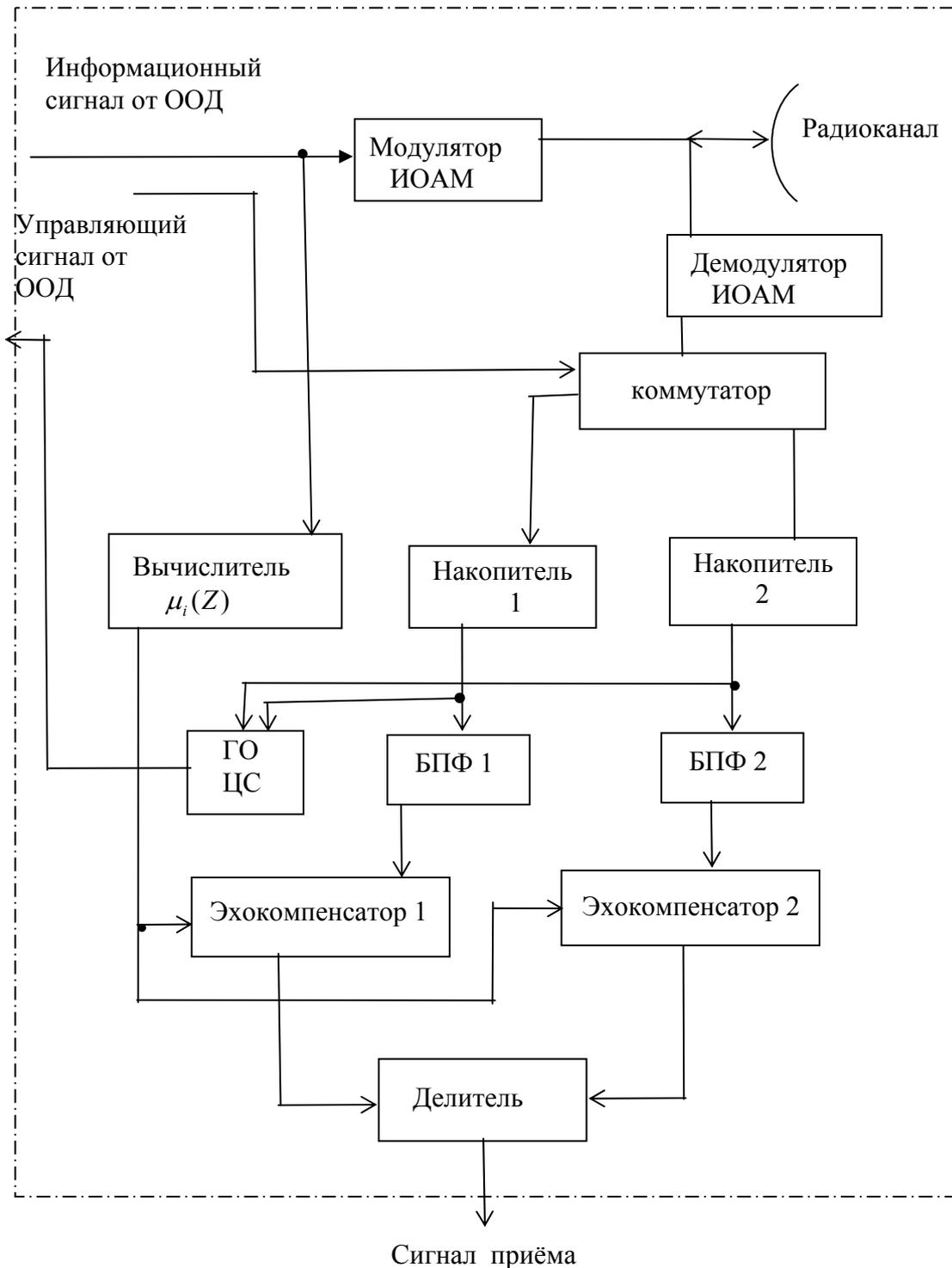


Рис. 1. Общая структура

На станции «В» процесс обучения включает в себе в рабочий цикл демодулятор ИО-АМ, накопитель 1 и накопитель 2, а также генераторное оборудование циклового синхросигнала. (На рис. 1 структура станции «В» не показана).

Выходной сигнал генераторного оборудования циклового синхросигнала поступает в ООД станции «В».

По данному сигналу формируются информационный сигнал STM-N и опорный сигнал станции «В». Производится включение вычислителя $\mu_i(z)$ станции «В», а также эхокомпенсаторов 1 и 2 указанной выше станции.

Для станции «В» требуется не более 500 мкс для обучения эхокомпенсаторов 1 и 2.

Таким образом, обучение двух станции при обмене информационными сигналами STM-N составляет не более 1 миллисекунды.

Для организации цикловой синхронизации между станциями «А» и «В» требуется организовать отдельный канал. При этом между двумя станциями организуется синхронизация по циклам.

Работа начинается с того момента, когда произойдёт обучение двух эхокомпенсаторов на обеих станциях.

При этом в рабочем состоянии вводится ещё одна операция – деление. С помощью этой операции производится компенсация амплитудно-частотных и фазо-частотных искажений и мультипликативной помехи. После операции деления сигнал приёма поступает в окончательное оборудование данных.

Рассмотрим все перечисленные операции более подробно. Во всех операциях используются инвариантные равенства. Так, на станции «А» для эхосигналов справедливо следующее соотношение

$$\frac{S_{ex\ i}(z)}{S_{on\ i}(z)} = \frac{\Pi_{exo\ i}(z)}{\Pi_{exo.on.i}(z)}, \quad (1)$$

где $S_{ex\ i}(z)$ - z изображение информационного сигнала (сигнала передачи ООД);

$S_{on\ i}(z)$ - z изображение опорного сигнала;

$\Pi_{exo\ i}(z)$ - z изображение эхосигнала в тракте приёма порождённого сигналом $S_{ex\ i}(z)$;

$\Pi_{exo.on.i}(z)$ - z изображение опорного сигнала в тракте приёма, порождённого опорным сигналом $S_{on\ i}(z)$.

Справедливость выражения легко доказывается, если учесть z изображение эхо тракта и свойства относительности среды распространения (радиоканала). Действительно, пользуясь теорией цифровой обработки сигналов можно записать

$$\left. \begin{aligned} \Pi_{exo\ i}(z) &= S_{ex\ i}(z) \cdot G_{exo\ i}(z) \\ \Pi_{exo.on.i}(z) &= S_{on\ i}(z) \cdot G'_{exo\ i}(z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $G_{exo\ i}(z)$ и $G'_{exo\ i}(z)$ - z изображение эхо тракта на соседних временных интервалах.

По закону относительности на интервале стационарности справедливо следующее:

$$G_{exo\ i}(z) \approx G'_{exo\ i}(z). \quad (3)$$

С учётом выражений (2) и (3), выражение (1) переходит в тождество. Из выражения (1) вытекает следующее:

$$P_{\text{exo } i}(z) = P_{\text{exo } \cdot \text{on } i}(z) \cdot \frac{S_{\text{ex } i}(z)}{S_{\text{on } i}(z)}. \quad (4)$$

Физически, выражение (4) можно объяснить следующим образом: величины $P_{\text{exo } i}(z)$ и $P_{\text{exo } \cdot \text{on } i}(z)$ неизвестны. Производя умножение на отношение Z изображений передаваемого информационного сигнала и опорного сигнала, искусственно производят расчёт оценки эхосигнала в соответствии с выражением (4). Таким образом, можно произвести компенсацию информационного и опорного сигнала эхосигнала в i -том цикле. Алгоритм компенсации информационного эхосигнала и опорного эхосигнала сводится к компенсации помехи, порядок следования которой известен. Эхокомпенсаторы 1 и 2 имеют передаточную характеристику, равную

$$H_{\text{комн}}(z) = (1 - \mu_i(z) \cdot z^{-1}) \cdot (1 + C \cdot \mu_i(z)z^{-1} + C^2 \cdot \mu_i^2(z) \cdot z^{-2} \dots + C^M \mu_i^M(z) \cdot z^{-M}), \quad (5)$$

где $\mu_i(Z)$ – управляющий коэффициент, изменяющий параметры эхокомпенсатора 1 и 2 таким образом, что для эхосигнала (информационного и опорного) подобная структура является фильтр-пробкой, а для сигналов приёма противоположной стороны является четырёхполосником, вносящим минимальное АЧИ и ФЧИ;

C – коэффициент, определяющий скорость сходимости процесса настройки. $C < 1$;

M – количество отводов адаптивно цифрового фильтра.

Эхокомпенсатор представляет собой два каскадно включенных нерекурсивных фильтра. В первом цифровом фильтре производится компенсация информационного эхосигнала и опорного эхосигнала. Во втором цифровом фильтре производится восстановление сигналов приёма, полученных из радиотракта (радиоканала).

При организации одновременного двустороннего обмена требуется организовать на противоположной стороне «В» передачу информационного и опорного сигналов. При этом, для помехоустойчивой передачи сигналов используется также инвариантное равенство. Для того, чтобы имелась возможность различить эхосигналы и сигналы приёма, введём обозначение сигналов приёма в виде $S_{\text{np}}(z)$.

Тогда инвариантное равенство для сигналов приёма на станции «А» будет выглядеть следующим образом

$$\frac{S'_{\text{ex } i}(z)}{S'_{\text{on } i}(z)} = \frac{S_{\text{np } i}(z)}{S_{\text{np } \cdot \text{on } i}(z)}, \quad (6)$$

где $S'_{\text{ex } i}(z)$ - z изображение входного сигнала станции «В»;

$S_{\text{np } i}(z)$ - z изображение сигнала приёма на входе станции «А»;

$S_{\text{np } \cdot \text{on } i}(z)$ - z изображение опорного сигнала приёма на входе станции «А».

Подстрочный индекс означает номер цикла. На информационные сигналы и опорные сигналы приёма воздействует АЧИ и ФЧИ радиоканала и комплексная помеха. Тогда мы вправе записать

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{np } i}(z) &= S_{\text{ex } i}(z) \cdot H_{\text{к.с.}i}(z) \cdot Q_i(z) \\ S_{\text{np } \cdot \text{on } i}(z) &= S_{\text{on } i}(z) \cdot H_{\text{к.с.}i}(z) \cdot Q_i(z) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $H_{\text{к.с.}i}(z)$ - передаточная характеристика радиоканала в направлении «В-А» в i -том цикле;

$Q_i(z)$ - z изображение мультипликативной помехи в i -том цикле.

Информационная составляющая сигналов противоположной стороны вложена в отношение z изображений.

Отсюда вытекает алгоритм демодуляции сигналов противоположной стороны: после компенсации эхосигналов на выходе эхокомпенсаторов 1 и 2 будут z изображения информационного сигнала и опорного сигнала. В силу того, что параметры среды распространения и мультипликативная помеха рассмотрены на интервале стационарности, то после деления АЧИ и ФЧИ компенсируются. Кроме этого, после операции деления компенсируется мультипликативная помеха. Параметры радиоканала изменяются со временем. Изменяются и передаточные характеристики среды распространения. Изменяется и мультипликативная помеха. Но ровно через один цикл обработки алгоритм демодуляции настроится на новые условия.

В процессе деления необходим контроль делителя на равенство нулю.

Результаты испытаний

Предлагаемый алгоритм исследован на математической модели. Кроме этого, сделана имитационная модель. Результаты испытаний отличаются на несколько процентов.

На рис. 2 проведены кривые сходимости процесса настройки инвариантных эхокомпенсаторов. Как сказано ранее, процесс настройки при выборе соответствующих коэффициентов сходимости «С» не превышает 3 блоков.

В системах SDH длительности контейнеров STM-N равны 125 мкс. Следовательно, интервал настройки не будет превышать 0,5 мс.

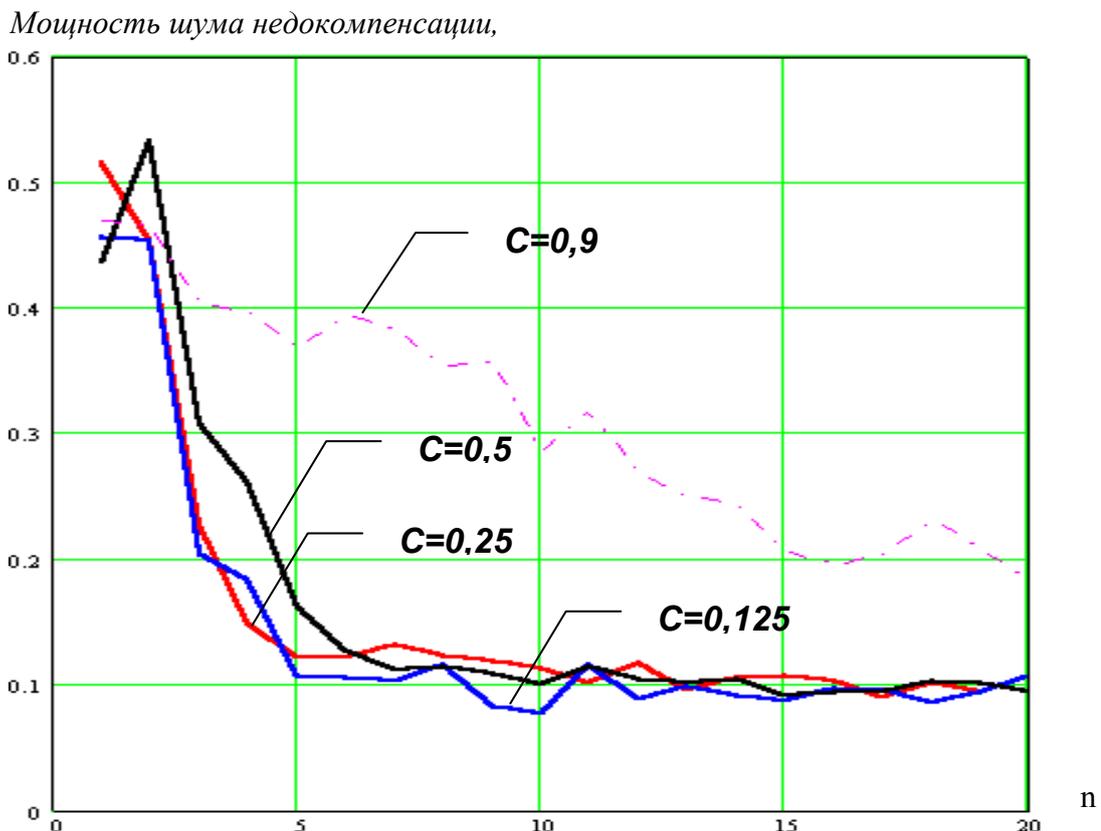
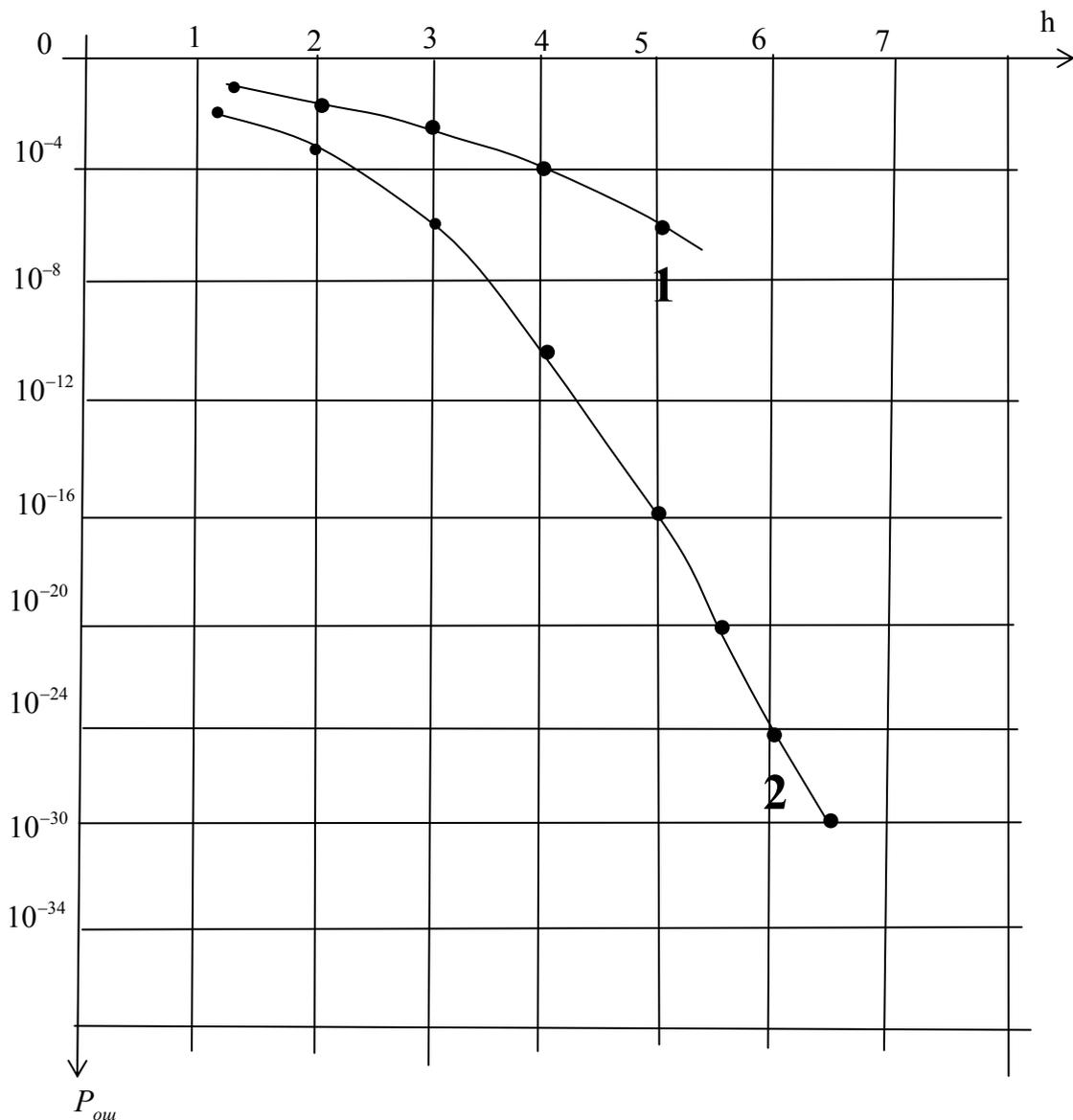


Рис. 2. Кривые настройки адаптивных эхокомпенсаторов



1 – зависимость $P_{oi}(h)$ для классической АМ модуляции.

2 – Зависимость $P_{oi}(h)$ для ИОАМ.

Рис. 3. Зависимость $P_{oi}(h)$

На рис. 3 приведены зависимость вероятности ошибочного приёма единичного элемента от отношения сигнал/шум для классической амплитудной модуляции и инвариантной относительной амплитудной модуляции. Из рис. 3 видно, что выигрыш в уменьшении вероятности ошибки в ИОАМ наступает при отношении сигнал/шум более 3. При этом, вероятность ошибочного приёма единичного элемента уменьшается на 3 порядка по сравнению с классической АМ модуляцией.

Выводы: Разработан метод функционирования цифровой радиорелейной линии, позволяющей организовать двусторонний обмен информационных сигналов в одной полосе частот, а также бороться с гладкими замираниями и мультипликативной помехой. Разработанный метод может найти применение в новом поколении цифровых радиорелейных линий.

Литература

1. Солонина А.И., Уляхович Д.А., Арбузов С.М. и др. Основы цифровой обработки сигналов. Курс лекций – Санкт-Петербург/БХВ-Петербург. - 2003, 594 с.
2. Петрович Н.Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией / Н.Т. Петрович-М.: Сов. Радио. - 1965, 263 с.
3. Малинкин В.Б. Инвариантная обработка сигналов в радиотехнических системах/ В.Б. Малинкин, Е.И. Алгазин, А.В. Малинкин / Монография, Красноярск, изд. Поликом. - 2012, 243 с.
4. Анализ функционирования системы ориентации и стабилизации геостационарного спутника связи // Петров М.Н., Анаров М.Ж. // Научное издание под ред. проф. Петрова М.Н. – Красноярск: изд. Поликом., ул. Вавилова 1, стр. 9. - 2018 г.-115 с. Тир. 500 экз.

Сведения об авторах

Петров Михаил Николаевич – профессор, главный научный сотрудник Сибирского государственного университета науки и технологии им. М.Ф. Решетнева, (Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31), т. 8 (391) 293 -20-70, e-mail: mnp_kafes@mail.ru.

Малинкин Виталий Борисович - профессор, профессор кафедры «Многоканальная электрическая связь» Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, 630102. г. Новосибирск, ул. Кирова, 86. e-mail: mesmnb@yandex.ru.

Малинкин Андрей Витальевич - инженер –исследователь Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, 630102. г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

Малинкин Евгений Витальевич - инженер –исследователь Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, 630102. г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.