УДК 621.396.41:621.391.826

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА УРОВНЯ СИГНАЛОВ НЕДОКОМПЕНСАЦИИ ЭХА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОРРЕЛЯЦИИ С ПЕРЕДАВАЕМЫМИ СИГНАЛАМИ

Абрамов С.С., Лебедянцев В.В., Павлов И.И., Абрамова Е.С.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Новосибирск, e-mail: abramov@sibsutis.ru

Разработка методов и устройств инвариантной адаптивной эхокомпенсации в дуплексных системах связи является, безусловно, актуальной задачей современной науки и техники. Связано это с тем, что современные системы связи в большинстве случаев являются дуплексными, а для них существует проблема подавления электрического эха, решаемая применением эхозаградителей, эхокомпенсаторов и т.п. Известные схемы эхокомпенсаторов основаны на применении трансверсальных фильтров и табличных методов записи эхосигналов в память и имеют ряд недостатков, связанных в первую очередь со сложностью реализации. Для их упрощения были предложены инвариантные эхокомпенсаторы, в которых используется свойство неизменности соотношений между параметрами сигналов, несмотря на их искажения в канале связи. Однако известные инвариантные эхокомпенсаторы не обладают свойствами адаптивности, что не позволяет использовать их в реальных системах связи с изменяемыми во времени параметрами эхотракта. Помимо отсутствия эффективных методов адаптивной инвариантной эхокомпенсации, не разработана и общая теория дуплексных систем передачи сообщений. Целью данной работы является повышение точности компенсации эхосигналов, вносимых собственным передатчиком в принимаемый сигнал, при разбалансировке дифференциальной системы и воздействии помех. Для этого предлагается ввести в схему адаптивного инвариантного эхокомпенсатора дополнительные блоки, которые обнаруживают, вычисляют и устраняют эхосигналы, возникающие вследствие разбалансировки дифференциальной системы и воздействии помех, с большей точностью по сравнению с известными вариантами схем. Результаты исследования доказали, что разработанное устройство обнаруживает, вычисляет и устраняет возникающие из-за разбалансировки дифференциальной системы эхосигналы, благодаря их сходству с передаваемыми сигналами, а повышение точности эхокомпенсации обеспечивается за счет замены процедуры деления суммы принимаемых сигналов, помехи и эхосигналов на передаваемые сигналы на процедуру вычисления величины корреляции этой суммы с передаваемыми сигналами. Таким образом, разработанная схема реализует способ адаптации инвариантного эхокомпенсатора, который позволяет компенсировать эхосигналы в условиях воздействия помех с большой точностью по сравнению с существующими.

Ключевые слова: эхокомпенсатор, дуплексный канал, недокомпенсация эха, эхотракт, корреляция

DETECTION AND EVALUATION OF LEVEL OF SIGNALS OF NON-COMPETITION ECHA IN USING CORRELATION WITH TRANSMITTED SIGNALS

Abramov S.S., Lebedyantsev V.V., Pavlov I.I., Abramova E.S.

Siberian State University of Telecommunications and Informatics Sciences, Novosibirsk, e-mail: abramov@sibsutis.ru

The development of methods and devices of invariant adaptive echo cancellation in duplex communication systems is, of course, an urgent task of modern science and technology. This is due to the fact that modern communication systems are in most cases duplex, and for them there is a problem of suppressing the electrical echo, solved by the use of echoes, echo cancers, etc. Known schemes of echo cancers are based on the use of transversal filters and tabular methods of recording echoes into memory and are glad of the shortcomings associated, first of all, with the complexity of implementation. To simplify them, invariant echo cancellators were proposed, in which the property of invariance of the relationships between signal parameters is used, despite their distortions in the communication channel. However, known invariant echo cancers do not have adaptive properties, which makes it impossible to use them in real communication systems with time-varying echo-trap parameters. In addition to the lack of effective methods of adaptive invariant echo cancellation, the general theory of duplex message transmission systems has not been developed. The aim of this work is to improve the accuracy of echo signal compensation introduced by the transmitter into the received signal, when the differential system is unbalanced and the effects of interference. For this purpose, it is proposed to introduce additional blocks into the scheme of the adaptive invariant echo canopy that detect, calculate and eliminate echoes resulting from the imbalance of the differential system and the interference effect, with greater accuracy in comparison with the known schemes. The results of the research proved that the developed device detects, computes and eliminates echo signals due to the imbalance of the differential system, due to their similarity to the transmitted signals, and an increase in the accuracy of echo cancellation is provided by replacing the procedure for dividing the sum of the received signals, interference and echoes into transmitted signals by the procedure calculating the correlation value of this sum with the transmitted signals. Thus, the developed scheme, realizes the method of adaptation of the invariant echo canceller, which makes it possible to compensate for echoes in the conditions of interference with a high accuracy in comparison with the existing ones.

Keywords: echo canceller, duplex channel, undercompensation of the echo, echotract, correlation

Современные высокоскоростные распределенные системы передачи информации требуют возрастающей пропускной способности подсистемы передачи как пользовательской, так и служебной информации, причем в цифровой форме и в полнодуплексном режиме. Такая форма информационного обмена предполагает одновременную передачу цифровых сигналов через один и тот же физический канал связи

в обоих направлениях в реальном масштабе времени [1–3]. И это является самой ресурсосберегающей и оправданной с экономической точки зрения основой увеличения пропускной способности распределительной сети между управляющей подсистемой и объектами управления [4].

Это позволяет обеспечить ощутимую экономию затрат на линейные сооружения, но связано с применением как аппаратного, так и вычислительного ресурса всей системы на организацию дуплексного режима передачи управляющих сигналов. Реализация дуплексного информационного обмена связана с необходимостью подавления сигналов собственного передатчика на входе приемного устройства и предполагает наличие механизма эхокомпенсации с адаптацией к изменяющимся условиям передачи [5–7].

Разработанный эхокомпенсатор [8] использовал для работы отношения длин векторов передаваемых сигналов с одинаковыми формами.

Цель исследования: повышение точности компенсации эхосигналов, вносимых собственным передатчиком в принимаемый сигнал, при разбалансировке дифференциальной системы и воздействии помех.

Материалы и методы исследования

Известный инвариантный эхокомпенсатор обладает недостатком, это отсутствие адаптивности к изменениям параметров эхотракта, которые возникают при неправильной работе дифференциальной системы в результате изменения параметров канала связи. Выходной сигнал инвариантного эхокомпенсатора определяется по формуле

$$S_{\text{вых эк}}(t) = kS_{\text{пер}}(t) + S_{\text{пр}}(t),$$

где $S_{\text{пер}}(t)$ – передаваемый сигнал; $S_{\text{пр}}(t)$ – принимаемый сигнал; k – коэффициент передачи паразитного эхотракта; $kS_{\text{пер}}(t)$ – погрешность компенсирующего сигнала.

Реализация адаптивности к изменениям параметров эхотракта была представлена в полезной модели «Адаптивный инвариантный эхокомпенсатор [9]».

Адаптивность исследуемого эхокомпенсатора достигается за счет оценки коэффициента передачи паразитного эхотракта, а также расчета сигналов компенсации.

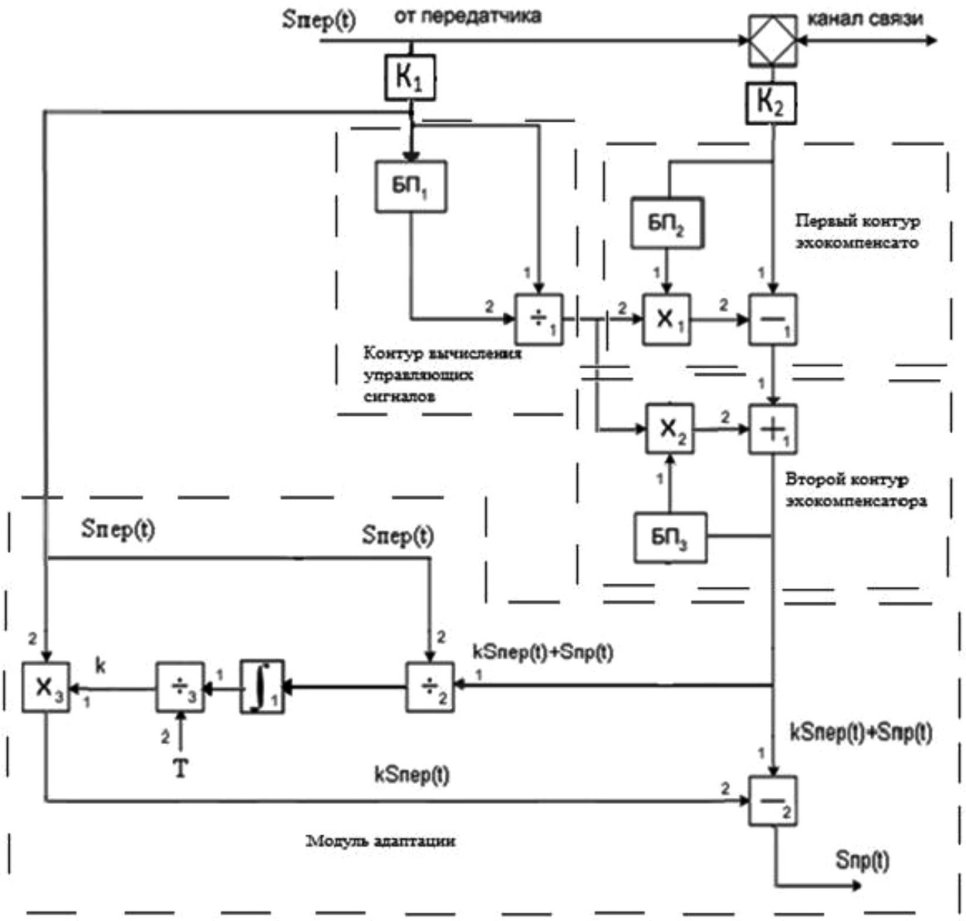

Рис. 1. Структурная схема адаптивного инвариантного эхокомпенсатора

Представленная структурная схема адаптивного инвариантного эхокомпенсатора (рис. 1) состоит из контуров управляющих сигналов, эхокомпенсации и модуля адаптации.

Для успешной работы этого устройства предполагается процесс обучения, в период которого встречные сигналы должны отсутствовать, а обучающий сигнал единичной амплитуды от передающего устройства записывается в первый блок памяти, а отклик эхотракта – во второй блок памяти.

Во время передачи сообщений отсчеты передаваемых сигналов через ключ $К_1$ поступают на вход первого блока памяти, где и хранятся в течение интервала дискретизации, и на первый вход делителя 1, который определяет управляющий сигнал, равный отношению двух временных отсчетов сигнала передатчика, передаваемых в данный и предыдущий моменты времени. За счет обладания свойств инвариантности – это сохранение величины такого же отношения для отсчетов эхосигнала на выходе дифференциальной системы, то есть на выходе паразитного эхотракта. Далее происходит умножение с помощью первого умножителя эха от предыдущего отсчета передаваемого сигнала, который хранится во 2 блоке памяти, на управляющий сигнал. В результате таких преобразований получилась величина эха от передаваемого в данный момент отсчета сигнала передатчика. При вычитании с помощью вычитателя 1 полученной таким образом величины эха из суммы реального эха и принимаемого сигнала и осуществляется компенсация эха первым контуром эхокомпенсатора.

В результате таких мероприятий первый контур, ликвидируя сигналы эха, также меняет структуру принимаемых сигналов. Для восстановления структуры принимаемых сигналов служит второй контур, который имеет зеркальную структуру, состоящую из первого сумматора, второго умножителя и третьего блока памяти.

При изменении частотно-временных характеристик канала связи после этапа обучения происходит разбалансировка дифференциальной системы, в результате чего во втором контуре возникают эхосигналы, повторяющие с точностью до неизвестного множителя k форму передаваемых сигналов. Для устранения возникших эхосигналов используется модуль адаптации, содержащий делитель 2, интегратор 1, делитель 3, умножитель 3 и вычитатель 2. В результате с помощью делителя 2, интегратора 1 и делителя 3 вычисляется оценка величины k

$$k = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} \frac{S_{\text{вых эк}}(t)}{S_{\text{пер}}(t)}dt = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} \frac{kS_{\text{пер}}(t) + S_{\text{пр}}(t)}{S_{\text{пер}}(t)}dt =$$

$$= k + \frac{1}{T}\int_{t}^{T+t} \frac{S_{\text{пр}}(t)}{S_{\text{пер}}(t)}dt, \qquad (1)$$

где T – интервал интегрирования.

При некоррелированности $S_{\text{пр}}(t)$ и $S_{\text{пер}}(t)$, что обеспечивается процедурами скремблирования сигналов на обеих сторонах системы связи, слагаемое в (1) будет вносить незначительную погрешность в оценку множителя k.

После определения k с помощью умножителя 3 происходит формирование компенсирующих эхосигналов $kS_{\text{пер}}(t)$, а далее во втором вычитателе будет происходить компенсация эхосигналов.

Наличие погрешности эхокомпенсации, вносимой помехами, поступающими на вход эхокомпенсатора из канала связи, является существенным недостатком этого инвариантного адаптивного эхокомпенсатора. Если в канале действует помеха типа белого шума со спектральной плотностью мощности G_0, то дисперсия погрешности оценки коэффициента передачи паразитного эхотракта, вносимая помехой, будет равна

$$D(\Delta k) = G_0 E_{0C}/T^2, \qquad (2)$$

где E_{0C} – энергия передаваемого сигнала.

$S_{\text{обр}}(t) = 1/S_{\text{пер}}(t)$, величина, вычисленная на интервале скользящего интегрирования длительностью T.

Результаты исследования и их обсуждение

Для достижения поставленной цели было разработано новое устройство. В схеме исследуемого эхокомпенсатора (рис. 1) были добавлены новые блоки (интегратор, квадратор), а также умножитель 4 заменен на делитель 2.

На рис. 2 изображена разработанная новая схема адаптивного инвариантного эхокомпенсатора с корреляцией.

Работа исследуемой схемы будет заключаться в следующим. В результате разбалансировки дифференциальной системы канала связи, а также при воздействии помехи $n(t)$, на выходе эхокомпенсатора, появится погрешность эхокомпенсации $\Delta S_{\text{эк}}(t)$:

$$\Delta S_{\text{эк}}(t) = kS_{\text{пер}}(t) + n(t),$$

где k – коэффициент передачи эхотракта,

При выполнении математических операций в модуле адаптации уменьшается погрешность эхокомпенсации $\Delta S_{\text{эк}}(t)$.

Произведем расчет значения корреляции $R(T)$ между передаваемым сигналом и выходным сигналом эхокомпенсатора $S_{\text{вых.эк}}(t) = \Delta S_{\text{эк}}(t) + S_{\text{пр}}(t) + n(t)$:

$$R(T) = \int_{t}^{t+T} S_{\text{вых. эк}}(t) S_{\text{пер}}(t)dt = \int_{t}^{t+T} [kS_{\text{пер}}(t) + n(t) + S_{\text{пр}}(t)]S_{\text{пер}}(t)dt =$$

$$= kE(T) + \int_{t}^{t+T} n(t)S_{\text{пер}}(t)dt + \int_{t}^{t+T} S_{\text{пр}}(t)S_{\text{пр}}(t)dt,$$

где $E(T) = \int_{t}^{t+T} S^2_{\text{пер}}(t)dt$ – энергия передаваемых сигналов.

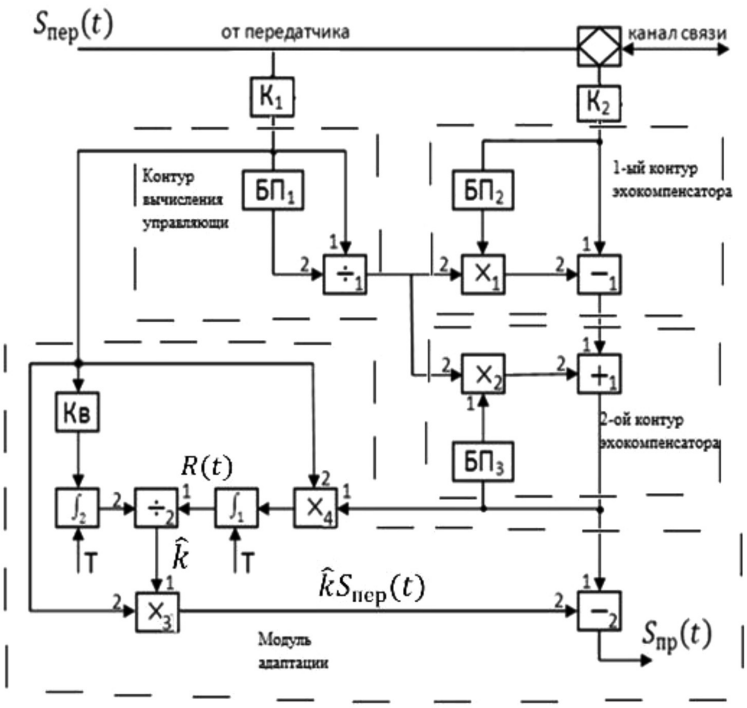

Рис. 2. Структурная схема адаптивного эхокомпенсатора с корреляцией

При отсутствии корреляции передаваемых и принимаемых сигналов последний интеграл будет равен нулю.

Для интервала скользящего интегрирования длительностью T с помощью квадратора Кв и интегратора 2 определим энергию $E(T)$.

Потом делителем 2 вычисляется оценка величины коэффициента передачи эхотракта $\hat{k}$:

$$\hat{k} = \frac{R(T)}{E(T)} = k + \frac{1}{E(T)} \int_{t}^{t+T} n(t) S_{пер}(t) dt = k + \Delta k.$$

В результате умножения коэффициента передачи $\hat{k}$ и передаваемого сигнала $S_{пер}(t)$, образуется копия сигналов погрешности эхокомпенсации $\hat{k}S_{пер}(t)$, при этом осуществляется компенсация эхосигналов на входе приемника системы.

Дисперсия погрешности будет равна

$$D'(\Delta k) = \frac{G_0}{E(T)}. \quad (3)$$

Если допустить, что плотность вероятности величин отсчетов передаваемых сигналов внутри диапазона значений будет равномерной $-M \le S_{пер}(t) \le M$, где, ($-M \div M$ – динамический диапазон изменений отсчетов сигналов) и влиянии помехи типа белого шума, то выигрыш в точности вычисления оценки коэффициента передачи эхотракта в данной полезной модели по отношению к прототипу составит

$$B = \frac{D(\Delta k)}{D'(\Delta k)} = \frac{1}{3}\left(\frac{M}{\beta} - 1\right),$$

где β – значение отсчетов передаваемых сигналов.

Так при $\frac{M}{\beta} = 10^3$ выигрыш в точности эхокомпенсации составит

$$B = \frac{1}{3}\left(10^3 - 1\right) = 300.$$

Для проведения доказательства работоспособности и эффективности адаптивного инвариантного эхокомпенсатора (рис. 1), по отношению к адаптивному инвариантному эхокомпенсатору посредством деления сигналов контура 2 на передаваемые сигналы, с последующим интегрированием (рис. 2), была разработана модель работы двух эхокомпенсаторов при неправильной работе дифференциальной системы и влияния помех типа белый шум.

При оценке качества эхокомпенсации использовалась величина отношения мощностей на входе и выходе исследуемых устройств.

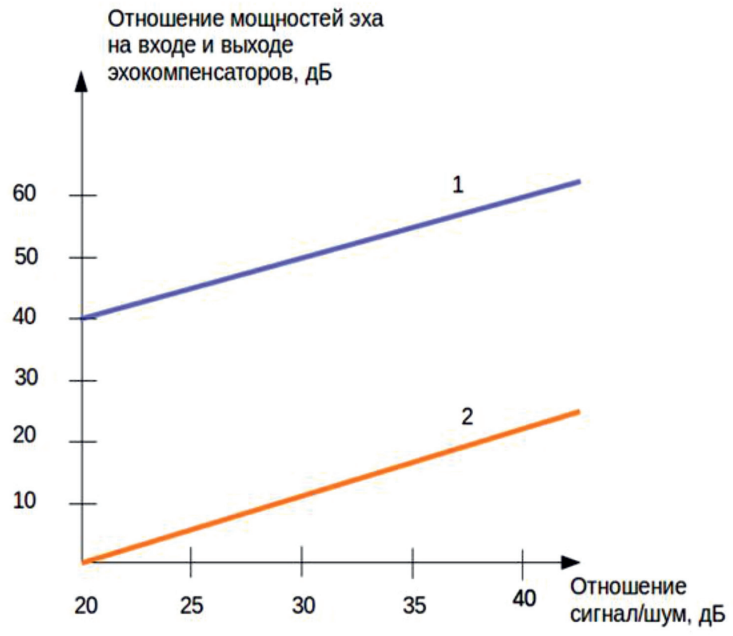

Рис. 3. График зависимости отношений сигнал-шум в канале при длительности интервала скользящего интегрирования: 1 – результаты исследования адаптивного инвариантного эхокомпенсатора с корреляцией, 2 – результаты исследования адаптивного инвариантного эхокомпенсатора (прототипа) [10]

Результаты эксперимента для различных отношений сигнал-шум в канале связи при длительности интервала скользящего интегрирования приведены на рис. 3.

Выводы

Результаты исследования доказали, что разработанное устройство обнаруживает, вычисляет и устраняет возникающие из-за разбалансировки дифференциальной системы эхосигналы, благодаря их сходству с передаваемыми сигналами. Повышение точности эхокомпенсации обеспечивается за счет замены процедуры деления суммы принимаемых сигналов, помехи и эхосигналов на передаваемые сигналы на процедуру вычисления величины корреляции этой суммы с передаваемыми сигналами, что доказывает ее помехоустойчивость и работоспособность.

Список литературы

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Алгоритмы адаптивной нелинейной обработки сигналов блоками нелинейного преобразования дискриминаторов с прямой и обратной связью // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 3. Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/mar18/10/text.pdf (дата обращения: 17.07.2018). DOI 10.30898/1684-1719.2018.3.3.

2. Корф К.С., Шаврин С.С. Оптимизация эхокомпенсатора для защищенных каналов // Вестник связи. 2014. № 7. С. 37–38.

3. Душин С.В., Шаврин С.С. Влияние параметрических изменений эхотракта на работу взаимокорреляционного эхокомпенсатора // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5. № 8. С. 47–49.

4. Душин С.В., Шаврин С.С. Алгоритм адаптивной настройки механизмов эхокомпенсации по критерию минимальной корреляции виртуальных сигналов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 4. С. 935–938.

5. Цыбулин М.К. Подавление электрического эха в телефонных каналах. М.: Радио и связь, 1990. 112 с.

6. Душин С., Коршунов В. Компенсационный принцип подавления эхосигналов // Первая миля. 2017. № 7 (68). С. 58–62.

7. Гордиенко В.Н., Шаврин С.С., Мусатова О.Ю. Оценка эффективности подавления эхосигналов // Вестник связи. 2014. № 2. С. 15–18.

8. Лебедянцев В.В. Разработка и исследование методов анализа и синтеза инвариантных систем связи: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.02. Новосибирск, 1995. 378 с.

9. Абрамов С.С., Лебедянцев В.В., Морозов Е.В., Калачиков А.А. Адаптивный инвариантный эхокомпенсатор. Патент РФ на полезную модель № 148617. Заявитель и правообладатель ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», зарег. 16.06.2014.

10. Абрамов С.С. Повышение помехозащищенности дуплексных систем на основе инвариантной адаптивной эхокомпенсации: дис. ... докт. техн. наук: 05.12.13. Новосибирск, 2016. 263 с.