

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ адаптивных эхокомпенсационных алгоритмов в технологии С-І-С

С.Душкин, к.т.н., старший научный сотрудник ИПУ РАН,
С.Шаврин, д.т.н., профессор МТУСИ / sss@mtuci.ru

УДК 621.395.664 / ВАК 05.12.13, DOI: [10.22184/2070-8963.2019.83.6.32.36](https://doi.org/10.22184/2070-8963.2019.83.6.32.36)

Проведен анализ условий функционирования эхокомпенсационных механизмов в технологии Carrier-in-Carrier (С-І-С). Рассмотрены основные факторы, оказывающие негативное влияние на процесс адаптивной настройки эхокомпенсатора. Приведены результаты анализа свойств основных алгоритмов эхокомпенсации в системе С-І-С. Представлены решения по обеспечению необходимой устойчивости и степени подавления мешающих сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Частотный ресурс, как известно, является в настоящее время едва ли не главной проблемой для пользователей радиоэфира. Его использование регламентируется Международным союзом электросвязи (МСЭ), реализующим стратегию распределения частотных диапазонов с акцентом на решение глобальных проблем радиовещания и радиосвязи. При этом конкуренция между различными службами даже в пределах выделенных диапазонов часто остается высокой вследствие непрерывного роста спроса на объем информации, передаваемой по радиоканалам.

Ограниченный и невосполнимый характер частотного ресурса вывел задачу повышения эффективности его использования в настоящее время в разряд актуальнейших и важнейших. Одним из действенных средств повышения эффективности использования частотного ресурса является технология Carrier-in-Carrier, являющаяся механизмом использования

дуплексного режима передачи информации на одной несущей частоте.

Эта технология в настоящее время находит применение как среди мелких операторов вследствие дороговизны частотного ресурса, так и в спутниковых системах специального назначения, поскольку в дополнение к экономии частотного ресурса обеспечивает высокую степень защиты от перехвата передаваемой информации.

УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭХОКОМПЕНСАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ В ТЕХНОЛОГИИ С-І-С

Механизм технологии С-І-С в упрощенном виде иллюстрируется рис.1, где приняты следующие обозначения: М – модулятор; Д – демодулятор; ЭК – эхокомпенсатор; АТФ – адаптивный трансверсальный фильтр.

Сигналы двух источников от станций А и Б в одной полосе, формируемые переносом

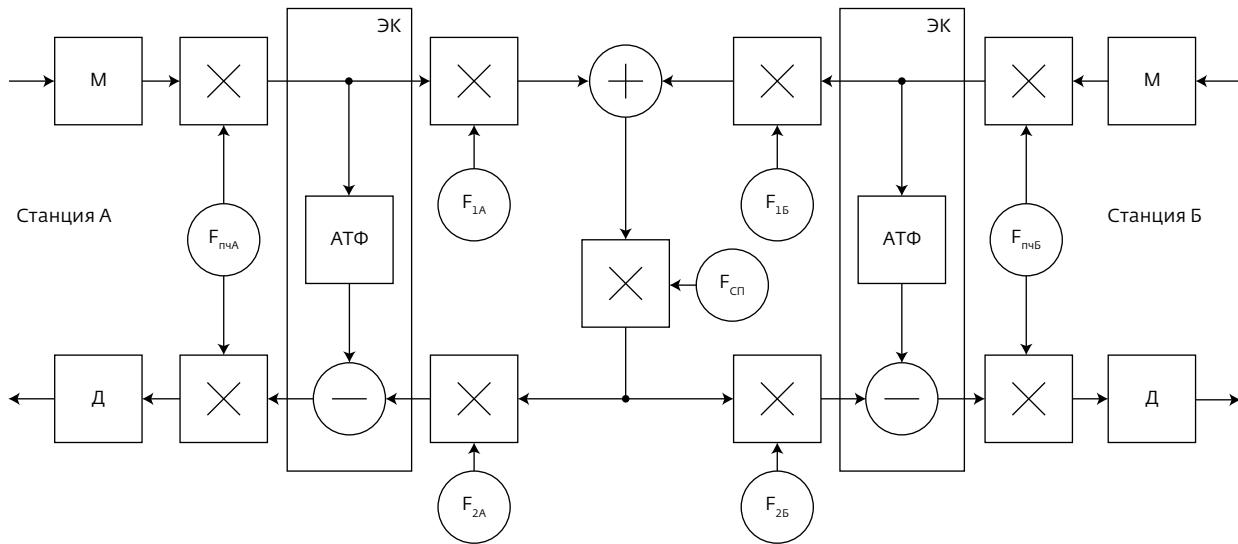


Рис.1. Технология Carrier-in-Carrier

из базовой полосы на промежуточные частоты (соответственно $F_{\text{пчA}}$ и $F_{\text{пчB}}$) и далее в спектр передачи F_{1A} и F_{1B} , поступают аддитивно на вход тракта приема спутника. Во избежание самовозбуждения при усилении на спутнике сумма этих сигналов переносится (сдвигается) на частоту $F_{\text{сп}}$.

Принимаемый со спутника на станциях А и Б сигнал переносится на промежуточную частоту генераторами $F_{2A} \approx F_{1A} - F_{\text{сп}}$ и $F_{2B} \approx F_{1B} - F_{\text{сп}}$. Этот сигнал представляет собой сумму сигналов ПЧ от источников станций А и Б. Из этого сигнала на станции А эхокомпенсатором ЭК вычитается копия сигнала ПЧ от источника А. В результате сигнал ПЧ только источника Б поступает в тракт ПЧ и далее в демодулятор станции А. Аналогичная картина наблюдается на станции Б.

Фильтр АТФ в составе ЭК выполняет обычную для эхокомпенсатора функцию, однако при этом функционирует при специфических условиях.

Во-первых, включение ЭК в тракт обработки сигнала осуществляется между трактами ПЧ и ВЧ, причем в тракт приема ЭК включен до согласованного фильтра модема в цепь практически нефильтрованного сигнала при невозможности использования дополнительной фильтрации в схеме ЭК.

Во-вторых, адаптивная настройка АТФ должна проводиться без перерыва связи в условиях постоянного воздействия сигнала встречного направления – возможно, превосходящей мощности (до 10 дБ).

В-третьих, принципиально нечетное количество ступеней преобразования частоты (за счет сдвига частоты на спутнике) вызывает частотный сдвиг между эхосигналом и вызвавшим его сигналом прямого направления передачи. Величина этого сдвига $\Delta F = F_{1A} + F_{\text{сп}} - F_{2A}$ (для станции А) определяется неточностью частот задающих генераторов ВЧ на станции и на спутнике. В системах связи спутников на низких околоземных орbitах частотный сдвиг, кроме того, будет усилен эффектом Доплера.

В-четвертых, статистические свойства сигналов, используемых в системе и, в частности, вид (форма) автокорреляционной функции могут оказать негативное влияние на сходимость эхокомпенсационных алгоритмов.

В-пятых, высокое значение времени распространения сигнала в геостационарных спутниковых системах и динамические колебания этого времени в системах на "низколетах" осложняют проблему оперативной оценки времени "плоской" задержки.

Из положительных моментов технологии С-І-С как объекта приложения эхокомпенсационных механизмов следует отметить короткую длительность значимой части импульсной характеристики эхотракта, что при возможности оперативной оценки ее "плоской" части может обеспечить ускорение процесса адаптивной настройки.

Кроме того, подавление "своего" эхосигнала даже на 30 дБ по отношению к уровню встречного сигнала в таких системах считается вполне допустимым, поскольку неподавленные сигналы в этом случае не приводят к значимому повышению коэффициента ошибок.

Представленные условия функционирования эхокомпенсационных механизмов в технологии С-І-С диктуют необходимость анализа возможности использования основных алгоритмов адаптивной фильтрации с точки зрения обеспечения адекватности процесса настройки.

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ЭХОКОМПЕНСАЦИИ В СИСТЕМЕ CARRIER-IN-CARRIER

Как отмечалось ранее, ключевым блоком приемо-передающего тракта в системах Carrier-in-Carrier является эхокомпенсатор. Важнейшим его свойством в данном применении должна являться способность осуществлять адаптацию на фоне действующего встречного сигнала, что позволяет отслеживать изменения импульсной характеристики эхотракта без прерывания передачи полезной информации. Очевидно, что для этого алгоритм адаптации, применяемый в эхокомпенсаторе, должен обладать высокой помехоустойчивостью (робастностью) в условиях действия модулированных сигналов прямого и обратного направлений передачи. Вторым важным свойством, как и в большинстве задач адаптивной эхокомпенсации, должна являться скорость сходимости алгоритма, позволяющая осуществить первоначальную настройку за приемлемое время и достаточно быстро отслеживать возможные изменения импульсной характеристики эхотракта.

Задаваясь вопросом рационального выбора алгоритма адаптации (далее – алгоритм адаптивной фильтрации) по обозначенным выше критериям, следует отметить, что устойчивость рекуррентных алгоритмов адаптивной фильтрации к аддитивным помехам имеет сильную зависимость от свойств активного сигнала, аддитивной помехи и параметров самих алгоритмов [6, 7]. При этом выбор параметров

алгоритмов в целях повышения помехоустойчивости, как правило, приводит к ухудшению других функциональных характеристик адаптивного фильтра (в частности, скорости сходимости). Проанализируем робастность основных классов алгоритмов адаптивной фильтрации и рассмотрим вопрос рациональности их применения в технологии Carrier-in-Carrier.

Наиболее алгоритмически и вычислительно простыми алгоритмами адаптивной фильтрации являются алгоритмы класса LMS (Least Mean Square). Помехоустойчивость этих алгоритмов имеет выраженную зависимость от параметра адаптации, а именно: по мере уменьшения значения параметра адаптации возрастает устойчивость к помехам. Скорость сходимости данных алгоритмов также довольно сильно зависит от параметра адаптации и снижается по мере уменьшения значения параметра адаптации. То есть при повышении помехоустойчивости скорость сходимости снижается. Необходимо также отметить, что на устойчивость к аддитивным помехам оказывают сильное влияние статистические свойства активного сигнала. Например, в рамках эксперимента, представленного в [7], при действии в качестве активного сигнала и встречного сигнала белого шума нормализованный алгоритм LMS (NLMS) обеспечивает уровень остаточного эхосигнала на 15 дБ меньше относительно уровня встречного сигнала, тогда как при действии модулированных сигналов этот показатель падает до 4 дБ. Для достижения приемлемого уровня подавления эхосигнала при действии модулированных сигналов требуется выбирать параметр адаптации таким, чтобы скорость сходимости становилась неприемлемо низкой для многих приложений, для которых скорость сходимости является критичным параметром. Таким образом, для применения в технологии Carrier-in-Carrier, в которой критична скорость настройки на изменения параметров эхотракта, алгоритмы класса LMS не обладают подходящим сочетанием функциональных характеристик.

Алгоритм аффинных проекций (Affine Projection, AP) является обобщением NLMS. Как показывают исследования, алгоритм AP имеет сопоставимую с NLMS помехоустойчивость при одинаковой скорости сходимости (необходимо выбирать разные параметры адаптации, так как алгоритм AP сходится быстрее NLMS при одинаковых параметрах адаптации) [6]. Таким образом, в условиях технологии Carrier-in-Carrier

высокая скорость сходимости не дает преимуществ алгоритму AP в сравнении с NLMS.

Алгоритмы класса RLS (Recursive Least Square) – в частности, взвешенный алгоритм wRLS – показывают более высокую помехоустойчивость как при адаптации на белом шуме, так и при адаптации на модулированном сигнале. При этом для достижения высокой помехоустойчивости критически важным параметром является параметр забывания, который должен выбираться близким к единице (типовые значения – 0,9999). Согласно экспериментам, представленным в [7], wRLS обеспечивает подавление остаточного эхосигнала более 20 дБ относительно уровня встречного сигнала при действии модулированных сигналов в прямом и обратном направлении.

Важно отметить, что алгоритм wRLS обладает квадратичной асимптотической сложностью, что при обработке высокоскоростных сигналов может значительно увеличить стоимость необходимой для реализации электронной компонентной базы. В связи с этим более логичным решением представляется использование вычислительно быстрых алгоритмов класса RLS. Однако алгоритмы RLS, построенные на вычислительно быстрых процедурах, в некоторых случаях могут показывать низкую устойчивость к воздействию аддитивных помех. Например, рассмотренный в [7] алгоритм FTF (Fast Transversal Filter) показывает одинаковую в сравнении с wRLS помехоустойчивость при действии в прямом и обратном направлении белого шума, но при действии модулированных сигналов она оказывается сравнительно невысокой.

Корреляционные алгоритмы, разработанные для задач адаптации в условиях действия аддитивных помех, способны обеспечить высокую

помехоустойчивость при действии в прямом и обратном направлении модулированных сигналов, позволяя подавить эхосигнал на 30 дБ относительно уровня встречного сигнала. При этом скорость сходимости может быть сопоставима со скоростью сходимости wRLS. В частности, такими свойствами обладает алгоритм минимальной корреляции виртуальных сигналов (МКВС) [5]. Однако МКВС, в случае выбора его параметров для обеспечения высокой помехоустойчивости, имеет довольно высокую вычислительную сложность, что делает затруднительным его применение для обработки скоростных сигналов на сравнительно недорогой элементной базе. В связи с этим практический интерес представляет взаимокорреляционный алгоритм [1], имеющий помехоустойчивость, аналогичную МКВС, но обладающий значительно меньшей вычислительной сложностью. Данный алгоритм можно описать выражениями (1) – (2):

$$H_{N_{i+1}} = H_{N_i} + \mu \cdot (R_{\text{бш}_i} + \delta E)^{-1} \quad (1)$$

$$P_{XZ_i} = \sum_{l=1}^M X_{i-l}, \quad (2)$$

где P_{XZ_i} – вектор взаимной корреляции активного сигнала и остаточного эхосигнала; δ – малая величина; E – единичная матрица; $R_{\text{бш}_i}$ – автокорреляционная матрица белого шума, мощность которого равна мощности активного сигнала; N – количество коэффициентов фильтра; M – количество отсчетов, участвующих в оценке ВКФ; z_i – отсчет остаточного эхосигнала; X_i – вектор значений активного сигнала; μ – параметр адаптации.

Недостатком взаимокорреляционного алгоритма является низкая в сравнении с МКВС скорость сходимости и ее зависимость от времени оценки взаимокорреляционной функ-



ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

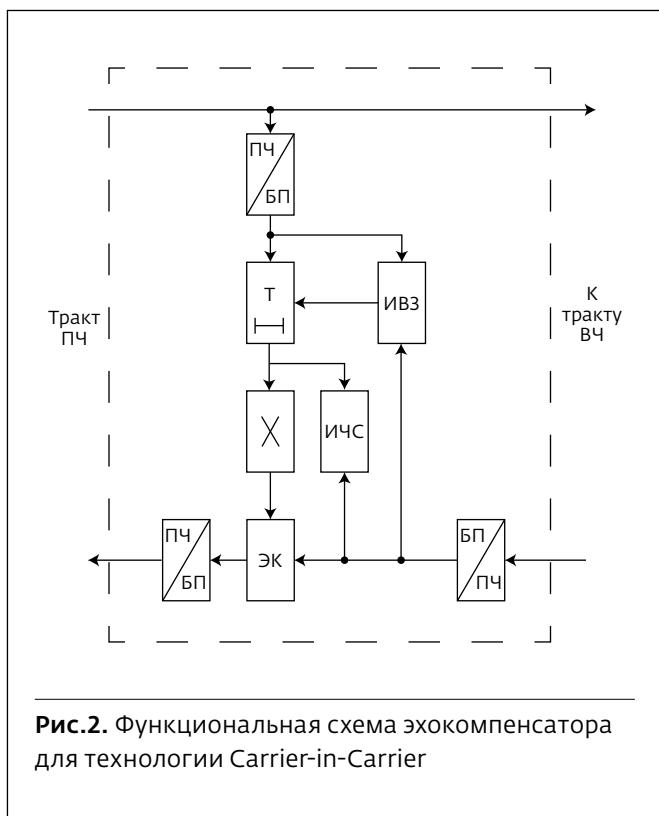
**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**

ONEPLAN



step@rpls.ru +7 812 590-77-11 www.rpls.ru

БЕСПРОВОДНАЯ СВЯЗЬ



ции, которая во многом определяет его помехоустойчивость.

Представляется важным отметить тот факт, что ни один из рассмотренных алгоритмов не в состоянии обеспечить адекватной развязки "своего" и "чужого" сигналов в системах С-І-С при наличии частотного сдвига между эхосигналом и вызвавшим его "своим" сигналом прямого направления передачи. Компенсация частотного сдвига в системах С-І-С представляет собой самостоятельную задачу, одно из возможных решений которой представлено на рис.2, где приняты следующие обозначения: Т – управляемая линия задержки; ИВЗ – измеритель времени "плоской" задержки; ИЧС – измеритель частотного сдвига.

Компенсация частотного сдвига реализуется квадратурным умножителем, а внесение в "свой" сигнал задержки, равной значению "плоской" задержки в тракте распространения сигнала, компенсирует ее влияние и обеспечивает возможность работы эхокомпенсационных алгоритмов только на значимом участке импульсной характеристики эхотракта.

Выводы

Подводя итог, можно сказать, что для технологии Carrier-in-Carrier наиболее рациональным выглядит

применение wRLS или взаимокорреляционного алгоритма. Взаимокорреляционный алгоритм выигрывает у wRLS в степени подавления эхосигналов, однако уступает в скорости сходимости. Кроме того, wRLS требует значительно более мощных вычислительных ресурсов.

Обработку сигналов эхокомпенсационными алгоритмами целесообразно проводить в базовой полосе сигнала с обязательной компенсацией частотного сдвига между эхосигналом и вызвавшим его сигналом прямого направления передачи. Внесение в "свой" сигнал задержки, равной значению "плоской" задержки в тракте распространения сигнала, обеспечивает возможность работы эхокомпенсационных алгоритмов только на значимом участке импульсной характеристики эхотракта, ускоряя сходимость алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Мусатова О.Ю., Шаврин С.С. Компактный алгоритм корреляционного эхокомпенсатора // Материалы тридцатой межрегиональной конференции "Обработка сигналов в системах телефонной связи и вещания". - М., 2004. С. 135.
2. Шаврин С.С. Организация дуплексного режима передачи информации по спутниковым стволам // Вестник связи. 2011. № 4. С. 36–37.
3. Душин С.В., Шаврин С.С. Сходимость корреляционного алгоритма адаптации // Вестник связи. 2013. № 1. С. 24–26.
4. Душин С.В., Шаврин С.С. Повышение помехоустойчивости взаимокорреляционного алгоритма подавления эхосигнала // Вестник связи. 2013. № 11. С. 45–48.
5. Душин С.В. Новый рекурсивный алгоритм адаптивной настройки механизмов компенсации эхосигналов: минимальная корреляция виртуальных сигналов // Материалы 19-й международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2017)" (ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова, 29–31 марта 2017 г.). - М., 2017. Т. 1. С. 126–131.
6. Душин С.В., Фархадов М.П., Шаврин С.С. Устойчивость адаптивных фильтров к непрерывным аддитивным помехам // Датчики и системы. 2019. № 1. С. 40–45.
7. Dushin S.V., Farkhadov M.P., Shavrin S.S. The adaptive filters immunity to additive noise and opposite direction signals in telecommunication systems // 24-th Finnish-Russian university cooperation in telecommunication (FRUCT). Moscow. 2019.

"Сарансккабель-Оптика" расширяет номенклатуру LAN-кабелей

Завод "Сарансккабель-Оптика" сообщил о начале выпуска новых конструкций LAN-кабелей.

Введенная в производство в начале 2019 года неэкранированная витая пара (кабель UTP) для внутренней прокладки с оболочкой из поливинилхлорида теперь дополнена конструкциями в оболочке, не распространяющими горение при групповой прокладке.

Возможно изготовление кабеля в двух видах оболочки: с индексом HF – не выделяющий коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении и с индексом LS – с пониженным дымо- и газовыделением, что позволяет применять их в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей, в том числе в многофункциональных высотных зданиях и бизнес-центрах.

Также заводом начато производство LAN-кабеля для внешней прокладки с оболочкой из светостабилизированного полиэтилена, устойчивой к низким температурам, обледенению и прямому воздействию солнечных лучей. Такой кабель предназначен для наружной прокладки в телефонной канализации, в коллекторах, шахтах, по стенам зданий.

По информации ООО "Сарансккабель-Оптика"

Tele2 проконсультирует абонентов в WhatsApp

Оператор Tele2 (ООО "Т2 Мобайл") запустил сервис для взаимодействия с клиентами в мессенджере WhatsApp. Первым регионом, где абоненты могут получить оперативную консультацию в самом популярном мессенджере в России, стал Ростов-на-Дону. До конца года обслуживание в WhatsApp станет доступно всем клиентам Tele2.

Новый сервис позволяет абонентам получать консультации и решать любые вопросы, связанные с использованием тарифов и услуг оператора. Поддержку клиентов в приложении ведут сотрудники контактного центра, прошедшие специальную программу обучения. Специалисты наделены расширенными полномочиями, что помогает им самостоятельно решать даже самые сложные проблемы абонентов.

В будущем Tele2 планирует расширить формат взаимодействия с клиентами в мессенджере и запустить чат-бот, который будет помогать абонентам проверить остаток на счете, сменить тариф, активировать или отключить услуги, а также найти адрес ближайшего салона связи.

По информации ООО "Т2 Мобайл"

GKO
САРАНСККАБЕЛЬ-ОПТИКА

- Входит в тройку лидеров производителей российского рынка
- Потенциал производства – 60 тыс. км кабеля в год
- Продукция одобрена крупнейшими энергетическими и телекоммуникационными компаниями России и СНГ

19 лет производства полного спектра волоконно-оптических кабелей связи для магистральных, внутризоновых и распределительных сетей

12 лет производства оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос

Огромный потенциал производства неизолированных проводов для ЛЭП

2019 год – старт производства кабелей связи симметричных – LAN-кабелей U/UTP Cat 5e

430001, РМ, г. Саранск, ул. Строительная, 3

Тел./факс: (8342) 47-38-13, 48-02-99

optic@sarko.ru
opgw@sarko.ru
lan@sarko.ru

www.sarko.ru