



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.322

ПОДАВЛЕНИЕ САМОИНТЕРФЕРЕНЦИИ: ВСЕСТОРОННИЙ ОБЗОР С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СХЕМ И ПОЛЕЙ

Палий А.В., Максимова С.М., Матыцин К.В.

Политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО "Донской государственный технический университет", Таганрог, Россия (347904, Ростовская область, город Таганрог, Петровская ул., д.109а), e-mail: matytsin2003@yandex.ru

Растущий спрос на более высокую эффективность использования спектра, особенно в условиях ограниченного пространства для чипов, базовых станций и транспортных средств, привел к развитию полнодуплексной связи, которая позволяет передавать и принимать сигнал одновременно на одной и той же частоте. Ключевой задачей в этой парадигме полнодуплексной связи является максимально возможное снижение самопомех, в идеале - до уровня шумов. В данной статье представлен полный обзор методов подавления самопомех (SIC) для систем связи, расположенных в одном месте, с точки зрения схем и полей.

Ключевые слова: Подавление помех; самопомехи; полнодуплексная связь.

SELF-INTERFERENCE SUPPRESSION: A COMPREHENSIVE REVIEW IN TERMS OF CIRCUITS AND FIELDS

Paliy A.V., Maksimova S.M., Matytsin K.V.

Polytechnic Institute (branch) of the Don State Technical University, Taganrog, Russia (347904, Rostov region, Taganrog, Petrovskaya street, 109a), e-mail: matytsin2003@yandex.ru

Increased demand for higher spectrum efficiency, especially in the space-limited chip, base station, and vehicle environments, has spawned the development of full-duplex communications, which enable the transmitting and receiving to occur simultaneously at the same frequency. The key challenge in this full-duplex communication paradigm is to reduce the self-interference as much as possible, ideally, down to the noise floor. This paper provides a comprehensive review of the self-interference cancellation (SIC) techniques for co-located communication systems from a circuits and fields perspective.

Keywords: Interference cancellation; self-interference; full-duplex communications.

Введение

С быстрым ростом современных систем беспроводной связи и технологий Интернета вещей беспроводные устройства становятся все более распространенными в настоящее время. Во многих ограниченных в пространстве платформах, таких как чипы, базовые станции и транспортные средства, потребность в достижении более высокой эффективности использования спектра и скорости передачи данных породила разработку интегрированных приемопередатчиков, которые позволяют осуществлять передачу и прием в совместно расположенной системе [1,2]. Полнодуплексная связь, как перспективный подход, обеспечивает новую парадигму для повышения эффективности использования спектра,

открывая возможность передавать и принимать сигналы в одном частотном диапазоне и временном интервале, и даже в условиях ограниченного пространства [3,4].

Ключевой задачей полнодуплексной связи является максимально возможное снижение самопомех, в идеале - до уровня шумового пола. В полнодуплексном трансивере мощный передаваемый сигнал распространяется в локальный приемник по прямому пути между передающей и приемной антеннами, а также по отраженным многопутевым каналам, создаваемым рассеянием передаваемого сигнала на близлежащих объектах. Эти передаваемые сигналы объединяются и модулируются на радиочастотном (РЧ) фронте местного приемника и становятся самоинтерференцией, которая в подавляющем большинстве случаев сильнее, чем интересующий сигнал (SoI) от удаленного передатчика. Сильные самопомехи будут мешать или даже насыщать приемную цепь, поэтому их необходимо подавить на радиочастотном фронте перед процессом квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [5].

1. Феномен и эффекты самоинтерференции

Помехи - это явление, когда принимаемые нежелательные сигналы нарушают работу системы связи. Растущая тенденция совместного использования нескольких операторов на общей площадке привела к серьезной проблеме помех. Сценарий совместного использования интегрированного приемопередатчика, содержащего мощные передатчики и приемник-жертву, показан на Рисунке 1.

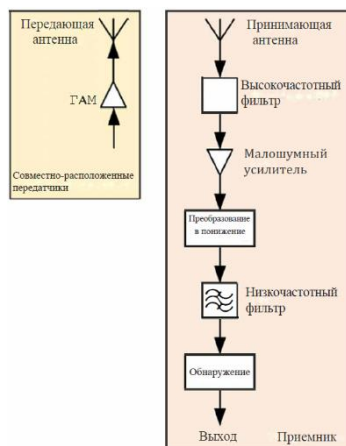


Рисунок 1 – Совместно расположенная система связи, включающая несколько передатчиков и приемник.

Приемная антенна устанавливается рядом с несколькими передающими антеннами, и в большинстве коммерческих объектов передающие антенны несут несколько каналов передачи. Эти передаваемые сигналы объединяются на радиочастотном фронте местного приемника и формируют самоинтерференцию, которая намного сильнее, чем SoI от удаленного передатчика. Поэтому приемник жертвы получает мощные сигналы помех, которые вызывают ряд искажений.

Во-первых, рассмотрим блокировку и десенсбилизацию. Десенсбилизация возникает, когда помехи достаточно велики, чтобы повлиять на величину покоя и малошумящий усилитель (МШУ) или смеситель в приемнике. Блокирование происходит, когда схемы приемника оказываются в насыщении под воздействием мощных сигналов помех, независимо от их несущей частоты [6].

Во-вторых, рассмотрим излученные искажения от совместно расположенных передатчиков. Они возникают, когда мощный сигнал от одного передатчика излучается во второй передатчик. Сигналы смешиваются в нелинейном выходном каскаде усилителя высокой мощности (НРА). Нежелательные продукты интермодуляции третьего порядка могут создавать помехи для близлежащих приемников, работающих на их частотах.

В-третьих, рассмотрим интермодуляционные (ИМ) искажения, которые генерируются в цепях переднего фронта приемника жертвы. Большие передаваемые сигналы от расположенных рядом передатчиков объединяются в приемнике жертвы и таким образом формируют искажения ИМ. Это становится серьезным, когда оно попадает непосредственно в полосу частот SoI. МШУ наиболее восприимчив к сигналам помех.

Искажения, возникающие в приемнике, хорошо изучены и моделируются точкой перехвата третьего порядка приемника. Оно может легко повлиять на активные устройства, такие как МШУ или смеситель, особенно если оно попадает в канал SoI. Блокирование не требует, чтобы передатчики помехи работали на определенных частотах, но может быть вызвано всего одним мощным передатчиком. Таким образом, для смягчения сигнала помехи и защиты приемника от ухудшения характеристик или даже повреждения следует внедрить методы SIC.

2. SIC с помощью аналоговых и цифровых схем

2.1. Аналоговый SIC

Среди всех методов SIC аналоговая SIC была широко признана как одна из наиболее эффективных опубликованных схем, поскольку она особенно важна для предотвращения насыщения АЦП [7]. Типичная аналоговая система подавления самопомех (SICS) показана на рисунке 2 [7]. Передаваемый сигнал на входе передающей антенны дискретизируется и используется в качестве опорного сигнала. Опорный сигнал задерживается и умножается на усиленные и зацикленные остаточные самопомехи с помощью векторного модулятора. Произведение остаточного сигнала самопомех и задержанного опорного сигнала самопомех затем фильтруется парой фильтров низких частот (ФНЧ) для обновления комплексного весового коэффициента, который, в свою очередь, изменяет задержанный опорный сигнал на векторном модуляторе. Синтезированный сигнал отмены получается путем объединения выходного сигнала SICS и принятого сигнала приемной антенны. После отмены остаточные самопомехи усиливаются МШУ.

Представленная топология с одним ответвителем, показанная на Рисунке 2, подходит для подавления узкополосных помех.

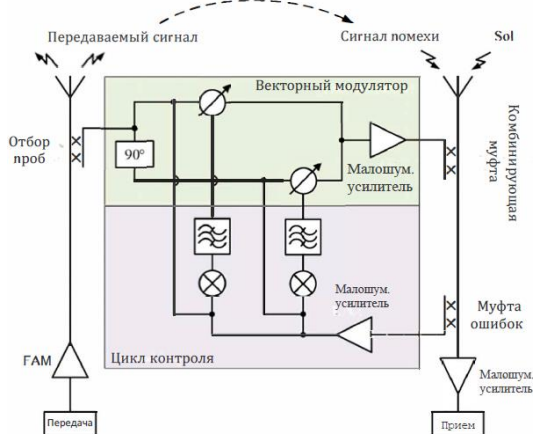


Рисунок 2 – Типичная топология цифровой SIC

Было показано, что методы подавления, использующие одноцелевую структуру, могут работать только в узкой мгновенной полосе пропускания и по своей природе не могут учитывать пути отражения от окружающей среды [8]. Для достижения широкополосного подавления помех необходимо включить многозахватную конфигурацию для имитации реалистичного канала помех, которая учитывает многопутевые эффекты [4,9]. Многозаярная конструкция в [9] пропускает связанный радиочастотный сигнал через более сложную схему, состоящую из 16 параллельных фиксированных линий с различными задержками и перестраиваемыми аттенюаторами, чтобы восстановить многолучевой сигнал самопомех. Однако этот метод значительно увеличивает сложность аппаратного проектирования и требует сложных алгоритмов настройки затухания вместо более общих подходов градиентного спуска [4]. Другие различные аспекты аналогового SIC были изучены многими другими исследователями, с точки зрения стратегии согласования, границы производительности [10] и производительности SIC в сложных условиях, т.е. эффекты Доплера, эффекты замирания канала и эффекты нелинейных искажений [11]. Все эти исследования с различных точек зрения формируют относительно зрелую структуру исследований аналоговых SIC по сравнению с цифровыми и гибридными подходами.

2.2. Цифровая SIC

Аннулирование, которое происходит в цифровой области после того, как принятый сигнал был квантован АЦП, называется SIC в цифровой области. В [12] приведены примеры полнодуплексных систем, в которых была реализована цифро-доменная SIC. Типичная цифровая СИИ показана на Рисунке 3[13].

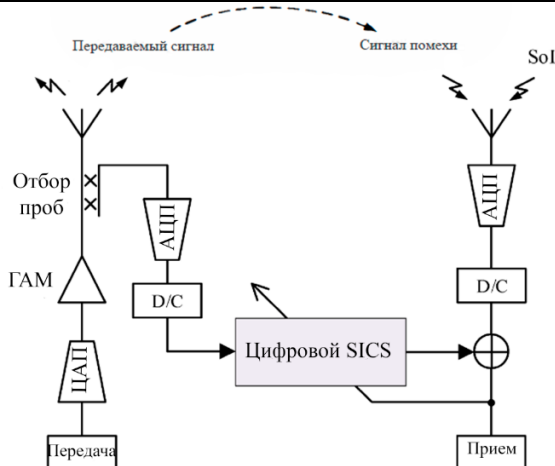


Рисунок 3 – Типичная топология аналоговой SIC

Как дискретизированный опорный сигнал самопомех, так и принятый сигнал приемника преобразуются в цифровой сигнал с помощью АЦП и понижающего преобразователя. Эквивалентный дискретно-временной канал связи оценивается для восстановления цифрового сигнала самопомех. Затем восстановленный сигнал самопомех вычитается из цифрового принятого сигнала.

Учитывая, что процесс подавления выполняется в цифровой области, цифровые методы SIC являются одними из наименее сложных среди всех активных методов подавления [14]. Цифровой НИЦ выполняется после АЦП, и можно использовать множество высокоэффективных алгоритмов цифровой обработки сигналов, что дает больше степеней свободы при проектировании НИЦ. Однако, как упоминалось выше, когда мощность помех слишком велика и насыщает передний фронт приемника, эффективность подавления помех цифровым SIC значительно снижается. Аналоговый SIC может решить эту проблему. Однако эффективность подавления аналогового SIC обычно зависит от точности блока задержки и аттенюатора векторного модулятора. В результате цифровая СЦИ обычно реализуется вместе с аналоговой СЦИ, т.е. сначала сильные самопомехи подавляются аналоговой СЦИ, а остаточные самопомехи затем устраняются цифровой СЦИ [15], см. Рисунок 4.

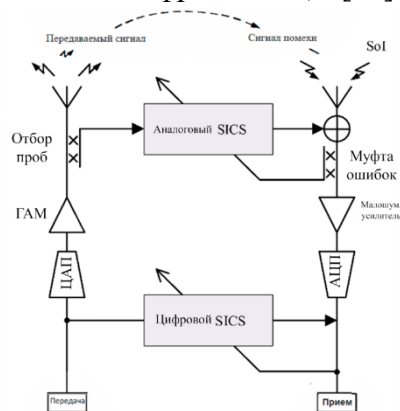


Рисунок 4 – Двухступенчатая топология SIC, которая содержит как аналоговый SIC, так и цифровой SIC.

2.3. Аналого-цифровая гибридная СИ

Как обсуждалось выше, аналоговый СИ способен подавить мощный СИ, в то время как цифровой СИ позволяет использовать более сложный адаптивный алгоритм. Вполне последовательная идея - объединить преимущества обоих методов. Таким образом, предлагается аналого-цифровой гибридный СИ. Этот подход осуществляется путем создания цифровой копии сигнала самопомех из сигнала, передаваемого по базовой полосе, а затем передачи цифровой копии через вспомогательную аналоговую цепь передачи для восстановления радиочастотного сигнала самопомех [16,17,18]. В этом подходе фильтр с конечным импульсным откликом реализуется в цифровой области для определения характеристик канала распространения самопомех с целью генерирования восстановленного сигнала самопомех с многолучевыми компонентами.

Типичная аналого-цифровая гибридная конфигурация показана на Рисунке 5.

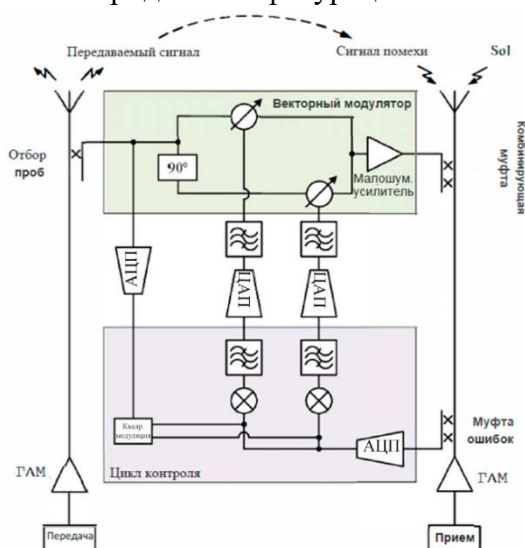


Рисунок 5 – Типичная аналого-цифровая гибридная топология СИ

Высокоскоростные АЦП используются для прямой выборки сигнала самопомех и сигнала обратной связи по ошибке. Таким образом, контур управления реализуется в цифровой области, а затем подключается к аналоговому векторному модулятору с помощью цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Таким образом, алгоритм адаптивного управления СИ может быть реализован в цифровых схемах, что позволяет получить более эффективный, сложный и высокопроизводительный алгоритм.

3. НИЦ в области полей

3.1. Механизм работы СОБД

Большинство предыдущих SICS реализовано в схемотехнической области с помощью аналоговых или цифровых подходов. Преимущество этого метода заключается в том, что можно получить высокий ICR. Однако CDSIC является сложным и дорогостоящим, поскольку многие основные компоненты являются обязательными, такие как дискретизирующий соединитель, векторный модулятор и объединяющий соединитель. По сравнению с CDSIC, FDSIC обычно имеет более простую структуру.

Механизм работы FDSIC показан на Рисунке 6.

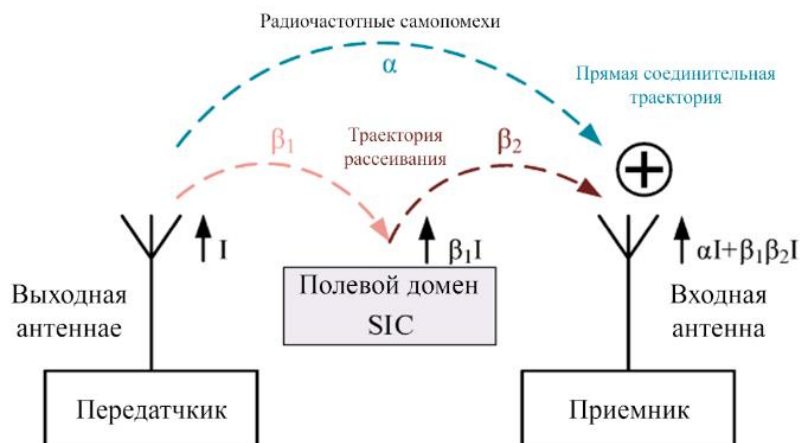


Рисунок 6 – Механизм работы FDSIC

Ток, возбуждаемый в передающей антенне, описывается I . Через прямой путь связи на приемной антенне индуцируется ток αI , где α - коэффициент связи. При добавлении системы FDSIC возникает новая ситуация, ситуация связи которой может быть рассчитана до первого порядка. Ток $\beta_1 I$ теперь также индуцируется в системе FDSIC, создавая, в свою очередь, индуцированный ток $\beta_1 \beta_2 I$ в приемной антенне, где β_1 - коэффициент связи между передающей антенной и системой FDSIC, а β_2 - коэффициент связи между системой FDSIC и приемной антенной. Общий наведенный ток в приемной антенне составляет $\alpha I + \beta_1 \beta_2 I$. При правильном проектировании системы FDSIC система FDSIC создает обратную связь, что означает, что общий наведенный ток приближается к нулю:

$$\alpha I + \beta_1 \beta_2 I = 0 \quad (1)$$

Самоинтерференция отменяется в полевой области подобным образом. По сути, система FDSIC разработана с рассеивателем, который может генерировать богатые характеристики рассеяния для восстановления копии СИ.

Выводы

1. Заключительные замечания

В данной статье представлен всесторонний обзор технологии SIC для интегрированных приемопередатчиков с точки зрения схем и областей применения. Было показано, что производительность приемников ухудшается из-за блокировки или искажений при наличии расположенных рядом передатчиков. Для того чтобы защитить приемник и улучшить производительность системы, необходимы методы SIC. В соответствии с методами восстановления и вычитания копии сигнала самопомех, SIC можно классифицировать как CDSIC или FDSIC. Первые могут быть далее разделены на аналоговые SIC и цифровые SIC. CDSIC и FDSIC имеют одинаковый базовый механизм работы, однако стратегии проектирования и подходы к реализации отличаются. В реальных приложениях реализация методов SIC зависит от конкретных сценариев и целевых требований. Аналоговый способ особенно важен для предотвращения насыщения АЦП. Однако реализация SIC в аналоговой области обычно сложна и очень трудна, поэтому аналоговый CDSIC обычно выбирается, когда самопомехи сильны и требуется высокий ICR. В отличие от аналогового CDSIC, цифровой

CDSIC работает с сигналами самопомех в цифровой области, после того как сигнал самопомех был квантован АЦП. Цифровой метод CDSIC имеет меньшую сложность по сравнению с аналоговым подходом, и многие высокопроизводительные алгоритмы SIC могут быть легко реализованы. Однако этот метод всегда ограничен производительностью аппаратуры. Для снижения мощности собственных помех ниже уровня шума обычно используется двухступенчатое подавление помех, которое объединяет аналоговый и цифровой CDSIC. Высокий ICR может быть получен, если сильные самопомехи сначала подавляются аналоговым подавителем, а остаточные помехи затем подавляются цифровым подавителем. Однако, очевидно, что такой способ подавления очень сложен. FDSIC имеет гораздо более простую структуру, чем CDSIC, поскольку дискретизирующая муфта находится на стороне передатчика, а объединяющая муфта на стороне приемника может быть опущена. Более того, мощность передаваемого сигнала и принимаемого SoI не будут ослаблены при реализации FDSIC. Хотя диаграмма направленности излучения будет изменена, FDSIC подходит для сценариев применения, в которых стоимость и сложность строго ограничены.

2. Прогнозы на будущее

В настоящее время искусственный интеллект (ИИ), как перспективный метод, привлекает большое внимание и играет очень важную роль как для обработки сигналов, так и для электромагнитных конструкций. Он также обладает большим потенциалом для будущего проектирования SIC в двух аспектах: (1) высокопроизводительный алгоритм на основе ИИ для обработки сигналов SIC и (2) автоматическое проектирование топологии SIC на основе ИИ [21]. Для первого аспекта необходимы более эффективные модели цифрового подавителя с меньшим количеством параметров и алгоритмы оптимизации с низкой сложностью, что послужит толчком к применению подходов ИИ. Для второго аспекта выгодно предложить общий метод SIC для различных конфигураций, обслуживающих сложные приложения, не требующий большого опыта от разработчиков. Кроме того, идея объединения концепции ИИ и методов SIC может быть распространена на другие приложения, такие как SIC без ссылок.

Работа выполнена под научным руководством к.т.н., доцента Палия А.В.

Список литературы

1. Lu, J.; Zhang, Q.; Shi, W.; Zhang, L.; Shi, J. Robust Adaptive Filtering Algorithm for Self-Interference Cancellation with Impulsive Noise. *Электроника* 2021, 10, С.196.
2. Эршади А., Энтесари К. Полнодуплексный смесительный приемник на 0,5-3,5 ГГц с декартовым синтезированным интерфейсом подавления самопомех в 65-нм КМОП. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2020, 68, С.1995-2010.
3. Наваз Х., Шоаиб Н., Ниази А.У., Чодри С.М. Компактная бистатическая антенная система с очень высокой межпортовой изоляцией для полнодуплексных приложений в диапазоне 2,4 ГГц. *Int. J. Antennas Propag.* 2021, 2021, 8855726.
4. Колодзей К.Е., МакМайкл Дж.Г., Перри Б.Т. Многокаскадный РЧ-канселлер для внутрисполосной полнодуплексной беспроводной связи. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2019, 15, С.4321-4334.
5. Гаван Дж.Дж., Шульман М.Б. Влияние десенсбилизации на производительность мобильных радиосистем, часть I: Количественный анализ. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, VT-33, С.285-290.

6. Li, W.; Zhao, Z.; Tang, J.; He, F.; Li, Y.; Xiao, H. Анализ производительности и оптимальная конструкция адаптивной системы подавления помех. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2019, 55, С.1068-1075.
7. Рагхаван А., Гебара Е., Тенцерис Е.М., Ласкар Ж. Анализ и проектирование подавителя помех для расположенных радиостанций. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2021, 53, С.3498-3508.
8. Бхарадия Д., Макмилиан Е., Катти С. Полнодуплексные радиостанции. В материалах конференции ACM SIGCOMM 2013, Гонконг, Китай, 12-16 августа 2022 г.; стр. 375-386.
9. Le, A.T.; Tran, L.C.; Huang, X.; Gou, Y.J.; Vardaxoglou, J.C. Характеристика в частотной области и границы производительности петли ALMS для подавления радиочастотных самопомех. *IEEE Trans. Commun.* 2019, 67, С.682-692.
10. Ma, M.; Huang, X.; Gou, Y.J. Техника самоподавления помех для систем SC-FDMA. *IEEE Commun. Lett.* 2018, 14, С.512-514.
11. Choi, J.I.; Jain, M.; Srinivasan, K.; Levis, P.; Katti, S. Achieving single channel, full duplex wireless communications. Труды Шестнадцатой ежегодной международной конференции по мобильным вычислениям и сетям, Чикаго, ИЛ, США, 20-24 сентября 2019 г.; С.1-12.
12. Шен, Л.; Хенсон, Б.; Захаров, Ю.; Митчелл, П. Цифровое подавление самоинтерференции для полнодуплексных подводных акустических систем. *IEEE Trans. Circuits Syst.-II Express Briefs* 2020, 67, С.192-196.
13. Масмуди А., Ле-Нгок Т. Оценка канала и подавление самопомех в полнодуплексных системах связи. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018, 66, С.321-334.
14. Ge, S.; Xing, J.; Liu, Y.; Liu, H.; Meng, J. Двухступенчатый подавитель радиопомех для широкополосных приемников прямого преобразования с использованием уменьшенной цепи наблюдения. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2020, 62, С.923-932.
15. Лю, Й.; Роблин, П.; Куан, Х.; Пан, В.; Шао, С.; Тан, Й. Полнодуплексный приемопередатчик с двухступенчатым аналоговым подавлением многоканальных самопомех. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2019, 65, С.5263-5273.
16. Лю, Й.; Куан, Х.; Пан, В.; Танг, Й. Цифровое аналоговое подавление помех для внутриполосных полнодуплексных радиостанций. *IEEE Commun. Lett.* 2021, 21, С.1079-1082
17. Xing, J.; Ge, S.; Liu, Y.; Cui, Z.; Meng, J. Всесторонний анализ эффектов квантования в адаптивной системе подавления самопомех с цифровым управлением. *IEEE Access* 2020, 8, С.75772-75784.
18. Zhang, Y.; Zhang, S.; Li, J.; Pedersen, G.F. Метод развязки на основе линии передачи для антенных решеток ММО. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, С.3117-3131.
19. Chaudhary, G.; Jeong, J.; Jeong, Y. Дифференциальная антенна с высоким уровнем подавления самопомех для внутриполосной полнодуплексной системы связи. *IEEE Access* 2019, 7, С.45340-45348.
20. Zhang, J.; Akinsolu, M.O.; Liu, B.; Vandenbosch, G.A.E. Автоматическое проектирование топологий уменьшения взаимной связи для частотно-реконфигурируемых антенных решеток, управляемое ИИ. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2021, 69, С.1831-1836.

References

1. Lu, J.; Zhang, Q.; Shi, W.; Zhang, L.; Shi, J. Robust Adaptive Filtering Algorithm for Self-Interference Cancellation with Impulsive Noise. *Electronics* 2021, 10, pp.196.
2. Ershadi A., Entesari K. 0.5-3.5 GHz full duplex mixing receiver with Cartesian synthesized self-noise cancellation interface in 65nm CMOS. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2020, 68, pp.1995-2010.
3. Nawaz H., Shoaib N., Niazi A.U., Chaudhry S.M. Compact bistatic antenna system with very high port-to-port isolation for full duplex applications in the 2.4 GHz band. *Int. J. Antennas Propag.* 2021, 2021, pp.8855726.
4. Kolodzei K.E., McMichael J.G., Perry B.T. Multistage RF Canceller for in-band full duplex wireless communications. *IEEE Trans. wirel. commun.* 2019, 15, pp.4321-4334.
5. Gavan J.J., Shulman M.B. Impact of desensitization on the performance of mobile radio systems, part I: Quantitative analysis. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, VT-33, pp.285-290.
6. Li, W.; Zhao, Z.; Tang, J.; He, F.; Li, Y.; Xiao, H. Performance Analysis and Optimal Design of an Adaptive Noise Cancellation System. *IEEE Trans. electromagn. Compat.* 2019, 55, pp.1068-1075.
7. Raghavan A., Gebara E., Tenzeris E.M., Laskar J. Analysis and design of an interference suppressor for located radio stations. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2021, 53, pp.3498-3508.
8. Bharadiya D., McMillin E., Katty S. Full duplex radios. In *Proceedings of ACM SIGCOMM 2013, Hong Kong, China, August 12-16, 2012*; pp. 375-386.
9. Le, A.T.; Tran, L.C.; Huang, X.; Gou, Y.J.; Vardaxoglou, J.C. Frequency domain response and performance limits of an ALMS loop for RF self-interference suppression. *IEEE Trans. commun.* 2019, 67, pp.682-692.
10. Ma, M.; Huang, X.; Gou, Y.J. Self-interference suppression technique for SC-FDMA systems. *IEEE Commun. Lett.* 2018, 14, pp.512-514.
11. Choi, J.I.; Jain, M.; Srinivasan, K.; Levis, P.; Katti, S. Achieving single channel, full duplex wireless communications. *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Chicago, IL, USA, September 20-24, 2019*; pp. 1-12.
12. Shen, L.; Henson, B.; Zakharov, Yu.; Mitchell, P. Digital self-interference suppression for full-duplex underwater acoustic systems. *IEEE Trans. Circuits Syst.-II Express Briefs* 2020, 67, pp.192-196.
13. Masmoudi A., Le-Ngoc T. Channel Estimation and Self-Interference Suppression in Full Duplex Communication Systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018, 66, pp.321-334.
14. Ge, S.; Xing, J.; Liu, Y.; Liu, H.; Meng, J. Two-stage radio interference suppressor for broadband direct conversion receivers using a reduced surveillance chain. *IEEE Trans. electromagn. Compat.* 2020, 62, pp.923-932.
15. Liu, Y.; Roblin, P.; Quan, X.; Pan, W.; Shao, S.; Tan, Y. Full duplex transceiver with two-stage analog multichannel self-interference suppression. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2019, 65, pp.5263-5273.
16. Liu, Y.; Quan, X.; Pan, W.; Tang, Y. Digital analog interference suppression for in-band full duplex radios. *IEEE Commun. Lett.* 2021, 21, pp.1079-1082

17. Xing, J.; Ge, S.; Liu, Y.; Cui, Z.; Meng, J. Comprehensive analysis of quantization effects in a digitally controlled adaptive self-noise cancellation system. *IEEE Access* 2020, 8, pp.75772-75784.
 18. Zhang, Y.; Zhang, S.; Li, J.; Pedersen, G.F. Transmission line-based decoupling method for MIMO antenna arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, pp.3117-3131.
 19. Chaudhary, G.; Jeong, J.; Jeong, Y. High noise suppression differential antenna for in-band full duplex communication system. *IEEE Access* 2019, 7, pp.45340-45348.
 20. Zhang, J.; Akinsolu, M. O.; Liu, B.; Vandenbosch, G.A.E. AI-driven automated design of coupling reduction topologies for frequency-reconfigurable antenna arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2021, 69, pp.1831-1836.
-