

Методы аналоговой и цифровой компенсации мощных детерминированных помех в приемных трактах

А.А. Суханов, М.И. Ярославский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: Рассмотрены основные методы компенсации мощных интерференционных помех детерминированного типа в широкополосных приемных трактах радиотехнических устройств СВЧ-диапазона, их преимущества, недостатки, а также особенности применения. Представлены результаты сравнительного анализа. Показана целесообразность использования гибридных архитектур для комплексного подавления мощных детерминированных помех в приемных трактах.

Ключевые слова: интерференционная помеха, компенсация помех, цифровая обработка, аналоговая обработка

1. Введение

При использовании различных приемо-передающих устройств (ППУ), рассчитанных на работу в широкой полосе частот, может возникнуть ситуация, когда на входе приемного тракта наблюдается мощный сигнал помехи (например, из-за недостаточной развязки между каналами приема и передачи), способный вывести малошумящий усилитель (МШУ) из строя, либо ввести его в нелинейный режим работы, что в свою очередь приводит к резкому ухудшению характеристик всего ППУ в целом. Нелинейность работы МШУ может приводить к возникновению на его выходе паразитных спектральных составляющих, в ряде случаев попадающих в пределы рабочей полосы частот приемника и, как следствие, выступающих в качестве побочных каналов приема на этапе преобразования частоты. Подобное обстоятельство неизбежно приводит к ухудшению динамического диапазона приемного тракта, росту вероятности битовой ошибки и снижению помехоустойчивости приема [1].

Следует отметить, что в качестве мощных интерференционных помех в ППУ могут выступать: 1) сигналы передающей части устройства с полосой частот, располагающейся в непосредственной близости от рабочего диапазона приемника; 2) сигналы, излучаемые передатчиком на частотах, точно попадающих в диапазон работы приемного тракта; 3) «шумовая юбка» передатчика, представляющая собой значительный по уровню внеполосный шум, в некоторых случаях попадающий в рабочую полосу частот приемника [2-5].

Одним из традиционно используемых методов решения указанной проблемы является применение в ППУ входных цепей фильтрации, состоящих из полосовых и/или режекторных фильтров. Однако в подавляющем большинстве случаев такие фильтры не обеспечивают перестройку своей рабочей полосы, что приводит к необходимости использования нескольких цепей фильтрации, усложнению ППУ из-за введения дополнительной системы коммутации и увеличению их габаритов.

Кроме этого, указанные фильтры, а именно фильтры, характеризующиеся сравнительно большими (не менее 1000) значениями добротности, могут обладать не только значительными геометрическими размерами, но и характеризоваться достаточно большими (до нескольких единиц и десятков дБ) потерями в пределах полосы пропускания. Фильтры же с низким коэффициентом прямоугольности часто

не обеспечивают требуемого подавления внеполосного излучения [6-7].

Другим распространенным и часто используемым способом борьбы с интерференционными помехами в ППУ является разделение каналов приема и передачи по частоте (Frequency Division Duplexing – FDD) или во времени (Time Division Duplexing – TDD). При этом сигнал передатчика не обрабатывается приемным устройством, что обеспечивает отсутствие возможных ошибок из-за влияния передатчика. Однако в то же время использование подобного метода приводит к ухудшению одной из ключевых характеристик радиотехнических систем, а именно удельной скорости передачи информации на единицу полосы [1-5].

Поэтому исследование иных способов решения проблемы влияния передающей части ППУ на его приемный тракт является актуальной и практически значимой задачей.

В данной работе рассмотрены основные методы компенсации мощных интерференционных помех детерминированного типа в широкополосных приемных трактах радиотехнических устройств СВЧ-диапазона, их преимущества, недостатки, а также особенности применения. Представлены результаты сравнительного анализа. Показана целесообразность использования гибридных архитектур для комплексного подавления мощных детерминированных помех в приемных трактах.

2. Основные принципы подавления помех

Используемые в настоящее время методы снижения влияния помех (помимо рассмотренных ранее) можно разделить на три категории:

- Пассивная (пространственная) развязка, предполагающая позиционное разнесение приемника и передатчика, обеспечение развязки между приемной и передающей антеннами, а также использование циркуляторов в ППУ с одной антенной.
- Аналоговая компенсация (Analog Self-Interference Cancellation – ASIC), осуществляющая подавление сигнала помехи в приемном тракте до аналого-цифрового преобразователя (АЦП).
- Цифровая компенсация (Digital Self-interference Cancellation – DSIC), обеспечивающая подавление сигнала помехи в тракте после АЦП.

В ряде случаев пространственное разнесение приемника и передатчика не может быть реализовано вследствие необходимости их расположения в непосредственной близости друг от друга (например, в составе небольшого бортового ППУ). Конечной развязки антенн или циркулятора может оказаться недостаточно для обеспечения защиты приемного тракта ППУ от воздействия передаваемого сигнала [8]. Как следствие, в рассматриваемых случаях пассивная развязка может использоваться лишь как дополнительный метод подавления помех.

3. Цифровые методы компенсации интерференционных помех в радиочастотном тракте

Цифровые методы компенсации оперируют оцифрованными данными и реализуются на программном уровне. Выделяют следующие основные виды цифровой компенсации:

- **Метод адаптивной оценки канала** предполагает использование таких алгоритмов, как LMS, RLS и др. [2, 9-10] или глубокого обучения и искусственных нейронных сетей [11-12] для оценки помехи на основе переданных данных. Основным преимуществом данного способа является высокая гибкость, обеспечиваемая программной настройкой параметров. Однако в то же время может наблюдаться ограничение динамического диапазона устройства.

- **Метод обработки огибающей**, предполагающий подавление помехи на основе анализа низкочастотных характеристик сигнала [9]. Основным достоинством является сравнительно малая вычислительная сложность, а недостатком – низкая эффективность применительно к сложным видам модуляции, а также зависимость степени подавления помех от динамического диапазона аналоговой части.

Иными словами, цифровые методы компенсации целесообразно использовать в качестве инструмента более точной компенсации малых помех. Однако они оказываются неэффективными в случае физического насыщения входного тракта.

4. Аналоговые методы компенсации интерференционных помех в радиочастотном тракте

Основным преимуществом аналоговой компенсации помех (по сравнению с цифровыми методами) является защита компонентов приемного тракта от насыщения и, как следствие, от появления нелинейных искажений в приемном тракте радиотехнических устройств.

Выделяют следующие методы аналоговой компенсации:

- **Компенсация с использованием дополнительного передатчика** [13] для формирования копии сигнала помехи, сдвинутого по фазе на 180° . Из очевидных достоинств можно отметить сравнительно высокую точность имитации сигнала помехи с учетом его распространения при использовании узкополосных сигналов. Среди недостатков ключевую роль играют сложность синхронизации, а также требования к оборудованию, необходимому для калибровки системы, генерации копии сигнала помехи и расчета передаточной характеристики канала распространения.
- **Компенсация с ответвлением мощности и использованием элементов рассогласования** [8, 14] предполагает ответвление части сигнала из тракта передачи, дальнейшее преобразование его уровня с помощью аттенуаторов и сдвига по фазе с использованием линий задержки, а также применение элементов рассогласования для устранения помеховых составляющих, вызванных отражением от антенны или утечкой сигнала через циркулятор в составе ППУ с одной антенной. Преимуществом является высокая надежность схемы компенсации, а также ее сравнительно низкое энергопотребление. Основными недостатками являются сложность подбора параметров в широкой рабочей полосе частот и существенный уровень вносимых потерь.
- **Компенсация с преобразованием частоты** предполагает подавление помехи в тракте промежуточной частоты (ПЧ) [15]. Достоинством данной схемы является ее сравнительная простота вследствие работы на ПЧ, а недостатком – отсутствие защиты МШУ или смесителя приемного тракта от помехи.

Аналоговые методы компенсации эффективны для защиты МШУ и прочих нелинейных элементов тракта, но в то же время ограничены по точности компенсации вследствие разброса значений компонентов тракта.

В таблице 1 приведены типичные значения частотных характеристик указанных методов и реализуемый уровень подавления помех.

Таблица 1. Характеристики методов компенсации помех

Компенсация	Метод	Несущая частота, ГГц	Рабочая полоса частот, МГц / %	Уровень подавления помехи, дБ	Источник
Цифровая	–	2.46	2.5 / 0.1	34	[9]

Аналоговая	С использованием дополнительного передатчика	2.4	20 / 0.83	20-30	[13]
	С ответвлением мощности и использованием элементов рассогласования	2.4	20 / 0.83	73-85	[8]
	С преобразованием частоты	1-2	20 / 1	30-40	[15]

Наибольший уровень подавления помехи (до 85 дБ) достигается при аналоговой компенсации за счет подавления помехи до активных каскадов усиления, что предотвращает насыщение приемника и защищает его от физического повреждения мощным сигналом. В отличие от цифровых методов, эффективность которых ограничена динамическим диапазоном приемного тракта, аналоговая компенсация позволяет работать с сигналами более высокой мощности, обеспечивая защиту входного тракта до этапа аналого-цифрового преобразования.

В качестве примера на рисунках 1–2 приведены 2 схемы аналоговой компенсации помех.

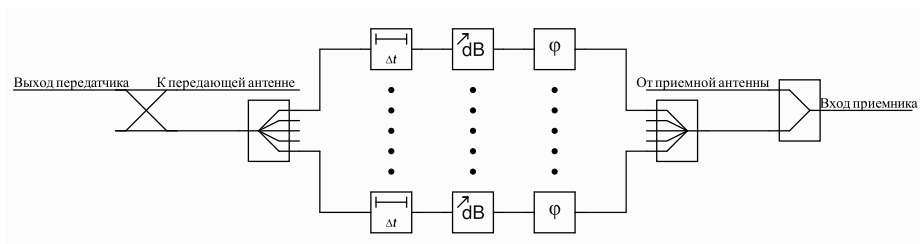


Рисунок 1. Структурная схема системы компенсации помех с ответвлением мощности

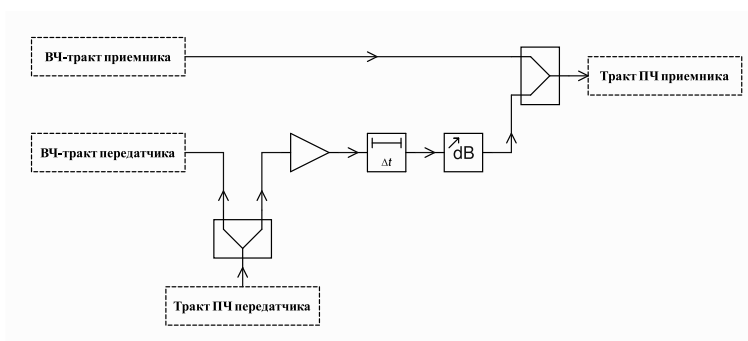


Рисунок 2. Структурная схема приемопередатчика с блоком компенсации на ПЧ

Видно, что схема, приведенная на рисунке 1, подразумевает применение ответвленной копии сигнала передатчика для ее последующей подстройки и вычитания из смеси принимаемого сигнала и помехи, тогда как схема на рисунке 2 предполагает использование копии передаваемого сигнала на ПЧ для компенсации помехи именно в тракте ПЧ.

Разветвление сигнала в схеме на рисунке 1 используется для более точной имитации многлучевого распространения сигнала и переотражения сигнала помехи от объектов окружающей среды за счет перестройки аттенуаторов и элементов задержки. Количество ветвей вариативно и меняется в зависимости от потребностей учета распространения сигнала в окружающей среде.

Схема компенсации на ПЧ имеет схожую структуру, однако сигнал ответвляется и обрабатывается в тракте ПЧ. Это позволяет использовать методы компенсации на фиксированной промежуточной частоте с сохранением возможности изменять рабочую частоту ППУ.

6. Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что использование по отдельности рассмотренных методов компенсации в ряде случаев не обеспечивает достаточной защиты приемника от мощных детерминированных помех в режиме полного дуплекса. Наиболее эффективным решением с точки зрения подавления помех собственного передатчика представляется гибридная архитектура, где аналоговая часть (ASIC) подавляет мощные помехи передатчика и защищает МШУ от насыщения и генерации комбинационных составляющих, а цифровая часть (DSIC) осуществляет окончательную компенсацию и устранение нелинейных артефактов, не влияющих непосредственно на искажения сигнала до АЦП.

Список литературы

1. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Wang Y. et al. A Full-Duplex 60 GHz Transceiver with Digital Self-Interference Cancellation // *Electronics*. – 2024. – Т. 13. – №. 3. – С. 483.
3. Sarret M. G. et al. Analyzing the potential of full duplex in 5G ultra-dense small cell networks // *J Wireless Com Network*. – 2016. – Т. 2016. – С. 284.
4. Brand J. Self-Interference Cancellation for Co-Located TDD Radios Sharing the Same Band. – *Kumu Networks*, 2020.
5. Sen P. et al. Joint Communication and Radar Sensing: RF Hardware Opportunities and Challenges—A Circuits and Systems Perspective // *Sensors*. – 2023. – Т. 23. – №. 17. – С. 7673.
6. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М. : Связь, 1971.
7. Hunter I. C. Theory and Design of Microwave Filters. – IET, 2001. – Т. 39.
8. Raro R. V. C. et al. Analog Domain Cancellation in Hybrid Self-Interference Cancellers for In-Band Full-Duplex Radios // *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. – 2019. – С. 646-648.
9. Liu X., Xue Y., Sun H. Analog Domain Self-Interference Cancellation Method Based on Digital Aided Processing // *2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. – 2020. – С. 1256-1260.
10. Ayesha A. et al. On Self-Interference Cancellation and Non-Idealities Suppression in Full-Duplex Radio Transceivers // *Mathematics*. – 2021. – Т. 9. – №. 12. – С. 1434.
11. Guo H. et al. DSIC: Deep Learning Based Self-Interference Cancellation for In-Band Full Duplex Wireless // *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. – 2019. – С. 1-6.
12. Ding J., Wang Y. WiFi CSI-Based Human Activity Recognition Using Deep Recurrent Neural Network // *IEEE Access*. – 2019. – Т. 7. – С. 174257-174269.
13. Ozan S. et al. Analog Self-Interference Cancellation By Means of a Synchronised Signal Injection // *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. – 2024. – С. 1-3.
14. Huusari T. et al. Wideband Self-Adaptive RF Cancellation Circuit for Full-Duplex Radio: Operating Principle and Measurements // *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. – 2015. – С. 1-7.
15. Matsumura T., Kojima F. Prototype of Analog Self-interference Cancellation based on Super-heterodyne Architecture for In-band Full-duplex Cellular System // *2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. – 2020. – С. 1-5.