СПОСОБ РАДИКАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ РАДИОЦЕНТРАХ

В.Л. Хазан¹, А.Н. Юрьев²

¹*Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация*

²*Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация*

Рассмотрен радикальный способ решения проблемы электромагнитной совместимости приемопередающих центров, который заключается в том, что режимы «передача – прием» периодически чередуются. Этот способ имеет определенные особенности и позволяет полностью реализовать чувствительность радиоприемных устройств в моменты времени, когда передатчики не излучают сигнал. Описаны особенности функционирования канала связи при периодическом переключении режимов «передача – прием» как в случае голосовой связи, так и при передаче телеграфных сообщений в прямом и обратном направлениях.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, разнесение по времени, аналоговая телефония, цифровая телефония, телеграфная связь, прямой канал связи, обратный канал связи.

THE WAY FOR A RADICAL SOLUTION ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY PROBLEMS FOR PREMO AND TRANSMITTING RADIO CENTERS

V.L. Khazan¹, A.N. Yuryev²

¹*Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation*

²*Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation*

The report considers a radical solution to the problem of electromagnetic compatibility of the receiving and transmitting centers, consists in the fact that the "transmission - reception" modes periodically alternate. This method has certain features and allows you to fully realize the sensitivity of radio receivers at times when the transmitters do not emit a signal. The report describes the features of the communication channel with periodic switching modes "transmission – reception" in the case of voice communication, and the transmission of Telegraph messages in the forward and reverse directions.

Keywords: electromagnetic compatibility, time separation, analog telephony, digital telephony, telegraphic communication, direct communication channel, reverse communication channel.

Традиционно для обеспечения в радиолинии дуплексной работы в ней организуют два канала, имеющих разнос рабочих частот, позволяющий передавать сигналы во взаимно противоположных направлениях. В ДКМ системах связи для устранения влияния излучений передатчика на собственный приемник и реализации дуплексного режима работы помимо частотного разнесения организуется либо пространственное разнесение приемного и передающего устройств радиоузла, либо пространственное разнесение приемной и передающей антенн для совмещенного радиоузла или радиостанции.

Более эффективным, но затратным является пространственное разнесение приемных и передающих устройств, объединение их внешней линией связи и единой системой управления. Примерами стационарных радиоузлов с пространственным разнесением приемного и передающего центров могут служить: стационарный КВ ретранслятор, представленный в монографии О.В. Головина [1], стационарный береговой КВ радиоузел [2]. В работах [3; 4] представлены мобильные КВ радиоузлы с пространственным разнесением приемных и передаю-

щих аппаратных. Связь приемных и передающих мобильных аппаратных осуществляется по радиорелейным линиям связи. Управление мобильными радиоузлами обеспечивается от аппаратной управления – для радиоузла [3] либо от приемной аппаратной – для радиоузла [4].

Применение частотного разнесения совместно с пространственным разнесением, практически, полностью решает проблемы дуплексного обмена сообщениями по каналам радиосвязи.

Во многих случаях возможности пространственного разнесения на расстояния в десятки километров приемных и передающих устройств радиоузла отсутствуют, например, при размещении радиоузла на кораблях, самолетах, автомобилях, морских нефтегазодобывающих платформах и пр. При этом, в отдельных случаях, например, на корабле, реализуется совмещенный приемопередающий радиоузел с пространственным разнесением приемных и передающих антенн. Примером совмещенного приемопередающего узла с разнесенными антеннами может служить и сухопутный мобильный радиоузел, представленный в работе [5]. Правда, ведение сеансов связи с такого рода радиоузлом может осуществлять только на стоянках, а не во время движения. Подключение приемников и передатчиков КВ радиоузла на разные антенны с их разнесением на $100\div 200$ м позволяет увеличить «изоляция» приемного тракта от передающего на $30\div 50$ дБ. Это дает возможность реализовать дуплексный режим работы при выполнении следующих условий:

- использовании приемников с повышенной избирательностью;
- разнесении частот приема и передачи не менее чем на 10% от номинального значения;
- обеспечении высокого динамического диапазона антенно-приемного тракта;
- использовании передатчиков с мощностью излучения не более 1 кВт и с уровнем шума не более минус 185 дБ/Гц, измеренного в диапазоне рабочих частот относительно номинальной мощности при отстройке на $\pm 10\%$ от значения частоты настройки передатчика.

Работа приемника и передатчика КВ радиостанции на одну антенну с использованием дуплексного фильтра, как это реализуется в ОВЧ и более высокочастотных диапазонах, в КВ диапазонах частот не применяется из-за невозможности организовать достаточный дуплексный разнос частот приема и передачи и невозможности реализации высокочастотных полосовых фильтров с необходимыми характеристиками.

Использование на совмещенном радиоузле магнитных приёмных антенн, например передающих штыревых антенн [6], позволяет обеспечить приём в ближней зоне передающей антенны (до 10 м от штыревой антенны при передатчике 1 кВт). Это обеспечивается за счёт того, что в ближнем поле передающей штыревой антенны преобладает электрическая составляющая сигнала, в то время как приём осуществляется по магнитной составляющей. Однако активная магнитная антенна имеет высокий уровень собственных шумов и низкую чувствительность.

Таким образом, обеспечение ЭМС на совмещенном КВ радиоузле при использовании частотного и пространственного разнесения приёмных и передающих каналов до настоящего времени является достаточно большой научно-технической проблемой.

На рис. 1 (а) изображен спектр электромагнитных колебаний на выходе передатчика [7], а на рис. 1 (б) амплитудно-частотная характеристика фильтра предварительной избирательности радиоприемника. Из приведенных рисунков видно, что использование мощных передатчиков требует высокой избирательности фильтров предварительной избирательности. Кроме того, наличие побочных и внеполосных излучений ухудшает отношение сигнал/помеха на входе приемного устройства и существенно снижает коэффициент исправного действия канала связи.

В диапазоне УКВ широко применяется метод временного разнесения каналов приёма и передачи (режим TDD – Time Division Duplex) (GSM, TETRA, LTE и др.), обеспечивающий реализацию дуплексного обмена. В КВ диапазоне метод временного разнесения до сих пор не нашел применения. Основной причиной этому в первую очередь является то, что для реализации режима TDD на КВ передатчиках требуются коммутаторы, способные пе-

реключать цепи, по которым протекают очень большие токи. Кроме того, пользователи существующих линий связи не могут преодолеть опасений, которые связаны с рисками перехода на новые стандарты функционирования связной аппаратуры. Однако режим TDD радикально решает проблему реализации одновременно двух режимов «передача» и «прием» на совмещенных радиочастотах.

Рис. 1 (а). Спектр основного и внеполосного излучений передающего устройства

Рис. 1 (б). АЧХ фильтра предварительной избирательности радиоприемного устройства

Способы применения временного разнесения приема и передачи для обеспечения дуплексной работы системы связи, реализуемые в том числе и в СВ и КВ диапазонах для построения радиальных систем связи и систем связи «точка-точка», были предложены в работах [8–17].

В работе [8] предложена система радиосвязи, обеспечивающая режим полного дуплексного радиообмена двух корреспондентов на одной рабочей частоте. Система состоит из двух приемопередающих комплектов, каждый из которых в процессе ведения связи синхронно со вторым непрерывно переключается с приёма на передачу с частотой F . При этом с той же частотой изменяется направление передачи сигнала от одного приёмопередатчика к другому. Непрерывность передачи и приёма обеспечивается введением устройств сжатия и расширения сигнала на каждом приёмопередающем комплекте. Система функционирует следующим образом. Передаваемый сигнал разделяется на интервалы длительностью $\Delta T = 1/F$, каждый из которых сжимается до интервала передачи $\Delta T_n = \Delta T/2 - \Delta t$, где F – частота переключения с приёма на передачу; Δt – время необходимое приёмопередатчику на переключение и время распространения сигнала от одного корреспондента к другому. Далее сжатый квант сигнала передаётся в интервал передачи приёмопередатчика, в интервал приёма принимается сжатый квант сигнала, передаваемый другим приёмопередатчи-

ком. На приёме производится обратная процедура. Сжатые кванты сигнала подаются на устройство расширения, после чего восстановленные по длине кванты сигнала сшиваются, чем обеспечивается восстановление принятого сигнала.

В работах [9–11] предложены варианты построения зоновых систем связи с временным разделением каналов приема и передачи, предназначенных для одновременной передачи дискретных сообщений от большого числа абонентов в ограниченной полосе частот. Построение зоновых ДКМ систем на указанных принципах позволяет, в частности, реализовать многоканальный вынесенный ретранслятор в виде совмещенного приёмопередающего центра. Для устранения влияния приёмопередатчиков разных каналов друг на друга необходимо обеспечить их циклическое и синхронное переключение с приема на передачу. При этом в разных каналах ретрансляции могут передаваться разные виды сообщений – речь, телеграф, передача данных.

Используя метод TDD, можно передавать как аналоговую, так и цифровую речь. Цифровая передача речи в КВ и СВ радиоканалах в полосе 3 кГц требует применения вокодера, обеспечивающего снижение скорости выходного цифрового потока с 64 кбит/с до значений 2,4 кбит/с и ниже, а также высокоскоростного модема, обеспечивающего надежную передачу цифрового потока с выхода вокодера по радиоканалу [12; 13]. На рис. 2 представлена упрощенная схема, реализуемая в цифровых системах связи с временным разнесением приема и передачи, для дуплексной передачи речевого сигнала.

Рис. 2. Структурная схема цифровой дуплексной КВ радиостанции с временным разнесением приема и передачи:

СРС – блок сжатия речевого сигнала; ВРС – блок восстановления речевого сигнала;
 КК – канальный кодер; КД – канальный декодер; МД – модулятор; ДМ – демодулятор;
 ПРД – передатчик; ПРМ – приемник; ФЦ – формирователь цикла

В работе [13] проведен анализ методов построения цифровой КВ системы голосовой связи с временным разнесением приема и передачи. На основе разработанной модели радиолинии путем имитационного моделирования для выбранных вокодеров 600, 1200 и 2400 бит/с, а также при использовании OFDM модема для передачи потока цифровой речи, для ряда сигнально-кодовых конструкций определены необходимые отношения сигнал/помеха для обеспечения удовлетворительной разборчивости речи на приемном конце. Для каждой скорости определены оптимальные сигнально-кодовые конструкции. Значения отношения сигнал/шум в полосе сигнала (E_s/N_0) в дБ, требуемые для достижения вероятности ошибки $2 \cdot 10^{-2}$ представлены в таблице, из которой видно, что передача цифровой речи в среднем и плохом каналах может быть обеспечена при скорости вокодера не более 1200 бит/с.

Значения отношения сигнал/шум в полосе сигнала (E_s/N_0) в дБ, требуемые для достижения вероятности ошибки $2 \cdot 10^{-2}$

Скорость вокодера, бит/с	Тип модуляции	Информ. скорость, реализуемая СКК, бит/с	R	Тип канала по ITU-R F.520			
				АБГШ	хороший	средний	плохой
600	DBPSK	1847	2/3	3,4	6,5	6,8	7,7
	DQPSK	2770	1/2	4,5	6,9	6,8	7,5
1200			3694	2/3	6,2	9,2	9,6
	DPSK-8	4155	1/2	7,8	10,3	10,8	11,6
2400			6232	3/4	11,1	14,6	16,1
	QAM-16	7387	2/3	13,6	19,5	25,7	—
	QAM-32	6925	1/2	14,9	20,9	—	—

В работе [14] предложен способ дуплексной связи, обеспечивающий передачу аналоговой речи в режиме TDD. Способ обеспечивает цифровое линейное сжатие сигнала во времени и не требует применения в составе радиостанции вокодера и высокоскоростного модема. Способ заключается в следующем. Телефонный сигнал, поступающий с микрофона после усиления, преобразуется на АЦП в последовательность цифровых отсчетов, которая разделяется на интервалы длительностью T , в каждом из которых находится $N = F_d \cdot T$ отсчетов. F_d – частота дискретизации телефонного сигнала. Отсчеты сигнала запоминаются в запоминающем устройстве (области памяти ОЗУ) и затем считываются со скоростью $F_{d1} = F_d \cdot k_{сж}$, где $k_{сж}$ – коэффициент сжатия кванта сигнала $k_{сж} > 2$. Этим обеспечивается линейное временное сжатие сигнала, которое необходимо для того, чтобы квант сжатого сигнала уместился в выделенном для него слоте передачи. Затем сформированные посылки цифрового сигнала пропускаются через ЦАП и в полученные сжатые кванты аналогового сигнала добавляются синхровставки. Сформированный таким образом сигнал направляется на телефонный вход передатчика.

Модем для дуплексной голосовой радиосвязи с периодическим переключением режимов «прием – передача» был реализован в виде макета и проверен в лабораторных условиях [15].

На рис. 3(а) и 3(б) показана зависимость спектра частот сигналов прямого $F_1(t)$ и обратного $F_2(t)$ каналов связи до временной компрессии и после временной декомпрессии сигналов при аналоговой голосовой связи. На рис. 3(в) и 3(г) показана зависимость спектра частот сигналов прямого $F_{11}(t)$ и обратного $F_{21}(t)$ канала связи после временной компрессии и группирования передаваемых сигналов на заданных интервалах времени.

На прямой и обратной стороне радиолиний после декомпрессии спектры принимаемых голосовых сигналов полностью восстанавливаются и при воспроизведении эти сигналы не отличаются от оригиналов, спектры которых изображены на рис. 3(а) и 3(б). Единственная особенность восстановленных сигналов заключается в том, что они по отношению к оригиналам будут запаздывать на время $2\Delta T$. Предельным значением для задержки сигналов при дуплексной голосовой радиосвязи является время 0,5 с, которое не вызывает ощутимого дискомфорта у собеседников. Поэтому интервал времени, в течение которого передаются сигналы после временной компрессии, не может превышать 250 мс.

Голосовая связь имеет:

- режим конференции, когда все пользователи сети слышат всех говорящих. При этом регламент общения в эфире регулируется либо самодисциплиной участвующих в разговоре, либо «председателем собрания»;
- режим разговора двух корреспондентов (режим «тет-а-тет»), который обеспечивается автоматически аппаратурой управления.

Рис. 3. Спектры сигналов в прямом (а) и обратном (б) каналах связи до временной компрессии и в прямом (в) и обратном (г) каналах связи после временной компрессии при аналоговой голосовой связи

Дуплексная цифровая голосовая радиосвязь с периодическим переключением режимов «прием – передача» отличается от аналоговой голосовой связи тем, что полоса частот, занимаемая спектром компрессированного цифрового голосового сигнала при использовании вокодеров может быть намного меньше, полосы спектра компрессированного аналогового сигнала. То есть при цифровой голосовой связи не требуется удвоенная полоса спектра, а можно обойтись полосой частот, которая обычно используется для передачи голосовых сообщений при однополосной телефонии. Однако при цифровой голосовой связи невозможно обеспечить режим конференции, когда все пользователи сети могут слышать всех говорящих одновременно.

Дуплексная радиосвязь с периодическим переключением режимов «прием – передача» имеет особенность, заключающуюся в том, что прямой и обратный каналы имеют одну и ту же рабочую частоту. Этот способ радиосвязи позволяет, во-первых, обеспечить ЭМС на совмещенных приемопередающих радиостанциях и, во-вторых, при дуплексной работе экономит рабочую частоту, поскольку прием-передача сообщения осуществляется на одной и той же частоте посредством периодического чередования режимов «передача – прием» сообщения на прямой и на обратной стороне радиолинии. Следует заметить,

что радиостанция в режиме TDD может работать не только в дуплексном режиме, обеспечивая передачу сигналов по каналу обратной связи, но и в симплексном режиме на два направления: принимать сообщение от одной радиостанции и передавать сообщение другой радиостанции.

На рис. 4 приведена блок-схема совмещенного КВ радицентра, работающего в режиме TDD. Задачей устройства разделения на передающей стороне радиолинии является разделение дискретного сообщения на отдельные пакеты для передачи каждого из них в те моменты времени, в которые передатчик работает в режиме излучения сигнала. Задача устройства восстановления на приемной стороне радиолинии является исключение временных пауз между принятыми пакетами дискретного сообщения и «сшивание» этих пакетов, что позволяет восстановить дискретное сообщение в первоначальном виде, т.е. таком, которое оно имело на входе устройства разделения на передающей стороне радиолинии.

После восстановления сообщения на приемной стороне радиолинии оно абсолютно ничем не отличается от сообщения на входе устройства разделения на передающей стороне радиолинии. Единственная особенность этого сигнала заключается в том, что он отстает по времени на величину $T/2$ от сигнала на передающей стороне радиолинии, что в системах, работающих в абсолютном времени, легко учитывается путем искусственного опережения часов на передающей стороне радиолинии на время равное $T/2$.

Рис. 4. Блок-схема совмещенного радицентра, работающего в режиме TDD при передаче телеграфных сообщений:

ИС – источник сообщения; ПС – приемник сообщения; К-3 – устройство кодирования и засекречивания; ДК-РС – устройство декодирования и рассекречивания; УР – устройство разделения сообщения; УВ – устройство восстановления сообщения; М – модулятор сигнала; ДМ – демодулятор сигнала; АМ – амплитудный манипулятор; П – передатчик; Пр – приемник; К(+) – переключатели, которые замыкаются накоротко во время передачи сообщения и размыкаются во время приема сообщения; К(-) – переключатели, которые замыкаются накоротко во время приема и размыкаются во время передачи сообщения

В работе [16] предложен КВ приёмопередатчик, обеспечивающий в режиме TDD дуплексную передачу, при работе приёмника и передатчика на одну антенну. На рис. 5 показана структурная схема приёмопередатчика, обеспечивающего дуплексный режим связи с временным разделением приёма и передачи. Приёмопередатчик содержит возбуждатель радиосигнала передатчика (1), усилитель мощности (2), фильтр нижних частот (3), в тракте которого используется первый быстродействующий коммутатор на

p-i-n диодах (11), выход которого постоянно подключен к антенне; приемник (16), подключаемый к антенне через второй быстродействующий коммутатор на p-i-n диодах (12); устройство управления (17), выход которого соединен с управляющими входами быстродействующих коммутаторов на p-i-n диодах. Отличием предлагаемого приемопередатчика является то, что ФНЧ выполнен в виде последовательно включенных резонансных контуров, а также то, что при работе приемника устройство управления обеспечивает отключение возбуждателя и запирание усилителя мощности, а первый быстродействующий коммутатор на p-i-n диодах соединяет с корпусом один конец катушки индуктивности, второй конец которой является выходом ФНЧ. Мощность передатчика не должна превышать 1 кВт. В работе [17] также предлагается использовать для коммутации цепей приёмопередатчика, работающего в режиме TDD p-i-n диоды.

Рис. 5. Структурная схема приемопередатчика, обеспечивающего дуплексный режим связи с временным разделением приёма и передачи

Подводя итоги вышеизложенному, можно с большой степенью уверенности утверждать, что режим TDD в КВ каналах связи радикально решает вопрос ЭМС при одновременной дуплексной работе приемных и передающих устройств в случае взаимного их расположения в непосредственной близости друг от друга на различных транспортных средствах и на другого рода локально сосредоточенных площадях, например, на нефтегазодобывающих морских платформах, а также в носимых радиостанциях.

Большим преимуществом режима TDD является экономия частот по сравнению с обычно используемым режимом частотного разнесения прямого и обратного каналов связи.

В связи с этим необходимо проведение НИР, которая бы позволила найти пути реализации режима TDD в КВ каналах связи, позволяющего обеспечить рассмотренные выше преимущества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин О.В. Декаметровая радиосвязь. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.
2. Автоматизированная радиосвязь с судами. (Б-ка судового инженера-связиста) / под ред. К.А. Семенова. Л.: Судостроение, 1989. 336 с.
3. Система коротковолновой радиосвязи: патент на полезную модель / Левченко В.И. [и др.]. № 46398. Заявл. 09.03.2005.
4. Радиозузел коротковолновой связи: патент на полезную модель / Левченко В.И. [и др.]. № 47602. Заявл. 04.04.2005.

5. Приемопередающий радиоузел коротковолновой связи: патент на полезную модель / Березовский В. А. [и др.]. № 98661. Заявл. 17.05.2010.
6. Изделие «Акция – КВ». Низкопрофильная широкополосная приемная антенна КВ диапазона. Технические условия. СКЖГ.464639.005ТУ, 2007.
7. *Виноградов Е.С.* Уч пособие ЭМС. URL: <http://topuch.ru/e-m-vinogradov/index9.html> (дата обращения: 27.08.2019).
8. Система дуплексной радиосвязи: патент РФ / Юрьев А.Н. [и др.]. № 2190301. Заявл. 10.05.2000.
9. Способ дуплексной связи с временным разнесением каналов приема и передачи: патент РФ / Юрьев А.Н., Хазан В.Л. № 2507683. Заявл. 25.05.2012.
10. Способ ведения двухсторонней высокоскоростной радиосвязи с эффективным использованием радиочастотного спектра в ведомственной системе связи: патент на изобретение / Шадрин Б.С. № 2663200. Заявл. 02.11.2016.
11. Способ средневолновой многоканальной зонной сети двусторонней мобильной автоматической радиосвязи с временным разделением режимов приема и передачи сообщений: патент РФ / Хазан В.Л. №2617211. Заявл. 02.03.2016.
12. *Юрьев А.Н.* Система дуплексной телефонной связи декаметрового диапазона с временным разделением каналов приема и передачи // Техника радиосвязи. 2008. Вып. 13. С. 33–44.
13. *Юрьев А.Н., Землянов И.С.* Выбор сигнально-кодовой конструкции для цифровых КВ систем связи с временным разнесением приема и передачи // Техника радиосвязи. 2015. Вып. 4. С. 48–59.
14. Способ дуплексного радиообмена телефонными сигналами: патент РФ / Юрьев А.Н., Ярошевич Б.Н. №2208910. Заявл. 23.02.2000.
15. *Юрьев А.Н., Землянов И.С.* Имитационное моделирование системы радиотелефонной связи декаметрового диапазона с временным разделением каналов приема и передачи // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. Вып. 12. С. 11–17.
16. Приёмопередатчик: патент РФ / Алексеенко В.Н., Юрьев А.Н. №2264032. Заявл. 17.04.2003.
17. Совершенствование систем дуплексной декаметровой радиосвязи / Б.Г. Шадрин [и др.] // Техника радиосвязи. 2015. Вып. 4. С. 31–47.