ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА КОМПЕНСАЦИИ СТАНЦИОННЫХ РАДИОПОМЕХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ДЕКАМЕТРОВОМ РАДИОКАНАЛЕ

И.М. Орошук, М.В. Соловьев, А.Н. Сучков, А.А. Гаврилов
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,
Владивосток, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-корреляционных свойств искусственных (станционных) радиопомех и способ их компенсации в декаметровом радиоканале. Проведен анализ потенциальных возможностей передачи широкополосных сигналов на фоне станционных радиопомех, обеспечивающих повышение скорости передачи в радиоканалах декаметрового диапазона.

Ключевые слова: декаметровая радиосвязь, цифровая антенная решетка, пространственно-корреляционная обработка сигнала, станционные радиопомехи, скорость передачи информации.

METHOD FOR COMPENSATION OF STATIONARY RADIO INTERFERENCE IN DECAMETER RADIO CHANNEL

I.M. Oroshchuk, M.V. Soloviev, A.N. Suchkov, A.A. Gavrilov
S.O. Makarov Pacific Higher Naval School,
Vladivostok, Russian Federation

The results of experimental studies of the spatial-correlation properties of artificial (station) radio interference and a method for their compensation in a decameter radio channel are presented. The analysis of the potential transmission capabilities of broadband signals against the background of station radio interference, providing an increase in the transmission speed in decameter radio channels.

Keywords: decameter radio communication, digital antenna array, spatial correlation signal processing, station radio interference, data transfer rate.

Декиметровая (ДКМ) радиосвязь несмотря на высокие достижения в системах спутниковой радиосвязи остается важным элементом в системах связи. Она играет большую роль в обеспечении дальней связи с судами и надводными кораблями ВМФ в акваториях Мирового океана и в других отраслях.

Востребованность ДКМ радиосвязи определяется возможностью оперативного установления прямой радиосвязи на различные расстояния, вплоть до глобальных, при высоких показателях живучести, низких экономических и энергетических затратах. Однако при всех достоинствах в системах ДКМ радиосвязи существует ряд недостатков: зависимость качества связи от изменений состояния ионосферы; многолучевое распространение радиоволн, свойственное для ионосферной радиосвязи, вызывающее замирания и временное рассеивание сигнала; влияние множества различных видов радиопомех, особенно станционных, возникающих на загруженных частотных участках спектра ДКМ диапазона; ограниченность скорости передачи данных из-за временного рассеяния, вызванного многолучевостью распространения радиоволн [1; 2].

С учетом всех достоинств ДКМ радиосвязи, несмотря на указанные недостатки, в настоящее время проводятся исследования новых возможностей применения ДКМ связи между корреспондентами [3; 4].

Наиболее остро стоит задача повышения скорости передачи информации, для решения которой в ведущих отечественных и зарубежных научных организациях активно ве-

дуются разработки новых скоростных ДКМ радиолиний [3]. Эти разработки направлены на повышение скорости передачи информации в ДКМ каналах связи за счёт использования высокоскоростных модемов с квадратурно-амплитудной модуляцией сигнала (КАМ), а также за счет применения OFDM-модемов, построенных на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency-division multiplexing) [5].

В современных разработках использование КАМ-64 модемов позволяет обеспечивать на односкачковых ионосферных радиотрассах в полосе 3,1 кГц скорость передачи информации до 9,6 кбит/с, а в полосе 40 кГц – до 57 кбит/с [4]. Однако для достижения приведенных скоростей в ионосферных каналах, существует проблема их обеспечения, связанная с глубокими интерференционными замираниями. Это существенно ограничивает возможности применения таких модемов. Данный вид модуляции может быть эффективно использован только на максимально применимой частоте (МПЧ) или на частотах близких к ней, обеспечивающих минимальные замирания при одноручевом распространении радиоволн [2]. Однако практическое использование МПЧ не всегда возможно из-за сложности точного прогнозирования и ограничений при выборе требуемых рабочих частот в реальной помеховой обстановке. В связи с этим возникает необходимость использования более низких рабочих частот, на которых в силу многолучевости воздействуют мультипликативные помехи, существенно снижающие помехоустойчивость КАМ-64 модемов, прежде всего за счет случайной флуктуации фазы принимаемого сигнала. Кроме того, в силу большой ограниченности доступного частотного ресурса в ДКМ диапазоне существует проблема передачи широкополосных сигналов с полосой более 40 кГц.

В разработанных ДКМ радиолиниях, построенных на основе OFDM-модемов, работающих в полосе 3,1 кГц, в ионосферных радиотрассах достигается скорость передачи информации до 9,6 кбит/с [3]. Данный способ модуляции обеспечивает достаточно высокую помехоустойчивость, в том числе для многолучевых ионосферных каналов связи, за счет пониженной скорости символьной модуляции на каждой поднесущей частоте. В этом случае снижается влияние фазовых мультипликативных помех и временного рассеяния сигнала [8].

Для увеличения скорости работы OFDM-модемов при сохранении требуемой помехоустойчивости ионосферных радиоканалов так же, как и для КАМ, необходимо использовать более широкополосные сигналы, передача которых ограничена частотной загруженностью ДКМ диапазона.

Проблема передачи широкополосных сигналов в загруженном ДКМ диапазоне может быть решена путем применения цифровых антенных решеток (ЦАР) с пространственно-корреляционной обработкой сигнала, которая позволяет принимать информацию с достаточной помехоустойчивостью, в том числе и в поле станционных помех [6].

Цифровая антенная решетка с пространственной корреляционной обработкой сигнала способна принимать и обрабатывать всю информацию, содержащуюся в структуре пространственно-временного электромагнитного поля в месте приема и при минимальном уровне полезного сигнала извлекать данные в сложной сигнально-помеховой обстановке.

В состав ЦАР входят: антенная решетка (АР); блок усиления (БУ); многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП); вычислительное устройство (ВУ), которое состоит из блока временных задержек (БВЗ), блока полосовой фильтрации (БФ), блока корреляционной обработки (БКО), блока суммирования (БС) и устройства принятия решения (УПР) (рис. 1).

Принцип работы ЦАР и форма ее апертуры определяется пространственно-корреляционными свойствами сигналов и помех. Для обеспечения эффективной компенсации помех были определены наиболее оптимальные с точки зрения помехоустойчивости и компактности формы апертуры в виде кольца или спирали [6; 7].

Принцип работы ЦАР основан на виртуальном позиционировании антенных элементов, разнесенных на разные расстояния ортогонально направлению корреспондента, за счет

ввода временных задержек (рис. 2). Такое позиционирование обеспечивает возможность когерентного приема. В дальнейшем осуществляется корреляционная обработка между всеми парами элементов антенной решетки с последующим суммированием вычисленных значений взаимной корреляции (рис. 2). После этого выполняется сравнение полученного отклика с пороговым напряжением, определяемым параметрами антенной решетки. В результате на выходе приемного тракта формируется битовая последовательность принимаемого цифрового сигнала.

Рис. 1. Функциональная схема приемного тракта обработки ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигнала

Рис. 2. Виртуальное позиционирование ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов

Для оценки возможности передачи широкополосных сигналов на фоне станционных помех были проведены экспериментальные исследования зависимости пространственно-корреляционных свойств искусственных радиопомех ДКМ диапазона от ширины полосы пропускания приемного тракта.

Экспериментальные данные представляли собой оцифрованные синхронные записи пространственно-разнесенных сигналов на расстояниях от 20 до 500 метров. Обработка проводилась в трех поддиапазонах частот (3–9 МГц, 9–14 МГц, 14–20 МГц).

После записи сигналов на ЭВМ производилась оценка пространственной корреляции интерференционного поля искусственных (станционных) радиопомех при различных полосах пропускания приемного тракта для пространственных разносов антенных элементов от 20 до 500 метров.

На основе анализа результатов обработки получены зависимости модуля коэффициента взаимной корреляции (КВК) искусственных (станционных) помех – $|\rho_{na}|$ от полосы пропускания приемного тракта – Δf , анализ которых показал, что с увеличением полосы пропускания КВК снижается (рис. 3).

Рис. 3. Результаты исследований пространственно-корреляционных свойств искусственных (станционных) радиопомех при разnose антенных элементов на 500 метров в диапазоне частот: а) 3–9 МГц; б) 9–14 МГц; в) 14–20 МГц

Анализ зависимостей $\rho_{na}(\Delta f)$ показал (см. рис. 3), что с ростом средней частоты сигнала наблюдается тенденция уменьшения крутизны спада КВК при увеличении полосы пропускания приемника, что связано с уменьшением относительной ширины спектра сигнала $\Delta f/f_c$. Кроме того, замечено смещение асимптоты спада КВК от неравномерности спектра уровней и числа станционных помех N_{cm} в исследуемой полосе пропускания приемника. Определено, что положение асимптоты (см. рис. 3) зависит от неравномерности уровней станционных помех, выраженной через нормированный пик-фактор спектра $\Pi_{na} = n_{a\max}^2 / (\bar{n}_a^2 N_{cm})$, где $n_{a\max}$, $\bar{n}_a$ – максимальный и средний уровни станционных помех в пределах полосы приемника.

Замечено, что при большей неравномерности спектра асимптота проходит на более высоком уровне относительно оси абсцисс. В результате чего с ростом полосы пропускания при большей неравномерности спектра станционных помех минимальное значение КВК будет возрастать (см. рис. 3). В этом случае при расширении полосы пропускания невозможно достигнуть значений КВК помех меньше высоты асимптоты, что ограничивает возможности достижения требуемой помехоустойчивости радиолиний в этих поддиапазонах.

Также анализ показал, что в наиболее загруженном поддиапазоне 3–9 МГц целесообразно расширять полосу приемного тракта не более чем до 50 кГц, в этом случае снижение влияния помех будет наиболее эффективным, так как в дальнейшем расширение полосы не снижает значение КВК станционных помех (см. рис. 3, а). С ростом частот сигнала необходимая эффективная полоса пропускания возрастает и составляет в поддиапазоне 9–14 МГц более 100 кГц, а в поддиапазоне 14–20 МГц более 400 кГц.

Из проведенного анализа следует, что существует потенциальная возможность передачи широкополосных сигналов на фоне станционных помех, позволяющих передавать информацию с повышенной скоростью. Однако с другой стороны существуют ограничения скорости передачи информации, связанные с временным рассеиванием принимаемого сигнала $\Delta\tau_p$, вызванным многолучевостью ионосферного канала [1; 2], а также с дисперсионными искажениями в ионосфере [1].

Временное рассеивание в ионосферных каналах составляет $\Delta\tau_p \approx 0,3 \div 1$ мс [5], что ограничивает минимальную длительность элементарной посылки сигнала допустимыми краевыми искажениями, которые могут вызвать межсимвольную интерференцию в информационном сигнале [8].

Дисперсионные искажения также ограничивают минимальную длительность элементарной посылки сигнала, которая определяется допустимой рассинхронизацией на краях полосы пропускания. В соответствии с [4], максимальное время расхождения сигналов по времени зависит от ширины полосы пропускания приемного тракта и несущей частоты f_0 :

$$\Delta\tau_o \approx 80,8 \cdot 10^9 \frac{\Delta f}{f_0^3 \sin \Delta}, \quad (1)$$

где Δ – угол места падающего и отраженного от ионосферы луча, зависящий от протяженности трассы.

С учетом рассмотренных ограничений при использовании OFDM-модема [3], допустив краевые искажения и рассинхронизацию сигналов на крайних поднесущих до 10%, можно обеспечить передачу информации на фоне станционных помех в ионосферных каналах связи в исследованных ДКМ поддиапазонах на скоростях:

- в поддиапазоне частот 3–9 МГц от 19 кбит/с – до 47 кбит/с;
- в поддиапазоне частот 9–14 МГц от 47 кбит/с – до 95 кбит/с;
- в поддиапазоне частот 14–20 МГц от 95 Мбит/с – до 142 кбит/с.

Полученные результаты расчета показывают потенциальную возможность обеспечения более высокой скорости передачи информации без ограничений на выбор рабочей частоты, по сравнению с возможностями новых разработок скоростных ДКМ модемов [2], в условиях ограниченности частотного ресурса ДКМ диапазона из-за большой загруженности работой территориально-разнесенных станций.

Также следует отметить, что учетом возможной неравномерности спектра уровня станций (см. рис. 3), для обеспечения заданной помехоустойчивости в поддиапазонах с большей неравномерностью уровней станционных помех, характерных более высоким частотам, потребуется большее соотношение уровней сигнала/помеха в точке приема, которое достигается большей мощностью передатчика или применением антенн с большим коэффициентом усиления [9].

С учетом проведенных исследований зависимости КВК интерференционного поля узкополосных станционных помех рассчитана помехоустойчивость ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов в ионосферных каналах с релеевскими замираниями,

которые показали возможность достижения вероятности битовой вероятности ошибки не более $\overline{BER} \leq 10^{-3}$ при соотношении уровней сигнал/шум на входе от -2 до 1 дБ в случаях использовании 16- и 10-элементных ЦАР соответственно (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость средней битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум на входе ЦАР в каналах с замираниями

Таким образом, полученные результаты исследований показали потенциальную возможность обеспечения повышенной скорости передачи информации в ДКМ радиоканалах, загруженных узкополосными станционными помехами за счет их компенсации в трактах обработки ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. М.: Связь, 1979. 296 с
2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.
3. Романов Ю.В. Эволюция высокоскоростных КВ-радиомодемов в XX веке // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 1 (28). С. 72–88.
4. Пукса Д.О., Романов Ю.В. Результаты трассовых испытаний адаптивной пакетной КВ-радиолинии высокоскоростной передачи данных файлового типа на базе радиомодема с полосой сигнала до 40 кГц // Техника радиосвязи. 2015. Вып. 4 (27). С. 14–20.
5. Патент RU 2639657.С1.МПК H04L5/00, H04L27/26 (2006.01). Способ адаптации системы КВ радиосвязи с OFDM-сигналами / Землянов И.С., Юрьев А.Н. Опубл. 21.12.2017, Бюл. №36.
6. Жариков-Горский В.А. Критерии оптимизации построения апертуры нелинейных антенных решеток декаметрового диапазона // Радиотехника, электроника и связь: сборник докладов IV Международной научно-технической конференции. Омск: АО «ОНИИП», 2017. С. 204–209.
7. Bevelacqua P.J. Antenna arrays: performance limits and geometry optimization. Arizona: Arizona State University, 2008.
8. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер.с англ. / под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
9. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Возможности неэквидистантных цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: сборник докладов 17-й Международной конференции. М., 2015. С. 302–305.