

УДК 621.372.512

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-58-69

Адаптация дискретных согласующих устройств ДКМВ-диапазона к изменяющемуся импедансу нагрузки

А. А. Извольский, кандидат технических наук, 18-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия

В радиосвязи первостепенную роль играет вопрос согласования антенны с приемопередатчиком. Задача согласования актуальна для различных диапазонов и решается множеством способов. В ДКМВ-диапазоне согласование имеет ряд особенностей при использовании согласующего антенного устройства (САУ) на основе дискретных элементов, состоящих из магазинов емкостей и индуктивностей. В статье обсуждается концепция быстрого согласования высокочастотных усилительных трактов ДКМВ приемопередатчиков с нестационарными нагрузками (антеннами) с помощью дискретных САУ. Разработан инновационный подход к процессу настройки при смене рабочей частоты и обеспечению собственной адаптации САУ при изменении импеданса антенны, основанный на методах быстрого поиска геометрической близости точек. Предложен быстрый способ настройки САУ, исключающий процедуру пересчета входного импеданса антенны по результатам измерения входного импеданса. При его использовании скорость настройки САУ на текущей рабочей частоте ограничена только временем однократной смены состояния дискретного силового контура, что в случае применения электромагнитных реле численно равно их времени переключения. Настройка САУ по методу быстрого поиска геометрической близости точек основана на наборе частотных карт вариантов настроек. Эти карты могут быть пересчитаны для референсной плоскости между генератором и входом САУ для всех комбинаций дискретных элементов в соответствии с известной матричной моделью дискретного силового контура. Это позволяет исключить сложную процедуру пересчета входного импеданса антенны с использованием комплексных чисел. Техническим результатом предлагаемого инновационного способа настройки САУ является упрощение, учет систематических погрешностей измерителя импеданса, исключение трудоемких вычислений с комплексными числами, расширение функциональных возможностей способа, сокращение продолжительности настройки и улучшение ее качества. Практическая значимость состоит в том, что реализация предлагаемых технических решений в средствах связи ДКМВ-диапазона позволяет существенно (порядка в 100 раз) сократить продолжительность подготовки к проведению сеанса радиосвязи, исключить процедуру пересчета входного импеданса антенны и снизить требования к ресурсу коммутационных элементов.

Ключевые слова: согласующее антенное устройство, импеданс, подстройка, адаптация, радиопередающие устройства.

Введение

Новые технологические подходы к построению адаптивных радиолиний в последнее время устранили большинство присущих системам ДКМВ-связи недостатков, и теперь системы связи отличаются большим разнообразием форм и методов адаптации [1, 2]. Развитие новых методов цифрового формирования и обработки сигналов позволило значительно повысить пропускную способность ионосферных каналов. Архитектура приемопередающих радиостанций сегодня позволяет проводить сеансы связи с возможностью быстрой смены рабочей частоты. Доступные методы

модуляции совместно с цифровой обработкой сигналов позволяют автоматически оценивать качественные показатели канала и инициировать необходимые процедуры, направленные на поддержание заданной достоверности связи, а также на выполнение требований по своевременности доставки информации и обеспечению ее безопасности. Единственным элементом из состава КВ-радиосредств, в реализации которого практически ничего принципиально не менялось на протяжении многих лет, является согласующее антенное устройство (САУ) [3–5].

Первостепенной трудностью создания современных приемопередающих устройств яв-

ляется проблема быстрого узкополосного согласования, решение которой позволяет обеспечить передачу максимальной мощности на рабочей частоте между источником сигнала и импедансом нагрузки (антенны) [6–9]. Технические решения, наиболее близкие к теме исследований, содержатся в патентах US8190109B2; RU2776424C1; RU2747564C1; RU2747575C1.

В большинстве случаев при проектировании САУ разработчиками не учитывается нестациональность импеданса антенны, вызванная изменениями условий эксплуатации, особенно на подвижных объектах [10–12]. Появление в непосредственной близости от антенны человека или другого биологического объекта, металлического предмета, летательного аппарата, дерева, здания и других подобных объектов приводит к уменьшению излучаемой электромагнитной энергии. В свою очередь, это приводит к отражению высокого процента мощности обратно в усилительный ВЧ-тракт. Количество отраженной мощности является показателем степени несоответствия импедансов между антенной и трактом.

Автоматизированный адаптивный режим работы радиолинии требует, чтобы САУ было полностью автоматизированным, осуществляя перестройку элементов согласующей цепи без перебора. Широкое внедрение низкоэнергетических радиолиний, сопровождаемое уменьшением габаритов антенн, приводит к ухудшению их естественного согласования, и, соответственно, возрастают требования в части возможности согласования весьма широких диапазонов комплексных нагрузок. Особенно это касается низкочастотной области ДКМВ-диапазона, где малогабаритные антенны имеют минимальные электрические размеры. Первостепенную важность приобрела и проблема обеспечения стабильности настройки. Малогабаритные антенны представляют собой высокочастотные нагрузки, которые согласуются в относительно узких полосах, настройка получается «острая» и, следовательно, чувствительная к условиям развертывания антенны. С целью предотвращения подобных нежелательных явлений САУ само должно быть адаптивным, то есть способным динамически подстраиваться при «ухудшении» настройки.

Решение задачи синтеза САУ, адаптивного к изменению импеданса антенны, позволит обеспечивать устойчивость радиосвязи в различных условиях эксплуатации.

Цель работы заключается в решении вопросов синтеза САУ, адаптивного в реальном времени к изменению импеданса нагрузки.

Анализ известных технических решений построения адаптивных САУ

Преимущественное распространение получили САУ с согласующими органами на дискретных элементах. Адаптивные САУ представляют собой систему с обратной связью, анализирующую качество согласования и подстраивающую свои элементы в сторону улучшения согласования. Существует ряд работ в области построения и исследования адаптивных цепей согласования, например, [13, 14], а также Полушин П. А., Самойлов А. Г., Самойлов С. А. Адаптация цепей согласования импеданса высокочастотных нагрузок // Симпозиум с международным участием Аэрокосмические приборные технологии. Москва, 1999. С. 34-35; Самойлов А. Г., Самойлов С. А. Концепция согласования радиопередающих устройств с нагрузками // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7, № 9. С. 127–131. Основное отличие данных работ состоит в алгоритме поиска оптимального значения элементов согласующей цепи. Подходы к синтезу согласующих цепей делятся на две группы – на аналитические и численные методы.

На практике частотные зависимости входного импеданса антенны оказываются очень сложными. В связи с этим характеристики антенны представляют в виде массива числовых значений импеданса, измеренных на заданных частотах. При таком представлении антенны целесообразно использовать численные методы синтеза согласующих цепей, основанные на методах оптимизации. Как правило, САУ синтезируется на основе методики вещественных частот с параметрическим представлением знаменателя действительной части функции сопротивления согласующей цепи – *real frequency parametric approach* (Yarman B.S. Design of ultra wideband antenna matching networks // Istanbul Springler, 2008, p. 308). Алгоритм работы данного метода сложен, хотя и не требует этапа дробно-рациональной аппроксимации и преобразования Гильберта.

В работе Самойлова А. Г., Самойлова С. А. «Концепция согласования радиопередающих устройств с нагрузками» (Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7, № 9) обсуждается концепция согласования генераторов высокой частоты с нестационарными нагрузками. Предложен метод адаптивного согласования, основанный на анализе амплитудно-фазовых соотношений отраженного от нагрузки сигнала и непрерывной подстройки управляемой цепи согласования. Рассмотрены пути практической

реализации САУ, функционирующих с изменяющимися во времени нагрузками. Приводятся результаты экспериментальных исследований. Результаты экспериментов показали, что потери высокочастотной энергии при передаче ее в переменную нагрузку снижаются более чем на 10 дБ, при дискретных и плавных изменениях нагрузки в диапазоне от 10 до 1000 Ом.

В этих работах изложен замысел, базирующийся на использовании адаптивных цепей согласования импедансов. Его суть заключается в том, что на выходе передатчика устанавливается управляемая цепь САУ. Устройство управления цепью согласования, анализируя поступающие от введенного в выходной тракт передатчика двунаправленного ответвителя, вырабатывает сигналы, изменяющие характеристики цепи согласования. При этом выходной импеданс цепи САУ перестраивается до тех пор, пока не произойдет его полное согласование с изменившимся сопротивлением нагрузки.

В качестве таких цепей используются Г-образные четырехполюсники на реактивных элементах. Для построения регулируемых цепей согласования в их ветвях используются перестраиваемые реактивные элементы – варикапы. Г-образные цепи имеют всего два органа согласования и в случае плавного изменения их параметров обеспечивают единственный вариант согласования. Возможны различные методы управления такой перестраиваемой цепью согласования: с последовательной подстройкой с разнесением регулировки каждой ветви по времени и параллельной – с одновременной регулировкой по двум каналам [15–18]. Эти методы не пригодны для цепей согласования с числом органов более двух, и не могут быть реализованы в мощных дискретных устройствах.

Новый подход к настройке и обеспечению собственной адаптации дискретных САУ

Наибольший интерес представляет расчетный метод согласования с использованием метода быстрого поиска геометрической близости точек, описанный в работе [19]. При его использовании скорость настройки САУ на текущей рабочей частоте ограничена только временем однократной смены состояния дискретного силового контура, что в случае применения электромагнитных реле численно равно их времени переключения.

Итак, современные САУ должны быть автоматизированными, обеспечивать весьма широкий диапазон согласуемых комплексных нагрузок и быть адаптивными, способными автоматически подстраиваться при изменениях

нагрузки из-за ее нестабильности. Весь комплекс указных требований может быть выполнен (необходимое условие) при использовании дискретно переключаемых САУ с бинарными наборами элементов.

Дискретные органы согласования обеспечивают необходимую скорость настройки САУ, что очень важно при адаптации системы в реальном масштабе времени. Вместе с тем это позволяет получить значительные вариации значений органов согласования, что необходимо для расширения диапазона согласуемых комплексных нагрузок.

Для обеспечения собственной адаптивности САУ одного коммутационного способа перестройки недостаточно, требуются дополнительные меры. Первостепенной из них является использование способного измерять фазу с точностью до знака измерителя коэффициента бегущей (стоячей) волны – $K_{с.в}$ или $K_{с.в}$, или измерителя импедансов. Такие индикаторы позволяют измерять как амплитуду, так и фазу коэффициента отражения или импеданс нагрузки со знаком реактивной составляющей, что дает всю необходимую информацию о ее импедансе и обеспечивает возможность автоматической настройки САУ. Вопросы построения таких измерителей в данной статье не рассматриваются. В упрощенном виде схема такого варианта построения передающего антенно-фидерного тракта показана на рисунке 1. Измеритель входного импеданса включен каскадно непосредственно на входе САУ. Включать его на выходе САУ нецелесообразно, поскольку в этом сечении действуют высокие напряжения. К примеру, при уровне выходной мощности 100 Вт на входе антенны ВЧ напряжение может достигнуть ≈ 3 кВ. Получаемые с его помощью данные об импедансе нагрузки передаются в управляющую ЭВМ, которая вычисляет требуемую комбинацию органов согласования САУ и выдает соответствующие команды управления.

Для реализации вычислительных алгоритмов автоматической настройки весьма важно уметь измерять входной импеданс антенны. Заметим, что коэффициент стоячей волны $K_{с.в}$ реальных антенн может достигать значений в две сотни единиц. В случае выбранного варианта построения антенно-фидерного тракта возможен только косвенный способ измерения. После измерения на рабочей частоте входного импеданса каскадно соединенных САУ и антенны (в сечении A) потребуется сделать пересчет в сечение B . Для реализации потребуется знать трансформирующие свойства той комби-

нации органов согласования САУ, которая была включена при измерении. И, следовательно, сохранять в памяти управляющей ЭВМ огромное количество матриц S -параметров для всего диапазона рабочих частот с некоторым дискретным шагом.

Возникает вопрос о выборе комбинации САУ для измерений. Интуитивно понятно, что луч-

шим вариантом будет так называемый нулевой, при котором все разряды будут выключены (при выведении всех элементов в нуль). Данная комбинация САУ не имеет частотных ограничений, к тому же имеет самые низкие потери. Согласующая цепь, построенная по типу П-образного контура в нулевом положении, представлена на рисунке 2.

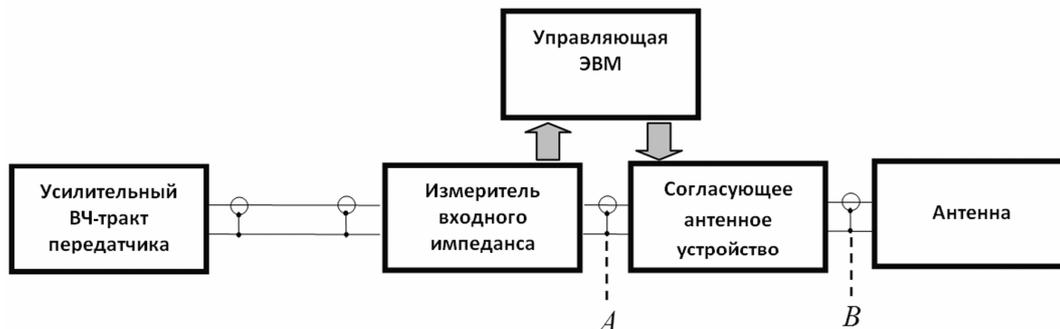


Рис. 1. Схема варианта построения антенно-фидерного тракта

Fig. 1. Diagram of the antenna-feeder path construction option

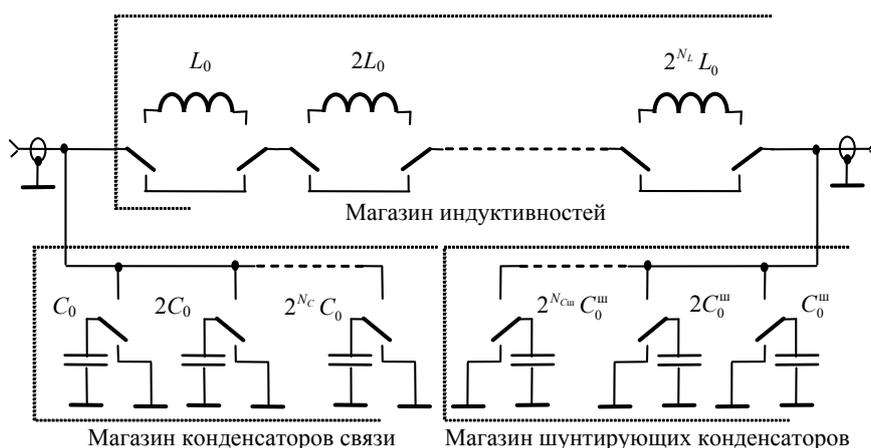


Рис. 2. Схема согласующего контура в выключенном состоянии

Fig. 2. Antenna tuning unit circuit in off state

Существенный недостаток косвенного измерения импеданса состоит в необходимости пересчета импеданса из сечения A в сечение B схемы, представленной на рисунке 2. Процедура пересчета с использованием комплексных чисел довольно сложна и занимает некоторое время. С целью исключения этого негативного момента предлагается новый подход.

Идея предлагаемого способа настройки, исключающего процедуру пересчета входного импеданса антенны

В способе настройки САУ по методу быстрого поиска геометрической близости точек используется набор частотных карт вариантов настроек. Эти карты могут быть построены для

сечения B в соответствии с матричной моделью силового контура, описанной в статье [20]. Натурные измерения S -параметров всех возможных комбинаций силового контура САУ на множестве рабочих частот выполняются с помощью векторного анализатора цепей. После пересчета S -параметров в окрестности, ограничивающие области возможного согласования входных импедансов антенны с заданным качеством, формируются высокоточные карты.

Предлагается эти карты пересчитать в сечение A с учетом искажающего влияния нулевой комбинации силового контура. В этом случае поиск ближайших точек на искаженной карте будет свободен от пересчета результатов

измерения. Это существенно упростит вычислительный процесс настройки САУ и незначительно усложнит процедуру формирования карты. При сокращенной записи выражение для последовательного применения двух дробно-линейных преобразований результирующее, записанное в T -параметрах, будет выглядеть $T_{\text{рез}}(N) = T(0) \times T(N)^{-1}$.

Помимо этого, предлагаемый способ аналогичным образом позволяет с целью повышения точности учесть систематическую погрешность измерителя импедансов (Савин А. А., Губа В. Г. Определение уровня остаточной систематической погрешности векторного анализатора цепей после выполнения однопортовой калибровки // Вестник метролога. 2009. № 4). Контроль систематической погрешности измерителя импедансов достигается применением разнообразных методов калибровки, их краткий математический аппарат и рекомендации по применению приведены в работе «Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей» (Губа В. Г., Ладур А. А., Савин А. А. Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 1). При построении аппарата калибровки коррекции измерений полагают, что существует идеальная (неискажающая) часть измерителя, а все погрешности сводят в линейные искажающие четырехполюсники. Очевидно, что параметры искажающих четырехполюсников не должны меняться во времени.

В нашем случае приемлемым способом калибровки будет основанный на использовании трех эталонных нагрузок: холостого хода (XX), короткого замыкания (КЗ), согласованной нагрузки (СН), называемый в литературе SOL (от англ. Short, Open, Load). Способ заключается в следующем. С помощью измерителя, порт которого требуется откалибровать, проводят измерения в диапазоне рабочих частот комплексных коэффициентов отражения трех эталонных нагрузок – КЗ, XX и СН, присоединяя их по очереди к калибруемому порту. Сравнивая измеренные комплексные коэффициенты отражения нагрузок КЗ, XX и СН с их эталонными значениями, которые известны заранее, определяют параметры искажающего четырехполюсника $e_{00}, e_{01}, e_{10}, e_{11}$. Его иногда называют четырехполюсником ошибок; рисунок 3 иллюстрирует его расположение в схеме измерений.

При создании частотных карт вариантов настроек САУ с целью исключения процедуры пересчета, вызванной четырехполюсником ошибок, его влияние следует учесть аналогич-

ным образом, как и нулевую комбинацию САУ, выразив ошибку через T -параметры.

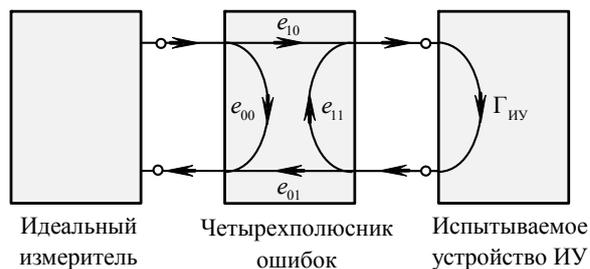


Рис. 3. Искажающий четырехполюсник с элементами ошибок

Fig. 3. Distorting quadripole with error elements

Перейдем к обсуждению вопроса подстройки САУ при изменении импеданса нагрузки. Обратимся к устройству, описанному в патенте на полезную модель RU 2747575 С1 (АО «Концерн «Созвездие»). В нем предложено техническое решение построения помехозащищенной передающей системы с автоматическим устройством согласования на дискретных элементах, состоящих из магазинов емкостей и индуктивностей. Изобретение может быть использовано в коротковолновом диапазоне. Заявленное устройство осуществляет подстройку автоматического САУ в режиме передачи при изменении импеданса нагрузки. Переключение дискретных органов САУ обеспечивает микропроцессорное устройство: оно определяет, какие именно дискретные элементы нужно коммутировать для обеспечения требуемых значений индуктивности и емкости в цепи согласования. Микропроцессорное устройство также формирует соответствующие команды управления САУ. После этого САУ осуществляет трансформацию импеданса антенны к выходу усилительного ВЧ-тракта. Данная процедура повторяется до тех пор, пока процесс настройки не придет в установившееся положение.

Недостатком данного решения является значительная продолжительность процесса перестройки САУ в связи с последовательным (последовательным) набором малыми приращениями необходимых значений перестраиваемых дискретных органов согласования. Указанный недостаток становится существенным в радиолиниях с быстрым изменением рабочей частоты во время сеанса связи. Задачей статьи является значительное сокращение времени настройки при смене рабочей частоты и перестройки САУ при изменении импеданса нагрузки.

Напомним, что под адаптивным устройством согласования комплексной нагрузки с радиотехническим устройством понимается система с отрицательной обратной связью, анализирующая качество согласования и подстраивающая свои элементы в сторону улучшения согласования. Чтобы предельно быстро оценивать изменения импеданса антенны в режиме передачи без пересчета, потребуется создание частотных карт настроек для всех возможных комбинаций САУ, как для «нулевого» состояния при настройке. Безусловно, трансформирующие свойства многих комбинаций потребуют учета частотных ограничений, что незначительно усложнит расчет. Создание частотных карт для всех комбинаций органов САУ – задача супермасштабная, но зато позволяет получить полный набор поведенческих моделей САУ для любой рабочей частоты. Данный подход по адаптивному согласованию нагрузки обладает такими преимуществами, как высокая скорость измерения, быстрая подстройка САУ и легкая интеграция в приемопередающую технику ДКМВ-диапазона. Подобная технология близка к понятию цифрового двойника и позволяет сложное устройство сделать более управляемым и предсказуемым.

**Дополнительные замечания
по реализации алгоритмов
с использованием быстрого поиска
геометрической близости точек**

С помощью САУ обеспечивается согласование комплексного сопротивления нагрузки (антенны) и источника сигнала. Для этого между источником высокочастотного сигнала и нагрузкой включают согласующее устройство, представляющее собой четырехполосник, параметры которого выбирают из условия обеспечения минимума отраженного сигнала на его входе, при этом с целью исключения потерь четырехполосник выполняют комплексным из реактивных элементов с высокой добротностью.

При выполнении приведенных условий величина коэффициента бегущей волны в линии близка к единице, и по всему тракту устанавливается режим бегущих волн, при котором обеспечиваются наилучшие условия передачи мощности сигнала от генератора в нагрузку.

Реактивные четырехполосные цепи используются для узкополосного согласования активного сопротивления генератора с комплексным сопротивлением нагрузки. При реализации алгоритмов подбора четырехполосника с требуемыми трансформирующими свойствами с использованием быстрого поиска геометрической

близости точек разработчику нет необходимости контролировать процесс выбора структуры цепей, а также значения всех элементов цепи. Это дает возможность получить простые практически реализуемые решения.

Предложенный вычислительный способ настройки САУ позволяет осуществить согласование с некоторым заданным качеством и из нескольких вариантов выбрать лучший, например, по уровню потерь. Но сравнить варианты настройки по критерию минимального коэффициента отражения не представляется возможным. Это обусловлено сокращением объема сохраняемых данных вместо S -параметров, которые представляют четыре комплексных числа, сохраняются только координаты центра окружности и ее радиус. В итоге вместо восьми чисел достаточно запомнить только три.

Прибегнуть к методам быстрого поиска геометрической близости точек в предложенных алгоритмах пришлось по причине невозможности сравнения матриц S -параметров между собой. При разработке алгоритмов настройки в качестве метрики была выбрана евклидова (Euclidean distance). Расстояние между двумя точками евклидова пространства вычисляется по теореме Пифагора. Это расстояние по прямой между двумя точками на декартовой плоскости, формула расстояния имеет вид

$$Dist(P, P') = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

Заметим, что выбор евклидовой метрики и декартовой плоскости в данном случае не является абсолютно строгим. Поясним это на примере. Рассмотрим на комплексной плоскости три вещественные точки: $P_1 = (25 + j0)$; $P_2 = (50 + j0)$ и $P_3 = (100 + j0)$. В случае генератора с внутренним сопротивлением 50 Ом точки P_1 и P_3 соответствуют одному качеству согласования – коэффициент стоячей волны $K_{св} = 2$. Вместе с тем дистанция между точками P_1 и P_3 вдвое больше, чем между P_2 и P_1 .

Основной проблемой в технике согласующих антенных устройств является выбор схемы между высокочастотным генератором и нагрузкой (передающей антенной). При узкополосном согласовании требуется, чтобы на определенных частотах к нагрузке подводилась вся отдаваемая генератором мощность, а на других частотах между нагрузкой и генератором обеспечивался разрыв. В радиопередающих устройствах эти схемы должны создавать оптимальные условия для генерирования и усиления мощности и максимальной ее передачи в антенну.

Трудности решения этой задачи обусловлены частотной зависимостью входного импеданса антенны, значительными пределами изменения в диапазоне частот его вещественной и мнимой частями.

В целях энергетического анализа передающие устройства могут быть условно разделены на два класса: генераторы напряжения и генераторы тока. К сожалению, ни один из реальных типов усилителей мощности ДКМВ-радиопередатчиков не может в полной мере быть отнесен к этим классам.

Для определенности выберем в качестве эквивалентной схемы усилителя генератор постоянного напряжения с ЭДС U_r и постоянным внутренним активным сопротивлением R_r . Заметим, что в случае представления усилителя мощности эквивалентным генератором тока справедливыми окажутся все приводимые ниже формулы и выводы при условии замены в них сопротивлений на соответствующие значения проводимостей.

Важно обратить внимание на то, что любой реальный четырехполюсник, даже составленный из реактивных элементов, фактически будет характеризоваться потерями. Эти элементы, будучи сами по себе качественными и высокодобротными, тем не менее в совокупности с антенной при больших значениях своих номиналов могут внести значительные потери.

Целесообразно в вопросе выбора метрики опираться на энергетический подход. Для этого необходимо вспомнить некоторые положения кругогеометрической теории четырехполюсников (Вайсфлор А. Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах : пер. с нем. / под ред. М. А. Силаева. М. : Советское радио, 1961). Особую важность представляет дробно-линейное преобразование

$$K \equiv \omega = \frac{z - Z_0}{z + Z_0}, \text{ где } Z_0 - \text{некоторая положи-}$$

тельная действительная постоянная. Она лежит в основе круговой диаграммы Вольперта – Смита, с помощью которого бесконечную правую комплексную полуплоскость импедансов свернули в плоскость, ограниченную единичным кругом, отображающую комплексные коэффициенты отражения относительно центральной точки диаграммы (опорного импеданса Z_0).

На диаграмме кривые постоянного коэффициента отражения представляют собой концентрические окружности. Это означает, что при

всех значениях импеданса нагрузки линейного генератора с постоянным внутренним сопротивлением Z_0 , расположенных на одной и той же окружности семейства, от генератора поступает одна и та же активная мощность.

Таким образом, для измерения дистанции между двумя точками, характеризующими импедансы, необходимо путем замены системы координат одну из точек разместить в центре диаграммы, и тогда модуль вектора коэффициента отражения будет характеризовать расстояние до другой точки (в энергетическом смысле).

Перейдем к решению задачи преобразования системы координат, как на декартовой плоскости импедансов, так и в полярной системе диаграммы Вольперта – Смита. Напомним, что преобразование координат может трактоваться двояко. Пассивная точка зрения предполагает, что происходит смена координат точек многообразия, все точки при этом остаются на своих местах. Активная точка зрения – преобразование ставит в соответствие каждой точке многообразия другую точку.

Перейдем к детальному анализу на декартовой плоскости. Рассмотрим схему, изображенную на рисунке 4. Горизонтальная черта над символом указывает на то, что соответствующая величина является комплексно сопряженной.

Между генератором с постоянным внутренним сопротивлением R_r и электродвижущей силой U и нагрузкой (антенной) Z_A включим согласующий четырехполюсник с потерями, трансформирующие свойства которого на рабочей частоте описываются матрицей A -параметров

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \text{ Импеданс антенны } Z_A \text{ трансфор-}$$

мируется в сечении A в сопротивление $Z_{\text{вх}}^{\text{конт}}$ равное R_r : $Z_{\text{вх}}^{\text{конт}} = (AZ_A + B)/(CZ_A + D) = R_r$. Выходное сопротивление четырехполюсника в сечении B при этом будет $Z_{\text{вых}}^{\text{конт}} = (DZ_r + B)/(CZ_r + A)$.

Для сечения B может быть составлена эквивалентная схема (рис. 5, а), состоящая из генератора с внутренним сопротивлением $Z_r' = (DR_r + B)/(CR_r + A)$ и электродвижущей силой $|U'| = |U|/|CR_r + A|$ и непосредственно подключенного к нему сопротивления антенны Z_A .

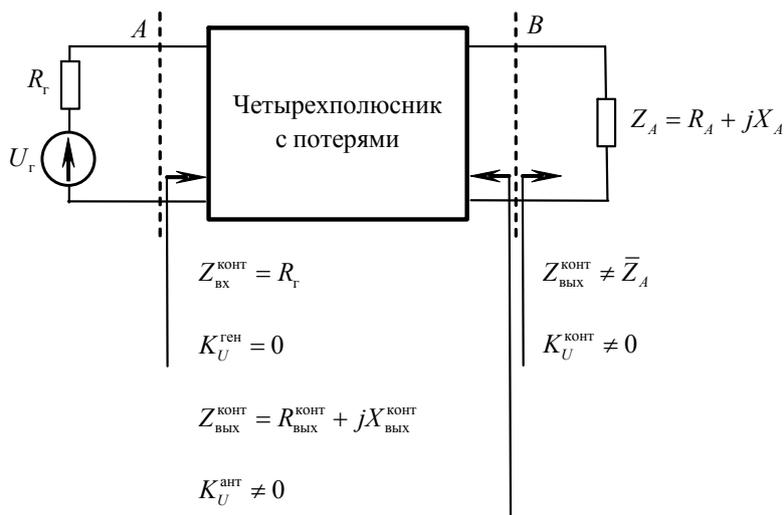


Рис. 4. Схема соединения генератора с антенной через четырехполюсник с потерями

Fig. 4. Connection diagram of the generator with the antenna using a four-port network with losses

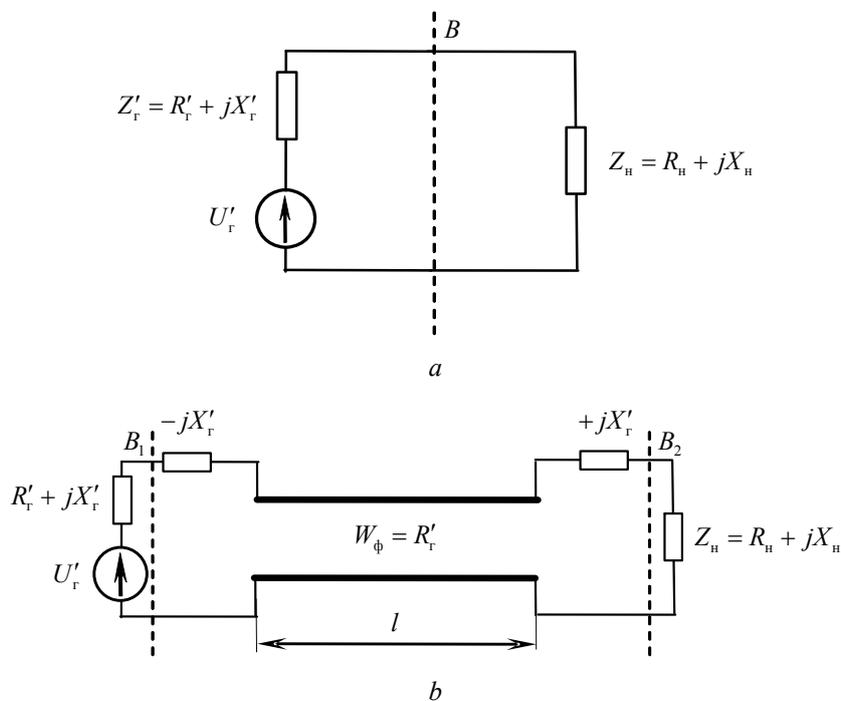


Рис. 5. Эквивалентная схема, используемая при расчете коэффициента согласования $K_{\text{сogl}}$

Fig. 5. Equivalent circuit used in calculating the matching coefficient K_{cal}

Воспользуемся известной теоремой (Вайсфлор А. Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах): «Если имеется генератор с постоянной ЭДС и постоянным внутренним сопротивлением Z_1 и к этому генератору подключено сопротивление нагрузки Z_2 , то при отдаче мощности в это сопротивление получается такой же коэффициент согласования, как если бы генератор имел внутреннее сопротивление Z_2 и сопротивление

нагрузки Z_1 », что позволит упростить дальнейшие расчеты.

Для расчета величины активной мощности, отдаваемой генератором с комплексным внутренним сопротивлением $Z'_g = R'_g + jX'_g$ в любое комплексное сопротивление нагрузки $Z_n = R_n + jX_n$, воспользуемся эквивалентной схемой, представленной на рисунке 5, b. Эта схема получается из схемы рисунка 5, a путем включения в нее четырехполюсника, состоящего из последова-

$$X_A = W_\phi \frac{K_U^{\text{ант}} - \bar{K}_U^{\text{ант}}}{|1 - K_U^{\text{ант}}|^2};$$

$$Z_K = W_\phi \frac{1 + K_U^{\text{конт}}}{1 - K_U^{\text{конт}}}; \quad R_K = W_\phi \frac{1 - |K_U^{\text{конт}}|^2}{|1 - K_U^{\text{конт}}|^2};$$

$$X_K = W_\phi \frac{K_U^{\text{конт}} - \bar{K}_U^{\text{конт}}}{|1 - K_U^{\text{конт}}|^2}.$$

Подставляя эти выражения в формулу коэффициента согласования получим

$$K_{\text{согл}} = \frac{(1 - |K_U^{\text{ант}}|^2)(1 - |K_U^{\text{конт}}|^2)}{|1 - K_U^{\text{ант}} K_U^{\text{конт}}|^2}.$$

Применим формулу для расчета коэффициента отражения, представленную в книге «Радиопередающие устройства» (Белов Л. А., Благовещенский М. В., Богачев В. М. [и др.] / под ред. М. В. Благовещенского, Г. М. Уткина. М.: Радио и связь, 1982):

$$K_U = \sqrt{1 - K_{\text{согл}}}.$$

Представленное выражение является строгой метрикой геометрической близости двух точек, характеризующих импедансы. При реализации метода настройки САУ с использованием быстрого поиска геометрической близости точек это выражение может быть рекомендовано для точного сравнения вариантов настроек.

Выводы

Техническим результатом предлагаемого инновационного способа настройки САУ являются упрощение, учет систематических погрешностей измерителя импеданса, исключение трудоемких вычислений с комплексными числами, расширение функциональных возможностей способа, сокращение продолжительности настройки и улучшение ее качества.

Новый подход способствует созданию устройств, обеспечивающих автоматическое согласование антенн ДКМВ-диапазона с выходом передатчика и осуществляющих при необходимости адаптивную подстройку при изменениях импеданса антенны вычислительным методом с использованием быстрого поиска геометрической близости точек (в беспереборном режиме silent tuning) за счет использования матричной модели силового контура САУ с результатами косвенных измерений импеданса антенны на рабочей частоте.

Практическая значимость состоит в том, что реализация предлагаемых технических решений в средствах связи ДКМВ-диапазона позволяет существенно (порядка в 100 раз) сократить продолжительность подготовки к проведению сеанса радиосвязи, снизить требования к ресурсу коммутационных элементов.

Обоснован энергетический подход в способе определения геометрической близости точек, предложена строгая метрика для определения расстояния между точками декартовой плоскости комплексных сопротивлений и на диаграмме Вольперта – Смита.

Все вышеизложенное позволяет говорить о существенном расширении функциональных возможностей предложенного способа по сравнению с известными.

Библиографические ссылки

1. Модель многоступенчатой адаптации низкоэнергетической радиолнии коротковолнового диапазона с учетом затрачиваемых ресурсов радиолнии и прогнозирования сигнально-помеховой обстановки / А. Е. Алекаев, В. А. Липатников, Р. Ю. Ряскин, Ю. А. Капкин // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 158–183.
2. Климов И. 3. Принципы построения эффективной системы передачи информации в декаметровом диапазоне радиоволн: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. 268 с. : ил.
3. Ковалевич Д. А. Антенные согласующие устройства для коротковолновых систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Новости науки и технологий. 2019. № 4. С. 54–57.
4. Листопад Н. И., Ковалевич Д. А. Методика синтеза согласующих устройств для мобильных систем связи КВ-диапазона // Новости науки и технологий. 2020. № 4 (55). С. 17–25.
5. Зиновьев А. Г., Шестаков И. А. Выходная колебательная система коротковолнового передатчика, согласованная с антенной // Техника радиосвязи. 2022. Вып. 2 (53). С. 66–78.
6. Адаптивное согласование широкополосных радиотехнических устройств к изменяющемуся импедансу нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев, М. А. Янцевич // Новости науки и технологий. 2019. № 4. С. 50–53.
7. Ковалевич Д. А. Использование расчетного способа согласования антенны с учетом конечной точности измерителя иммитанса // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2021. № 6 (129). С. 134–140.
8. Ковалевич Д. А. Моделирование процесса согласования автоматических антенных согласующих устройств коротковолнового диапазона // Сборник научных статей БГУИР. 2019. С. 79–80.
9. Ковалевич Д. А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика //

Сборник научных статей БГУИР. 2021. № 19 (3). С. 31–39.

10. Бойкачев П. В., Дубовик И. А., Исаев В. О. Метод синтеза широкополосных устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности, согласующих изменяющийся во времени импеданс нагрузки // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 5. С. 1–27.

11. Дубовик И. А., Бойкачев П. В., Исаев В. О. Комплексный критерий синтеза широкополосных согласующих устройств на основе инварианта чувствительности // Информационные радиосистемы и радиотехнологии. 2020. С. 41–44.

12. Дубовик И. А. Согласующая цепь для широкополосного антенного устройства радиостанции Р-180 на основе инварианта чувствительности функции коэффициента отражения // Сборник научных трудов НИИ ВС. 2020. № 2 (10). С. 111–120.

13. Бойкачев П. В., Дубовик И. А., Исаев В. О. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ВЧ/ОВЧ-диапазонов // Вестник ВАРБ. 2019. № 2 (63). С. 32–40.

14. Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев, А. А. Дмитриенко // Сборник научных статей БГУИР. 2021. № 19 (1). С. 61–69.

15. Жуков В. М. Информационно-управляющая система антенным согласующим устройством с распределенными параметрами элементов настройки // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 4 (36). С. 79–87.

16. Жуков В. М., Муромцев Д. Ю. Метод синтеза мостовых измерителей и датчиков для информационно-измерительных и управляющих систем антенными согласующими устройствами // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 3 (51). С. 128–134.

17. Варламов О. В. Максимальная мощность коммутируемого р-и-п-диодами антенно-согласующего устройства диапазона ВЧ при рассогласовании // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 10. С. 26–32.

18. Varlamov O.V. and Gromorushkin V.N. (2020) High Efficiency Power Amplifier for IoT Application: RF Path: System of Signals: Generating and Processing in the Field of on Board Communication, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-10.

19. Извольский А. А. Эффективные алгоритмы настройки дискретных согласующих антенных устройств ДКМВ-диапазона с использованием быстрого поиска геометрической близости точек // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 1. С. 89–101. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-89-101

20. Извольский А. А. Матричная модель дискретных органов настройки согласующего антенного устройства ДКМВ-диапазона вычислительного типа // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 63–72. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-63-72

References

1. Alekaev A.E., Lipatnikov V.A., Ryaskin R.Yu., Kapkin Yu.A. (2020) [Model of multi-stage adaptation of low-energy shortwave radio link taking into account the expended resources of the radio link and forecasting the signal-interference situation]. // *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 3, pp. 158-183 (in Russ.).

2. Klimov I.Z. (2017) *Principy postroeniya jeffektivnoj sistemy peredachi informacii v dekametrovom diapazone radiovoln* [Principles of constructing an effective information transmission system in the decameter range of radio waves: monograph]. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 268 p. (in Russ.).

3. Kovalevich D.A. (2019) [Antenna matching devices for shortwave communication systems with pseudo-random frequency hopping]. *Novosti nauki i tekhnologii*, no. 4, pp. 54-57 (in Russ.).

4. Listopad N.I., Kovalevich D.A. (2020) [Methodology for synthesizing matching devices for mobile communication systems in the HF range]. *Novosti nauki i tekhnologii*, no. 4, pp. 17-25 (in Russ.).

5. Zinov'ev A.G., Shestakov I.A. (2022) [Output oscillatory system of a shortwave transmitter matched with an antenna]. *Tekhnika radiosvyazi*, no. 2, pp. 66-78 (in Russ.).

6. Dubovik I.A., Boikachev P.V., Isaev V.O., Yantsevich M.A. (2019) [Adaptive matching of broadband radio devices to changing load impedance], *Novosti nauki i tekhnologii*, no. 4, pp. 50-53 (in Russ.).

7. Kovalevich D.A. (2021) [Using the calculation method of antenna matching taking into account the finite accuracy of the immittance meter]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny*, no. 6, pp. 134-140 (in Russ.).

8. Kovalevich D.A. (2019) [Modeling the process of matching automatic antenna matching devices of the shortwave range]. *Sbornik nauchnykh statei BGUIR*, pp. 79-80.

9. Kovalevich D.A. (2021) [Method of automatic matching of antenna and transmitter output stages]. *Sbornik nauchnykh statei BGUIR*, no. 19, pp. 31-39 (in Russ.).

10. Boikachev P.V., Dubovik I.A., Isaev V.O. (2021) [Method for synthesizing broadband devices with optimal power conversion coefficient characteristics matching time-varying load impedance]. *Zhurnal radioelektroniki*, no. 5, pp. 1-27 (in Russ.).

11. Dubovik I.A., Boikachev P.V., Isaev V.O. (2020) [Complex criterion for the synthesis of broadband matching devices based on the sensitivity invariant]. *Informatsionnye radiosistemy i radiotekhnologii*, pp. 41-44 (in Russ.).

12. Dubovik I.A. (2020) [Matching circuit for the broadband antenna device of the R-180 radio station based on the sensitivity invariant of the reflection coefficient function]. *Sbornik nauchnykh trudov NII VS*, no. 2, pp. 111-120 (in Russ.).

13. Boikachev P.V., Dubovik I.A., Isaev V.O. (2019) [Results of the study of the influence of operating conditions on the impedance of antenna devices of HF/VHF

radio stations]. *Vestnik VARB*, no. 2, pp. 32-40 (in Russ.).

14. Dubovik I.A., Boikachev P.V., Isaev V.O., Dmitrienko A.A. (2021) [Methods of Synthesis of Matching Circuits for Broadband Radiotechnical Devices with Unstable Load Impedance]. *Sbornik nauchnykh statei BGUIR*, no. 19, pp. 61-69 (in Russ.).

15. Zhukov V.M. (2020) [Information and control system of an antenna matching device with distributed parameters of tuning elements]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*, no. 4, pp. 79-87 (in Russ.).

16. Zhukov V.M., Muromtsev D.Yu. (2020) [Method of synthesis of bridge meters and sensors for information-measuring and control systems with antenna matching devices]. *Prikladii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, no. 3, pp. 128-134 (in Russ.).

17. Varlamov O.V. (2020) [Maximum power of the switched p-i-n diodes of the antenna matching device of

the HF range with a mismatch]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, vol. 14, no. 10, pp. 26-32 (in Russ.).

18. Varlamov O.V. and Gromorushkin V.N. (2020) [High Efficiency Power Amplifier for IoT Application: RF Path]. *System of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communication*, pp. 1-10 (in Russ.).

19. Izvolsky A.A. (2024) [Advanced Algorithms for Configuring Discrete Antenna Tuning Units of High Frequency Band Using a Quick Search Method for the Points Geometric Proximity]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 1, pp. 89-101 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-89-101

20. Izvolsky A.A. (20234) [The Matrix Model of Discrete Matching Elements for HF Computational Automatic Tuning Units]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 25, no. 4, pp. 63-72 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-63-72

Adaptive Matching of Discrete Antenna Tuning Units of High Frequency Band to Varying Load Impedance

A.A. Izvolsky, PhD in Engineering, 18th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia

The issue of matching the antenna with the transmitter-receiver plays a primary role in radio communications. The matching problem is relevant for different ranges and is solved in many ways. In the high frequency wave range, matching has a number of features when using an antenna coupler based on discrete elements consisting of capacitance and inductance boxes. The article discusses the concept of fast matching of high-frequency amplifying paths of decimetric wave transceivers with non-stationary loads using discrete antenna couplers. An innovative approach has been developed to the tuning process when changing the operating frequency and ensuring self-adaptation of the antenna coupler when changing the impedance, based on methods for quickly searching for the geometric proximity of points. A quick method for configuring the antenna coupler is proposed, eliminating the procedure for recalculating the input impedance based on the results of measuring the input impedance of the antenna coupler. When using it, the speed of setting the antenna coupler at the current operating frequency is limited only by the time of a single state change of the discrete power circuit, which in the case of electromagnetic relays is numerically equal to their switching time. The configuration of the antenna coupler using the method of fast search for the geometric proximity of points is based on a set of frequency cards with settings options. Such cards can be recalculated for the reference plane between the generator and the antenna coupler input for all combinations of discrete elements in accordance with the known matrix model of a discrete power circuit. This eliminates the complicated procedure of recalculating the input impedance of the antenna using complex numbers. The technical result of the proposed innovative method of antenna coupler configuration is simplification, tracking of systematic errors of the impedance meter, elimination of time-consuming calculations with complex numbers, expansion of the method functionality, reduction of the tuning duration and improvement its quality. The practical significance lies in the fact that the implementation of the proposed technical solutions in the high frequency range communications means can significantly (about 100 times) limit the duration of preparation for a radio communication session, eliminate the procedure for recalculating the antenna input impedance and reduce the resource requirements of switching elements.

Keywords: antenna tuning units, impedance, fine tuning, adaptation, radio-transmitting devices.

Получено 20.05.2024

Образец цитирования

Изво́льский А. А. Адаптация дискретных согласующих устройств ДКМВ-диапазона к изменяющемуся импедансу нагрузки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 2. С. 58–69. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-58-69

For Citation

Izvolsky A.A. (2024) [Adaptive Matching of Discrete Antenna Tuning Units of High Frequency Band to Varying Load Impedance]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 58-69 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-58-69