ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ АДАПТАЦИЕЙ

А.Е. Алекаев, Д.Н. Чубатый, Р.Ю. Ряскин

*Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники,
Череповец, Российская Федерация*

Рассмотрена функциональная модель построения адаптивной радиосвязи как системы связи с многоступенчатой адаптацией (СМА). Предложен метод многокритериальной оценки эффективности функционирования СМА путем преобразования натуральных значений частных параметров в единую безразмерную шкалу с применением функции Е.С. Харрингтона. Описана процедура обобщения качественных показателей системы, ведущая к единому (интегральному) показателю качества.

Ключевые слова: эффективность, помехоустойчивость, адаптивная радиосвязь, многоступенчатая адаптация, интегральный показатель качества.

PERFORMANCE EVALUATION MULTISTAGE ADAPTATIVE COMMUNICATION SYSTEM

A.E. Alekaev, D.N. Chubaty, R.Y. Ryaskin

*Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics,
Cherepovets, Russian Federation*

The article considers the functional model of building adaptive radio links as a multistage adaptive communication system (MSACS). The SMACS multi criterion performance assessment method has been proposed by transforming natural values of private settings in a single, none-size scale using the function of E.S. Harrington. The procedure of generalization of system quality indexes, leading to a single (integrated) quality index is described.

Keywords: efficiency, noise-immunity, adaptive radio link, multistage adaptation, integrated quality index.

Введение

Новые системы управления, основанные на сетцентрических принципах, все шире описываются в современной теории, и основой таких систем управления почти всегда является подсистема связи. Сложные условия функционирования систем связи, а также развитие современной науки и техники и применение методов цифровой обработки сигналов предъявляют высокие *требования по своевременности, достоверности и безопасности* всех видов связи. В связи с этим актуальным является реализация новых направлений решения задач повышения их помехоустойчивости.

Применение адаптивных радиосвязей (АРЛ) в настоящее время является одной из ведущих тенденций развития систем радиосвязи. Это обусловлено более высокими показателями эффективности АРЛ по сравнению с неадаптивными радиосвязями. Данное направление адаптации по различным параметрам и структуре радиосвязей требует наличия оптимальных алгоритмов адаптации с точки зрения основных показателей эффективности радиосвязи. В свою очередь, построение таких алгоритмов предполагает разработку методов их построения и методик оценки основных показателей эффективности АРЛ.

Постановка задачи

В настоящее время в системах связи имеются самоприспосабливающиеся к условиям ведения связи адаптивные радиосвязи (АРЛ), в которых процесс управления параметрами

автоматизирован. Примером таких динамических систем являются радиолинии, имеющие в своем составе средства связи, обладающие набором определенных ресурсов, таких как рабочая частота, скорость передачи информационных символов или мощность радиопередающих устройств, которые изменяются в процессе ведения связи для обеспечения необходимого превышения сигнал/помеха (с/п) в точке приема. Эффективность таких радиолиний в большей мере зависит от степени автоматизации операций (алгоритма) по смене и выбору изменяемого параметра.

Необходимо отметить, что в сложных условиях радиоэлектронной обстановки недостаточно использования какого-либо одного адаптивного ресурса [1]. Поэтому, задачей повышения помехоустойчивости АРЛ является реализация адаптивных алгоритмов их функционирования, учитывающих одновременно несколько параметров адаптации, а в некоторых случаях и селективные свойства антенных систем, различные способы разделения частотно-территориальных ресурсов радиоэлектронных средств (РЭС), а также структуру построения системы связи в целом. В этом случае описывать такую АРЛ необходимо как систему и рассматривать её как систему с многоступенчатой адаптацией (СМА), так как в такой единой системе алгоритм реализации адаптивных процедур будет иметь многоуровневый или многоступенчатый характер.

В целях качественного использования всех ресурсов радиолинии стоит задача по разработке новых и совершенствованию существующих методов оценки эффективности функционирования АРЛ, применяющих те или иные параметры адаптации (или же эти параметры применяются комплексно), причем оценка обязательно должна основываться на показателях качества, по которым однозначно можно оценить, насколько система отвечает требованиям по своевременности, достоверности и безопасности связи.

Следует заметить, что только совокупность всех составляющих оценки взаимосвязанных между собой, дополняющих друг друга и проявляющих себя как единая целостность качественных показателей системы связи дают возможность оценить эффективность применения адаптивных ресурсов в конкретных условиях для решения конкретных задач.

Однако, несмотря на то, что оценка эффективности адаптивных систем связи является актуальным инструментом при выборе конкретных технических решений, в настоящее время в отечественной науке и практике единый общепризнанный подход к ней отсутствует.

Задача оценки эффективности применения параметров адаптации в конкретных условиях заключается в том, чтобы объективно и всесторонне оценить систему, включая в анализ все существенные и несущественные, значимые и не очень, простые и сложные, количественные и качественные и прочей природы параметры. Соответственно, для расчета и оценки параметров таких систем необходимо использовать методы, способные решить многоуровневые или многокритериальные задачи.

Решение задачи

Эффективность – это комплексное операционное свойство целенаправленного процесса функционирования системы, характеризующее его приспособленность к достижению цели операции, в рамках данной статьи, реализуемой адаптивной системой радиосвязи [2; 3].

Понятие эффективности играет чрезвычайно важную роль в нашей деятельности. Это объясняется тем, что в общем случае возможные способы достижения поставленной цели обладают разной эффективностью. Поэтому их необходимо сравнить между собой и выбрать наилучший вариант, т. е. такой вариант адаптации, который имеет наибольшую эффективность. Именно в этом и заключается задача поиска оптимальных вариантов различных методик и образцов техники, принятия решения на применение адаптивного ресурса на любом уровне [4].

В каждом конкретном случае должен быть сформирован свой набор критериев и показателей эффективности, значения которых точно или приближённо оценивают альтернативные варианты действий.

Эффективность функционирования СМА можно представить сложной функцией, включающей в себя показатели качества связи – Π_{KC} (своевременность, достоверность, безопасность), системные показатели – $\Pi_{СП}$ (функциональная готовность, мобильность, устойчивость, пропускная способность, разведзащищенность), показатели затрат ресурсов – $\Pi_{ЗР}$ (частотного, энергетического, пространственного, маршрутного и др.) и показатели качества управления – $\Pi_{КУ}$ (непрерывность, оперативность, точность).

В этом случае обобщенная функция эффективности СМА имеет вид

$$\mathcal{E}_{CMA} = \varphi\{\Pi_{KC}(t), \Pi_{СП}(t), \Pi_{ЗР}(t), \Pi_{КУ}(t)\}.$$

В нашем случае в качестве основной выделим функцию от показателей качества связи, а остальные отнесем в разряд ограничений, тогда обобщенная эффективность представляется как

$$\mathcal{E}_{CMA} = \varphi\{\Pi_{KC}(t)\} \quad \text{при} \quad \Pi_{СП}(t), \Pi_{ЗР}(t), \Pi_{КУ}(t) = const.$$

Рассматривая показатель качества связи как частные показатели, описывающие свойства системы по достоверности, своевременности и безопасности, обобщенную эффективность можно представить в виде

$$\mathcal{E}_{CMA} = \varphi\{\Pi_C(t), \Pi_D(t), \Pi_B(t)\},$$

где $\Pi_C(t)$ – показатель своевременности связи; $\Pi_D(t)$ – показатель достоверности связи, $\Pi_B(t)$ – показатель безопасности связи.

Для проведения систематического исследования СМА необходимо задать обобщенную структурную схему такой системы с взаимозависимой адаптацией её компонент, являющихся элементами структуры радиолинии. Необходимо отметить, что в процессе построения схемы целесообразно исследовать не саму систему, а процесс, который она реализует, разложив этот сложный процесс на элементарные процессы по уровням эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) [5].

Наиболее универсальным подходом к представлению сложных систем является агрегативный подход, при котором сложная система может быть разложена на взаимосвязанные подсистемы, удобные для математического описания и представлена в виде многоуровневой системы [6]. В соответствии с данным подходом функциональную модель СМА можно представить в виде схемы, отражающей уровни СМА с позиции ЭМВОС (см. рис.), где A_Φ , A_K , A_C – агрегаты физического, канального и сетевого уровней модели, A_y и A_a – агрегаты управления и анализа, A_{BB} – агрегаты, моделирующие внешние воздействия и условия окружающей среды.

Функциональная модель СМА с позиции ЭМВОС

Устройства, входящие в состав агрегатов, могут реализовывать различные виды адаптации системы, причем каждое на своем уровне (пространственно-временная селекция, мощность передачи, скорость передачи, вид сигнально-кодовой конструкции, маршрут доставки сообщения) или их комбинации. Каждое устройство имеет набор определенных ресурсов, применение которых позволяет достигать требуемых критериев качества.

От количества ресурсов зависит число возможных вариантов построения систем с многоступенчатой адаптацией, определяемых совокупностью применения ресурсов. Все варианты различны не только по структуре, но и по достигаемому качеству выходного сигнала и затратам на реализацию. Поэтому в общем случае требуются исследование всех возможных вариантов построения СМА и выбор оптимального для каждой сигнально-помеховой ситуации [7].

Для оценки показателей качества системы по достоверности своевременности и безопасности необходимо сопоставить их с физическими величинами, которые можно измерить и которые количественно будут характеризовать качество радиолинии, давать оценку её параметров и т. д. Такими величинами являются [8]:

$P_{\text{пр}}$ – вероятность приема при условии $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}$ (соответствует показателю достоверности);

$T_{\text{пер}}$ – время передачи сообщения (соответствует показателю своевременности);

$P_{\text{зо}}$ – вероятность энергетического обнаружения источника (соответствует показателю безопасности).

Каждый из показателей имеет свой физический смысл и разную размерность, поэтому необходимо все показатели качества обобщать в единый признак. Только совокупность этих признаков дает возможность оценить эффективность системы в конкретных условиях для решения конкретных задач.

В этом случае, для сравнимости признаков, требуется введение некоторой безразмерной шкалы, которая будет однотипной для всех показателей.

Наиболее компромиссным решением для такого рода многофакторных задач является процедура обобщения параметров, ведущая к единому параметру оптимизации. При этом всё должно сводиться в один специально сконструированный итоговый показатель (единый для всех показателей), чтобы дать понятную, объективную и однозначную оценку функционирования системы.

Итоговый (интегральный) показатель качества должен удовлетворять ряду требований, предъявляемых к параметрам адаптации, а именно он должен быть [9]:

- количественным (задаваться числом);
- единым (выражаться одним числом);
- однозначным, т. е. заданному набору значений учитываемых показателей в оценке (частных параметров оценки) должно соответствовать одно значение итогового показателя;
- универсальным, т. е. способным всесторонне охарактеризовать объект;
- соответствовать требованию полноты, т. е. быть достаточно общим, неспецифичным, характеризовать объект как единое целое.

В основе сравнения всех показателей лежит преобразование натуральных значений частных параметров различной физической сущности и размерности в единую безразмерную шкалу. Назначение шкалы заключается в установлении соответствия между параметрами адаптации (ресурсами системы) и показателями качества. Значения на шкале для отдельных показателей необходимо устанавливать по имеющимся стандартам.

Одним из способов построения такой шкалы является функция Е.С. Харрингтона, позволяющая в какой-то степени моделировать процесс согласованного поведения отдельных подсистем единого целого, учитывать связи и воздействия между ними при решении поставленной задачи выбора из совокупности существующих альтернатив.

Отличительной особенностью данного метода является возможность применения иерархического принципа оценки параметров, т. е. разделения множества сравниваемых параметров на блоки. В таком случае сначала вычисляются частные показатели d_i каждого из параметров, затем они сводятся к среднему геометрическому по каждому блоку $D_{\text{бл}}$:

$$D_{\text{бл}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}.$$

Поскольку каждый блок может иметь разное число параметров, то затем блочные показатели объединяются в итоговый (интегральный) показатель $D_{ин}$:

$$D_{ин} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n D_{бл.i}}.$$

Важно отметить, что количество ступеней (блоков) может быть абсолютно любым, в зависимости от числа оцениваемых параметров. В данном случае, рассматривая СМА как многоуровневую модель с точки зрения ЭМВОС эффективность всей системы можно выразить через интегральный показатель $D_{СМА} = \sqrt[3]{D_{ф} D_{кан} D_{с}}$, где $D_{ф}$, $D_{кан}$ и $D_{с}$ общие показатели эффективности физического, канального и сетевого уровней адаптации.

Практическая значимость

Предложенная методика оценки эффективности функционирования СМА обладает следующими преимуществами:

- предложенная методика базируется на многомерном и комплексном подходе, она является максимально информативной и может учитывать множество факторов и условий функционирования радиолиний;

- оценка эффективности применения того или иного адаптивного ресурса имеет гибкий вычислительный алгоритм, реализующий возможности сведения всех частных размерных показателей радиолинии в комплексные показатели по каждому уровню СМА, а затем и в интегральный показатель состояния СМА в целом;

- методика характеризуется доступностью и простотой использования, так как для ее проведения применяется информация, полученная из различных источников. Следует отметить, что предложенный перечень показателей не является универсальным и может меняться в зависимости от задач подразделений, а также от вида и специфики функционирования радиолиний;

- универсальность данной методики позволяет оценивать эффективность применения различных алгоритмов адаптации и сравнивать их друг с другом с целью выявления уровня конкурентных преимуществ;

- проведение мониторинга всех показателей качества радиолинии позволяет выявлять критические точки, выход за пределы которых может привести к полному отсутствию связи, решать задачи по достоверности и своевременности информации в ходе ведения связи.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что для достижения требований, предъявляемых к узлам и линиям радиосвязи и необходимой вероятности приема сообщений с заданной достоверностью $P_{пр}(p_{ош} \leq p_{ош.дон}; T_{прд} \leq T_{прд.дон}) \geq P_{дон}$, адаптивные радиолинии нужно рассматривать как систему с многоступенчатой адаптацией, так как в такой единой системе алгоритм реализации адаптивных процедур будет иметь многоуровневый или многоступенчатый характер. Это обуславливает необходимость использования методов, способных решать многоуровневые или многокритериальные задачи по расчету и оценке параметров СМА.

Для решения задач оценки эффективности функционирования СМА возможно и целесообразно применение метода преобразования натуральных значений частных параметров в единую безразмерную шкалу. Данное направление исследования дает возможность для последующей разработки методов и оптимальных алгоритмов адаптации с точки зрения основных показателей эффективности радиосвязи, а также алгоритмов управления системой с многоступенчатой адаптацией для радиолиний, различных по своим параметрам и структуре.

Предложенный метод позволяет учитывать возможность применения в системах связи структурной адаптации радиосетей в сочетании с параметрической адаптацией для обеспечения своевременности и достоверности передаваемой информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивные антенные решетки: учебное пособие: в 2 ч. / В.А. Григорьев [и др.]; под общ. ред. В.А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. Ч. 1. 179 с.
2. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
3. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. М.: МО СССР, 1982. 660 с.
4. Скалепов А.Н. Основы методологии и методики военно-научного исследования: учебное пособие. М., 2019. 405 с.
5. Комарович В.Ф., Липатников В.А. Многоуровневая защита радиолиний декаметровой связи: учебное пособие. СПб.: Военная академия связи им. С.М. Буденного, 2003. 248 с.
6. Семисошенко М.А. Управление автоматизированными сетями декаметровой связи в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. СПб.: Военная академия связи им. С.М. Буденного, 1997. 364 с.
7. Григорьев В.А. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2002. 263 с.
8. Ряскин Р.Ю. Выбор вероятностно-оптимальных полос приема в ДКМ радиолиниях как одна из процедур многоступенчатой адаптации // Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов: сборник трудов III Международного конгресса. СПб., 2010. 129 с.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.