

УДК 621.37

## Модель многоступенчатой адаптации низкоэнергетической радиолинии коротковолнового диапазона с учетом затрачиваемых ресурсов радиолинии и прогнозирования сигнально-помеховой обстановки

Алекаев А. Е., Липатников В. А., Ряскин Р. Ю., Капкин Ю. А.

**Постановка задачи.** Низкоэнергетические радиолинии коротковолнового диапазона, в том числе применяющие адаптацию, предназначены для обмена информацией между отдельными корреспондентами и органами управления различных ведомств, и строятся, как правило, посредством однокачковых ионосферных радиотрасс. Известные алгоритмы управления адаптивными процедурами не могут быть применены к низкоэнергетическим адаптивным радиолиниям ввиду специфических условий их функционирования. Необходимо учитывать степень влияния адаптивных параметров на качественные показатели, описывающие требования к связи, энергетическую составляющую радиолинии, а также объем ресурсов радиолинии, затрачиваемые на ведение и восстановление связи, которые в условиях функционирования низкоэнергетических радиолиний, как правило, весьма ограничены. Применение многоступенчатой адаптации обуславливает увеличение числа объектов, входящих в адаптивную систему, а, соответственно, к увеличению числа внутренних связей. **Целью работы** является построение комплексной модели функционирования и управления параметрами адаптивной радиолинии для определения степени влияния применяемых адаптивных ресурсов и объемов затрачиваемых ресурсов радиолинии на показатели качества адаптивной радиолинии в различных условиях помеховой обстановки. Предлагается рассматривать адаптивную радиолинию как систему с многоступенчатой адаптацией. **Используемые методы:** для решения задачи моделирования применены графоаналитический и математический методы описания операторов управления адаптивными процедурами, построенными на основе линейной стохастической модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего, а также с применением методики вычисления интегрального показателя на основе функции Е.С. Харрингтона. **Результат:** предложена комплексная модель обеспечивающая исследование структурных, функциональных, энергетических и прогностических свойств низкоэнергетических адаптивных радиолиний коротковолнового диапазона. Модели зависимости и соотношения, полученные при использовании предложенной модели прогнозирования, позволяют более эффективно управлять адаптивными ресурсами на других ступенях адаптации, а вариационные ряды, построенные на основании расчетов с применением функции Е.С. Харрингтона, определяют более рациональное использование ресурсов радиолинии. **Новизна** заключается в предложенной модели радиолинии, описывающей управление адаптивными параметрами с учетом предоставленных статистических данных в области помех, результатов прогнозирования и зондирования, а также с учетом минимизации вероятности энергетического обнаружения источника, а также позволяющая минимизировать затраты ресурсов радиолинии. **Практическая значимость** определяется применением модели для последующего построения алгоритмов управления ресурсами низкоэнергетических адаптивных радиолиний коротковолнового диапазона, а также дает возможность сформулировать рекомендации специалистам в области разработки комплексов средств радиосвязи на этапах синтеза помехозащищенных режимов работы.

**Ключевые слова:** адаптивная радиолиния, многоступенчатая адаптация, ARIMA модель, прогнозирование, многопараметрическая адаптация, интегральный показатель качества.

### Библиографическая ссылка на статью:

Алекаев А. Е., Липатников В. А., Ряскин Р. Ю., Капкин Ю. А. Модель многоступенчатой адаптации низкоэнергетической радиолинии коротковолнового диапазона с учетом затрачиваемых ресурсов радиолинии и прогнозирования сигнально-помеховой обстановки // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 158-183. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10305.

### Reference for citation:

Alekaev A. E., Lipatnikov V. A., Ryaskin R. Y., Kapkin Y. A. Multi Stage Adaptation Model of Low Energy Adaptive Radio Link on High Frequency Range Taking into Account the Spent Radio Link Resources and Predicting the-Interference Enviroment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 158-183 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10305.

## Актуальность

Известные подходы позволяют получать приемлемые решения при условии априорных знаний о стратегии поведения конфликтующих сторон. Однако, реализации современных радиотехнических систем на основе современных технологий [1-2] и платформе CRS (Cognitive Radio System) систем базируется на принципах искусственного интеллекта, который предполагает недетерминированность их поведения, и определяющий изменение реакции не только в зависимости от обстановки, но и от уровня знаний, получаемой системой в ходе протекания конфликтной ситуации.

Существующие адаптивные системы, отличаются большим разнообразием форм и методов адаптации, а также алгоритмами управления адаптивными ресурсами, которые подробно описаны в работах [3-5]. Анализ данных работ показывает, что адаптация одновременно по нескольким параметрам, во-первых, осуществляется либо на одном уровне системы (например, параметры сигнала и помехоустойчивого кода), либо адаптивные процедуры полностью не коррелированы, то есть изменение одного параметра никак не учитывается при адаптации по другим параметрам. Во-вторых, все адаптивные процедуры, как правило, направлены только на поддержание заданной достоверности связи и не учитывают требования по своевременности и безопасности. Не рассматриваются и такие радиолинии, одним из требований к работе которых является скрытность. То есть, в тех случаях, когда необходимо минимизировать сам факт обнаружения источника радиоизлучения в целях затруднения определения его местоположения. Особенности работы таких радиолиний, как правило, являются: низкая энергетика, для снижения вероятности обнаружения корреспондента и экономии энергетических ресурсов и постоянное изменение географического положения корреспондента. Определим такие радиолинии как низкоэнергетические радиолинии (НЭР).

В случае применения адаптивных ресурсов на нескольких уровнях такую радиолинию необходимо рассматривать как систему с многоступенчатой адаптацией (МСА), так как в такой единой системе алгоритм реализации адаптивных процедур будет иметь многоуровневый или многоступенчатый характер.

Возникает необходимость проведения глубокого системного анализа процесса функционирования адаптивных радиолиний, включающий в себя декомпозицию сложного процесса многоступенчатой адаптации на частные подпроцессы с целью изолированного исследования подсистем, составляющих объект МСА и выявления факторов, в разной степени влияющих на эффективность применения адаптивных ресурсов.

В этой связи актуальной является задача комплексного моделирования НЭР коротковолнового (КВ) диапазона с МСА, включающая в себя оценку эффективности применения адаптивных процедур с учетом предоставленных для связи ресурсов, затрачиваемых на ведение и восстановление связи.

Под комплексным моделированием будем понимать методологию и технологии описания сложной системы, в том числе комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с со-

зданием и развитием рассматриваемых объектов в динамически изменяющихся внешних и внутренних условиях [6].

Адаптивная радиолиния с многоступенчатой адаптацией, является стохастической системой дискретного управления с переменной структурой. Поведение системы в каждом из различных состояний описывается случайным процессом, характеризующим состояние, в котором находится система, а алгоритм работы системы описывает следующие адаптивные процедуры:

- 1) процедура адаптивного прогнозирования уровня помех в предоставленном для работы участке КВ диапазона;
- 2) процедура адаптивного зондирования радиотрассы;
- 3) процедура адаптивной пространственно-временной обработки сигналов;
- 4) процедура многопараметрической адаптации радиосигналов;
- 5) процедура структурной адаптации (на уровне радиосетей).

Необходимо оценить степень влияния каждого адаптивного параметра всех ступеней адаптивной системы на качественные показатели, описывающие требования по своевременности, достоверности и безопасности связи с учетом предоставленных для связи ресурсов радиолинии, которые могут быть затрачены на ведение и восстановление связи.

Объектом исследования являются НЭР КВ диапазона с МСА. Предметом исследования являются процессы функционирования НЭР КВ диапазона с многоступенчатой адаптацией в условиях дисперсионных искажений.

Целью работы является построение модели адаптивной низкоэнергетической радиолинии для исследования процесса функционирования в сложной помеховой обстановке.

### Постановка задачи

Целью статьи является разработка комплексной модели НЭР МСА КВ диапазона, реализующей динамическое изменение воздействия в зависимости от совокупности информационных признаков о функциональной модели взаимодействия и реакции.

### Решение задачи

#### Описание комплексной модели помехозащищенной линии радиосвязи

Канал радиосвязи представлен моделью, характеризуемой прерывистой связью с быстрыми и медленными замираниями (типичные условия для каналов с ионосферным распространением радиоволн), а также неоднородными условиями сигнальной и помеховой обстановки на рабочих частотах [7, 8].

Наиболее важным показателем качества КВ связи является вероятность достоверного приема сообщения  $P_{\text{пр}}(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$ , которая характеризует степень соответствия сигналов на выходе и входе радиоканала. Статистические характеристики рассматриваемой линии радиосвязи определяются на основе функций распределения, огибающих мощности сигналов и помех.

Порядок построения модели функционирования НЭР КВ диапазона с многоступенчатой адаптацией представляется в следующем виде:

- 1) построение структурной модели процессов функционирования НЭР КВ диапазона;
- 2) построение математической модели НЭР МСА КВ диапазона;
- 3) построение структурно-функциональной модели НЭР МСА КВ диапазона;
- 4) построение структурной модели управления НЭР МСА КВ диапазона;
- 5) построение модели управления многопараметрической адаптацией.

Исходя из предоставленных адаптивных ресурсов и задач, обобщенная структурная модель, описывающая порядок функционирования адаптивной радиолинии, представляется в виде, показанном на рис 1. Для проведения системного анализа процесса функционирования НЭР, необходимо произвести декомпозицию сложного процесса многоступенчатой адаптации на частные подпроцессы, описывающие адаптивные процедуры, упомянутые выше.

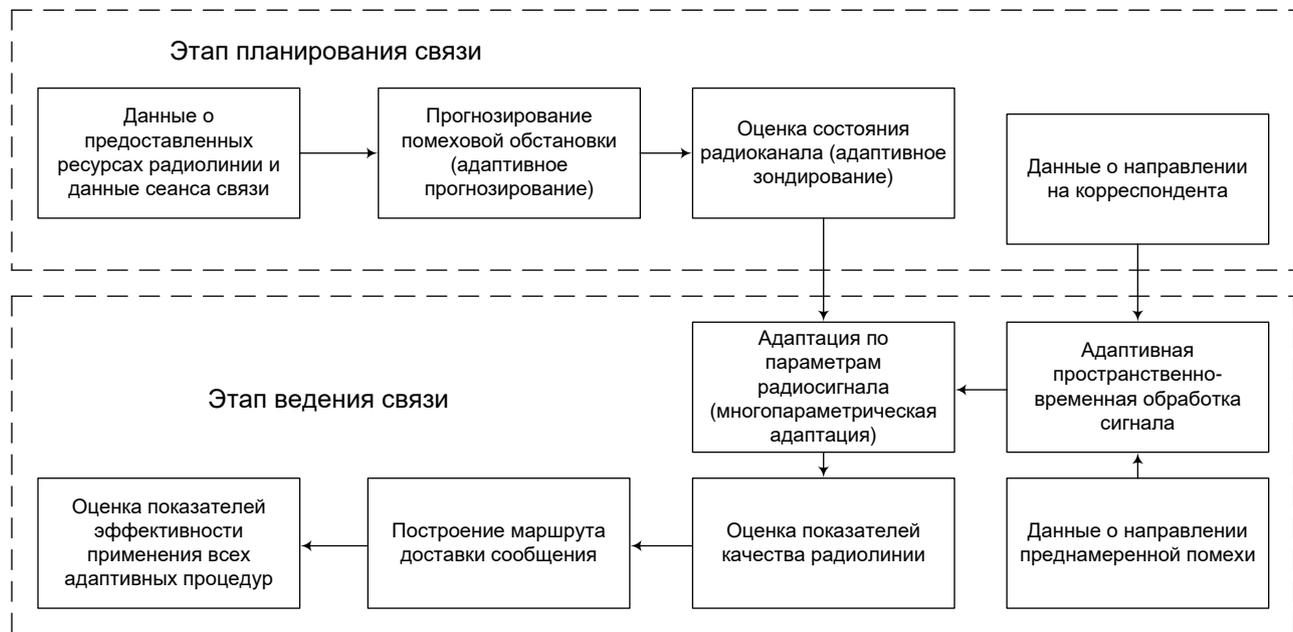


Рис. 1. Обобщенная структурная модель процессов функционирования НЭР КВ диапазона

Раскрывая структурную модель необходимо от обобщенной структурной модели перейти к рассмотрению обобщенной математической модели. Здесь отмечаем, что под обобщенной математической моделью ( $\Omega$ ) следует понимать систему, заданную подмножеством всех отношений  $r_j$  объектов  $S_i$

$$\Omega \subset S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n. \quad (1)$$

Определим переменную времени  $t$  (в общепринятом смысле), а под объектами  $S_i$  будем понимать временные функции  $S_i = S_i(t)$ , которые в частных случаях могут быть параметрами.

Уточняя определение (1) запишем:

$$\Omega = \{S_i; r_j; t; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m\}, \quad (2)$$

где  $r_j$  – некоторые функции, функционалы или операторы.

При описании структуры модели целесообразно различать 4 группы объектов:

- 1) объекты данных  $S_{i_1д}$ ;
- 2) объекты организации  $S_{i_2орг}$ ;
- 3) объекты состояния  $S_{i_3с}$ ;
- 4) внешние воздействия  $S_{i_4вв}$ ,

$$S_i = \{S_{i_1д}; S_{i_2орг}; S_{i_3с}; S_{i_4вв}\}, \quad (3)$$

где  $i_1 = 1, \dots, n_1$ ,  $i_2 = 1, \dots, n_2$ ,  $i_3 = 1, \dots, n_3$ ,  $i_4 = 1, \dots, n_4$ .

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n,$$

где  $n$  – число объектов модели.

Структура обобщенной математической модели НЭР КВ диапазона представлена на рис. 2.

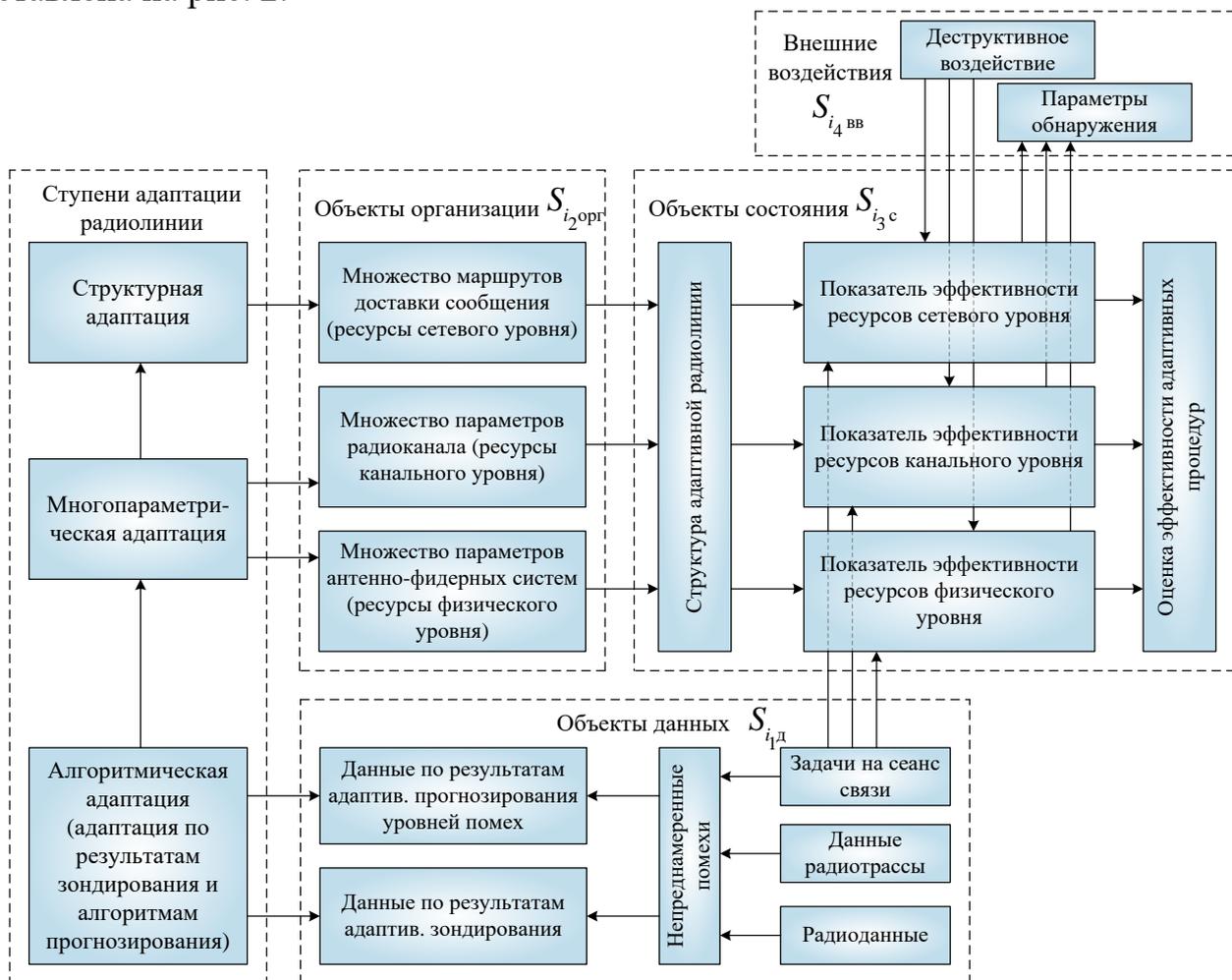


Рис. 2. Структурная модель процессов функционирования НЭР КВ диапазона

К объектам данных  $S_{i,d}$  отнесём функции и параметры, описывающие характеристики радиотрассы, передаваемой информации, а также результаты прогнозирования:

- 1) координаты корреспондентов, дата и время проведения связи;
- 2) состояние ионизированного слоя атмосферы, длина радиотрассы, азимуты корреспондентов;
- 3) вероятностно-оптимальные частоты (ВОЧ) и вероятностно-оптимальные полосы (ВОП), полученные по результатам прогнозирования, а также результаты адаптивного зондирования;
- 4) вид сеанса, правила связи, объем передаваемых данных.
- 5) требования к достоверности связи;
- 6) требования к своевременности связи;
- 7) требования к скрытности связи.

Так как функции и объекты 5, 6 и 7 нормируются задачами на сеанс связи, то очень часто их выделяют в отдельную подгруппу.

Вероятностно-оптимальной считается частота, где прогнозируемый уровень помех, либо сумма среднеквадратичного отклонения (СКО) и среднего уровня помех являются минимальными.

Под ВОП подразумевается полоса частот, в которой обеспечивается максимальная вероятность приема с заданной достоверностью  $P_{пр} (P_{ош} \leq P_{ош доп})$  [5] (т.е. с минимальной спектральной плотностью мощности помехи в полосе или максимальным отношением уровней сигнал/помеха в группе частот).

Характеристики сигнала на выходе КВ канала, связанные со средой распространения, достаточно хорошо описываются рядом известных моделей, одним из которых является метод рефракционного интеграла, на основе которого разработан пакет программ «Прогноз», используемый в современных комплексах КВ радиосвязи, имеющих адаптивные системы. Методы расчета, предложенные в этой модели, позволяют определить ожидаемые значения параметров электромагнитного поля в точке приема, а достоверность прогноза максимально применимой частоты (МПЧ) и наименьшей применимой частоты (НПЧ) составляет примерно 70% [9, 10], что является приемлемым, так как считается, что недостающие характеристики канала будут восполняться непосредственно в процессе передачи сообщений и ведения сеанса связи.

При оценке замираний, целесообразно использовать двухпараметрические модели замираний в виде законов Райса и Накагами. Данные модели показывают адекватность в 90-95% случаев, к тому же, связь между параметрами моделей и вероятностью ошибки на бит, является конструктивной основой для выбора рабочих параметров адаптивных КВ радиолиний и явным достоинством этих моделей замираний.

Объекты организации  $S_{i,орг}$  представляют собой набор адаптивных ресурсов радиолинии, которые могут составлять иерархию в соответствии с уровнями эталонной модели взаимодействия открытых систем (рис. 2). От количества ресурсов зависит число возможных вариантов построения адаптивной радиолинии, определяемых совокупностью применения ресурсов. Все варианты

различны не только по структуре, но и по достигаемому качеству выходного сигнала и затратам (частотным, временным и т.д.) на реализацию.

К характеристикам состояния  $S_{i_3 c}$  отнесем объекты, функции и параметры, описывающие показатели качества, формируемые для оценки затрат ресурсов и эффективности применения адаптивных процедур. В ходе ведения связи основным показателем, значение которого будет обуславливать смену адаптивных параметров, является количество ошибок на бит информации  $n_{\text{ош}}$ . Основным показателем, значение которого определяет построение алгоритма применения адаптивных параметров – вероятность достоверного приема сообщения  $P_{\text{пр}} (P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$ . В данном же случае, для рассмотрения НЭР, и исходя из задач моделирования, включающих требования не только по достоверности, но и по своевременности и безопасности связи, введены дополнительные показатели такие как, вероятность энергетического обнаружения источника радиоизлучения  $P_{\text{эо}}$  и комплексный показатель, такой как вероятность своевременной передачи с заданной достоверностью  $P_{\text{пр}} (T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}} \mid P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$ .

При рассмотрении внешних воздействий  $S_{i_4 \text{ вв}}$  необходимо уточнить, что в рамках данной работы под таковыми будем понимать непоражающие электромагнитные излучения, ухудшающие качество функционирования радиоэлектронных средств, а именно, не только случайные, промышленные и другого вида непреднамеренные помехи, но и преднамеренные помехи, создаваемые комплексами подавления (КП). Учитывая же особенности функционирования НЭР КВ диапазона, в данную группу необходимо отнести и воздействия, оказываемые на комплекс обнаружения (КО) со стороны радиостанции корреспондента и автоматизированного узла радиосвязи (УРС).

Стратегия управления ресурсами радиолинии строится на основании расчета вышеуказанных показателей исходя из количества ресурсов, число которых и определяет количество элементарных методов управления. С учетом предложенной структурной модели считается, что элементарные методы управления, относящиеся к разным группам объектов модели, функционирующие на разных уровнях (согласно эталонной модели взаимодействия открытых систем) и на разных ступенях адаптации являются некоррелированными. Соответственно есть необходимость определить стратегии управления на каждой ступени адаптивной системы.

### Структурно-функциональная модель адаптивной радиолинии

Под качеством функционирования адаптивной радиолинии будем понимать представленные выше показатели, к которым предъявляются определенные требования. Эффективность функционирования определим как степень достижения показателей качества. [11, 12].

На рис. 3 представлена структурно-функциональная модель низкоэнергетической адаптивной радиолинии, функционал которой  $\Phi_{\text{АПЛ}}(U(\theta), V(\theta))$  описывает структуру адаптивной радиолинии, где вектор  $U(\theta)$  – определяет алго-

ритм управления её ресурсами, а вектор  $V(\theta)$  – характеризует возможности радиолинии в соответствии с объемом этих ресурсов.

Множество  $\theta$  в модели является множеством всех возможных состояний радиолинии. А множество  $S$  определяет поле требуемых состояний радиолинии, причем  $S \in \Theta$ .

Тогда при заданных векторах управления  $U(\theta)$  и возможностях  $V(\theta)$  значение эффективности функционирования  $\theta$ -й радиолинии определяется как  $C_\theta(S)$  – т.е. степень достижения показателей качества радиолинии на множестве  $S$ . Определяя её значение через уравнение синтеза [13], запишем

$$\int_S \Phi_{\text{АРЛ}}(u(\theta), v(\theta)) d\theta = C_\theta(S). \quad (4)$$

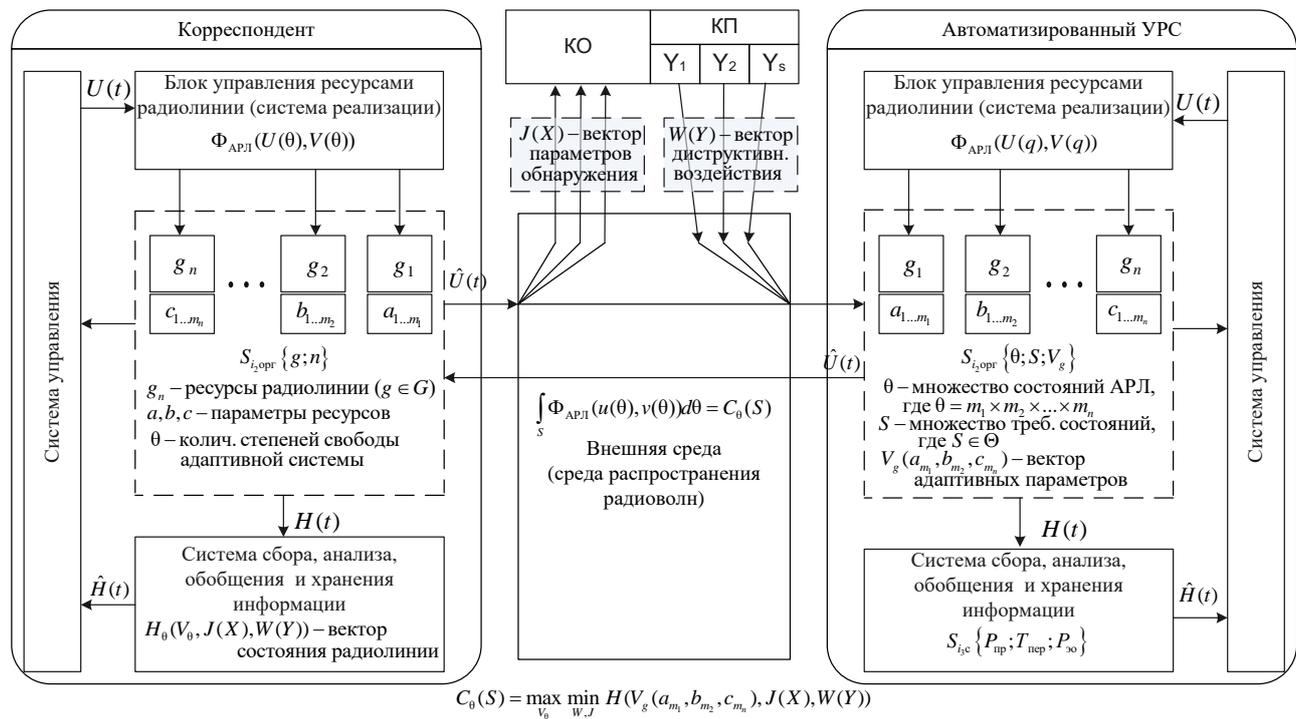


Рис.3. Структурно-функциональная модель НЭР МСА

Данное уравнение определяет область различных режимов функционирования адаптивной радиолинии в определенных условиях с заданной эффективностью.

Определив вектор состояния радиолинии  $H_\theta$  как совокупность вектора адаптивных параметров  $V_\theta(g)$ , вектора параметров обнаружения  $J(X)$  и вектора деструктивного воздействия  $W(Y)$ , то на основе уравнения (4) решается задача обеспечения оптимального алгоритма функционирования адаптивной радиолинии:

$$C_\theta(S) \rightarrow \max_{V(g)} \min_{J(X), W(Y)} H_\theta(V_\theta(a_{m_1}, b_{m_2}, c_{m_n}), J(X), W(Y)). \quad (5)$$

Заметим, что построение и функционирование модели низкоэнергетической адаптивной радиолинии напрямую зависит от располагаемых ресурсов,

степени влияния параметров радиолинии на систему обнаружения и уровня деструктивного воздействия комплекса подавления.

Таким образом, представленные структурная и функциональная модели учитывают как влияние каждого адаптивного ресурса радиолинии на качество выходного сигнала и объем затрачиваемых ресурсов радиолинии, так и характер деструктивного воздействия и уровень влияния излучающего сигнала на комплекс обнаружения.

### Модель прогнозирования помеховой обстановки

Неотъемлемой составляющей системы с МСА является система адаптивного прогнозирования. Процедура выбора ВОЧ и ВОП строится, как правило на основе полученной стационарной случайной последовательности средних уровней помех в полосе частот за отрезок времени  $T$ , т.е.  $\{\bar{x}_T(\Delta f'_1), \dots, \bar{x}_T(\Delta f'_Q)\}$  –  $Q$ -мерный случайный процесс с независимыми составляющими. Необходимо отметить, что степень соответствия выбранных частот и полос критериям оптимальности определяется точностью прогноза.

Прогнозирование помехоустойчивости в анализируемых полосах приема и на отдельных частотах дает возможность рассуждать о прогнозируемой достоверности информации, на основании чего и выстраивать управление адаптивными ресурсами на ступенях адаптации.

В работах [14, 15] описаны способы прогнозирования помеховой обстановки на основе анализа прошлых значений уровней помех. Но, ввиду нестационарности процессов КВ радиоканала, данные способы находят применение на ограниченных прогнозных интервалах. На данных интервалах нестационарные процессы рассматриваются как квазистационарные. Применение способов прогнозирования для нестационарных случайных процессов позволит выбирать горизонт прогноза и повысить его точность.

Также известны способы описания эволюции системы по состояниям марковской или полумарковской моделями [16, 17]. Однако матрица вероятностей переходов при практическом использовании таких моделей может быть получена с большим запаздыванием. Также остается открытым вопрос о получении частных показателей эффективности при нахождении системы в каждом из состояний. Поэтому более рациональным представляется применение линейной стохастической модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average). Для построения модели ARIMA достаточно использовать информацию, содержащуюся в самих анализируемых данных временного ряда.

ARIMA состоит из трех компонентов – AR отвечает за авторегрессионную составляющую, I – за интегрированную составляющую и MA – за скользящее среднее. Каждой составляющей модели соответствует свой параметр:  $p$ ,  $d$ ,  $q$ . Общепринятое обозначение модели – ARIMA ( $p$ ,  $d$ ,  $q$ ). Описание данных компонентов приведено далее.

Компонент AR относится к прошлым значениям, используемым для прогнозирования следующего значения, и определяется параметром  $p$  [18]. Значе-

ние  $p$  определяется с использованием графика частной автокорреляционной функции (ЧАКФ). Компонент МА используется для определения количества прошлых ошибок прогноза, используемых для прогнозирования будущих значений. Параметр  $q$  определяет данный компонент, а его значение находится из графика автокорреляционной функции (АКФ). Порядок дифференцирования (компонент I) определяет, сколько раз (параметр  $d$ ) необходимо выполнить операцию дифференцирования полученного временного ряда, чтобы сделать его стационарным. Оценка стационарности исходного временного ряда осуществляется с использованием формальных тестов, например, при помощи расширенного критерия Дикки-Фуллера (ADF-теста) или KPSS-теста [19-21].

Для построения временного ряда осуществляется измерение уровней помех на частотах выделенной группы в дискретные моменты времени с интервалами между измерениями  $t$ .

В результате для каждой частоты выделенной группы получим набор последовательных значений уровней помех  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , зафиксированных в равноудаленные друг от друга моменты времени. Тогда авторегрессионная модель (AR) порядка  $p$  имеет вид:

$$x_{t_0} = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t_0-t} + \alpha_2 x_{t_0-2t} + \dots + \alpha_p x_{t_0-pt} + \varepsilon_{t_0}, \quad (6)$$

где  $x_{t_0}$  – уровень временного ряда в момент времени  $t_0$  (зависимая переменная);  $x_{t_0-t}, x_{t_0-2t} \dots x_{t_0-pt}$  – уровни временного ряда в моменты времени  $t_0 - t, t_0 - 2t, \dots, t_0 - pt$  соответственно (независимые переменные);  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$  – оцениваемые коэффициенты;  $\varepsilon_{t_0}$  – случайное возмущение, описывающее влияние переменных, не учтенных в модели.

Коэффициент  $\alpha_0$  определяет постоянный уровень ряда и связан с математическим ожиданием  $\mu$  соотношением

$$\alpha_0 = \mu(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \dots - \alpha_p).$$

Модель со скользящим средним порядка  $q$  задается уравнением:

$$x_{t_0} = \varepsilon_0 - \beta_1 \varepsilon_{t_0-t} + \beta_2 \varepsilon_{t_0-2t} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t_0-qt}, \quad (7)$$

где  $y_{t_0}$  – уровень временного ряда в момент времени  $t_0$ ;  $\varepsilon_{t_0-t}, \varepsilon_{t_0-2t} \dots \varepsilon_{t_0-pt}$  – значения остатков  $t, 2t, \dots, qt$  временных периодов назад (независимые переменные);  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$  – оцениваемые коэффициенты.

Модели типа ARIMA строятся на методологии Бокса-Дженкинса, предлагающей выделять класс нестационарных рядов, которые взятием последовательных разностей можно привести к стационарному виду типа ARMA. Если ряд после взятия  $d$  последовательных разностей сводится к стационарному, то для прогнозирования его уровней можно применить комбинированную модель авторегрессии и скользящего среднего, обозначаемую как ARIMA( $p, d, q$ ).

Обычно рассчитывают разницу не более чем до 2-го порядка.

После того, как значение одного параметра в модели ARIMA( $p, d, q$ ) уже известно, после получения стационарного ряда исследуется характер поведения выборочных ЧАКФ и АКФ и выдвигаются гипотезы о значениях параметров  $p$

(порядок авторегрессии) и  $q$  (порядок скользящего среднего) соответственно. Информация о порядке  $p$  модели авторегрессии AR содержится в ЧАКФ. Для процесса, описываемого моделью  $AR(p)$ , ее значениями являются последние значения коэффициентов моделей авторегрессии порядков, не превосходящих  $p$ . Для модели  $AR(p)$  значения частной автокорреляционной функции являются значимыми (отличными от нуля) до лага  $p$  включительно и равными нулю при сдвигах, превышающих порядок модели. Частная автокорреляционная функция модели  $AR(p)$  обрывается после задержки  $p$ . Если значения частной автокорреляционной функции, рассчитанной для реального процесса, становятся нулевыми, начиная со сдвига  $p + 1$ , то модель авторегрессии  $p$ -го порядка соответствуют свойствам рассматриваемого процесса. Аналогичные рассуждения относительно поведения автокорреляционной функции справедливы для модели  $MA(q)$ . Как и для моделей типа AR, автокорреляционные функции могут быть построены для моделей скользящего среднего любых порядков [20, 21].

Таким образом, может формироваться некое множество, включающее одну, две или даже большее число моделей.

Далее производится проверка каждой полученной модели на адекватность при помощи анализа ее ряда остатков. У адекватной модели ряд остатков должен быть похож на белый шум, т.е. их выборочные АКФ не должны отличаться от нуля. Для проверки гипотезы о том, что наблюдаемые данные являются реализацией «белого шума», используется  $Q$ -статистика.

$Q$ -статистика Льюинга-Бокса определяется как

$$Q^* = n(n+2) \sum_{k=1}^m \frac{\Psi_k^2}{n-k}, \quad (8)$$

где  $n$  – объем выборки,  $m$  – максимальное количество лагов,  $\Psi_k$  – коэффициенты автокорреляционной функции.

Определено, что сразу несколько моделей могут довольно точно соответствовать структуре выборочных АКФ и ЧАКФ, но выбрать необходимо только одну.

Для выбора оптимальной модели, как правило, используются информационные критерии Акайке –  $A$  (AIC – Akaike Information Criterion) и Шварца-Байесовского –  $B$  (BIC – Bayesian Information Criterion). Согласно первому критерию, выбирается модель, минимизирующая значение статистики

$$A = \ln(\sigma^2) + \frac{2k}{n}, \quad (9)$$

где  $\sigma^2 = \frac{\sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2}{n}$  – сумма квадратов остатков, деленная на количество наблюдений;  $n$  – число наблюдений (остатков);  $k$  – число оцененных параметров модели  $k = p + q$ .

Критерий Шварца-Байесовского предполагает, что выбрать стоит ту модель, которая минимизирует выражение

$$B = \ln(\sigma^2) + \frac{k \cdot \ln n}{n}. \quad (10)$$

Выбранную модель можно применять для прогнозирования значений в будущем, определяя их как условные математические ожидания модельных процессов с определенным горизонтом прогноза. Для анализа точности прогноза рассчитывается ряд показателей, также характеризующих выбранную модель, такие как:

Средняя абсолютная процентная ошибка –  $M$  (MAPE – Mean Absolute Percent Error)

$$M = \frac{100\%}{L} \sum_{i=1}^L \left| \frac{\hat{x}_{t_0+it} - x_{t_0+it}}{x_{t_0+it}} \right|, \quad (11)$$

где  $x_{t_0+it}$  – наблюдаемые значения в момент времени  $t_0 + it$ ,  $\hat{x}_{t_0+it}$  – предсказанные значения ряда в момент времени  $t_0$  на  $i$  шагов вперед,  $L$  – горизонт прогноза.

Средняя квадратичная ошибка –  $R$  (RMSE – Root Mean Squared Error)

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (\hat{x}_{t_0+it} - x_{t_0+it})^2}{L}}. \quad (12)$$

Отметим, что для вычисления характеристик точности прогноза исходную последовательность необходимо разделить на две части: обучающую и тестовую. Для тестовой выборки обычно берут последние наблюдения, составляющие 20% исходной выборки [18]. Характеристики качества прогноза рассчитывали по тестовой выборке.

В связи с тем, что свойства ионосферы в обычных условиях изменяются относительно медленно, достаточно вычислить средний уровень помехи по результатам измерений примерно за 20 мин (в зависимости от частоты отсчетов, времени суток и т.д.) до момента начала прогнозирования [15].

### Критерии выбора ВОЧ и ВОП

Поскольку одной из основных целей прогнозирования помеховой обстановки является сокращение количества операций по смене рабочих частот, то важным значением для определения ВОЧ является время  $T$ , определяемое для работы на выбранной частоте.

В этом случае после получения прогнозных уровней помех и формирования статистики процессов уровней помех для каждой частоты необходимо сформировать показатели, характеризующие данную частоту, которыми могут являться усредненные за различные интервалы времени  $T$  уровни помех –  $\bar{x}_T$ :

$$\bar{x}_T = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l, \quad (13)$$

где  $n$  – общее число измерений в реализации за время  $T$ ,  $l$  – номер отсчета уровня помех на одной  $i$ -й частоте.

Определение показателей анализируемых полос и критерии выбора оптимальных достаточно подробно описаны в [5], в соответствии с этим, можно сделать выводы о том, что для выбора ВОП необходимо осуществлять оценку анализируемых полос по двум показателям:

- 1) энергетический показатель – усредненный за отрезок времени  $T$  средний уровень помех в полосе частот –  $\bar{x}_T(\Delta f')$ ;
- 2) непараметрический показатель – импульсная случайная последовательность радиопомех  $\eta(\Delta f_r)$  в анализируемой полосе.

Обосновав показатели ВОП, можно подытожить, что для обеспечения заданного качества связи критерием  $\Phi$  выбора ВОП будет:

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{l} \min_{r=1;W} \bar{x}_T(\Delta f_r) \\ \min_{r=1;W} \sum_{r=1}^W \tilde{\eta}(\Delta f_r) \end{array} \right\}. \quad (14)$$

Подводя итог, отметим, что по полученным статистическим оценкам загрузки КВ диапазона необходимо осуществлять прогнозирование уровней помех и производить выбор ВОЧ, а далее по указанным показателям по критерию (14) производить выбор ВОП.

### Модель управления многопараметрической адаптацией

При декомпозиции сложного процесса многоступенчатой адаптации на частные подпроцессы отдельной ступенью необходимо выделять многопараметрическую адаптацию на канальном уровне системы.

Если адаптивную радиолинию рассматривать как систему дискретного управления с переменной структурой, то количество имеющихся адаптивных ресурсов  $n$  и множества возможных параметров этих ресурсов определяют количество возможных состояний адаптивной радиолинии (множество степеней свободы).

Тогда количество степеней свободы такой дискретной системы определяется как

$$\Theta = \prod_{i=1}^n m_i.$$

Для построения алгоритма управления и определения порядка применения адаптивных параметров необходимо произвести оценку эффективности каждой из  $\theta \in \Theta$  радиолиний по заданным показателям  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j$ , где  $j$  – число показателей оценки в зависимости от задач, которые призвана решать адаптивная система.

В [22] представлены показатели, описывающие требования к связи по достоверности, своевременности и безопасности, которые количественно будут характеризовать качество радиолинии, давать оценку её параметров и т.д. В данном случае были выделены три из них:

- 1)  $P_{пр}$  – вероятность приема информации при условии  $P_{ош} \leq P_{ош доп}$  (достоверность);

- 2)  $T_{\text{пер}}$  – время передачи сообщения (своевременность);
- 3)  $P_{\text{эо}}$  – вероятность энергетического обнаружения источника (безопасность).

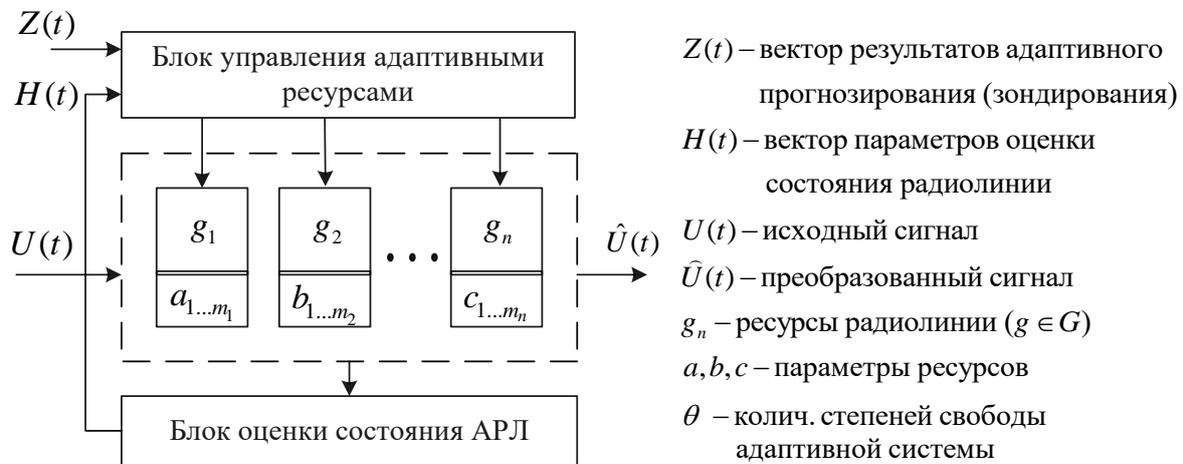


Рис. 4. Структурная модель управления НЭР МСА КВ диапазона

Для сравнимости качественных признаков, требуется введение некоторой безразмерной шкалы, которая будет однотипной для всех показателей.

По результатам оценки показателей каждой из  $\theta$  радиолиний необходимо выстроить вариационный ряд, на основании которого и будет строиться алгоритм применения адаптивных процедур.

При оценке потенциальных возможностей с использованием данной функции необходимо определить пограничные состояния выбранных обобщающих показателей. В данном случае ограничения являются односторонними ( $Y_{\min}$  или  $Y_{\max}$ ) (рис.5).

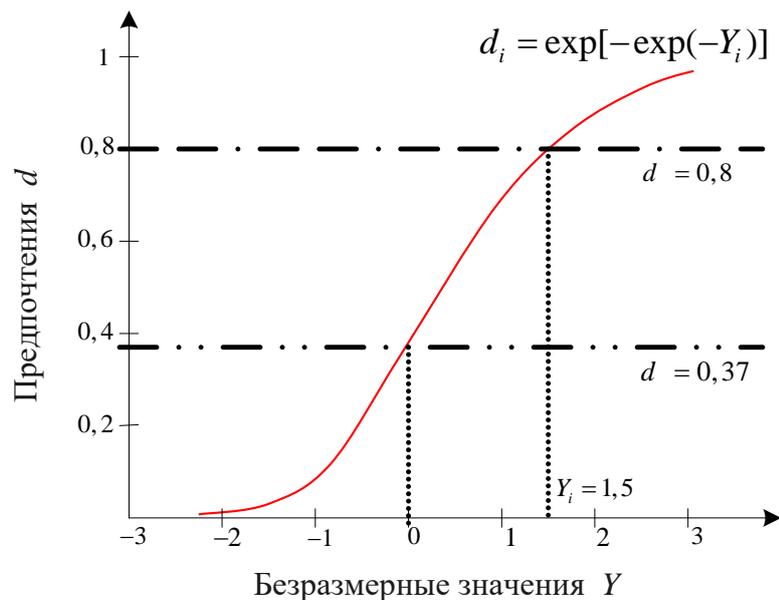


Рис. 5. График функции предпочтения для односторонних ограничений

$Y_i$  – безразмерное значение на оси абсцисс графика функции, соответствует предпочтению  $d_i$ . Область предпочтений  $0,37 \leq d \leq 0,8$  является областью нормального функционирования.

Для сопоставления показателей, выраженных в различных единицах измерения необходимо их перевести в условный масштаб, т.е. перевести в безразмерную шкалу. Значения частного показателя  $Y_i$  в условном масштабе можно определить выражением (15):

$$Y_i' = a_i + b_i Y_i. \quad (15)$$

При одностороннем ограничении коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  можно определить, если для двух значений свойств  $Y_i$  задать соответствующие базовые значения предпочтений  $d_i$ . Как правило, эти базовые значения задаются для области нормального функционирования.

Необходимо отметить, что в данном случае пороговые значения на шкале для имеющихся показателей устанавливаются по имеющимся стандартам или в зависимости от задач на сеанс связи предоставленных частотно-временных ресурсов. Расчет коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  представлен в [22].

На графике (рис. 6) отражены зависимости предпочтений от каждого показателя качества, где  $P_{\text{пр опт}}$ ,  $P_{\text{пр пор}}$ ,  $P_{\text{ЭО опт}}$ ,  $P_{\text{ЭО пор}}$ ,  $T_{\text{опт}}$  и  $T_{\text{пор}}$  – соответственно оптимальные и пороговые значения показателей качества системы.

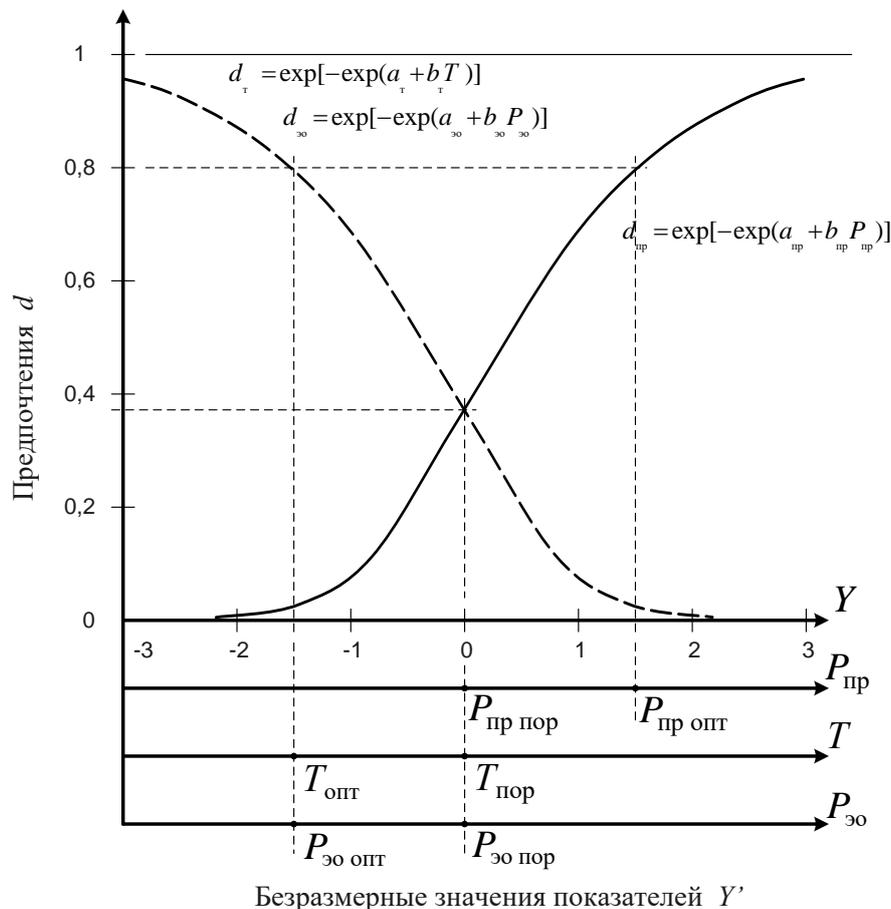


Рис. 6. График зависимости предпочтений от показателей качества

Из графика видно, что значения всех показателей, выраженные через функцию предпочтения, приведены к единой шкале, что позволяет их сравнивать.

При оценке эффективности  $\theta$ -й радиолинии по совокупности показателей необходимо введение обобщенного (интегрального –  $D_{\text{инт}}$ ) показателя. По данной методике вычисление интегрального показателя производится на основании обобщенной функции предпочтения которая представляет собой среднее геометрическое частных предпочтений  $d_i$  заданных показателей [23]:

$$D_{\text{инт}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}, \quad (21)$$

где  $n$  – количество показателей оценки.

Соответственно, для показателей оценки, характеризующих требования по достоверности, своевременности и безопасности связи

$$D_{\text{инт}} = \sqrt[3]{d_{\text{дп}} \cdot d_{\text{т}} \cdot d_{\text{зо}}}. \quad (22)$$

На основании полученных численных значений предпочтений для каждой  $\theta$ -й радиолинии выстраивается вариационный ряд, первый член которого будет соответствовать наибольшему значению интегрального показателя, следовательно, соответствовать радиолинии, значения адаптивных параметров которой обеспечивают наибольшую эффективность.

На основании полученного вариационного ряда можно выстраивать алгоритм применения адаптивных процедур на промежутке времени  $T$ , который определяется выбранной на предыдущей ступени адаптации ВОП для этого же временного интервала.

### Анализ результатов контрольных решений моделирования НЭР МСА КВ диапазона

Для подтверждения правомерности разработанной модели проведем расчет и сравнение выбранных ранее показателей.

Для этого, в качестве примера, рассмотрим радиолинию, которая имеет три адаптивных ресурса, обозначим их множествами  $N$ ,  $E$  и  $R$ . Причем, множества ресурсов  $N(n_1; n_2)$  и  $E(e_1; e_2)$  имеют по 2 изменяемых параметра, а множество ресурса  $R(r_1; r_2; r_3)$  – 3 параметра.

Множество  $N$  определяет возможности радиолинии адаптироваться по виду применяемого помехоустойчивого кода. При этом адаптивная система применяет код Рида-Соломона, который, в зависимости от наличия в кодовом блоке служебной команды и циклической контрольной суммы имеет кодовые скорости  $n_1 = 1/4$ ,  $n_2 = 2/7$ .

Множество  $E$  определяет возможности радиолинии адаптироваться по излучаемой мощности передатчика. Для выбранной адаптивной системы определим  $e_1 = 5$ Вт,  $e_2 = 10$ Вт.

Множеством  $R$  выражены возможности радиолинии изменять техническую скорость передачи. Для данного множества зададим  $r_1 = 75$  бит/с,  $r_2 = 150$  бит/с,  $r_3 = 300$  бит/с.

Применяя адаптивные ресурсы комплексно, мы получаем для сравнения 12 отличных друг от друга радиолиний с различными показателями качества (12 степеней свободы), которые и сравниваем.

Допустим, что процедуры адаптивного прогнозирования и адаптивной пространственно-временной обработки системой выполнены, и не изменяются в процессе адаптации системы по вышеуказанным параметрам радиосигнала.

Для расчета коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  зададим «оптимальные» (соответствуют уровню предпочтения 0,8) и «пороговые» (соответствуют уровню 0,37) значения для каждого показателя качества:  $P_{\text{пр опт}} = 0,99$ ,  $P_{\text{пр пор}} = 0,96$ ,  $P_{\text{ЭО опт}} = 0,4$ ,  $P_{\text{ЭО пор}} = 0,8$ ,  $T_{\text{опт}} = 60$  с и  $T_{\text{пор}} = 150$  с.

Рассчитанные по [22] показатели качества для каждого состояния адаптивной радиолинии, а также зависимость значений предпочтений от этих показателей представлены в табл. 1. Значение  $D$  в таблице – обобщенная функция предпочтения, которая является обобщенным параметром оценки системы и представляет собой среднее геометрическое частных показателей предпочтений.

Необходимо отметить, что уровни предпочтений, оказавшиеся ниже границы пороговых значений, принимаются во внимание как абсолютно недопустимые значения качественных показателей и в таблице обозначены нулями. Эти значения при дальнейших расчетах и построениях алгоритмов адаптации не учитываются.

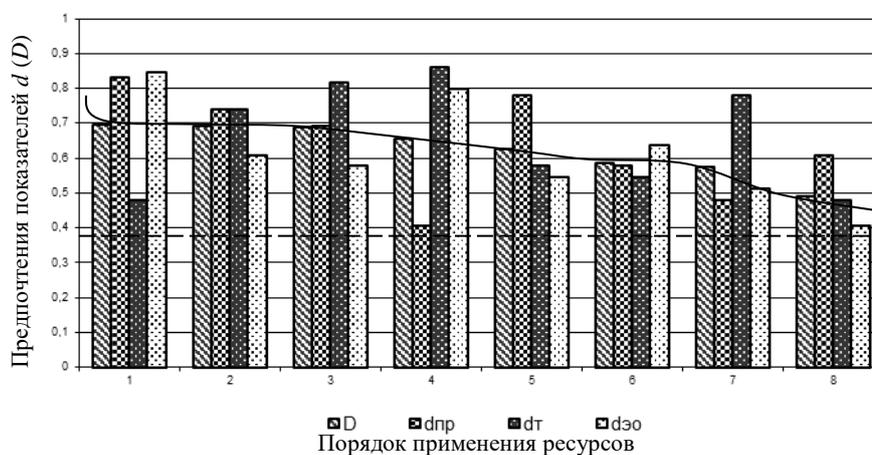
Полученные в ходе расчета результаты представим в виде вариационного ряда обобщенных предпочтений, в соответствии с которым и определяется порядок применения адаптивных ресурсов. Для наглядности вариационный ряд представлен в виде таблицы (табл. 2).

Таблица 1 – Результаты зависимостей полученных предпочтений от рассчитанных показателей качества

№ п/п	Ресурсы			Частные показатели (отклики)			Значения частных функций предпочтений			$D$
	$N$	$E$	$R$	$P_{\text{пр}}$	$T$	$P_{\text{ЭО}}$	$d_{\text{пр}}$	$d_{\text{T}}$	$d_{\text{ЭО}}$	
1.	$n_1$	$e_1$	$r_1$	0,952	116	0,46	0	0,4065	0,7401	0
2.	$n_1$	$e_1$	$r_2$	0,994	108	0,34	0,8329	0,4783	0,8474	0,6963
3.	$n_1$	$e_1$	$r_3$	0,962	44	0,4	0,4065	0,8608	0,8000	0,6542
4.	$n_1$	$e_2$	$r_1$	0,974	108	0,68	0,6095	0,4783	0,4065	0,4912
5.	$n_1$	$e_2$	$r_2$	0,988	96	0,6	0,7815	0,5787	0,5465	0,6275
6.	$n_1$	$e_2$	$r_3$	0,98	56	0,58	0,6926	0,8171	0,5787	0,6893
7.	$n_2$	$e_1$	$r_1$	0,968	158	0,42	0,5129	0	0,7815	0
8.	$n_2$	$e_1$	$r_2$	0,972	100	0,54	0,5787	0,5465	0,6388	0,5867
9.	$n_2$	$e_1$	$r_3$	0,984	72	0,56	0,7401	0,7401	0,6095	0,6937
10.	$n_2$	$e_2$	$r_1$	0,978	164	0,66	0,6665	0	0,4427	0
11.	$n_2$	$e_2$	$r_2$	0,992	112	0,76	0,8171	0,4427	0	0
12.	$n_2$	$e_2$	$r_3$	0,966	64	0,62	0,4783	0,7815	0,5129	0,5766

Таблица 2 – Вариационный ряд, построенный в зависимости от обобщенного показателя  $D$

Порядок применения ресурсов	Построение вариационного ряда	Применяемые ресурсы		
		$n_1$	$e_1$	$r_2$
1	$D_2$	$n_1$	$e_1$	$r_2$
2	$D_9$	$n_2$	$e_1$	$r_3$
3	$D_6$	$n_1$	$e_2$	$r_3$
4	$D_3$	$n_1$	$e_1$	$r_3$
5	$D_5$	$n_1$	$e_2$	$r_2$
6	$D_8$	$n_2$	$e_1$	$r_2$
7	$D_{12}$	$n_2$	$e_2$	$r_3$
8	$D_4$	$n_1$	$e_2$	$r_1$



— линия значений предпочтений приоритетного показателя  
 - - - - линия пороговых значений предпочтений

Рис. 7 – Порядок применения адаптивных ресурсов при приоритетном интегральном показателе  $D$

В предлагаемой методике, для оценки функционирования системы, не исключена возможность применения дифференциации весов отдельных показателей, но, ввиду отсутствия достаточно обоснованной методики такой дифференциации, в данном случае она не применяется. Хотя, для построения вариационного ряда обобщенных предпочтений можно учитывать значения отдельных показателей качества, которые считаются наиболее весомыми, т.е. выполнение которых в сложившихся условиях или в зависимости от имеющихся исходных данных имеют наиболее важное значение.

Так, если за основной показатель принять своевременность, то самый левый член вариационного ряда обобщенного предпочтения будет соответствовать минимальному значению временных затрат на передачу информации (табл. 3).

Таблица 3 – Вариационный ряд, построенный в зависимости от показателя времени  $d_T$

Порядок применения ресурсов	Построение вариационного ряда	Применяемые ресурсы		
		$n_1$	$e_1$	$r_3$
1	$D_3$	$n_1$	$e_1$	$r_3$
2	$D_6$	$n_1$	$e_2$	$r_3$
3	$D_{12}$	$n_2$	$e_2$	$r_3$
4	$D_9$	$n_2$	$e_1$	$r_3$
5	$D_5$	$n_1$	$e_2$	$r_2$
6	$D_8$	$n_2$	$e_1$	$r_2$
7	$D_4$	$n_1$	$e_2$	$r_1$
8	$D_2$	$n_1$	$e_1$	$r_2$

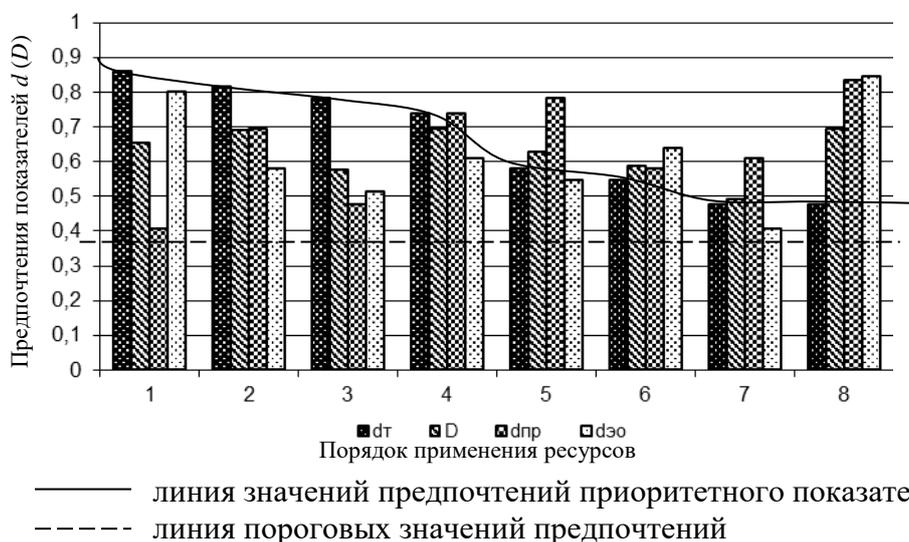


Рис. 8 – Порядок применения адаптивных ресурсов при приоритетном показателе  $d_T$

Таблица 4 – Вариационный ряд, построенный в зависимости от показателя обнаружения  $d_{эо}$

Порядок применения ресурсов	Построение вариационного ряда	Применяемые ресурсы		
		$n_1$	$e_1$	$r_2$
1	$D_2$	$n_1$	$e_1$	$r_2$
2	$D_3$	$n_1$	$e_1$	$r_3$
3	$D_8$	$n_2$	$e_1$	$r_2$
4	$D_9$	$n_2$	$e_1$	$r_3$
5	$D_6$	$n_1$	$e_2$	$r_3$
6	$D_5$	$n_1$	$e_2$	$r_2$
7	$D_{12}$	$n_2$	$e_2$	$r_3$
8	$D_4$	$n_1$	$e_2$	$r_1$

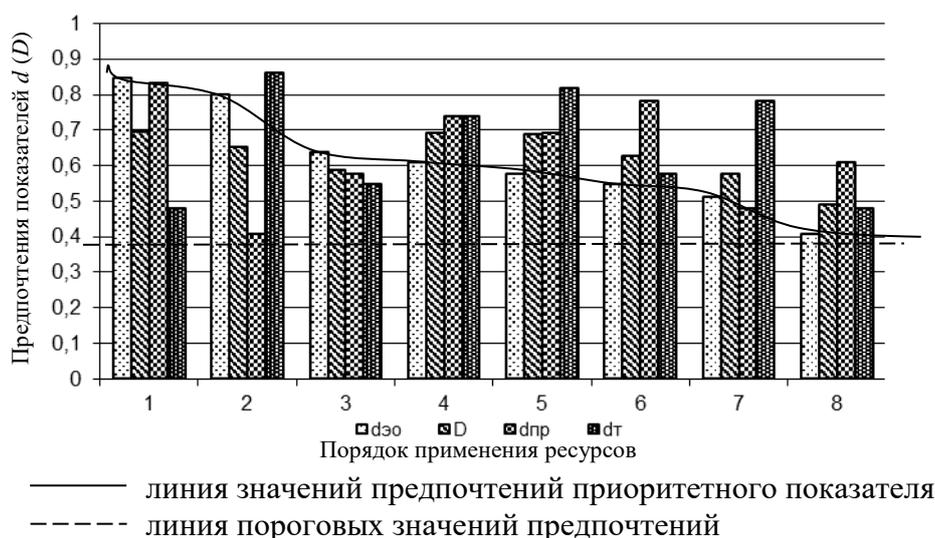


Рис. 9 – Порядок применения адаптивных ресурсов при приоритетном показателе  $d_{30}$

Аналогичным образом выстраивается вариационный ряд при необходимости минимизации вероятности энергетического обнаружения источника (табл. 4).

На гистограммах, соответствующих таблицам (рис. 7, 8, 9) графически отображаются уровни предпочтений всех частных показателей и обобщенного предпочтения в зависимости от приоритетного показателя и порядка применения адаптивных ресурсов. Полученные результаты позволяют сформировать алгоритм применения адаптивных ресурсов.

### Выводы

Большое разнообразие форм и методов адаптации в системах радиосвязи, определяет необходимость рассмотрения таких систем как систем с МСА, так как в таких системах алгоритм реализации адаптивных процедур будет иметь многоуровневый или многоступенчатый характер.

К исследованиям, в которых предлагается декомпозиция адаптивных систем на отдельные области в интересах решения задачи помехоустойчивости, можно отнести работы [4, 7]. Но в данных работах не рассматривается возможность декомпозиции сложного процесса многоступенчатой адаптации на частные подпроцессы согласно уровням эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Предложенная структурная модель (рис. 2) адаптивной радиолинии учитывает взаимодействия системы на различных ступенях адаптации, что позволяет провести достаточно глубокий системный анализ процесса функционирования адаптивных радиолиний и определить степень влияния каждой ступени на эффективность функционирования всей системы.

Вопросы комплексного моделирования радиолиний и КВ радиоканала достаточно подробно описаны в [10, 13, 16, 17], но не в полной мере учтены вопросы моделирования в конфликтной ситуации, в том числе, исходя из особенностей функционирования НЭР КВ диапазона, не учитывается такой показатель, как вероятность энергетического обнаружения источника. К работам, в которых применена методика прогнозирования на основе оценки значений

временных рядов, можно отнести работы [18-20]. Однако данная методика в большинстве случаев применяется для прогнозирования процессов в экономической и социальной областях наук. Определив критерии выбора ВОЧ и ВОП, в данной работе предложена возможность прогнозировать уровни помех в заданных участках КВ диапазона.

Применение модели ARIMA, а также структурная модель управления НЭР с учетом их использования в соответствии с предложенной обобщенной структурой (рис. 1) позволяют:

- 1) прогнозировать уровни помех в анализируемых участках диапазона на основе их прошлых значений даже с учетом нестационарности процессов, протекающих в ионосфере;
- 2) при построении алгоритма управления и определения порядка применения адаптивных параметров многопараметрической адаптации производить оценку эффективности каждой из  $\theta \in \Theta$  радиолиний по нескольким показателям в зависимости от задач, которые призвана решать адаптивная система;
- 3) при введении показателя (показателей), описывающих требования по безопасности связи учитывать влияние излучающего сигнала на комплекс обнаружения.

Таким образом, предложенные в данной работе модели и методы позволяют выстраивать алгоритмы управления адаптивными ресурсами сложных адаптивных систем.

Разработанный научно-аналитический аппарат формализует задачу управления ресурсами НЭР МСА КВ диапазона в различных моделях радиоканалов и произвольных видах сигнальных конструкций. Это в свою очередь дает возможность сформулировать рекомендации специалистам в области разработки комплексов средств радиосвязи на этапах синтеза помехозащищенных режимов работы. Особую актуальность решение данных задач приобретает при проектировании приемо-передающих устройств на основе программно-определяемой радиосистемы. Направление дальнейших исследований авторы связывают с разработкой временных циклов управления ресурсами разработанной интегральной модели помехозащищенных НЭР МСА КВ диапазона.

### Литература

1. Липатников В. А., Царик О. В. Методы радиоконтроля. Теория и практика. Монография: Серия «Система технической защиты информации в Российской Федерации». – СПб.: Военная академия связи, 2018. – 607 с.
2. Рабин А. В., Добросельский М. А., Липатников В. А. Исследование характеристик помехоустойчивости при использовании ортогонального кодирования // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 80-85.
3. Антонюк Л. Я., Семисошенко М. А. Адаптивная радиосвязь в системах связи специального назначения // Электросвязь. 2007. № 5. С. 17-20.
4. Дулькейт И. В., Землянов И. С., Юрьев А. Н. Многокритериальная адаптация модема с OFDM к условиям распространения на коротковолновой

радиолинии // Тенденции и перспективы развития современного научного знания: сборник трудов конференции. – М.: 2015. – С. 7-20.

5. Ряскин Р. Ю., Комарович В. Ф. Обоснование частотно-энергетического показателя и критерия выбора вероятностно-оптимальных полос приема // Труды военной академии связи. 2011. № 76. С. 54-60.

6. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

7. Липатников В. А., Кузин П. И. Метод повышения оперативности смены параметров адаптации при приеме информации в системах радиосвязи КВ- и УКВ-диапазонов // Автоматизация процессов управления. 2016. № 4 (46). С. 18-22.

8. Битков А. Н., Жилин А. В., Касибин С. В., Комарович В. Ф., Кузнецов С. И., Липатников В. А. Устройство автоматического выбора рабочих частот // Патент на изобретение от 13.07.2005. № 2295761.

9. Пирогов Ю. А., Романенко К. П., Сызранцев Г. В., Фисенко В. А. Основы организации связи в общевойсковых объединениях сухопутных войск. – СПб.: ВУС, 2004. – 188 с.

10. Erhel Y., Perrine C., Chatellier C., Bourdon P., Lemur D. High data rate radio communications through the ionospheric channel // International Journal of Electronics and Communications. 2007. vol. 61. № 1. P. 270-278.

11. Антонюк Л. Я., Игнатов В. В. Эффективность радиосвязи и методы её оценки. – СПб.: ВАС, 1994. – 138 с.

12. Скалепов А. Н. Основы методологии и методики военно-научного исследования. – М.: ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, 2019. – 405 с.

13. Бурлов В. Г., Зенина Е. А., Матвеев А. В. Синтез модели и способов функционирования системы в условиях конфликта // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. 2012. Т. 3. № 150. С. 72-79.

14. Комарович В. Ф., Ряскин Р. Ю. Способ краткосрочного адаптивного прогнозирования уровней помех в декаметровом диапазоне // Патент на изобретение RU 2423786 от 06.02.2010.

15. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 256 с.

16. Le Roux Y. M., Niberon M., Fleury R., Menard J., Jolivet J. P. HF Channel Modelling and Simulation // 5th International Conference on Radio Receivers and Associated Systems. London, 1990. P. 72-76.

17. Vogler L. E., Hoffmeyer J. A. A New Approach to HF Channel Modeling and Simulation Part II: Stochastic Model // U.S. Department of Commerce. NTIA Report 90-255. 1990. №2. P. 37.

18. Шмойлова Р. А., Садовникова Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование: учебник. – М.: Издательский дом Университета "Синергия", 2016. – 152 с.

19. Кизбикенов К. О. Прогнозирование и временные ряды [Электронный ресурс]. – Барнаул: АлтГПУ, 2017. – 1 файл: 2918400 байт.

20. Трегуб А. В., Трегуб И. В. Методика построения модели ARIMA для прогнозирования динамики временных рядов // Лесной вестник. 2011. № 5. С. 179-184.

21. Camacho E. F., Bordons C. Model predictive control. – London, Springer Verlag, 2004. – 405 p.

22. Алекаев А. Е., Чубатый Д. Н., Ряскин Р. Ю. Методика расчета эффективности применения адаптивных процедур в системе связи с многоступенчатой адаптацией // Техника радиосвязи. 2020. № 1. С. 35-46.

23. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

### References

1. Lipatnikov V. A., Tsarik O. V. *Metody radiokontrolja. Teorija i praktika. Monografija* [Radio Control Methods. Theory and Practice. Monograph]. Saint-Petersburg, Military Academy of Communication Publ., 2018. 607 p. (in Russian).

2. Rabin A. V., Dobroselskij M. A., Lipatnikov V. A. Research of Characteristics of Noise Immunity with Use of Orthogonal Coding. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 10, pp. 80-85 (in Russian).

3. Antonjuk L. Y., Semisoshenko M. A. Adaptivnaja radiosvjaz' v sistemah svjazi special'nogo naznachenija [Adaptive Radio Communication in Special Purpose Communication System]. *Elektrosvjaz*, 2007, no. 5, pp. 17-20 (in Russian).

4. Dul'kejt I. V., Zemljanov I. S., Yur'ev A. N. Mnogokriterial'naja adaptacija modema s OFDM k uslovijam rasprostraneniya na korotkovolnovoj radiolinii [The OFDM Modem Multi Criterion Adaptation to Distribution Conditions on Shortwave Radio Link]. *Tendencii i perspektivy razvitija sovremennogo nauchnogo znanija*, Moscow, 2015, pp. 7-20 (in Russian).

5. Ryaskin R. Y., Komarovich V. F. Obosnovanie chastotno-jenergeticheskogo pokazatelja i kriterija vybora verojatnostno-optimal'nyh polos prijoma [Justification of Frequency and Energy Indicator and Criterion for Selecting Probability Optimal Admission Lines]. *Trudy voennoj akademii svyazi*, 2011, no. 76, pp. 54-60 (in Russian).

6. Ohtilev M. Ju., Sokolov B. V., Jusupov R. M. *Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehniceskij ob#ektov.* [Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects]. Moscow, Science Publ., 2006. 410 p. (in Russian).

7. Lipatnikov V. A., Kuzin P. I. A Method of Expediting the Adaptation Parameters Change in Receiving Information in Radio Communication System Operating in Short and Ultra Short Bands. *Control processes automation*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 18-22 (in Russian).

8. Bitkov A. N., Zhilin A. V., Kasibin S. V., Komarovich V. F., Kuznecov S. I., Lipatnikov V. A. *Ustrojstvo avtomaticheskogo vybora rabochih chastot* [Working Frequencies Automatic Selection Devise]. Patent Russia, no. RU 2295761, 2005 (in Russian).

9. Pirogov R. Y., Romanenko K. P., Syzrancev G. V., Fisenko V. A. *Osnovy organizacii svjazi v obshhevojskovykh ob#edinenijah suhoputnyh vojsk* [Basics of

Communication Organization in General Arms Associations of Army]. Saint-Petersburg, Military University of Communication Publ., 2004. 188 p. (in Russian).

10. Erhel Y., Perrine C., Chatellier C., Bourdon P., Lemur D. High Data Rate Radio Communications Through the Ionospheric Channel. *International Journal of Electronics and Communications*, 2007, vol. 61, no 1, pp. 270-278.

11. Antonjuk L. Y., Ignatov V. V. *Jeffektivnost' radiosvjazi I metody ejo ocenki* [Efficiency of Radio Communication and Method of Evaluating It]. Saint-Petersburg, Military Academy of Communication Publ., 1994. 138 p. (in Russian).

12. Skalepov A. N. *Osnovy metodologii I metodiki voenno-nauchnogo znanija* [The Basics of the Military Scientific Research Methodology]. Moscow, 18 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation Publ., 2019. 405 p. (in Russian).

13. Burlov V. G., Zenina E. A., Matveev A. V. Sintez modeli I sposobov funkcionirovanija sistemy v uslovijah konflikta [Synthesis Models and How the System Operates in the Face of Conflict]. *Computing, Telecommunications and Control*, 2012, no. 150, pp. 72-79 (in Russian).

14. Komarovich V. F., Ryaskin R. Y. *Sposob kratkosrochnogo adaptivnogo prognozirovaniya urovnej pomeh v dekametrovom diapazone* [Method of the Short-Term Adaptive Forecasting of Interference Levels in the Decameter Range]. Patent Russia, no. RU 2423786, 2009 (in Russian).

15. Komarovich V. F. *Sluchajnye radiopomehi I nadjozhnost' KV svjazi* [Accidental Radio Interference and Decameter Range Communication Reliability]. Moscow, Communication Publ., 1977. 256 p. (in Russian).

16. Le Roux Y. M., Niberon M., Fleury R., Menard J., Jolivet J. P. HF Channel Modelling and Simulation. *5th International Conference on Radio Receivers and Associated Systems*. London, 1990. pp. 72-76.

17. Vogler L. E., Hoffmeyer J. A. *A New Approach to HF Channel Modeling and Simulation Part II: Stochastic Model*. U.S. Department of Commerce. NTIA Report 90-255, 1990. p. 37.

18. Shmojlova R. A., Sadovnikova N. A. *Analiz vremennyh rjadov I prognozirovanie* [Time Series Analysis and Forecasting]. Moscow, Synergy Book Publ., 2016. 208 p. (in Russian).

19. Kizbikenov K. O. *Prognozirovanie i vremennye rjady* [Forecasting and Time Series]. Barnaul, Altai state pedagogical University Publ., 2017. 113 p. (in Russian).

20. Tregub A. V. Metodika postroenija modeli ARIMA dlja prognozirovaniya dinamiki vremennyh rjadov [ARIMA Model Building Method for the Time Series Dynamics Forecasting]. *Forestry Bulletin*, 2011, no. 5, pp. 179-184 (in Russian).

21. Camacho E. F., Bordons C. *Model Predictive Control*. London, Springer Verlag, 2004. 405 p.

22. Ryaskin R. Y., Chubatyj D. N., Alekaev A. E. How to Calculate the Adaptive Procedures Effectiveness in Multistage Adaptative Communication System. *Radio communication technology*, 2020, no. 1, pp. 35-46 (in Russian).

23. Adler Y P., Markova E V., Granovskij Y V. *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* [Experimental Design when Searching for Optimal Provisions]. Moscow, Science Publ., 1976. 278 p. (in Russian).

Статья поступила 23 марта 2020 г.

### Информация об авторах

*Алекаев Александр Евгеньевич* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аджункт кафедры средств и комплексов связи. Военный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: помехоустойчивость радиолиний; адаптивная обработка сигналов. E-mail: maldonado@ro.ru

Адрес: 162622, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, пр-т Советский, д. 126.

*Липатников Валерий Алексеевич* – доктор технических наук, профессор. Научный сотрудник НИЦ. Военная академия связи им. маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: радиоэлектроника; защита информации; адаптивная обработка сигналов. E-mail: lipatnikovanl@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, пр-т Тихорецкий, д. 3.

*Ряскин Роман Юрьевич* – кандидат технических наук. Доцент кафедры радиоэлектроники. Военный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: помехоустойчивость радиолиний; адаптивная обработка сигналов. E-mail: r\_roman1980@mail.ru

*Капкин Юрий Александрович* – кандидат технических наук. Заместитель начальника кафедры радиоэлектроники. Военный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: моделирование радиотехнических и робототехнических систем; методы спектрального анализа со сверхразрешением; адаптивная обработка сигналов. E-mail: kapkin\_yuri@bk.ru

Адрес: 162622, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, пр-т Советский, д. 126.

---

## Multi Stage Adaptation Model of Low Energy Adaptive Radio Link on High Frequency Range Taking into Account the Spent Radio Link Resources and Predicting the-Interference Environment

A. E. Alekaev, V. A. Lipatnikov, R. Y. Ryaskin, Y. A. Kapkin

*Setting a task.* Low energy radio links on high frequency range, including those using adaptation, are intended for the exchange of information between individual correspondents and management bodies of various departments, and are built, as a rule, through single hop ionospheric radio paths. Currently known adaptive procedures control algorithms cannot be applied to low energy adaptive radio links due to specific conditions of their functioning. It is necessary to take into account the influence of adaptive parameters on the quality indices that describe the requirements for communication, the energy component of the radio link, as well as the resources of the radio link spent on maintaining and restoring communications, which are generally very limited in the conditions of low energy radio link functioning. The use of multi stage adaptation leads to an increase in the number of objects included in the adaptive system, and accordingly to an

increase in the number of internal connections. **The aim of the work** is to build a comprehensive model of functioning of adaptive radio link to determine the impact of the resources used and the amount of radio link resources spent on the adaptive radio link quality indices in different jamming environment. It is proposed to consider an adaptive radio link as a multistage adaptation system. **Methods.** To solve the modeling problem, graphical-analytical and mathematical methods were used to describe operators of control of adaptive procedures built on the basis of a auto regressive integrated moving average model as well as the method of calculating an integrated quality index using the E.S Harrington function. **Results.** A comprehensive model is proposed that provides a study of the structural, functional, energy and prognostic properties of low energy adaptive radio links on high frequency range. Dependencies and relationships from the proposed predicting model enables efficient control of adaptive resources at other stages of adaptation, and variation series based on Harrington function calculations determine a more rational use of radio link resources. **Novelty.** The novelty lies in the proposed radio link model which describes the control of adaptive parameters taking into account the provided interference statistics, predicting and sensing results and the minimization of the energy source detection probability and also allows reducing expenditures of radio link resources. **Practical significance** is determined by using the model for further building the algorithms to control resources of low energy adaptive radio links of the high frequency range and the model also allows to formulate recommendations to specialists in the development of means and complexes of radio communication at the phase of synthesis of interference-protected modes of operation.

**Keywords:** adaptive radio link, ARIMA model, predicting interference levels, integrated quality index.

### Information about Authors

*Alexandr Evgen'evich Alekaev* – Doctoral Student. The postgraduate student of the Department of Communications Funds and Coaches. Military University of radio electronics. Field of research: radio links noise immunity, adaptive signal handling. E-mail: maldonado@ro.ru

Address: Russia, 162622, Russia, Vologda region, Cherepovets, Soviet prospect, 126.

*Valerij Alekseevich Lipatnikov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Scientific work of Research center. Military Academy of Communication S.M. Budenny. Field of research: telecommunication, protecting information, adaptive signal handling. E-mail: lipatnikovanl@mail.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.

*Roman Yur'evich Ryaskin* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of radio electronics. Military University of radio electronics. Field of research: radio links noise immunity, adaptive signal handling. E-mail: r\_roman1980@mail.ru

*Yurij Aleksandrovich Kapkin* – Ph.D. of Engineering Sciences. Replace the Head at the Department of radio electronics. Military University of radio electronics. Field of research: modeling of radio and robotic system; methods of spectral analysis; adaptive signal handling. E-mail: kapkin\_yuri@bk.ru

Address: Russia, 162622, Russia, Vologda region, Cherepovets, Soviet prospect, 126.