

БАВУЛОВ Олег Юрьевич

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ
ВОЗДУШНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СЛУЖБЫ
И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ КООРДИНАЦИИ
С СОВРЕМЕННЫМИ СИСТЕМАМИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

05.25.05 – Информационные системы и процессы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сухов Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Князев Владимир Владимирович,
ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого»,
кафедра защиты информации в системах и комплексах вооружения, профессор
кандидат физико-математических наук, доцент
Савилкин Сергей Борисович,
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
кафедра «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии», доцент

Ведущая организация: ФГУП «Научно-исследовательский институт радио»

Защита состоится «___» _____ 2018 г. в ___ часов ___ мин. на заседании диссертационного совета по техническим наукам Д 222.020.02 при Российском научно-техническом центре информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия по адресу: 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 31, корп. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Российского научно-технического центра информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект, д. 31, корп. 2, с авторефератом и диссертацией дополнительно – на официальном сайте Российского научно-технического центра информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия www.gostinfo.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат экономических наук

Стреха Анатолий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В современном информационном обществе одной из наиболее важных задач является обеспечение надёжной и качественной связи между всеми субъектами информационной деятельности. Наиболее перспективным видом связи на сегодняшний день считается электросвязь. Основной организацией, занимающейся регулированием вопросов в данной области, является Международный союз электросвязи (МСЭ), специализированное учреждение Организации Объединённых Наций (ООН) в области информационно-коммуникационных технологий (ИКТ).

Бурное развитие технологий, прежде всего в области радиосвязи, обусловленное растущими потребностями пользователей в надёжности, доступности и скорости передачи данных, остро ставит вопрос о возможности совмещения различных средств электросвязи и минимизации их взаимного помехового воздействия. Основным руководящим документом, призванным решить эту проблему, является составленный МСЭ «Регламент радиосвязи» (РР), регулярно обновляющийся по результатам Всемирных конференций радиосвязи (ВКР). Согласно п. 4.10 РР: «...аспекты безопасности радионавигационной службы и других служб безопасности требуют специальных мер по обеспечению ограждения их от вредных помех». В полной мере это положение относится и к рассматриваемой в настоящей работе воздушной радионавигационной службе (ВРНС).

Тем не менее, в ряде случаев распределённые в статьях РР для ВРНС на первичной основе участки радиочастотного спектра оказываются распределёнными и другим службам электросвязи, причём, так же на первичной основе. В первую очередь речь идёт о сухопутной подвижной службе (СПС), чьи средства и технологии (4G, LTE, в перспективе – 5G) в настоящее время пользуются широким спросом, стремительно развиваясь и распространяясь. Особую остроту означенная проблема приобретает в условиях, когда управление совместным функционированием указанных служб принципиально децентрализовано. Такая ситуация типична для приграничных регионов Российской Федерации, в которых отечественные станции ВРНС потенциально уязвимы для деструктивного помехового воздействия со стороны мобильных сетей, развёрнутых на территории сопредельных государств.

Заклячая вышесказанное, можно сказать, что тема данного диссертационного исследования по решению научной задачи разработки информационных моделей КС ВРНС и их использования для координации с современными системами мобильной связи является актуальной.

Анализ научно-технической литературы показал, что вопросы построения информационных моделей сложных технических систем в информационном пространстве раскрыты как иностранными, так и отечественными учёными во множестве аспектов, подходов и приложений. Подходы к определению математически обоснованных метрик для задания информационной области и количественного описания информационных процессов предложены в работах Л. Заде, А. Н. Колмогорова, Р. Л. Стратоновича, Р. В. Л. Хартли, К. Шеннона, Ю. А. Шрейдера и других исследователей. Разнообразные приложения информационных моделей для информационной оценки и оптимизации процессов управления техническими комплексами рассмотрены в работах таких учёных как В. В. Бетанов, А. С. Бурый, А. В. Зайцев, Д. А. Ловцов, М. И. Ломакин, А. В. Сухов.

В целом проведенный анализ показал, что методически процедура координации средств СПС и комплекса средств (КС) ВРНС на сегодняшний день обеспечена достаточно слабо. МСЭ разработан ряд документов Рекомендаций, в которых содержатся общие характеристики средств СПС и ВРНС, критерии защиты станций ВРНС различных типов, методики расчёта помех и прочие сведения по вопросу. Однако, несмотря на достаточно полное раскрытие физической сути проблемы совместимости рассматриваемых радиоэлектронных средств (РЭС), в научно-технической литературе не разработано комплексных математических подходов к её решению. Автор данного диссертационного исследования связывает сложившуюся ситуацию с тем, что КС ВРНС рассматривается только как физический объект, тогда как он вместе с тем является и участником информационной деятельности. При переводе проблемы совместимости средств СПС и ВРНС из физического пространства в информационное для её решения могут быть применены информационно-математические методы, в частности методы оптимизации в целевом пространстве, заданном с помощью определённой информационной метрики.

Объектом исследования является обеспечение помехозащищённости комплекса радиоэлектронных средств (станций) ВРНС в условиях воздействия на

них непреднамеренных помех, обусловленных функционированием сетей мобильной связи (станций СПС).

Предмет исследования – информационная модель КС ВРНС во всей полноте взаимодействия с элементами своей сферы отношений, позволяющая осуществлять оптимальное с точки зрения помеховой защищённости станций ВРНС управление параметрами РЭС СПС в предметной области.

Цель настоящей работы состоит в разработке предложений по оптимизации процесса управления состоянием КС ВРНС в условиях деструктивного помехового воздействия со стороны сетей мобильной связи, а также по оптимизации координационных процедур между ВРНС и СПС посредством синтеза информационной модели КС ВРНС в информационном пространстве.

В соответствии с поставленной целью задача исследования заключается в разработке информационной модели КС ВРНС для координации современных средств мобильной связи, оказывающих деструктивное помеховое воздействие на работу средств ВРНС, в информационном пространстве, основанном на информационной мере – энтропии покрытия, а также в разработке математически обоснованных методик и алгоритмов применения указанной модели в целях оптимизации координационных процедур и процессов управления состоянием КС ВРНС в условиях непреднамеренных помех.

Основная задача исследования может быть декомпозирована на следующие частные задачи:

- 1) синтез информационной модели КС ВРНС в информационном (целевом) пространстве;
- 2) разработка методики достижения соглашения между Администрациями связи сопредельных государств по совместному использованию станций СПС и ВРНС в определённом частотном диапазоне;
- 3) разработка методики оптимизации информационного ресурса (ИР) КС ВРНС;
- 4) разработка алгоритмов комплексной информационной оценки помехового воздействия на КС ВРНС со стороны сети мобильной связи, а также координации новых частотных присвоений для единичных средств СПС с КС ВРНС по информационным критериям;

5) проведение комплексной информационной оценки результатов координации КС ВРНС Российской Федерации и сети станций СПС сопредельного государства.

Основными методами исследования, использованными в работе кроме общенаучных методов познания (анализ, классификация, синтез, обобщение, моделирование) стали основы теории радиофизики в части распространения электромагнитных волн, методы теории множеств, теории решения экстремальных задач, в частности, задач оптимального управления в понтрягинской форме, методы анализа иерархий и экспертных оценок, а также методы математической статистики. При машинной организации вычислений в рамках настоящего диссертационного исследования также применялись методы вероятностного программирования.

Научная новизна работы состоит в рассмотрении объекта исследования в информационном целевом пространстве отношений, что позволило произвести синтез информационной модели КС ВРНС, с применением которой были решены оптимизационные задачи исследования.

Основными результатами диссертационного исследования, которые выносятся на защиту, являются:

1) информационная модель КС ВРНС в информационном пространстве, представленная в материалах исследования как в виде детального вербального описания информационных процессов в сфере отношений ВРНС, так и в виде системы конкретных уравнений, посредством которых была формализована сущность установленных особенностей и закономерностей развития исследуемой системы;

2) методика достижения соглашения между Администрациями связи сопредельных государств по совместному использованию станций СПС и ВРНС в определённом частотном диапазоне, построенная на основе анализа иерархической структуры проблемы функционирования КС ВРНС в условиях внешних непреднамеренных помех с применением методов экспертной оценки;

3) методика оптимизации ИР КС ВРНС, в основе которой лежит математический аппарат, сочетающий в себе методы решения экстремальных задач в условиях наличия ограничений на управление, а также элементы математической статистики (марковские последовательности, байесовское оптимальное

оценивание), позволяющие применять указанную методику в условиях реальной эксплуатации КС ВРНС с учётом влияния возмущающих факторов;

4) алгоритмы комплексной информационной оценки помехового воздействия на КС ВРНС со стороны сети мобильной связи, а также координации новых частотных присвоений для единичных средств СПС с КС ВРНС по информационным критериям;

5) результаты комплексной информационной оценки результатов координации КС ВРНС Российской Федерации (РФ) и сети станций СПС сопредельного государства в виде таблицы соответствия параметров координируемых станций СПС их нормативным значениям, а также результатов расчётов значений информационной метрики, в том числе в визуальном представлении.

Практическая значимость исследования состоит в том, что приведённые выше результаты были применены для информационной оценки помехового воздействия от реальных сетей СПС; разработаны конкретные методики и алгоритмы, которые могут быть применены для решения частных задач координации станций СПС с КС ВРНС сопредельных государств по различным сценариям помеховой обстановки.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается строгостью математического обоснования полученных результатов, объективной физической интерпретацией результатов моделирования, использованием в разработанных методиках и алгоритмах актуальных процедур технического регулирования по вопросу исследования, а также выводом расчётных результатов из реальных характеристик функционирующих в настоящее время станций электросвязи.

Апробация результатов исследования нашла отражение в разработках итоговых документов при заключении соглашений между Администрацией связи РФ и Администрациями связи сопредельных государств, выполненных сотрудниками ООО «Гейзер-Телеком», ФГУП «Главный радиочастотный центр», ФГУП «Научно-исследовательский институт радио» в процессе работы делегации Администрации связи РФ.

Материалы диссертационного исследования опубликованы в 10 печатных работах общим объемом 6,1 п.л., из которых 5,2 п.л. принадлежат автору, при этом 3 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей

аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных результатов диссертационных исследований на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Структура и объём работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список сокращений и список литературы. Общий объём диссертации составил 169 страниц, в которые входит 55 рисунков, 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана основная характеристика диссертационной работы, показана актуальность темы исследования, сформулирована достигаемая в процессе исследования цель, поставлены основная и частные научные задачи. Вместе с тем отмечена научная новизна, а также практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту, и приведены сведения об апробации результатов исследования.

В первой главе проведён общий анализ структуры и назначения совместно используемых служб радиосвязи: ВРНС и СПС. Приведены критерии помеховой защищённости станций ВРНС в зависимости от их типа. Детально рассмотрено явление множественной непреднамеренной помехи от сетей станций СПС на КС ВРНС при всех возможных сценариях помеховой обстановки. Поставлена проблема координации станций ВРНС и СПС сопредельных государств в приграничном регионе. Введено понятие соглашения между Администрациями связи сопредельных государств по совместному использованию средствами СПС и ВРНС определённого частотного диапазона (Соглашение). Проведена математическая постановка задачи исследования.

Параметры реально существующих станций СПС представлены как компоненты многомерного вектора в предметной области $R_T(t)$. Суммируя этот вектор по станциям СПС и ВРНС, получим обобщённый вектор состояния КС ВРНС в условиях помехового воздействия со стороны сети СПС (далее - вектор технических показателей). Нормативные значения, заданные Соглашением, также представлены вектором R_{Tnorm} в предметной области.

С учётом изложенного задача исследования состоит в следующем. При заданных параметрах внешних воздействий и взаимоотношений между элементами системы на заданном промежутке времени в предметной области осуществить

перевод вектора технических показателей из произвольной точки некоторой ограниченной области Θ значений вокруг вектора нормативных показателей в другую произвольную точку этой же области. Иными словами, автор формулирует требование удержания вектора технических показателей в ограниченной области Θ в целях предупреждения чрезмерного расхождения реальных параметров, определяющих помеховое воздействие, и нормативных значений. Математически выразим сказанное следующим образом.

$$R_T(t_n) \rightarrow R_T(t_k), R_T(t_n) \in \Theta, R_T(t_k) \in \Theta, R_{Tnorm} \in \Theta, \quad (1)$$

где t_n, t_k – соответственно начальный и конечный моменты процесса.

Задана целевая функция Φ_0 , которую необходимо оптимизировать:

$$\Phi_0 = \int_{t_n}^{t_k} I_0(R_T(t), t) dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

Во второй главе разработана методика достижения Соглашения, построена информационная модель КС ВРНС в информационном пространстве, проведено обоснование целевой области для КС ВРНС на основе энтропии покрытия, корректно описана сфера отношений ВРНС, определены уравнения динамики информационных потоков между элементами системы.

В рамках разработки методики достижения Соглашения дано иерархическое представление проблемы работы КС ВРНС в условиях помехового воздействия, которое схематично изображено на рисунке 1.

Для станций, размещенных в одной и той же зоне, разрабатываются единые требования. Степень жёсткости требований определяется по результатам ранжирования характеристик станций СПС по степени влияния на результирующее значение напряжённости поля суммарной помехи. Для достижения этих целей может быть использован подход к организации экспертной системы на базе метода анализа иерархий, разработанного Т. Саати. Для оценки согласованности мнений экспертов используется коэффициент конкордации Кендалла.

Приведённый подход призван служить руководством по организации соответствующих мероприятий для сотрудников Администраций связи. Разработанная методика является гибким и математически обоснованным инструментом принятия решений при множестве альтернативных вариантов выбора.

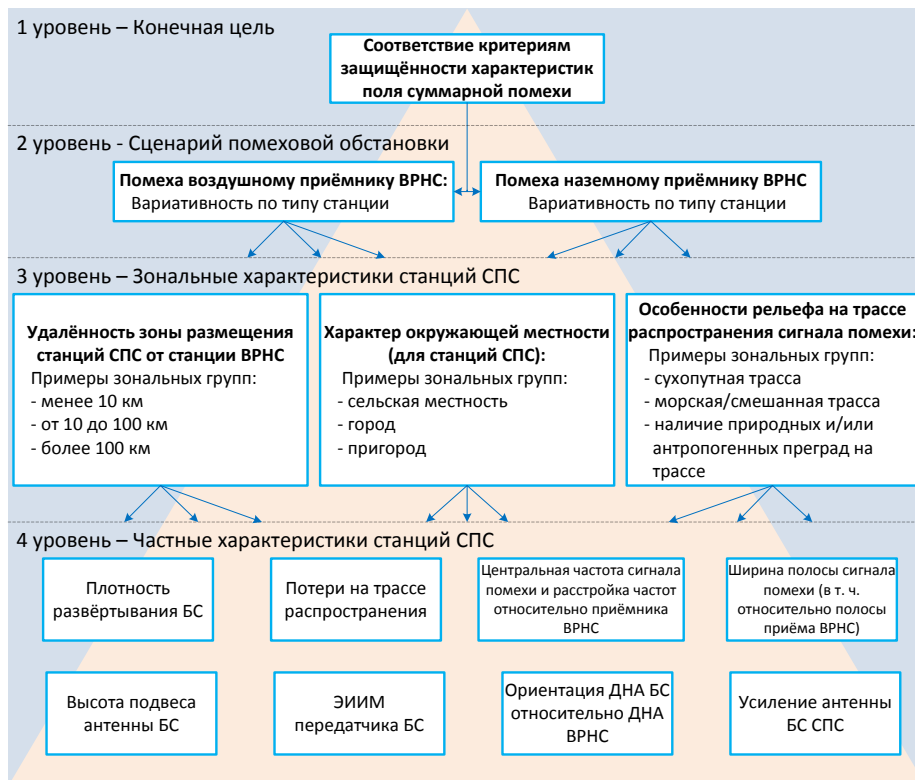


Рисунок 1. Иерархическое представление проблемы работы КС ВРНС в условиях помехового воздействия

После анализа наиболее используемых мер информации автор настоящей работы пришёл к выводу, что энтропия покрытия H_{Π} полностью соответствует поставленным в настоящем исследовании задачам, так как в обобщённой форме эта метрика характеризует степень соответствия/несоответствия реальных характеристик определённой системы заданным нормативным значениям.

Анализ результатов отображения состояния КС ВРНС в условиях помехового воздействия со стороны условной сети мобильной связи доказывает соответствие метрики установленным критериям пригодности, а именно: энтропия покрытия обладает свойствами специфичности, детерминированности, адекватности.

Помимо вектора технических показателей R_T , введены в предметной области векторы R_0 , R_1 , R_2 для ВРНС, АС и СПС соответственно, нормы которых рассматриваются как обобщённые показатели запаса ресурсов (денежных, технических, интеллектуальных и т. п., вводимых как компоненты векторов R_0 , R_1 , R_2). Нормативные значения этих показателей $(R_0)_{norm}$, $(R_1)_{norm}$, $(R_2)_{norm}$ выбираются без ограничений как начальные условия в соответствии с конкретным состоянием элементов системы.

На рисунке 2 сфера отношений ВРНС в целевой области представлена в виде графа, в вершинах которого располагаются элементы системы управления, а центральным узлом является технический комплекс, представляющий собой совокупность совместно функционирующих станций СПС и ВРНС.

Динамику процессов поступления и расходования ресурсов, а также изменения показателей в системе, руководствуясь особенностями внутренних взаимоотношений, можно описать системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{R}_T = -\xi_{0T}d_{0T}R_0 - \xi_{1T}d_{1T}R_1 + \xi_{2T}d_{2T}R_2, \\ \dot{R}_0 = \xi_{00}R_0 - \xi_{T0}d_{T0}R_T, \\ \dot{R}_1 = \xi_{11}R_1 - \xi_{T1}d_{T1}R_T, \\ \dot{R}_2 = \xi_{22}R_2 - \xi_{T2}d_{T2}R_T, \end{cases} \quad (3)$$

где $d_{ij}(t)$ – управляющее воздействие на j -й элемент со стороны i -го;

ξ_{ij} – интенсивность воздействия на j -й элемент со стороны i -го.

Задача исследования заключается в выборе в целевой области таких управлений d_i , которые являлись бы оптимальными, то есть расходование ресурсов и увеличение/уменьшение показателей, связь которых описывается системой (3), происходили бы за наименьшее время. В информационном пространстве это эквивалентно требованию максимизации приращения энтропии покрытия на малом промежутке времени, то есть текущей энтропии покрытия h_i .

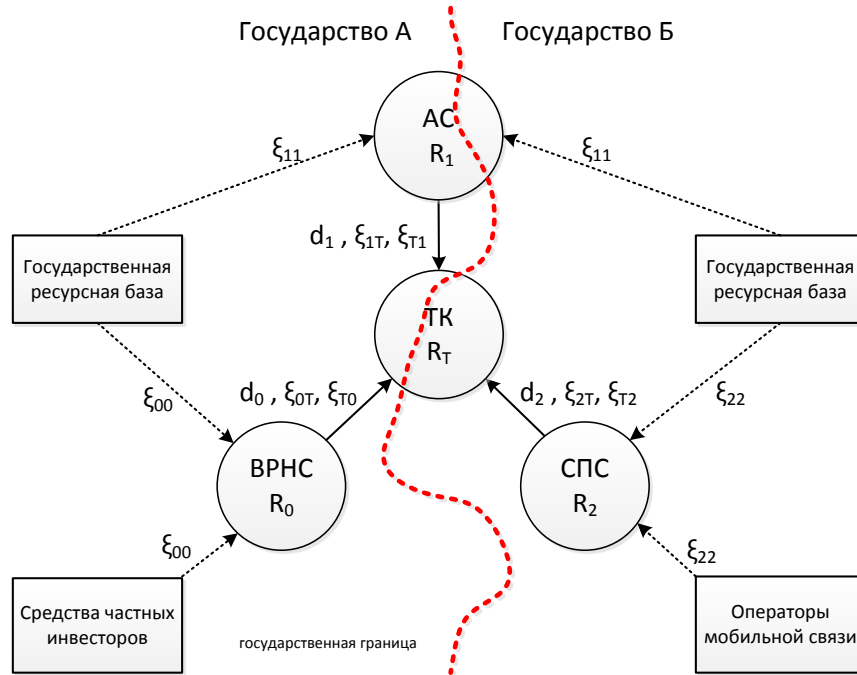


Рисунок 2. Представление сферы отношений КС ВРНС в виде графа

С учётом вида уравнений в (3) задана система дифференциальных уравнений связи, определяющих зависимость текущих энтропий от соответствующих управлений. Для управляющих воздействий введены ограничения, связанные с конкретным распределением отношений в системе.

Третья глава диссертации посвящена разработке методики оптимизации информационного ресурса (ИР) КС ВРНС. Соотношения системы (4) представляют собой задачу оптимального управления автономной системой с интегральной целевой функцией на фиксированном отрезке времени со свободными концами в понтрягинской форме.

Целевая функция:

$$\Phi_0 = \int_{t_H}^{t_K} \left(d_{iT}^t(t) V_{iT} h_T(R, t) \right) dt \rightarrow \min,$$

ограничения на изменение ресурсов/показателей:

$$\Phi_1 = \int_{t_H}^{t_K} \left(d_{i0}^t(t) V_{i0} h_{R0}(R, t) \right) dt - H_{R0max} \leq 0,$$

$$\Phi_2 = \int_{t_H}^{t_K} \left(d_{i1}^t(t) V_{i1} h_{R1}(R, t) \right) dt - H_{R1max} \leq 0,$$

$$\Phi_3 = \int_{t_H}^{t_K} \left(d_{i2}^t(t) V_{i2} h_{R2}(R, t) \right) dt - H_{R2max} \leq 0, \quad (4)$$

уравнения дифференциальной связи:

$$\Psi_0 = \dot{h}_T(t) - \frac{d}{dt} \left(\sum_j d_{ji}(t) V_{ji} R_j(t) \right) = 0,$$

$$\Psi_{i+1} = \dot{h}_{Ri}(t) - \frac{d}{dt} \left(\sum_j d_{ji}(t) V_{ji} R_j(t) \right) = 0,$$

начальные условия:

$$\Phi_4 = H_0(t_H) - (H_0)_{init} = 0, \Phi_5 = H_1(t_H) - (H_1)_{init} = 0,$$

$$\Phi_6 = H_2(t_H) - (H_2)_{init} = 0,$$

ограничения на управление, границы отрезка времени планирования:

$$\xi_{ij}d_{ij} \in [-1; 1], \quad t_n = 0, \quad t_k = T, \quad i = 0, 1, 2, \quad j = 0, 1, 2, T.$$

Здесь и далее будем полагать $i = 0, 1, 2, j = 0, 1, 2, T$, если не указано обратное. Функция Лагранжа для настоящей задачи имеет вид:

$$\mathcal{L} = \int_0^T L(h_{Ri}, h_T, d_i) dt + l(h_{Ri}, h_T, d_i), \quad (5)$$

$$L = -\lambda_0 d_{Ti}^t V_{Ti} h_T - \sum_{i=0}^2 \lambda_{i+1} d_{ji}^t V_{ji} h_{Ri} + p_0(\dot{h}_T - \Psi_0) + \sum_{i=0}^2 p_{i+1}(\dot{h}_{Ri} - \Psi_{i+1}), \quad (6)$$

$$l = \lambda_1 H_{R0max} + \lambda_2 H_{R1max} + \lambda_3 H_{R2max} - \sum_{i=0}^2 \lambda_{i+4} (H_i(0) - (H_i)_{init}), \quad (7)$$

где L, l – соответственно лагранжиан и терминант функции Лагранжа;

λ_i – неопределённые множители Лагранжа;

$p_i(t)$ – сопряжённые переменные.

Функция Понтрягина $P = P(d_{ij}, h_i, t)$ имеет следующий вид:

$$P = \lambda_0 d_{Ti}^t V_{Ti} h_T + \sum_{i=0}^2 \lambda_{i+1} d_{ji}^t V_{ji} h_{Ri} + \sum_{i=0}^3 p_i \Psi_i. \quad (8)$$

Учитывая особенности функционирования эргаситом, рассматриваемый горизонт стратегического планирования T был разбит на некоторое число N эквидистантных промежутков времени Δt , достаточно малых, чтобы считать значения управляющих воздействий на них постоянными. Поставленная задача оптимального управления (4) была решена на каждом шаге Δt .

Систему дифференциальных уравнений (3), описывающую динамику состояния системы в предметной области, можем переписать как соответствующую систему уравнений в конечных разностях на k -м шаге, что позволяет переопределить систему уравнений связи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta H_T}{\Delta t} \cdot \ln 2 + \xi_{0T} d_0 R_0 + \xi_{1T} d_1 R_1 - \xi_{2T} d_2 R_2 = 0, \\ \frac{\Delta H_0}{\Delta t} \cdot \ln 2 + \xi_{T0} d_0 R_T - \xi_{00} R_0 = 0, \\ \frac{\Delta H_1}{\Delta t} \cdot \ln 2 + \xi_{T1} d_1 R_T - \xi_{11} R_1 = 0, \\ \frac{\Delta H_2}{\Delta t} \cdot \ln 2 + \xi_{T2} d_2 R_T - \xi_{22} R_2 = 0. \end{array} \right. \quad (9)$$

Рассмотрены необходимые условия принципа максимума Понтрягина.

1) Стационарность по фазовым переменным.

Стационарные по фазе точки находятся с помощью уравнения Эйлера для лагранжиана, откуда следует сопряжённая система уравнений:

$$-\frac{d}{dt} L_{\dot{h}}(t) + L_h(t) = 0 \Rightarrow \dot{p}_i(t) = -\frac{\partial P}{\partial h_i}. \quad (10)$$

Тогда, подставляя в (10) конкретный вид P из (8), получим следующую систему уравнений для сопряжённых переменных на k -м шаге:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_0 = \Delta t(-\xi_{0T} d_0 - \xi_{1T} d_1 + \xi_{2T} d_2), \\ \Delta p_1 = -\lambda_1 \Delta t(\xi_{00} - \xi_{T0} d_0), \\ \Delta p_2 = -\lambda_2 \Delta t(\xi_{11} - \xi_{T1} d_1), \\ \Delta p_3 = -\lambda_3 \Delta t(\xi_{22} - \xi_{T2} d_2). \end{array} \right. \quad (11)$$

2) Трансверсальность по фазовым переменным.

Данное условие задаёт соотношение между лагранжианом L и терминантом l в начальный момент времени $t_n = 0$.

$$L_{\dot{h}}(0) = l_{h(0)} \Rightarrow p_i(0) = 0. \quad (12)$$

После выполненных преобразований, (12) представляет собой начальные условия для сопряжённых переменных, которые должны быть использованы при решении системы дифференциальных уравнений (11).

3) Оптимальность по управляющим воздействиям.

Требуется найти такие $d_i(t)$, при которых:

$$P = \max_{\xi_{ij} d_{ij} \in [-1; 1]} P. \quad (13)$$

Оптимальное управление будем искать среди стационарных по управлению точек функции Понтрягина:

$$\frac{\partial H}{\partial d_i} = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \xi_{0T} \Delta H_T - \lambda_1 \xi_{T0} \Delta H_{R0} - p_0 \xi_{0T} \Delta R_0 - p_1 \xi_{T0} \Delta R_T = 0, \\ \xi_{1T} \Delta H_T - \lambda_2 \xi_{T1} \Delta H_{R1} - p_0 \xi_{1T} \Delta R_1 - p_2 \xi_{T1} \Delta R_T = 0, \\ -\xi_{2T} \Delta H_T - \lambda_3 \xi_{T2} \Delta H_{R2} + p_0 \xi_{2T} \Delta R_2 - p_3 \xi_{T2} \Delta R_T = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

4) Неположительность множителей Лагранжа (условие задачи на поиск максимального значения функции Понтрягина).

$$\lambda_i \leq 0, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (15)$$

5) Нетривиальность.

Множители λ_i и сопряжённые переменные p_i не равны 0 одновременно:

$$\sum_{i=0}^3 |\lambda_i| + \sum_{i=0}^3 |p_i| > 0, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (16)$$

4) Дополняющая нежёсткость.

$$\lambda_i \Phi_i = 0 \Rightarrow \begin{cases} \xi_{00} \Delta H_{R0} - \xi_{T0} d_0 \Delta H_{R0} - H_{R0max} = 0, \\ \xi_{11} \Delta H_{R1} - \xi_{T1} d_1 \Delta H_{R1} - H_{R1max} = 0, \\ \xi_{22} \Delta H_{R2} - \xi_{T2} d_2 \Delta H_{R2} - H_{R2max} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, из приведённых выше условий (17) и записанных в форме конечных разностей уравнений состояния системы в информационном пространстве (9) можно составить систему из семи уравнений с семью неизвестными $d_0, d_1, d_2, \Delta H_{R0}, \Delta H_{R1}, \Delta H_{R2}, \Delta H_T$.

Выразим из системы уравнений связи (9) значения управлений.

$$\begin{cases} d_0 = \frac{1}{\xi_{T0} R_T} (\xi_{00} R_0 - \ln 2 \cdot \Delta H_{R0} \Delta t^{-1}), \\ d_1 = \frac{1}{\xi_{T1} R_T} (\xi_{11} R_1 - \ln 2 \cdot \Delta H_{R1} \Delta t^{-1}), \\ d_2 = \frac{1}{\xi_{T2} R_T} (\xi_{22} R_2 - \ln 2 \cdot \Delta H_{R2} \Delta t^{-1}). \end{cases} \quad (18)$$

Подставляя выражение для d_0 из (18) в (17), получим квадратное уравнение относительно ΔH_{R0} с заведомо неотрицательным дискриминантом.

$$\Delta H_{R0}^2 + \ln^{-1} 2 \cdot \Delta t \xi_{00} (R_T - R_0) \Delta H_{R0} - \ln^{-1} 2 \cdot \Delta t R_T H_{R0max} = 0. \quad (19)$$

Аналогичным способом составим квадратные уравнения для $\Delta H_{R1}, \Delta H_{R2}$, решая которые, найдём по два численных значения приращений энтропии покрытия для каждого элемента, соответствующее значение управления найдём по (18). Итак, система уравнений с неизвестными $d_0, d_1, d_2, \Delta H_{R0}, \Delta H_{R1}, \Delta H_{R2}$ имеет общее число решений, равное восьми.

Для каждого решения найдём соответствующие значения $\Delta H_T, \Delta p_0, \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, получив 8 наборов решений для всех неизвестных величин, из

которых следует отобрать тот набор, который удовлетворяет всем заданным ограничениям и доставляет максимум функции Понтрягина. Общий алгоритм решения задачи оптимального управления КС ВРНС представлен на рисунке 3.

Так как фактически значения обобщённых показателей системы R_0, R_1, R_2, R_T в данный момент времени являются случайными величинами, автором предложена методика корректного перехода от непрерывных процессов к их модели в дискретном времени.

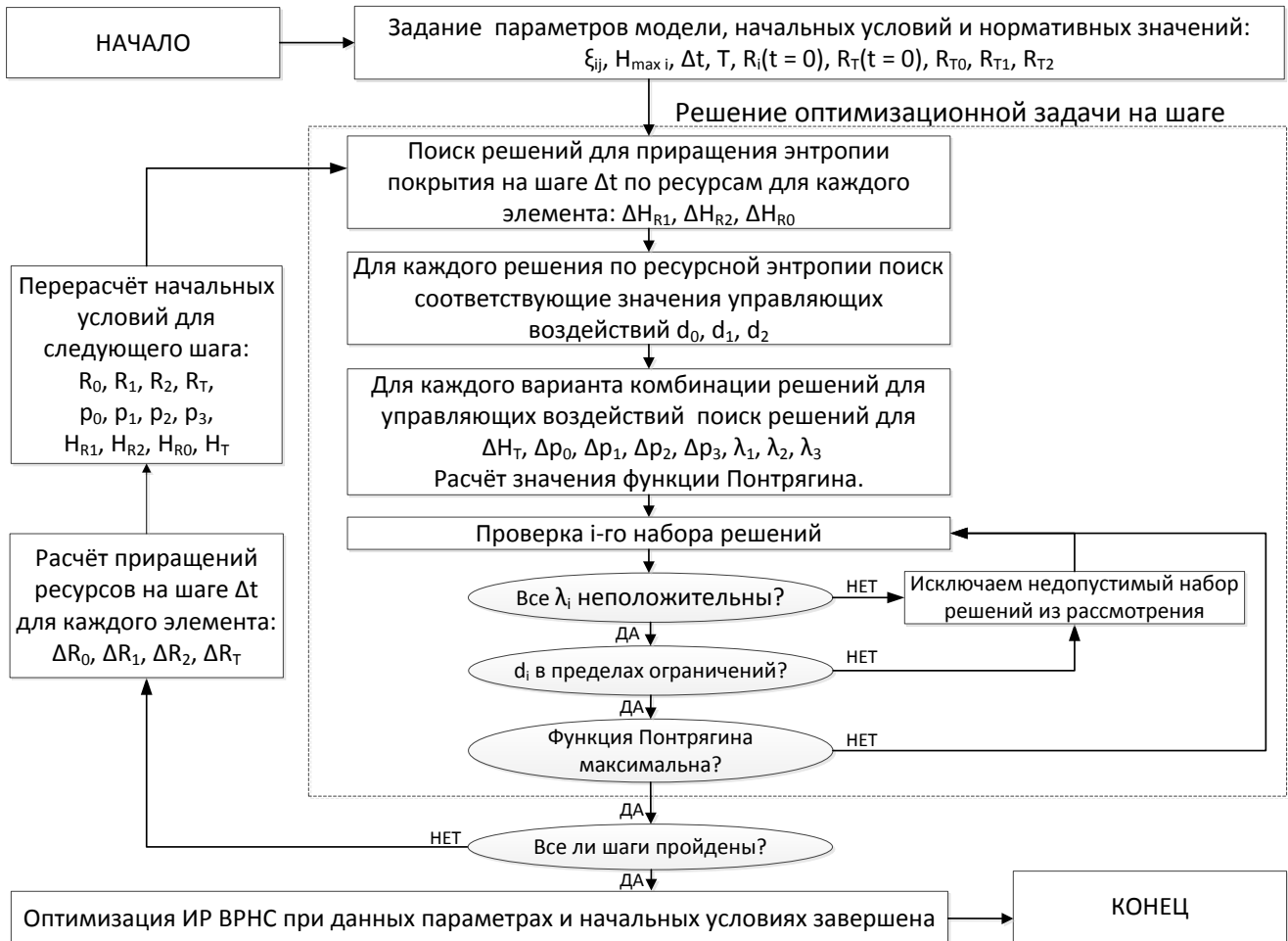


Рисунок 3. Алгоритм решения задачи оптимального управления КС ВРНС

Моделирование марковских последовательностей осуществлялось итеративно по заранее выбранным шагам дискретизации согласно выражению:

$$R_{n+1} = \Lambda(\tau) R_n + \Gamma n_n, \quad \Lambda(\tau) = \exp(A\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(A\tau)^k}{k!} \approx I + A\tau, \quad (20)$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \sqrt{D_T\tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{D_0\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{D_1\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{D_2\tau} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & -\xi_{0T}d_0 & -\xi_{1T}d_1 & -\xi_{2T}d_2 \\ -\xi_{T0}d_0 & \xi_{00} & 0 & 0 \\ -\xi_{T1}d_0 & 0 & \xi_{11} & 0 \\ -\xi_{T2}d_0 & 0 & 0 & \xi_{22} \end{pmatrix}$$

где D_T , D_0 , D_1 , D_2 – дисперсии шумов по элементам системы;
 I – единичная матрица.

Вместе с тем значение энтропии покрытия вычисляется не для моментального случайного значения показателя, а для его некоторой оптимальной оценки, доставляющей максимум апостериорной плотности распределения вероятности (ПРВ) случайной величины. Для получения оптимальной оценки вектора состояния на исходе k -го шага управления была построена многомерная модель, линейная по времени за счёт постоянства локального управления, латентными (неизмеряемыми) переменными которой являются значения управляющих воздействий и дисперсий гауссовских шумов.

Декомпозиция задачи в исходной постановке привела нас к поиску оптимальных оценок по двум группам параметров: дисперсии и управляющие воздействия.

Известно, что для условных ПРВ справедливо соотношение, аналогичное формуле Байеса, которое позволяет найти апостериорную ПРВ, зная условную ПРВ (находится из функции правдоподобия данных) и априорные ПРВ.

$$P(\tilde{d}_{(k)}, \tilde{D} | R_{(k)}(t)) = \max \frac{P(R_{(k)}(t) | d_{(k)}, D) P(d_{(k)}) P(D)}{P(R_{(k)}(t))}. \quad (21)$$

где $\tilde{d}_{(k)}$, $\tilde{D}$ – оптимальные оценки управлений и дисперсий;

$R_{(k)}(t)$ – наблюдаемый марковский процесс.

В настоящей работе для получения апостериорного распределения был применен метод Монте-Карло в цепях Маркова (Markov chain Monte Carlo - MCMC). Программная реализация осуществлена на языке программирования Python версии 3.6.1. Типовые примеры получаемых результатов моделирования представлены на рисунках 4 и 5.

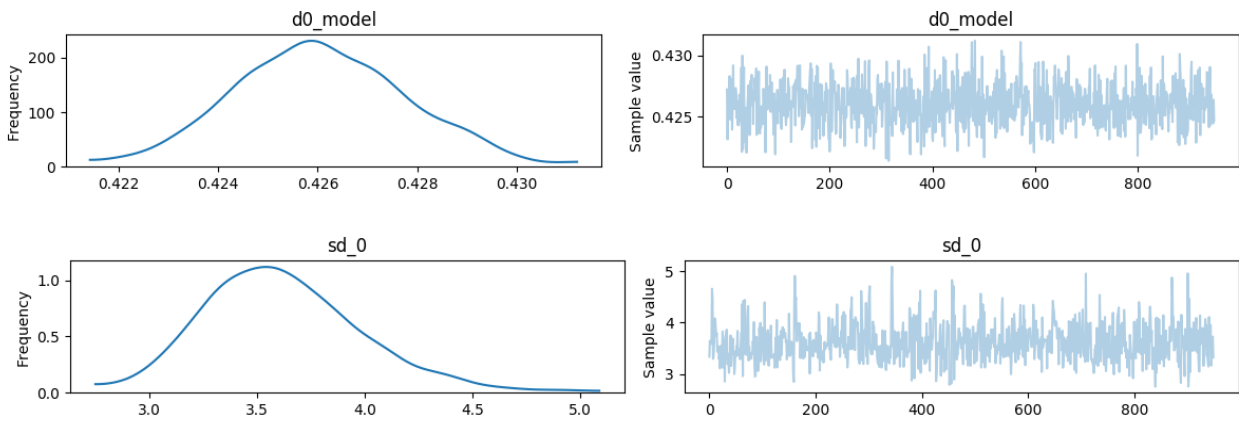


Рисунок 4. Апостериорное распределение (слева) и след выборки (справа) для управления d_0 и стандартного отклонения показателя R_0

На основе представленного подхода по применению системы байесовского вывода, а также ранее разработанного алгоритма решения задачи оптимального управления в понтрягинской форме в работе предложена методика оптимизации информационного ресурса ВРНС в ходе процесса реального управления, то есть при воздействии возмущающих факторов, которая представлена на рисунке 6.

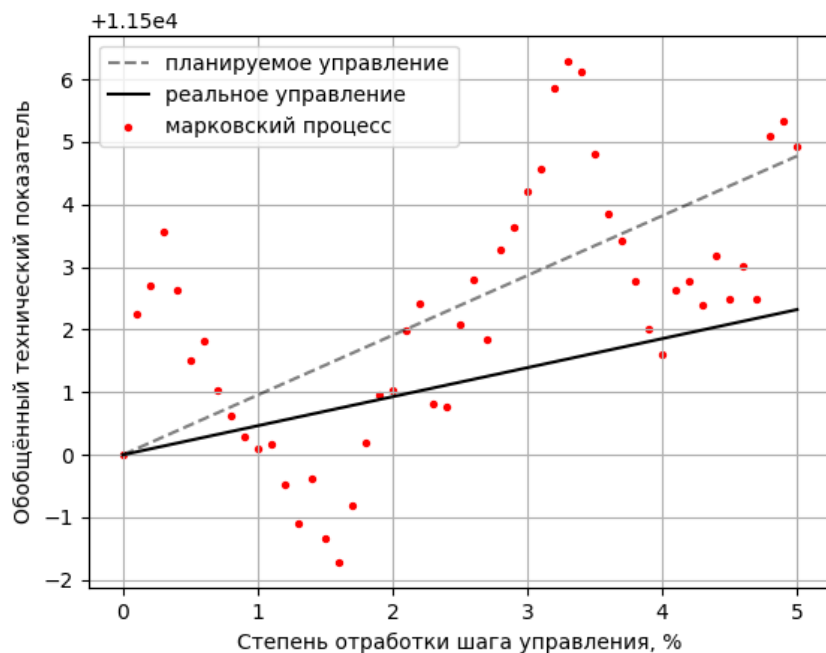


Рисунок 5. Результат оптимальной оценки значения обобщённого технического показателя R_T на исходе шага локального управления

В четвертой главе приведён перечень рекомендаций по применению методики оптимизации информационного ресурса ВРНС, а также рассмотрены

вопросы координации с КС ВРНС как целых сетей мобильной связи, так и отдельных станций.

В качестве демонстрации применения информационного подхода к анализу электромагнитной совместимости средств ВРНС со средствами СПС была проведена информационная оценка характеристик станций реальной сети мобильной связи сопредельного государства, развертываемой в непосредственной близости от границы с РФ, на соответствие условиям Соглашения. Результаты оценки в битах приведены на рисунке 7.

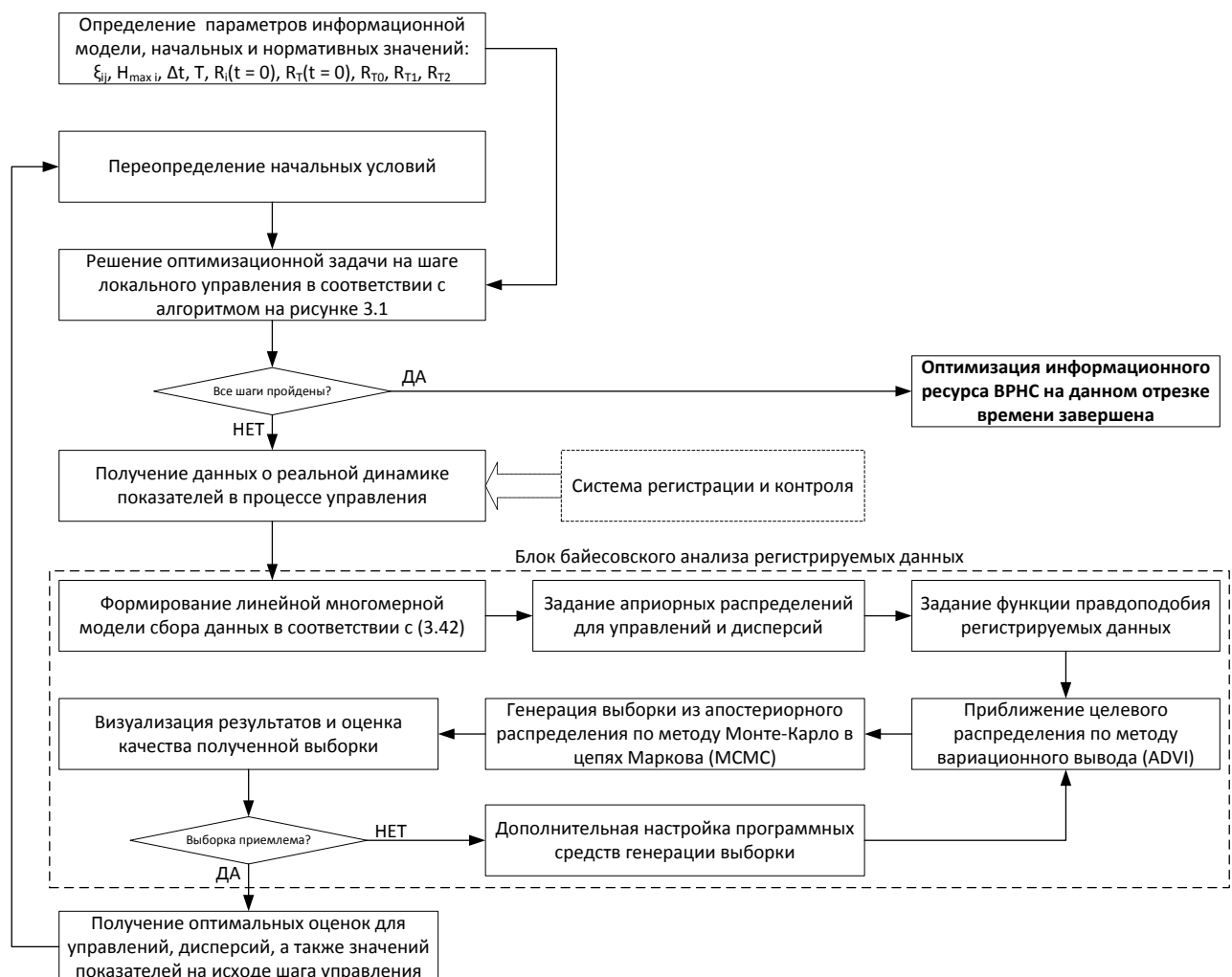


Рисунок 6. Методика оптимизации информационного ресурса ВРНС

Оценка была проведена для трёх ситуаций:

- 1) исходные предложения АС сопредельного государства;
- 2) полное исключение станций СПС сопредельного государства, не удовлетворяющих условиям Соглашения;

3) ситуация компромисса, учитывающая предложения АС сопредельного государства и не допускающая запрещённого по критерию защиты уровня помех на РЭС ВРНС.

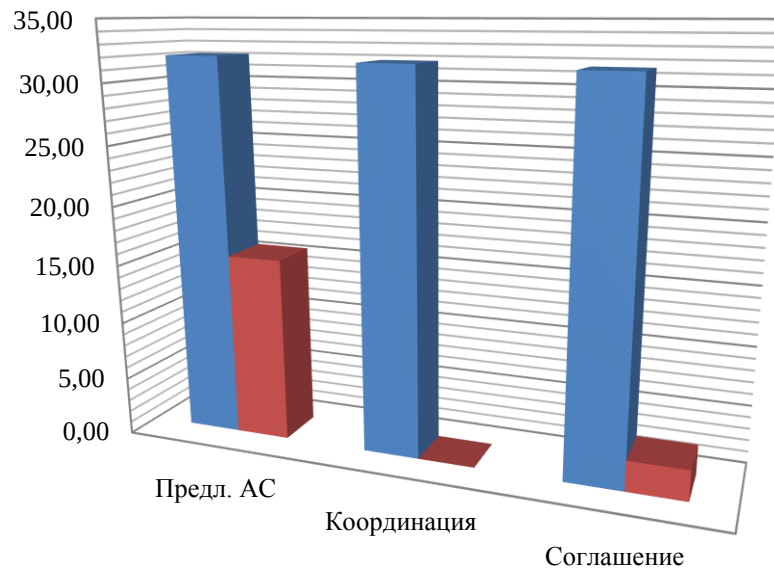


Рисунок 7. Результаты комплексной информационной оценки помехового воздействия на КС ВРНС со стороны сети мобильной связи

Наряду с приведённым выше анализом комплексного помехового воздействия не менее актуальной задачей является оценка вклада излучения, создаваемого единичной БС СПС. Решение этого вопроса позволяет адекватно реагировать на изменение помеховой обстановки в приграничном регионе.

Автором настоящего исследования разработан алгоритм координации нового частотного присвоения для единичной БС СПС и КС ВРНС. Указанный алгоритм схематично представлен на рисунке 8.

Приведенный алгоритм надёжен и гарантированно обеспечивает защиту КС ВРНС, однако он имеет ряд недостатков:

1) существенная часть алгоритма состоит из операций в предметной области, что значительно увеличивает трудоёмкость работ по нему;

2) в алгоритме недостаточно эффективно используются возможности, которые предоставляет разработанная информационная модель КС ВРНС.

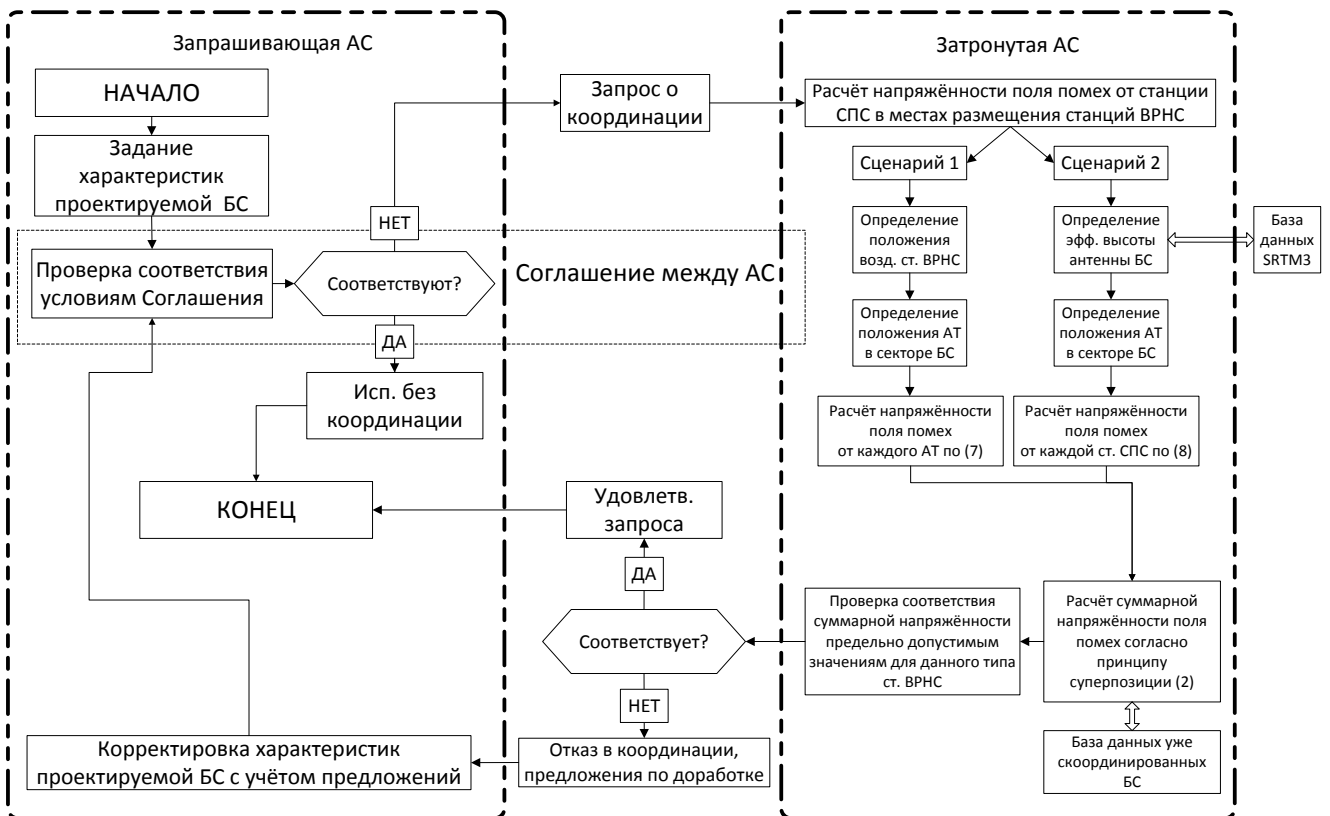


Рисунок 8. Алгоритм координации нового частотного присвоения для СПС

В целях компенсации указанных недостатков проведена доработка алгоритма дополнительным блоком обработки запросов, представленным на рисунке 9. По итогам отбора только подходящие по заданным целевым критериям станции будут допущены к проведению полномасштабных радиотехнических проверок. Возможность гибкой настройки информационных критериев и простота автоматизации вычислений по данному алгоритму позволяют существенно снизить нагрузку на координационный аппарат АС и значительно повысить его эффективность.

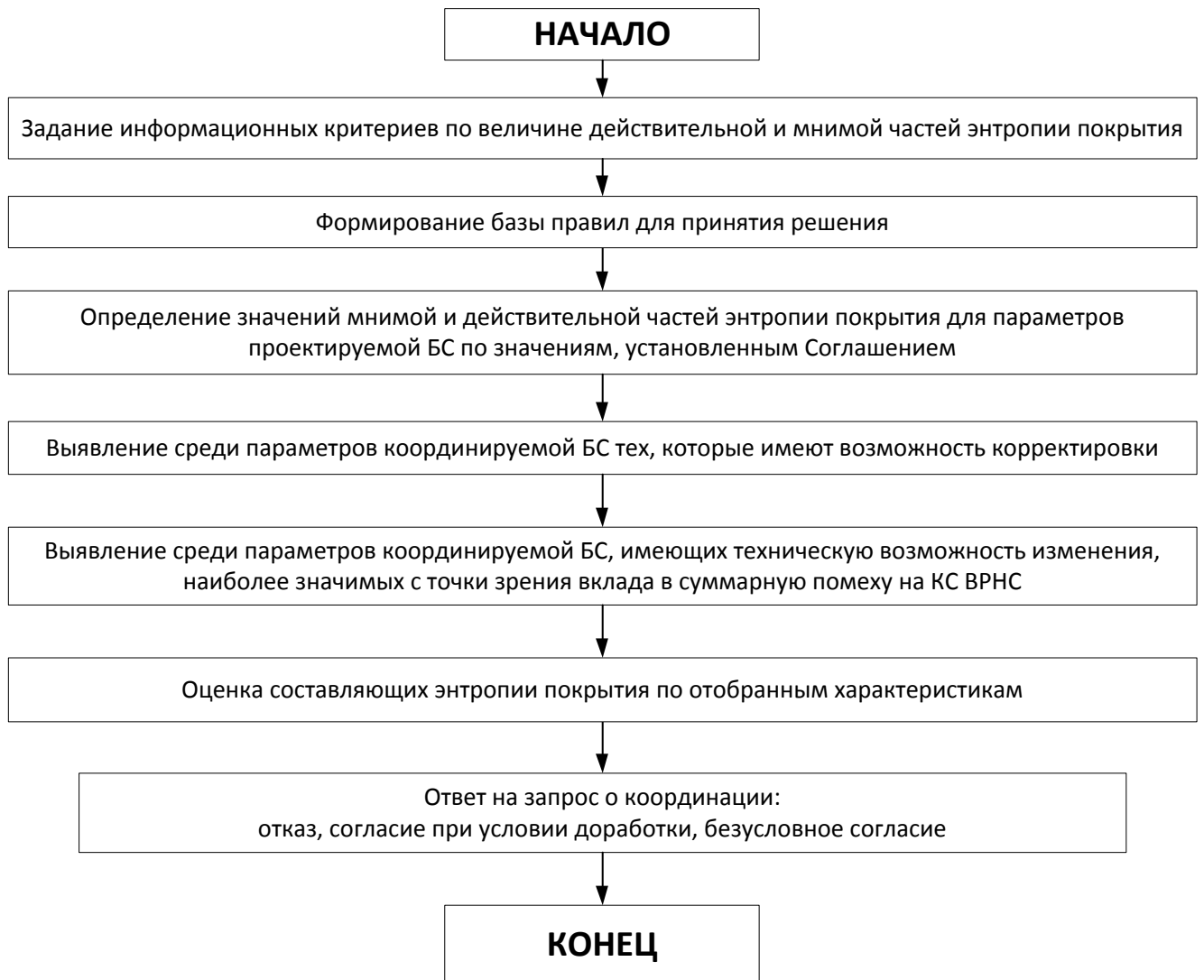


Рисунок 9. Алгоритм предварительной потоковой обработки запросов на координацию по информационным критериям

В заключении сделаны основные выводы и приведены результаты, полученные в ходе проведённого исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В представленном диссертационном исследовании решена актуальная научная проблема эффективного управления КС ВРНС в условиях деструктивного помехового воздействия со стороны сетей станций мобильной связи (СПС). Комплексный информационный подход к решению поставленных задач позволяет сформировать широкий взгляд на обозначенную проблему и учесть не только

требования Соглашения, но и пожелания координирующей стороны. Корректное применение предложенной методики оптимизации ИР ВРНС обеспечит смягчение противодействия ВРНС и СПС за счёт постоянного поиска состояния компромисса между жёсткими требованиями ВРНС по отношению к станциям СПС и неограниченным стремлением СПС к повышению качества связи относительно дешёвыми экстенсивными мерами. Реализация выработанных управляющих воздействий опирается на правовой авторитет Администраций связи и заключённых ими Соглашений, относительно которых в исследовании представлены отдельная методика, подробно изложенная и проиллюстрированная типовым сквозным примером.

Представленная многокритериальная информационная модель КС ВРНС обладает высокой степенью гибкости, что чрезвычайно расширяет возможный круг решаемых с помощью неё задач. Помимо высокоточной настройки под любую конфигурацию отношений в системе «СПС – АС - ВРНС» с возможностью изменять эти параметры на любом достаточно малом шаге локального управления, в дальнейшем возможна адаптация применяемого подхода для оценки помехового воздействия со стороны других потенциально опасных служб электросвязи, например, службы радиовещания.

Также в качестве перспективы работ по теме диссертационного исследования можно рассматривать возможность применения аналогичных информационных моделей для оценки состояния и защиты других критически важных служб радиосвязи, подверженных риску непреднамеренного деструктивного радиовоздействия.

В ходе исследования были получены следующие результаты.

1. Проведён синтез информационной модели КС ВРНС в информационном (целевом) пространстве.
2. Разработана методика достижения соглашения между Администрациями связи сопредельных государств по совместному использованию станций СПС и ВРНС в определённом частотном диапазоне.
3. Разработана методика оптимизации информационного ресурса (ИР) КС ВРНС.
4. Разработаны алгоритмы комплексной информационной оценки помехового воздействия на КС ВРНС со стороны сети мобильной связи, а также

координации новых частотных присвоений для единичных средств СПС с КС ВРНС по информационным критериям.

5. Проведена комплексная информационная оценка результатов координации СПС сопредельных государств с КС ВРНС Российской Федерации (РФ).

Таким образом, путём реализации всех поставленных частных задач полностью решена основная задача исследования, то есть построена информационная модель КС ВРНС для координации современных средств мобильной связи, оказывающих деструктивное помеховое воздействие на работу средств ВРНС в информационном пространстве, основанном на энтропии покрытия, разработаны обоснованные методики и алгоритмы применения информационной модели в целях оптимизации координационных процедур и процессов управления состоянием КС ВРНС, тем самым достигнута поставленная цель настоящего диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Вавулов, О.Ю., Сухов, А.В., Решетников, В.Н. Алгоритмы информационной оценки совместимости средств мобильной связи и станций воздушной радионавигационной службы / О. Ю. Вавулов, А. В. Сухов, В. Н. Решетников // Программные продукты и системы. – 2017. – № 3 (1,3 п.л. / 0,4 п.л.).

2. Вавулов, О. Ю. Разработка методики оптимизации информационного ресурса воздушной радионавигационной службы в условиях деструктивного помехового воздействия / О.Ю. Вавулов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2017. – № 6(40) (0,8 п.л.)

3. Вавулов, О. Ю. Разработка информационной модели комплекса средств воздушной радионавигационной службы в условиях деструктивного помехового воздействия со стороны сетей мобильной связи / О.Ю. Вавулов // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 1(71) (0,4 п.л.).

Публикации в иных изданиях

4. Вавулов, О. Ю. Методика координации станций мобильной связи в приграничных регионах / О. Ю. Вавулов // Новая наука: техника и технологии. – Sterlitaamak: AMI. – 2017. – № 4-1 (0,5 п.л.).

5. Вавулов, О. Ю. Метод экспертной оценки при задании требований обеспечения электромагнитной совместимости станций в приграничном регионе / О. Ю. Вавулов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов» (г. Уфа, 2.10.2017 г.). – Уфа: Омега сайнс, 2017 (0,6 п.л.).

6. Вавулов О. Ю. Оптимальное управление комплексом средств воздушной радионавигационной службы в условиях помехового воздействия в отсутствие возмущающих факторов / О. Ю. Вавулов // Научный форум: технические и физико-математические науки: Сборник статей по материалам IX-ой Международной научно-практической конференции (г. Москва). – М.: Издательство «МЦНО», 2017. – № 8(9) (0,5 п.л.).

7. Вавулов О. Ю. Моделирование процессов в предметной области отношений воздушной радионавигационной службы в дискретном времени с учётом возмущающих факторов / О.Ю. Вавулов // Проблемы эффективности функционирования технических и информационных систем: сборник статей V-ой Международной научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург: LITALLIANCE, 2018 (0,7 п.л.).

8. Вавулов, О. Ю. Оптимальное оценивание состояния и оптимальное управление комплексом средств воздушной радионавигационной службы / О. Ю. Вавулов // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Пенза). – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018 (0,5 п.л.).

9. Вавулов, О. Ю. Методические рекомендации по вопросу оптимизации информационного ресурса воздушной радионавигационной службы / О. Ю. Вавулов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». - Sterlitaamak: AMI, 2018 (0,4 п.л.).

10. Вавулов, О. Ю. Алгоритмы координации станций мобильной связи с комплексом средств воздушной радионавигационной службы по информационным критериям / О. Ю. Вавулов // Технические науки: проблемы и решения: Сборник

статей по материалам VII-ой Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – М.: Издательство «Интернаука», 2018. – № 1(6) (0,4 п.л.).