

---

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

УДК: 681.518.22

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА ВОЗДУШНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СЛУЖБЫ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНОГО ПОМЕХОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Вавулов О.Ю.**, аспирант ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»

*В настоящей статье предложена методика оптимизации информационного ресурса воздушной радионавигационной службы в условиях радиопомех со стороны систем мобильной связи. Методика основана на актуальных на межгосударственном уровне процедурах технического регулирования радиоэлектронных средств и призвана служить инструментом соблюдения условий соглашений между Администрациями связи.*

**Ключевые слова:** оптимизация, информационный ресурс, воздушная радионавигационная служба, администрация связи, электромагнитная совместимость.

UDC: 681.518.22

## DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY OF OPTIMIZATION OF THE INFORMATION RESOURCE OF THE AIR RADIONAVIGATION SERVICE UNDER THE CONDITIONS OF DESTRUCTIVE IMMERSION EXPOSURE

**Vavulov O.Yu.**, graduate student FSUE «STANDARTINFORM»

*The methodology of information resource optimization of aeronautical radionavigation service in conditions of interference impact from mobile telecommunication systems is considered in the present article. The methodology is based on current at the interstate level procedures for the technical regulation of radio electronic facilities and is intended to serve as an instrument for compliance with the terms of agreements between Communications Administrations.*

**Key words:** optimization, information resource, aeronautical radionavigation service, communication administration, electromagnetic compatibility.

---

---

Основными вопросами, рассматриваемыми в настоящей статье, является вопрос оптимизации информационных процессов, который имеет ключевое значение для эксплуатации и эффективного управления комплексом средств (КС) воздушной радионавигационной службы (ВРНС) одного государства в условиях деструктивного помехового воздействия, оказываемого сухопутной подвижной службой (СПС) другого государства.

Центральным элементом рассматриваемой системы, относительно которого будет строиться задача исследования, является технический комплекс (ТК). Его основными характерными особенностями являются:

- а) административная пассивность, так как ТК является некоторым полем, на котором реализуются управляющие воздействия прочих элементов;
- б) сложная внутренняя структура, так как он включает в себя как КС ВРНС, так и сети станций КС СПС, несущие помеховую опасность.

КС ВРНС представлен совокупностью радиостанций различной конструкции и назначения, для каждой станции задан допустимый уровень помех, при котором еще возможно выполнение рабочих задач [4]. КС СПС представляет собой совокупность стационарных базовых станций и мобильных абонентских терминалов.

Следующим административно активным актором информационного взаимодействия является ВРНС. ВРНС осуществляет важные функции организации воздушного движения (ОВД) и является службой безопасности [5]. Функция ОВД в Российской Федерации (РФ) находится в ведении государственных органов, однако поддержка и развитие соответствующей инфраструктуры осуществляется не только за счёт бюджетных средств, но и инвестиций частного капитала. Состояние КС ВРНС с точки зрения электромагнитной помеховой обстановки напрямую зависит от следующего

актора – СПС. В отличие от ВРНС предоставление услуг мобильной связи осуществляется по большей части частными компаниями (операторами сотовой связи) под контролем со стороны государства.

Отношения между СПС и ВРНС можно определить, как противоборство. Операторы мобильной связи заинтересованы в привлечении клиентов (абонентов) за счет расширения зон покрытия своих сетей, а также за счёт улучшения качества связи, что в конечном итоге может привести к превышению уровня помех, допустимого для станций ВРНС. Однако даже в том случае, когда помеховое воздействие не превышает критических значений, чрезмерное расширение сетей СПС ограничивает возможности ВРНС по оборудованию новых станций и модернизации уже имеющихся.

В условиях такого скрытого противодействия ключевую роль играет следующий управляющий элемент системы – Администрация связи, призванная урегулировать противоречия между ВРНС и СПС. Это исключительно государственный орган (в РФ его функции исполняет Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (Минкомсвязь России)), который представляет интересы страны в области телекоммуникаций при международном взаимодействии и располагает всей полнотой выделяемых ему бюджетных ресурсов.

В настоящей задаче принято допущение, что между Администрациями связи сопредельных государств достигнуто и юридически оформлено Соглашение об условиях совместного использования определённого частотного диапазона средствами СПС и ВРНС, что позволяет рассматривать Администрации связи как один комплексный элемент управления.

Учсть описанные выше особенности отношений ВРНС, АС и СПС позволит введение в предметной области характерных векторов нормативных значений технических показателей для каждого элемента. Как

показано на рисунке 1, соотношение между нормативными значениями технических показателей всегда определяется следующим неравенством:

$$R_{T0} \leq R_{T1} \leq R_{T2}, \text{ где:} \quad (1)$$

$R_{T0}$ ,  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$  – нормативные значения технических показателей соответственно для ВРНС, АС, СПС.

В случае использования операции приведения к экспоненциальной норме энтропия покрытия А.В. Сухова [1, 5] по техническим показателям для каждого элемента выражается (в натуральных единицах) как разность текущего и нормативного значений, взятая по модулю, при этом в зависимости от знака указанной разности полученное значение относится к действительной или мнимой части:

$$H_{Ti}(Re/Im) = |R_T - R_{Ti}|, \quad i = 0, 1, 2. \quad (2)$$

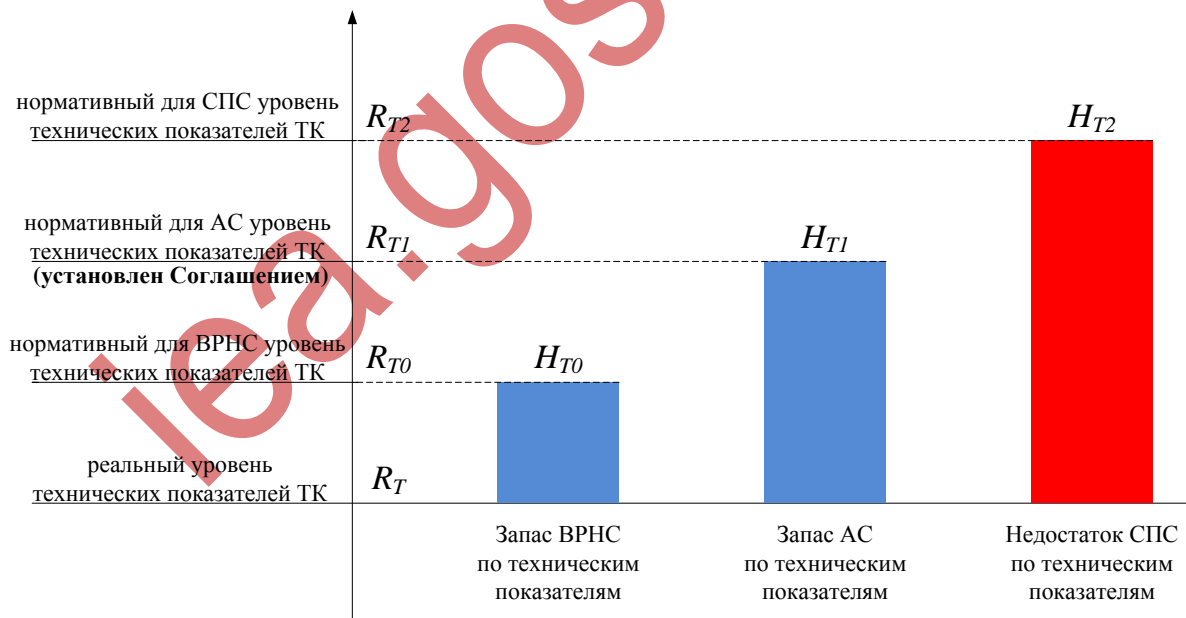


Рисунок 1. Схематичное представление соотношения нормативных технических показателей для управляющих элементов системы (пример)

При этом энтропия  $H_{T0} = H_{T0}(Re)$  характеризует степень запаса по параметрам ТК относительно некоторого целевого уровня ВРНС, более

низкого, нежели уровень, установленный Соглашением, так как ВРНС заинтересовано в максимальном снижении технических показателей, отвечающих за помеховую опасность станций СПС. Энтропия  $H_{T1} = H_{T1}(Re)$  также характеризует степень запаса АС по показателям ТК, так как приоритетным направлением деятельности АС является обеспечение помеховой безопасности всех существующих служб при их совместном использовании, нормативный уровень совпадает с уровнем, определённым Соглашением. Энтропия  $H_{T2} = H_{T2}(Im)$  описывает состояние противодействующего (сдерживаемого) элемента системы – СПС, т.е. степень недостатка технических показателей относительно желаемого уровня, который всегда будет выше уровня, установленного Соглашением, так как СПС стремится к комплексному повышению параметров ТК. Таким образом, несмотря на то, что для всех управляющих элементов состояние ТК описывается одним и тем же вектором  $R_T$ , расчёт энтропии покрытия по техническим показателям будет производиться различным образом для каждого в зависимости от установленного нормативного уровня.

Помимо вектора  $R_T$ , отражающего состояние ТК, введём для ВРНС, АС и СПС в предметной области векторы соответственно  $R_0, R_1, R_2$ , нормы которых будем рассматривать как обобщённые показатели запаса ресурсов (денежных, технических, интеллектуальных и т.п., вводимых как компоненты векторов  $R_0, R_1, R_2$ ), необходимых для осуществления эффективных управляющих воздействий.

Таким образом, состояние (положение) любого  $i$ -го управляющего элемента системы (ВРНС, АС, СПС) в информационном пространстве будет определяться значением энтропии покрытия, складывающимся из ресурсной части  $H_{Ri}$  и энтропии покрытия по техническим показателям  $H_{Ti}$ :

$$H_i = H_{Ri} + H_{Ti}, \quad i = 0, 1, 2. \quad (3)$$

Управляющие элементы представляют собой эргатические системы (эргасистемы) [3]. При этом очевидно, что величина выбираемых управляющих воздействий, а также возможности расходования и получения ресурсов ограничены техническими возможностями систем. При наличии подобных ограничений наиболее подходящим для оптимизации процессов системы представляется использование теории оптимального управления, основанной на принципе максимума Понтрягина [2].

Будем полагать, что ВРНС, АС и СПС способны оказывать прямое воздействие на ТК, однако не имеют прямых связей друг с другом и способны пополнять свои ресурсы только из внешних источников, названных выше. Схематично сфера отношений ВРНС представлена на рисунке 2.

В этом случае динамику процессов в предметной области можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{R}_T = -\xi_{0T}d_{0T}R_0 - \xi_{1T}d_{1T}R_1 + \xi_{2T}d_{2T}R_2, \\ \dot{R}_0 = \xi_{00}R_0 - \xi_{T0}d_{T0}R_T, \\ \dot{R}_1 = \xi_{11}R_1 - \xi_{T1}d_{T1}R_T, \\ \dot{R}_2 = \xi_{22}R_2 - \xi_{T2}d_{T2}R_T, \end{cases} \text{ , где:} \quad (4)$$

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

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

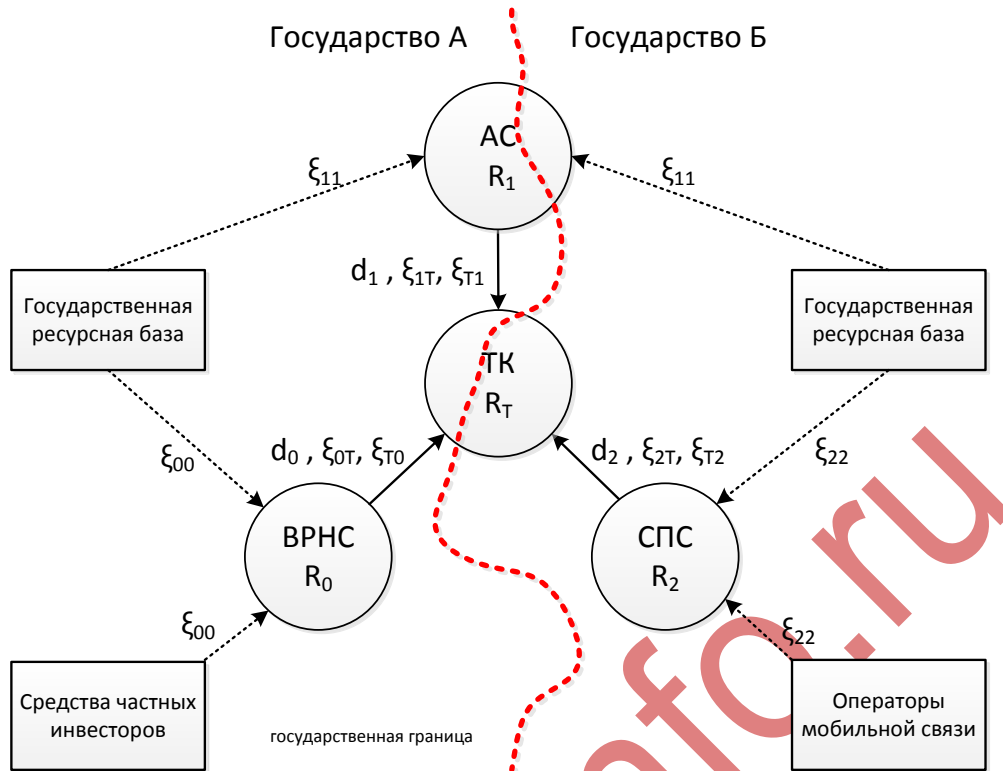


Рисунок 2. Схематичное представление сферы отношений ВРНС

Формализуем задачу исследования в информационном пространстве, основанном на энтропии покрытия, приведём все необходимые условия.

$$\Phi_0 = \int_{t_H}^{t_K} \left( d_{iT}^t(t) V_{iT} h_{T1}(R, t) \right) dt \rightarrow \min,$$

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

$$\Phi_2 = \int_{t_H}^{t_K} \left( d_{i1}^t(t) V_{i1} h_{R1}(R, t) \right) dt - H_{R1max} \leq 0, \quad (5)$$

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

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

$$\Psi_{i+1} = \dot{h}_{Ri}(t) - \frac{d}{dt} \left( \sum_j d_{ji}(t) V_{ji} R_j(t) \right) = 0, \quad (2)$$

$$\Phi_4 = H_0(t_H) - (H_0)_{init} = 0, \Phi_5 = H_1(t_H) - (H_1)_{init} = 0, \quad .3.$$

$$\Phi_6 = H_2(t_H) - (H_2)_{init} = 0, \quad 5)$$

$$d_i \in [-1; 1], t_H = 0, t_K = T, i = 0, 1, 2, j = 0, 1, 2, T.$$

В приведённой формулировке (5) представляет собой задачу оптимального управления автономной системой с интегральной целевой функцией на фиксированном отрезке времени со свободными концами.

Рассмотрим необходимые условия принципа максимума Понтрягина.

1) Стационарность по фазовым переменным.

Условие задаётся с помощью уравнения Эйлера для лагранжиана:

$$-\frac{d}{dt} L_{\dot{h}}(t) + L_h(t) = 0, \quad (6)$$

откуда следует, так называемая, сопряжённая система уравнений:

$$\dot{p}_i(t) = -\frac{\partial H}{\partial h_i}, i = 0, 1, 2, \text{ где:} \quad (7)$$

$H$  – функция Понтрягина.

Тогда, подставляя в (7) конкретный вид  $H$ , получим следующую систему:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -\lambda_0(-\xi_{0T}d_0 - \xi_{1T}d_1 + \xi_{2T}d_2), \\ \dot{p}_1(t) = -\lambda_1(\xi_{00} - \xi_{T0}d_0), \\ \dot{p}_2(t) = -\lambda_2(\xi_{11} - \xi_{T1}d_1), \\ \dot{p}_3(t) = -\lambda_3(\xi_{22} - \xi_{T2}d_2). \end{cases} \quad (8)$$

2) Трансверсальность по фазовым переменным.



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

$$L_{\dot{h}}(0) = l_{h(0)} \Rightarrow p_i(0) = 0. \quad (9)$$

3) Оптимальность по управляющим воздействиям.

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

$$H = \max_{d_i \in [-1;1]} H = \mathcal{H}. \quad (10)$$

Найдём стационарные по управлению точки функции Понтрягина.

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial d_0} = -\lambda_0 \xi_{0T} h_{T1} - \lambda_1 \xi_{T0} h_{R0} - p_0 \xi_{0T} \dot{R}_0 - p_1 \xi_{T0} \dot{R}_T = 0, \\ \frac{\partial H}{\partial d_1} = -\lambda_0 \xi_{1T} h_{T1} - \lambda_2 \xi_{T1} h_{R1} - p_0 \xi_{1T} \dot{R}_1 - p_2 \xi_{T1} \dot{R}_T = 0, \\ \frac{\partial H}{\partial d_2} = \lambda_0 \xi_{2T} h_{T1} - \lambda_3 \xi_{T2} h_{R2} + p_0 \xi_{2T} \dot{R}_2 - p_3 \xi_{T2} \dot{R}_T = 0. \end{cases} \quad (11)$$

4) Дополняющая нежёсткость.

$$\begin{cases} \lambda_1 \Phi_1 = \lambda_1 \int_{t_H}^{t_K} (\xi_{00} - \xi_{T0} d_0) h_{R0} dt - \lambda_1 H_{R0max} = 0, \\ \lambda_2 \Phi_2 = \lambda_2 \int_{t_H}^{t_K} (\xi_{11} - \xi_{T1} d_1) h_{R1} dt - \lambda_2 H_{R1max} = 0, \\ \lambda_3 \Phi_3 = \lambda_3 \int_{t_H}^{t_K} (\xi_{22} - \xi_{T2} d_2) h_{R2} dt - \lambda_3 H_{R2max} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

5) Неположительность множителей Лагранжа.

$$\lambda_i \leq 0, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (13)$$

б) Нетривиальность.

$$\sum_{i=0}^3 |\lambda_i| + \sum_{i=0}^3 |p_i| > 0. \quad (14)$$

В силу особенностей человеко-машинного взаимодействия процессы управления сложными техническими системами имеют дискретный характер, т.е. на отдельном этапе определяется конкретный набор управляющих воздействий, который корректируется по окончании исполняемого этапа. Учитывая эту особенность эргаситем, разобьём рассматриваемый горизонт стратегического планирования  $T$  на некоторое число  $N$  эквидистантных промежутков времени  $\Delta t$ , достаточно малых, чтобы считать значения управляющих воздействий на них постоянными, что позволяет представить полученные нами дифференциальные уравнения в виде конечных разностей.

Решая полученную систему уравнений на каждом шаге  $\Delta t$ , получим по два численных значения приращений энтропии покрытия по ресурсным показателям для каждого элемента, для каждого из которых в свою очередь легко вычислить соответствующее значение управляющего воздействия. Таким образом, система имеет общее число решений, равное количеству размещений с повторениями двух вариантов решений квадратного уравнения по трём независимым квадратным уравнениям, то есть  $2^3 = 8$ .

Для каждого решения найдём соответствующие значения приращений энтропий по техническим показателям  $\Delta H_T$ , приращений по сопряжённым переменным  $\Delta p_0, \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3$  неопределённых множителей Лагранжа  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , таким образом получив 8 наборов решений для всех неизвестных величин, из которых следует отобрать тот набор, который:

- а) во-первых, обеспечивает неположительность множителей Лагранжа;
- б) во-вторых, не противоречит ограничению на управление;

в) в-третьих, доставляет максимум функции Понтрягина.

По найденным приращениям  $\Delta H_i$ ,  $\Delta R_i$ ,  $\Delta p_i$  определяются значения показателей состояния системы по итогам текущего этапа управления, которые используются как начальные условия для проведения аналогичных расчётов на следующем шаге процесса.

Схематически разработанная методика приведена на рисунке 3.



Рисунок 3. Методика оптимизации информационного ресурса ВРНС

С помощью математического моделирования отношений ВРНС с СПС и АС по регулированию параметров ТК можно решить следующие задачи в предметной области:

а) прогнозирование состояния КС ВРНС, а также других участников информационных отношений на заданном промежутке времени;

б) прогнозирование критических ситуаций в отношениях между акторами информационного взаимодействия и планирование мероприятий по их стабилизации;

в) выработка оптимальной политики расходования ресурсов, модернизации парка техники или расширения сети РЭС;

г) оценка устойчивости системы к внешним и внутренним случайным возмущающим факторам, разработка мероприятий по повышению устойчивости.

### Список использованных источников и литературы

1. Вавулов, О.Ю., Сухов, А.В., Решетников, В.Н. Алгоритмы информационной оценки совместимости средств мобильной связи и станций воздушной радионавигационной службы // Программные продукты и системы. – 2017. – № 3. – С. 529-536.
2. Галеев, Э.М., Тихомиров, В.М. Краткий курс теории экстремальных задач. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1989. – С. 91-93.
3. Ловцов, Д.А. Тезаурус. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 2005.
4. Рекомендация МСЭ-R М.1830. Технические характеристики и критерии защиты систем воздушной радионавигационной службы в полосе частот 645-862 МГц. – Женева: МСЭ, 2007. – С. 6-10.
5. Регламент радиосвязи. Статьи. – Женева: МСЭ, 2012. – С. 13.
6. Сухов, А.В., Мячин, А.В. Методы и технологии выработки управленческих решений при создании сложных технических комплексов. – М.: Военная академия РВСН имени Петра Великого, 2008. – С. 78-79.

© О.Ю. Вавулов