

ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ ОТ СРЕДСТВ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Сухов А.В. *

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, соглашение, методика, воздушная радионавигационная служба, энтропия покрытия, комплексный ИКС-подход, системологические принципы.

Аннотация.

Цель работы: совершенствование научно-методической базы решения задач обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств различных радиослужб.

Метод исследования: комплексный ИКС-подход к анализу и оптимизации электромагнитной совместимости, математическое моделирование информационного ресурса радиослужбы.

Результаты: введено новое понятие информационного ресурса радиослужбы, основанного на энтропии покрытия; приведена методика его оценки и применения в целях обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств различных радиослужб; приведён пример применения методики для обеспечения электромагнитной совместимости станций воздушной радионавигационной службы и сухопутной подвижной службы.

DOI:10.21681/1994-1404-2019-1-36-45

Введение

В настоящее время всё большее развитие получают новые средства информационного обмена. И одной из важнейших задач в этом направлении является развитие радиосредств *мобильной* (подвижной) связи, которые относятся к радиослужбе подвижной связи (ПС). Естественно, что развитие технических средств радиослужб требует предоставления им диапазонов радиочастот, которые уже заняты другими радиослужбами. Нас будет интересовать вопрос информационной оценки эффективности согласования такого совмещения.

Подобные согласования связаны с удовлетворением интересов радиослужб разных государств. Интересы государств по вопросам радиосвязи представляют Администрации связи (АС) этих государств, которые организуют и добиваются заключения соглашений между странами по совместному использованию затрагиваемых в конкретном вопросе диапазонов радиочастот. Такие Соглашения не так давно были заключены между АС Российской Федерации и АС сопредельных государств вдоль западной границы по вопросам обеспечения электромагнитной совместимости средств воздушной радионавигационной службы Российской Федерации со средствами мобильной связи 4-го поколения сопредельных государств.

С учётом интенсивного развития технологий в области подвижной связи в ближайшем будущем по-

требуется заключение новых соглашений между АС различных государств для обеспечения возможности функционирования средств мобильной связи уже 5-го поколения. Однако методика *информационного* подхода по оценке эффективности соглашений в данном случае не меняется. Такую оценку можно получить на основе анализа *информационного ресурса* затрагиваемой радиослужбы.

Международный союз электросвязи (МСЭ) – глобальная организация, иницирующая и координирующая действия мирового сообщества в области развития телекоммуникаций. В целях обеспечения гармонизации использования спектра радиочастот разработан Регламент радиосвязи (РР), который предписывает различным радиослужбам свои частотные диапазоны. В ряде случаев один и тот же частотный диапазон может быть распределён разным радиослужбам на *первичной* (с приоритетом) или на *вторичной* (не создавать помех средствам первичных радиослужб) основе. И в целях обеспечения возможности для работы средств разных радиослужб приходят к компромиссным решениям.

В настоящей статье рассматривается диапазон радиочастот 790 – 862 МГц, который распределён одновременно как сухопутной подвижной службе (СПС) на первичной основе, так и воздушной радионавигационной службе (ВРНС) на первичной основе.

Проведём информационную оценку [12, 13] изменения информационного ресурса ВРНС, обеспечивающую оценку эффективности заключения соглашений для радиослужбы мобильной связи 4-го поколения с воздушной радионавигационной службой админи-

* Сухов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники, телекоммуникаций и нанотехнологий Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: avs57@mail.ru

страции связи (АС) Российской Федерации. В рассматриваемом частотном диапазоне радиоэлектронные средства (РЭС) ВРНС РФ были заявлены раньше и, следовательно, имеют приоритет.

Для получения *информационной оценки эффективности*¹ будем использовать энтропию покрытия (ЭП) [3, 10]. Подобный подход уже рассматривался в работах [2, 8, 9, 11].

1. Свойства энтропии покрытия как информационной меры

Энтропия покрытия даёт оценку целевого соответствия реальных показателей сложного технического комплекса требуемым значениям. Эта специфическая информационная мера предназначена, прежде всего, для оптимизации системы управления. *Энтропия покрытия* [3, 10] – теоретико-множественная мера неопределённости сведения о соответствии параметров объекта их нормативным значениям – относительного покрытия по приведению к норме множества реальных технических параметров объекта множеством требуемых параметров:

$$H_{\Pi} = k \log_2 \frac{\|(R_p \setminus R_n) \cup R_n\|}{\|R_n\|}, \text{ бит}, \quad (1)$$

где R_p – множество реальных показателей; R_n – множество нормативных показателей; \setminus – операция разности множеств; $\| \cdot \|$ – первая норма.

Понятие энтропии покрытия с целью расширения области применения было дополнено понятием *обобщённая энтропия покрытия* – комплексная мера степени соответствия ресурсов объекта нормативным значениям на заданном этапе жизненного цикла объекта через логарифм относительного покрытия множеством действительных ресурсов множества нормативных ресурсов (действительная часть – обычная энтропия покрытия, характеризующая нормальные условия расхода-пополнения ресурсов, а мнимая специальная часть – степень «перенапряжённости» функционирования эргасистемы) [3, 10]:

$$H_{\Pi} = (\log_2 \Pi_1 + i \log_2 \Pi_2), \text{ бит}, \quad (2)$$

где Π_k – компоненты вектора покрытия:

$$\Pi = \begin{pmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \end{pmatrix} = \left(\frac{\| [R_p \setminus (R_p \cap R_n)] \cup (R_p \cap R_n) \|}{\|R_p \cap R_n\|} ; \frac{\|R_p \setminus (R_p \cap R_n)\|}{\|R_n\| - r \|R_p \setminus (R_p \cap R_n)\|} \right); \quad (3)$$

i – мнимая единица; r – коэффициент приоритета элемента, для которого рассчитывается относительная энтропия покрытия, $r \in (0; 1)$, обычно принимается равным в диапазоне 0,9 – 0,999.

Проведём сравнение энтропии покрытия с известной информационной мерой – энтропией Хартли [1, 4]. Энтропия покрытия является скалярной функцией на векторном аргументе, но она применима и на скалярном аргументе. Для этого рассмотрим случай скалярно-

го вектора. На практике такое упрощение допустимо, если привести все компоненты вектора ресурсов, например, к критериальному обобщённому показателю.

Тогда для x – требуемого значения и y – реального значения показателя для ситуации $x < y$ энтропия покрытия примет вид:

$$H_{\Pi}(y) = k \log [(y-x) + x] / x = k \log y - k \log x = H(y) - H(x)$$

где $H(y)$, $H(x)$ – энтропия Хартли.

Если же $x > y$, то энтропия покрытия примет вид:

$$H_{\Pi}(y) = k \log [x/x] = k \log 1 = 0.$$

Формальное применение энтропии Хартли в этом случае привело бы к отрицательным значениям или не имело бы действительных значений.

Таким образом, видно, что в самом простом случае энтропия покрытия может быть выражена через энтропию Хартли, но только лишь в одной ситуации, когда $x < y$, т.е. требуемое значение показателя меньше реального его значения.

Значение энтропии покрытия зависит не только от одного аргумента, а также и от отношения этого аргумента к другому. Энтропия покрытия в отличие от энтропии Хартли является функцией двух векторных величин, связана с взаимным соотношением между ними. В многомерном случае при вычислении значения энтропии покрытия характерно первоначальное использование операций с множествами с последующими аналитическими вычислениями. Зависимость энтропии покрытия от нормативного параметра показана на рис. 1.

При определении энтропии покрытия используется совместное применение как алгебраических функциональных преобразований, так и логических.

Обобщённая энтропия покрытия не только обладает свойствами функции двух аргументов и совместного использования алгебраических функциональных преобразований с логическими, но и свойством принадлежности к функциям комплексного аргумента.

Характерной особенностью энтропии покрытия является то, что она определяет степень соответствия одного аргумента другому. Доопределяющий термин «покрытие» был введён на основании того, что при вычислении энтропии покрытия и обобщённой энтропии покрытия анализируется степень покрытия одного множества другим. И когда одно множество является множеством реальных значений, а другое – множеством требуемых значений, то энтропия покрытия и будет характеризовать степень соответствия реальных показателей требуемым.

Энтропия покрытия несколько похожа на известную шенноновскую энтропию, однако она имеет целевое содержание, позволяющее с её использованием решать задачи оптимизации в информационном пространстве.

Характерно, что введённая информационная мера сочетается с *системологическими принципами*, описанными в [3, 5 – 7] с позиций комплексного информационно-кибернетически-синергетического (ИКС) подхода.

¹ Ловцов Д. А. Модели измерения информационного ресурса АСУ // Автоматика и Телемеханика. – 1996. – № 9. – С. 3 – 17; Ловцов Д. А. Информационные показатели эффективности функционирования АСУ сложными динамическими объектами // Автоматика и Телемеханика. – 1994. – № 12. – С. 143 – 150.

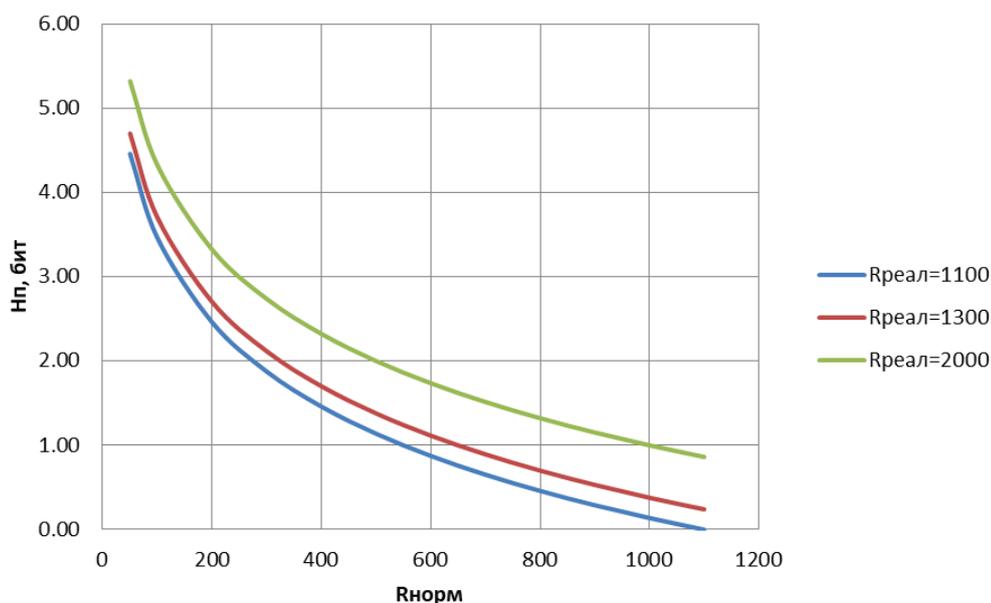


Рис. 1. Зависимость энтропии покрытия от нормативного параметра

Принципы цели и оптимальности ИКС-подхода находят своё отражение в целевом функционале [10], для

которого предложено универсальное применение энтропии покрытия:

$$F = T(H_{\Pi}(R, t_{\text{н}}), H_{\Pi}(R, t_{\text{к}})) + \int_{t_{\text{н}}}^{t_{\text{к}}} J(u, R, t), h_{\Pi}(R, t) dt \rightarrow \min_u \quad (4)$$

где $T(\cdot)$ – терминант функционала; $H_{\Pi}(\cdot)$ – начальная энтропия покрытия; $H_{\text{к}}(\cdot)$ – конечная энтропия покрытия; R – вектор обобщённых технических показателей системы; $t_{\text{н}}, t_{\text{к}}$ – начальное и конечное время, соответ-

ственно; $J(\cdot)$ – интегрант функционала; $u(\cdot)$ – функция управления ресурсами; $h_{\Pi}(\cdot)$ – текущая энтропия покрытия, которую доопределим как энтропию покрытия на бесконечно малом приращении:

$$h_{\Pi}(t) = \frac{dH_{\Pi}(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{H_{\Pi}(t + \Delta t) - H_{\Pi}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\log \left(\frac{\|(R_{\text{п}}(t+\Delta t) \setminus R_{\text{н}}(t+\Delta t)) \cup R_{\text{н}}(t+\Delta t)\|}{\|R_{\text{н}}(t+\Delta t)\|} \right) - \log \left(\frac{\|(R_{\text{п}}(t) \setminus R_{\text{н}}(t)) \cup R_{\text{н}}(t)\|}{\|R_{\text{н}}(t)\|} \right) \right] / \Delta t. \quad (5)$$

Из (5) видно, что в отличие от шенноновской дифференциальной энтропии энтропия покрытия имеет корректное определение в дифференциальном виде.

Терминант зависит от энтропии покрытия в начале и на завершающей временной части процесса, поэтому он имеет вид:

$$T(H_{\Pi}(R, t_{\text{н}}), H_{\Pi}(R, t_{\text{к}})) = H_{\Pi}(R, t_{\text{н}}) - H_{\Pi}(R, t_{\text{к}}) = -I_{\text{пф}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{пф}}$ – финальная информация покрытия.

Принцип сложности определяется сведением автономных дифференциальных уравнений движения всех элементов системы управления к подчинению главной задачи функционирования системы управления – достижению энтропии покрытия объекта управления минимального (нулевого) значения. Отсюда эмерджентное свойство системы управления проявляется в преобразовании значений величин, входящих в уравнения состояния, и к изменению обобщённой энтропии покрытия и обобщённых информационных потоков в системе.

Центральный принцип ИКС-подхода – принцип информационного баланса [5 – 7] в закрытой киберне-

тической системе – соответствует такому идеальному функционированию элементов системы управления, когда входящий обобщённый информационный поток покрытия равен исходящему обобщённому информационному потоку покрытия. Это равенство соответствует оптимальной динамике ресурсов системы управления, когда ограничения типа неравенств в постановке задачи оптимизации обращаются в равенство. Для объекта системы управления принцип информационного баланса заключается в сведении энтропии покрытия к минимальному (нулевому) значению, что соответствует значению требуемой исходной информации покрытия значению полученной информации покрытия в ходе проведённых работ. В соответствии с целевым функци-

аналом (4) принцип информационного баланса можно записать следующим образом для требуемого и полученного количества информации:

$$I_{\text{треб}} = I_{\text{получ}}, \quad (7)$$

$$I_{\text{треб}} = H_{\Pi}(R, t_n) - (H_{\Pi}^{\text{ИД}}(R_{\text{ИД}}, t_k) = 0) = H_{\Pi}(R, t_n); \quad (8)$$

$$I_{\text{получ}} = H_{\Pi}(R, t_n) - H_{\Pi}^{\text{реал}}(R_{\text{реал}}, t_k); \quad (9)$$

$H_{\Pi}^{\text{ИД}}$ – энтропия покрытия по исходным данным для вектора состояния; $H_{\Pi}^{\text{реал}}$ – энтропия покрытия по реальным значениям компонентов вектора состояния.

Постулируемые свойства информационных мер ИКС-подхода и логика информационных отношений [3] выполняются для энтропии покрытия:

1. Энтропия покрытия является неотрицательной величиной (а обобщённая энтропия покрытия находится в первом квадранте комплексной плоскости), что указывается для меры информационной неопределённости события.

2. Энтропия покрытия обладает свойством иерархической аддитивности как и информационная неопределённость сложного события [10].

3. Положительные значения информации покрытия и обобщённой информации покрытия соответствует требуемому значению изменения энтропии покрытия (обобщённой энтропии покрытия), что соответствует постулируемому принципу информационной определённости. Отрицательные значения информации покрытия (обобщённой информации покрытия) характеризуют не количество дезинформации, а количество дополнительной информационной неопределённости, полученной элементом системы управления при реализации управления и воздействия возмущающих

факторов на определённом этапе функционирования системы.

4. Пространство, основанное на информационной мере энтропии покрытия, является метрическим, поэтому разность между соответствующими значениями энтропии покрытия (обобщённой энтропии покрытия) элементов системы или элемента системы в разные моменты времени будет соответствовать их информационным состояниям.

2. Информационный ресурс ВРНС, основанный на энтропии покрытия

В сети СПС активными источниками непреднамеренных помех на ВРНС являются базовые станции (БС) и абонентские терминалы (АТ). Схема действия помех показана на рис. 2.

Для определения информационного ресурса следует задать вектор оцениваемых параметров. В состав вектора должны войти параметры, определяющие степень защищённости РЭС ВРНС. Определим эти параметры.

Основным показателем, по которому можно оценить защищённость станции ВРНС, является напряжённость поля суммарной помехи, создаваемой средствами СПС в месте нахождения защищаемой станции. Множественная помеха рассчитывается по принципу суперпозиции электромагнитных полей, т.е. результирующая мощность является суммой мощностей полей помех, создаваемых в этом месте каждой из станций СПС в отдельности:

$$P_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N P_i, \quad (10)$$

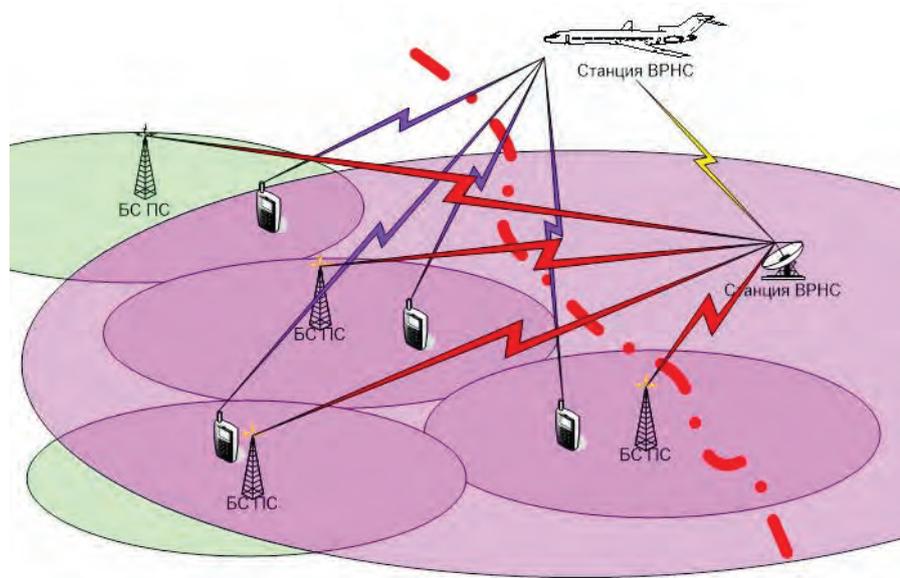


Рис. 2. Схема действия помех от РЭС СПС на РЭС ВРНС

где: P_i – мощность поля помехи, создаваемой в месте размещения станции ВРНС i -й станцией СПС (Bm); P_{sum} – результирующая мощность поля помехи от всех учитываемых станций СПС в месте размеще-

ния станции ВРНС (Bm); N – общее число учитываемых станций СПС.

Принцип суперпозиции (10) может быть представлен в логарифмических единицах для напряжённости поля:

$$E_{sum} = 10 \times \lg\left(\sum_{i=1}^N 10^{0,1E_i}\right), \quad (11)$$

где: E_{sum} , E_i – результирующая и создаваемая i -й станцией СПС напряжённости поля, выраженные в $\text{дБ}(\text{мкВ}/\text{м})$, соответственно.

Критерий защиты РЭС ВРНС содержится в Рекомендации МСЭ М.1830², в которой приведён состав средств ВРНС, даны необходимые технические характеристики и критерии защиты этих средств.

В качестве критерия защиты станций ВРНС принимаются задаваемые разработчиками для каждого типа станций предельно допустимые значения поля суммарной помехи в месте размещения станции.

Для расчёта напряжённости поля помехи E_p создаваемой одиночной i -й станцией СПС необходимо иметь следующие исходные данные:

- 1) расстояние между станциями ВРНС и СПС (r);
- 2) эквивалентная изотропно излучаемую мощность P_{MS} (ЭИИМ) передатчиков средств СПС: базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) (P_{BS}, P_{ST});
- 3) высота подвеса приёмной антенны станции ВРНС (h_{ARNS});
- 4) высота подвеса передающей антенны БС в конкретном секторе (h_{BS});
- 5) эффективная высота антенны БС по азимуту от БС на станцию ВРНС (h_{eff});
- 6) диаграммы направленности (ДН) антенны БС;
- 7) координаты БС.

Для оценки эффективности координации средств СПС со станциями ВРНС необходимо учитывать не только совокупную мощность поля помех, но и требования, установленные Соглашениями между Администрациями связи сопредельных государств по использованию определённых частотных диапазонов. В этих Соглашениях заданы ограничения на значения этих параметров, которые определены с учётом расположения средств ВРНС по отношению к государственной границе Российской Федерации.

На практике возможны определённые отклонения параметров средств СПС от предписанных в Соглашениях значений. Такие ситуации рассматриваются отдельно с учётом взаимного расположения реальных средств ВРНС. Поэтому эти отклонения могут оказаться допустимыми, но при этом будет нарушен потенциал по развёртыванию новых средств ВРНС. Такая ситуация и может быть оценена с использованием энтропии покрытия.

Поэтому в качестве информационного ресурса средств ВРНС следует сформировать векторный показатель по средствам СПС, приведённый к рамкам Соглашения, рассчитать по нему с учётом Соглашения энтропию покрытия и получить информационный ресурс средств ВРНС в качестве основного результата оценки эффективности.

Информационный ресурс средств ВРНС определяется следующим образом:

1. Задаются компоненты вектора состояния системы СПС-ВРНС. Компонентами вектора являются параметры средств СПС, указанные в Соглашении, и координаты этих средств.

2. Определяется вектор нормативных параметров, как вектор состояния со значениями, указанными в Соглашении.

3. Определяется вектор реальных параметров по данным, представленным АС сопредельной стороны.

4. Проводится расчёт обобщённой энтропии покрытия системы СПС-ВРНС. Действительная часть будет обобщённо характеризовать потенциальные возможности радиослужбы ВРНС по развёртыванию дополнительных средств, а мнимая часть будет характеризовать степень дефицита этого потенциала. Ситуация, когда $H_n = 0$ соответствует идеальному случаю, когда реальные показатели соответствуют условиям Соглашения.

Выражение для определения информационного ресурса средств ВРНС выглядит следующим образом:

$$I_{ВРНС} = H_n(R_{реал}) - (H_n^{Согл}(R_{Согл}) = 0) = H_n(R_{реал}, t_n), \quad (12)$$

где $R_{реал}$ – вектор реального состояния системы СПС-ВРНС; $R_{Согл}$ – идеальный вектор состояния системы СПС-ВРНС, соответствующий условиям соглашения.

3. Анализ информационного ресурса системы ВРНС-СПС

В качестве демонстрации применения информационного подхода к анализу электромагнитной совместимости средств ВРНС со средствами СПС с использованием энтропии покрытия была проведена информационная оценка характеристик БС сети мобильной связи одного из сопредельных государств, развёртываемой в непосредственной близости от границы с Российской Федерацией (РФ), на соответствие условиям, приведённым в Соглашении по совместному использованию частотного диапазона 790 – 862 МГц.

Сеть мобильной связи строится по сотовому принципу. В центре соты располагается БС, как правило, с трёхсекторной антенной. Каждый сектор имеет обзор 120°. Радиус зоны обслуживания БС ограничен значениями примерно от 0,5 км в городских условиях до 5 – 8 км в условиях сельской местности. Организация каналов информационного обмена абонентов с БС может осуществляться по принципам временного разделения (TDD) или частотного разделения (FDD). В соответствии с заключёнными Соглашениями допускалось только частотное разделение, когда БС работает в одном частотном диапазоне (790 – 820 МГц) а абонентские терминалы (АТ) в другом (832 – 862 МГц). Это связано с различными критериями защиты РЭС ВРНС в этих диапазонах и различным уровнем помех от БС и от АТ.

При расчётах помех должна учитываться полоса частот одного канала передачи, равная 5 МГц, ЭИИМ передатчиков, которая в соответствии с Соглашением должна составлять:

для АТ – минус 3 дБВт,

² Рекомендация МСЭ-R М.1830. Технические характеристики и критерии защиты систем воздушной радионавигационной службы в полосе частот 645–862 МГц.

Оценка информационного ресурса радионавигационных станций...

для БС – 25 дБВт.

В соответствии заданными в Соглашении ограничениями информационная оценка электромагнитной совместимости проводилась по следующим параметрам для сети СПС:

1) $h_{\text{эфф}}$ м – эффективная высота антенны БС по азимуту от БС на границу РФ (значения данного показателя

не должны превышать нормативного значения ($h_{\text{эфф}}^{\text{норм}}$) = 60 м для всех БС, находящихся не более чем в 60 км от границы);

2) d , шт. на 100 км² – плотность развёртывания БС (нормативное значение по этому показателю $d_{\text{норм}}$ выбирается в зависимости от конкретных условий размещения БС в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Плотность размещения БС СПС в соответствии с Соглашением

Расстояние до границы РФ, км	Приграничный район № 1:	Приграничный район № 2:	Приграничный район № 3:
менее 10	Требуется координация	Требуется координация	Требуется координация
от 10 до 15	Требуется координация	Требуется координация	1 БС на 100 км ²
от 15 до 30	1 БС на 100 км ²	1 БС на 100 км ²	1 БС на 100 км ²
от 30 до 60	10 БС на 100 км ²	1 БС на 100 км ²	10 БС на 100 км ²
от 60 до 100	100 БС на 100 км ²	100 БС на 100 км ²	100 БС на 100 км ²

3) E , дБ(мкВ/м) – прогнозируемая средняя напряжённость электрического поля, создаваемого конкретной БС при передаче на границе РФ (нормативное значение по этому показателю $E_{\text{норм}}$ выбирается в зависимости от географического местоположения БС: в Приграничном районе № 1 – 53 дБ(мкВ/м), в Приграничном районе № 2 – 57 дБ(мкВ/м), в Приграничном районе № 1 – 58 дБ(мкВ/м)).

При производстве расчётов напряжённости поля помехи принимаются следующие ограничения:

1) средства СПС используют режим частотного разделения каналов (*FDD – frequency division duplex*), который подразумевает, что БС и АТ работают в разных частотных диапазонах;

2) антенны АТ являются всенаправленными;

3) эффективная высота антенн АТ равна 1,5 м;

4) БС одной сети могут одновременно работать на одной частоте;

5) АТ, расположенные в различных секторах антенны БС, могут одновременно работать на одной частоте;

6) суммарная ЭИИМ всех АТ, работающих в одном секторе антенны БС, соответствует максимальной ЭИИМ одного АТ;

7) в целях обеспечения безопасности полётов воздушного судна для расчётов напряжённости поля помех, создаваемых средствами СПС в месте размещения воздушной станции ВРНС, используется уравнение распространения радиоволн в свободном пространстве, приведённое в Рекомендации МСЭ-Р Р.525³;

8) для расчёта напряжённости поля помех от станций СПС в месте размещения наземной станции ВРНС

используется Рекомендация МСЭ-Р Р.154-5⁴ для 10% времени и 50% местоположений.

Возможно два характерных сценария помеховой обстановки:

- сценарий 1: помеха от средств СПС на воздушные станции ВРНС;

- сценарий 2: помеха от средств СПС на наземные станции ВРНС.

Поскольку в соответствии с Соглашением сеть СПС организована по принципу *FDD*, в диапазоне частот 832 – 862 МГц могут работать только передатчики АТ. В этом же диапазоне радиочастот работают приёмники ВРНС, размещаемые на борту воздушного судна и имеющие жёсткие критерии к допустимому уровню помех. Поэтому для сценария 1 расчёт помех проводится от передатчиков АТ на приёмники воздушного судна ВРНС.

В диапазоне радиочастот 790 – 820 МГц могут работать передатчики БС. И в этом же диапазоне частот работают приёмники радиолокаторов ближней навигации ВРНС, имеющие менее жёсткий критерий к допустимому уровню помех. Поэтому для сценария 2 расчёт помех проводится от передатчиков БС на приёмники наземной станции ВРНС.

В случае сценария 1 алгоритм для проведения расчётов заключается в следующем:

1) определяется место размещения воздушной станции ВРНС путем размещения на минимальном удалении от границы в пределах зоны обслуживания соответствующей наземной станции ВРНС;

2) определяется положение АТ (работающего с максимальной мощностью) в каждом секторе БС путем

³ Рекомендация МСЭ-Р Р.525-3. Расчёт ослабления в свободном пространстве.

⁴ Рекомендация МСЭ-Р Р.1546-5. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц.

Таблица 2
Результаты оценки вектора показателей сети СПС

Базовая станция	Показатель № 1: heff, м		Показатель № 2: d, шт. на 100 км ²		Показатель № 3: E, дБ(мкВ/м)	
	реально	норма	реально	норма	реально	норма
БС1	45,00	60	33	100	0,46	58
БС2	39,00	60	33	100	14,64	58
...						
БС153	66,80	60	2	1	21,71	58
БС154	63,00	60	2	1	10,98	53
БС155	79,57	60	2	1	-1,37	53
БС156	79,57	60	3	100	-10,00	58
...						
БС871	21,00	60	11	100	14,67	53

Таблица 3
Результаты расчёта энтропии покрытия для вариантов сети СПС

Варианты сети СПС	Значение действительной составляющей, бит	Значение мнимой составляющей, бит
Предложения АС сопредельного государства	32,10	15,74
Полная координация с КС ВРНС	31,79	0
Компромисс (Соглашение)	31,58	2,60

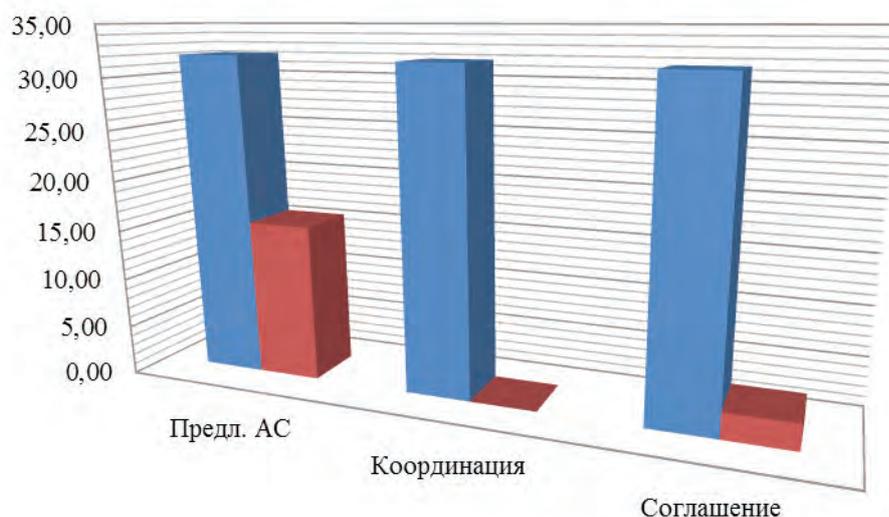


Рис. 3 – Значения энтропии покрытия для вариантов сети СПС

размещения АТ на минимальном удалении от воздушной станции ВРНС в пределах зоны обслуживания рассматриваемого сектора БС;

3) рассчитывается напряжённость поля помехи от каждого АТ в месте размещения воздушной станции ВРНС по выражению²:

$$E_i = P_i - 20 \log_{10} r_i + 74,8 + G_{ARNS}, \quad (13)$$

где: E_i – напряжённость поля помехи, создаваемой i -й станцией СПС в месте размещения станции ВРНС (дБ(мкВ/м)); P_i – максимальная ЭИИМ i -й станции СПС (дБ(Вт)); r_i – расстояние от i -й станции СПС до станции ВРНС (км); G_{ARNS} – коэффициент усиления антенны станции ВРНС (дБ);

4) по закону суперпозиции электромагнитных полей (11) рассчитывается суммарная напряжённость поля помехи в месте размещения воздушной станции ВРНС;

5) суммарная напряжённость поля помехи сравнивается с предельно допустимым уровнем суммарных помех и делается вывод о возможности совмещения с рассматриваемой воздушной станцией ВРНС.

В случае реализации сценария 2 расчёты ведутся по следующему алгоритму:

1) по координатам БС и высоте подвеса антенны БС в конкретном секторе вычисляется эффективная высота антенны БС по азимуту на наземную станцию ВРНС программным способом с использованием матрицы высот земной поверхности (данные SRTM3);

2) рассчитывается напряжённость поля помехи от каждой БС для модели распространения земной волны в месте размещения наземной станции ВРНС по стандартной методике⁵;

3) по закону суперпозиции электромагнитных полей (11) рассчитывается суммарная напряжённость поля помехи от всех БС в месте размещения наземной станции ВРНС;

б) полученная суммарная помеха в месте размещения наземной станции ВРНС сравнивается с предельно допустимым уровнем суммарной помехи и делается вывод о возможности совмещения с рассматриваемой наземной станцией ВРНС.

Далее проводится расчёт информационного ресурса средств ВРНС.

В соответствии с (3) для i -й БС расчёт составляющих вектора элемента покрытия множества нормативных значений j -го показателя множеством реальных осуществляется по выражению:

$$P_{ji} = K_H \frac{|(R_j)_i - (R_{норм})_j|}{(R_{норм})_j} + 1, \quad (14)$$

где: $(R_j)_i$ – реальное значение j -го показателя для i -й БС; $(R_{норм})_j$ – нормативное значение j -го показателя; K_H – коэффициент нормировки, который выбирается из соотношения:

$$\frac{(R_{max})_j}{(R_{норм})_j} \times K_H = 10,$$

⁵ Рекомендация МСЭ-R P.1546-5. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц.

где: $(R_{max})_j$ – максимальное значение j -го показателя. Значение энтропии покрытия:

$$H_{\Pi} = \sum_{j=1}^3 \log_2 \sum_{i=1}^N \begin{cases} P_{ji}, (R_j)_i \leq (R_{норм})_j \\ 0, (R_j)_i > (R_{норм})_j \end{cases} + i \sum_{j=1}^3 \log_2 \sum_{i=1}^N \begin{cases} P_{ji}, (R_j)_i > (R_{норм})_j \\ 0, (R_j)_i \leq (R_{норм})_j \end{cases}. \quad (15)$$

В таблице 2 приведен фрагмент оценки результатов сопоставления требуемых значений показателей с реальными значениями, предложенными АС государства, на территории которого развёрнута сеть. Общий размер реального исследования сети составил 871 станцию. Реальные значения показателей, превышающие нормативные значения, отмечены красным цветом, а удовлетворяющие условиям Соглашения – синим.

На основании расчётов было получено значение энтропии покрытия по данным показателям для предложения сопредельного государства:

$$H_{\Pi} = 32,1 + i 15,74$$

Аналогичные расчёты были проведены для характеристик станций сети для идеального случая полной координации с КС ВРНС (отсутствии превышений нормативных значений), а также для компромиссной ситуации, достигнутой в результате переговоров между Администрациями связи сопряжённых государств, закреплёнными положениями Соглашения. Результаты расчётов приведены в табл. 3, а также на рис. 3.

Синие столбцы диаграммы (см. рис. 3) соответствуют значениям действительной части энтропии покрытия (запас), а красные – мнимой (превышения), по оси ординат значения отложены в битах.

По полученным значениям можно сделать вывод, что в ходе проведения работ по заключению Соглашения достигнута достаточно высокая эффективность, которая близка к идеальному значению, так как сохранён достаточно высокий потенциал для средств ВРНС, о чём говорят достаточно большое значение действительной части ЭП и невысокое значение мнимой части. Но всё-таки желательно добиваться того, чтобы мнимые значения ЭП не превосходили бы единицы.

Первичные предложения АС сопредельного государства имели слишком высокое значение мнимой составляющей информационного ресурса, что привело к несоблюдению условий электромагнитной совместимости средств.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрен подход, который может быть использован для комплексной оценки эффективности заключённых соглашений в компромиссных ситуациях на примере оценки эффективности Соглашения между АС Российской Федерации с АС сопредельного государства по обеспечению электромагнитной совместимости РЭС различных радиослужб.

Данный подход обладает универсальностью, поскольку методически основан на комплексной оценке вектора обобщённых показателей для предметной области.

Также рассмотрены свойства энтропии покрытия и показано, каким образом на её основе можно представить информационный ресурс объекта, отражающий его целевое предназначение.

Рецензент: **Цимбал Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, г. Серпухов, Россия.

Литература

1. Информатизация управления: Монография / Под ред. Д. А. Ловцова. – М.: ВА им. Петра Великого, 2003. – 263 с.
2. Коровайцев А. А., Ломакин М. И., Сухов А. В. Информационно-энтропийный подход к оценке метрологического ресурса средств измерений // Измерительная техника. – 2014. – № 6. – С. 14 – 17.
3. Ловцов Д. А. Информационная теория эргасистем: Тезаурус. – М.: Наука, 2005. – 248 с.
4. Ловцов Д. А. Распределение информационных мер в эргасистеме // Научно-техническая информация. Сер. 2. Информ. процессы и системы. – 2002. – № 10. – С. 12 – 18.
5. Ловцов Д. А. Концепция комплексного «ИКС»-подхода к исследованию сложных правозначимых явлений как систем // Философия права. – 2009. – № 5. – С. 40 – 45.
6. Ловцов Д. А. Информационные аспекты комплексного подхода к исследованию систем управления // Научно-техническая информация. Сер. 2. Информ. процессы и системы. – 1997. – № 5. – С. 10 – 17, 32.
7. Ловцов Д. А. Системология правового регулирования информационных отношений в инфосфере: Монография. – М.: РГУП, 2016. – 316 с..
8. Методы и технологии выработки управленческих решений при создании сложных технических комплексов / А. В. Сухов, А. В. Мячин, Д. А. Ловцов и др. – М.: ВА им. Петра Великого, 2009. – 335 с.
9. Решетников В. Н., Сухов А. В., Вавулов О. Ю. Алгоритмы информационной оценки совместимости средств мобильной связи и станций воздушной радионавигационной службы // Программные продукты и системы. – 2017. – № 3. – С. 529 – 536.
10. Сухов А.В. Динамика информационных потоков в системе управления сложным техническим комплексом // Теория и системы управления. – 2000. – № 4. – С. 111 – 120.
11. Сухов А.В., Зайцев М. И. Информационный мониторинг частотного ресурса геостационарных спутников-ретрансляторов, основанный на энтропии покрытия // Современные проблемы управления природными ресурсами и развитием социально-экономических систем: Тр. XII Междунар. науч. конф. (7 апреля 2016 г.)/ Моск. ун-т им. С. Ю. Витте. – М.: МУ им. С. Ю. Витте, 2016. – С. 390 – 399.
12. Lovtsov D. A. Models for Measuring the Information Resource of a Computerized Control System // Automation and Remote Control. – 1996. – Vol. 57. – No 9. – Part 1. – P. 1221 – 1232.
13. Lovtsov D. A. The information-measure distribution in an Ergasystem // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2002. – Vol. 36. – No 5. – P. 35 – 45.

EVALUATION OF THE INFORMATION RESOURCE OF RADIONAVIGATION STATIONS UNDER THE CONDITIONS OF MOBILE TELECOMMUNICATION INTERFERENCE

Andrei Sukhov, Doctor of Science (Technology), Professor at the Department of Radioelectronics, Telecommunications and Nanotechnologies of the Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation.

E-mail: avs57@mail.ru

Keywords: *electromagnetic compatibility, agreement, information evaluation, methodology, aeronautical radionavigation service, mobile telecommunication, interference, covering entropy, combined ICS (“information-cybernetics-synergy”) approach, systemological principles.*

Abstract.

Purpose of the work: *improving the scientific and methodological basis for solving problems of ensuring electromagnetic compatibility of radio electronic devices of different radio services.*

Method used: combined ICS ("information-cybernetics-synergy") approach to the analysis and optimisation of electromagnetic compatibility, mathematical modelling of the information resource of radio service.

Results obtained: a new concept of information resource of radio service is introduced based on the covering entropy; a technique for its evaluation and use for ensuring electromagnetic compatibility of radio electronic devices of different radio services is presented; an example of using the technique for ensuring electromagnetic compatibility of aeronautical radionavigation service stations and land mobile service is given.

References

1. Informatizatsiia upravleniia : monografiia, pod red. D. A. Lovtsova, M. : VA im. Petra Velikogo, 2003, 263 pp.
2. Korovaitsev A. A., Lomakin M. I., Sukhov A. V. Informatsionno-entropiinyi podkhod k otsenke metrologicheskogo resursa sredstv izmerenii, Izmeritel'naia tekhnika, 2014, No. 6, pp. 14-17.
3. Lovtsov D. A. Informatsionnaia teoriia ergasistem : tezaurus, M. : Nauka, 2005, 248 pp.
4. Lovtsov D. A. Raspredelenie informatsionnykh mer v ergasisteme, Nauchno-tekhnicheskaiia informatsiia. Ser. 2. Inform. protsessy i sistemy, 2002, No. 10, pp. 12-18.
5. Lovtsov D. A. Kontseptsii kompleksnogo "IKS"-podkhoda k issledovaniuu slozhnykh pravoznachimykh iavlenii kak sistem, Filosofii prava, 2009, No. 5, pp. 40-45.
6. Lovtsov D. A. Informatsionnye aspekty kompleksnogo podkhoda k issledovaniuu sistem upravleniia, Nauchno-tekhnicheskaiia informatsiia. Ser. 2. Inform. protsessy i sistemy, 1997, No. 5, pp. 10-17, 32.
7. Lovtsov D. A. Sistemologiiia pravovogo regulirovaniia informatsionnykh otnoshenii v infosfere : monografiia, M. : RGUP, 2016, 316 pp.
8. Metody i tekhnologii vyrabotki upravlencheskikh reshenii pri sozdanii slozhnykh tekhnicheskikh kompleksov, A. V. Sukhov, A. V. Miachin, D. A. Lovtsov i dr, M. : VA im. Petra Velikogo, 2009, 335 pp.
9. Reshetnikov V. N., Sukhov A. V., Vavulov O. Iu. Algoritmy informatsionnoi otsenki sovместimosti sredstv mobil'noi svyazi i stantsii vozdukhnoi radionavigatsionnoi sluzhby, Programmnye produkty i sistemy, 2017, No. 3, pp. 529-536.
10. Sukhov A.V. Dinamika informatsionnykh potokov v sisteme upravleniia slozhnym tekhnicheskim kompleksom, Teoriia i sistemy upravleniia, 2000, No. 4, pp. 111-120.
11. Sukhov A.V., Zaitsev M. I. Informatsionnyi monitoring chastotnogo resursa geostatsionnykh sputnikov-retransliatorov, osnovannyi na entropii pokrytiia, Sovremennye problemy upravleniia prirodnyimi resursami i razvitiem sotsial'no-ekonomicheskikh sistem : tr. XII Mezhdunar. nauch. konf. (7 apreliia 2016 g.), Mosk. un-t im. S. Iu. Vitte, M. : MU im. S. Iu. Vitte, 2016, pp. 390-399.
12. Lovtsov D. A. Models for Measuring the Information Resource of a Computerized Control System, Automation and Remote Control, 1996, vol. 57, No. 9, part 1, pp. 1221-1232.
13. Lovtsov D. A. The information-measure distribution in an Ergasystem, Automatic Documentation and Mathematical Linguistics, 2002, vol. 36, No. 5, pp. 35-45.