

УДК 621.396.49

ТАКСОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ IOT

Паршин Ю.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, email: parshin.y.n@rsreu.ru

Паршин А.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедры РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, email: parshin.a.yu@rsreu.ru

Грачев М.В., младший научный сотрудник кафедры РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, email: grachev.m.v@rsreu.ru

TAXONOMICAL ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENT IOT INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM

Parshin Yu. N., Parshin A. Yu., Grachev M. V.

The application of the taxonomic analysis method to select the parameters of the IoT information transmission system is considered. To take into account the heterogeneous properties and requirements for the information transmission system, its individual parameters are considered as features of objects that form a representative sample. After appropriate normalization, a set of features of the reference object is formed. A metric is specified in the feature space, and the best object is selected according to the criterion of minimum distance to the reference object. As a result of modeling, a set of parameters of the optimal object was obtained, which is used as initial data when designing an IoT information transmission system.

Key words: information transmission system, taxonomic analysis, ideal object, throughput, MIMO, energy efficiency.

Ключевые слова: система передачи информации, таксономический анализ, идеальный объект, пропускная способность, MIMO, энергоэффективность.

Введение

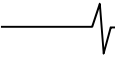
Определение наилучшего варианта из множества некоторых объектов по набору показателей качества является достаточно сложной задачей и составляет предмет исследований многих авторов [1-7]. Большинство методов многокритериального синтеза сигналов и устройств требуют участия лица, принимающего решения, на том или ином этапе синтеза. При преобразовании множества критериев к одному критерию необходимо определять весовые коэффициенты или другие функции влияния отдельных критериев на общий критерий. Также при формулировке задачи оптимизации требуется вводить ограничения, которые имеют неформальный характер.

Нашел широкое применение в различных областях научных исследований и принятия решений таксономический анализ, призванный устранить субъективизм в оценках степени сходства сравниваемых объектов без конкретизации их природы. Например, таксономический анализ используется для оптимального размещения базовых станций сети специальной подвижной радиосвязи, оперативно развертываемой и функционирующей в сложных физико-географических условиях [8, 9]. Для повышения эффективности таких сетей на основе формирования динамически управляемой топологии опорно-транспортной сети предложены методика и алгоритм оптимизации размещения базовых станций. Обоснованы основные критерии оптимизации, включая

Рассматривается применение метода таксономического анализа для выбора параметров системы передачи информации IoT. Для учета разнородных свойств и требований к системе передачи информации отдельные ее параметры рассматриваются как признаки объектов, образующих представительную выборку. После соответствующей нормировки формируется набор признаков эталонного объекта. В пространстве признаков задается метрика, а наилучший объект выбирается по критерию минимума расстояния до эталонного объекта. В результате моделирования получена совокупность параметров оптимального объекта, которая используется как исходные данные при проектировании системы передачи информации IoT.

минимизацию числа базовых станций, числа частотных каналов на каждой станции и размерности частотного кластера при выполнении заданных требований к качеству связи. Группирование объектов в локальные плотности по степени схожести может быть осуществлена на основе алгоритма «FOREL» [10,11] и теории таксономического анализа, которая позволяет на множестве размещенных на плоскости объектов выделить локальные неоднородности, таксоны, таким образом, чтобы сумма расстояний от объектов таксонов до центров таксонов была минимальной по всем таксонам.

К системе передачи информации объектов IoT предъявляются комплекс разнородных требований, составляющих признаки объекта: надежность передачи информации, энергоэффективность, малые размеры. Объективное рассмотрение всех признаков объектов и выбор наиболее удачного объекта становится возможным при использовании таксономического анализа. В работе [12] проведена оптимизация мощности передатчика и тактовой частоты с целью минимизации потребляемой мощности при заданном качестве передачи информации. При этом не учиты-



вается количество антенн, определяющее массу и габариты всего устройства.

Целью работы является сравнительный анализ представительной выборки вариантов систем передачи информации по совокупности разнородных признаков, характеризующих их качество, и выбор варианта системы, наиболее близкого к эталонному варианту.

Постановка задачи

Для таксономического анализа выбраны следующие признаки объектов сравнения: суммарная мощность, излучаемая всеми передающими антеннами $P_{\text{ПРД}}$, мощность, потребляемая от источника питания $P_{\text{ПИТ}}$, число N_A приемных и передающих антенн ММО системы передачи информации, шенноновская пропускная способность C . Пропускная способность ММО системы для ортогональной канальной матрицы вычисляется по формуле [13]:

$$C = N_A \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{ПРД}}/L}{P_{\text{Ш}}} \right),$$

где $P_{\text{Ш}}$ – мощность шума в каждом приемном канале, L – затухание сигнала при распространении от передатчика к приемнику.

Полная мощность, потребляемая от источника питания, равна

$$P_{\text{ПИТ}} = \frac{P_{\text{ПРД}}}{\eta} + P_{\text{СТАТ}} + P_{\text{ПЛИС}} N_A,$$

где $P_{\text{СТАТ}}$ – мощность, потребляемая цифровым процессором в статическом режиме, $P_{\text{ПЛИС}}$ – мощность, потребляемая цифровым устройством формирования и обработки сигнала одной антенны. При этом увеличение числа антенн требует пропорционального повышения скорости обработки сигнала и, соответственно, тактовой частоты ПЛИС.

Так как скорость передачи и обработки данных в системах IoT невелика, то можно повысить энергоэффективность системы передачи информации путем рационального выбора мощности передатчика и тактовой частоты ПЛИС. Статическая составляющая потребляемой мощности $P_{\text{СТАТ}}$ не зависит от тактовой частоты и не уменьшается при изменении напряжения питания [14]:

$$P_{\text{СТАТ}} = Ae^{BT} + C,$$

где A, B, C – константы, T – температура перехода в кристалле ПЛИС. Динамический компонент мощности $P_{\text{ПЛИС}} = P_{\text{ПРМ}} N_A = \beta f_T$, потребляемой ПЛИС, линейно зависит от тактовой частоты, а коэффициент пропорциональности равен [15]:

$$\beta = n_A C_3 V^2,$$

где C_3 – общая емкость затворов ПЛИС, V – разность переключаемых уровней напряжения, n_A – часть переключаемых цепей в ПЛИС.

Задача заключается в определении максимальной пропускной способности C и минимальной мощности $P_{\text{ПИТ}}$, потребляемой от источника питания, путем выбо-

ра мощности передатчика $P_{\text{ПРД}}$ и числа антенн N_A . ММО системы передачи информации с использованием многокритериального подхода.

Определение оптимальных параметров системы передачи информации объектов IoT с помощью таксономического анализа

В связи с тем, что ММО системы передачи информации объектов IoT используют различные методы модуляции и базируются на разных стандартах, необходимо произвести сравнительный анализ разнородных параметров этих систем с целью определить наиболее рациональные из них на основе представительной выборки. Для решения этой задачи целесообразно воспользоваться методом таксономического анализа, который базируется на сравнении объектов по нескольким разнородным признакам [16,17].

Таксономический анализ выборки объектов состоит из следующих этапов [16]:

- определение идеального с точки зрения цели анализа объекта;
- нахождение расстояния от каждого реального объекта до идеального объекта;
- упорядочение всех объектов по степени их близости к идеальному объекту и выбор лучшего объекта по критерию минимума расстояния до идеального объекта.

В таксономическом анализе полагается, что чем ближе между собой значения признаков двух объектов, тем более близки свойства этих объектов. Следовательно, для оценки степени сходства или различия объектов нужно найти расстояние между объектами в условном пространстве признаков по заданной метрике. Таксономическое расстояние вычисляется между объектами-единицами, или между объектами-признаками, расположенными в многомерном пространстве. Все признаки можно разделить на два класса: класс I_+ , стимуляторы, значения которых желательно иметь как можно большими, и класс I_- , дестимуляторы, значения которых желательно иметь как можно меньшими.

Для таксономического анализа необходимо представить выборку объектов и их признаков в виде матрицы

$$\mathbf{X} = \{X(m, n), m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N\},$$

где M – число объектов в выборке, N – число признаков каждого объекта. Признаки объектов описывают разные свойства объектов, могут быть случайными величинами с разными разбросом значений, могут иметь разные размерности. Поэтому следующим этапом таксономического анализа является преобразование признаков путем перехода к нормированным безразмерным значениям:

$$Z(m, n) = \frac{X(m, n) - m(n)}{\sigma(n)},$$

где $m(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X(m, n)$ – оценка математического

ожидания признака, $\sigma(n) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (X(m, n) - m(n))^2}$ – оценка среднеквадратического отклонения признака. В

соответствии со стратегией таксономического анализа определим координаты идеального многомерного объекта, выбирая лучшие из существующих значений признаков:

$$Z_0(n) = \begin{cases} \max_{m=1,\dots,M} Z(m,n), & n \in I_+ \\ \min_{m=1,\dots,M} Z(m,n), & n \in I_- \end{cases}$$

Определим расстояния от каждого объекта до идеального объекта, используя евклидову метрику:

$$C(m) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (Z(m,n) - Z_0(n))^2}$$

Чем ближе объект $Z(m,n)$ совокупности находится к идеальному объекту в пространстве признаков, тем меньшим будет значение $C(m)$. Так как конкретное значение расстояния не дает однозначной характеристики степени удаленности объекта от идеального объекта, то используется нормировка расстояния таким образом,

чтобы нормированное расстояние $D(m) = \frac{C(m)}{C_{\text{МАКС}}}$ при-

нимало значение в интервале $D(m) \in [0,1]$. Для выполнения этого условия необходимо определить статистические параметры: математическое ожидание и среднеквадратичное значение расстояний

$$m_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M C(m), \quad \sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (C(m) - m_0)^2}$$

Максимальное расстояние $C_{\text{МАКС}}$ может быть найдено с использованием правила «трех сигм»

$$C_{\text{МАКС}} = m_0 + 3\sigma_0$$

Наилучший объект с номером $m_{\text{ОПТ}}$ и набором признаков $\{X(m_{\text{ОПТ}}, n), n = 1, \dots, N\}$ по итогам таксономического анализа определяется в соответствие с критерием максимального уровня развития, который соответствует минимальному расстоянию до идеального объекта

$$m_{\text{ОПТ}} = \arg \max_{m=1,\dots,M} (1 - D(m))$$

Данный показатель интерпретируется следующим образом: объект с номером m имеет тем больший уровень развития, чем ближе к единице находится значение показателя уровня ее развития $G(m) = 1 - D(m)$.

Используем алгоритм таксономического анализа для определения разнородных параметров MIMO системы передачи информации, которые имеют смысл признаков таксономического анализа:

– признак стимулятор, пропускная способность $X(m,3) = C$,

– признаки дестимуляторы, мощность передатчика $X(m,1) = P_{\text{ПРД}}$, число антенн $X(m,2) = N_A$, мощность, потребляемая от источника питания $X(m,4) = P_{\text{ПИТ}}$.

Результаты таксономического анализа энергоэффективности MIMO системы передачи информации

Для таксономического анализа необходимы исходные данные в виде значений потребляемой мощности от источника питания в различных режимах. Исходные дан-

ные получены с использованием испытательного стенда, содержащего IoT метку PALMEXX iTag Bluetooth Key Finder в режиме ожидания при $N_A = 1$. В данном режиме IoT метка и базовая станция периодически обмениваются сообщениями, подтверждающими их контакт. Для записи данных использовалась модуль сбора данных L-CARD E14-440. Анализ временной диаграммы потребляемой мощности от источника питания на различных временных интервалах работы показал, что метка находится в режиме передачи 0,18 % всего анализируемого времени, в режиме приема – 0,36 %, в статическом режиме – 99,46 %. Импульсная потребляемая мощность в режиме передачи на 7,5 дБ больше импульсной потребляемой мощности в режиме приема.

Измеренные средние мощности, потребляемые IoT меткой от источника питания в режиме передачи, приема и в статическом режиме, соответственно равны:

$$\frac{P_{\text{ПРД}}}{\eta} + P_{\text{ПРИС}} = -32,43 \text{ дБм};$$

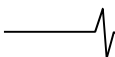
$$P_{\text{ПРИС}} \times 1 = -36,68 \text{ дБм}; \quad P_{\text{СТАТ}} = -59,7 \text{ дБм}.$$

При расчетах принято, что коэффициент полезного действия передатчика равен $\eta = 0,6$, затухание сигнала при распространении равно $L = 110$ дБ, мощность шума равна $P_{\text{Ш}} = -150$ дБм. Варианты систем передачи информации формировались на основе выборки равномерно распределенных случайных независимых признаков: $P_{\text{ПРД}}$ непрерывно в диапазоне $0 \dots -10$ дБм, N_A целочисленно в диапазоне $0 \dots 20$. При заданных условиях моделирования установлено, что идеальный объект имеет параметры: $P_{\text{ПРД}} < -75$ дБм, $N_A = 1$, $C = 199$ бит, $P_{\text{ПИТ}} = -36,5$ дБм.

На рис. 1 приведена гистограмма показателей уровня развития $G(m)$ для исследуемой выборки объектов размером $M = 10^8$. Моделирование показало, что наилучшее приближение к идеальному варианту, которому соответствует $G(m) \rightarrow 1$, может соответствовать несколько оптимальных комбинаций независимых признаков-параметров $X(m,1) = P_{\text{ПРД}}$ и $X(m,2) = N_A$.

На рис. 2 отображены пары оптимальных значений непрерывного параметра $P_{\text{ПРД}}$ и целочисленного параметра N_A , при которых реализовывалось наилучшее приближение объектов выборки к идеальному варианту. Для моделирования совокупности объектов формировалась выборка объектов размером $M = 10^5$, а число реализаций, необходимое для усреднения и построения графиков равно 10^3 . Установлено, что увеличение числа антенн позволяет уменьшить требуемую мощность передатчика и, тем самым минимизировать мощность, потребляемую от источника питания.

При значениях пар параметров, соответствующих наилучшему приближению (рис. 2), потребляемая мощность уменьшается при увеличении числа антенн (рис. 3), а при $N_A \approx 18$ имеет минимум. Пропускная способность при увеличении числа антенн в паре с уменьшением мощности передатчика сначала увеличивается, а



затем при $N_A \approx 12$ достигает максимума и начинает уменьшаться (рис. 4). Таким образом, таксономический анализ при заданном наборе признаков позволяет сделать следующие рекомендации: число антенн $N_A = 12$, мощность передатчика $P_{\text{ПРД}} = -22$ дБм. На результат анализа влияет априорный диапазон $P_{\text{ПРД}}$ и N_A , который определяется техническими ограничениями. При уменьшении априорного диапазона оптимальные значения этих параметров также уменьшаются.

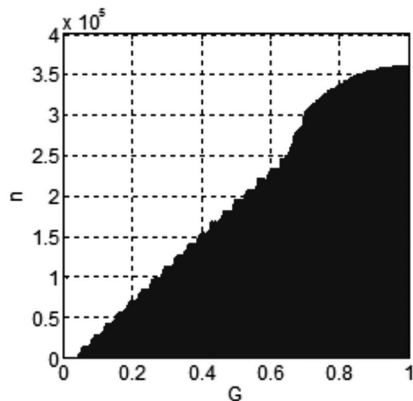


Рис. 1. Гистограмма показателей уровня развития

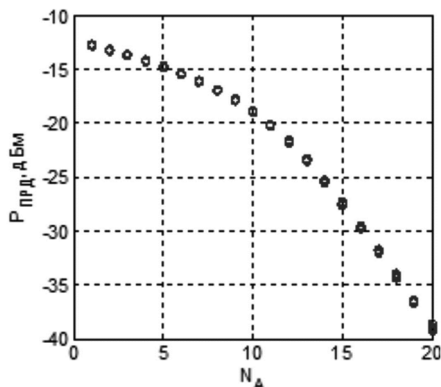


Рис. 2. Оптимальные значения мощности передатчика и числа антенн наилучшего объекта

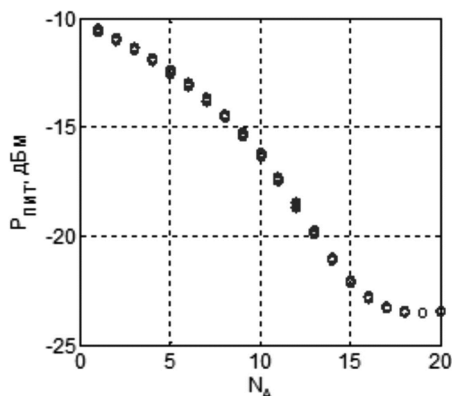


Рис. 3. Оптимальные значения мощности источника питания и числа антенн наилучшего объекта

Если число антенн слабо влияет на потребляемую от источника питания мощность, то зависимость $P_{\text{ПИТ}}(N_A)$ становится монотонно убывающей. Наоборот, при очень сильном влиянии числа антенн на потребляемую от источника питания мощность, например, пропорционально

квадрату числа антенн $P_{\text{ПИТ}} N_A^2$, минимум зависимости $P_{\text{ПИТ}}(N_A)$ получается при меньшем значении числа антенн. Конкретный вид этой зависимости определяется алгоритмом формирования и обработки ММО сигналов.

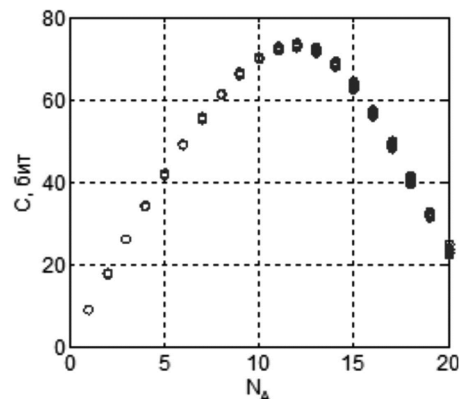


Рис. 4. Оптимальные значения пропускной способности и числа антенн наилучшего объекта

Заключение

Проведенный таксономический анализ показал возможность оптимизации системы передачи информации при разнородных показателях качества. Установлены варианты пар независимых признаков $P_{\text{ПРД}}$, N_A , при которых достигается минимум расстояния до идеального объекта, что целесообразно использовать при проектировании системы передачи информации объектов IoT. Вместе с тем, критерий минимального расстояния до идеального объекта не всегда гарантирует достижения наилучших значений других, зависимых признаков, например, пропускной способности. В этом случае предлагается из полученных комбинаций независимых признаков отбирать значения, дающие оптимум пропускной способности и мощности, потребляемой от источника питания.

Эффективность таксономического анализа повышается при увеличении числа разнородных независимых признаков, а также функционально связанных с ними признаков. Поэтому представляется перспективным расширить перечень признаков, а также установить функциональные связи между ними и зависимыми признаками.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ 22-29-01652, <https://rscf.ru/en/project/22-29-01652/> в Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина.

Литература

1. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
2. Штойфер Р. Многокритериальная оптимизация. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
3. Статистические модели и многокритериальные задачи принятия решений. Под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Статистика, 1979. 183 с.
4. Оптимизация технико-экономических характеристик радиоаппаратуры / под. ред. В.К. Маригодова. Киев: Техника, 1990. 192 с.

5. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / под ред. А.Г. Зюко. М.: Радио и связь, 1985. 272 с.

6. Юрлов Ф.Ф., Шапкин Е.И. Выбор эффективных стратегических решений на основе многоуровневого и многокритериального подходов. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2007. 208 с.

7. Кириллов С.Н. Многокритериальный синтез сигналов и устройств обработки. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2019. 48 с.

8. Севериненко А.М. Исследование и разработка методов и алгоритмов создания автоматической опорно-транспортной сети связи на основе динамического управления топологией в составе сети подвижной радиосвязи специального назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. Самара, 2017. 180 с.

9. Севериненко А.М. Алгоритм оптимального размещения базовых станций в сетях подвижной радиосвязи специального назначения, работающих в сложных физико-географических условиях. Радиотехника. 2017. № 4. С. 116-121.

10. Загоруйко Н.Г., Елкина В.Н., Лбов Г.С. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей. Новосибирск: Наука, 1985. 106 с.

11. Орлов А.И. Эконометрика. М.: Издательство «Эк-замен», 2002. 567 с.

12. Parshin A., Parshin Yu. Investigation of Efficient Receiving of Ultra Low Power Signal for IoT Application. 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Budva, Montenegro, June 10th-14th 2019, 842 p, pp. 32-35.

13. Бакулин М.Г., Варукина В.В., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 244 с.

14. Вычужанин В.В. Минимизация энергопотребления проектируемых устройств на ПЛИС типа FPGA. Современная электроника. 2011. №4. С. 58-61.

15. N.S. Kim, T. Austin, D. Blaauw, T. Mudge, K. Flautner, Jie S. Hu, M. J. Irwin, M. Kandemir, N. Vijaykrishnan. Leakage Current: Moore's Law Meets Static Power. IEEE Computer, vol. 36, no.12, pp. 68-75, Dec 2003. doi: 10.1109/ MC.2003.1250885

16. Городнов В.П., Романчик Т.В. Таксономический анализ как метод оценки конкурентоспособности промышленной продукции. Бизнесинформ. 2010. № 22. С. 24-28.

17. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях. Методы таксономии и факторного анализа. М.: Статистика, 1980. 151 с.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в формировании тематических выпусков журнала «Цифровая обработка сигналов» и размещению рекламы продукции (услуг) Вашей организации на его страницах. В случае положительного решения просим представить в редакцию журнала Ваши предложения по плановому размещению информационных материалов и макет рекламы продукции (услуг) с указанием желаемого её месторасположения: обложка (2-я, 3-я или 4-я стр.), цветная внутренняя полоса (объем полосы).

Журнал «Цифровая обработка сигналов» издается с 1999 года. Выходит ежеквартально, тиражом 200 экз.

Научно-технический журнал «Цифровая обработка сигналов» включен в Перечень изданий, рекомендуемый ВАК РФ для публикации результатов научных исследований соискателями ученой степени доктора и кандидата технических наук в области радиотехники, связи, вычислительной техники, электроники, приборостроения, информационных технологий, информационно-измерительных и управляющих систем. Журнал «Цифровая обработка сигналов» включен в базу данных Web of Science - Russian Science Citation Index.

Планируемые сроки издания отдельных номеров журнала:

- № 1 март 2023 г. Тематический выпуск: «ЦОС в инфокоммуникационных системах».
- № 2 июнь 2023 г. Тематический выпуск по материалам 25-й Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA».
- № 3 сентябрь 2023 г. Тематический выпуск: «Цифровая обработка изображений».
- № 4 декабрь 2023 г. Тематический выпуск: «ЦОС в радиотехнике и системах телекоммуникаций».

Ориентировочная стоимость рекламных услуг:

- 4-я (внешняя) страница цветной обложки – 25 тысяч рублей.
- 2-я и 3-я (внутренние) страницы цветной обложки – 15 тысяч рублей.
- 1\2 цветной внутренней полосы – 8 тысяч рублей.

Ждем Ваших предложений.

С наилучшими пожеланиями, зам. главного редактора

д.т.н., профессор Витязев Владимир Викторович, телефон 8-903-834-81-81.

Предложения прошу направлять по адресу: E-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru или info@dspa.ru