

УДК 378.653

# Модели для оценки эффективности использования радиочастотного спектра на основе мультиагентной технологии

Приведено понятие эффективности использования радиочастотного спектра (РЧС). Рассмотрены основы методики расчета эффективности РЧС, включающей техническую, экономическую и социальную составляющие. Предложены модели в виде ряда критериев. Приведены структура и описание компонент мультиагентной системы (МАС) для автоматизации оценки эффективности РЧС в динамических условиях.

**В.А. ВИШНЯКОВ,**  
профессор, д. т. н., профессор кафедры ИКТ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

**П.Ю. ЛАКИЗО,**  
соискатель кафедры ТКС

Белорусская государственная академия связи

**Ключевые слова:**

радиочастотный спектр (РЧС), виды эффективности РЧС, мультиагентные технологии, структура МАС.

**Введение.** Управление РЧС в целях повышения эффективности его использования является важнейшей областью деятельности государства. Термин «управление использованием радиочастотного спектра» применяется для описания различных административных и технических процедур, которые должны гарантировать возможность радиостанциям различных радиослужб работать, не создавая помех работе других радиоэлектронных средств (РЭС) и не испытывая помех со стороны других радиостанций [1].

Плата за использование РЧС установлена во многих странах мира. Методики расчета разовых и ежегодных платежей за использование РЧС разрабатываются национальными радиочастотными службами с учетом особенностей страны, географического положения, уровня развития инфокоммуникационной инфраструктуры, а также потенциального спроса на услуги электросвязи [2].

Для Республики Беларусь актуальными задачами являются определение эффективности использования РЧС уже действующими операторами связи и возможность оценить эффективность использования этого спектра предполагаемыми новыми операторами связи. При разработке методики оценки и расчета эффективности использования радиочастотного спектра в Республике Беларусь необходимо использовать зарубежный опыт [3].

**Методика оценки эффективности использования РЧС.** Предлагается определить эффективность

использования РЧС как меру использования, т. е. как соотношение достигнутого результата и максимально возможного (эталона); соотношение результата с затратами.

Под эффективностью использования РЧС будем понимать совокупность технических, экономических и социальных действий, направленных на максимально возможное обеспечение технических и социально-экономических потребностей государства. На основании этого определения эффективность использования РЧС будем разделять на следующие виды: техническая, экономическая и социальная.

Необходимо отметить, что не для всех радиослужб можно проводить оценку эффективности использования РЧС. Так, некоторые субъекты хозяйствования используют выделенный им радиочастотный спектр в своих технологических процессах. Поэтому предлагается всех пользователей радиочастотного спектра разделить на тех, кто получает прямую выгоду от использования радиочастотного спектра и тех, кто получает косвенную выгоду. Деление по этим группам предлагается осуществлять по такому критерию: субъекты хозяйствования, которые используют выделенный им спектр для предоставления радиотехнологий другим субъектам хозяйствования или физическим лицам, отнести к первой группе, а всех остальных – ко второй.



Для оценки общей эффективности использования РЧС ( $E$ ) необходимо использовать следующее выражение:

$$E = C_1 E_m + C_2 E_s + C_3 E_c \quad (1)$$

где  $E_m$ ,  $E_s$ ,  $E_c$  – эффективности техническая, экономическая и социальная соответственно,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – корректирующие коэффициенты для эффективностей технической, экономической и социальной соответственно.

Корректирующие коэффициенты необходимо использовать, чтобы учитывать значимость той или иной эффективности, а также ее отсутствие. Так, если значимость каждой из эффективностей равноценна, то  $C_1 = C_2 = C_3$ . В случае когда та или иная эффективность отсутствует, необходимо выбирать корректирующий коэффициент, равный нулю. Общая сумма корректирующих коэффициентов  $C_1 + C_2 + C_3 = 1$  [4].

В Республике Беларусь собственником РЧС выступает государство, что обеспечивает приоритетные условия для выполнения государственных программ, в том числе обеспечения национальной безопасности, реализации научных проектов. При этом рыночный подход к выделению РЧС представляется как необходимость отказа от государственной формы собственности, что является не совсем верным, т. к. современная система правоотношений позволяет разработать механизмы обмена совокупностью правомочий без изменения титула собственности.

Примером является долгосрочная аренда земли [5]. Для эффективного функционирования рыночного механизма важнее создание и поддержание равных прав доступа к ресурсу, относительная стабильность условий функционирования субъектов хозяйствования, выполнение договоренностей и обязательств, прозрачность и открытость отношений.

**Техническая эффективность.** Согласно рекомендациям МСЭ [2] для оценки технической эффективности должен использоваться подход «полоса – пространство – время». Оценка использования спектра  $\eta_m$  в этом случае должна определяться как отношение количества информации  $M$ , переданной по каналу, к величине использования спектра  $U = \Delta f S t$  (где  $\Delta f$  – ширина полосы частот,  $S$  – площадь зоны охвата,  $t$  – время работы). Однако этот подход позволяет получить увеличение величины  $\eta_r$  за счет уменьшения ширины полосы частот, площади зоны охвата и времени работы, что на самом деле ухудшает техническую эффективность. Поэтому использование этого подхода не является целесообразным.

Отметим, что при выдаче лицензии оператору, предоставляющему ту или иную услугу, оговаривается территория, на которой будет предоставляться эта услуга, а значит, и площадь. Также каждому оператору выдается разрешение на работу в некоторой полосе частот, т. е. задается  $\Delta f$ .

Проанализируем возможность использования параметра  $\eta_m$  в качестве критерия оценки использования РЧС радиослужбами.

Для оценки систем подвижной электросвязи технологии UMTS/LTE в качестве критерия предлагается использовать такой параметр, как среднее число каналов сети. Среднее число каналов необходимо проводить за время  $t$ , равное одним суткам (24 часа). Тогда величину  $\eta_t$  можно определить по следующей формуле:

$$\eta_m = t_k \times n_k / t \quad (2)$$

Необходимо отметить, что в (2) величина  $n_k$  – число каналов сети, использующих время  $t_k \leq t$ . Если все каналы будут использоваться в течение одних суток (24 часа) непрерывно, то  $\eta_m = n_k$ .

Конечным результатом любого эффективного использования радиочастотного спектра будет являться большее количество абонентов, приходящихся на выделенную полосу радиочастот. Это достигается двумя способами:

- количественно – путем увеличения площади покрытия сетью оператора;
- качественно – путем уменьшения радиуса соты и, следовательно, увеличения коэффициента повторного использования радиочастот.

Введем понятие «коэффициент покрытия сетью оператора», определяемый как:

$$C = S_{\text{покрытия}} / S_{\text{РБ}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{покрытия}}$  – площадь покрытия сетью оператора;  $S_{\text{РБ}}$  – площадь Республики Беларусь.

Данный критерий будет давать количественную оценку эффективности использования радиочастотного спектра. Наиболее сложными в плане оценки эффективности использования радиочастотного спектра на сегодняшний момент являются технологии подвижной радиосвязи, использующие кластерное построение сетей.

Совокупность близлежащих сот, в которых невозможно использовать одни и те же частотные каналы из-за взаимных помех, называется кластером, а число сот, входящих в кластер, – размерностью кластера. Размерность кластера является наиболее важной и необходимой величиной для частотно-территориального планирования сетей сотовой подвижной связи.

Данное понятие напрямую связано с еще одним – коэффициентом повторного использования радиочастот, под которым будем понимать следующее соотношение:

$$K = N_{\text{используемых}} / N_{\text{выделенных}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{используемых}}$  – количество используемых радиочастотных каналов на всей площади покрытия сетью оператора конкретной технологии;  $N_{\text{выделенных}}$  – количество выделенных

радиочастотных каналов на основании решения ГКРЧ.

**Экономическая эффективность.** Выделим следующих субъектов, заинтересованных в повышении эффективности использования РЧС и связанных с его использованием: государство, орган управления, операторы, потребители услуг.

Экономическая эффективность использования РЧС для государства выражается в следующем: чем больше прямая и косвенная отдача, тем эффективнее используется РЧС. Прямая отдача от РЧС предполагает разовые и ежегодные платежи от использования РЧС, косвенная – рост налоговых поступлений, рост ВВП и занятости. Интересы государства и органа управления совпадают, т. е. при расчете экономической эффективности использования РЧС для государства и органа управления необходимо использовать единый подход.

При расчете экономической эффективности целесообразно опираться на следующие показатели: годовые доходы государства от  $i$ -го оператора, использующего спектр, руб., которые включают прямые доходы (разовая и ежегодная плата пользователя за РЧС) и косвенные доходы (налоги пользователей, связанные с использованием РЧС); объем выделенного РЧС, МГц; площадь географической территории, на которой осуществляется вещание (излучение РЭС), км<sup>2</sup>; время работы, год.

Эффективность для оператора выражается в следующем: чем больше он сможет предоставить услуг потребителям и чем выше будет их качество, чем меньше будут инвестиционные и текущие расходы, тем эффективнее он использует РЧС.

При повышении экономической эффективности использования РЧС оператором государство получает прирост ВВП, занятости и увеличение налоговых поступлений в бюджет. Можно выразить экономическую эффективность использования РЧС в данном случае через соотношение доходов и расходов пользователя.

Для расчета необходимо знать доходы пользователя от использования РЧС, а также затраты, связанные с использованием РЧС, за анализируемый период. В качестве затрат нужно учитывать расходы на оплату за использование РЧС, капитальные затраты на приобретение оборудования и его обслуживание, расходы на модернизацию оборудования и технологий. Для выработки экспертных значений необходимо изучить статистическую и финансовую отчетность пользователей и рассчитать реальные показатели.

Эффективность использования РЧС с точки зрения потребителей услуг – это прежде всего социальная эффективность, которая может выражаться в:

соотношении цена/ качество; надежности и бесперебойности услуг; разнообразия услуг.

Показатель экономической эффективности, рассчитанный для каждого оператора, определим по формуле:

$$E_{PЧC_i} = D_{20c_i} / F_i \times S \times T \quad (5)$$

где  $D_{20c_i}$  – годовые доходы государства от  $i$ -го пользователя, руб., включает: прямые доходы – разовую и ежегодную плату пользователя за РЧС; косвенные доходы – налоги пользователей, связанные с использованием РЧС.  $F_i$  – объем выделенного РЧС, МГц;  $S$  – площадь географической территории, на которой осуществляется вещание (излучение РЭС), км<sup>2</sup>;  $T$  – время работы, год.

**Социальная эффективность.** Применительно к операторам, использующим РЧС, социальная эффективность функционирования может быть оценена для ключевых социокультурных групп: пользователей услуг и работников оператора.

Единых показателей оценки социальной эффективности нет. Однако в любом случае она может быть оценена в соответствии с теоретически обоснованными измерениями, которые при каждом исследовании остаются постоянными: социальной необходимостью, социальной полезностью, социальной привлекательностью. Они интерпретируются следующим образом.

*Социальная необходимость* деятельности оператора определяет его вклад в развитие общества:

– соответствие социальной политике государства:

$$\Theta_{сн} = d_{соц. аб} / d_{соц. нез}, \quad (6)$$

где  $d_{соц. аб}$  – доля «социальных» абонентов;  $d_{соц. нез}$  – доля социально незащищенных граждан на обслуживаемой территории;

– необходимость оказываемых услуг:

$$\Theta_{необх} = N_{необх} / N_{опрош}, \quad (7)$$

где  $N_{необх}$  – количество опрошенных, признавших услуги необходимыми;  $N_{опрош}$  – общее количество опрошенных.

*Социальная полезность* функционирования оператора указывает на качество работы, его результаты и последствия в виде трех показателей:

– доступность и высокое качество предоставляемых услуг:  $\Theta_{ус} = N_{удовл} / N_{опрош}, \quad (8)$

где  $N_{удовл}$  – количество опрошенных, признавших услуги доступными и качественными;  $N_{опрош}$  – общее количество опрошенных;

– соответствие оказываемых услуг требованиям современного информационного общества:  $\Theta_{соот} = N_{удовл. ио} / N_{опрош. ио},$

где  $N_{удовл}$  – количество опрошенных, признавших услуги соответствующими требованиям современного информационного общества;  $N_{опрош}$  – общее количество опрошенных;

– реализация социальных программ, развитие социальной инфраструктуры:

$$\Theta_{соц. прог} = N_{реализ} / N_{общ}, \quad (5)$$

где  $N_{реализ}$  – количество социальных программ, реализованных оператором за период деятельности;  $N_{общ}$  – общее количество социальных программ, реализованных на обслуживаемой территории.

*Социальная привлекательность* предполагает удовлетворенность работников оператора условиями труда, а реальных и потенциальных потребителей – оказываемыми услугами:

– охватываемая площадь:

$$\Theta_{пл} = S_{покр} / S_{общ}, \quad (11)$$

где  $S_{покр}$  – зона покрытия оператора;  $S_{общ}$  – общая площадь обслуживаемой территории;

– количество населенных пунктов:  $\Theta_{нас.п.} = N_{покр}, \quad (12)$

где  $N_{покр}$  – общее количество населенных пунктов в зоне покрытия оператора;  $N_{об}$  – общее количество населенных пунктов на обслуживаемой территории;

– количество потребителей:  $\Theta_{аб} = N_{аб} / N_{нас}, \quad (13)$

где  $N_{аб}$  – количество абонентов (пользователей) на обслуживаемой территории;  $N_{нас}$  – общая численность населения на обслуживаемой территории;

– количество потребителей:

$$N_{нас} = N_{удовл} / N_{опрош}, \quad (14)$$

где  $N_{удовл}$  – количество опрошенных, удовлетворенных оказываемыми услугами;  $N_{опрош}$  – общее количество опрошенных;

– уровень заработной платы у оператора, его соотношение со средним на обслуживаемой территории:

$$\Theta_{зп} = ЗП_{опер} / ЗП_{терр}, \quad (15)$$

где  $ЗП_{опер}$  – средняя заработная плата у оператора;  $ЗП_{терр}$  – средняя заработная плата на обслуживаемой территории.

**Использование многоагентной системы (МАС).**

Для расчета по критериям 1–15 оценки эффективности использования РЧС необходима программная поддержка. В связи с тем, что пользователи РЧС – множество станций, распределенных по территории республики, и другие потребители (агенты), предложено оценивать управление и эффективность РЧС с использованием технологии мультиагентов.

Многоагентная система (МАС) – сложная система, в которой функционируют два или более интеллектуальных агента [7]. Каждый из них может иметь следующую структуру. Входами являются внутренние параметры агента и данные о состоянии среды. Выходы – параметры, воздействующие на среду и информирующие пользователя или программу, выполняющую роль менеджера в системе, о состоянии среды и принятых решениях.

Решатель – процедура принятия решений – может быть достаточно простым алгоритмом или элементом системы искусственного интеллекта.

В архитектуре МАС основную часть составляет предметно-независимое ядро, в составе которого выделяются следующие базовые компоненты:

- служба прямого доступа обеспечивает непосредственный доступ к атрибутам агентов;
- служба сообщений отвечает за передачу сообщений между самими агентами, а также между агентами и дополнительными системами ядра;
- библиотека классов агентов (часть базы знаний) содержит информацию о классификации агентов в данной МАС;
- сообщество агентов – серверное «место», где размещаются агенты. Этот блок, кроме жизнедеятельности агентов, обеспечивает еще функции по загрузке/записи агентов и их свойств и отвечает за оптимизацию работы агентов с ресурсами;
- онтология – предметная база знаний, содержащая конкретные знания об объектах и среде функционирования, представляемых в виде соответствующей семантической сети.

**Заключение.** В результате разработки критериев оценки эффективности использования РЧС было выявлено три основных аспекта эффективности:

- техническая эффективность, которая может измеряться количественно (путем увеличения

площади покрытия сетью оператора) и качественно (путем уменьшения радиуса соты, т. е. увеличения коэффициента повторного использования радиочастот);

- экономическая эффективность, которая дает возможность определить финансовую отдачу от спектра, т. е. величину поступлений в бюджет, полученную государством с 1 единицы объема РЧС, выделенного на определенной территории, с учетом времени работы пользователя;

- социальная эффективность, которая выражается степенью достижения цели деятельности с учетом затрат ресурсов и времени путем соотношения с общепринятой нормой (или идеалом), уровнем удовлетворенности клиента полученной услугой.

Каждой из трех составляющих соответствуют свои критерии для расчета. Для оценки общей эффективности использования РЧС пользователем необходимо применить суммарную эффективность с учетом значимости (весовых коэффициентов) той или иной эффективности, а также ее отсутствия. В то же время определение методики расчетов весовых коэффициентов и их корректировки в зависимости от изменения политики государства в области управления РЧС требует использования агентов, которые на основании динамической информации будут корректировать такие расчеты. Представлена структура МАС для оценки эффективности РЧС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем: учебное пособие / А.Л. Бузов [и др.]; под ред. М.А. Быховского. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 10 с.
2. Экономические аспекты управления использованием спектра. Отчет МСЭ-R SM.2012-4. – Женева, 2015.
3. Вишняков, В.А. Управление эффективностью использования радиочастотного спектра на основе анализа расчета размеров платы в странах СНГ / В.А. Вишняков, П.Ю. Лакизо // Веснік сув'язі. – № 5 (157). – Минск. – 2019. – С. 60–64.
4. Вишняков, В.А. Информационная оценка эффективности радиочастотного спектра с использованием многоагентной технологии / В.А. Вишняков, П.Ю. Лакизо // Проблемы инфокоммуникаций. – № 2 (10). – Минск. – 2019. – С. 53.
5. Министерство связи и информатизации Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mpt.gov.by/ru>. – Дата доступа: 05.8.2020.
6. Регламент радиосвязи. Женева: МСЭ, 2012.
7. Ватсон, Б. Мультиагентные системы на примерах / Б. Ватсон. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2011. – 608 с.

---

*The concept of the efficiency of using the radio frequency spectrum (RFS) is given. The fundamentals of the methodology for calculating the effectiveness of RFS, including technical, economic and social components, are considered, models are proposed in the form of a number of criteria. The structure and description of the components of a multi-agent system (MAS) for automating the assessment of the effectiveness of RFS in dynamic conditions are presented.*

*Key words:* radio frequency spectrum (RFS), types of RFS efficiency, multi-agent technologies, MAS structure.