

УДК 004.75

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.027](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.027)

АРХИТЕКТУРА ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТЕНТА В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Д.К. Левоневский

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской
академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: DLewonewski.8781@gmail.com*

Резюме: Доставка контента потребителю – одна из важных задач информационных систем. Для эффективной доставки контента необходимо выполнение ряда условий, связанных с надёжностью, управляемостью, согласованностью процессов доставки. Возможность обеспечения этих условий зависит от концепции и архитектуры системы распределения контента. В данной статье рассматривается подход к построению облачной системы распределения мультимедийного контента в киберфизическом окружении. Проанализированы процессы доставки контента в киберфизических системах и сценарии взаимодействия этих систем с пользователями. Отмечено, что процессы доставки контента при интерактивном человеко-машинном взаимодействии с использованием многомодальных интерфейсов исследованы недостаточно. Поэтому предложена общая концепция системы, учитывающая использование многомодальных интерфейсов, детализированы роли участников процесса распределения контента, их типовые действия определены с помощью диаграмм прецедентов. Построены диаграммы классов, описывающие структуру модулей управления и трансляции контента. Предложена архитектура системы на основе общей шины данных. Рассмотрены преимущества данной архитектуры, связанные с надёжностью, оперативностью выявления сбоев, управляемостью, простотой подключения сторонних источников и получателей данных. Рассмотрен пример реализации сервиса корпоративного телевидения на основе предложенной архитектуры, определены компоненты этого сервиса и порядок их взаимодействия.

Ключевые слова: мультимедиа, человеко-машинное взаимодействие, распределённые системы, системы доставки контента, киберфизические системы, шина данных.

Для цитирования: Левоневский Д.К. Архитектура облачной системы распределения контента в киберфизических системах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/Levonevskiy_4_19_1.pdf
DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.027

ARCHITECTURE OF A CLOUD SYSTEM FOR DISTRIBUTING MULTIMEDIA CONTENT IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

D.K. Levonevskiy

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract: Content delivery to consumers counts to the important tasks of information systems. To make the content delivery effective, a number of conditions concerning reliability, controllability, and coherence of content delivery processes should be fulfilled. The ability to secure these conditions depends on the concept and architecture of a content distribution system. This paper discusses an approach to building a cloud system for distributing multimedia content in cyber-physical environment, analyzes the processes of content delivery in cyberphysical systems and scenarios of interaction between these systems and users. It is noted that the content delivery processes of human-machine interaction

with the use of multimodal interfaces have been studied insufficiently. Therefore, a general system concept has been proposed that takes into account the use of multimodal interfaces. The roles of participants in the content distribution process are detailed, their typical actions are determined in terms of use-case diagrams. Class diagrams are constructed to describe the structure of control and broadcast modules. A system architecture based on a common data bus is proposed. The advantages of this architecture include reliability, promptness of failure detection, controllability, flexibility in connecting third-party data sources and recipients. An example of the implementation of a corporate television service based on the proposed architecture is considered, the components of this service and the scheme of their interaction are described.

Keywords: multimedia, human-machine interaction, distributed systems, content delivery systems, cyber-physical systems, data bus.

For citation: Levonevskiy D.K. Architecture of a cloud system for distributing multimedia content in cyber-physical systems. *Modeling, optimization and information technology*. 2019;7(4). Available by: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/Levonevskiy_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.027 (In Russ.).

Введение

Доставка контента конечному потребителю является одной из важных задач информационных систем. Использование информационных и рекламных киосков, чат-ботов, мобильных платформ, мобильных приложений позволяет сделать взаимодействие пользователя с информационной системой удобным и эффективным.

При этом для эффективной доставки контента необходимо выполнение ряда условий. Эти условия связаны с надёжностью системы доставки и возможностью передачи контента по каналам связи, возможностью конечных устройств воспроизводить контент полностью и в требуемом качестве, а также с согласованностью между содержанием контента, целями системы доставки и требованиями потребителя. Использование распределённых систем упрощает управление контентом и позволяет пользователям с административными ролями управлять масштабной системой доставки контента с помощью единого интерфейса.

В данной статье рассматривается подход к построению облачной системы распределения мультимедийного контента в киберфизических системах (КФС), основанный на использовании архитектуры с общей шиной данных.

Материалы и методы

В КФС доставка осуществляется с использованием различных устройств и модальностей. К таким устройствам относятся стационарные и мобильные информационные киоски, подвижные робототехнические системы, мобильные устройства [1]. Также мультимедийный контент может транслироваться на цифровые вывески, в телевизионные сети, в т.ч. системы корпоративного телевидения [2], отображаться на сайтах с различными информационными и рекламными блоками, в десктопных и мобильных приложениях. Потребитель контента может управлять трансляцией с помощью мобильных приложений и многомодальных интерфейсов [3]. Интеграция различных информационных систем и коммуникационных интерфейсов позволяет создавать киберфизическую интерактивную дополненную реальность [4-7]. Архитектура программно-конфигурируемой интеллектуальной системы управления контентом на основе технологии Интернета вещей [8] предложена в [9].

В научной литературе уделяется значительное внимание области доставки контента в распределённых системах. Ряд исследований предлагает протоколы доставки

контента, отличающиеся более эффективной балансировкой нагрузки и позволяющие снижать загруженность критических элементов системы в различных условиях, например, в Internet of Vehicles [10-11]. Рассматриваются вопросы организации топологии сетей для построения оптимальных планов передачи данных [12] и обеспечения устойчивости систем [13]. Исследуются системы согласованной доставки контента из множества источников и вопросы маршрутизации в таких системах [14-15].

Меньше исследований посвящено организации доставки контента при интерактивном человеко-машинном взаимодействии с использованием многомодальных интерфейсов [16]. Выполнение доставки и трансляции контента требуется при создании интеллектуальных справочных систем, чат-ботов. Пример подобной корпоративной информационно-навигационной системы описан в работе [17]. В этой работе рассматриваются подходы к организации человеко-машинного взаимодействия, но не рассматриваются вопросы доставки контента. Сценарии взаимодействия пользователя с системой описаны в [18].

Результаты

Рассмотрим подход, при котором мультимедийный контент распределяется по устройствам, которые зарегистрированы в облачной системе как точки доступа. Размещение контента в облачной системе позволяет поддерживать актуальность этого контента и централизованно управлять процессом трансляции в соответствии с ролями, назначенными пользователям. Процесс распределения контента связан с необходимостью поиска компромисса между требованиями поставщиков контента, возможностями конечных устройств и удобством потребителей [19].

В процессе распределения контента принимают участие стороны:

- Пользователи, которые могут, в соответствии с назначенными им ролями, предоставлять контент, информацию о возможных площадках его размещения, управлять доставкой контента.
- Облачная система, которая обеспечивает хранение контента и распределяет его по точкам доступа.
- Точки доступа – элементы КФС, входящие в состав площадок размещения контента и транслирующие его конечному потребителю.

Для взаимодействия с потребителями контента используются конечные устройства доступа, которые визуализируют контент. В роли конечных устройств могут выступать смартфоны, планшеты, стационарные ПК, системы цифровых вывесок. Для получения контента конечные устройства используют инфраструктуру доступа (сайты, программное обеспечение цифровых вывесок), которая обращается к интерфейсам доступа (API облачной системы). Цикл, который проходит контент, представлен на Рисунке 1.

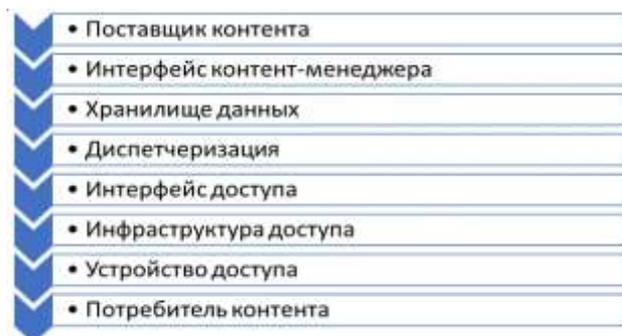


Рисунок 1 – Последовательность передачи контента
Figure 1 – Content delivery sequence

Процесс распределения контента связан с необходимостью нахождения компромисса между требованиями поставщиков контента, возможностями конечных устройств и удобством потребителей контента.

Рассмотрим общую схему взаимодействия пользователей, облачной системы и точек доступа, которая показана на Рисунке 2. Можно видеть, что процессом распределения контента управляют пользователи, которых можно разделить на 3 основных категории: поставщики контента, диспетчеры и владельцы площадок. Рассмотрим более подробно каждую роль и процессы, которыми эта роль управляет в облачной системе.

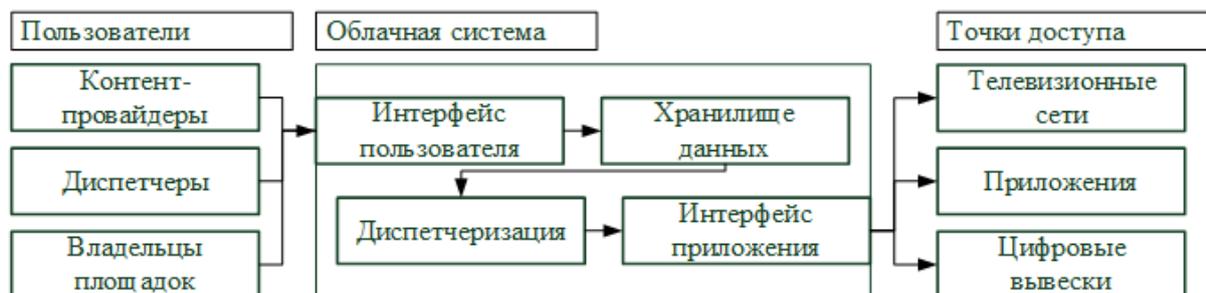


Рисунок 2 – Взаимодействие пользователей, облачной системы и точек доступа
Figure 2 – Interaction of cloud system users with endpoints

Поставщики загружают в облачную систему контент, элемент которого характеризуется такими свойствами, как набор модальностей (текст, звук, изображение), объём (по времени, количеству информации), набор категорий (ключевых слов). Поставщики контента создают репозитории (группы элементов контента), в которых организовано хранение контента. Каждый элемент контента представляет собой объект, содержащий информацию о типах хранимого контента и его размещении. В зависимости от типа контент-объект имеет набор свойств, определяющих его характеристики и влияющих на возможность доставки этого контента к точкам доступа.

Диаграмма прецедентов для контент-менеджера представлена на Рисунке 3.



Рисунок 3 – Диаграмма прецедентов для контент-менеджера
Figure 3 – Use case diagram for content manager

На Рисунке 4 приводится диаграмма классов, характеризующая типы и свойства программных объектов, описывающих контент. Общие свойства, характерные для любых элементов контента, описываются классом `ContentItem`. Свойства контента, связанные с наличием в нём разных характеристик и модальностей, описаны классами `VisualContentItem`, `AudioContentItem` и т. д. Данные классы позволяют описать требования к точкам доступа, необходимые для трансляции контента: к примеру, для аудио необходимо соблюдать требования по битрейту, для визуального контента – по разрешению и глубине цвета, для видео – также по частоте кадров. С помощью наследования от этих классов формируются типовые контент-объекты, содержащие аудио, видео и текст.

Все типы контента имеют свойство «Расположение» – файл на сервере или торрент-файл. Контент также характеризуется набором метаданных (категорий, наборов, тематических рубрик) для упрощения его распределения по клиентским устройствам. Эти свойства описываются принадлежностью контента к группам (класс `ContentGroup`), которым для удобства администрирования могут быть назначены пользователи с управляющими ролями.

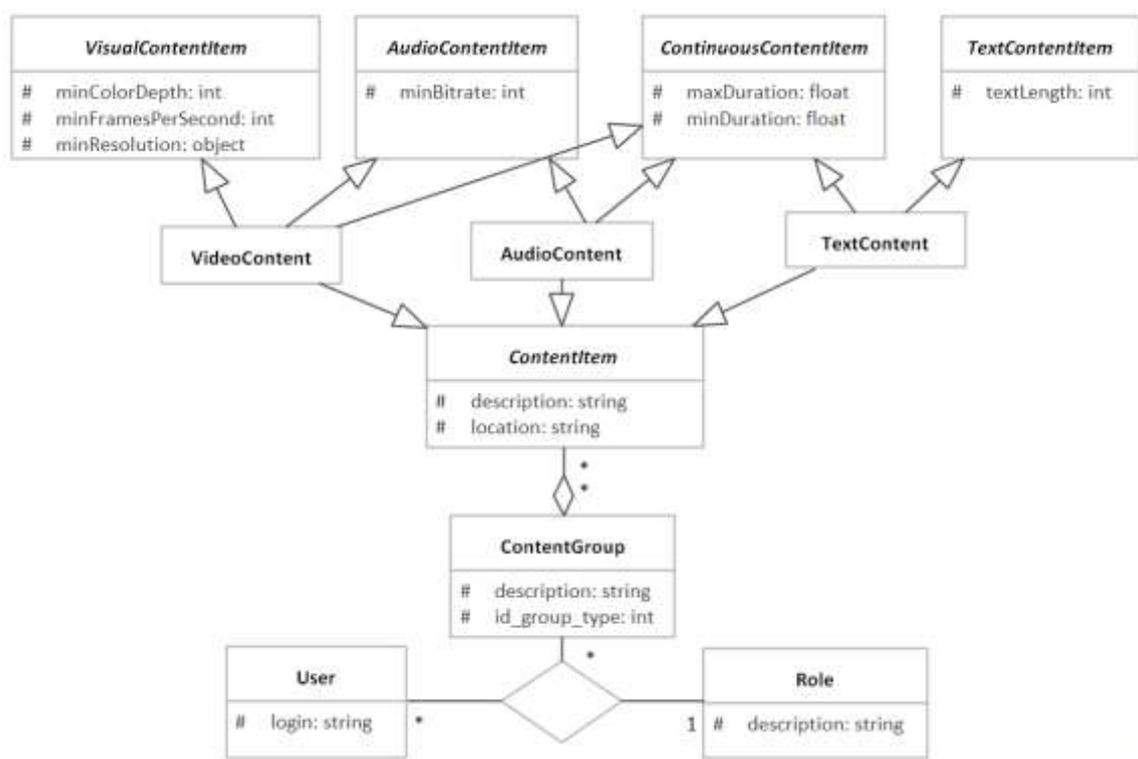


Рисунок 4 – Программные объекты, описывающие контент
 Figure 4 – Program entities, describing the content

Диспетчеризация представляет собой процесс распределения контента по клиентским устройствам. Диспетчеризация выполняется как в автоматическом режиме с учётом соответствия клиентских устройств необходимым требованиям для отображения контента и с применением правил, установленных диспетчером, так и вручную. Диаграмма прецедентов показана на Рисунке 5.

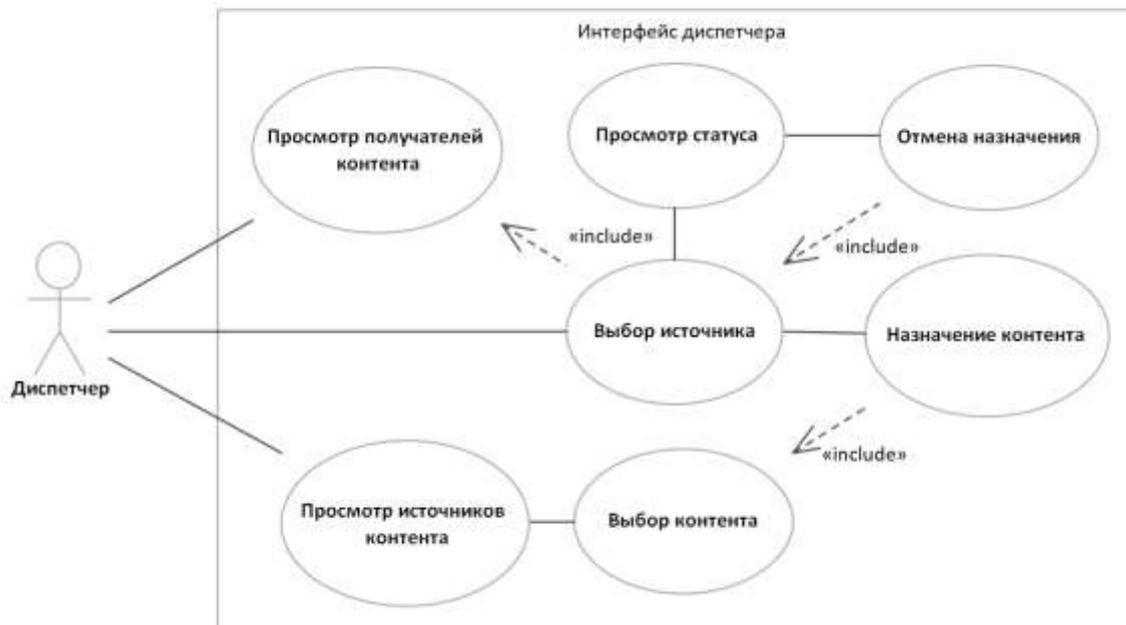


Рисунок 5 – Диаграмма прецедентов для диспетчера
Figure 5 – Use case diagram for dispatcher

Управление трансляциями выполняется с помощью создания и управления объектами Broadcast (Рисунок 6).

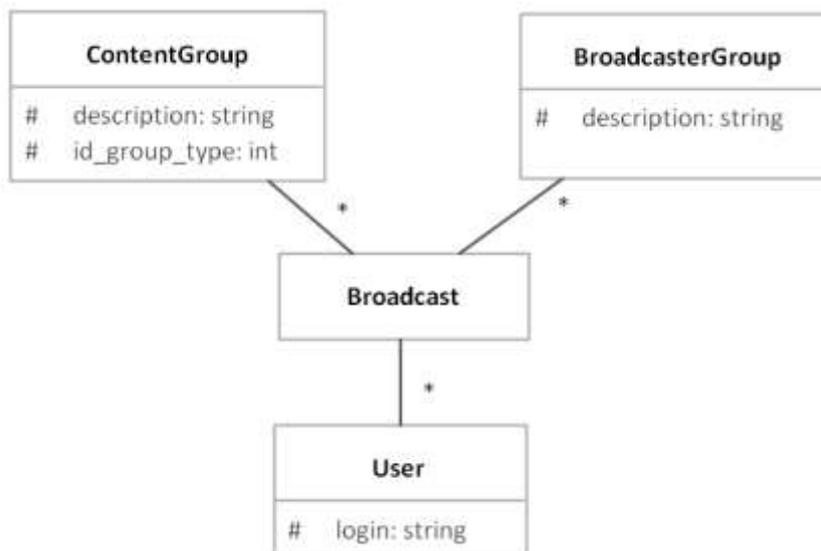


Рисунок 6 – Программные объекты диспетчеризации
Figure 6 – Dispatch program entities

При распределении контента по конечным устройствам необходимо учитывать совместимость контента и конечного устройства: конечное устройство должно поддерживать все модальности, которые включает контент, и обеспечивать возможность передачи данных в каждой модальности с качеством не хуже, чем заявлено в метаданных контента. Трансляция должна быть целевой, что обеспечивается назначением контента в соответствии с его метаданными в процессе диспетчеризации. Кроме того, в наличии у конечного устройства должно быть достаточное количество свободных ресурсов (каналов передачи данных).

Контент транслируется устройствами КФС, которые зарегистрированы в облачной системе как точки доступа. К подобным системам относятся цифровые вывески, телевизионные сети, в т. ч. системы корпоративного телевидения, сайты (отображение информационных и рекламных блоков), десктопные и мобильные приложения.

Управление устройствами и их свойствами выполняется менеджером. Диаграмма прецедентов для этого типа активности приведена на Рисунке 7, диаграмма классов – на Рисунке 8.



Рисунок 7 – Управление точкой доступа
Рисунок 7 – Access point control

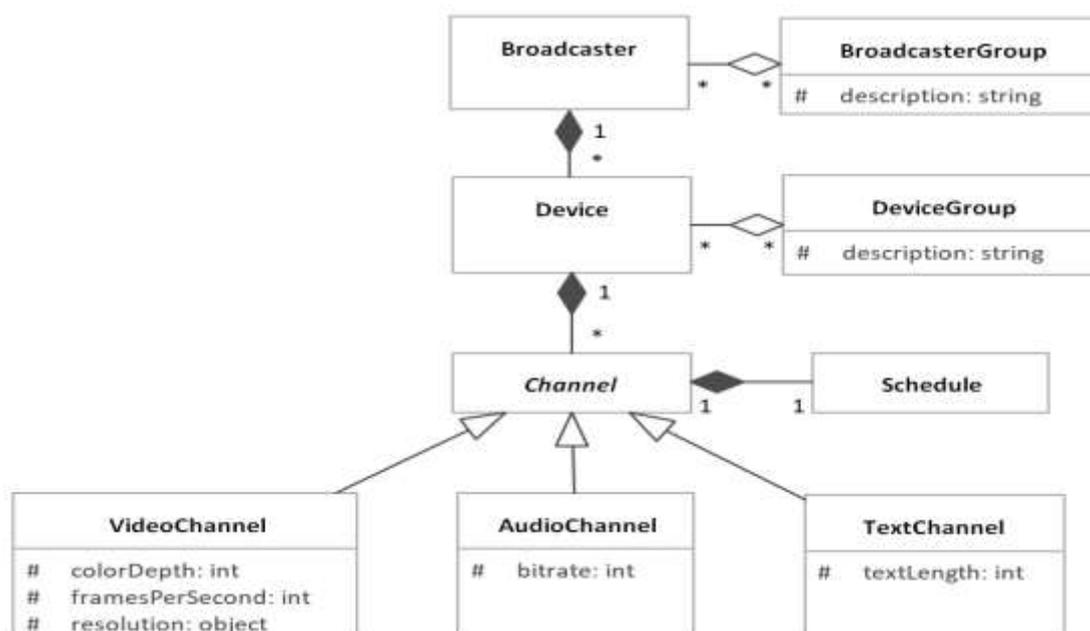


Рисунок 8 – Диаграмма классов для управления устройствами
Figure 8 – Class diagram for device management

Рассмотрим вопросы, связанные с реализацией такой системы. Вся система распределения контента разделяется на 3 группы компонентов (Рисунок 9):

1. Клиентская часть, содержащая внешние компоненты системы – роботы, клиентские станции, мобильные приложения пользователей и т. п. – компоненты, выполняющие получение контента.

2. Серверная часть, отвечающая за хранение и обработку данных сервисами – поставщиками контента.

3. Шина доступа к данным, которая представляет собой общий интерфейс («фасад») для обращения к сервисам со стороны клиентов и других сервисов. Как клиенты, так и сервисы не общаются напрямую между собой, а используют шину доступа. В рамках неё организуются вспомогательные сервисы – веб-сервис для скачивания веб-клиентов и сервис данных, предоставляющий общий API системы распределения контента.

Компоненты взаимодействуют между собой по сети, при этом запросы данных выполняется с помощью WSO2 Enterprise Integrator [20] – интеграционной платформы, представляющей компоненты в виде дата-сервисов и прокси-сервисов, для которых публикуются REST API. Отметим, что в отдельных случаях целесообразно взаимодействие, минуя шину: например, при передаче видеопотока peer-to-peer; при обращении сервиса к локальным данным; при взаимодействии микросервисов, если некоторый сервис строится как их комплекс.

В самом простом случае шина работает как прокси, но при этом имеет возможность присоединения дополнительной функциональности (например, преобразование входных и выходных данных, протоколирование, агрегирование запросов, назначение функций-триггеров, контроль доступности сервиса).

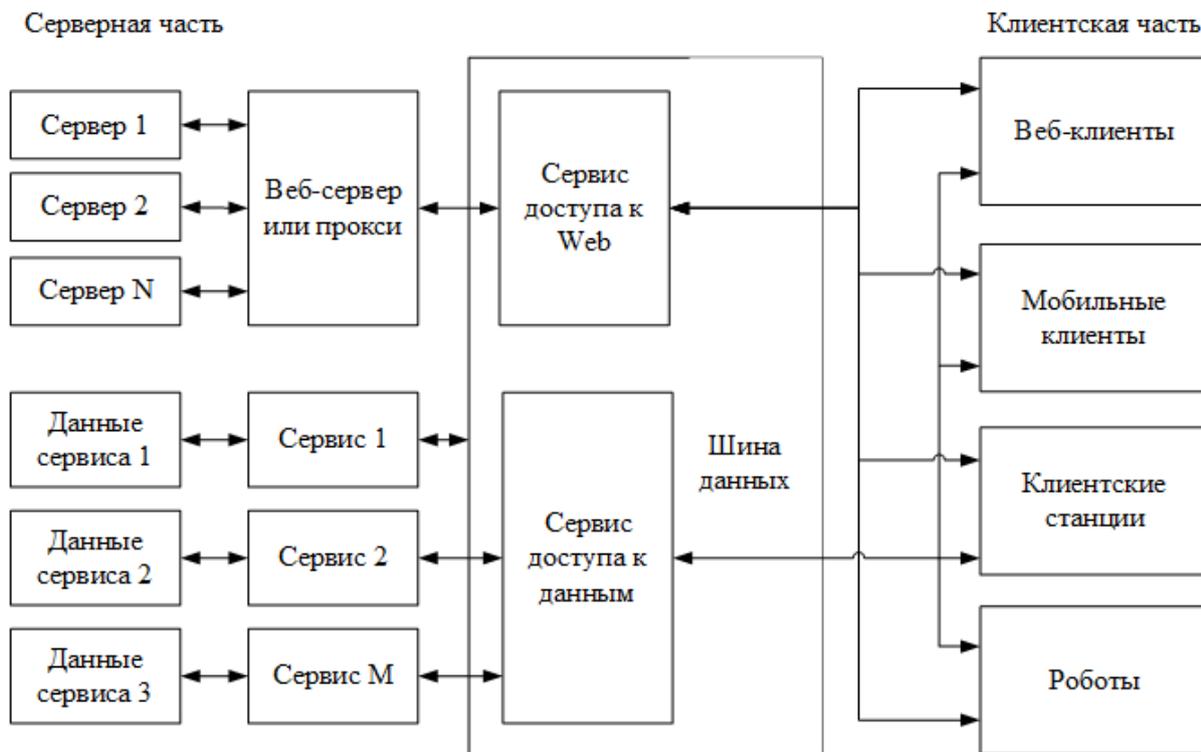


Рисунок 9 – Обобщённая архитектура системы распределения контента

Figure 9 – High-level architecture of content distribution system

Приведём список компонентов сервиса корпоративного телевидения (КТ) и охарактеризуем их связи между собой и с другими сервисами (Таблица).

Таблица – Компоненты сервиса КТ
Table – Corporate television service components

	Компонент, функции	Принимаемые данные	Отправляемые данные
КТ1	Веб-сервер, предоставляющий интерфейс экрана	КТ4: запрос интерфейса экрана	КТ4: веб-интерфейс экрана
КТ2	Веб-сервер, предоставляющий интерфейс пульта управления	КТ5: запрос интерфейса пульта	КТ5: веб-интерфейс пульта
КТ3	Управляющий сервер: - управление событиями трансляции - хранение контента - генерация контента с помощью других сервисов	КТ4: запросы к API КТ (передача состояния клиентской станции, запрос актуального расписания, контента, команд) КТ5: запросы к API КТ (запрос состояния станции, передача управляющих команд)	КТ4: контент для трансляции, управляющие команды (например, «следующий», «пауза») КТ5: состояние клиентской станции, доступные команды
КТ4	Клиентская станция	КТ1: веб-интерфейс экрана КТ3: контент для трансляции, управляющие команды	КТ1: запросы интерфейса экрана КТ3: запросы к API КТ (передача состояния клиентской станции, запрос актуального расписания, контента, команд)
КТ5	Управляющее приложение	КТ2: веб-интерфейс пульта КТ3: состояние клиентской станции, список доступных команд	КТ2: запросы интерфейса пульта КТ3: запрос состояния станции, передача команд пользователя

Архитектура сервиса КТ реализуется в рамках общей архитектуры, представленной на Рисунке 9, и изображена на Рисунке 10.

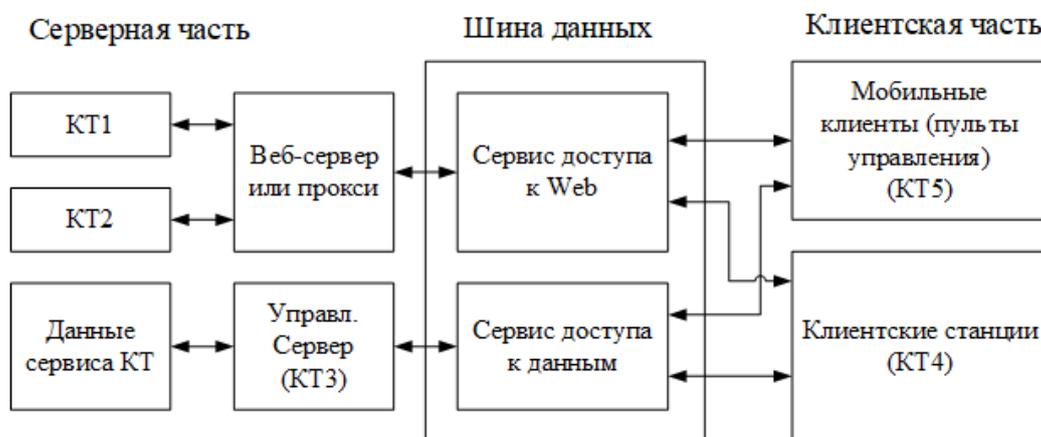


Рисунок 10 – Архитектура сервиса КТ
Рисунок 10 – Corporate television service architecture

Обсуждение

Приведённые модели позволяют сформировать образ системы доставки контента в киберфизическом окружении. Механизм диспетчеризации позволяет контролировать обеспечение качества обслуживания и корректно работать с различными типами контента и устройств, обеспечивая их совместимость.

Использование общей шины данных позволяет добиться следующих эффектов:

1. Отслеживание сбоев и перегрузок отдельных компонентов и оперативное реагирование на эти события с помощью механизма триггеров.

2. Протоколирование запросов, позволяющее выявить узкие места сервисов и оптимизировать процессы передачи данных при распределении контента.

3. Упрощение присоединения сторонних источников и получателей данных для системы распределения контента.

В рамках предложенной архитектуры могут быть использованы различные стеки технологий. Например, распределённые системы хранения данных, в частности, пиринговые сети [21], позволяют добиться ряда преимуществ в обеспечении устойчивости системы и экономии ресурсов её компонентов. В частности, к преимуществам относятся:

1. Экономное использование ресурсов хранилища: вместо контента достаточно хранить его метаданные.

2. Снижение нагрузки на сеть сервера в связи с тем, что файлы передаются из разных источников.

3. Более высокая устойчивость системы в силу того, что клиентские приложения могут загружать контент в случае временной недоступности сервера.

Заключение

Применение предложенного подхода при организации системы доставки контента как составной части киберфизического окружения предприятия позволяет сделать такую систему надёжной и гибкой с точки зрения интеграции с разнородными источниками и получателями данных, а также другими сервисами киберфизического окружения. Предложенные модели учитывают особенности управления многомодальным контентом.

Дальнейшие направления исследований включают в себя исследования методов интеграции с источниками данных различного типа, развитие методов управления многомодальным контентом и сценариев взаимодействия с пользователями, разработку подходов для интеграции с другими сервисами киберфизического окружения – например, сервисами локализации, навигации, идентификации, и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прищепа М.В., Ронжин А.Л. Модели интерактивного взаимодействия с подвижным информационно-навигационным комплексом. *Доклады ТУСУР*. 2013;2 (28).
2. Levonevskiy D., Vatamaniuk I., Saveliev A. Processing models for conflicting user requests in ubiquitous corporate smart spaces. *MATEC Web Conf. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings»*. 2018; 161(03006). DOI: 10.1051/mateccconf/201816103006.
3. Andreas H. Jucker, Heiko Hausendorf, Christa Dürscheid, Karina Frick, Christoph Hottiger, Wolfgang Kesselheim, Angelika Linke, Nathalie Meyer, Antonia Steger, Doing space in face-to-face interaction and on interactive multimodal platforms. *Journal of*

- Pragmatics*. 2018;134:85-101. ISSN 0378-2166, <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2018.07.001>.
4. Jucker A.H., Hausendorf H., Dürscheid C., Frick K., Hottiger C., Kesselheim W., ... & Steger A. Doing space in face-to-face interaction and on interactive multimodal platforms. *Journal of Pragmatic.*; 2018;134:85-101.
 5. Davies N., Clinch S., Alt F. Pervasive displays: understanding the future of digital signage. *Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing*. 2014;8(1):1-128.
 6. She J., Crowcroft J., Fu H., Ho P. H. Smart Signage: A draggable cyber-physical broadcast/multicast media system. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2013;1(2): 232-243.
 7. Fu H. Smart signage: a cyber-physical interactive display system for effective advertising. Dissertation. Hong Kong University of Science and Technology. 2013.
 8. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond (2016). *World Economic Forum*. 2017.
 9. Perera C., Liu C.H., Jayawardena S. The emerging internet of things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2015;3(4):585-598.
 10. Kim E., Lee H.J., Lee D.H., Jang U., Kim H.S., Cho K.S., Ryu W. Efficient contents sharing between digital signage system and mobile terminals. *Advanced Communication Technology (ICACT), 15th International Conference on. IEEE*. 2013:1002-1005.
 11. Meneguetto R.I., Boukerche A., Silva F.A., Villas L., Ruiz L.B., Loureiro A.A. A novel self-adaptive content delivery protocol for vehicular networks. *Ad Hoc Networks*. 2018; 73:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.02.005>.
 12. C.M. Silva, Silva F.A., Sarubbi J.F., Oliveira T.R., Meira Jr.W., Nogueira J.M.S. Designing mobile content delivery networks for the internet of vehicles. *Vehicular communications*. 2017;8:45-55. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2016.11.003>.
 13. Zheng Z., Zheng Z. Towards an improved heuristic genetic algorithm for static content delivery in cloud storage. *Computers & Electrical Engineering*. 2018;69:422-434. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.06.011>.
 14. Natalino C., Yayimli A., Wosinska L., Furdek M. Infrastructure upgrade framework for Content Delivery Networks robust to targeted attacks. *Optical Switching and Networking*. 2019; 31: 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2018.10.006>.
 15. Hashemi S.N.S., Bohlooli A. Analytical modeling of multi-source content delivery in information-centric networks. *Computer Networks*. 2018;140:152-162. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.05.007>.
 16. Liu Y., Yu S.Z. Network coding-based multisource content delivery in content centric networking. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;64:167-175. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.007>.
 17. Budkov V.Y., Prischepa M.V., Ronzhin A.L., Karpov A.A. Multimodal human-robot interaction. *2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE*. 2010:485-488.
 18. Левоневский Д.К., Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Многомодальная информационно-навигационная облачная система МИНОС для корпоративного киберфизического интеллектуального пространства. *Программная инженерия*. 2017;3: 120-128. DOI: 10.17587/prin.8.120-128.
 19. Vatamaniuk I., Levonevskiy D., Saveliev A., Denisov A. Scenarios of Multimodal Information Navigation Services for Users in Cyberphysical Environment. *Speech and Computer, 18 International Conference SPECOM 2016, Budapest, Hungary, August 23-27, 2016*, Springer International Publishing. 2016:588-595.

20. Sarwar G., Ullah F., Lee S. QoS and QoE Aware N-Screen Multicast Service. *Journal of Sensors*. 2016; 2016.
21. The WSO2 Integration Agile Platform – Overview. Режим доступа: <https://wso2.com/platform>. (Дата обращения 12 Декабря 2019).
22. Anjum N., Karamshuk D., Shikh-Bahaei M., Sastry N. Survey on peer-assisted content delivery networks. *Computer Networks*. 2017;116:79-95. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.02.008>.

REFERENCES

1. Prishhepa M.V., Ronzhin A.L. Models of interaction with mobile information-navigation complex. *Proceedings of TUSUR*. 2013;2 (28).
2. Levonevskiy D., Vatamaniuk I., Saveliev A. Processing models for conflicting user requests in ubiquitous corporate smart spaces. *MATEC Web Conf. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings»*. 2018; 161(03006). DOI: 10.1051/mateconf/201816103006.
3. Andreas H. Jucker, Heiko Hausendorf, Christa Dürscheid, Karina Frick, Christoph Hottiger, Wolfgang Kesselheim, Angelika Linke, Nathalie Meyer, Antonia Steger, Doing space in face-to-face interaction and on interactive multimodal platforms. *Journal of Pragmatics*. 2018;134:85-101. ISSN 0378-2166. <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2018.07.001>.
4. Jucker A.H., Hausendorf H., Dürscheid C., Frick K., Hottiger C., Kesselheim W., ... & Steger A. Doing space in face-to-face interaction and on interactive multimodal platforms. *Journal of Pragmatic.*; 2018;134:85-101.
5. Davies N., Clinch S., Alt F. Pervasive displays: understanding the future of digital signage. *Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing*. 2014;8(1):1-128.
6. She J., Crowcroft J., Fu H., Ho P. H. Smart Signage: A draggable cyber-physical broadcast/multicast media system. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2013;1(2):232-243.
7. Fu H. Smart signage: a cyber-physical interactive display system for effective advertising. Dissertation. Hong Kong University of Science and Technology. 2013.
8. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond (2016). *World Economic Forum*. 2017.
9. Perera C., Liu C.H., Jayawardena S. The emerging internet of things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2015;3(4):585-598.
10. Kim E., Lee H.J., Lee D.H., Jang U., Kim H.S., Cho K.S., Ryu W. Efficient contents sharing between digital signage system and mobile terminals. *Advanced Communication Technology (ICACT), 15th International Conference on. IEEE*. 2013:1002-1005.
11. Meneguetto R.I., Boukerche A., Silva F.A., Villas L., Ruiz L.B., Loureiro A.A. A novel self-adaptive content delivery protocol for vehicular networks. *Ad Hoc Networks*. 2018; 73: P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.02.005>.
12. C.M. Silva, Silva F.A., Sarubbi J.F., Oliveira T.R., Meira Jr.W., Nogueira J.M.S. Designing mobile content delivery networks for the internet of vehicles. *Vehicular communications*. 2017; 8: 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2016.11.003>.
13. Zheng Z., Zheng Z. Towards an improved heuristic genetic algorithm for static content delivery in cloud storage. *Computers & Electrical Engineering*. 2018;69:422-434. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.06.011>.
14. Natalino C., Yayimli A., Wosinska L., Furdek M. Infrastructure upgrade framework for Content Delivery Networks robust to targeted attacks. *Optical Switching and Networking*. 2019; 31: 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2018.10.006>.

15. Hashemi S.N.S., Bohlooli A. Analytical modeling of multi-source content delivery in information-centric networks. *Computer Networks*. 2018;140:152-162. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.05.007>.
16. Liu Y., Yu S.Z. Network coding-based multisource content delivery in content centric networking. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;64:167-175. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.007>.
17. Budkov V.Y., Prischepa M.V., Ronzhin A.L., Karpov A.A. Multimodal human-robot interaction. *2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. IEEE. 2010:485-488.
18. Levonevskiy D.K., Vatamaniuk I.V., Saveliev A.I. MINOS Multimodal Information and Navigation Cloud System for the Corporate Cyber-Physical Smart Space. *Software engineering*. 2017;3:120-128. DOI: 10.17587/prin.8.120-128.
19. Vatamaniuk I., Levonevskiy D., Saveliev A., Denisov A. Scenarios of Multimodal Information Navigation Services for Users in Cyberphysical Environment. *Speech and Computer, 18 International Conference SPECOM 2016, Budapest, Hungary, August 23-27, 2016*, Springer International Publishing. 2016:588-595.
20. Sarwar G., Ullah F., Lee S. QoS and QoE Aware N-Screen Multicast Service. *Journal of Sensors*. 2016;2016.
21. The WSO2 Integration Agile Platform – Overview. Режим доступа: <https://wso2.com/platform>. (Дата обращения 12 Декабря 2019).
22. Anjum N., Karamshuk D., Shikh-Bahaei M., Sastry N. Survey on peer-assisted content delivery networks. *Computer Networks*. 2017;116:79-95. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.02.008>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Левоневский Дмитрий Константинович, научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социоконвергентных систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация.
ORCID: [0000-0003-3994-2567](https://orcid.org/0000-0003-3994-2567)

Dmitriy K. Levonevskiy, Researcher at the Laboratory for Big Data Technologies of Sociocyberphysical Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation.