

ТУМАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н.А. Захаров (НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»)

Рассмотрено применение туманных вычислений на объектах промышленности. Показана трансформация информационной системы предприятия от традиционной пирамиды к сетевой структуре. Указаны отрасли, в которых туманные вычисления получили наиболее широкое распространение. Приведены примеры задач поддержки реального времени, управления конфигурацией, обеспечения безопасности.

Ключевые слова: туманные вычисления, облачные вычисления, Internet of Things, Industry 4.0, управление конфигурацией, супервизор конфигурации, распределенная система управления.

Введение

Облачные вычисления в настоящее время стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Насыщение различных устройств микропроцессорной техникой с сетевыми интерфейсами, появление Internet of Things (IoT) и Industrial Internet of Things (IIoT) привело к появлению туманных вычислений как результату развития облачных вычислений.

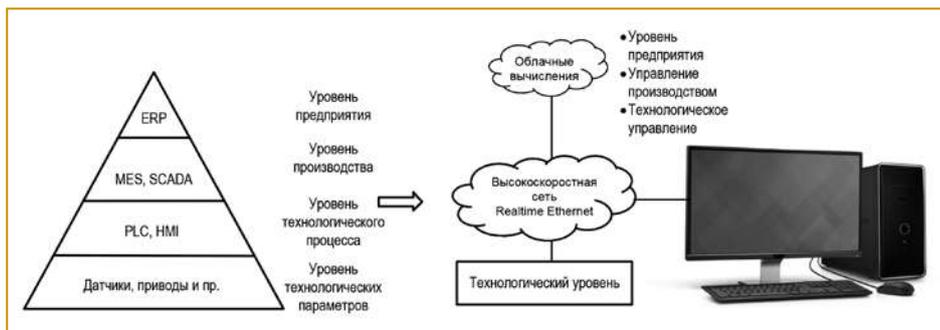
Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) определяет облачные вычисления как модель обеспечения удобного сетевого доступа по требованию к некоторому общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов (например, сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам — как вместе, так и по отдельности), которые могут быть оперативно предоставлены и освобождены с минимальными эксплуатационными затратами или обращениями к провайдеру [1]. Термин «облако» пришел из телефонии, где символ облака использовался на схемах для обозначения сети.

С развитием IoT объемы данных, генерируемых сетевыми устройствами, резко возросло. Обработка больших объемов данных стала одной из ключевых проблем при развертывании систем IoT. Традиционные облачные системы в приложениях IoT сталки-

ваются с большими масштабами и неоднородностью сетевой инфраструктуры, а также высокой задержкой передачи данных. Одним из решений является децентрализация приложений, управления и анализа данных в узлах отдельно взятой сети. Этот подход стал известен как туманные вычисления (fog computing).

Туманные вычисления это многоуровневая модель для обеспечения повсеместного доступа к общему континууму масштабируемых вычислительных ресурсов. Модель облегчает развертывание распределенных приложений и служб с задержкой и состоит из узлов (физических или виртуальных), расположенных между «интеллектуальными» конечными устройствами и централизованными (облачными) службами. Узлы являются контекстно-зависимыми и поддерживают общую систему управления данными и связи. Они могут быть организованы в кластеры либо вертикальные, либо горизонтальные, либо по времени обмена информацией между узлами и «интеллектуальными» оконечными устройствами. В туманных вычислениях минимизируется время запроса-ответа от/до поддерживаемых приложений, обеспечиваются требуемые для конечных устройств локальные вычислительные ресурсы и при необходимости сетевое подключение к централизованным службам [2]. Основной особенностью туманных вы-

числений является обработка данных в непосредственной близости от источников их получения без необходимости их передачи в крупные дата-центры только для того, чтобы их там обработать и передать результаты назад. Можно сказать, что туманные вычисления получаются при масштабировании технологии облачных вычислений и их переносе на уровень



Перемены в пирамиде автоматизации [3]

локальной сети. Отсюда становится ясным происхождение термина «туманные вычисления»: когда густое облако спускается с неба (от провайдера) на землю (на границу сети), получается туман.

Трансформация информационной системы предприятия

Развитие технологий на этапе Industry 4.0 характеризуется, в том числе интенсивным ростом объема обрабатываемых данных и развитием коммуникационных технологий. Перспективные коммуникационные технологии будут во многом опережать существующие, при этом ожидается [3]:

- передача больших объемов данных в реальном времени с минимальными задержками;
- подключение множества конечных устройств с обеспечением надежности соединения и безопасности данных;
- использование беспроводных технологий внутри технологических сетей и для удаленных подключений;
- внедрение энергоэффективных («зеленых») технологий.

Общеизвестно представление информационной системы предприятия в виде структурированной пирамиды с четко выделяемыми уровнями (левая часть рисунка).

В [3] утверждается, что в рамках концепции Industry 4.0 пирамида как таковая перестает существовать, в неизменном виде от нее останется только нижний уровень. Датчики и исполнительные механизмы, конечно, продолжат свое существование, но при этом они станут «интеллектуальными» и превратятся в полноценные узлы распределенных систем управления. Заявлен перенос расположенных на более высоких уровнях функций в высокопроизводительные серверы, расположенные в серверных кластерах, дата-центрах или в облаках.

Преимущество приведенной концепции по [3] заключается в заметном уменьшении объема распределенного оборудования, что упрощает управление и снижает затраты на обслуживание. Проблемы, препятствующие внедрению данного подхода, состоят в производительности, обеспечении функционирования в реальном времени, быстром сборе данных и коммуникации с серверами.

Отметим, что для решения задач управления технологическим процессом предпочтительно все задействованные вычислительные ресурсы располагать в локальной сети предприятия, то есть придерживаясь принятой терминологии — в тумане, поскольку зависимость формирования управляющего воздействия от внешних ресурсов и каналов связи с ними не приемлема с позиций качества регулирования и безопасности управления. Во внешнее облако допустимо выносить задачи, не требующие жесткого реального времени, решаемые на верхних уровнях классической пирамиды.

Современная тенденция к росту числа «интеллектуальных» устройств на предприятии требует обновления

принципов организации локальной сети, используемых топологий и протоколов. Связанный с увеличением числа абонентов сети рост затрат на монтаж и поддержку кабельного хозяйства требует унификации коммуникационных технологий и широкого внедрения беспроводных сетевых решений. Также возрастают требования к производительности сетевой инфраструктуры, поэтому ожидается отказ от полевых шин и максимальное внедрение проводных и беспроводных Ethernet-технологий с использованием IP протокола. Усложнение и укрупнение коммуникационных сетей влечет за собой наряду с общепринятыми топологиями «звезда», «кольцо», шина более интенсивное использование ячеистой топологии (mesh network).

Современные отраслевые применения

В [4] перечислен ряд отраслей, в которых на данный момент нашла свое применение технология туманных вычислений.

Горнодобывающая промышленность характеризуется капиталоемкостью и связана со многими рисками. Использование сетевых датчиков и технологий обработки данных поможет повысить производительность и снизить расходы. Также улучшаются возможности прогноза отказов оборудования и операционных расходов. Данные, собранные до начала работ, экономят деньги и время. Автономные экскаваторы и буровые установки, беспилотные транспортные средства представляют примеры модернизации горнодобывающей промышленности с использованием стандартов ПоТ. С угольной промышленностью и шахтным делом связаны риски таких событий, как оползни, удушье, выброс взрывоопасных газов и т.д. Использование сетей датчиков для сбора данных и своевременного оповещения персонала весьма полезно. Кроме того, применение технологии туманных вычислений в сети датчиков повышает точность. ПоТ в данной отрасли также улучшает техническое обслуживание оборудования и повышает энергоэффективность.

«Интеллектуальные» сети и электроэнергетика. «Интеллектуальная» сеть — это новый тип электрической сети, который стал актуальным в последнее десятилетие. Она охватывает возобновляемые источники энергии, «интеллектуальные» датчики и «интеллектуальных» потребителей. В традиционной электросети потребители получают электричество, и раз в месяц им выставляется счет. Однако с ростом уровня автоматизации и систем автономного электроснабжения, расширением ассортимента электрических устройств запросы потребителей стали весьма динамичными. Следовательно нужна двусторонняя коммуникация между поставщиком и потребителем электроэнергии, это лежит в основе концепции «интеллектуальной» сети.

В «интеллектуальной» сети энергия поставляется локальным распределительным компаниям, которые выглядят как микросети и поставляют электричество конечным пользователям. В целом концепция «интеллектуальных» сетей не ограничивается электро-

Наша главная задача - не заглядывать в туманную даль будущего, а действовать сейчас, в направлении, которое нам видно.

Уильям Ослер

энергетикой, телекоммуникационные операторы также задействованы в их создании, обеспечивая двусторонние коммуникации между поставщиками и «интеллектуальными» счетчиками потребителей. Поставщик электроэнергии получает данные о потреблении в реальном времени и в свою очередь дает обратную связь и предложения по оптимизации расходов потребителям и их устройствам.

Транспорт. Частью IoT являются «интеллектуальные» транспортные системы (ИТС). Для реализации ИТС на придорожных устройствах может быть развернута сеть туманных вычислений. Например, туман может поддерживать работу мультимедийных устройств в транспортных средствах, обеспечивать информирование водителей о дорожной обстановке, включая пробки и маршруты объезда, организовывать работу «интеллектуальной» парковки и «интеллектуальных» светофоров.

Сельское хозяйство. Очевидно, что сети датчиков будут играть ключевую роль в сельском хозяйстве. В ситуациях, когда нужна информация от различных датчиков, будут востребованы виртуальные датчики. Туманные вычисления могут быть использованы для поддержки работы беспилотных летательных аппаратов при посевных работах, мониторинге, обработке против вредителей.

Задачи в управлении технологическими процессами

В приведенных выше отраслевых применениях туманных вычислений рассматриваемая технология используется в режиме информационной поддержки персонала и локальной автоматизации технологического оборудования. Ее широкое внедрение собственно в автоматизацию технологических процессов требует решения ряда перечисленных ниже задач, связанных с обеспечением жесткого реального времени, организацией работы систем с резервированием, безопасностью.

Обеспечение реального времени

Для управления технологическим процессом коммуникационная сеть должна функционировать в реальном времени. Под работой в реальном времени понимается, что время доставки любого сообщения не превысит заданную заранее известную величину. Требование реального времени особенно критично, когда входящие в единый контур управления источник и приемник данных находятся в разных узлах сети, а в некоторых случаях и в разных ее сегментах. Прямолинейный подход к обеспечению реального времени состоит в увеличении пропускной способности сети, что естественным образом приводит к сокращению задержек и большей прогнозируемости максималь-

ного времени пересылки сообщения. Этого недостаточно, для поддержки реального времени сетевая инфраструктура должна поддерживать дополнительную функциональность, отсутствующую стандарту Ethernet. Перспективным является применение поверх Ethernet синхронно-временного протокола [5], отличающегося наличием строго выполняемого расписания обмена для каждого узла сети. Применение обмена по расписанию обеспечивает фиксированное время доставки каждого сообщения, а не только максимальное, то есть устраняет временную нестабильность (джиттер), негативно влияющую на устойчивость регулирования. Также возможно применение сетевых интерфейсов SERCOS (Serial Real-time Communication System), EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology — Beckhoff, Германия), протокола IEEE 1588.

В [6] отмечается, что ключевой идеей организации туманных вычислений реального времени является реализация хорошо специфицированного виртуального вычислительного ресурса, расположенного между программным обеспечением реального времени (ПО РВ) и аппаратной инфраструктурой, исполняющей программный код в рамках заданного интервала реального времени. Компоненты ПО РВ могут вызываться на исполнение в различных узлах доступной аппаратной инфраструктуры.

Управление конфигурацией

Туманные вычисления реализуются в системах, обладающих сетевой распределенной архитектурой, способной обеспечить высокий уровень аппаратной, программной, временной, коммуникационной и информационной избыточностью, которую можно использовать для повышения надежности и отказоустойчивости системы управления, а также для повышения точности и качества регулирования и управления. Большая пропускная способность каналов связи позволяет организовать единое информационное пространство для всех узлов распределенной системы, что позволяет нескольким узлам одновременно выполнять расчеты алгоритмов управления и передавать результаты в схемы мажоритарного голосования или агрегирования данных.

Назовем конфигурацией совокупность компонентов системы, обеспечивающих выполнение определенной функции. Конфигурация может обеспечивать как выполнение функции управления объектом, то есть заканчиваться расчетом выходного значения системы, так и выполнять промежуточные расчеты, определяющие значения параметров, необходимых для других конфигураций, например, рассчитывать наиболее достоверные значения входных параметров на основе показаний нескольких датчиков. Одна и та же функция в системе управления может реализовываться различными конфигурациями в зависимости от того, какие компоненты в данный момент времени являются исправными.

Для управления избыточностью в среде туманных вычислений использование супервизоров конфигура-

Заключение

ции [7, 8]. Под супервизорами конфигурации понимаются программные и аппаратные модули, используемые для мониторинга работоспособности своей конфигурации, участия в межузловом арбитраже для активизации своей конфигурации либо при победе в арбитраже, либо для параллельной работы вместе с другими конфигурациями на общий исполнительный элемент. Определение достоверности конфигурации на основе информации об исправности входящих в нее компонентов дополняется оценками достоверности работы конфигураций, формируемыми на основе анализа выходных данных конфигураций. Полученные оценки достоверности работы конфигураций используются в качестве обратной связи для получения оценок исправности образующих конфигурации компонентов. Подробно формализованная постановка задачи управления конфигурацией и алгоритмы ее решения приведены в [7, 8].

Частным случаем управления конфигурацией является управление сетевой инфраструктурой [9, 10]. В этом случае решается задача формирования расписания сетевого обмена, определения маршрутов, выбора участвующих в обмене устройств. Выдвигается приведенное выше требование обеспечения жесткого реального времени. Применяются эвристические алгоритмы и методы линейного программирования. Сетевая инфраструктура настраивается таким образом, чтобы удовлетворять временным ограничениям на скорость передачи данных конкретного объекта. Для отображения полученного расписания возможно использование диаграммы Ганта.

Вопросы безопасности

ПоТ может быть уязвим для атак, которые могут повлиять на доступность, конфиденциальность и целостность передаваемых или хранимых данных. Поэтому важной задачей IoT является обеспечение безопасности. Передача и хранение данных в условиях взаимодействия нескольких узлов и систем более подвержены взлому, чем в одной замкнутой системе. Особые сложности возникают в промышленных приложениях из-за чувствительности данных и возможности доступа к управлению оборудованием. Обычные меры безопасности проявляются в авторизации доступа к данным устройства определенному кругу лиц. Однако устройства IoT ограничены в ресурсах, что накладывает ограничения на методы аутентификации. Кроме того, данные, формируемые оборудованием в приложении ПоТ, должны быть защищены от любого несанкционированного вмешательства как на этапе пересылки, так и на этапе анализа.

Применение технологии туманных вычислений в управлении технологическим процессом является закономерным итогом развития распределенных систем управления, ПоТ, киберфизических систем и смежных дисциплин. В настоящее время наиболее широкое внедрение данная технология получила в системах, к которым не предъявляются требования жесткого реального времени. Имеются обширные теоретические проработки, касающиеся обеспечения реального времени, управления конфигурацией и реализации отказоустойчивости, оптимизации сетевой инфраструктуры. Для использования указанной технологии в системах ответственного применения требуют решения вопросы валидации, верификации и сертификации, рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

Список литературы

1. The NIST Definition of Cloud Computing. NIST, Special Publication 800–145. 2011. DOI: 10.6028/NIST.SP.800–145.
2. Fog Computing Conceptual Model. NIST Special Publication 500-325. 2018. DOI: 10.6028/NIST.SP.500-325.
3. *Лопухов И.* Коммуникационные технологии умного предприятия в рамках концепции Индустрия 4.0 и Интернета вещей // Современные технологии автоматизации. 2015. № 2. стр. 36–44.
4. *Mohammad Aazam, Sherali Zeadally and Khaled A. Harras.* Deploying Fog Computing in Industria Internet of Things and Industry 4.0 IEEE Transactions On Industrial Informatics, Vol. 14, №. 10. 2018.
5. *Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С.* Синхронно-временной протокол для распределенных систем управления // Автоматизация в промышленности. 2013. № 2. стр. 37–39.
6. *Kopetz H., Poledna S.* In-Vehicle Real-Time Fog Computing, 2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W). Toulouse. 2016. pp. 162-167.
7. *Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С.* Управление избыточностью сетевых распределенных систем необслуживаемой авионики // Авиакосмическое приборостроение. 2018 № 3. стр. 3–12.
8. *Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф.* Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. стр. 72–82.
9. *Pop, Paul & Raagaard, Michael & Gutierrez, Marina & Steiner. Wilfried.* Enabling Fog Computing for Industrial Automation Through Time-Sensitive Networking (TSN) // IEEE Communications Standards Magazine. 2018. 2. 55–61.
10. *Raagaard, Michael & Pop, Paul & Gutierrez, Marina & Steiner, Wilfried.* Runtime reconfiguration of time-sensitive networking (TSN) schedules for Fog Computing. 2017.

Захаров Николай Анатольевич — канд. техн. наук, начальник отдела, Научно-производственное подразделение «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ». Контактный телефон (495) 640-09-47. E-mail nazakharov@npp-dozor.ru