

УДК 517.977

ПРОБЛЕМА C^3 И КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

А.С. Матвеев

Санкт Петербургский государственный университет
Россия, 198504, Санкт Петербург, Университетский пр., 28
E-mail: almat1712@yahoo.com

Ключевые слова: управление; единая теория управления, связи и вычислений.

Аннотация: Потребности, вытекающие из логики развития киберфизических систем, были осознаны на рубеже тысячелетий как необходимость ориентированной на сетевые системы новой главы теории управления, в которой вопросы управления, коммуникации и вычислений изучаются в единстве и которую все чаще именуют «единой теорией управления, вычислений и связи» ($control \times computing \times communication = C^3$). С позиций теории управления это предполагает фокус на сетевых децентрализованных системах управления и решение задач их синтеза и анализа с учетом ограничений и неидеальностей применяемых систем связи и вычислительных модулей и с опорой на понятийные концепты, выработанные в теории информации и теории вычислений; репрезентативный C^3 -результат явно увязывает возможность и средства достижения определенной цели управления с характеристиками каналов связи и вычислительных модулей. Доклад предлагает краткий обзор относящихся к данной области математически строгих результатов, касающихся проблемы стабилизации сетевых систем с нетривиальной топологией информационных потоков при ограничениях на битовую пропускную способность каналов связи. Доклад предназначен для приглашенной сессии, "Киберфизические системы"

1. Введение

Литература по теории управления при ограничениях на пропускную способность каналов связи элементов системы в подавляющем большинстве случаев рассматривает сетевые системы простейшей топологии, например, состоящие из единственного контура обратной связи; с ее обзором можно ознакомиться в [1–6]. Такие исследования, однако, представляют собой лишь начальное приближение к ситуации, мотивирующей развитие теории C^3 и типичной для перспективных кибер-физических систем. Для них характерна намного более сложная топология сети с множественными распределенными в пространстве сенсорами, контроллерами и актуаторами, обменивающимися данными через неидеальную коммуникационную среду. Ее неидеальность может проявляться в том числе в виде конечной пропускной способности, нерегулярных и непредсказуемых запаздываний, конфликтов между передаваемыми пакетами, их искажениями, потерями и т.п.

Среди многоконтурных сетей наиболее исследован случай многосенсорных си-

стем с единым центром принятия решений; обзор соответствующей литературы доступен в [3, Sec. 3.1]. В частности, в [8] исследована линейная система, приводимая к вещественно-диагональной форме таким образом, что каждая связанная с этой формой мода либо не влияет на показания данного сенсора, либо полностью определяется из этих показаний, а также случай идеальных каналов связи ограниченной пропускной способности. Предложена схема управления, родственная по духу схеме кодирования Слепиана-Вольфа, и показано, что она обеспечивается устойчивостью замкнутой системы при определенных условиях на емкости каналов связи. В [9] получены необходимые и близкие к ним достаточные условия стабилизируемости многосенсорной системы в случае каналов связи с ограниченной пропускной способностью, задержками и потерями данных для достаточно общих, необязательно диагонализируемых линейных систем. В [10] исследована задача слияния данных от многих сенсоров в случае стохастической системы, эволюция состояния которой представляет собой вероятностный процесс Гаусса-Маркова. Случай сетевой системы с многими сенсорами и актуаторами, в которой каждый сенсор напрямую соединен с каждым актуатором идеальным каналом связи конечной и меняющейся во времени пропускной способности рассмотрен в [11] для линейной вещественно-диагонализируемой системы. Получены необходимые, а также достаточные условия стабилизируемости системы. В общем случае полученные необходимые условия не близки к достаточным; однако они близки в частном случае, когда система стабилизируема каждым отдельным актуатором и детектируема каждым отдельным сенсором [11]. Вопросы стабилизации линейных систем через переключательный канал связи бесконечной пропускной способности рассматривались, например, в [7, 12].

Далее проанализирована намного более общая ситуация сети произвольной топологии с множественными сенсорами, актуаторами и регуляторами в условиях разнообразных коммуникационных и вычислительных неидеальностей и ограничений.

2. Распределенная стабилизация многоагентных ансамблей линейных систем через коммуникационные сети ограниченной пропускной способности

Рассматривается сеть общей топологии, состоящая из распределенных в пространстве *элементов*. Каждый элемент наделен вычислительными способностями, которые используются для трансформации входящей информации в исходящие из элемента потоки данных. Некоторые элементы, именуемые *сенсорами*, способны наблюдать некоторый внешний (по отношению к сети) неустойчивый процесс. Другие элементы, именуемые *актуаторами*, способны непосредственно на него воздействовать. Остальные элементы функционируют в качестве промежуточных *регуляторов*, принимая участие в передаче данных и их обработке в целях итоговой децентрализованной и распределенной трансформации совокупности сенсорных данных в управляющие сигналы. Допускается произвольное сочетание функций сенсора, актуатора и регулятора у заданного элемента. Алгоритм обработки и трансформации данных для каждого элемента индивидуален и подлежит построению. Цель заключается в выборе такой системы алгоритмов, которая делает замкнутую систему устойчивой.

Эта система образована внешним процессом и взаимодействующими с ним элементами, которые также взаимодействуют друг с другом.

Предполагается, что сеть задана, то есть указано, от каких элементов каким другим элементам передается информация, при каких ограничениях и каким образом. При этом учитывается ограниченная пропускная способность канала, возможность задержки, потери и искажения передаваемого пакета, а также их интерференции и конфликта. В результате данные, полученные отдельным элементом, могут оказаться достаточно сложной функцией пакетов, отправленных сразу несколькими элементами. Рассматривается случай произвольной топологии каналов связи. Более того, предполагается, что эта топология может динамически изменяться авторизованными элементами. Простейший пример — переключение канала связи от обслуживания одной пары абонентов на обслуживание другой пары. Предложена детерминированная математическая модель обсуждаемой сети в форме специальной динамической системы с дискретным временем и входами и выходами. Отдельные аспекты модели проиллюстрированы примерами.

Рассмотрен случай, когда на алгоритмы обработки информации, допустимые к использованию регуляторами, наложены произвольные ограничения. Они могут касаться объема памяти, номенклатуры выполнимых операций, скорости процессора и др. Не исключен случай, когда допустим единственный алгоритм; это означает, что соответствующий регулятор задан условиями задачи. Примером может служить переключательный канал связи с априори заданным протоколом переключения. Вместе с тем основной результат работы предполагает, что сенсоры и актуаторы допускают применение произвольных каузальных алгоритмов.

Предполагается, что внешний процесс, сенсоры и влияние актуаторов описываются стандартной линейной моделью в дискретном времени с ограниченным и неизвестным аддитивными помехами. Процесс предполагается полностью детектируемым всей совокупностью сенсоров, однако каждый отдельный сенсор может иметь нетривиальное недетектируемое подпространство. Аналогично, процесс стабилизируем всей совокупностью актуаторов, однако каждый отдельный актуатор может иметь нестабилизируемые им неустойчивые моды.

Задача заключается в выявлении условий, при которых элементы могут быть снабжены такими допустимыми алгоритмами работы, что замкнутая система управления оказывается устойчивой. При выполнении этих условий требуется предъявить эти алгоритмы явным образом.

В работе получено решение указанных задач, причем решение первой из них дано в виде математически строгой теоремы. Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что по модулю классической линейной теории управления, проблема в основной части сводится к долговременной стандартной задаче многотерминальной теории информации и связи: нахождению так называемой области пропускных способностей (capacity domain) коммуникационной сети, одновременно обслуживающей несколько пар абонентов, а также построению блочных кодов, обеспечивающих передачу данных на скоростях из этой области. Упомянутая область состоит из наборов, компоненты которых находятся во взаимно-однозначном соответствии с парами абонентов сети и имеют смысл средней битовой скорости, на которой возможна передача данных между этими абонентами при условии одновременного отслеживания всех пар. Установленные условия стабилизируемости "необходимы и почти достаточны": если необходимые условия требуют, чтобы определенный вектор, характеризующих

степень неустойчивости внешнего процесса, принадлежал обсуждаемой области, то достаточные условия состоят в принадлежности этого вектора внутренности этой области. Предложенный синтез стабилизирующей распределенной стратегии управления сетью конструктивен по модулю построения блочного кода.

Используемая основными результатами область пропускных способностей характеризует коммуникационную сеть N_+ , которая строится на основе исходной сети N из постановки задачи и наследует все ее ограничения и неидеальности. Пары абонентов сети N_+ связаны с неустойчивыми модами внешнего процесса, а их локации в сети генерируются определенным образом исходя из, во первых, расположения сенсоров и актуаторов в исходной сети и, во вторых, наблюдаемости/ненаблюдаемости и управляемости/неуправляемости данной моды сенсором или актуатором, соответственно. Кроме того в N_+ явным образом учитывается феномен неявной передачи информации от актуатора любому сенсору, который способен наблюдать последствия управляющего воздействия данного актуатора. Более формально, N_+ получается добавлением к N новых узлов и каналов бесконечной пропускной способности. С каждой неустойчивой модой внешнего процесса связывается два новых узла: передающий и принимающий. Новые каналы подразделяются на три типа. Каналы первого типа идут от каждого актуатора ко всем сенсором, на показания которых он влияет. Каналы второго типа выходят из передающих узлов неустойчивых мод, каждый из них передает из соответствующего узла общий пакет всем сенсорам, которые наблюдают данную моду. Каналы третьего типа передают данные от актуаторов принимающим узлам неустойчивых мод. Данные в каждый узел поступают от всех актуаторов, которые влияют на соответствующую моду, причем в процессе передачи данные от таких актуаторов подвергаются аддитивной интерференции. В этих узлах допустимые алгоритмы декодирования сведены к простому проектированию вещественного сигнала на целочисленную решетку (простому квантованию). Область пропускных способностей, используемая в основных результатах, отвечает на вопрос: с какой средней скоростью (в bits/sec) можно передавать информацию из каждого нового передающего узла в соответствующий принимающий узел при условии, что все такие пары обслуживаются одновременно.

Основной результат, касающийся сетевой системы общей топологии, проиллюстрирован примерами.

3. Заключение

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17-08-00715).

Список литературы

1. Nair G., Fagnani F., Zampieri S., Evans R. Feedback control under data rate constraints: an overview // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95. P. 108-137.
2. Baillieul J., Antsaklis P. Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems // Proceedings of the IEEE. Special issue. 2007. Vol. 95. No. 1.
3. Matveev A.S., Savkin A.V. Estimation and control over communication networks. Boston.: Birkhäuser, 2009, 533 p.

4. Андриевский Б.Р., Матвеев А.С., Фрадков А.Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи // Автоматика и телемеханика. 2010. Выпуск 4. С. 34-99.
5. Zhang X., Han Q., Yu X. Survey on Recent Advances in Networked Control Systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2016. Vol. 12. No. 5. P. 1740-1752.
6. Zhang D., Shi P., Wang Q., Yua L. Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges // ISA Transactions. 2017. Vol. 66. P. 376-392.
7. Hristu D., Morgansen K. Limited Communication Control // Systems and Control Letters. 1999. Vol. 37. P. 193-205.
8. Tatikonda S. Some scaling properties of large distributed control systems // Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Maui, HI, 9-12 December 2003. P. 3142-3147.
9. Matveev A.S., Savkin A.V. Multi-rate stabilization of linear multiple sensor systems via limited capacity communication channels // SIAM Journal on Control and Optimization. 2005. Vol. 44, No. 2. P. 584-618.
10. La Scala B., Evans R. Minimum Necessary Data Rates for Accurate Track Fusion // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference ECC 2005. Seville, Spain, 12-15 December 2005. P. 6966-6971.
11. Nair G., Evans R., Caines P. Stabilizing decentralized linear systems under data rate constraints // Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Atlantis, Bahamas, 14-17 December 2004. P. 3992-3997.
12. Ishii H., Francis B. Limited Data Rate in Control Systems with Networks. Berlin: Springer, 2002, 168 p.