УДК 004.622

О РАСЧЕТЕ ЛИНЕЙНЫХ ОГИБАЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Байбулатов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: bajbulatov@mail.ru

В.Г. Промыслов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: v1925@mail.ru

Д.Б. Майстренко
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: maistrenkodaria@mail.ru

Ключевые слова: поток данных, сетевое исчисление, Network calculus, огибающая, линейные огибающие на отрезке, промышленная система управления.

Аннотация: Рассмотрена проблема расчета огибающих информационных потоков промышленных систем управления в задачах сетевого исчисления. Введено понятие огибающих на отрезке и выделено их линейное представление. Раскрыты преимущества линейных огибающих на отрезке перед классическими огибающими и проанализирован алгоритм их расчета. Приведены результаты сравнительного анализа линейных огибающих на отрезке и классической минимальной огибающей, построенных для потоков, подчиняющихся заданным статистическим распределениям. Сделаны выводы о возможности применения линейных огибающих на отрезке в приложениях промышленных систем управления.

1. Введение

Современные промышленные системы управления подвержены высокой информационной нагрузке; так, АСУТП АЭС обрабатывают десятки тысяч аварийных, предупредительных и информационных сигналов и тысячи команд управления. Значительные времен*ы*е задержки передачи такой информации недопустимы, поскольку могут приводить к аварийным ситуациям. Для оценки времени прохождения команд управления и отображения сигнализации необходимы знания о характеристиках соответствующих информационных потоков.

Теория массового обслуживания и теория детерминированных систем с очередями Network calculus, или сетевое исчисление, оперируют понятиями потоков данных и могут использоваться для оценки времен*ы*х показателей. Для промышленных систем управления, подчиняющихся жестким времен*ы*м требованиям, более предпочтительным оказывается подход сетевого исчисления, поскольку он дает наихудшие, а не статистические, результаты [1].

Характеристики потоков в сетевом исчислении определяются детерминированным образом на основе кумулятивных функций и называются огибающими. Понятие огибающей Network calculus двойственно, поскольку может использоваться как для описания заданных ограничений на потоки, так и для прогноза характеристик потоков на будущее на основе экспериментальных данных [2]. При этом проблемы расчета огибающих по данным измерений исследованы недостаточно.

Для решения задач прогноза ограничений потоков данных и дальнейшей оценки временн*ы*х показателей в сетевом исчислении могут использоваться несколько видов огибающих. Классическая минимальная огибающая [3] дает решение проблемы в общем случае. Однако на практике она неудобна и поэтому обычно аппроксимируется кусочно-заданными функциями, среди которых наиболее популярна кусочно-линейная аппроксимация [4]. Еще более удобна в применении аппроксимация минимальной огибающей одной или двумя аффинными функциями, которые могут быть построены на основе минимальной огибающей с помощью регрессии по опорным векторам [5].

Важный вопрос, который возникает при практическом использовании огибающих в задачах сетевого исчисления, заключается в оценке вычислительной сложности их расчета, поскольку расчет огибающих – довольно ресурсоемкая задача. Действительно, классическая минимальная огибающая обладает высокой вычислительной сложностью $\mathrm{O}(N^2)$ в пространстве $\mathrm{O}(T)$, где N – суммарное количество пакетов потока, T – общее количество меток времени [6]. Аппроксимация минимальной огибающей линейными функциями требует дополнительных вычислений, поэтому еще более увеличивает сложность. В частности, расчет линейных огибающих методом опорных векторов имеет вычислительную сложность $\mathrm{O}(N^2)$.

Другой недостаток минимальной и построенных на ее основе огибающих заключается в том, что при их использовании должно выполняться предположение, что наихудшая реализация потока, т.е., наибольшие всплеск и скорость, уже была зафиксирована и содержится в исторических данных.

Возвращаясь к промышленным системам управления, работающим по жестким временн*ы*м требованиям в режиме реального времени, можно заключить, что отмеченные выше недостатки классической минимальной огибающей, а также линейных огибающих, построенных на ее основе, затрудняют их использование для оценки временн*ы*х показателей таких систем.

2. Огибающие на отрезке

2.1. Определение и свойства

Для решения практических задач оценки временн*ы*х показателей систем управления реального времени может быть полезно обобщение понятия огибающей на конечные интервалы времени, или отрезки. Огибающие на отрезке [7] – это пара огибающих, которые ограничивают кумулятивную функцию входящего потока с двух сторон: нижняя огибающая – снизу, а верхняя – сверху. Огибающие на отрезке рассчитываются непосредственно по кумулятивной функции входящего потока без использования минимальной огибающей. По определению поток называется ограниченным на отрезке $[t_1, t_2]$, если

(1) $$E_l(t_2' - t_1') \le A(t_2') - A(t_1') \le E_u(t_2' - t_1'),\ \ \forall t_1 \le t_1' \le t_2' \le t_2,$$

где $A(t)$ – кумулятивная функция входящего потока, $E_l(t)$ – нижняя и $E_u(t)$ – верхняя огибающие.

Как следует из названия и определения (1), огибающие на отрезке действительны только на некотором отрезке времени, а при дальнейшем наблюдении, на следующем отрезке, они должны задаваться вновь, при этом расчету подлежат как значения прямых в начальной точке отрезка t_1, так и в конечной t_2. Из этого очевидно, что объединение огибающих на отрезке для полного времени наблюдения не является кусочно-заданной функцией: на границах отрезков происходит разрыв функций $E_l(t)$ и $E_u(t)$.

Важное преимущество огибающих на отрезке заключается в том, что в соответствии с определением (1) они могут использоваться для быстрого «на лету» нахождения ограничений на потоки.

Однако при расчете огибающих на отрезке в общем виде вычислительная сложность получается сравнительно высокой: для (n+1)-го пакета требуется $O(n)$ вычислений, где n – текущее количество пакетов потока. При росте n, т.е. при длительном наблюдении, вычислительные затраты будут ощутимыми. Поэтому использование огибающих на отрезке общего вида в системах управления реального времени затруднительно.

Линейные огибающие на отрезке: аффинная функция (2) в качестве верхней огибающей и функция «скорость-задержка» (3) в качестве нижней позволяют снизить вычислительную сложность [7]. При этом угловой коэффициент k обеих прямых должен быть одинаков, а параметры b – «всплеск» и T – «задержка» должны быть постоянными:

(2) $$E_u(t) = kt + b,$$

(3) $$E_l(t) = k(t - T).$$

При такой постановке задача расчета огибающих на отрезке сводится к нахождению углового коэффициента k прямых (2) и (3), вычисления не учитывают прошлые данные, и их сложность сокращается до $O(1)$.

Одно из достоинств линейных огибающих на отрезке (2) и (3) заключается в том, что для расчета их углового коэффициента можно реализовать алгоритм без обращения к предыстории, последовательно используя входные данные только текущих наблюдений в том порядке, в котором они поступают в систему (иногда подобные алгоритмы называют онлайн-алгоритмами). Поэтому угловой коэффициент k линейных огибающих на отрезке может быть рассчитан быстро «на лету» при наблюдении за потоком в реальном времени.

2.2. Алгоритм

Основные идеи алгоритма расчета углового коэффициента k прямых (2) и (3) заключаются в следующем.

Вначале наблюдения параметры «всплеска» b и «задержки» T подбираются исходя из характеристик исследуемого потока и фиксируются на все время работы алгоритма. На первом шаге задается начальное значение углового коэффициента, которое обычно определяется, как скорость потока на промежутке времени от начала наблюдения до первой точки измерений.

В процессе наблюдения за потоком в реальном времени работа алгоритма имеет циклический характер. Вначале каждого цикла предполагается, что поток ограничен прямыми (2) и (3) с текущим значением углового коэффициента. Далее определяются два ключевых пакета: первый исходящий пакет – это первый пакет, который нарушил ограничения, и критический пакет – это пакет, предыдущий первому исходящему. Новое значение углового коэффициента рассчитывается как наклон прямой, проведенной между критическим и первым исходящим пакетами. После расчета углового коэффициента циклическая часть алгоритма повторяется.

Говорят, что алгоритм сходится, если в процессе его работы найдено некоторое значение углового коэффициента k, с которым поток становится ограниченным прямыми (2) и (3), и дальнейшее выполнение алгоритма не приводит к расчету нового значения углового коэффициента [7].

2.3. Применение

Таким образом, основные преимущества линейных огибающих на отрезке: возможность их быстрого «на лету» расчета при постоянной сложности и независимость от исторических данных делают их удобными для применения в задачах оценки временн*ы*х показателей систем управления реального времени.

Однако при использовании линейных огибающих на отрезке возникает вопрос, насколько правомерна замена ими классической минимальной огибающей, т.е. как сильно ограничения потоков линейными огибающими на отрезке отличаются от ограничений классической минимальной огибающей.

3. Экспериментальное исследование линейных огибающих на отрезке для потоков заданных распределений

Для ответа на вопрос о правомерности использования линейных огибающих на отрезке было проведено исследование потоков данных на экспериментальной клиент-серверной установке. Каждый поток рассматривался как последовательность сообщений размера некоторого количества байт, поступающих через некоторые интервалы времени.

Были смоделированы и исследованы два вида потоков:

- сообщения переменного размера поступают через равные интервалы времени, при этом размеры сообщений подчиняются заданным статистическим распределениям: равномерному, Пуассона, Коши, Парето;
- сообщения постоянного размера поступают через переменные интервалы времени, при этом длительности этих интервалов подчиняются заданным распределениям: равномерному, экспоненциальному, Коши, Парето.

В работе использовался вышеизложенный алгоритм: были подобраны параметры b и T и найдены быстро «на лету» линейные огибающие на отрезке для всех вышеперечисленных потоков.

В результате исследования было выявлено, что параметры линейных огибающих на отрезке b и T не оказывают существенного влияния на работу алгоритма, а задают ширину полосы между огибающими.

Для определения насколько близки ограничения потоков линейными огибающими на отрезке к ограничениям, задаваемым классической минимальной огибающей, было проведено сравнение площадей под верхней линейной огибающей на отрезке и под минимальной огибающей для всех исследуемых потоков. В результате было выявлено, что верхняя линейная огибающая на отрезке располагается наиболее близко к классической минимальной огибающей для потока, интервалы между сообщениями которого подчиняются распределению Коши. Также огибающие довольно близки для потока, интервалы между сообщениями которого распределены равномерно, и для потока, длины сообщений которого подчиняются равномерному распределению. Таким образом, огибающие близки для потоков, которые лишены больших всплесков. Поэтому для указанных потоков замена классической минимальной огибающей на линейные огибающие на отрезке будет заведомо правомерной.

4. Заключение

При решении задач сетевого исчисления для промышленных систем управления знание огибающих информационных потоков позволяет проводить оценку критически важных временных показателей, связанных с передачей команд управления и отображением сигнализации.

Применение классической минимальной огибающей в большинстве случаев оказывается неудобным и неоправданно ресурсоемким по объему необходимых вычислений. Удобные в применении линейные огибающие, построенные на основе минимальной, приводят к дополнительной сложности. Более того, использование таких огибающих основано на предположение о возможной наихудшей предыстории потока.

Огибающие на отрезке представляют актуальный подход к оценке ограничений информационных потоков и временных показателей в промышленных системах управления. Они рассчитываются без использования минимальной огибающей и поэтому лишены ее недостатков.

Расчет огибающих на отрезке в общем виде требует $O(N)$ вычислений. Но в случае линейных огибающих вычислительная сложность постоянна и не зависит от продолжительности наблюдения за потоком и его предыстории.

Применение линейных огибающих на отрезке наиболее оправдано для потоков, которые лишены больших всплесков.

Дальнейшие исследования линейных огибающих на отрезке могут быть направлены на повышение скорости сходимости алгоритма их расчета.

Список литературы

1. Байбулатов А.А. От теории очередей к сетевому исчислению: исторический обзор // Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD’2018. Москва, 1-3 октября 2018 г. М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 411-421.
2. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. Об ограничениях входящих потоков в сетях передачи и обработки данных систем управления // Труды 16-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2023. Волгоград, 11-15 сентября 2023 г. Волгоград: ВолгГТУ, 2023. Т. 2. С. 179-181.
3. Le Boudec J.-Y., Thiran P. Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Online Version of the Book Springer Verlag, LNCS 2050, 2022. 265 p.
4. Funda Ch. Arrival- and service-curve estimation methods from measurements to analyze and design soft real-time streaming systems with network calculus // Preprint. TechRxiv, 2022. https://doi.org/10.36227/techrxiv.21776816.v1 (дата обращения 27.11.2023).
5. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. Аппроксимация огибающей в приложениях «Network calculus» // Проблемы управления. 2016. № 6. С. 59-64.
6. Байбулатов А.А. О расчете огибающих входящих потоков для объектов повышенной опасности // Труды 16-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD’2023. Москва, 26-28 сентября 2023 г. М.: ИПУ РАН, 2023. С. 1178-1183.
7. Bouillard A. Algorithms and efficiency of Network calculus. Paris, France, 2014. 56 p.