

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/45-188

Ссылка для цитирования этой статьи:

Муравьев О.Е., Дурейкин Д.Б., Ремизов М.Р. Беспроводная сеть датчиков и теория систем для компьютерных сетей // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2024. № 1

УДК 004.738:621.396

DOI:10.24412/2541-9269-2024-1-26-32

БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ ДАТЧИКОВ И ТЕОРИЯ СИСТЕМ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Муравьев О.Е., Дурейкин Д.Б., Ремизов М.Р.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, ieei_director@mail.ru

WIRELESS SENSOR NETWORK AND THEORY OF SYSTEMS FOR COMPUTER NETWORKS

O.E. Muraviov, D.B. Dureykin, M.R. Remizov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Russia, Saratov, ieei_director@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен подход к описанию моделей беспроводных сетей датчиков (БСД), основанный на использовании теории сетевого компьютерного исчисления. Показано, что данный подход может с успехом использоваться при описании нелинейных БСД. Дан пример такого описания.

Ключевые слова: беспроводная сеть датчиков, компьютерная сеть, электронная схема, кривая обслуживания.

Abstract. An approach to the description of models of wireless sensor networks (WSN) based on the theory of network computer calculus is considered. It is shown that this approach can be successfully used to describe non-linear WSNs. An example of such a description is given.

Keywords: wireless sensor network, computer network, electronic circuit, service curve.

Беспроводная сеть датчиков (БСД) может описываться в терминах теории детерминированных систем массового обслуживания, используемой для характеристики компьютерных сетей [1]. Подобное описание также можно рассматривать как теорию систем, применимую к компьютерным сетям [2]. Основное отличие от традиционной теории систем, как той, которая была так успешно применена для проектирования электронных схем, заключается в том, что здесь рассматривается другая алгебра, в которой операции меняются следующим образом: сложение становится вычислением минимума, умножение — сложением.

В этой работе устанавливаются и иллюстрируются некоторые аналогии и различия между теорией систем, условно называемой «поиск минимума – сложение» (ПМС, *min-plus*) и применяемой к сетям связи, и традиционной теорией систем, используемой, например, при исследовании электронных схем.

Начнем с простейшей схемы, такой как RC -цепь, представленной на рис. 1. Если входным сигналом является напряжение $x(t) \in \mathfrak{R}$ (\mathfrak{R} — пространство действительных чисел), то выход $y(t) \in \mathfrak{R}$ этой простой схемы представляет собой свертку x с импульсной характеристикой этой схемы, которая для приводимого

примера (рис. 1) [3] равна $h(t) = \frac{1}{R_0 C} e^{-\frac{t}{R_0 C}}$ для $t \geq 0$:

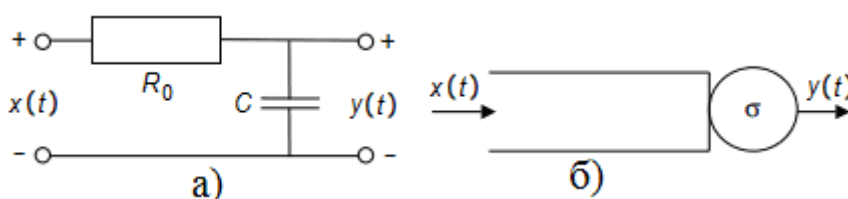


Рис. 1. RC -цепь а) и жадный формирователь б), представляющие две элементарные линейные системы в их соответствующих алгебраических структурах

$$y(t) = (h \otimes x)(t) = \int_0^t h(t-s)x(s)ds, \quad (1)$$

где: t — время наблюдения; x, y — сигналы; R_0, C — параметры RC -цепи.

Рассмотрим теперь узел сети связи, который в идеале является «жадным» формирователем. Жадный формирователь — это устройство, которое заставляет входной поток $x(t)$ формировать выходной поток $y(t)$, соответствующим заданному набору скоростей в соответствии с огибающей трафика σ (кривая формирования) [4], за счет возможной задержки битов в буфере. Здесь входные и выходные «сигналы» представляют собой совокупный поток, определяемый как количество битов, отображаемых в потоке данных за интервал времени $[0, t]$. Эти функции — неубывающие во времени t . Параметр t может быть непрерывным или дискретным. Несложно показать [4], что $x(t)$ и $y(t)$ связаны между собой соотношением:

$$y(t) = (\sigma \otimes x)(t) = \inf_{0 \leq s \leq t, s \in \mathfrak{R}} \{\sigma(t-s) + x(s)\}. \quad (2)$$

Это соотношение определяет ПМС свертку между σ и x .

Свертка в традиционной теории систем является как коммутативной, так и ассоциативной, и это свойство позволяет легко расширить анализ электрических схем от малых до крупномасштабных. Например, импульсная характеристика схемы на рис. 2, а представляет собой свертку импульсных характеристик каждой из элементарных ячеек с импульсными характеристиками $h_1(t)$ и $h_{21}(t)$:

$$y(t) = (h_1 \otimes h_2)(t) = \int_0^t h_1(t-s)h_2(s)ds, \quad (3)$$

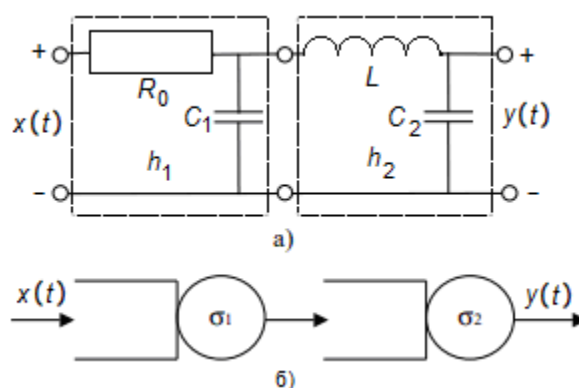


Рис. 2. Импульсная характеристика объединения двух линейных цепей — свертка отдельных импульсных характеристик (а), кривая формирования объединения двух формирователей — свертка отдельных кривых формирования (б).

То же свойство применимо и к жадным формирователям. Выходной сигнал второго формирователя на рис. 2, б действительно равен $y(t) = (\sigma \otimes x)(t)$, [5], где:

$$\sigma(t) = (\sigma_1 \otimes \sigma_2)(t) = \inf_{0 \leq s \leq t, s \in \mathbb{R}} \{ \sigma_1(t-s) + \sigma_2(s) \}. \quad (4)$$

Таким образом, существуют четкие аналогии между «обычной» электрической схемой и теорией систем, а также БСД. Однако есть и важные различия.

Первое из них — это реакция линейной системы на сумму входных воздействий. Рассмотрим очень распространенную ситуацию в электронных схемах, (например, линейный фильтр нижних частот, используемый для снижения влияния на полезный сигнал $x(t)$ аддитивного высокочастотного шума $n(t)$, как показано на рис. 3, а). Попытаемся сравнить эту линейную систему с ее аналогом из компьютерных сетей (возьмем в качестве примера канал буферизованного узла с пропускной способностью выходного канала C_{out} , где один поток $x(t)$, содержащий полезную информацию, мультиплексируется с другим фоновым трафиком $n(t)$, как показано на рис. 3, б).

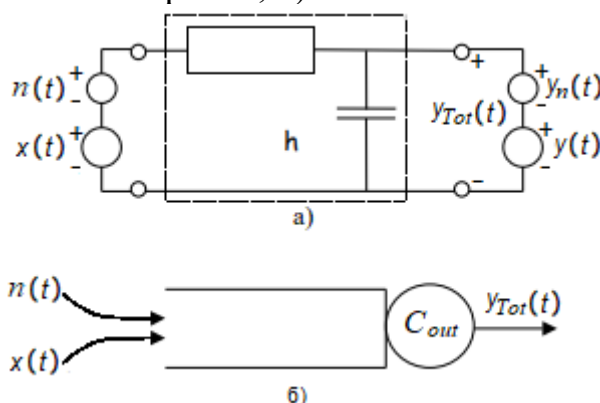


Рис. 3. Отклик $y_{Tot}(t)$ линейной схемы на сумму двух входов $x + n$ является суммой отдельных откликов (а), но отклик $y_{Tot}(t)$ жадного формирователя на совокупность двух входных потоков $x + n$ не является суммой индивидуальных откликов (б).

Поскольку электронная схема на рис. 3, а является линейной системой, отклик на сумму двух входов представляет собой сумму индивидуальных откли-

ков на каждый сигнал. Назовем $y(t)$ откликом системы на чистый сигнал $x(t)$, $y_n(t)$ — откликом на шум $n(t)$ и $y_{Tot}(t)$ — откликом на входной сигнал, искаженный шумом $x(t) + n(t)$. Тогда $y_{Tot}(t) = y(t) + y_n(t)$. Это полезное свойство действительно используется для разработки оптимальной линейной системы, которая будет максимально отфильтровывать шум.

Если трафик подается по исходящему каналу связи в режиме «первый пришел – первым ушел» (*first in first out, FIFO*) с максимально возможной скоростью, то узел на рис. 3,б эквивалентен жадному формирователю с кривой формирования $\sigma(t) = C_{out} \cdot t$ для $t \geq 0$. Следовательно, рассматриваемая система тоже линейная, но в этом случае в смысле алгебры ПМС. Это означает, что отклик на минимум двух входных сигналов равен минимуму откликов системы на каждый входной сигнал, взятый отдельно. Однако это также означает, что отклик на сумму двух входов больше не является суммой откликов системы на каждый вход, взятый отдельно, потому что теперь $x(t) + n(t)$ представляет собой нелинейную операцию между двумя входами $x(t)$ и $n(t)$, которая эквивалентна операции умножения в традиционной теории систем. Поэтому, к сожалению, свойство линейности не применимо к совокупности $x(t) + n(t)$. В результате сложно сказать что-то определенное о совокупности мультиплексированных потоков.

Как в электронике, так и в компьютерных сетях (в частности БСД) также часто встречаются нелинейные системы. Однако они обрабатываются совершенно по-разному в теории цепей и в сетевом исчислении.

Рассмотрим элементарную нелинейную систему, такую как схема усилителя на одном биполярном транзисторе, показанную на рис. 4,а. Инженеры-электронщики начинают анализ этой нелинейной схемы, вычисляя статическую рабочую точку y^* схемы, когда на вход подается фиксированное постоянное напряжение x^* (так называемый анализ по постоянному току). На следующем этапе они линеаризуют нелинейный элемент (т.е. транзистор) в окрестности рабочей точки, чтобы получить так называемую модель малого сигнала, которая представляет собой линейную модель с импульсной характеристикой $h(t)$ (это анализ по переменному току в режиме малого сигнала). Теперь $x_{lin}(t) = x(t) - x^*$ является изменяющейся во времени функцией времени в малой окрестности вокруг x^* , так что $y_{lin}(t) = y(t) - y^*$ на самом деле приближенно задается выражением $y_{lin}(t) = (\sigma \otimes x_{lin})(t)$. Такая модель показана на рисунке 4,б. Таким образом, сложность скрупулезного нелинейного анализа устраняется за счет ограничения входного сигнала в небольшом диапазоне в окрестности рабочей точки. Это позволяет использовать линеаризованную модель, точность которой достаточна для оценки представляющих интерес для показателей характеристик схемы, таких как коэффициент усиления, входное сопротивление и т.д.

В БСД входные данные не разлагаются на составляющую, изменяющуюся во времени в небольшом диапазоне, и другую составляющую, остающуюся неизменной. Здесь также нелинейные элементы заменяются линейными систе-

мами, но последние теперь представляют собой нижние границы соответствующих нелинейных систем. Например, в работе [2] при введении понятия кривой обслуживания: нелинейная система $y(t) = \Pi(x)(t)$ заменяется линейной системой $y_{lin}(t) = (\beta \otimes x)(t)$, где β и является кривой обслуживания. Показано, что эта модель удовлетворяет условию $y_{lin}(t) \leq y(t)$ для всех $t \geq 0$ и всех возможных входных данных $x(t)$. Такой подход также позволяет вычислять количественные характеристики нелинейных систем, такие как задержки и длины очередей необработанных сообщений.

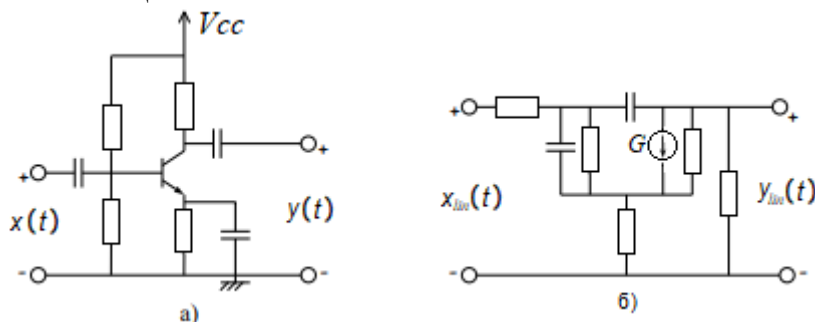


Рис. 4. Элементарная нелинейная схема (а) заменена упрощенной линейной моделью для малых сигналов (б): G — генератор сигнала

Примером может служить контроллер потока в виде скользящего окна, показанный на рис. 5, а. Входной поток x подается через этот контроллер из БСД. Сам контроллер реализует некоторое отображение $y(t) = \Pi(x)(t)$, при этом он ограничивает объем данных из сети, допускаемых к обработке, таким образом, чтобы общий объем данных, передаваемых по сети, всегда был меньше некоторого положительного числа (равного размеру скользящего окна). Априорно точный вид отображения Π неизвестен, предполагается, что известна только кривая обслуживания β этого потока. Это дает возможность для упрощения описания системы заменить нелинейную систему, показанную на рис. 5,а линейной системой, изображенной на рис. 5,б, чтобы получить детерминированные оценки сквозной задержки или объема передаваемых данных.

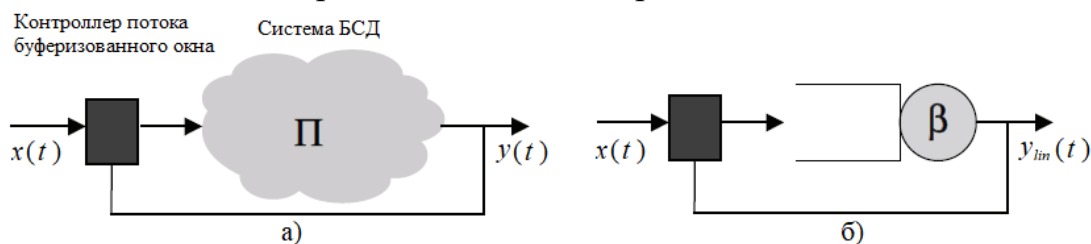


Рис. 5. Замена нелинейной сети БСД с управлением потоком в буфере а) линейной системой для наилучшего случая б)

Конечно же, существует большое количество других аналогий и различий между двумя подходами к описанию систем. Однако для описания БСД с точки зрения сетевого исчисления не требуется никаких специальных знаний из классической теории систем [4, 6].

О приложениях сетевого исчисления для БСД рассказано в работах [7-17].

Литература:

1. Лабинский, А.Ю. Компьютерное моделирование систем массового обслуживания / А.Ю. Лабинский // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2020. – С. 139–145.
2. Le Boudec, J.-Y. A Short Tutorial on Network Calculus. I. Fundamental Bounds in Communication Networks / J.-Y. Le Boudec, P. Thiran // 2000 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS). – Geneva: IEEE, 2000. – Vol. 4. – P. 93–96. DOI: 10.1109/ISCAS.2000.858696.
3. Бакалов, В.П. Основы теории цепей: учебник для вузов / В.П. Бакалов, В.Ф. Дмитриков, Б.Е. Крук. – М.: Радио и связь, 2000. – 592 с.
4. Исследование характеристик схем ретрансляции сигнала в беспроводных сетях датчиков / Н.А.М. Шаммари, Д.А. Мищенко, М.С. Светлов и др. // Известия ЮФУ. Технические науки, 2021. – № 5. – С. 6-20.
5. Maile, L. Network Calculus Results for TSN: An Introduction / L. Maile, K.-S. Hielscher, R. German // Proc. of the 2020 Information Communication Technologies Conf. – Nanjing, China, 2020. – P. 131-140. DOI: 10.1109/ICTC49638.2020.9123308.
6. Полумарковская модель телекоммуникационной сети с динамическим управлением / Д.А. Мищенко, М.С. Светлов, А.А. Никифоров и др. // Известия ЮФУ. Технические науки, 2021. – № 5. – С. 49-60.
7. Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems / A.A. L'vov; D.V. Klenov; S.A. Kuzin; M.S. Svetlov; P.A. L'vov // Proc. of the 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications Conf. – Minsk, Belarus: IEEE, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040/
8. Synchronization Techniques for the Information Channel with Codec Based on Code Signal Feature / M.S. Svetlov, D.V. Klenov, A.A. L'vov, M.K. Svetlova // Proc. of the 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications Conf. – Minsk, Belarus: IEEE, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457052/
9. Information channel synthesis for remote test monitoring / Svetlov M.S., Klenov D.V., Sytnik A.A. et al. // Proc. of the 2018 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 101-104
10. Mathematical Model of Information and Communication Networks / M.S. Svetlov, A. A. L'vov, D.A. Mishchenko, N.S. Vagarina // Proc. of the 2018 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 195-198.
11. Львов, А.А. Моделирование распределенной системы датчиков давления на основе беспроводного радиоканала связи / А.А. Львов, С.А. Кузин, М.С. Светлов, П.А. Львов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы V Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. –

- Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Вып. 5. – Т. 1. – С. 54-60.
12. Распределенная система датчиков для управления на основе беспроводного радиоканала связи / Д.В. Кленов, С.А. Кузин, М.С. Светлов и др. // Системный синтез и прикладная синергетика: сб. тр. VIII Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – С. 306-313.
 13. Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков / А.Р.Д. Алалван, Д.А. Мищенко, А.А. Никифоров и др. // Системный синтез и прикладная синергетика: сб. тр. X Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021. – С. 273–280.
 14. Львов, А.А. Самосинхронизация в информационных каналах с помехами большой интенсивности / А.А. Львов, М.С. Светлов, П.В. Мартынов // Радиотехника, 2015. – №7. – С. 18-21.
 15. L'vov, A.A. Improvement of information reliability of digital systems with QAM/COFDM modulation / A.A. L'vov, M.S. Svetlov, P.V. Martynov // Proc. of the 20th IMEKO TC4 Int. Symp. “Research on Electrical and Electronic Measurement for the Economic Upturn”, Benevento, Italy, University of Sannio, 2014. – P. 478-482.
 16. Mathematical Model of Information and Communication Networks / M.S. Svetlov, A. A. L'vov, D.A. Mishchenko, N.S. Vagarina // Proc. of the 2018 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018). – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 195-198.
 17. Моделирование распределенной системы датчиков давления на основе беспроводного радиоканала связи // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн/ Львов А. А., Кузин С. А., Светлов М. С., Львов П. А. // Материалы V Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Вып. 5. – Т. 1. – С. 54-60.