

## Активные беспроводные сети как аппаратная платформа для моделирования ансамблей динамических систем на примере модели Курамото

А.С. Дмитриев<sup>1,2</sup>, Р.Ю. Емельянов<sup>1,2</sup>, М.Ю. Герасимов<sup>1</sup>, В.А. Лазарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и радиоэлектроники им. В.А.Котельникова РАН  
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)  
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9. E-mail:  
chaos@cplire.ru

*В работе рассматриваются активные беспроводная сети как новая платформа для моделирования поведения ансамблей взаимодействующих динамических систем. Каждой динамической системе в процессе моделирования, ставится в соответствие узел активной сети. Размещенное на этом узле вычислительное устройство (микроконтроллер), осуществляет интегрирование уравнений динамической системы.Packetная передача внутренних состояний динамических систем по радиоканалам обеспечивает их взаимодействие. Экспериментально этот ансамбль реализован в сети, активные узлы которой включают в себя прямохаотические приемопередатчики со специальными платами актуаторов, содержащими микроконтроллеры для моделирования динамических систем и устройства визуального отображения информации (цветные светодиоды). Описывается методика моделирования на примере модели Курамото, экспериментальные результаты и их анализ.*

*The paper considers active wireless networks as a new multi-element processor platform to model the behavior of interacting dynamical systems. Each dynamic system modeling process is associated with an active network node. Hosted on this site-computing device (microcontroller), performs integration of the equations of the dynamical system. The packet based wireless transmission of state information of the dynamical systems, provides interaction between them. An ensemble of Kuramoto oscillators demonstrates platform capabilities. Experimentally, this ensemble is implemented in the network, the active components of which include direct chaotic transceivers with special actuators boards containing microcontrollers for modeling dynamic systems and visual display of information (colored LEDs). It describes the technique of modeling, experimental results and their analysis.*

### Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой совокупность узлов с датчиками, объединенными в ансамбль, путем взаимодействия по радиоканалам [1]. В настоящее время появляется все большее число примеров беспроводных сетей, узлы которых, кроме приемопередатчика и датчика, включают в себя актуаторы – устройства, воздействующие на окружающую среду, в том числе устройства отображения информации (например, светодиоды или экраны), и устройства обработки информации (микроконтроллеры, процессоры). Ниже будем называть такие обобщенные беспроводные сенсорные сети активными беспроводными сетями (АБС).

Особый интерес представляют сверхширокополосные АБС с приёмопередатчиками на хаотических радиоимпульсах [2-4], в которых скорость передачи между узлами в 10-25 раз превосходит скорость передачи между приемопередающими узлами, реализованными на узкополосных приемопередатчиках типа ZigBee.

Широкий набор оборудования в узлах, вместе с коммуникационными возможностями, позволяет рассматривать сверхширокополосные активные беспроводные сети не только как средство сбора данных с некоторой территории и передачи их пункту анализа, но и как мощную технологическую платформу, для

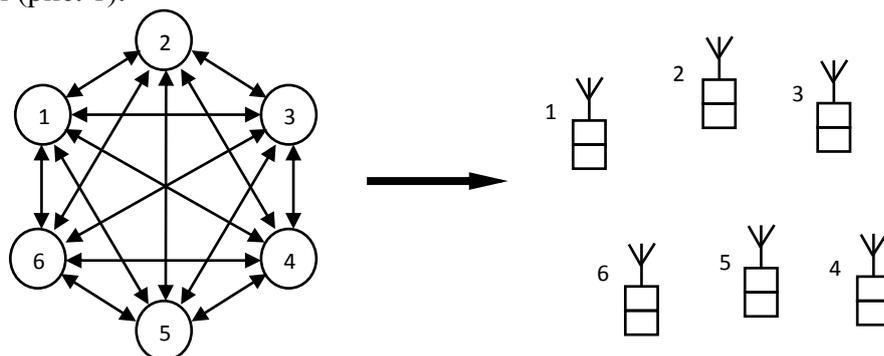
решения более широких классов задач, относящихся к многоэлементным взаимодействующим системам.

Одной из таких задач является моделирование взаимодействующих динамических систем.

В данной работе активные беспроводные сети используются для моделирования ансамбля систем Курамото [5-6].

### Схема моделирования

Первым шагом реализации ансамбля взаимодействующих динамических в АБС является представление взаимодействующих динамических систем в беспроводной активной сети (рис. 1).



**Рис. 1. Схема отображения ансамбля динамических систем на активную беспроводную сеть. Динамические системы моделируются на узлах, связи реализуются посредством радиоканалов.**

Представление включает в себя

- постановку каждому элементу ансамбля динамических систем в соответствие узла активной беспроводной сети;
- программирование уравнений элемента ансамбля в процессоре узла АБС;
- определение и установление связей между узлами активной сети согласно связям между элементами ансамбля;
- реализацию связей через радиоканалы.

Программирование уравнений ансамбля в процессорном элементе, вместе с его взаимодействием, осуществляется в три этапа:

- написание программы на языке высокого уровня и ее отладка;
- компиляция программы в машинный код;
- «загрузка» программы в микроконтроллер.

Принципиальным моментом при моделировании взаимодействующих динамических систем в беспроводной активной сети является способность сети реализовывать с помощью радиоканалов связи между любыми узлами. Это означает, что в принципе радиоканалы обеспечивают моделирование ансамблей с произвольной топологией связей.

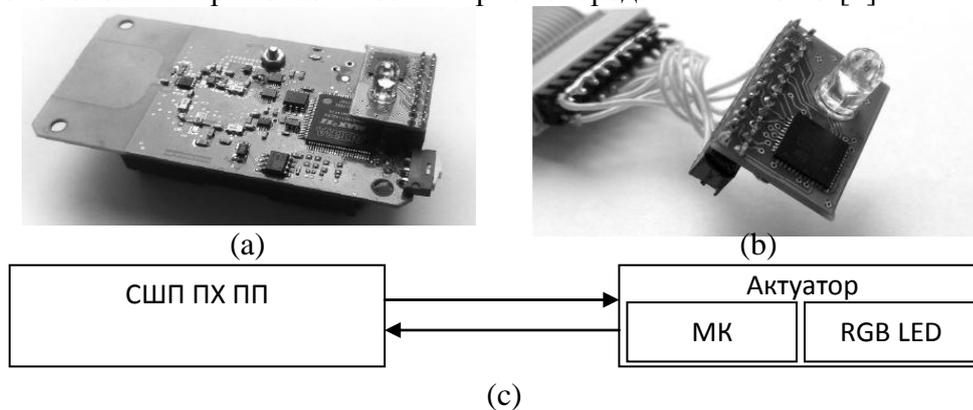
При моделировании:

- узлы располагаются так, чтобы каждый узел находился в области видимости любого другого узла сети, т.е. имел возможность, как получать данные от узлов, с которыми он должен быть связан, так и передавать им свои данные;
- в каждом узле процессор интегрирует уравнения, описывающие поведение соответствующего элемента ансамбля;

- все узлы работают независимо во времени, циклически совершая каждый шаг интегрирования через интервал времени  $T$ ;
- в начале интервала каждый элемент переходит в режим прослушивания эфира, а в конце интервала передает в эфир сообщение о состоянии своих переменных;
- в результате, за «свой» интервал времени  $T$ , каждый из узлов сети передает информацию о своем состоянии всем узлам, с которыми он поддерживает связь и получает информацию о состоянии этих узлов;
- состояние переменной узла отображается визуально цветом свечения светодиода.

### Сверхширокополосный активный узел и актуатор

Активный узел сети представляет собой устройство, включающее беспроводный приемопередатчик и специальную плату – актуатор, связанные специальным интерфейсом (рис. 2). В качестве приемопередатчика в работе использовался сверхширокополосный прямохаотический приемопередатчик ППС 43 [4].



**Рис. 2. Активный беспроводный узел и его структура: (а) сверхшироко-полосный прямохаотический приемопередатчик (СШП ПХ ПП) с актуатором; (б) актуатор; (с) структура узла.**

Актуатор был реализован на основе микроконтроллера STM32L, используемого в качестве вычислительного устройства, на котором программируется уравнение элемента ансамбля, и цветного светодиода в качестве элемента визуального отображения состояния одной из переменных элемента ансамбля.

Отображающим элементом процессорной платы является цветной светодиод, цвет свечения которого позволяет непосредственно судить о состоянии одной из переменных элемента ансамбля. Совместное использование нескольких светодиодов в сети дает визуальную динамическую картину степени согласованности их коллективного поведения.

### Экспериментальная реализации модели Курамото

Модель Курамото представляет собой систему  $N$  связанных фазовых осцилляторов с собственными частотами  $\omega_i$ . Динамика модели с силой связи  $K$  описывается системой уравнений:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Модель Курамото в зависимости от силы связи и числа устройств обладает широким спектром динамических явлений: при малых значениях связи возможны некогерентные режимы (квазипериодические и хаотические [7, 8]), при превышении силой связи определенного порога, спонтанно возникает коллективная синхронизация.

С точки зрения моделирования на активных беспроводных сетях дополнительным аргументом в ее пользу является то обстоятельство, что каждый элемент модели описывается только одним дифференциальным уравнением первого порядка.

В рамках работы был проведен компьютерный анализ динамического поведения ансамбля из  $N=6$  осцилляторов и проведены эксперименты по сопоставлению теоретических результатов с динамической системой, моделируемой при помощи АБС.

Эксперименты включали в себя: наблюдение синхронного режима; режима динамического хаоса; равновесного состояния; десинхронизацию и восстановление синхронизации ансамбля при наличии/отсутствии внешнего помехового сигнала.

В первом эксперименте сила связи  $K=0$ . В этом случае узлы постоянно обменивались значениями фаз в течение эксперимента, однако член с суммой в уравнении (1), отвечающий за связь между динамическими системами был равен 0. Поэтому все динамические системы на узлах эволюционировали независимо, с разными собственными частотами, стартовав в различные моменты времени. При проведении эксперимента наблюдалось строго периодическая плавная смена цветов светодиодов на актуаторах узлов АБС, корреляция между цветами отсутствовала.

Следующий эксперимент был проведен для системы с силой связи  $K=1.3$ , что соответствует динамическому хаосу в при расчетах в модели Курамото. Показатель Ляпунова при этом положителен и равен приблизительно 0.03. Для данной силы связи, по сравнению с предыдущим экспериментом, визуальное поведение ансамбля поменялось, смена цветов светодиодов утратила периодичность и стала нерегулярной, видимой корреляции между цветами светодиодов в разных узлах не было.

Третий эксперимент проводился при силе связи  $K=3$ . В этом эксперименте, устройства начали работу после включения со случайными цветами, но затем наблюдалось сходимость процесса к равновесному состоянию, при котором все светодиоды постоянно горели одним цветом.

В четвертом эксперименте собственные частоты осцилляторов выбирались случайно в интервале  $(-1, 1)$ . В этом случае при силе связи  $K=3$ , наблюдался режим синхронизации при которой результирующая частота была не нулевой. Визуально процесс выглядел как когерентная периодическая смена осцилляторами цвета. Частота когерентных колебаний менялась при каждом новом включении.

Для последнего эксперимента, использовалась АБС с теми же параметрами, что и в четвертом эксперименте. После установления синхронизации ансамбля, к устройствам был поднесен прямохаотический передатчик, с непрерывным излучением сигнала в диапазоне частот, на котором работают приёмопередатчики АБС. Наличие такой помехи привело к нарушению работы приемников в узлах, разрушению связей в АБС и прекращению обмена данными о фазах осцилляторов в рамках ансамбля. Как следствие, цвета светодиодов перестали совпадать и начали эволюционировать независимо — произошла десинхронизация ансамбля. После отключения передатчика, излучающего помеховый сигнал, синхронизация в ансамбле быстро восстановилась.

### **Заключение**

В работе исследована возможность использования активных беспроводных сетей как среды для экспериментального использования динамики многоэлементных систем с непрерывным временем.

Создан и экспериментально реализован актуатор, обладающий возможностью интегрировать уравнение системы и отображать её состояние в виде изменения цвета светодиода.

Разработаны программы, обеспечивающие работу актуатора в составе беспроводного активного узла и функционирование АБС как многоэлементной динамической системы с непрерывным временем.

В качестве конкретной многоэлементной динамической системы выбран ансамбль связанных осцилляторов Курамото. На примере этой системы с 6 элементами экспериментально показано, что динамика активной сети может полностью соответствовать динамике исходной математической модели.

Проведены эксперименты по воздействию на активную сеть внешнего к ней сверхширокополосного хаотического радиосигнала, в результате чего происходило разрушение связей между узлами и качественное изменение поведения многоэлементной системы в целом.

Полученные результаты показали, что АБС могут эффективно использоваться для экспериментальной эмуляции многоэлементных динамических систем с непрерывным временем.

*Данная работа выполнена при частичной поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Минобрнауки, Соглашение № 14.584.21.0010*

### **Литература**

1. Wikipedia. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network).
2. Дмитриев А. С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9–20.
3. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., С.О. Старков. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысококачастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 224–233.
4. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Лазарев В.А., Герасимов М.Ю. Сверхширокополосная беспроводная самоорганизующаяся прямохаотическая сенсорная сеть // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 19–29.
5. Kuramoto Y. Chemical oscillations, waves and turbulence. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
6. Kuramoto Y. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators // International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics / Ed. by H. Araki. Berlin: Springer, 1975. Vol. 39. P. 420–422.
7. Popovych O. V., Maistrenko Y. L., Tass P. A. Phase chaos in coupled oscillators // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 71, № 6. P. 065201.
8. Maistrenko Y., Popovych O., Tass P. Desynchronization and chaos in the Kuramoto model // Lecture notes in physics. 2005. Vol. 671. P. 285–306.