УПРАВЛЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
кибернетика, нелинейная динамика

А.В. Макаренко
avm@rdcn.ru

Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика»
Москва, Россия, www.rdcn.ru

Институт проблем управления РАН
Москва, Россия

Учебный курс – Лекция 7

14 мая 2020 г.

ИПУ РАН, Москва, Россия

Outline

Outline section

Определение понятия

КИБЕРНЕТИКА – наука об общих закономерностях получения, хранения, преобразования и передачи информации в сложных управляющих системах, будь то машины, живые организмы или общество.

Определение понятия

КИБЕРНЕТИКА – наука об общих закономерностях получения, хранения, преобразования и передачи информации в сложных управляющих системах, будь то машины, живые организмы или общество.

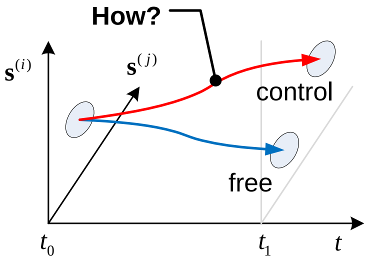
ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ – наука о принципах и методах управления различными системами, процессами и объектами. Теоретической базой теории управления являются кибернетика и теория информации.

Определение понятия

КИБЕРНЕТИКА – наука об общих закономерностях получения, хранения, преобразования и передачи информации в сложных управляющих системах, будь то машины, живые организмы или общество.

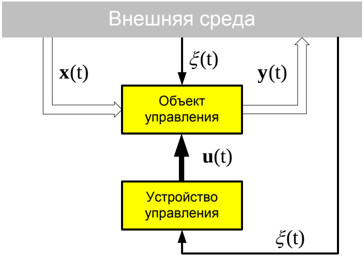
ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ – наука о принципах и методах управления различными системами, процессами и объектами. Теоретической базой теории управления являются кибернетика и теория информации.

УПРАВЛЕНИЕ – целенаправленный перевод (переход) системы Σ посредством управляющего воздействия U из одного состояния $\mathrm{S_b}$ в другое – требуемое $\mathrm{S_e}$ (определённое целями управления $\mathrm{W_u}$).

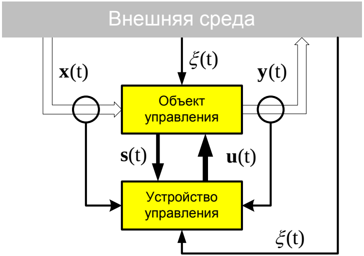


Виды управления

Программное управление



Управление на основе обратной связи



Наблюдаемость

НАБЛЮДАЕМОСТЬ – возможность косвенного определения величин на основе измерения некоторых других величин и использования априорной информации. Наблюдаемость системы, в классическом смысле, это возможность восстановления полного вектора состояния системы, по частичным и/или косвенным измерениям различных величин, с использованием априорной информации.

Наблюдаемость

НАБЛЮДАЕМОСТЬ – возможность косвенного определения величин на основе измерения некоторых других величин и использования априорной информации. Наблюдаемость системы, в классическом смысле, это возможность восстановления полного вектора состояния системы, по частичным и/или косвенным измерениям различных величин, с использованием априорной информации.

ИЗМЕРИМОСТЬ – возможность непосредственного измерения той или иной физической величины.

Наблюдаемость

НАБЛЮДАЕМОСТЬ – возможность косвенного определения величин на основе измерения некоторых других величин и использования априорной информации. Наблюдаемость системы, в классическом смысле, это возможность восстановления полного вектора состояния системы, по частичным и/или косвенным измерениям различных величин, с использованием априорной информации.

ИЗМЕРИМОСТЬ – возможность непосредственного измерения той или иной физической величины.

ОЦЕНИВАНИЕ – обработка данных измерений (наблюдений) с целью уменьшить влияние случайных факторов (ошибок).

Идентифицируемость

ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ – в широком смысле это возможность получения или уточнения по экспериментальным данным формальной модели реального объекта (системы, процесса) выраженной в тех или иных терминах (описанной на том или ином языке).

Идентификация динамической системы (процесса) – это получение или уточнение по экспериментальным данным математической модели этой системы (процесса), выраженной посредством того или иного математического аппарата.

Идентифицируемость

ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ – в широком смысле это возможность получения или уточнения по экспериментальным данным формальной модели реального объекта (системы, процесса) выраженной в тех или иных терминах (описанной на том или ином языке).

Идентификация динамической системы (процесса) – это получение или уточнение по экспериментальным данным математической модели этой системы (процесса), выраженной посредством того или иного математического аппарата.

АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ – соответствие модели реальному моделируемому объекту или процессу, в части их свойств, релевантных задаче моделирования. Адекватность – в какой-то мере условное понятие, так как полного соответствия модели реальному объекту (процессу) быть не может, в противном случае это была бы не модель, а сам объект.

Управляемость

УПРАВЛЯЕМОСТЬ – возможность целенаправленного перевода динамической системы посредством управления из одного (текущего) состояния в другое – требуемое.

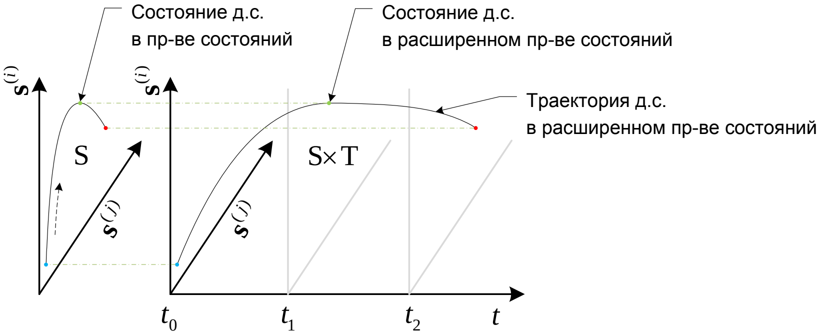
Адаптируемость

АДАПТИРУЕМОСТЬ – в широком смысле это возможность системы изменять свою структуру, параметры, алгоритмы, методы и цели функционирования и т.п., приспосабливаться к изменяющимся внешним условиям, с целью сохранения (улучшения) качества (эффективности) своего функционирования.

Outline section

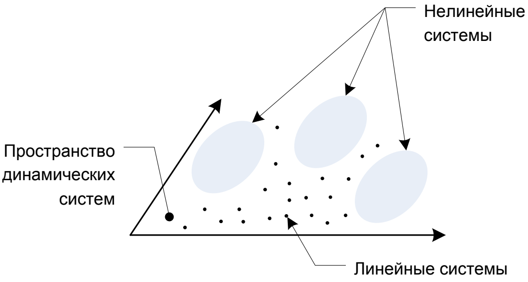
Определение понятия

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА – множество связанных элементов, для которого задана функциональная зависимость между временем и состоянием – положением в пространстве состояний каждого элемента системы. Данная математическая абстракция позволяет описывать и изучать эволюцию систем во времени.



Определение понятия

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА – междисциплинарная наука, в которой изучаются свойства нелинейных динамических систем. Нелинейная динамика использует для описания систем нелинейные модели, обычно описываемые дифференциальными уравнениями или дискретными отображениями. Свойства и характеристики нелинейных динамических систем зависят от их состояния.



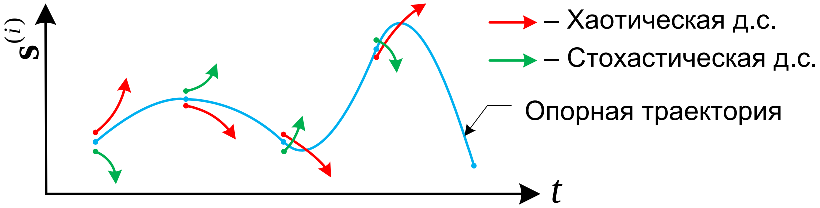
$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\,t}\mathbf{s} \equiv \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{f}(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),$$

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{s}_k,\, \mathbf{p}).$$

$$f(x+y) \neq f(x) + f(y)$$

Определение понятия

ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС – явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминированными правилами (законами).



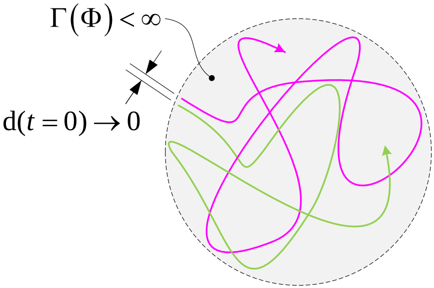
Причиной появления хаоса является неустойчивость (чувствительность) по отношению к начальным условиям и/или параметрам: малое изменение начального условия (параметра) со временем приводит к сколь угодно большим изменениям в динамике системы.

$$\mathrm{d}(t) = \mathrm{d}(t = 0) \exp[h_o\, t], \quad h_o > 0$$

Определение понятия

ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС – явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминированными правилами (законами).

Эффект перемешивания:



Тип системы:

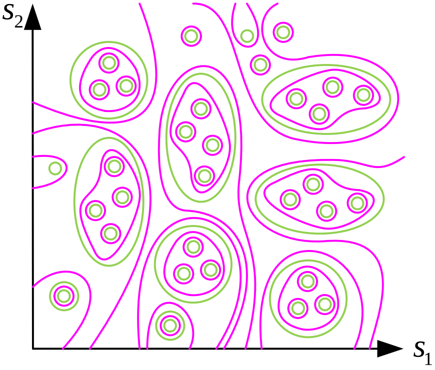
$\Gamma(\Phi) = const$ – Консервативная.

$\Gamma(\Phi) \neq const$ – Диссипативная.

Определение понятия

ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС – явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминированными правилами (законами).

Плотность периодических орбит:



Дополнительные моменты

АТТРАКТОР – множество точек (подпространство) фазового пространства динамической системы, к которому приближается её фазовая траектория с течением времени.

АТТРАКТОР СТРАННЫЙ – такой аттрактор, фазовый портрет которого представляет собой не точку равновесия и не предельный цикл (как для устойчивых, равновесных систем), а некоторую ограниченную область в пространстве состояний системы, по которой происходят «случайные блуждания».

ГОРИЗОНТ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ – характерное время (для системы со странным аттрактором), в пределах которого может быть предсказано, с заданным уровнем статистической надёжности, наиболее вероятное поведение системы.

Дополнительная литература:

- Ю.А. Кравцов, Случайность, детерминированность, предсказуемость. УФН, **158**:5 (1989), 93–122.
- А.Ю. Колесов, Н.Х. Розов, К вопросу об определении хаоса. УМН, **64**:4 (2009), 125–17.

Дискретные отображения

Введём в рассмотрение динамическую систему заданную в виде дискретного отображения:

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{s}_k,\, \mathbf{p}),$$

$$\boldsymbol{\phi}_{\mathbf{p}} : \mathrm{S} \times \mathrm{K} \to \mathrm{S}, \quad \boldsymbol{\phi}_{\mathbf{p}}(\mathbf{s},\, k) \equiv \mathbf{f}^{k}\left(\mathbf{s},\, \mathbf{p}\right),$$

со свойствами:

$$\mathbf{s} \in \mathrm{S} \subset \mathbb{R}^N, \quad \mathbf{p} \in \mathrm{P} \subset \mathbb{R}^L, \quad \mathbf{f} \in \mathrm{C}^0(\mathrm{S} \times \mathrm{P}),$$

$$k \in \mathrm{K} \subseteq \mathbb{Z}, \quad n \in \overline{1,\, N}, \quad l \in \overline{1,\, L}.$$

С системой также свяжем траекторию эволюции её состояния $\mathbf{s}$: $\{\mathbf{s}_k\}_{k \in \mathrm{K}}$.

Показатель Ляпунова

ПОКАЗАТЕЛЬ ЛЯПУНОВА – одна из ведущих диагностических характеристик, определяющих находится ли исследуемая система в режиме хаоса. Он оценивает локальную экспоненциальную расходимость двух близких траекторий и вычисляется через собственные числа матрицы:

$$\mathbf{M}_{ij}^{k} = \left[\mathbf{G}(\mathbf{s}_{k-1})\,\mathbf{G}(\mathbf{s}_{k-2})\ldots\mathbf{G}(\mathbf{s}_0)\right]_{ij}, \quad \mathbf{G}_{ij}(\mathbf{s}_k) = \left.\frac{\partial\,\mathbf{f}_i}{\partial\,\mathbf{s}^{(j)}}\right|_{\mathbf{s}=\mathbf{s}_k}.$$

Примечание: на практике применяются различные вариации алгоритма Бенеттина. G. Benettin, et al. Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and for Hamiltonian Systems; A Method for Computing All of Them. Meccanica, vol. 15, pp. 9–20, 1980.

Показатель Ляпунова

ПОКАЗАТЕЛЬ ЛЯПУНОВА – одна из ведущих диагностических характеристик, определяющих находится ли исследуемая система в режиме хаоса. Он оценивает локальную экспоненциальную расходимость двух близких траекторий и вычисляется через собственные числа матрицы:

$$\mathbf{M}^k_{ij} = \left[\mathbf{G}(\mathbf{s}_{k-1})\,\mathbf{G}(\mathbf{s}_{k-2})\ldots\mathbf{G}(\mathbf{s}_0)\right]_{ij}, \quad \mathbf{G}_{ij}(\mathbf{s}_k) = \frac{\partial\,\mathbf{f}_i}{\partial\,\mathbf{s}^{(j)}}\bigg|_{\mathbf{s}=\mathbf{s}_k}.$$

Примечание: на практике применяются различные вариации алгоритма Бенеттина. G. Benettin, et al. Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and for Hamiltonian Systems; A Method for Computing All of Them. Meccanica, vol. 15, pp. 9–20, 1980.

В одномерном случае $N = 1$, задача вырождается и поддаётся прямому счёту:

$$\Lambda\big(s_0\big) = \lim_{K\to\infty}\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}\ln\left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\,s}f^k(s_0)\right|.$$

Показатель Ляпунова

ПОКАЗАТЕЛЬ ЛЯПУНОВА – одна из ведущих диагностических характеристик, определяющих находится ли исследуемая система в режиме хаоса. Он оценивает локальную экспоненциальную расходимость двух близких траекторий и вычисляется через собственные числа матрицы:

$$\mathbf{M}_{ij}^{k} = \big[\mathbf{G}(\mathbf{s}_{k-1})\,\mathbf{G}(\mathbf{s}_{k-2})\ldots\mathbf{G}(\mathbf{s}_0)\big]_{ij}, \quad \mathbf{G}_{ij}(\mathbf{s}_k) = \frac{\partial\,\mathbf{f}_i}{\partial\,\mathbf{s}^{(j)}}\bigg|_{\mathbf{s}=\mathbf{s}_k}.$$

Примечание: на практике применяются различные вариации алгоритма Бенеттина. G. Benettin, et al. Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and for Hamiltonian Systems; A Method for Computing All of Them. Meccanica, vol. 15, pp. 9–20, 1980.

В одномерном случае $N = 1$, задача вырождается и поддаётся прямому счёту:

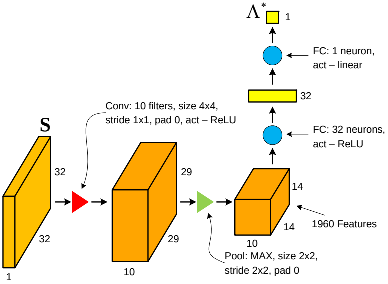
$$\Lambda\big(s_0\big) = \lim_{K\to\infty}\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}\ln\bigg|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\,s}f^{k}(s_0)\bigg|.$$

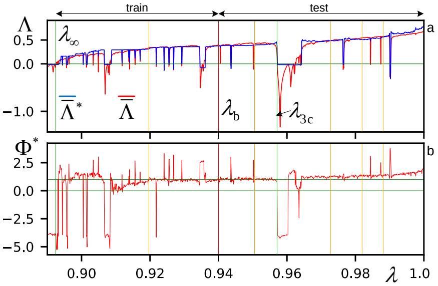
Для случая оценивания Λ на основе наблюдаемой реализации динамического процесса, исторически первым алгоритмом был подход предложенный Вольфом. A. Wolf, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series. Physica D: Nonlinear Phenomena, vol. 16, pp. 285–317, 1985.

Показатель Ляпунова и Глубокое обучение

$$s_{k+1} = f(s_k,\, \lambda) = 4\,\lambda\, s_k\, (1 - s_k),$$

где: $\lambda \in (0,\, 1]$ – управляющий параметр, $s \in (0,\, 1)$ – фазовая переменная.





A.V. Makarenko, Deep Convolutional Neural Networks for Chaos Identification in Signal Processing. // The IEEE EUSIPCO 2018 / Proceedings – Rome, EURASIP, 2018.

Машинное обучение ⇔ Нелинейная динамика

Тематика Вычислительного интеллекта предполагает конвергенцию двух основных направлений исследований:

- Нелинейная динамика – как основа для оценивания сложных динамических процессов и идентификации сложных динамических систем.
- Машинное обучение – как основа для анализа больших массивов слабоструктурированных данных и порождения над ними моделей, имеющих описательную, объяснительную и предсказательную силу.

При этом взаимопроникновение двух дисциплин ещё более сильное:

- Решение отдельных, как правило прикладных, задач нелинейной динамики при помощи нейронных сетей (принимая во внимание универсальную теорему об аппроксимации RNN).
- Применение методов нелинейной динамики в проектировании, обучении и исследовании глубоких нейронных сетей (принимая во внимание нелинейную природу ГНС).

Синхронизация хаоса

Синхронизация хаотических колебаний принадлежит к числу фундаментальных понятий теории нелинейной динамики и теории хаоса. Этот феномен широко распространён в природе, науке, технике и в обществе.

Виды синхронизации хаоса: обобщённая, полная, противофазная, с запаздыванием, частотная, фазовая, синхронизация временных масштабов.

Структура синхронизма систем: перемежаемость между синхронным и несинхронным поведениями элементов систем несёт важную информацию о свойствах их динамики.

С физической точки зрения перемежаемость вообще означает появление неких структур различного масштаба в среде (например вихрей, локализованных деформаций, температурных неоднородностей), которая исходно могла быть совершенно бесструктурной на этих масштабах.

С математической точки зрения такое поведение характеризуется наличием редких, но сильных пиков в поведении индикатора структуры – некоей случайной величины.

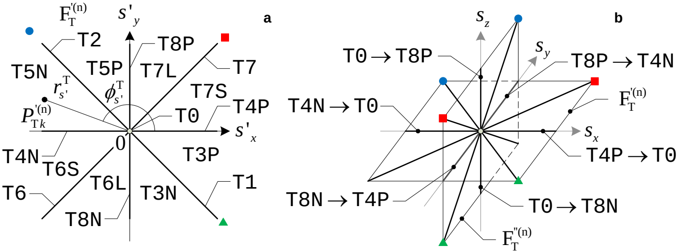
Временная структура синхронизма систем – актуальная, но слабо изученная область.

Определение T-синхронизации

Определим исходное отображение:

$$\left\{\mathbf{s}_{k-1}^{(n)},\, \mathbf{s}_{k}^{(n)},\, \mathbf{s}_{k+1}^{(n)}\right\} \Rightarrow T_k^{\alpha\varphi}|_n, \quad T_k^{\alpha\varphi} = [T_k^{\alpha\varphi}|_1,\, \ldots,\, T_k^{\alpha\varphi}|_N]\,.$$

$$\mathrm{T}_o^{\alpha\varphi} = \{\mathtt{T0},\ \mathtt{T1},\ \mathtt{T2},\ \mathtt{T3N},\ \mathtt{T3P},\ \mathtt{T4N},\ \mathtt{T4P},\ \mathtt{T5N},\ \mathtt{T5P},\ \mathtt{T6S},\ \mathtt{T6},\ \mathtt{T6L},\ \mathtt{T7S},\ \mathtt{T7},\ \mathtt{T7L},\ \mathtt{T8N},\ \mathtt{T8P}\}.$$



Будем считать динамические системы синхронными в момент времени k, в смысле T-синхронизации, если выполняется условие $J_k{=}1$:

$$J_k = \begin{cases} 1 & T_k^{\alpha\varphi}|_1 = \ldots = T_k^{\alpha\varphi}|_n = \ldots = T_k^{\alpha\varphi}|_N, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

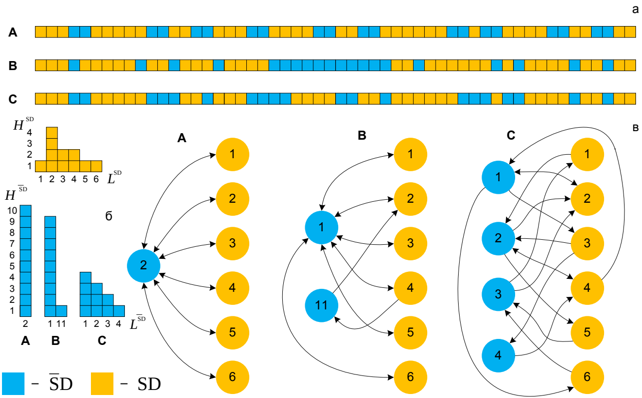
Временная структура синхронизма

Theorem

Индикаторная последовательность

$$\{D_r^{\mathrm{SS}}\}_{r=1}^{R^{\mathrm{SS}}}, \quad D^{\mathrm{SS}} \in \mathbb{Z}_2 = \{\overline{\mathrm{SD}} = 0, \, \mathrm{SD} = 1\}$$

является необходимым и достаточным условием описания временной структуры T-синхронизации, и позволяет проводить согласованное рассмотрение десинхронных $\overline{\mathrm{SD}}$ *и синхронных* SD *доменов.*



Временная структура синхронизма

Theorem

Индикаторная последовательность

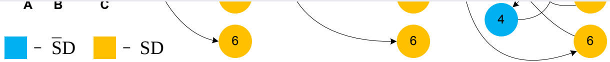
$$\{D_r^{\mathrm{SS}}\}_{r=1}^{R^{\mathrm{SS}}}, \quad D^{\mathrm{SS}} \in \mathbb{Z}_2 = \{\overline{\mathrm{SD}} = 0,\, \mathrm{SD} = 1\}$$

является необходимым и достаточным условием описания временной структуры T-синхронизации, и позволяет проводить согласованное рассмотрение десинхронных $\overline{\mathrm{SD}}$ *и синхронных* SD *доменов.*

a

Применение в нейросетевой области

- Анализ синхронности сложных взаимосвязанных динамических систем (структур) и/или процессов с целью формирования субоптимальных первичных информативных признаков.
- Исследование временной структуры синхронизма внутренних рекуррентных слоёв с целью повышения качества функционирования и/или улучшения обучаемости сети.



Т-синхронизации: Выводы

- Т-синхронизация обобщает ряд известных типов синхронизации.
- Метод применим для исследования многомерных решёток с произвольной топологией.
- Подход применим для анализа экспериментальных данных.
- Анализатор инвариантен к сдвигам и растяжениям фазовых траекторий.
- Т-синхронизация позволяет исследовать в замкнутой форме временную структуру синхронизма хаотических систем.

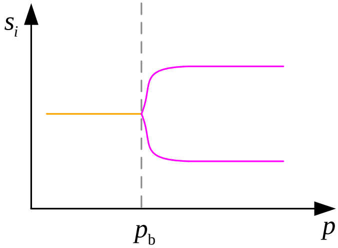
A.V. Makarenko, The Study of Discrete Mappings in TQ-Space. Basic Principles. //Journal of Math. Sci., 2016, Vol. 219, Issue 2, pp. 190-203. //Journal of Math. Sci., 2016, Vol. 219, Issue 2, pp. 190-203.

A.V. Makarenko, Analysis of the time structure of synchronization in multidimensional chaotic systems // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2015, Vol. 120, Issue 5, pp. 912-921.

A.V. Makarenko, Analysis of phase synchronization of chaotic oscillations in terms of symbolic CTQ-analysis // Technical Physics, 2016, Vol. 61, Issue 2, pp. 265-273.

Бифуркации д.с.

Концепция бифуркаций в динамических системах впервые была выдвинута А. Пуанкаре для описания «расщепления» равновесных решений в семействе обыкновенных дифференциальных уравнений.

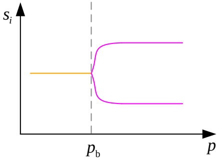


Бифуркации д.с.

Концепция бифуркаций в динамических системах впервые была выдвинута А. Пуанкаре для описания «расщепления» равновесных решений в семействе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Второй этап исследования бифуркаций [А.А. Адронов и др.] заключался в основном в исследовании д.с. в аспекте изменения качественной структуры их орбит в результате малых возмущений системы, в связи с широким распространением прикладных задач для теории динамических систем и нелинейных колебаний.

Современная теория бифуркаций [В.И. Арнольд, Л.П. Шильников и др.] рассматривает не только бифуркации положений равновесия и предельных циклов, но перестройки системы в целом и, прежде всего, её инвариантных множеств, аттракторов.



Определение TQ-синхронизации

Сгруппируем последовательные итерации отображения:

$$\Big\{\mathbf{s},\, \mathbf{f}(\mathbf{s},\,\mathbf{p}),\, \mathbf{f}^2(\mathbf{s},\,\mathbf{p})\Big\} \to \Big\{\mathbf{f}(\mathbf{s},\,\mathbf{p}),\, \mathbf{f}^2(\mathbf{s},\,\mathbf{p}),\, \mathbf{f}^3(\mathbf{s},\,\mathbf{p})\Big\},$$

TQ-бифуркацию в отображении определим как изменение набора T- и Q-символов в области варьирования переменной состояния $\mathbf{s}$, отвечающее условию:

$$\big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{a}} \xrightarrow[\mathbf{p}=\mathbf{p}_b]{\text{TQ-bif}} \big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{b}}, \quad \big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{a}} \neq \big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{b}}, \quad \mathbf{p}_a \neq \mathbf{p}_b.$$

Theorem

TQ-бифуркации в дискретных отображениях подразделяются на три фундаментальных рода:

I – изменяется набор символов $T^{\alpha\varphi}$, набор символов $Q^{\alpha\varphi}$ – переходов между неизменными символами $T^{\alpha\varphi}$ остаётся неизменным.

II – набор символов $T^{\alpha\varphi}$ остаётся постоянным, но изменяется набор символов $Q^{\alpha\varphi}$.

III – изменяется как набор символов $T^{\alpha\varphi}$, так и набор символов $Q^{\alpha\varphi}$ – переходов между неизменными символами $T^{\alpha\varphi}$.

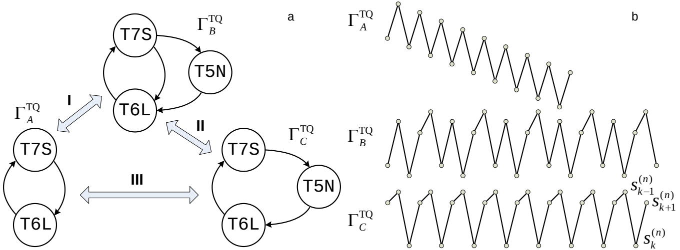
Определение TQ-синхронизации

Сгруппируем последовательные итерации отображения:

$$\Big\{\mathbf{s},\, \mathbf{f}(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),\, \mathbf{f}^2(\mathbf{s},\, \mathbf{p})\Big\} \to \Big\{\mathbf{f}(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),\, \mathbf{f}^2(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),\, \mathbf{f}^3(\mathbf{s},\, \mathbf{p})\Big\},$$

TQ-бифуркацию в отображении определим как изменение набора T- и Q-символов в области варьирования переменной состояния $\mathbf{s}$, отвечающее условию:

$$\left\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi}\right\rangle_{\mathbf{a}}^{\mathrm{O}} \xrightarrow[\mathbf{p}=\mathbf{p}_b]{\text{TQ-bif}} \left\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi}\right\rangle_{\mathbf{b}}^{\mathrm{O}}, \quad \left\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi}\right\rangle_{\mathbf{a}}^{\mathrm{O}} \neq \left\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi}\right\rangle_{\mathbf{b}}^{\mathrm{O}}, \quad \mathbf{p}_a \neq \mathbf{p}_b.$$



Определение TQ-синхронизации

Сгруппируем последовательные итерации отображения:

$$\Big\{\mathbf{s},\, \mathbf{f}(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),\, \mathbf{f}^2(\mathbf{s},\, \mathbf{p})\Big\} \to \Big\{\mathbf{f}(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),\, \mathbf{f}^2(\mathbf{s},\, \mathbf{p}),\, \mathbf{f}^3(\mathbf{s},\, \mathbf{p})\Big\},$$

TQ-бифуркацию в отображении определим как изменение набора T- и Q-символов в области варьирования переменной состояния $\mathbf{s}$, отвечающее условию:

$$\big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{a}} \xrightarrow[\mathbf{p}=\mathbf{p}_b]{\text{TQ-bif}} \big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{b}}, \quad \big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{a}} \neq \big\langle \mathrm{T}^{\alpha\varphi},\, \mathrm{Q}^{\alpha\varphi} \big\rangle^{\mathrm{O}}_{\mathbf{b}}, \quad \mathbf{p}_a \neq \mathbf{p}_b.$$

Применение в нейросетевой области

- Анализ перестроений аттракторов динамических систем и/или формы траекторий процессов с целью формирования субоптимальных первичных информативных признаков.
- Исследование перестроений аттракторов рекуррентных слоёв с целью повышения качества функционирования и/или улучшения обучаемости сети.

TQ-синхронизация: Выводы

- TQ-бифуркации связаны с качественным изменением формы траекторий отображений в расширенном пространстве состояний.
- TQ-бифуркации позволяют исследовать ряд феноменов: синхронизация, самоорганизация, управление (подавление) хаосом.
- Метод применим для исследования многомерных решёток с произвольной топологией:
  - магнитные решётки – качественные свойства пространственного профиля намагниченности кристалла;
  - кристаллические решётки – динамика заряженных частиц высоких энергий в изогнутых кристаллах.
- Анализатор инвариантен к сдвигам и растяжениям фазовых траекторий.

A.V. Makarenko, The Study of Discrete Mappings in TQ-Space. Basic Principles. //Journal of Math. Sci., 2016, Vol. 219, Issue 2, pp. 190-203. //Journal of Math. Sci., 2016, Vol. 219, Issue 2, pp. 190-203.

A.V. Makarenko, TQ-bifurcations in discrete dynamical systems: Analysis of qualitative rearrangements of the oscillation mode // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2016, Vol. 123, Issue 4, pp. 666-676.

Самоорганизация д.с.

САМООРГАНИЗАЦИЯ - спонтанное, самопроизвольное возникновение упорядоченности (пространственных, временных, пространственно-временных или функциональных структур) в открытых (диссипативных) нелинейных, далеких от равновесия системах.

В процессе самоорганизации в сложных системах выделяется набор ведущих переменных (их называют параметрами порядка), которые подчиняют, определяют остальные характеристики объекта.

Макроэффекты (примеры):

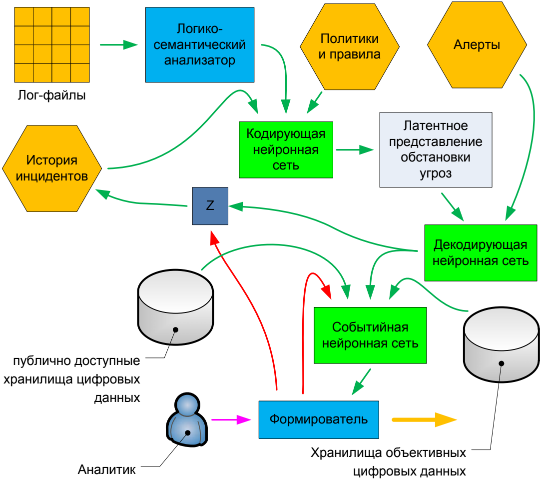
- генерация лазерного излучения;
- формирование ячеек Рэлея–Бенара;
- реакция Белоусова–Жаботинского;
- спонтанная полимеризация, фазовые переходы;
- образование спонтанной намагниченности ферромагнетиков.

Outline section

О задаче: Система распознавания вторжений в «Облако»

- Крупная вычислительная система;
- Предоставление «сырых» виртуальных машин;
- Обнаружение пассивных и активных атак;
- Выявление: доступа к информации / уничтожение системы;
- Внешние и внутренние атаки.

Контур обработки целевой информации



- Перекрёстный анализ метаданных.
- Поведенческий мониторинг.
- Информация из внешних источников.

Результаты

- Выявление нетипичного поведения пользователей;
- Выявление нетипичной активности узлов системы;
- Обнаружение пассивных и активных атак;
- Предсказание цели и назначения атак.

О задаче: Обнаружение подвижных подводных объектов

Источник: https://www.youtube.com/watch?v=QqFlZblQJIc

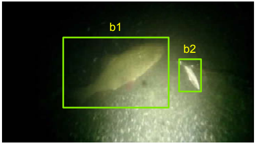
- Разработка системы подводного видения;
- Задача обнаружение рыбы в водоёмах рыбных ферм;
- Сегментация и выделение контура объекта.

Решение и результаты

Простое обнаружение/классификация

Fish: True, Conf.: 0.9992

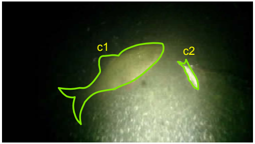
Детектирование



b1. Fish: True, Conf.: 0.9864, Pos.: 0.9452

b2. Fish: True, Conf.: 0.9137, Pos.: 0.8426

Сегментирование экземпляров



c1. Pos.: 0.8846, Compl.: 0.53

c2. Pos.: 0.7921, Compl.: 0.33

Примечания:

- Классификатор может строиться как одноклассовый, либо как многоклассовый.
- Сеть инвариантна к размеру входного изображения и размерам объектов.
- Затраты времени на отработку алгоритмов (GPU NVIDIA Geforce 1080): 12 мс, 27 мс, 194 мс.
- В случае решения задачи «Выделение контура» на выходе сети используется полиноминальный аппроксиматор полигонов.

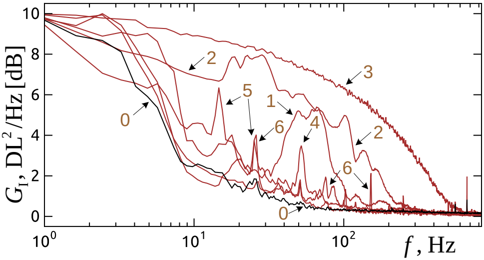
- Решение интегрировано в серийное изделие для подсчёта рыб и управления лазерной системой биоочистки рыбы.

О задаче: Защита магистрального трубопровода

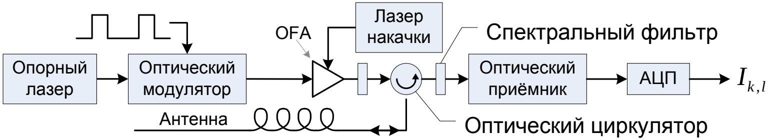
- 0 – Фон;
- 1 – Утечка;
- 2 – Лопата;
- 3 – Экскаватор;
- 4 – Сверление;
- 5 – Сварка;
- 6 – Шлифовка.

- Трубопроводы ПАО «Транснефть»;
- Общая протяжённость МТ – свыше 60 тысяч км;
- Обнаружение протечек;
- Выявление хищений;
- Антитеррористические мероприятия.

О задаче: Защита магистрального трубопровода

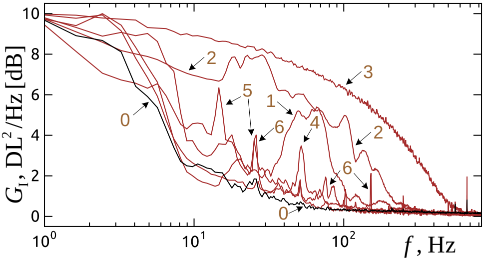


- 0 – Фон;
- 1 – Утечка;
- 2 – Лопата;
- 3 – Экскаватор;
- 4 – Сверление;
- 5 – Сварка;
- 6 – Шлифовка.

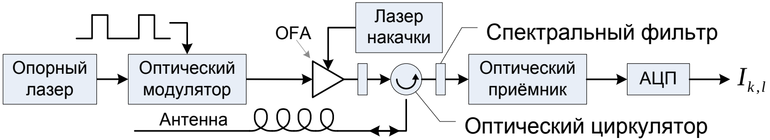


Когерентный волоконно-оптический рефлектометр, функционирующий на основе рассеивания Релея.

О задаче: Защита магистрального трубопровода

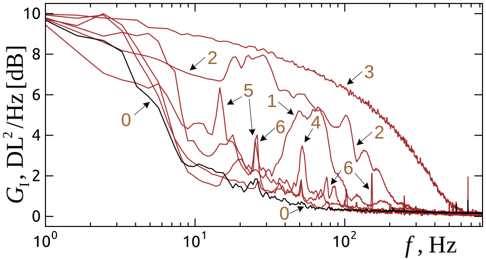


- 0 – Фон;
- 1 – Утечка;
- 2 – Лопата;
- 3 – Экскаватор;
- 4 – Сверление;
- 5 – Сварка;
- 6 – Шлифовка.

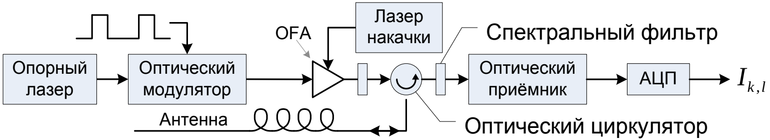


Когерентная рефлектограмма обладает высокой чувствительностью к механическим воздействиям на волокно (обнаруживаются «шевеления» от 70 нм).

О задаче: Защита магистрального трубопровода



- 0 – Фон;
- 1 – Утечка;
- 2 – Лопата;
- 3 – Экскаватор;
- 4 – Сверление;
- 5 – Сварка;
- 6 – Шлифовка.



Анализ время-частотных портретов сигналов позволяет регистрировать и распознавать события происходящие в зоне заложения ВОК.

О задаче: Защита магистрального трубопровода

- 0 – Фон;
- 1 – Утечка;
- 2 – Лопата;
- 3 – Экскаватор;
- 4 – Сверление;
- 5 – Сварка;
- 6 – Шлифовка.

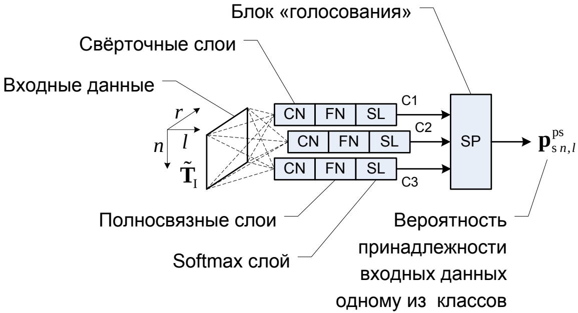
- 3 географически разнесённых трубопровода;
- 14 месяцев активных экспериментов;
- 56 помеховых подклассов;
- 70 ТБ «сырых» данных.

Основные проблемы

- Паразитные модуляции рефлектограммы.
- Локальные участки временной нечувствительности сенсора.
- Существенное изменение отношения сигнал/шум по длине сенсора.
- Рефлектометр теряет информацию о направлении деформации волокна.
- Большое разнообразие и нестационарность сигнальных портретов.
- Интенсивные сигнало-подобные помехи.
- Существенная вариативность структурных характеристик сигналов.

Первичный классификатор сигналов

В классификаторе центральное место занимает глубокая нейронная сеть:



A.V. Makarenko, Deep Learning Algorithms for Signal Recognition in Long Perimeter Monitoring Distributed Fiber Optic Sensors. // The IEEE International Workshop MLSP 2016 / Proceedings – Vietri sul Mare, IIASS, 2016.

Результаты

Получено высокое качество обнаружения и распознавания полезных сигналов:

Таблица: Классификатор C1: матрица ошибок, тестовое множество.

Event class		Предсказания, %						
		0	1	2	3	4	5	6
Reference, 100%	0	**91.80**	3.96	0.64	0.14	2.34	0.42	0.70
	1	13.78	**79.24**	5.38	0.02	1.14	0.28	0.16
	2	4.24	3.34	**91.30**	0.14	0.66	0.00	0.32
	3	2.36	0.10	0.28	**97.08**	0.12	0.00	0.06
	4	8.68	0.38	0.22	0.00	**89.80**	0.28	0.64
	5	3.34	0.14	0.02	0.00	0.30	**94.40**	1.80
	6	3.42	0.12	0.14	0.00	0.70	0.82	**94.80**
Prec.		71.93	90.79	93.18	99.69	94.47	98.13	96.26
F1 sc.		80.66	84.62	92.23	98.37	92.07	96.23	95.53

- Предыдущие решения (по утечке) давали менее 45% правильно распознанных блоков данных;
- Система внедрена на реальном нефтепроводе и контролирует участок протяжённостью свыше 2 500 км;

Outline section

Контрольная работа

Задание для слушателей:

1. Изучить понятие бифуркационная диаграмма.
2. Исследовать отображение: $s_{k+1} = \lambda\, s_k^2\, (1 - s_k^2)$.
3. Для отображения построить бифуркационную диаграмму.
4. Для отображения построить зависимость показателя Ляпунова от параметра λ.