# Мультиагентные технологии и оптимизация в условиях неопределенности

Олег Николаевич Граничин

Санкт-Петербургский государственный университет

XIX конференция молодых ученых
“Навигация и управление движением”
14 марта 2017

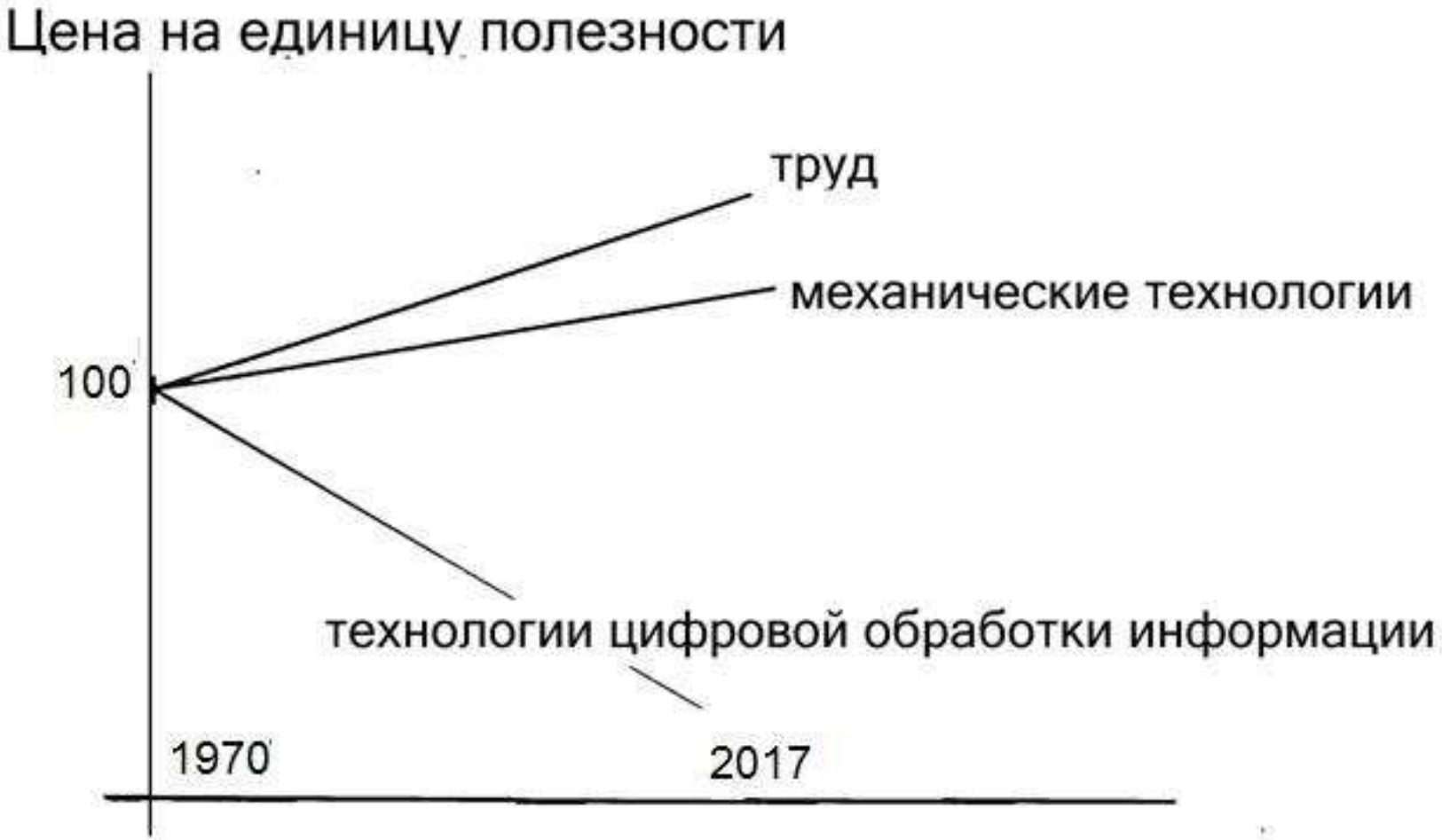
# План


1. Введение (Introduction)
2. Мультиагентные технологии (Multiagent technologies)
   - Планирование группы БПЛА (UAV Group Planning)
   - Балансировка загрузки (Load Balancing)
   - Самолет с “перышками” (Airplane with “Feathers”)
3. Оптимизация в условиях неопределенностей (Optimization under Unsertanties)
   - Рандомизированные алгоритмы в управлении и при извлечении знаний (Randomized algorithms in automatic control and data mining)
4. Заключение (Conclusion)

# План


1. Введение (Introduction)
2. Мультиагентные технологии (Multiagent technologies)
   - Планирование группы БПЛА (UAV Group Planning)
   - Балансировка загрузки (Load Balancing)
   - Самолет с “перышками” (Airplane with “Feathers”)
3. Оптимизация в условиях неопределенностей (Optimization under Unsertanties)
   - Рандомизированные алгоритмы в управлении и при извлечении знаний (Randomized algorithms in automatic control and data mining)
4. Заключение (Conclusion)

# Цифровые технологии в сравнении с “механическими”



# Сдвиги в технологиях XXI в.

| Стадии | Ключевые ресурсы | Распре-деление | Область | Факторы успеха |
|---|---|---|---|---|
| Урбанизация<br>Индустриальная экономика<br>Технологии массовых продуктов | Капитал | Транспорт | Региональная | Экономия при масштабировании |
| ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Глобализация общества<br>Экономика знаний<br>Цифровые технологии | Знания / Информация | Цифровые сети | Глобальная | **Адаптивность** |

- Степень сложности в экономике и обществе растет

# Следствия роста сложности

Для живущих и работающих в сложных условиях частых непредсказуемых разрушительных событий:

- хорошо структурированные общества и бизнесы не могут реагировать быстро на непредвиденные события
- неопределенности генерируют тревогу
- неопределенности дают возможности

# Информационные технологии

# Усложнение сети взаимодействий

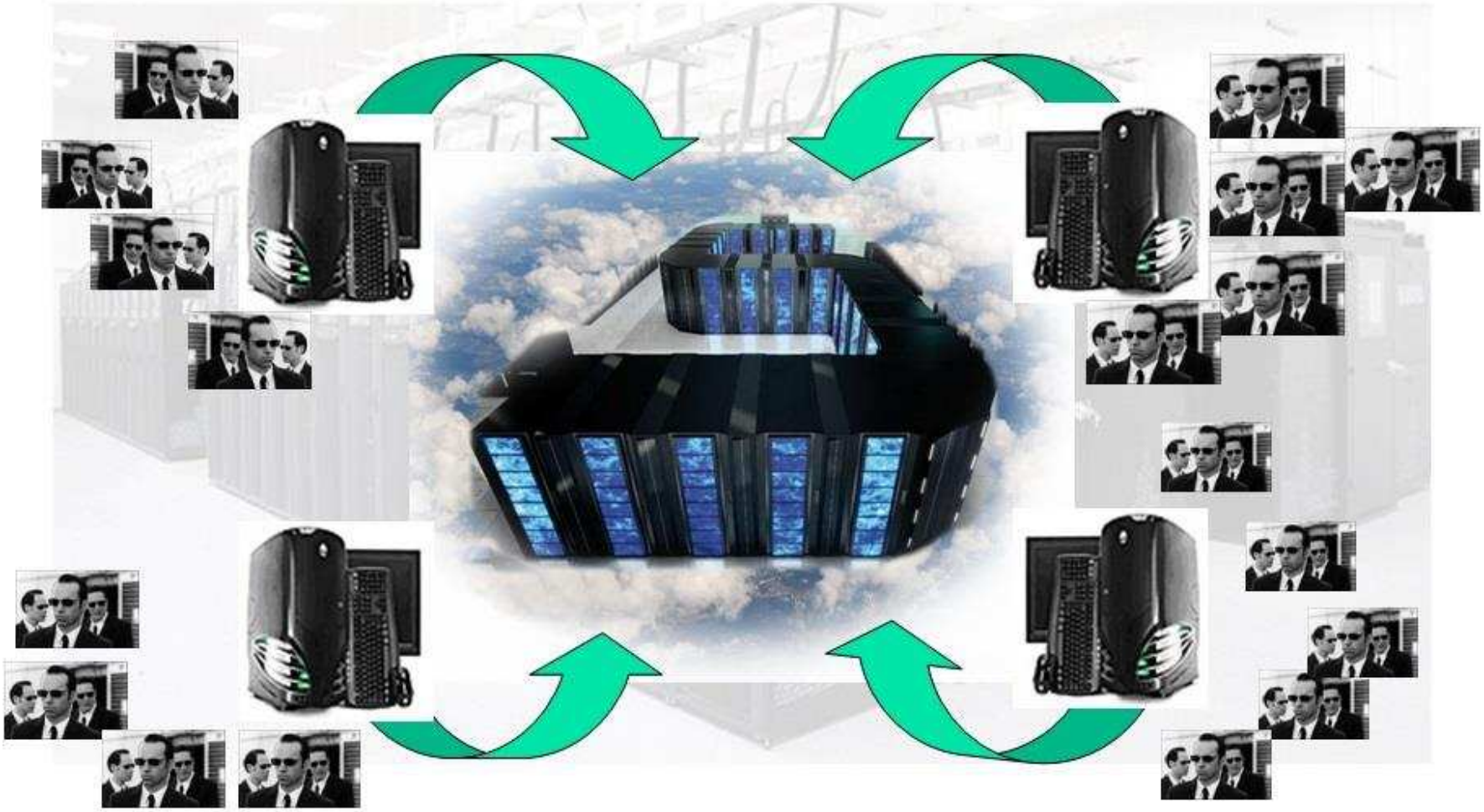
# Усложнение сети взаимодействий

# Усложнение сети взаимодействий

# Усложнение сети взаимодействий

# Усложнение сети взаимодействий

# Время сбора и подготовки данных критично

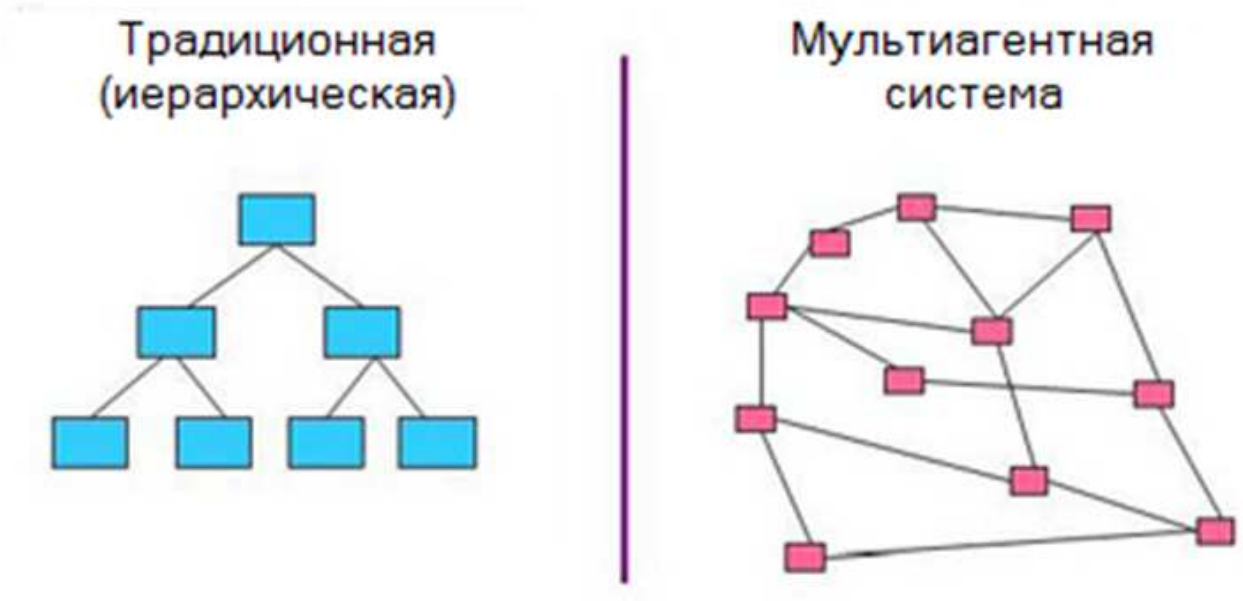


# Интеллектуальные встроенные системы

# План


1. Введение (Introduction)
2. Мультиагентные технологии (Multiagent technologies)
   - Планирование группы БПЛА (UAV Group Planning)
   - Балансировка загрузки (Load Balancing)
   - Самолет с “перышками” (Airplane with “Feathers”)
3. Оптимизация в условиях неопределенностей (Optimization under Unsertanties)
   - Рандомизированные алгоритмы в управлении и при извлечении знаний (Randomized algorithms in automatic control and data mining)
4. Заключение (Conclusion)

# Мультиагентные системы (начиная с 1990х)




В качестве основы были взяты достижения в следующих областях:

- параллельные вычисления (Parallel Computing)
- распределенное решение задач (Distributed Problem Solving)
- системы искусственного интеллекта (Artificial Intelligence)

# Агент

Агент — некто или нечто, прикладывающее усилия для достижения эффекта

- совершает действия
- действует автономно и рационально

Агент помещен во внешнюю среду, с которой он способен взаимодействовать

# Агент

Объекты и события реального мира
Другие агенты
Познавательный фильтр
(знания, интеллектуальные способности, ценности, отношения)
АГЕНТ

# Рациональность агента

У каждого агента есть:

- убеждения (beliefs) — представление о текущем состоянием среды
- желания (desires) — состояние, в которое агент стремится
- намерения (intentions) — множество избранных, совместимых и достижимых желаний

Интеллектуальный агент обладает следующими свойствами:

- реактивность (reactivity) — ощущает внешнюю среду и реагирует на изменения в ней, совершая действия, направленные на достижение целей
- проактивность (pro-activeness) — показывает управляемое целями поведение, проявляя инициативу, совершая действия направленные на достижение целей
- социальность (social ability) — взаимодействует с другими сущностями внешней среды (другими агентами, людьми и т.д.) для достижения целей

# Адаптивность агента

Сложность формулирования содержательных практически значимых задач и невозможность априорного точного задания всех условий функционирования выдвигают адаптивные постановки проблем, выделяя такую особенность агентов, как

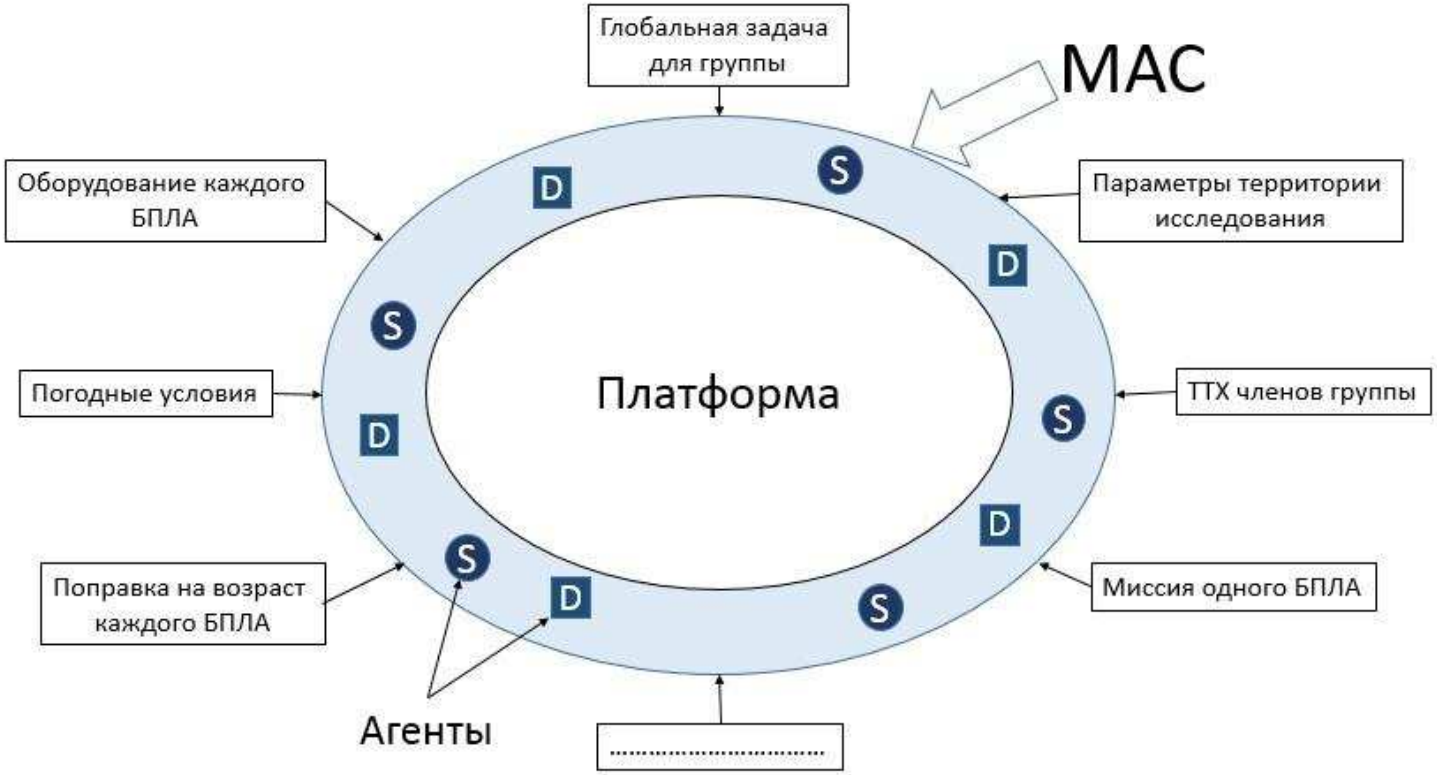
- адаптивность — способность автоматически приспосабливаться к неопределенным и изменяющимся условиям в динамической среде

# Планирование группы БПЛА

Централизованный подход (классический)

При увеличении потока новой информации загрузка блока “планировщик” растет

# Децентрализованный подход (МАС)




Новая информация попадает в систему, агенты ее “расхватывают” и используют. Существуют два типа агентов которые “ищут” друг друга

# Согласованное решение

Две группы агентов:

- агент потребности — предоставляет в систему потребность на выполнение задания
- агент возможности — предоставляет в систему параметры и характеристики БПЛА в настоящий момент времени

Согласованное решение строится эволюционно и итеративно агентами потребностей и возможностей посредством переговоров и взаимных уступок от грубого и быстрого решения до сложного “равновесия”, когда все агенты довольны своим состоянием или не могут его улучшить

# Преимущества и недостатки MAC

Преимущества над централизованной системой:

- можно добавлять новые входные параметры без перестроения системы планирования
- можно переносить в микрокомпьютеры каждого БПЛА для адаптивного перераспределения заданий непосредственно до вылета и в процессе полета
- система реагирует на все изменения параметров непосредственно в ходе планирования
- можно добавлять и убирать членов группы в процессе планирования
- исключается распределительный блок системы

Недостаток:

- сложность разработки системы по сравнению с централизованным подходом

# Прототип системы планирования

Задаваемые параметры

- размер территории выполнения задачи
- размер квадрата наблюдения БПЛА “за единицу времени” (например, квадрат 50x50 м)
- перекрытие фотоматериалов местности (при задачи картирования)
- скорость выполнения-наблюдения подзадачи-квадрата (определяется скоростью БПЛА, например, 50 м/с)
- время выполнения задачи (сейчас не задается)
- количество БПЛА в группе

Критерии:

- наблюдаемость квадратов —- менее наблюдаемые за предыдущие периоды планирования квадраты более “выгодные” при выборе;
- коммуникационная доступность других БПЛА — вынуждает БПЛА при планировании держать некоторое условно оптимальное расстояние до всех других БПЛА

# Балансировка загрузки сети

Пусть $x_t^i = q_t^i / p_t^i$, где

- $q_t^i$ — очередь заданий агента $i$ в момент времени $t$
- $p_t^i$ — производительность агента $i$ в момент времени $t$

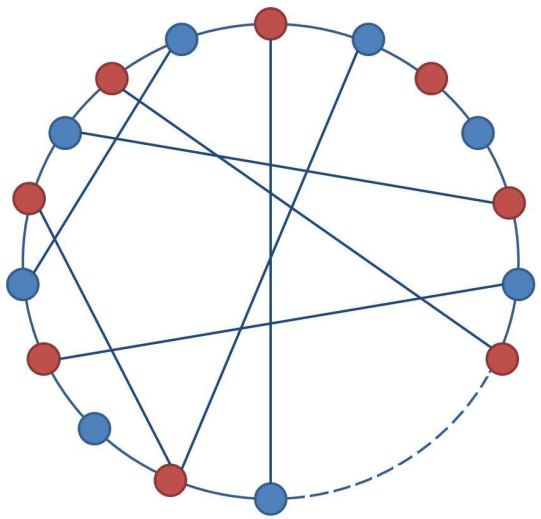
Динамическая модель:

$$x_{t+1}^i = x_t^i + f_t^i + u_t^i,\ i \in N = \{1, \ldots, n\},$$

или

$$q_{t+1}^i = q_t^i - p_t^i + z_t^i + p_t^i u_t^i;\ \ i \in N,\ t = 0, 1, \ldots$$

Пример топологии сети:



# Оптимальное решение

IEEE TAC 2015, АиТ 2015 (Граничин, Амелина)

$$z_t = \sum_{i=1}^{n} \bar{u}_i, \ \bar{u}_i = ?$$

$$T(\mathbf{u}) = \max_{i \in N} \ time_i(\bar{u}_i) \to \min_{\mathbf{u}}$$

Согласованность:

$$p_1 \bar{u}_1 = p_2 \bar{u}_2 = \cdots = p_n \bar{u}_n$$

Функционал среднего риска (Потенциал Лапласа):

$$F(\mathbf{u}) = \sum_{i,j=1}^{m} a_t^{i,j} (time_t^i - time_t^j)^2 \ \to \ \min_{\mathbf{u}}$$

# Консенсусное управление

IEEE TIT 2015 (Амелина, Фрадков и др.)
Динамика агентов:

$$x_{t+1}^i = f(x_t^i, u_t^i),\ i \in N = \{1, \ldots, n\}$$

Согласованное поведение:

$$x_t^i \approx x_t^j,\ i,j \in N$$

Наблюдения:

$$y_t^{i,j} = x_{t-d_t^{i,j}}^j + w_t^{i,j},\ j \in N_t^i$$

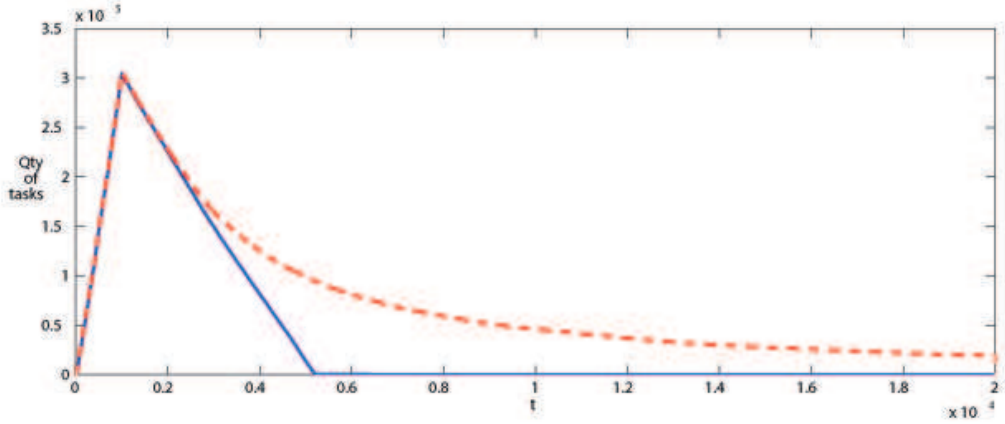
Протокол локального голосования:

$$u_t^i = \gamma \sum_{j \in \bar{N}_t^i} a_t^{i,j}(y_t^{i,j} - y_t^{i,i})$$

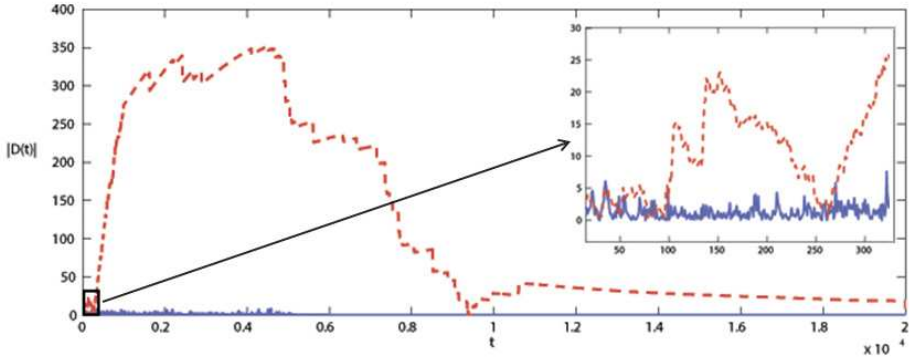
# Моделирование

- $n = 1024$
- Число заданий $10^6$ (поступают на интервале от 1 до 2000)

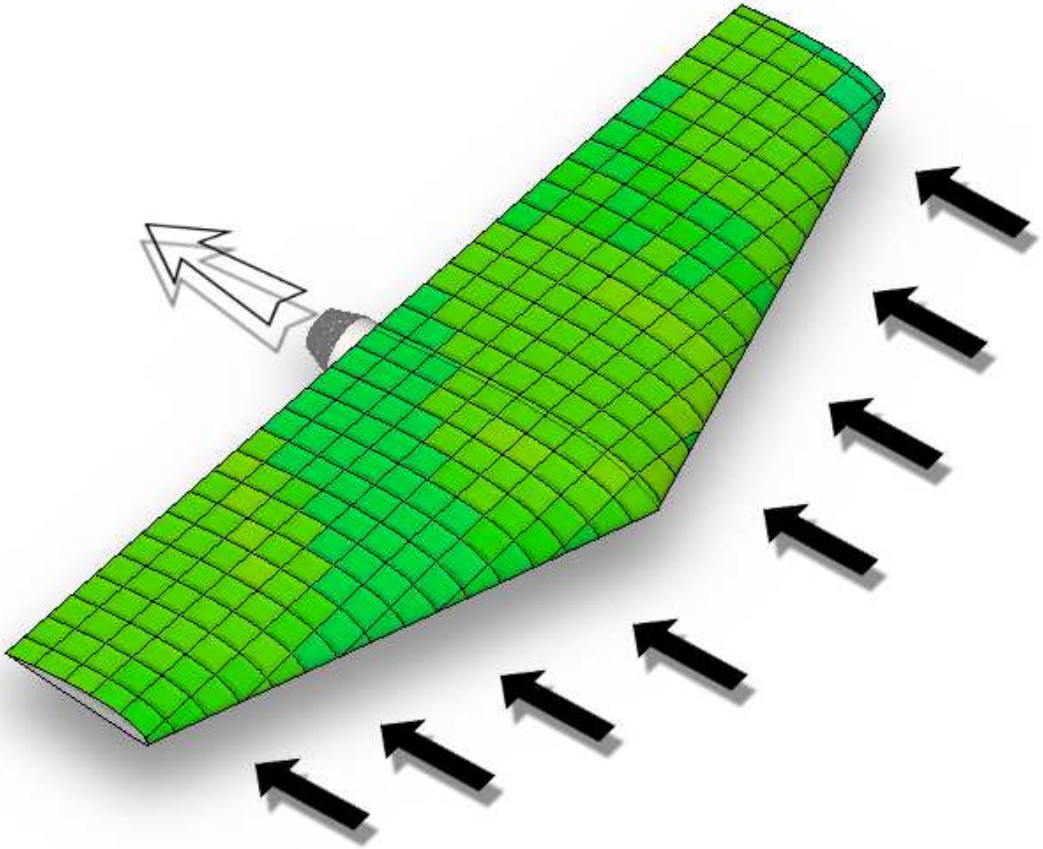
Количество заданий в очередях:



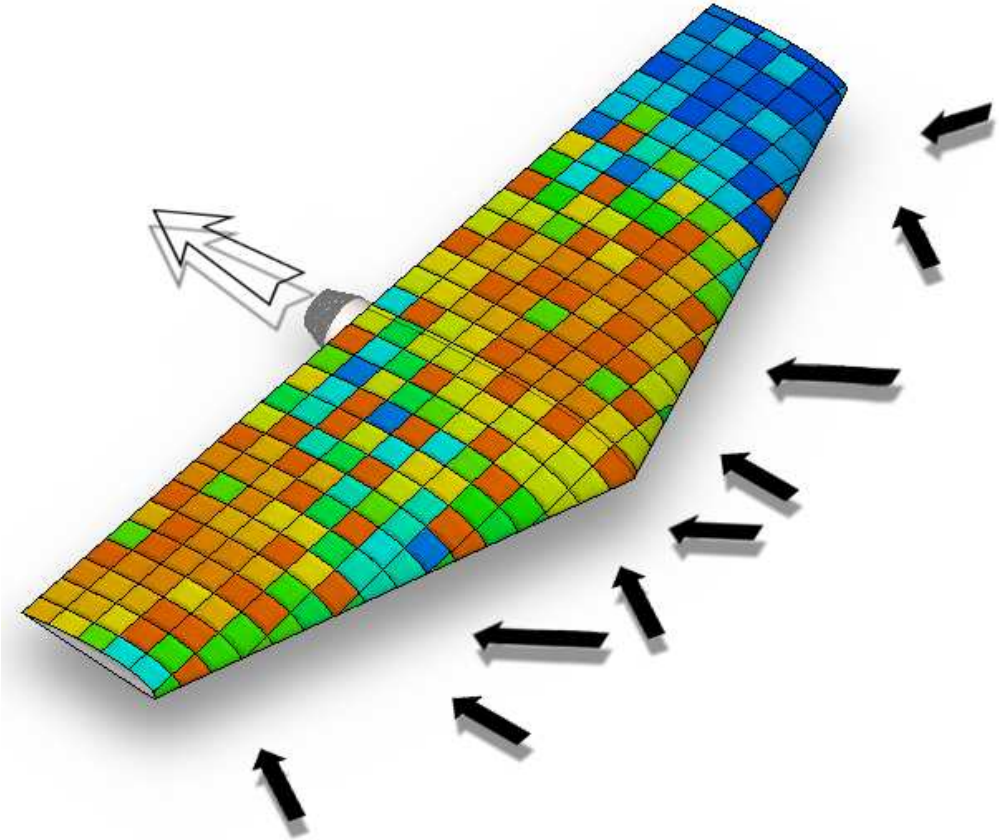

Среднее отклонение от консенсуса:



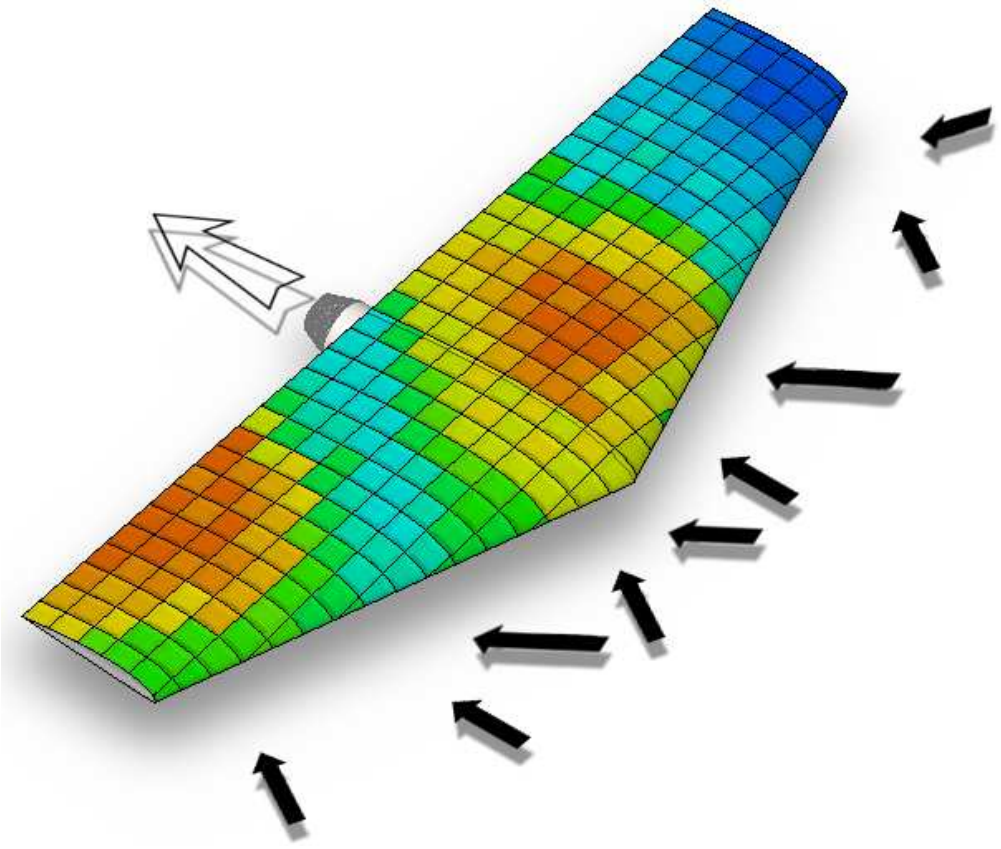
# Самолет с “перышками” в ламинарном потоке



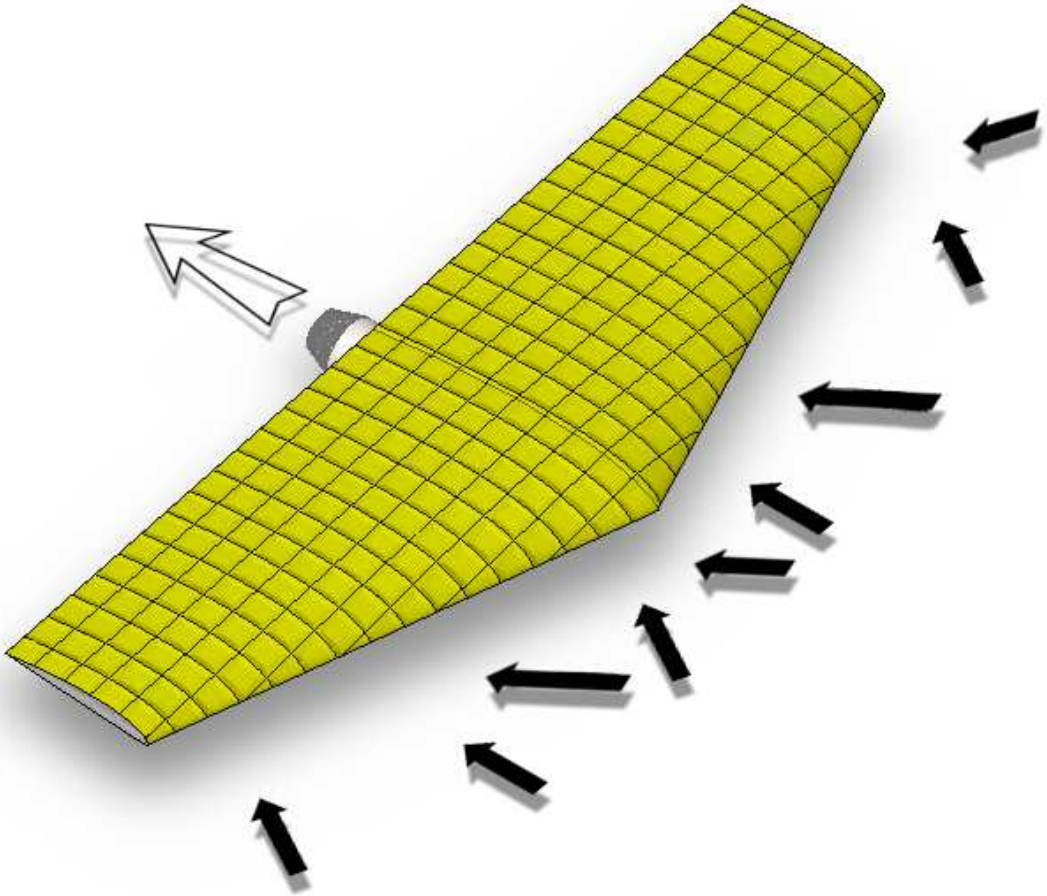
# Турбулентный поток



# Кластеризация “перьев”



# “Выравнивание” давлений в турбулентном потоке ветра



# План


1. Введение (Introduction)
2. Мультиагентные технологии (Multiagent technologies)
   - Планирование группы БПЛА (UAV Group Planning)
   - Балансировка загрузки (Load Balancing)
   - Самолет с “перышками” (Airplane with “Feathers”)
3. Оптимизация в условиях неопределенностей (Optimization under Unsertanties)
   - Рандомизированные алгоритмы в управлении и при извлечении знаний (Randomized algorithms in automatic control and data mining)
4. Заключение (Conclusion)

# Принятие решений в реальном времени

Критические факторы:

- скорость — надо принять и реализовать решение до наступления следующего “разрушительного” события
- интеллект (природный и/или искусственный) — надо достичь цели в условиях неопределенности

Критическая технологии:

- Стохастическое программирование и мультиагентные технологии для поддержки (или замены) процесса принятия решения человеком

# Стохастическое программирование

Стохастичность — греческое слово ($\sigma\tau o\chi\alpha\sigma\tau\iota\kappa\acute{\varepsilon}\zeta$)

- целиться, метить (целиться во что (в кого)-либо)
- стремиться к тому, чтобы судьями были самые влиятельные люди
- применяться, приспособляться
- умозаключать, судить, догадываться, разгадывать (догадываться о том, что требуется; заключать на основании чего-либо; путем догадок)

*Стохастическое программирование* — подход в математическом программировании, позволяющий учитывать неопределённость в оптимизационных моделях

# Интеллект

Интеллект — это то, что:

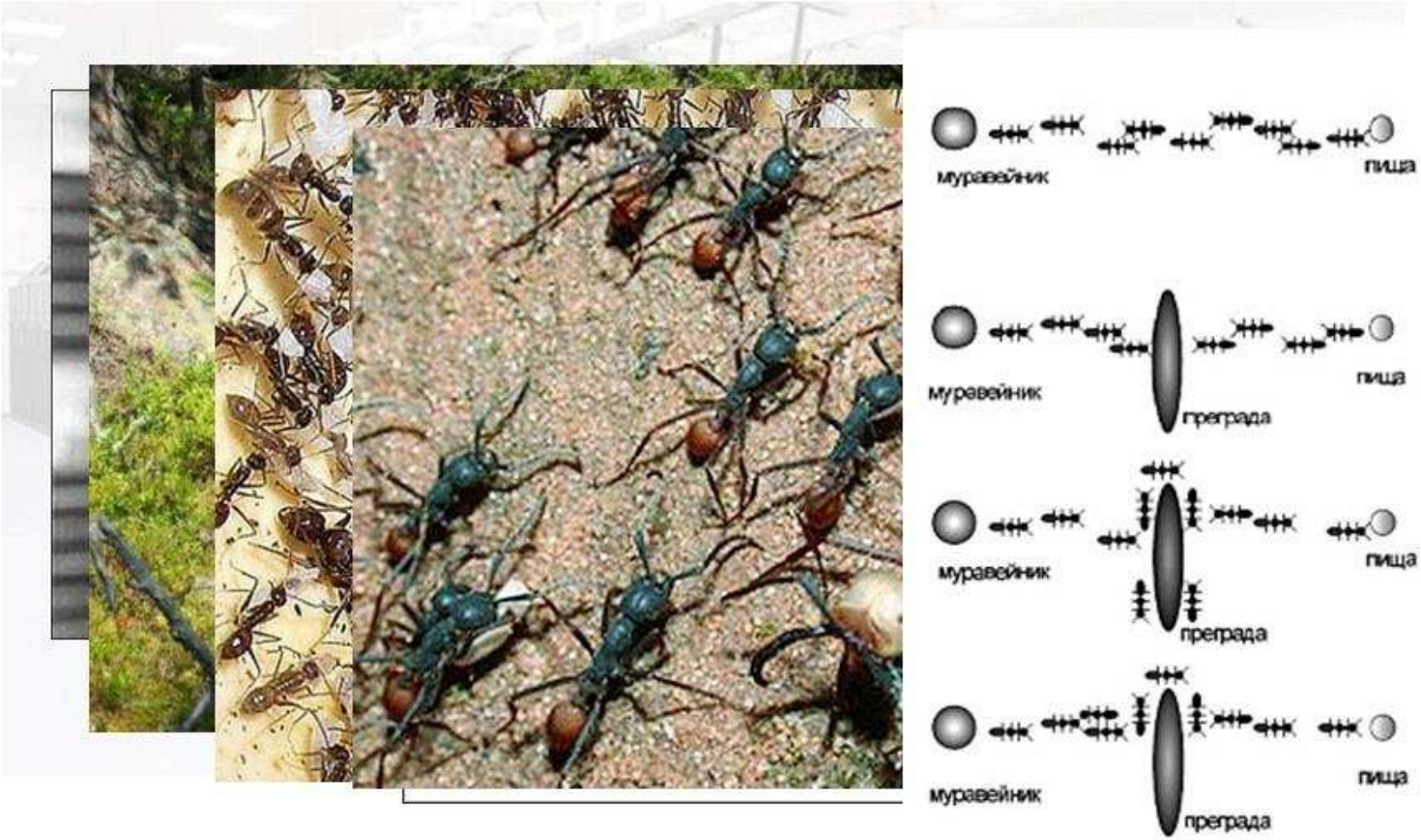
- отличает человека от компьютера, действующего строго по заложенной в него программе
- позволяет человеку ориентироваться в сложной обстановке, иметь дело с нечетко поставленными задачами, адаптироваться к меняющимся условиям

# А есть ли интеллект у колонии муравьев?

# А есть ли интеллект у колонии муравьев?

# А есть ли интеллект у колонии муравьев?

# А есть ли интеллект у колонии муравьев?



# Эмерджентный интеллект

Эмерджентный интеллект (интеллектуальный резонанс, интеллект роя) — это

- проявление неожиданных свойств “квазиразумного” поведения, которыми обладает система, но не обладает ни один из входящих в нее отдельных элементов

Ключевая особенность —

- динамика и непредсказуемость процесса принятия решений

# Стохастичность и вычисления

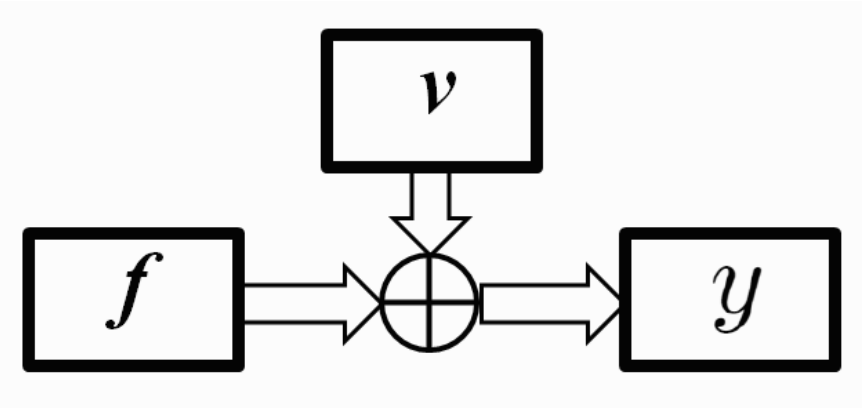
- «Кто нам мешает, тот нам поможет!»

- Стохастичность является основой самоорганизации

# Произвольные внешние помехи

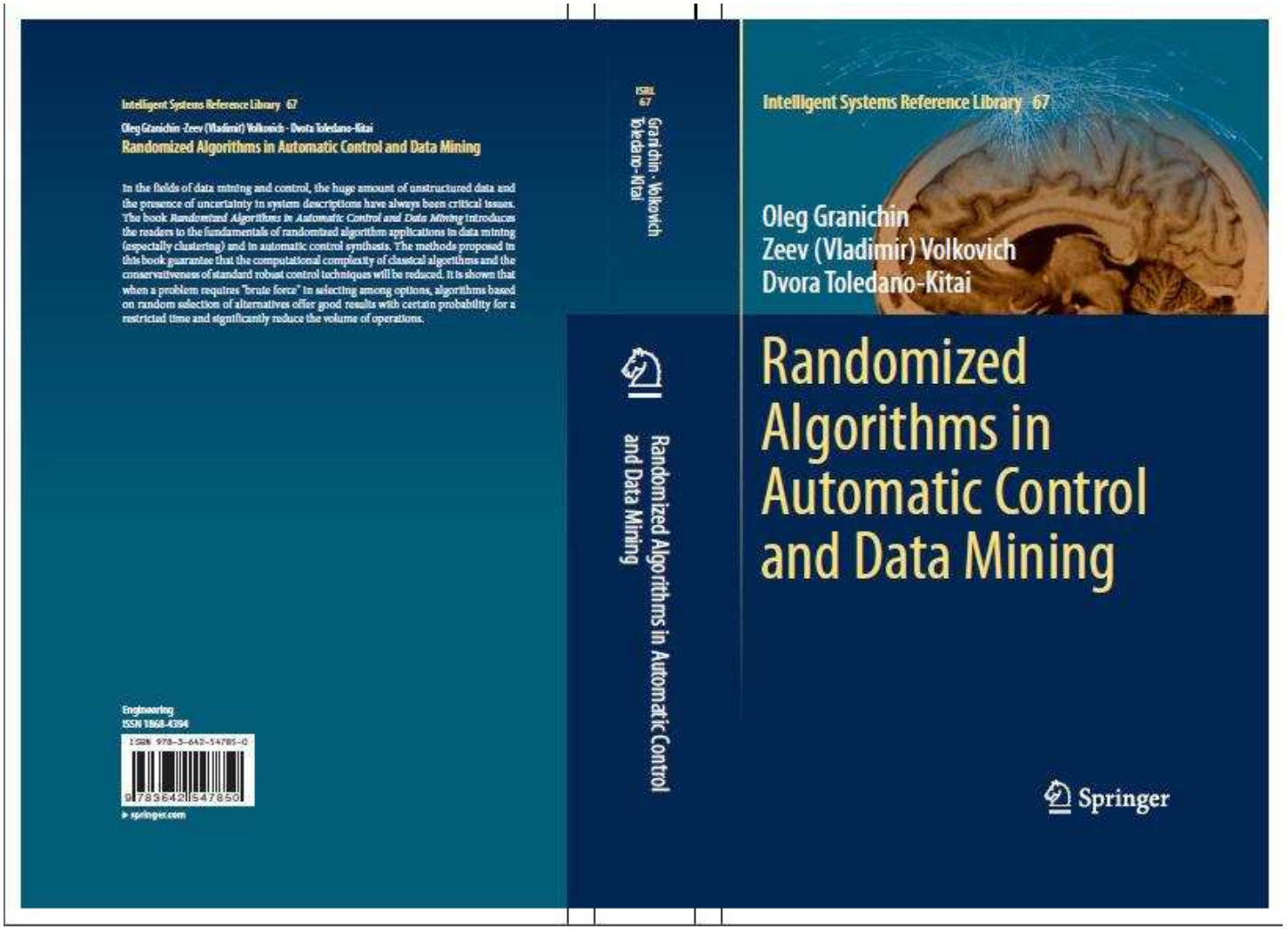
Если сигнал $f = u\theta^\star$ регистрируется с помехой $v$, тогда "мгновенные" наблюдения $y_t$:

$$y_t = f_t + v_t. \tag{1}$$




- $v = 0$.
- $v \approx 0$.
- $v_t \to 0$ as $t \to \infty$.
- $v_t$, $t = 1, \ldots, T$, — i.i.d., $Ev_t = 0$ и $\sigma_v^2 < \infty$
- $v_t$ — произвольные внешние помехи

# Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining




Springer, 2015

# Замечательные свойства

- Существенное сокращение числа операций
- Снижение негативного влияния систематических ошибок
- Точность обычно не существенно зависит от размерности данных

# Рандомизированный и байесовский подходы

Альтернативный вероятностный подход — байесовский, при котором помехам $v_t$ "приписывается" распределение вероятностей $Q$.
НО рандомизированный и байесовский подходы совершенно различны с практической точки зрения!!!
При байесовском подходе $Q$ описывает вероятности значений $v_t$, т. е. выбор $Q$ — часть модели задачи.
В противоположность, вероятность $P$ в рандомизированном подходе выбирается искусственно. $P$ существует только в нашем алгоритме, следовательно, нет традиционной проблемы "плохой модели" как это часто бывает с $Q$ при байесовском подходе.

# Оптимизация функционала среднего риска

Пусть $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots \in \mathbb{R}^d$ — точки измерений

$$y_t = f(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t) + v_t, \tag{2}$$

где $f : \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^p \to \mathbb{R}$,
$\mathbf{w}_t$ — случайный вектор, $v_n$ — произвольная внешняя помеха.
Задача стохастического программирования:

$$F(\mathbf{x}) = \int f(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \mathrm{P}(d\mathbf{w}) \to \min_{\mathbf{x}}. \tag{3}$$

# Конечно-разностный подход

Процедура Кифера-Вольфовица
Число наблюдений на итерации $M = 2d$

$$\widehat{\theta}_0 \in \mathbb{R}^d$$

$$\widehat{\theta}_n = \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{2\beta_n}(\mathbf{Y}_n^+ - \mathbf{Y}_n^-),$$

$$x_n^{(i,\pm)} = \widehat{\theta}_{n-1} \pm \beta_n e_i$$

$$\mathbf{Y}_n^{\pm} = \begin{pmatrix} f(x_n^{(1,\pm)}, w_n^{(1,\pm)}) + v_n^{(1,\pm)} \\ f(x_n^{(2,\pm)}, w_n^{(2,\pm)}) + v_n^{(2,\pm)} \\ \vdots \\ f(x_n^{(d,\pm)}, w_n^{(d,\pm)}) + v_n^{(d,\pm)} \end{pmatrix}$$

# Рандомизированные алгоритмы стохастической аппроксимации

Сокращение числа наблюдений до 1 или 2 вместо $2d$ (!)

Алгоритм с одним измерением

$$\mathbf{x}_n = \widehat{\theta}_{n-1} + \beta_n \Delta_n, \;\; \Delta_n = \begin{pmatrix} \pm 1 \\ \pm 1 \\ \vdots \\ \pm 1 \end{pmatrix}$$

$$y_n = f(\mathbf{x}_n, \mathbf{w}_n) + v_n$$

$$\widehat{\theta}_n = \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{\beta_n} \mathscr{K}_n(\Delta_n) y_n$$

Алгоритм с двумя измерениями

$$\mathbf{x}_n^{\pm} = \widehat{\theta}_{n-1} \pm \beta_n^{\pm} \Delta_n, \; y_n^{\pm} = f(\mathbf{x}_n^{\pm}, \mathbf{w}_n^{\pm}) + v_n^{\pm}$$

$$\widehat{\theta}_n = \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{\beta_n^{+} + \beta_n^{-}} \mathscr{K}_n(\Delta_n)(y_n^{+} - y_n^{-})$$

# Преимущества алгоритма

- Состоятельность при почти произвольных внешних помехах [Granichin, 1989, 1992, 2002]
- Асимптотически-оптимальная скорость сходимости [Polyak and Tsybakov, 1990]
- Минимальное число наблюдений на итерации [Spall, 1992, 1997]
- Применимость в задаче об отслеживании изменений параметров [Granichin et al., 2009, 2015]
- "Естественная" реализация на квантовом компьютере [Granichin, Sysoev, 2006]

# Обоснование "псевдоградиентности" при произвольных внешних помехах

$$E\{\widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{\beta_n}\Delta_n y_n | \mathscr{F}_{n-1}\} =$$

$$= \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{\beta_n}(E\{\Delta_n f(\mathbf{x}_n)|\mathscr{F}_{n-1}\} + E\{\Delta_n\}E\{v_n|\mathscr{F}_{n-1}\}) =$$

$$= \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{\beta_n}(E\{\Delta_n f(\widehat{\theta}_{n-1} + \beta_n\Delta_n)|\mathscr{F}_{n-1}\} \approx$$

$$\approx \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{\beta_n}(E\{\Delta_n f(\widehat{\theta}_{n-1}) + \frac{\beta_n\Delta_n\Delta_n^{\mathrm{T}}\nabla f(\widehat{\theta}_{n-1})}{2}|\mathscr{F}_{n-1}\} =$$

$$= \widehat{\theta}_{n-1} - \frac{\alpha_n}{2}\nabla f(\widehat{\theta}_{n-1})$$

# Рандомизированные алгоритмы и квантовые вычисления

Все известные эффективные квантовые алгоритмы выполняются по следующей схеме:

- сначала подготавливается “суперпозиция” входов
- потом происходит обработка входов и
- измерение результата

# Выполнение алгоритма SPSA на квантовом компьютере

$$\mathbf{u} = \frac{1}{2^{\frac{d}{2}}} \sum_{\Delta_i \in \{-1,+1\}^d} |\widehat{\mathbf{x}} + \beta \Delta_i\rangle = \mathbf{H}_\beta |\widehat{\mathbf{x}}\rangle$$

$$\mathbf{U}_f |\mathbf{u}\rangle |0\rangle = \frac{1}{2^d} \sum_{\Delta_i \in \{-1,+1\}^d} |\widehat{\mathbf{x}} + \beta \Delta_i\rangle |f(\widehat{\mathbf{x}} + \beta \Delta_i)\rangle$$

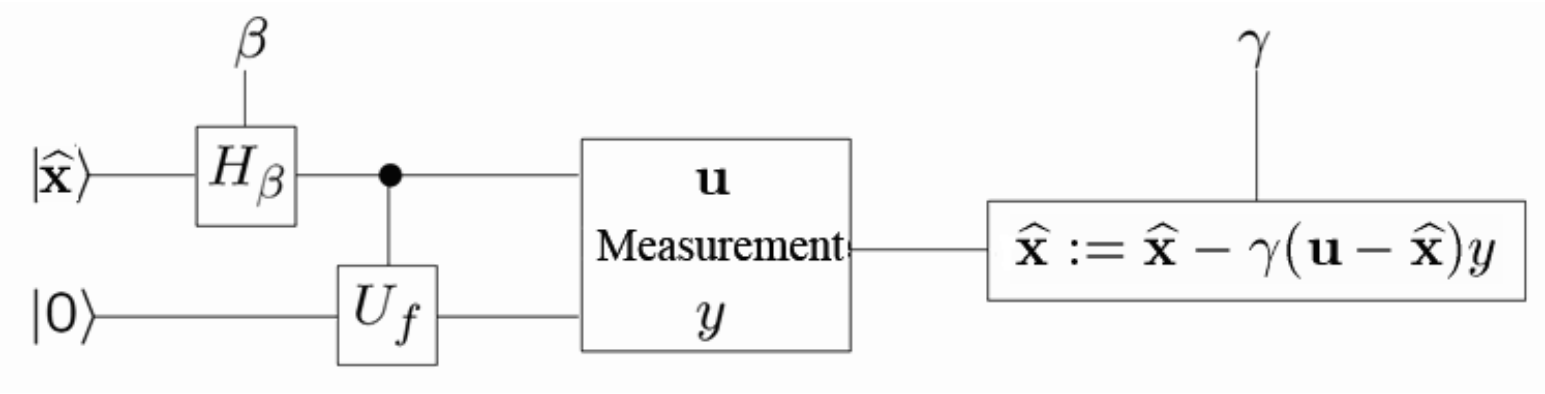



Рис.: Квантовая цепь для вычисления градиента “на лету”.

# План


1. Введение (Introduction)
2. Мультиагентные технологии (Multiagent technologies)
   - Планирование группы БПЛА (UAV Group Planning)
   - Балансировка загрузки (Load Balancing)
   - Самолет с “перышками” (Airplane with “Feathers”)
3. Оптимизация в условиях неопределенностей (Optimization under Unsertanties)
   - Рандомизированные алгоритмы в управлении и при извлечении знаний (Randomized algorithms in automatic control and data mining)
4. Заключение (Conclusion)

Спасибо за внимание!