

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНДЕКСА ЦЕНТРАЛЬНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

**В.А. Ушаков**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)*  
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67  
E-mail: ushakov@guap.ru

**Ключевые слова:** оптимальное управление, кибернетика, подвижный объект, статическая модель, динамическая модель, информационный процесс, маломассоразмерный космический аппарат, специальное модельно-алгоритмическое обеспечение.

**Аннотация.** Приведено формальное и содержательное описание разработанных и внедренных новых комбинированных моделей с дополнительными алгоритмами оптимального планирования и диспетчеризации информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Отмечены достоинства указанного подхода в сравнении с применением логико-динамическими моделями. Целью статьи является исследование влияния индекса центральности на объемы информации при взаимодействии подвижных объектов. Приведен пример с группировкой маломассоразмерными космическими аппаратами для решения задачи оптимального планирования информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов. Даны практические рекомендации по учету индекса центральности при оптимальном планировании информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов.

## 1. Введение

Сегодня решение задач планирования и управления процессами обработки и передачи информации при взаимодействии подвижных объектов (ПДО), и разработка специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО) для автоматизированного решения указанных задач имеет огромную актуальность. Ранее опубликованные публикации, посвященные применению логико-динамических моделей планирования и диспетчеризации, основанные на использовании результатов исследования операций и теории оптимального управления [1-4], доказали их эффективность для стационарных предметных областей [5, 6]. В то же время их использование является весьма трудоемким и сложным в реализации процессом.

Опираясь на принципы кибернетики [7-10] в [11-13] предложено полимодельное описание, которое включает в себя статическую (СМ) и детерминированную динамическую (ДМ) модели планирования (программного управления) информационными процессами (ИнП) при взаимодействии группировки (Гр) ПДО. Исследуемые ИнП включают в себя процессы приема, передачи, обработки, хранения данных. Пространственную составляющую предлагается описывать с помощью СМ. При заданных интервалах структурного постоянства (топологии сети) Гр ПДО

информационные операции распределяются между ресурсами без привязки их ко времени. Задача планирования решается на СМ. Временную составляющую предлагается описывать с помощью ДМ. Планируемые на СМ операции, являющиеся частью ИнП, привязаны к конкретным ресурсам и времени. Задача планирования решена на ДМ. Данный подход позволил преодолеть эти недостатки.

## 2. Разработанные комбинированные модели оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов

Для описания СМ были введены следующие множества и ограничения. Пусть  $A$  – ПДО,  $i, j$  – индексы ПДО,  $n$  количество ПДО;  $\rho$  – тип данных (поток), для которого параметр  $P$  – граничное значение переменной  $\rho$ , которая задает количество типов данных (потоков). Структура и характеристики ПДО изменяются в дискретные моменты времени, разбивающие весь интервал времени (интервал планирования) на подынтервалы ( $l$ ), соответствующие постоянству структуры Гр ПДО.

Разработанная СМ планирования ИнП при взаимодействии ПДО:

$$(1) \quad \alpha_1 I_1 - \alpha_2 I_2 = I_0 \rightarrow \max_{\vec{x} \in \Delta},$$

где  $I_1 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L g_{j\rho l}$ ,  $I_2 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L z_{j\rho l}$ ,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ,  $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ ,

$$(2) \quad \Delta = \left\{ \begin{array}{l} \vec{x} | \sum_{\rho \in P} x_{j\rho l}^{(bx)} = (\sum_{i \in M_{jl}^{(+)}} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_{jl}^{(-)}} x_{ij\rho l}) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} + z_{j\rho l}; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}; \quad 0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq V_j; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}; \quad 0 \leq z_{j\rho l}; \quad g_{j(\rho+1)l} = s_\rho g_{j\rho l}; \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right\},$$

где  $\vec{x}$  – это вектор оптимизированных параметров, определяющий план выполнения операций, входящих в ИнП и включающий в качестве компонентов переменные (параметры), характеризующий объемы переданных, принятых, сохраненных, обработанных, потерянных данных (информации).

Поясним значения характеристик ПДО:  $V_j$  – максимально возможный объем запоминающего устройства (ЗУ) в  $A_j$  ПДО;  $\varphi_{jl}$  – максимальная интенсивность обработки данных в  $A_j$  ПДО;  $\psi_{ijl}$  – максимальная интенсивность передачи данных между  $A_i$  и  $A_j$  ПДО. Для проведения дальнейшей формализации добавим следующие переменные:  $x_{jl}^{(bx)}$  – количество данных, поступивших из внешней среды в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м подынтервале времени;  $x_{ij\rho l}$  – количество данных, переданных из  $A_i$  ПДО в  $A_j$   $\rho$ -го типа на  $l$ -м участке времени;  $y_{j\rho l}$ ,  $g_{j\rho l}$ ,  $z_{j\rho l}$  – «переменные, характеризующие каждая соответственно: объем данных  $\rho$ -го типа на  $l$ -м подынтервале, который может быть записан (согласно плану работы Гр ПДО) в ЗУ  $A_j$  ПДО, либо обработан (согласно характеристикам аппаратуры) в  $A_j$  ПДО, либо потерян в  $A_j$  ПДО (из-за ограниченной пропускной способности каналов связи). Кроме того, пусть  $M_{jl}^-$  – множество номеров ПДО, из которых в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м участке времени передаются данные, а  $M_{jl}^+$  – множество номеров ПДО, в которые передаются данные из  $A_j$  ПДО на  $l$ -м подынтервале времени;  $s_\rho$  – коэффициент, характеризующий степень обработки данных, в ходе которой они становятся информацией.

Из-за ограниченности в объеме статьи приведем обобщенное описание ДМ.

$$(3) \quad M^{(1)} = \left\{ \begin{array}{l} u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \mid \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \quad \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \\ 0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \in \{0,1\}; \\ \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad \sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)}; \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right\},$$

$$(4) \quad M^{(2)} = \left\{ \begin{array}{l} u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \mid \dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = u_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \quad \dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \\ 0 \leq u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{j\rho l}^{(n,2)} \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \quad \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \in \{0,1\}; \\ \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad \sum_{\rho=1}^P u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{jl}^{(2)}; \\ j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right\}.$$

Подробное описание указанных моделей приведено в [11, 12].

### 3. Исследование влияния индекса центральности на объемы информации при взаимодействии подвижных объектов

Проведем исследование влияния индекса центральности с применением разработанного СМАО планирования ИнП при взаимодействии ПдО. Для обозначения индекса центральности будем использовать  $\nu$ . В качестве примера рассмотрим Гр маломассоразмерных космических аппаратов (МКА), исходные данные которой приведены на рис. 1. Приведем случай с Гр из 5 МКА и 3 подынтервалов постоянства структуры. Также отметим, что величина входного потока одинакова и входит в один и тот же МКА, который обозначен на рис. 1 оранжевым цветом. Аналогично для выходного потока, только МКА обозначен зеленым цветом.

Внутри каждой вершины представленного на графе (рис. 1), задающего фиксированный сценарий структурной динамики Гр МКА, размещен номер МКА, а рядом с вершиной графа задаются величины максимальной интенсивности (скорости) обработки поступающих данных (эти величины указаны в треугольниках, и измеряются в Мб/с) и максимального объема ЗУ (их величина указана внутри квадратов, и измеряется в Мб). Дугам поставлена в соответствие максимальная интенсивность (скорость) передачи по космическим каналам связи, которая принимается равной 20 Мб/с.

Расположим структурные состояния в следующем порядке: «цепь», «полный граф», «штурвал».

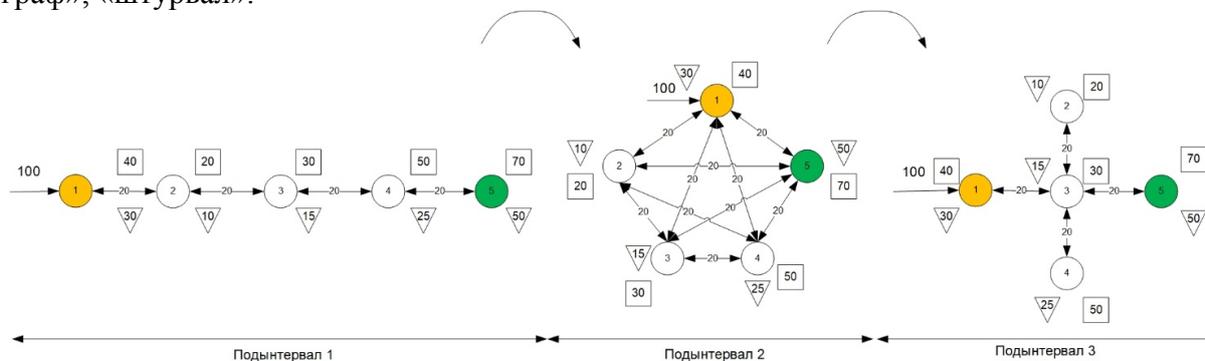
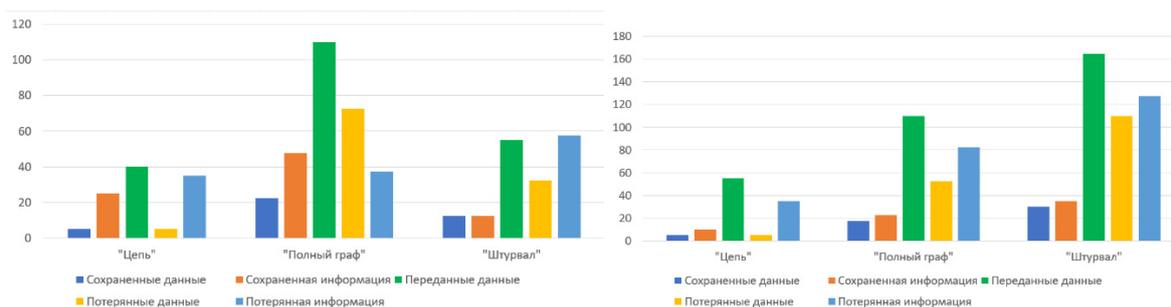


Рис. 1. Исходные данные для проведения планирования ИнП Гр МКА.

На рис. 1 на первом подынтервале задан тип структуры «Цепь» ( $\nu = \frac{1}{6}$ ), на втором – «Полный граф» ( $\nu = 0$ ), на третьем – «Штурвал» ( $\nu = 1$ ).

На рис. 2 по оси абсцисс отмечены объемы сохраненных, обработанных и потерянных данных и информации, по оси ординат – индекс центральности.



а – типа структуры, б – индекса центральности

Рис. 2. Влияние исходных данных структуры Гр МКА на объемы данных и информации.

Если посмотрим на рис. 2а, где приведены данные для каждого участка постоянства отдельно, то увидим, что наилучшие результаты (наибольший объем обработанных данных и сохраненной информации) соответствуют индексу центральности «полный граф», когда все МКА связаны со всеми МКА Гр, кроме самих себя. Промежуточный результат (значительный объем обработанных данных при хорошем сохранении информации и незначительных потерях данных) соответствует индексу центральности «цепь». Наихудшие результаты соответствуют индексу центральности «штурвал» из-за производительности ВСр «центрального» МКА в рассматриваемой ИВС, а также объема ЗУ «центрального» МКА. Потери информации для «цепи» и «полного графа» оказались сопоставимы. Полученные результаты объясняются количеством связей в Гр.

Согласно рис. 2б на первом участке постоянства структуры получено конечным потребителем (КнП) **55 Мб**, в ЗУ МКА сохранено 5 Мб данных и 10 Мб информации. Потери информации в Гр МКА составили 35 Мб и 5 Мб данных. На втором участке постоянства структуры получено КнП **110 Мб**, в ЗУ МКА сохранено 17,5 Мб данных и 22,5 Мб информации. Потери информации в Гр МКА составили 82,5 Мб и 52,5 Мб данных. На третьем участке постоянства структуры получено КнП **165 Мб**, в ЗУ МКА сохранено 30 Мб данных и 35 Мб информации. Потери информации в Гр МКА составили 127,5 Мб и 110 Мб данных.

Потери данных связаны с ограничениями на пропускные способности каналов космической связи и производительностью ВСр каждого МКА в рассматриваемой Гр, а также объемы ЗУ МКА. В рассматриваемом примере преобладают обработанные данные, потери данных и информации незначительны, а сохраненные данные и информация могут быть обработаны на следующих участках постоянства структуры.

## 4. Заключение

В статье рассматриваются разработанные комбинированные модели планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Проведено исследование влияния индекса центральности на объемы информации при взаимодействии подвижных объектов, которое показало важность учета индекса центральности при формировании связей между подвижными объектами в группировках и на различных участках постоянства структуры. Отметим, что чем выше значение индекса связности, тем большее количество информации может получить конечный потребитель.

Важным является учет индекса центральности при планировании информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. В дальнейшем планируется провести другие исследования, например влияния показателя связности на объемы информации при взаимодействии подвижных объектов.

## Список литературы

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 384 с.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. 401 с.
3. Костюкова О., Курдина М. Теория оптимального управления // Наука и инновации. 2017. Т. 7, № 173. С. 24-27.
4. Ушаков В.А. Области достижимости и проектирующие операторы в задачах оптимального управления // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019): материалы конференции (Москва, 17-20 июня 2019 г.). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1037-1042. DOI: 10.25728/vspru.2019.1037.
5. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
7. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ междисциплинарного взаимодействия современной информатики и кибернетики: теоретические и практические аспекты // Материалы XII Всеросс. совещания по проблемам управления. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 8625-8636.
8. Новиков Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. М.: ЛЕНАНД, 2016. 160 с.
9. Бир С. Мозг фирмы. М.: УРСС, 2005. 415 с.
10. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Наука, 1983. 338 с.
11. Ушаков В.А. Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3, часть 1. С. 235-247. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.031.
12. Ушаков В.А. Комбинированные модели и алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов: дис..канд. техн. наук: 2.3.1. С.Пб.: СПб ФИЦ РАН, 2022. 181 с.
13. Sokolov B., Ushakov V., Zakharov V. Optimal planning and scheduling of information processes during interaction among mobile objects // International Journal of Production Research. 2024. DOI: 10.1080/00207543.2024.2302388.