

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Канаев А. К.¹, Субботин Д. В.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-31-38

Ключевые слова: теория графов, критерий Калмана, матрица достижимости, паросочетания, топология сети, оптимальное размещение управляющих воздействий, динамические системы, матричный анализ, военные системы связи, надежность сетей.

Аннотация

Цель работы состоит в разработке подхода к структурному анализу управляемости оптических транспортных сетей военного назначения произвольной топологии для обеспечения их эффективного функционирования с учетом внешних воздействий.

Метод исследования: в работе применяется комбинированный подход, сочетающий классический критерий управляемости Калмана для систем с фиксированными параметрами и структурный подход Лина для анализа управляемости в общем случае. Используются методы теории графов, включая анализ достижимости и построение максимальных паросочетаний.

Результаты исследования: разработана методика формирования матриц динамической модели сети: матрицы A , отражающей топологию сети, и матрицы B , определяющей расположение управляющих воздействий. Разработан алгоритм определения минимального количества управляющих узлов, необходимых для обеспечения полной управляемости сети. Установлено, что для сети из n узлов с определенной топологией количество необходимых управляющих воздействий составляет от $n/3$ до $n/2$ в зависимости от структуры связей. Выявлены критические топологические конфигурации, требующие особого подхода к размещению управляющих элементов. Показано, что применение графовых методов позволяет снизить вычислительную сложность анализа с $O(n^3)$ до $O(n^2)$ для разреженных сетей. Определены оптимальные позиции размещения управляющих воздействий, обеспечивающие максимальную устойчивость управления при отказах отдельных элементов сети.

Научная новизна: предложен комплексный подход структурного анализа управляемости для оптических транспортных сетей связи военного назначения, учитывающий специфику их функционирования.

Введение

Оптические транспортные сети связи военного назначения (ОТСС ВН) представляют собой сложные распределенные системы, обеспечивающие передачу критически важной информации. Развитие технологий волоконно-оптической связи, внедрение систем спектрального уплотнения (**WDM/DWDM**) и программно-конфигурируемых сетей (**SDN**) существенно усложнили задачи управления такими сетями [1].

В настоящее время актуальной задачей становится обеспечение управляемости ОТСС ВН в условиях динамического изменения топологии, обусловленного как плановыми реконфигурациями ресурсов сети, так и нештатными ситуациями, возникающими в результате воздействия дестабилизирующих

факторов противника. Традиционные подходы к анализу управляемости, основанные на численных методах, становятся неэффективными при необходимости оперативной оценки управляемости для множества возможных конфигураций сети [2].

В последние годы активно развиваются структурные методы анализа управляемости динамических систем, позволяющие делать выводы о свойствах системы на основе только информации о структуре связей между элементами, без знания точных численных значений параметров [3]. Эти методы особенно перспективны для анализа сложных сетевых систем, где получение точных значений всех параметров затруднительно или невозможно.

Несмотря на значительный прогресс в области структурного анализа управляемости,

¹ Канаев Андрей Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kanaevak@mail.ru

² Субботин Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d1sub@yandex.ru

применение этих методов к ОТСС ВН остается малоизученной областью. Специфика функционирования таких сетей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов противника, особенности распространения оптических сигналов, требует адаптации существующих методов и разработки новых подходов [4].

Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель ОТСС ВН как динамической системы с учетом особенностей передачи оптических сигналов и адаптировать структурные методы анализа управляемости.
2. Разработать алгоритмы определения минимального набора управляющих узлов и исследовать влияние топологии сети на ее управляемость.
3. Разработать рекомендации по оптимальному размещению управляющих воздействий с учетом требований, предъявляемых к ОТСС ВН.

Динамическая модель ОТСС ВН как системы с линейными дифференциальными уравнениями и структурными матрицами

Рассмотрим ОТСС ВН как динамическую систему, состояние которой описывается вектором $x(t) \in \mathbb{R}^n$, где n – количество узлов сети. Каждая компонента вектора состояния $x_i(t)$ характеризует оптическую мощность или фазу сигнала в i -м узле сети в момент времени t [5].

Динамика сети описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица состояния, отражающая топологию сети и параметры оптических связей между узлами; $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ – матрица управления, определяющая, на какие узлы подаются внешние управляющие воздействия; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор управляющих воздействий.

Элементы матрицы A определяются следующим образом:

- $a_{ij} \neq 0$, если существует оптическая связь от узла j к узлу i ;
- $a_{ij} = 0$, если прямая оптическая связь отсутствует;
- $a_{ii} < 0$ отражает потери в узле i .

Линейная модель (1) справедлива в режиме малых сигналов, когда можно пренебречь

нелинейными эффектами в оптических волокнах (керровская нелинейность, вынужденное комбинационное рассеяние). Для сигналов в ОТСС ВН (до 10 дБм) это приближение выполняется с точностью не хуже 5%.

Согласно классическому критерию Калмана, система (1) является полностью управляемой, если и только если ранг матрицы управляемости равен n [6]:

$$\text{rank}[B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B] = n. \quad (2)$$

Однако для сетей с изменяющейся топологией и неопределенными параметрами связей применение критерия Калмана затруднительно. В этом случае целесообразно использовать структурный подход [7].

Адаптация критерия Калмана и структурного подхода Лина для анализа управляемости ОТСС ВН

Структурная матрица $\bar{A}$ получается из матрицы A заменой ненулевых элементов на независимые параметры α_{ij} , представляющие свободные переменные без конкретных численных значений. Это позволяет анализировать управляемость на основе только топологии сети:

$$\bar{a}_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{ij} = 0 \\ \alpha_{ij}, & \text{если } a_{ij} \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где α_{ij} – независимые параметры, представляющие коэффициенты передачи оптического сигнала между узлами, свободные от конкретных численных значений.

Аналогично определяется структурная матрица $\bar{B}$. Система $(\bar{A}, \bar{B})$ называется структурно управляемой, если существуют численные значения параметров α_{ij} и β_{ij} , при которых соответствующая численная система (A, B) удовлетворяет критерию Калмана [8].

Для анализа структурной управляемости используется графовое представление системы. Определим ориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество вершин; E – множество ребер, где $(x_j, x_i) \in E$, если $\bar{a}_{ij} \neq 0$, и $(u_k, x_i) \in E$, если $\bar{b}_{ik} \neq 0$.

Структурная система $(\bar{A}, \bar{B})$ является структурно управляемой тогда и только тогда, когда выполнены два условия:

1. Граф G не содержит недостижимых из управляющих вершин узлов состояния.
2. Существует набор вершинно-непересекающихся путей, покрывающий все узлы состояния [9].

Для проверки первого условия используется алгоритм поиска в ширину (**BFS**) из множества управляющих вершин [10]. Сложность алгоритма $O(|V| + |E|)$.

Второе условие эквивалентно существованию максимального паросочетания размера n в двудольном графе $B(G)$, построенном следующим образом:

Левая доля: $V_1 = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n, u'_1, u'_2, \dots, u'_m\}$;

Правая доля: $V_2 = \{x''_1, x''_2, \dots, x''_n\}$;

Ребра: $(x'_j, x''_i) \in E_B; (u'_k, x''_i) \in E_B$.

Алгоритм определения минимального набора управляющих узлов

Задача определения минимального количества управляющих узлов формулируется как задача оптимизации $\min_{U \subseteq V} |U|$ при условии: $C(U) = V$, где $U \subseteq V$ – множество управляющих узлов, $|U|$ – мощность множества (количество управляющих узлов), $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица состояния системы, $B(U) \in \mathbb{R}^{n \times |U|}$ – матрица управления, зависящая от выбора U [11]. Множество управляющих узлов $U \subseteq V$ – это узлы сети, на которые подаются внешние управляющие воздействия $u(t)$. Узел $v \in V$ называется управляемым из множества U , если его состояние может быть переведено в любое заданное значение за конечное время с помощью управляющих воздействий, приложенных к узлам из U . Множество всех управляемых узлов обозначим $C(U)$. Сеть называется полностью управляемой, если $C(U) = V$, то есть все узлы сети являются управляемыми.

Разработанный алгоритм основан на итеративном подходе (см. рис. 1)

Прирост управляемости $\Delta(v)$ определяется как количество новых узлов, становящихся структурно управляемыми при добавлении управления в узел v [12].

Для различных типовых топологий оптических сетей получены аналитические оценки минимального количества управляющих узлов:

- для кольцевой топологии из n узлов достаточно одного управляющего узла при однонаправленных связях и $n/2$ узлов при двунаправленных связях;
- для звездообразной топологии достаточно управления центральным узлом для обеспечения полной управляемости;
- для двумерной решетки размера $k \times k$ требуется от k до $2k$ управляющих узлов в зависимости от граничных условий.

- для случайного графа Эрдёша-Реньи с вероятностью связи p среднее количество управляющих узлов составляет [13]:

$$\langle |U^*| \rangle \approx n \cdot e^{-\frac{p(n-1)}{2}}, \quad (4)$$

где $|U^*|$ – размер минимального множества управляющих узлов, обеспечивающего $C(U^*) = V$ для случайного графа Эрдёша-Реньи с n узлами и вероятностью связи p .

Для обеспечения устойчивости управления вводится мера робастности $R(U)$ как минимальное количество отказов узлов или связей, приводящее к потере управляемости [14].

Робастность управления $R(U)$ для заданного набора управляющих узлов U представляет собой минимальное количество отказов элементов сети, приводящее к потере структурной управляемости: $R(U) = \min\{|F|: \text{система } (A, F, B(U)) \text{ не является структурно управляемой}\}$,

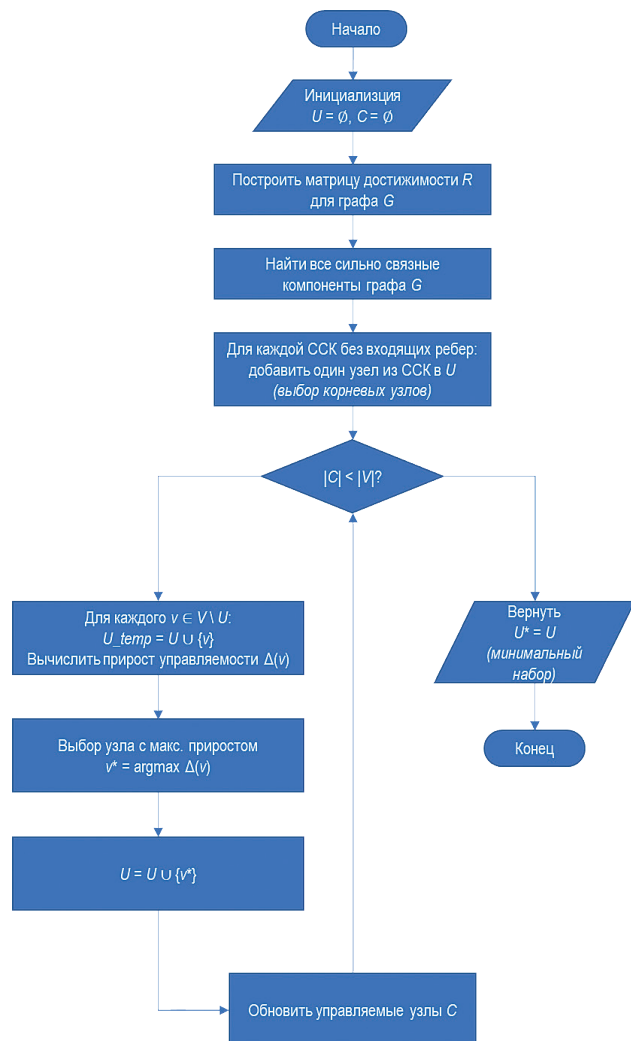


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения минимального набора управляющих узлов

где $F \subseteq V \cup E$ – множество отказавших элементов (узлов или связей).

Учет физических ограничений оптических систем передачи в ОТСС ВН

При анализе управляемости оптических транспортных сетей связи необходимо учитывать характерные ограничения:

- однонаправленная конфигурация оптических усилителей – в оптических системах связи усилители оснащаются оптическими изоляторами и настраиваются для работы в одном направлении, что предотвращает обратные отражения и обеспечивает стабильность, но требует дублирования оборудования для двунаправленной работы[15];
- ограничения на оптическую мощность – существуют физические ограничения на максимальную мощность оптического сигнала, что ограничивает диапазон управляющих воздействий;
- хроматическая дисперсия – при использовании **WDM** необходимо учитывать взаимодействие между каналами различных длин волн.

Эти особенности учитываются путем модификации матриц A и B в линейном приближении:

$$A = A_{\text{топ}} + A_D,$$

где $A_{\text{топ}}$ – базовая матрица топологии, A_D – линейаризованная поправка на хроматическую дисперсию (нелинейные эффекты аппроксимированы для совместимости со структурным анализом).

$$B_{\text{опт}} = B_{\text{баз}} \cdot K_{\text{мощн}} \cdot S_{\text{напр}},$$

где $B_{\text{баз}} \in R^{n \times m}$ – базовая матрица управления, определяющая структуру управляющих

воздействий, $K_{\text{мощн}} = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m)$ – диагональная матрица коэффициентов ограничения мощности: $P_{\text{макс}}$ – максимально допустимая оптическая мощность (~20–23 дБм), $P_j^{\text{вх}}$ – входная мощность управляющего сигнала в узле j , $S_{\text{напр}}$ – матрица селективности по направлению:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если направление } j \rightarrow i \text{ разрешено;} \\ 0, & \text{если заблокировано оптическими,} \\ & \text{невзаимными элементами.} \end{cases}$$

Сравнительный анализ эффективности предложенных подходов

Для верификации предложенных подходов проведена серия вычислительных экспериментов на моделях оптических сетей различной топологии и размерности.

Результаты показывают, что количество необходимых управляющих узлов существенно зависит от топологии сети. Для регулярных топологий (кольцо, решетка) получены результаты, согласующиеся с теоретическими оценками [13].

Оценка робастности управления при отказах элементов сети для различных стратегий размещения

Исследована робастность управления при различных стратегиях размещения управляющих узлов. Рассмотрены три стратегии:

- минимальная – минимизация количества управляющих узлов без учета робастности;
- централизованная – размещение управляющих в узлах с максимальной степенью;
- распределенная – равномерное распределение управляющих узлов по сети.

Таблица 1.

Результаты определения минимального количества управляющих узлов

Топология	Размер сети (n)	Количество связей	Минимальное $ U $ для $C(U) = V$	Время расчета (с)
Кольцо	10	10	1	0,01
Кольцо	50	50	1	0,03
Кольцо	100	100	1	0,08
Решетка 5×5	25	40	5	0,05
Решетка 10×10	100	180	10	0,42
Случайный ($p = 0,1$)	50	~125	5 ± 1	0,18
Случайный ($p = 0,2$)	50	~250	3 ± 1	0,25

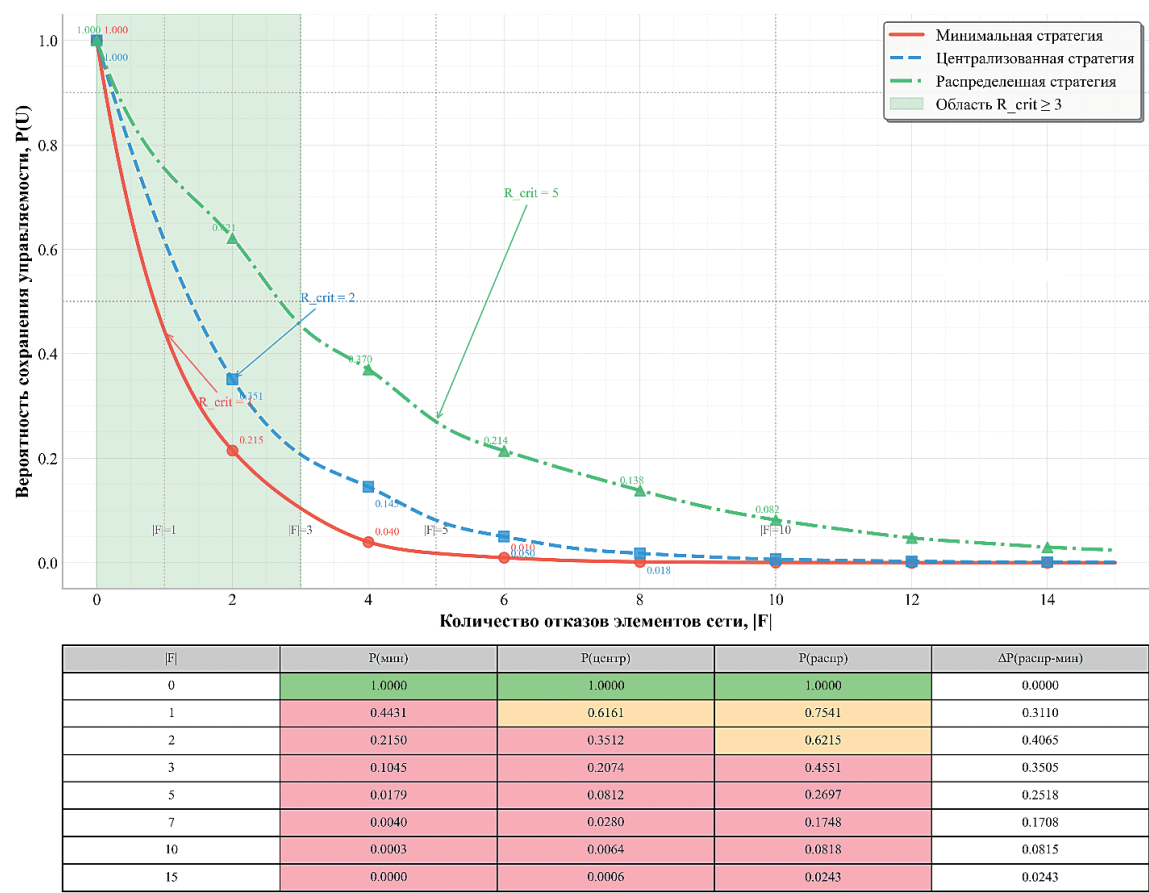


Рис. 2. Зависимость вероятности сохранения управляемости от количества отказов

Таблица 2.

Влияние учета специфических эффектов оптических сетей на управляемость

Учитываемые эффекты	Минимальное $ U $ для $C(U) = V$	Робастность (R)
Только топология	8	5
+ Однонаправленность	10	4
+ Ограничения мощности	11	4
+ Хроматическая дисперсия	12	3
Все эффекты	12	3

Таблица 3.

Сравнение методов анализа управляемости

Метод	Время расчета ($n = 100$)	Точность	Применимость
Критерий Калмана (численный)	12,4 с	100 %	Фиксированные параметры
Структурный анализ (предложенный)	0,38 с	95 %	Произвольные параметры
Эвристический	0,05 с	75 %	Ограниченная

Распределенная стратегия демонстрирует наилучшую робастность, сохраняя управляемость при большем количестве отказов [14].

Проведен сравнительный анализ управляемости при учете и без учета специфических особенностей оптических сетей. Для сети из 50 узлов с *DWDM*-технологией (40 каналов) получены следующие результаты (см. табл. 2).

Учет специфических особенностей оптических сетей приводит к увеличению минимального количества управляющих узлов на 40–50 % и снижению робастности [15].

Сравнение с существующими методами

Проведено сравнение предложенного структурного подхода с традиционными численными методами анализа управляемости (см. табл. 3).

Предложенный метод обеспечивает оптимальный баланс между вычислительной эффективностью и точностью результатов [3].

Выводы

1. Разработан комплексный метод структурного анализа управляемости оптических транспортных сетей военного назначения, включающий математическую модель сети как динамической системы, адаптированные алгоритмы структурного анализа и методы оптимизации размещения управляющих воздействий.
2. Предложен и реализован эффективный алгоритм определения минимального набора управляющих узлов, обеспечивающий

снижение вычислительной сложности с $O(n^3)$ до $O(n^2)$ для разреженных сетей при сохранении точности 95 % по сравнению с точными численными методами.

3. Установлены количественные зависимости между топологическими характеристиками сети и минимальным количеством управляющих узлов: для регулярных топологий требуется от 1 до n/k узлов (где k – средняя связность), для случайных топологий – от $n/3$ до $n/2$ узлов.
4. Показано, что учет специфических особенностей оптических сетей (однонаправленность усилителей, ограничения мощности, хроматическая дисперсия) приводит к увеличению минимального количества управляющих узлов на 40–50 % и требует применения распределенной стратегии размещения для обеспечения робастности.
5. Достигнутый эффект заключается в возможности оперативного (время анализа < 1 с для сетей до 100 узлов) определения оптимальной конфигурации управления при проектировании и реконфигурации оптических сетей, что критически важно для военных систем связи.
6. Практическое подтверждение эффективности предложенного метода получено путем моделирования на различных топологиях оптических сетей, продемонстрировавшего согласование теоретических оценок с экспериментальными результатами в пределах 5 % погрешности.

Литература

1. Калмыков Н. С., Докучаев В. А. Применение концепции программно-конфигурируемых сетей для построения территориально-распределенных сетей // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2020. – Т. 7. – №. 2. – С. 51–56.
2. Ибрагимов Д. Н., Берендакова А. В. Метод построения и оценивания асимптотических множеств управляемости двумерных линейных дискретных систем с ограниченным управлением // Труды МАИ. – 2022. – №. 126. – С. 408–446.
3. Ги К., Жорж Б., Брижит Д. Н. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2011. – Т. 7. – №. 4. – С. 733–769.
4. Воронин Д. А., Фролкина О. С. Волоконно-оптические системы передачи // Под редакцией Н. В. Яшковой – к. э. н., доцент, зам. директора по научно-методической работе филиала СамГУПС в г. Нижнем Новгороде. Составители: Н. В. Яшкова – канд. экон. наук, доцент. – 2022. – С. 211.
5. Рыжков А. В., Шварц М. Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования – основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2021. – Т. 15. – №. 7. – С. 14–22.

6. Лапин А. В., Зубов Н. Е., Пролетарский А. В. Обобщение формулы Аккермана для некоторого класса многомерных динамических систем с векторным входом // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2023. – №. 4(109). – С. 18–38.
7. Оморов Р. О. Модальная чувствительность, робастность и грубость динамических систем (обзорная статья) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21. – №. 2. – С. 179–190.
8. Li X. et al. Sufficient control of complex networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2024. – Т. 642. – С. 129751.
9. Park N. J. et al. Composition rules for strong structural controllability and minimum input problem in diffusively coupled networks // arXiv preprint arXiv:2405.05557. – 2024.
10. Zhang Y., Xia Y., Wang L. On the reachability and controllability of temporal continuous-time linear networks: A generic analysis // Automatica. – 2024. – Т. 167. – С. 111741.
11. Ефремов А. А., Козлов В. Н. Метод синтеза локально допустимых ограниченных управлений для стабилизации программных движений динамических объектов // Информационно-управляющие системы. – 2023. – №. 4(125). – С. 47–55.
12. Никонов А. А. Гибридные подходы к адаптивному управлению организационными структурами многоагентных систем в условиях неполной наблюдаемости и динамичных изменений среды // Вестник науки. – 2025. – Т. 2. – №. 1(82). – С. 1022–1026.
13. Росляков А. «СЕТЬ-2030»: взгляд МСЭ-Т на будущее сетей фиксированной связи // Первая миля. – 2021. – №. 4. – С. 50–59.
14. Borraccini G. et al. Local and global optimization methods for optical line control based on quality of transmission // Journal of Optical Communications and Networking. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. B60–B70.
15. Vujicic Z. et al. Towards virtualized optical-wireless heterogeneous networks // IEEE access. – 2024. – Т. 12. – С. 87776–87806.

STRUCTURAL ANALYSIS OF CONTROLLABILITY FOR MILITARY OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Kanaev A. K.¹, Subbotin D. V.²

Keywords: graph theory, Kalman criterion, reachability matrix, matchings, network topology, optimal placement of control inputs, dynamic systems, matrix analysis, military communication systems, network reliability.

Abstract

Purpose of work is to develop a method for structural analysis of controllability for military optical transport networks with arbitrary topology to ensure their effective operation under external influences.

Method of research: the author uses a combined approach that combines the classical Kalman controllability criterion for systems with fixed parameters and the Lin structural approach for the analysis of controllability in the general case. The methods of graph theory are used, including the analysis of reachability and the construction of maximum pairings.

Results: a method for forming matrices of a dynamic network model has been developed: matrix A , which reflects the network topology, and matrix B , which determines the location of control actions. An algorithm for determining the minimum number of control nodes necessary to ensure full controllability of the network has been developed. It has been established that for a network of n nodes with a certain topology, the number of necessary control actions ranges from $n/3$ to $n/2$, depending on structure of connections. Critical topological configurations that require a special approach to the placement of control elements are revealed. It is shown that the use of graph methods makes it possible to reduce the computational complexity of the analysis from $O(n^3)$ to $O(n^2)$ for sparse networks. The optimal positions for the placement of control actions are determined, which provide maximum stability of control in case of failures of individual network elements.

¹ Andrey K. Kanaev, Dr.Sc. (in Engineering), Professor of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical and Optical Communication, Military Academy of Communication named after S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: kanaevak@mail.ru

² Dmitry V. Subbotin, Ph.D. (in Engineering), doctoral student of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical and Optical Communication, Military Academy of Communication named after S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: d1sub@yandex.ru

Scientific novelty: *an integrated approach to structural analysis of controllability for optical transport networks for military purposes, taking into account the specifics of their functioning, is proposed.*

References

1. Kalmykov N. S., Dokuchaev V. A. Primenenie koncepcii programmno-konfiguriruemyh setej dlja postroenija territorial'no-raspredelennyh setej //Telekommunikacii i informacionnye tehnologii. – 2020. – T. 7. – № 2. – S. 51–56.
2. Ibragimov D. N., Berendakova A. V. Metod postroenija i ocenivanija asimptoticheskikh mnozhestv upravljajemosti dvumernyh linejnyh diskretnyh sistem s ogranichenym upravleniem //Trudy MAI. – 2022. – № 126. – S. 408–446.
3. Gi K., Zhorzh B., Brizhit D. N. Strukturnye svojstva i klassifikacija kinematicheskikh i dinamicheskikh modelej kolesnyh mobil'nyh robotov //Russian Journal ofNonlinear Dynamics. – 2011. – T. 7. – № 4. – S. 733–769.
4. Voronin D. A., Frolkina O. S. Volokonno-opticheskie sistemy peredachi //Pod redakciej N. V. Jashkovej – k. je. n., docent, zam. direktora po nauchno-metodicheskoy rabote filiala SamGUPS v g. Nizhnem Novgorode Sostaviteli: N. V. Jashkova – kand. jekon. nauk, docent. – 2022. – S. 211.
5. Ryzhkov A. V., Shvarc M. L. Predposylki sozdaniya kogerentnoj seti svjazi obshhego pol'zovanija – osnovy skvoznyh cifrovyh tehnologij //T-Comm-Telekommunikacii i Transport. – 2021. – T. 15. – № 7. – S. 14–22.
6. Lapin A. V., Zubov N. E., Proletarskij A. V. Obobshhenie formuly Akkermana dlja nekotorigo klassa mnogomernyh dinamicheskikh sistem s vektornym vhomom //Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. NJe Baumana. Serija «Estestvennye nauki». – 2023. – № 4(109). – S. 18–38.
7. Omorov R. O. Modal'naja chuvstvitel'nost', robustnost' i grubost' dinamicheskikh sistem (obzornaja stat'ja) // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. – 2021. – T. 21. – № 2. – S. 179–190.
8. Li X. et al. Sufficient control of complex networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2024. – T. 642. – S. 129751.
9. Park N. J. et al. Composition rules for strong structural controllability and minimum input problem in diffusively coupled networks //arXiv preprint arXiv:2405.05557. – 2024.
10. Zhang Y., Xia Y., Wang L. On the reachability and controllability of temporal continuous-time linear networks: A generic analysis //Automatica. – 2024. – T. 167. – S. 111741.
11. Efremov A. A., Kozlov V. N. Metod sinteza lokal'no dopustimyh ogranichenykh upravlenij dlja stabilizacii programmyh dvizhenij dinamicheskikh ob'ektov //Informacionno-upravljajushhie sistemy. – 2023. – № 4(125). – S. 47–55.
12. Nikonov A. A. Gibridnye podhody k adaptivnomu upravleniju organizacionnymi strukturami mnogoagentnyh sistem v uslovijah nepolnoj nabljudajemosti i dinamichnykh izmenenij sredy //Vestnik nauki. – 2025. – T. 2. – № 1(82). – S. 1022–1026.
13. Rosljakov A. «SET-2030»: vzgljad MSJe-T na budushhee setej fiksirovannoj svjazi //Pervaja milja. – 2021. – № 4. – S. 50–59.
14. Borraccini G. et al. Local and global optimization methods for optical line control based on quality of transmission // Journal of Optical Communications and Networking. – 2024. – T. 16. – № 5. – S. B60–B70.
15. Vujicic Z. et al. Towards virtualized optical-wireless heterogeneous networks //IEEE access. – 2024. – T. 12. – S. 87776–87806.

