DOI 10.24412/2221-2574-2025-2-69-79 УДК 621.39

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ OSPF ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА ГРУППЫ РОБОТОВ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В СОСТАВЕ КЛАСТЕРА

Канаев Андрей Константинович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая связь»
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет[1] путей сообщения
Императора Александра I».
E-mail: kanaevak@mail.ru

Сахарова Мария Александровна
кандидат технических наук, начальник отдела разработки систем связи
ЗАО «Институт телекоммуникаций»[2].
E-mail: zuvakamariya@mail.ru

Боброва Ксения Борисовна
ведущий инженер отдела разработки систем связи ЗАО «Институт телекоммуникаций»[2].
E-mail: bobrova@itain.ru

Захаров Иван Вячеславович
ведущий программист отдела разработки систем связи ЗАО «Институт телекоммуникаций»[2].
E-mail: zakharov_i@itain.ru

Лукичев Михаил Михайлович
кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Телетакс»[3].
E-mail: mixailspbpy@mail.ru

Опарин Евгений Валерьевич
, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист отдела разработки систем связи
ЗАО «Институт телекоммуникаций»[2].
E-mail: oparin@itain.ru

[1]*Адрес:* 190031, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 9.
[2]*Адрес:* 194100, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 5.
[3]*Адрес:* 191002, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Владимирский просп., д. 21, лит. А.

Аннотация: В работе приведены результаты исследования применения протокола динамической маршрутизации OSPF при организации информационного взаимодействия роботов в составе кластера. Рассмотрены варианты организации сетевого взаимодействия роботов при топологиях «каждый с каждым» и «в линию» при отсутствии ограничений на канальный ресурс, а также при ограничении пропускной способности каналов связи. Для каждого варианта организации сетевого взаимодействия роботов проведён ряд экспериментов, позволяющих получить количественные характеристики процесса динамической маршрутизации OSPF в зависимости от числа роботов, топологии их сетевого взаимодействия и характеристик канального ресурса. На основании результатов проведённых экспериментов даны рекомендации по применению протокола динамической маршрутизации OSPF при организации информационного обмена группы роботов в составе кластера.

Ключевые слова: робот, информационный обмен, маршрутизация, телекоммуникационный модуль, протокол OSPF.

Введение

В последних разработках, касающихся роботов и их взаимодействия между собой, всё чаще встречается термин «самоорганизующиеся сети». Учитывая данную тенденцию, совокупность локально расположенных роботов объединяют в кластер телекоммуникационных устройств. Взаимообмен между роботами в

кластере организуется на основе одного из наиболее приемлемых способов многостанционного доступа. В составе кластера присутствуют узлы, содержащие телекоммуникационные модули, с возможностями по передаче информации в смежные группы роботов или в центры обработки сообщений [1–4]. Функционирование роботов в составе кластера увязывается с процедурой управления ресурсами сети и достигается, в том числе, маршрутизацией. В основе управления и поддержания ресурсов сети связи лежит возможность выбора маршрута передачи информации по некоторому критерию качества, например, выбор участков для организации связи между роботами с наилучшим отношением сигнал/шум. Выбор протокола маршрутизации и его параметров существенно влияет на характеристики связи, в том числе:

- оперативность и надёжность доставки или передачи информации;
- достоверность и полноту передаваемой в системе информации;
- уровень необходимых затрат, связанных с передачей информации.

Для упрощения процедуры настройки узловых устройств в настоящее время широко применяются системы автоматического обмена топологической и маршрутной информации - динамическая маршрутизация. С одной стороны, такой подход позволяет сократить время пуско-наладки сетевого оборудования, повышается отказоустойчивость (при отказе любого элемента сети узловые устройства автоматически перераспределят трафик в обход неисправного элемента), с другой — требуется полное понимания процессов динамической маршрутизации и условия её использования (область применения) для того, чтобы избежать отказов обслуживания [5–7].

Сам процесс динамической маршрутизации занимает вычислительные ресурсы как телекоммуникационного модуля, так и каждого канала связи, участвующего в процессе маршрутизации. Поэтому критически важным является решение задачи, направленной на определение требований к пропускной способности и характеристикам каналов связи от количества роботов в составе кластера, их топологии для формирования области применения различных протоколов динамической маршрутизации. В данной статье указанная задача рассматривается применительно к протоколу *OSPF* (*Open Shortest Path First*) [5–7].

Таким образом, для оценки эффективности функционирования протокола *OSPF*, выявления его ключевых особенностей, потребляемых сетевых ресурсов для формирования области его применения с учётом низкоскоростных каналов сетевой инфраструктуры была проведена серия экспериментов. Для проведения экспериментов была развёрнута виртуальная сетевая инфраструктура.

Эксперимент 1: Определение объёма информации, требуемого для формирования таблиц маршрутизации при топологии «каждый с каждым»

Цель эксперимента: выявление количественных характеристик влияния процесса динамической маршрутизации *OSPF* на ресурсы сети передачи данных от количества узлов в сети при различных топологиях.

Для проведения эксперимента были использованы от двух до 10 узловых устройств, соединённых в общую сеть без ограничений пропускной способности канала. Так как алгоритм *OSPF* предполагает в начальный момент времени (при активации сетевых устройств) создание базы данных топологии всей сети внутри домена или автономной системы и базы данных состояний каналов, на основании которых строит таблицы маршрутизации, применяя алгоритм Дейкстры, то логично оценить объём данных, необходимый для формирования таблиц маршрутизации и время, необходимое для данного процесса [5, 8–10].

При проведении эксперимента на каждом узловом устройстве (УУ) настроено два сетевых интерфейса: один для участия в процессе *OSPF*, другой — уникальная сеть для анонсирования маршрутов, участвующем в тестировании УУ.

Таким образом, при конфигурации всех включённых в эксперимент УУ и физическом соединении их между собой в топологии «каждый с каждым» через виртуальный коммутатор, как показано на рис. 1, будет запущен процесс определения топологии и обмена известными сетями.

Постановка эксперимента:

1. узловое устройство 1 всегда запущено. Кроме участия в процессе оно также собирает статистику с помощью установленного и активированного трафик-сниффера, а также отслеживает состояние маршрутизатора *OSPF* и количество анонсированных сетей путём отслеживания состояния таблицы маршрутизации. Трафик-сниффер фильтрует пакеты, отображая только относящиеся к процессу *OSPF*, не включая пакеты «*Hello*»;

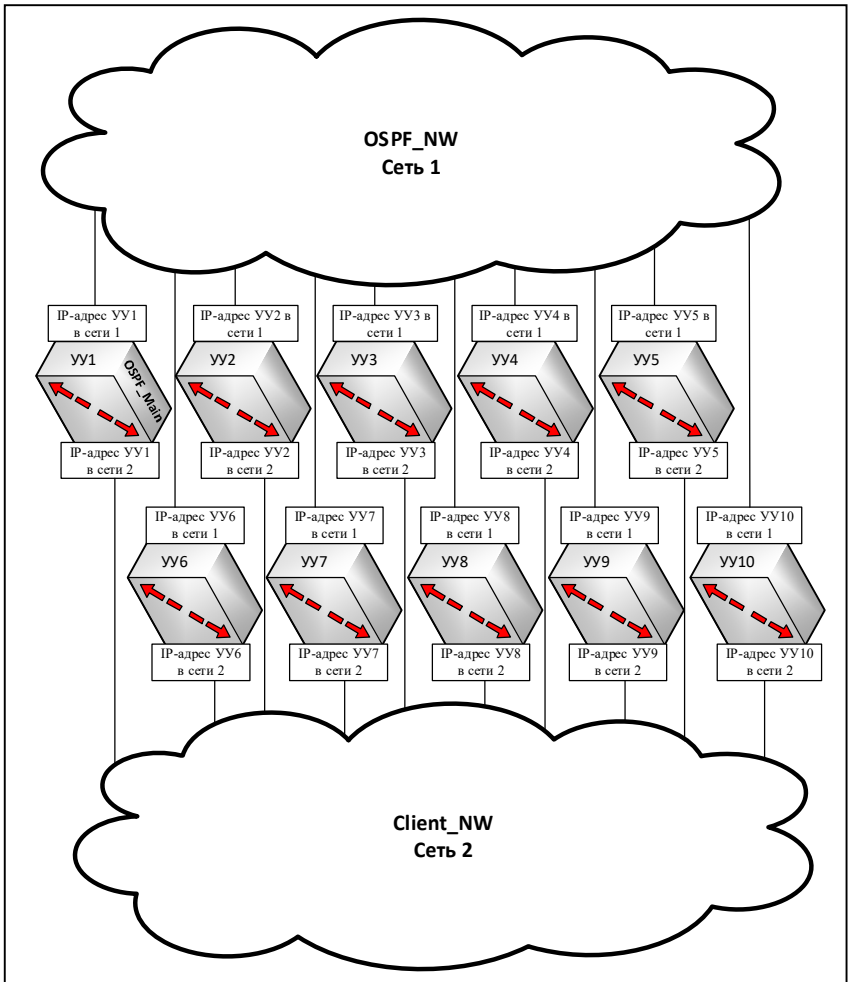

Рис. 1. Схема соединения узлов при тестировании нагрузки *OSPF*

2. в процессе эксперимента запускается переменное число виртуальных машин (большее или равное 2);

3. в момент времени, когда состояние алгоритма *OSPF* УУ1 становилось *Full state*, а также в таблице маршрутизации появлялась информация о сетях, подключённых к другим (всем) участникам эксперимента, производилась фиксация сумм длин всех пакетов, полученных трафик-сниффером (с учетом фильтра), а также разница меток времени получения первого и последнего пакета обмена служебным трафиком *OSPF*, кроме пакетов «*Hello*»;

4. полностью выключались УУ (кроме УУ1), очищался буфер трафик-сниффера, а также выполнялись проверки потерь маршрутов и соседних УУ (подготовка к следующему эксперименту);

5. заново запускался эксперимент с п.п. 2 при увеличении количества одновременного включения УУ.

Результаты:

1. получены временные метки пакетов *OSPF* не включая пакеты «*Hello*», что позволяет оценить время, требуемое алгоритму *OSPF* для обмена топологической и маршрутной информацией;

2. получены объёмы всех пакетов, участвующих в двухстороннем обмене при прохождении всех стадий алгоритма *OSPF*, что позволяет оценить объёмы служебного трафика в начальный момент времени — инициализации (сходимости);

3. в ходе анализа времени обмена и объёма передаваемых данных получены их зависимо-

Таблица 1. Зависимость времени обмена базами данных OSPF при построении структуры сети и формировании таблиц маршрутизации

Параметр	Количество УУ								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время обмена DB и LS, с	16	25	25	30	35	24	30	39	50
Объём переданных данных, байт	2136	6096	12552	21308	27286	35116	42132	52060	60206
BackupRouter	Bdr-2	Bdr-3	Bdr-4	Bdr-5	Bdr-6	Bdr-6	Bdr-6	Bdr-6	Bdr-3

сти от количества устройств, участвующих в процессе *OSPF* (таблица 1, рис. 2).

Таким образом, можно утверждать, что при топологии «каждый с каждым» объём служебных данных возрастает линейно в зависимости от количества узлов, участвующих в процессе *OSPF*. Время сходимости протокола *OSPF* сильно зависит от момента включения в сеть маршрутизаторов и получения «*Hello*» пакетов от «соседей». Кроме этого, условия выбора *BDR* (резервный выделенный маршрутизатор) не такие жёсткие, как при выборе *DR* (выделенный маршрутизатор). На выбор *BDR* может влиять последнее состояние до включения узловых устройств, что также влияет на время обмена служебным трафиком, однако незначительно влияет на объём этого трафика. Для достижения более точных результатов времени сходимости нужно увеличить количество последовательно выполняемых экспериментов, согласно алгоритму постановки эксперимента. Это позволит получить максимальное, минимальное и среднее время сходимости протокола *OSPF* в данной топологии. Тем не менее, результат эксперимента показывает, какой объём данных необходим для выполнения процесса *OSPF* в идеальных условиях, без ограничения физической скорости каналов связи. Следующие эксперименты позволят оценить, как влияет снижение пропускной способности рёбер сети на процесс сходимости *OSPF*.

Эксперимент 2: Исследование времени сходимости протокола *OSPF* с учётом ограничения пропускной способности среды в 8 кбит/с при топологии «каждый с каждым».

Цель эксперимента: выявление количественных характеристик влияния ограничений пропускной способности на процесс динамической маршрутизации *OSPF* с учётом переменного количества устройств в сети.

Для проведения эксперимента также были использованы от двух до 10 узловых устройств, соединённых в общую сеть с учётом ограничения пропускной способности канала. Скорость канала ограничивалась количеством узловых устройств в сети.

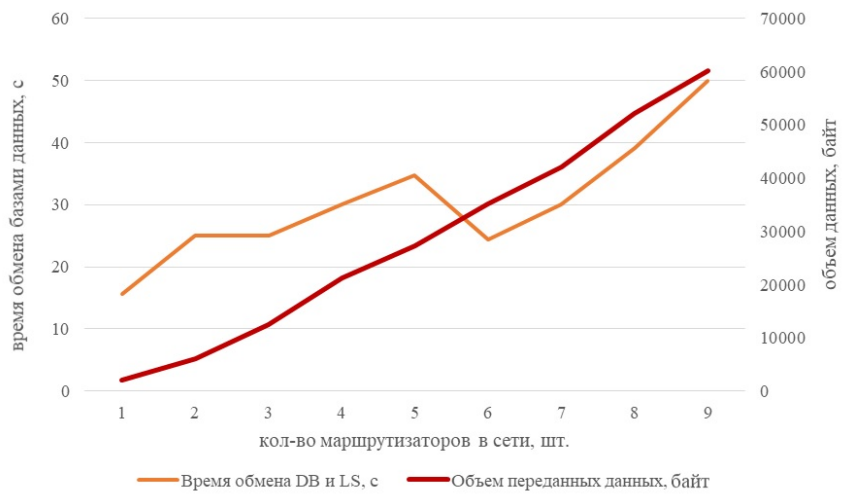

Рис. 2. Зависимость времени обмена базами данных *OSPF* при построении структуры сети и формировании таблиц маршрутизации

Таблица 2. Зависимость времени обмена базами данных OSPF при построении структуры сети и формировании таблиц маршрутизации от разного количества *УУ* при ограничении скорости среды передачи данных в 8кбит/с, топология «каждый с каждым»

Параметр		Количество УУ, установленная скорость				
		2	3	4	5	6
		8 кбит/с	4 кбит/с	2,67 кбит/с	2 кбит/с	1,6 кбит/с
Время обмена DB и LS, с	Эксп.1	15,56	24,79	25,00	200,00	< 800
	Эксп.2	15,78	25,01	30,00	121,34	< 800
	Эксп.3	15,63	20,00	28,75	149,13	—
	Среднее	15,70	23,30	27,90	156,80	—
Объем переданных данных, байт	Эксп.1	2882	7920	10428	101270	∞
	Эксп.2	2870	9496	15126	67856	∞
	Эксп.3	3046	7438	22944	81430	—
	Среднее	2932,7	8284,7	16166,0	83518,7	—

Метод организации очередей был выбран *token bucket filter* (*tfb*), так как стандартный *FIFO* отбрасывает пакеты, если их длина превышает скорость в единицу времени. Фильтр *tfb* более гибкий и позволяет пропустить некоторые «всплески» трафика в сеть, однако для повышения точности эксперимента значения «всплеска» трафика использовано как максимальная физическая скорость интерфейса, участвующего в эксперименте [5, 10–12].

Дополнительно при организации эксперимента были выключены *multicast domain name system* (*MDNS*) и *network time protocol* (*NTP*) сетевые сервисы, т. к. для их выполнения дополнительно занимается канальный ресурс. Для подавления процедуры *arp* в каждый УУ была прописана таблица соответствия IP и MAC адресов заранее, до начала экспериментов. Кроме этого, дополнительно увеличена буферная память каждого интерфейса.

С целью повышения точности эксперименты проведены несколько раз для одного и того же числа узловых устройств.

Результаты:

1. получены временные метки пакетов *OSPF* не включая пакеты «*Hello*», что позволяет оценить время, требуемое алгоритму *OSPF* для обмена топологической и маршрутной информацией с учётом ограничения среды распространения сигналов;

2. Получены объёмы всех пакетов, участвующих в двухстороннем обмене при прохождении всех стадий алгоритма *OSPF*, что позволяет оценить объёмы служебного трафика в начальный момент времени — инициализации (сходимости). Для уточнения результатов, проведены дополнительные эксперименты;

3. В ходе анализа времени обмена и объёма передаваемых данных получены их зависимости от количества устройств, участвующих в процессе OSPF с учётом топологии и ограничений скорости передачи информации (таблица 2, рис. 3).

Частные выводы по эксперименту.

1. Определена граница, при которой алгоритм *OSPF* может существовать в сети с представленной топологией и ограничениями пропускной способности интерфейсов. При коли-

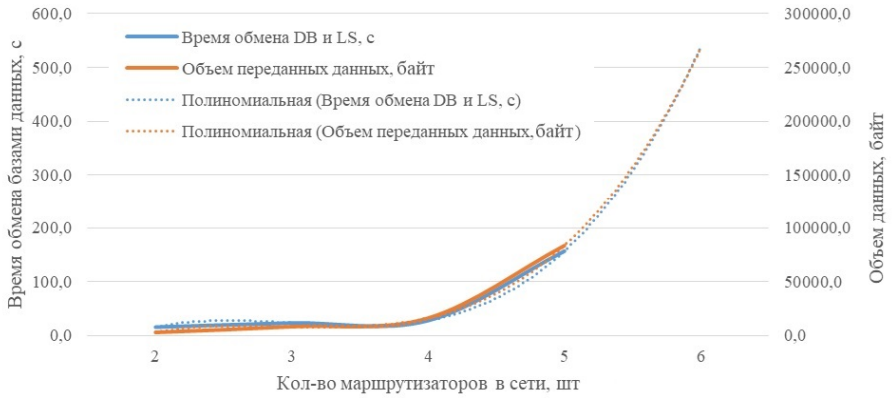

Рис. 3. Зависимость объёма передачи данных и времени, необходимых для передачи баз данных *OSPF* от количества маршрутизаторов в сети с учётом топологии и ограничений скорости передачи

честве узловых устройств в сети шесть и более и ограничении в битовой скорости распространения сигналов — алгоритм *OSPF* не может синхронизировать топологическую и маршрутную информацию. Это вызвано существенной задержкой информационных пакетов, которая превышает время их ожидания (*wait tamer* — 5 с), что приводит к повторной инициализации циклов формирования баз данных и, соответственно, к дополнительному росту служебного трафика. Изменения стандартных настроек времени (таймеров настройки алгоритмов *OSPF*) также не позволяет обойти ограничения среды передачи данных, т.к. приводит и к увеличению всех прочих временных интервалов алгоритма *OSPF*, что ещё больше снижает время сходимости.

2. При анализе времени сходимости и объёма передачи данных можно сделать вывод о том, что изменение полосы пропускания приводит к увеличению как времени выполнения алгоритма *OSPF*, так и объёма служебных данных. Это вызвано увеличением времени на принятие решений о выборе *BDR*, т.к. некоторые узлы выбирают один *BDR*, другие — другой. В этом состоянии начинается синхронизация баз данных состояния смежности маршрутизаторов, и при выполнении этого процесса оказывается, что *BDR* выбраны некорректно. Это приводит к возвращению процесса *OSPF* к выбору *BDR* и отмене полученной ранее топологической информации.

3. При ограничении скорости распространения среды до 1 кбит/с протокол *OSPF* не сходится даже для 2 узлов.

4. С целью выявления минимальной скорости передачи информации, при которой *OSPF* выполняется корректно, был проведён дополнительный эксперимент с уменьшением блока MTU кадра Ethernet всех УУ. Уменьшение MTU ведёт к росту фрагментации пакетов, как следствие — росту требуемого объёма служебных данных, а при низкой скорости среды распространения сигнала это приводит к тому, что процесс *OSPF* не может завершиться.

Эксперимент 3: Исследование времени сходимости протокола *OSPF* с учётом ограничения пропускной способности среды в 8 кбит/с при топологии «в линию»

Цель эксперимента: выявление количественных характеристик влияния ограничений пропускной способности на процесс динамической маршрутизации *OSPF* с учётом переменного количества устройств в сети при топологическом построении «в линию».

Для проведения эксперимента также были использованы от двух до 10 узловых устройств, соединённых в общую сеть последовательно (в линию или в цепочку) с учётом ограничения пропускной способности канала. Скорость канала также устанавливалась с зависимостью от количества узловых устройств скорости в 8 кбит/с для двух УУ, при включении трёх УУ скорость устанавливалась по 4 кбит/с на каждый интерфейс, т.к. одновременно УУ может передавать данные только в две стороны одновременно. Для обеспечения топологии «в линию» или в «цепочку» на каждом узловом устройстве два физических интерфейса объединены в «мост» и создан виртуальный интерфейс, на котором настроена адресация и запущен процесс *OSPF*, как показано

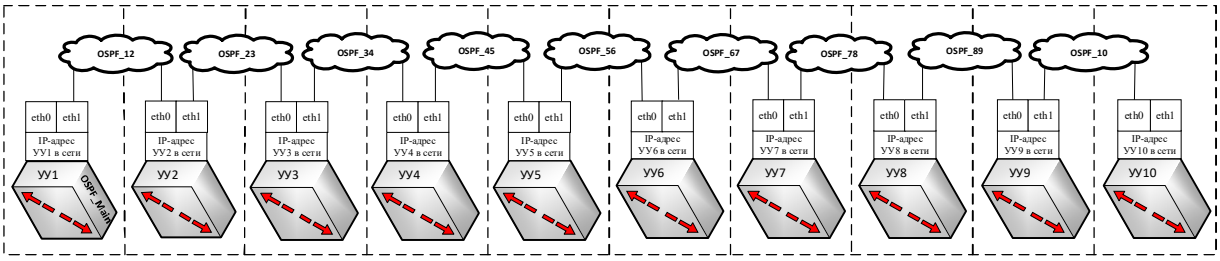

Рис. 4. Схема соединения и распределения адресов исследуемой сети

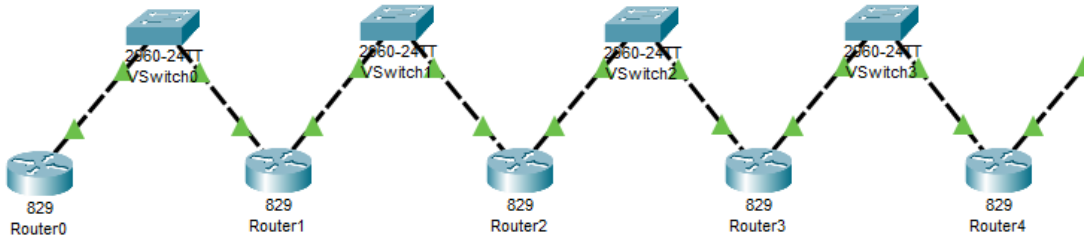

Рис. 5. Фрагмент схемы топологического соединения узловых устройств

на рис. 4 [5, 13–15].

С точки зрения сетевой топологии, схему включения узловых устройств можно представить в виде рис. 5.

Результаты:

1. Получены временные метки пактов *OSPF* не включая пакеты «*Hello*», что позволяет оценить время, требуемое алгоритму *OSPF* для обмена топологической и маршрутной информацией с учётом ограничения среды распространения сигналов и схемой соединения.

2. Получены объёмы всех пакетов, участвующих в двухстороннем обмене при прохождении всех стадий алгоритма *OSPF*, что позволяет оценить объёмы служебного трафика в начальный момент времени — инициализации (сходимости) с учётом схемы соединения. Для уточнения результатов, проведены дополнительные повторные эксперименты.

3. В ходе анализа времени обмена и объёма передаваемых данных получены их зависимости от количества устройств, участвующих в процессе OSPF с учётом топологии и ограничений скорости передачи информации (табл. 3, рис. 6).

Частные выводы по эксперименту:

1. Определена граница, при которой алгоритм *OSPF* может существовать в сети с представленной топологией и ограничениями пропускной способности интерфейсов. При количестве узловых устройств в сети десять и более и ограничении в битовой скорости распространения сигналов алгоритм *OSPF* не может синхронизировать топологическую и маршрутную информацию. При запуске 7 УУ и более было замечено, что протокол *OSPF* не всегда сходится. Были выявлены случаи, когда *LDSB* сообщения устаревали в буферной памяти интерфейсов «цепочки» устройств. Это приводило к повторным обновлениям *LDSB* и увеличению времени сходимости, при этом все маршрутизаторы в сети уже обменялись маршрутами (таблица маршрутизации заполнена корректно), передача пользовательской информации возможна, но по-прежнему канал занимает служебная информация *OSPF*.

Таблица 3. Зависимость времени обмена базами данных *OSPF* при построении структуры сети и формировании таблиц маршрутизации от разного количества УУ при ограничении скорости среды передачи данных в 8кбит/с, топология «в линию»

Параметр		Количество УУ при топологии «в линию», скорость 8 кбит/с (макс. 4 кбит/с на интерфейс)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время обмена *DB* и *LS*, с	Эксп. 1	1,72	2,11	5,09	8,07	0,54	14,95	15,65	161,71	800
	Эксп. 2	11,03	21,35	41,65	32,07	60,56	85,17	90,17	226,6	—
	Эксп. 3	15,31	15,01	40,13	45,44	44,7	86,85	13,67	942	-
	Среднее	2,7	6,2	42,3	41,9	55,3	95,7	106,5	443,4	—
Объём переданных данных, байт	Эксп. 1	884	660	932	4186	9162	8654	1224	5642	∞
	Эксп. 2	1990	5596	10098	12196	15178	25504	32700	78950	—
	Эксп. 3	102	608	464	14508	15178	32468	39736	194490	—
	Среднее	992	288	831	3630	6506	5542	7887	109694	—

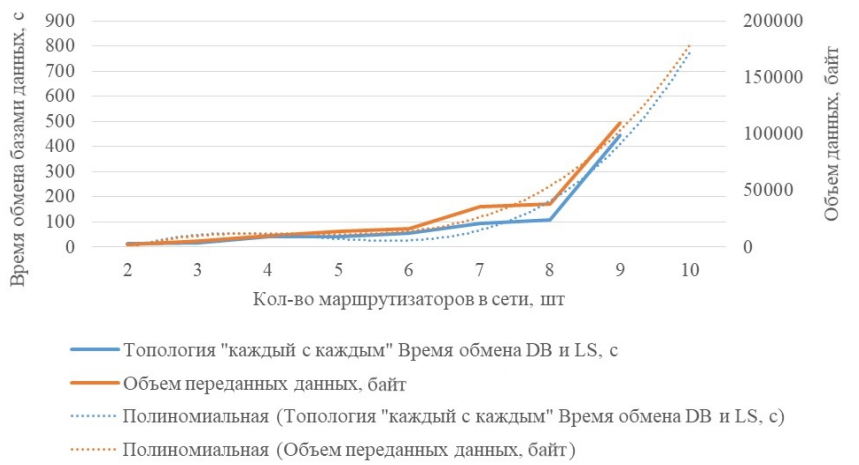

Рис. 6. Зависимость объёма и времени, необходимых для передачи баз данных *OSPF* от количества маршрутизаторов в сети, топология «в линию»

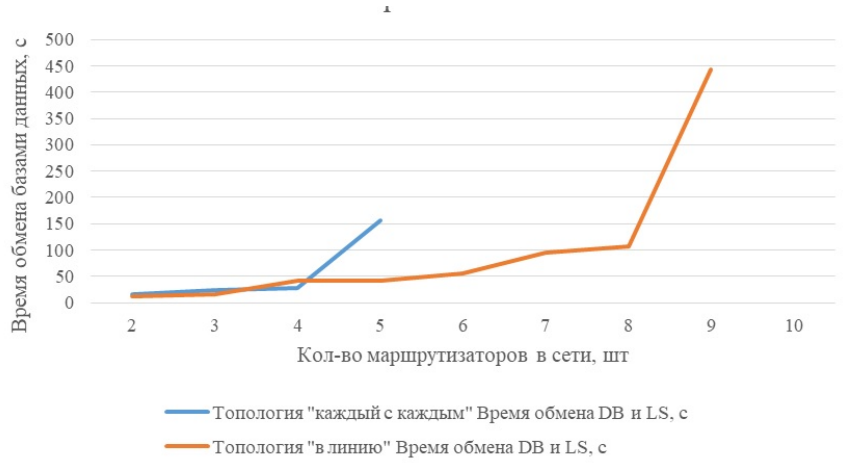

Рис. 7. Сравнение времени сходимости протокола *OSPF* в условиях разных топологий

2. При анализе времени сходимости и объёма передачи данных можно сделать вывод о том, что топология «в линию» более предпочтительна для функционирования протокола OSPF в отличии от топологии «каждый с каждым», сравнение топологий показано на рис. 7. Это связано с тем, что физически среда передачи данных в такой топологии рассредоточена, что приводит к большей пропускной способности интерфейсов, участвующих в эксперименте.

3. При ограничении скорости распространения среды до 1 кбит/с протокол *OSPF* не сходится даже для 2 узлов.

Заключение

Таким образом, рассмотрены два крайних случая соединения узловых устройств — «каждый с каждым» и «в линию», определена возможность использования протокола *OSPF* при физической скорости передачи данных не ниже 8 кбит/с.

Протокол *OSPF* позволяет точно определить топологию всей сети, на основании которой каждый УУ определяет таблицу маршрутизации. Из явных достоинств выявлена встроенная возможность определить событие полной готовности к передаче данных — переход УУ в режим *Full state*. Также протокол *OSPF* формирует низкое количество служебного трафика после процесса сходимости, необходимого для проверки состояния связности.

Однако сам процесс сходимости протокола *OSPF* занимает достаточно продолжительное время, измеряемое минутами, в течении которого сеть считается недоступной.

Полученные результаты при организации информационного обмена между роботами в составе кластера позволяют обеспечить:

- создание высоконадёжной системы информационного обмена между элементами кластера роботов как составной части их системы управления;
- обеспечение функций маршрутизации сообщений на каждом уровне реализации кластера роботов;
- обеспечение масштабируемости сети связи в зависимости от выполняемых задач;
- оптимизацию информационного обмена

между элементами кластера роботов с учётом ограниченности частотных ресурсов и ресурсов пропускной способности;

- обоснование набора технических и программных решений при реализации телекоммуникационного модуля роботов.

Полученные результаты дают возможность обоснованно использовать возможности протокола *OSPF* при физической скорости передачи данных не ниже 8 кбит/с в проекции на два крайних случая соединения узловых устройств — «каждый с каждым» и «в линию».

Литература

1. ГОСТ Р 60.0.0.4-2023 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения»: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2023-04-20 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. Москва: Российский институт стандартизации, 2023. 28 с.
2. *Авсиевич А.В., Колтыгин Д.С., Седельников И.А.* Аппаратно-программный комплекс для управления робототехническими комплексами // Вестник СамГУПС. 2021. №1(51). С. 91–97.
3. *Будко П.А., Жуков Г.А.* Групповое использование робототехнических комплексов при выполнении миссий на глобальных удалениях от пункта управления // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2017. Том 11. №9. С. 4–14.
4. *Никитина А.А., Уланов С.И.* Обнаружение объектов на местности интеллектуальными роботами в быстроменяющейся обстановке // Проблемы искусственного интеллекта. 2023. №3(30). С. 36–43.
5. *Дибров М.В.* Сети и телекоммуникации. Маршрутизация в IP-сетях: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2024. 423 с.
6. *Кирьянов В.А., Буторин К.А., Сухов А.А.* Анализ использования протоколов внутренней динамической маршрутизации RIP и OSPF в современных сетевых инфраструктурах // Наукосфера. 2023. №12-2. С. 177–181.
7. *Селифанов В.А., Мартыненко В.В.* Протоколы динамической маршрутизации и коммутации, метод построения сети связи для нужд ракетно-космической отрасли // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Том 7. №2. С. 63–69.
8. *Чертова О.Г., Новак К.В.* Возможные способы организации связи при построении сети морских робототехнических комплексов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Том 9. №4. С. 54–61.
9. *Будко П.А., Виноградeнко А.М., Жуков Г.А., Литвинов А.И.* Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Том 9. №1. С. 18–41.
10. *Родионов В.В., Филиппов С.И., Варабин Д.А.* Унифицированная система управления робототехническими комплексами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. №1(195). С. 128–140.
11. *Варганов В.В., Гривачев А.В., Курочкин А.Г., Титенко Е.А.* Структура интеллектуальной системы управления наземного робототехнического комплекса для формирования маршрута движения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Том 10. №2. С. 78–86.
12. *Рубцов И.В., Русанова О.Г.* Внедрение технологий группового применения военных робототехнических комплексов для нужд народного хозяйства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. №3. С. 44–53.
13. *Горский А.С.* Анализ требований к разработке системы передачи данных наземных робототехнических комплексов военного назначения // Вестник современных исследований. 2020. №8-2(38). С. 25–33.
14. *Яшин А.И., Будко П.А., Виноградeнко А.М.* Интеллектуальный контроль технического состояния морского робототехнического комплекса // Морская радиоэлектроника. 2020. №1(71). С. 46–51.
15. *Белов П.Ю., Попов А.М., Ружейников В.Н., Филатов В.И.* Моделирование процессов организации оценки технического состояния средств связи и автоматизированных средств управления робототехнических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. №1. С. 41–49.

Поступила 16 января 2025 г.

English

INVESTIGATION OF THE OSPF ROUTING PROTOCOL FOR AN ORGANIZATION INFORMATION EXCHANGE OF A GROUP OF ROBOTS DURING THEIR INTERACTION AS PART OF A CLUSTER

Andrey Konstantinovich Kanaev — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Electrical Communications, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)[1].
E-mail: kanaevak@mail.ru

Maria Alexandrovna Sakharova — PhD in Engineering, the Head of the Communication Systems Development, CJSC "Institute of Telecommunications"[2].
E-mail: zuvakamariya@mail.ru

Kseniya Borisovna Bobrova — Senior Engineer, Communication Systems Development, CJSC "Institute of Telecommunications"[2].
E-mail: bobrova@itain.ru

Ivan Vyacheslavovich Zakharov — the Leading Programmer, Communication Systems Development, CJSC "Institute of Telecommunications"[2].
E-mail: zakharov_i@itain.ru

Mikhail Mikhailovich Lukichev — PhD in Engineering, the Head of the Group, LLC "Teletax"[3].
E-mail: mixailspbpy@mail.ru

Evgeny Valerievich Oparin — PhD in Engineering, Associate Professor, the Leading specialist of the Communication Systems Development, CJSC "Institute of Telecommunications"[2].
E-mail: oparin@itain.ru

[1]*Address:* 190031, Russian Federation, Saint Petersburg, Moskovsky ave., 9.
[2]*Address:* 194100, Russian Federation, Saint Petersburg, Kantemirovskaya str., 5.
[3]*Address:* 191002, Russian Federation, Saint Petersburg, Vladimirsky ave., 21A.

Abstract: The paper presents the results of a study on the use of the OSPF dynamic routing protocol in organizing information interaction between robots in a cluster. The options for organizing the network interaction of robots with the topologies "each with each" and "in line" are considered in the absence of restrictions on the channel resource, as well as when the bandwidth of communication channels is limited. For each variant of the organization of the network interaction of robots, a number of experiments have been conducted to obtain quantitative characteristics of the dynamic OSPF routing process depending on the number of robots, the topology of their network interaction and the characteristics of the channel resource. Based on the results of the experiments, recommendations are given on the use of the OSPF dynamic routing protocol in organizing the information exchange of a group of robots in a cluster.

Keywords: robot, information exchange, routing, telecommunication module, OSPF protocol.

References

1. GOST R 60.0.0.4-2023 "Robots and robotic devices. Terms and definitions": national standard of the Russian Federation: date of introduction 2023-04-20 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Official edition. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023. 28 p.
2. *Avsievich A.V., Koltygin D.S., Sedelnikov I.A.* Hardware and software complex for controlling robotic complexes. Bulletin of SamGUPS. 2021. No. 1(51). Pp. 91–97.
3. *Budko P.A., Zhukov G.A.* Group use of robotic complexes when performing missions at global distances from the control center. T-Comm: Telecommunications and Transport. 2017. Volume 11. No. 9. Pp. 4–14.
4. Nikitina A.A., Ulanov S.I. Detection of objects on the ground by intelligent robots in a rapidly changing environment. Problems of artificial intelligence. 2023. No. 3(30). Pp. 36–43.
5. *Dibrov M.V.* Networks and telecommunications. Routing in IP networks: textbook and workshop for universities. 2nd ed., revised and additional. Moscow: Yurayt, 2024. 423 p.
6. *Kiryanov V.A., Butorin K.A., Sukhov A.A.* Analysis of the use of RIP and OSPF internal dynamic routing protocols in modern network infrastructures. Naukosfera. 2023. No. 12-2. Pp. 177–181.
7. *Selifanov V.A., Martynenko V.V.* Protocols of dynamic routing and switching, a method of building a communication network for the needs of the rocket and space industry. Rocket and space engineering and information systems. 2020. Volume 7. No. 2. Pp. 63–69.
8. *Chertova O.G., Novak K.V.* Possible ways of organizing communications when building a network of marine robotic complexes. High-tech technologies in space exploration of the Earth. 2017. Volume 9. No. 4. Pp. 54–61.
9. *Budko P.A., Vinogradenko A.M., Zhukov G.A., Litvinov A.I.* Complex use of various communication channels for controlling robotic complexes based on a unified radio monitoring system. High-tech technologies in space exploration of the Earth. 2017. Volume 9. No. 1. Pp. 18–41.

10. *Rodionov V.V., Filippov S.I., Varabin D.A.* Unified control system for robotic complexes. Izvestiya SFU. Technical sciences. 2018. No. 1(195). Pp. 128–140.

11. *Varganov V.V., Grivachev A.V., Kurochkin A.G., Titenko E.A.* The structure of an intelligent control system of a ground-based robotic complex for route formation. High-tech technologies in space exploration of the Earth. 2018. Volume 10. No. 2. Pp. 78–86.

12. *Rubtsov I.V., Rusanova O.G.* Introduction of technologies for the group use of military robotic and technical complexes for the needs of the national economy. Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2018. No. 3. Pp. 44–53.

13. *Gorsky A.S.* Analysis of requirements for the development of a data transmission system for ground-based military-purpose robotic systems. Bulletin of Modern Research. 2020. No.8-2(38). Pp. 25–33.

14. *Yashin A.I., Budko P.A., Vinogradenko A.M.* Intelligent control of the technical condition of the marine robotic complex. Marine radio electronics. 2020. No. 1(71). Pp. 46–51.

15. *Belov P.Yu., Popov A.M., Ruzheynikov V.N., Filatov V.I.* Modeling of organizational processes for assessing the technical condition of communications and automated controls of robotic technical systems. Problems of mechanical engineering and automation. 2017. No. 1. Pp. 41–49.