

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МНОГОПУТЕВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ РОЯ СВЕТЛЯЧКОВ

Перепелкин Д.А., д.т.н., доцент, декан факультета вычислительной техники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: perpelkin.d.a@rsreu.ru

Нгуен В.Т., аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: nguyenvantinsreu@gmail.com

INTELLIGENT MULTIPATH ROUTING IN SOFTWARE DEFINED NETWORKS BASED ON FIREFLY SWARM BEHAVIOR MODEL

Perepelkin D.A., Nguyen V.T.

Software defined networks (SDN) is a new architectural approach that separates network management from low-level data transfer functions. This approach makes it possible to make network management completely programmable, and abstract applications and network services from the network infrastructure. SDN have a number of advantages over traditional networks: they are flexibly manageable, dynamic, adaptive, and allow efficient use of physical equipment. The concept of multipath routing in the SDN allows reducing congestion in the network by redistributing network traffic and ensuring a given level of quality of service. The aim of the work is to develop a scientific approach to intelligent multipath routing in SDN based on the firefly swarm behavior model. The article studies and analyzes the model and algorithm of a swarm of fireflies for solving the problem of multipath routing in the SDN. A visual software system SDNLoadBalancer has been developed and an experimental SDN topology has been designed, which makes it possible to study in detail the processes of multipath routing in the SDN based on the proposed approach. The paper compares the proposed approach with the results of the work of the classical genetic algorithm and the artificial bee colony algorithm. The results of experimental studies have shown the effectiveness of the application of the firefly swarm model and algorithm in solving the problem of multipath routing in the SDN, made it possible to obtain results close to optimal, and also reduce the transmission delay jitter in the network.

Key words: software defined networks, SDNLoadBalancer, intelligent routing, multipath routing, swarm intelligence, firefly algorithm, firefly swarm.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, SDNLoadBalancer, интеллектуальная маршрутизация, многопутевая маршрутизация, роевой интеллект, алгоритм светлячков, рой светлячков.

Введение

В настоящее время ПКС органично вписались в многообразие современных трендовых технологий, таких как облачные вычисления, граничные вычисления, Интернет вещей и туманные вычисления. При соответствующих конфигурациях ПКС способны привести к выигрышам в каждой из указанных технологий [1-3].

С быстрым развитием сети Интернета спрос на передачу видеоданных резко возрастает, и потоковое видео обычно занимает большую долю пропускной способности в сети. При перегрузке каналов связи в сети происходит потеря пакетов данных. Для традиционной однопутевой маршрутизации ресурсы пропускной способности других каналов за пределами транспортно-путного пути простаивают в процессе передачи потокового видео. Применение методов многопутевой маршрутизации и балансировки потоков данных в ПКС позволяет устранить данные ограничения, обеспечить заданный уровень качества сервиса в сети и распределить потоки данных по сети

Программно-конфигурируемые сети (ПКС) – это новый архитектурный подход, отделяющий управление сетью от низкоуровневых функций передачи данных. Данный подход позволяет сделать управление сетью полностью программируемым, а прикладные приложения и сетевые службы абстрагировать от инфраструктуры сети. ПКС имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными сетями: гибко управляемы, динамичны, адаптивны, позволяют эффективно использовать физическое оборудование. Концепция многопутевой маршрутизации в ПКС позволяет уменьшить перегрузку в сети за счет перераспределения сетевого трафика и обеспечить заданный уровень качества сервиса. Цель работы – разработка научного подхода интеллектуальной многопутевой маршрутизации в ПКС на основе модели поведения роя светлячков. В статье проведено исследование и анализ модели и алгоритма роя светлячков для решения задачи многопутевой маршрутизации в ПКС. Разработана визуальная программная система SDNLoadBalancer и спроектирована экспериментальная топология ПКС, позволяющая детально исследовать процессы многопутевой маршрутизации в ПКС на основе предложенного подхода. В работе выполнено сравнение предложенного подхода с результатами работы классического генетического алгоритма и алгоритма искусственной пчелиной колонии. Результаты экспериментальных исследований показали эффективность применения модели и алгоритма роя светлячков при решении задачи многопутевой маршрутизации в ПКС, позволили получить близкие к оптимальным результаты, а также уменьшить джиттер задержки передачи в сети.

оптимальным образом. В данной статье для решения задачи многопутевой маршрутизации в ПКС предлагается

использовать интеллектуальный метод роевой оптимизации на основе модели поведения роя светлячков.

Теоретические исследования

В работе [4] был предложен алгоритм двунаправленного поиска множества путей на основе вспомогательного графа. В работах [5, 6] предложены алгоритмы маршрутизации для обеспечения качества сервиса в ПКС на основе генетического алгоритма и алгоритма муравьиной колонии. Анализ различных метрик каналов связи в процессе маршрутизации изучен и рассмотрен в работах [7, 8]. В работе [9] предложен подход к многопутевой маршрутизации, основанный на структуре ПКС для удовлетворения QoS, необходимого для различных видов трафика. Данный подход учитывает доступную полосу пропускания и задержки для выбора наилучшего пути. Адаптивная схема многопутевой маршрутизации, основанная как на активном опросе, так и на прогнозировании трафика предложена в [10]. В работе [11] предлагается метод балансировки трафика, который за счет централизованного метода генерации маршрутной информации в ПКС-контроллере и использования многопутевой маршрутизации упрощает реконфигурацию трафика и обеспечивает максимально равномерную загрузку сети. В работе [12] предложен алгоритм многопутевой маршрутизации, позволяющий повысить производительность сети за счет уменьшения объема служебных пакетов. В работе [13] предложен метод централизованного формирования маршрутной информации в распределенных центрах обработки данных на основе технологии ПКС, позволяющий избежать реорганизации маршрутной информации для ранее созданных участков маршрута. В работе [14] рассматривается концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки. Визуальная среда и программная инфраструктура для распределенной обработки данных представлены в работе [15]. Подходы к динамическому управлению трафиком в облачной инфраструктуре программно-конфигурируемых сетей и центров обработки данных рассматриваются в работах [16-18]. Подходы интеллектуальной многопутевой маршрутизации в ПКС на основе методов роевого интеллекта предложены в работах [19-22].

Таким образом, актуальной научной задачей является разработка новых моделей и алгоритмов интеллектуальной многопутевой маршрутизации в ПКС на основе методов роевого интеллекта.

Алгоритм поведения роя светлячков

Алгоритм поведения роя светлячков – это метаэвристический алгоритм, вдохновленный естественной биологией, для решения задач оптимизации. Алгоритм вдохновлен ночным мигающим поведением светлячков. Алгоритм основан на трех правилах, используемых при построении модели. Первое правило заключается в том, что любой светлячок может быть привлечен к любому другому более яркому. Второе правило – яркость светлячка определяется из закодированной целевой функции. Третье правило – привлекательность прямо

пропорциональна яркости, но уменьшается с расстоянием, и светлячок будет двигаться в сторону более яркого. Схема алгоритма роя светлячков приведена на рис. 1.

Шаг 1. Инициализация начальных параметров N , Max , K_{paths} , γ , β_0 , α_0 , где N – число светлячков (размер популяции); Max – число итераций; K_{paths} – число кратчайших путей; γ – коэффициент поглощения; β_0 – фактор яркости светлячка; α_0 – параметр, контролирующий размер шага.

Шаг 2. Инициализация начальной позиции светлячков.

Начальная популяция представляется следующим образом:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N].$$

Начальная позиция i -го светлячка ($i = 1, 2, \dots, N$) генерируется случайным и представляется следующим образом:

$$x_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}],$$

$$x_{i,j} \in [-1.0, 1.0], \quad j \in (1, 2, \dots, n),$$

где n – число узлов графа.

Шаг 3. Оценка яркости (приспособленности) светлячков.

Функция оценки яркости определяется как:

$$f(x_i) = \frac{1}{w(x_i)},$$

где $f(x_i)$ вычисляет значение яркости i -го светлячка и $w(x_i)$ вычисляет значение длины пути соответствующей позиции x_i .

Шаг 4. Инициализация начального значения счетчика итерации $k = 1$.

Шаг 5. Размер шага перемещения светлячков уменьшается по каждой итерации

$$\alpha = \alpha_0 \theta^k,$$

где $\theta \in [0.9, 0.99]$ – константа, характеризующая скорость уменьшения α .

Шаг 6. Перемещение светлячков.

for $i = 1 : N$

for $j = 1 : N$

Подшаг 6.1. Вычисление размера шага

$$A_{ij} = 2 \times \alpha \times \left(e - \frac{1}{2} \right),$$

где e – случайное число в интервале (0, 1).

if $(f(x_j) > f(x_i))$

Подшаг 6.2. Вычисление расстояния между светлячками i и j

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{d=1}^n (x_{id} - x_{jd})^2}.$$

Подшаг 6.3. Оценка привлекательности между светлячками i и j

$$B_{ij} = \beta_0 \times e^{-\gamma \times r_{ij}^2}.$$

Подшаг 6.4. i -й светлячок перемещается к j -у

светлячку

$$x_i = x_i + B_{ij} \times (x_j - x_i) + A_{ij}.$$

else

Подшаг 6.5. i -й светлячок случайно перемещается

$$x_i = x_i + A_{ij}.$$

end if

Подшаг 6.6. Обновление яркости i -го светлячка

end for i

end for j

Шаг 7. Сортировка популяции по значению яркости (по длине пути).

Шаг 8. Отбор K_paths кратчайших путей и добавление их в список кандидатов R .

Шаг 9. Увеличение значения счетчика итерации на единицу $k = k + 1$.

Шаг 10. Проверка условия остановки.

Если $k < Max$, то вернуться к шагу 5.

Если $k = Max$, то перейти к шагу 11.

Шаг 11. Сортировка списка кандидатов R по значению яркости (по длине пути).

Шаг 12. Отбор K_paths кратчайших путей.

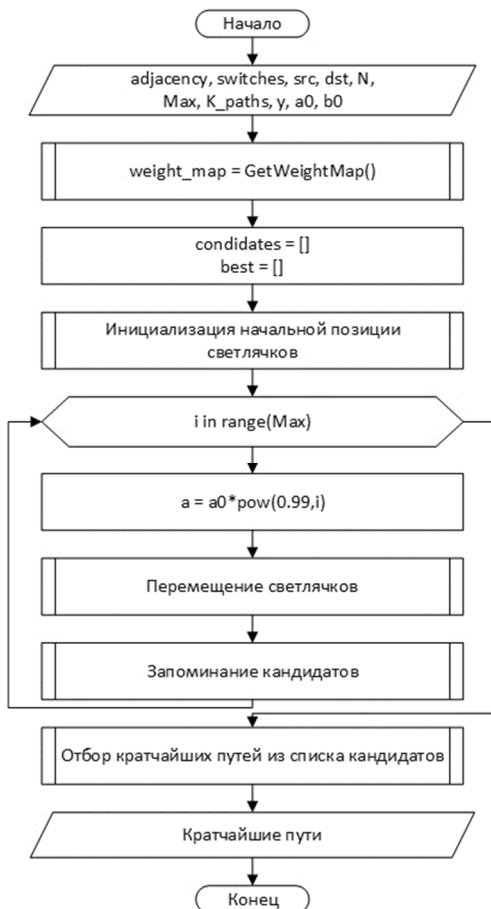


Рис. 1. Схема алгоритма поведения роя светлячков

Экспериментальное исследование

Для оценки эффективности алгоритма роя светлячков для решения задач многопутевой маршрутизации в ПКС была разработана виртуальная среда SDNLoadBalancer на языке C++ в свободной IDE Qt Creator. Визуальная среда позволила спроектировать экспериментальные топологии ПКС, включающие основные компоненты, такие как маршрутизаторы, контроллеры и серверы, а также каналы связи между ними. Для проверки подключения и параметров сети предложено использовать сетевой эмулятор Mininet и контроллер Ryu. Визуальная среда SDNLoadBalancer позволяет сгенерировать сценарий на языке Python для запуска эмулятора Mininet. В данной работе исследовалась сетевая топология, состоящая из 50 узлов и 120 ребер.

Алгоритм роя светлячков – это интеллектуальный роевой алгоритм, который имитирует мерцающее поведение светлячков. Чтобы наиболее точно оценить эффективность алгоритма роя светлячков при поиске кратчайших путей, в работе выполнено сравнение алгоритма с классическим алгоритмом Йена. В табл. 1 показаны кратчайшие пути, найденные с помощью алгоритма Йена.

На рис. 3 показаны результаты алгоритма роя светлячков в визуальной среде SDNLoadBalancer. Полученные маршруты отмечены разными цветами.

На рис. 4 и 9 показаны результаты работы рассматриваемых алгоритмов: $Parameters$ – параметры алгоритма; $Algorithm$ – тип алгоритма; K_paths – число кратчайших путей, CD – общая длина, т.е. общая маршрутная метрика всех доступных маршрутов между коммутатором-источником и коммутатором-получателем, Ds – длина маршрута, I – доля информации, проходящей через маршрут, AV – среднее значение каналов, входящих в маршрут, SD – квадратичное отклонение каналов, входящих в маршрут, $MxVL$ – максимальное значение канала в маршруте, $MnVL$ – минимальное значение канала в маршруте, J – отклонение значения длины текущего маршрута от длины оптимального маршрута.

Рассмотрим влияние размера популяции на эффективность работы алгоритма роя светлячков. Из рисунка выше видно, что чем больше размер популяции, тем лучше получаемые результаты. При $N=20$ предлагаемый алгоритм позволяет найти десять маршрутов, общая длина которых меньше, чем при $N=10$ и $N=15$ ($CD = 1680 < 1710 < 1775$). Хотя рассматриваемые размеры популяций существенно не отличались друг от друга, они демонстрировали существенно разные результаты. Длины каждого маршрута, найденного во всех трех случаях, показаны на рис. 5.

Из-за случайности алгоритма роя светлячков каждый новый запуск алгоритма будет показывать разные результаты. Поэтому в работе предложено запустить алгоритм 50 раз, чтобы проверить, сколько раз были найдены маршруты в соответствии с табл. 1, а также оценить время выполнения алгоритма при каждом запуске. Полученные результаты приведены на рис. 6-8.

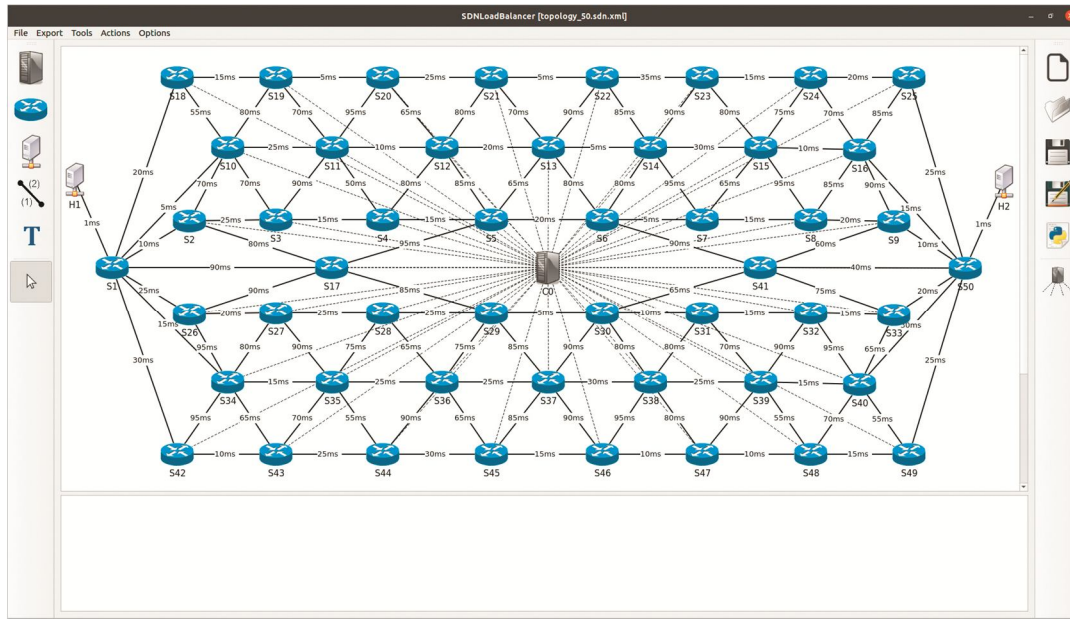


Рис. 2. Топология ПКС из 50 узлов и 120 ребер

Таблица 1. Результат работы алгоритма Йена

№	Кратчайшие пути	Стоимость (вес)
1	1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 50	120
2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 50	135
3	1, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 50	160
4	1, 10, 11, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 50	165
5	1, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 50	165
6	1, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50	170
7	1, 10, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 50	175
8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 15, 16, 50	180
9	1, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 50	180
10	1, 18, 19, 20, 12, 13, 14, 15, 16, 50	185
Общая стоимость (вес) всех путей = 1635		

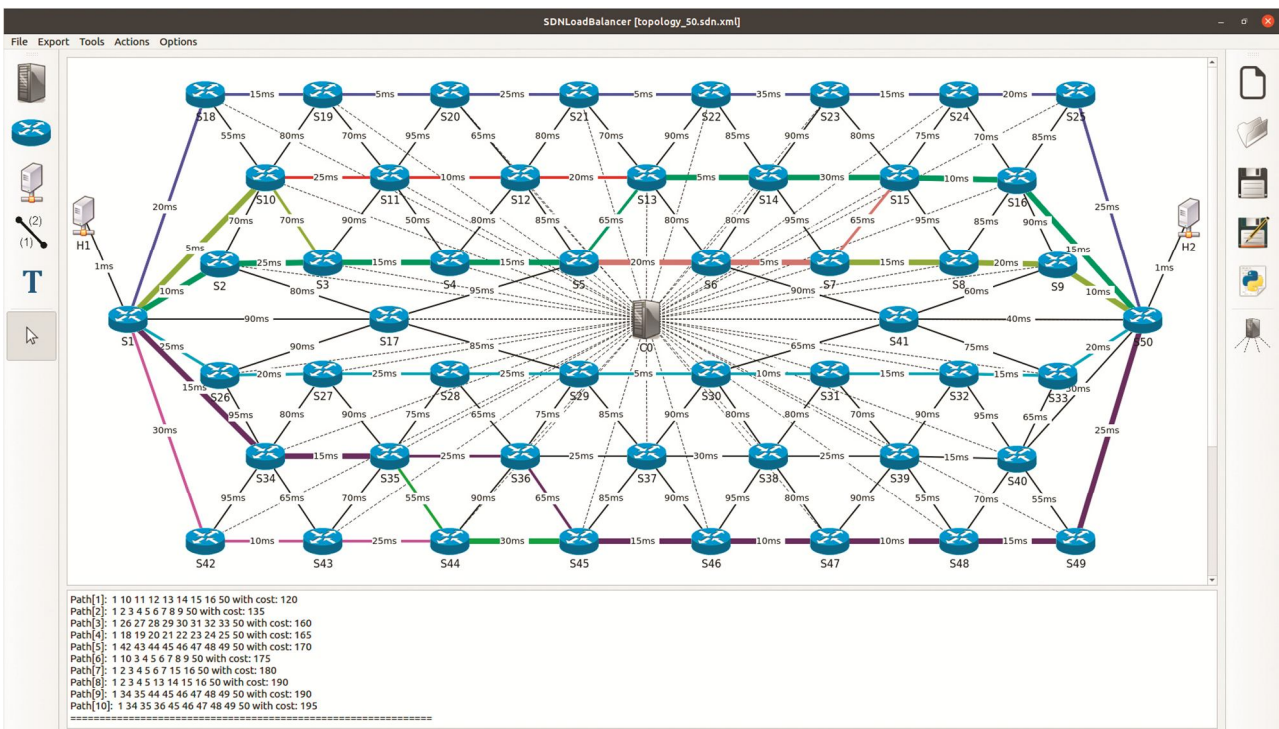


Рис. 3. Результат работы алгоритма светлячков

Result of firefly algorithm										
Parameters	K_paths	CD	Ds	I, %	AV	SD	MxVL	MnVL	J, %	
1	N=10 Max=1000	10	1775	135	12.9	15	5.8	25	5	34.15
2				160	10.9	17.8	6.7	25	5	
3				165	10.6	18.3	9.1	35	5	
4				165	10.6	18.3	12.9	50	5	
5				170	10.3	18.9	8.1	30	10	
6				185	9.4	20.6	17.4	65	5	
7				190	9.2	21.1	13.5	55	10	
8				195	9	21.7	19.6	75	5	
9				205	8.5	22.8	18.9	70	5	
10				205	8.6	29.3	17.4	65	5	
11	N=15 Max=1000	10	1710	135	12.6	15	5.8	25	5	28.95
12				160	10.6	17.8	6.7	25	5	
13				165	10.3	18.3	12.9	50	5	
14				165	10.3	18.3	9.1	35	5	
15				170	10	18.9	8.1	30	10	
16				175	9.7	19.4	18.6	70	5	
17				180	9.4	20	16.8	65	5	
18				180	9.4	22.5	6.1	30	15	
19				190	8.8	21.1	13.5	55	10	
20				190	8.9	21.1	21.8	80	5	
21	N=20 Max=1000	10	1680	120	13.7	15	8.7	30	5	38.46
22				135	12.2	15	5.8	25	5	
23				160	10.3	17.8	6.7	25	5	
24				165	10	18.3	9.1	35	5	
25				170	9.7	18.9	8.1	30	10	
26				175	9.4	19.4	18.6	70	5	
27				180	9.1	20	16.8	65	5	
28				190	8.6	21.1	17.1	65	5	
29				190	8.6	21.1	13.5	55	10	
30				195	8.4	21.7	16.2	65	10	

K_paths = 10

Рис. 4. Результаты работы алгоритма светлячков с разными размерами популяции

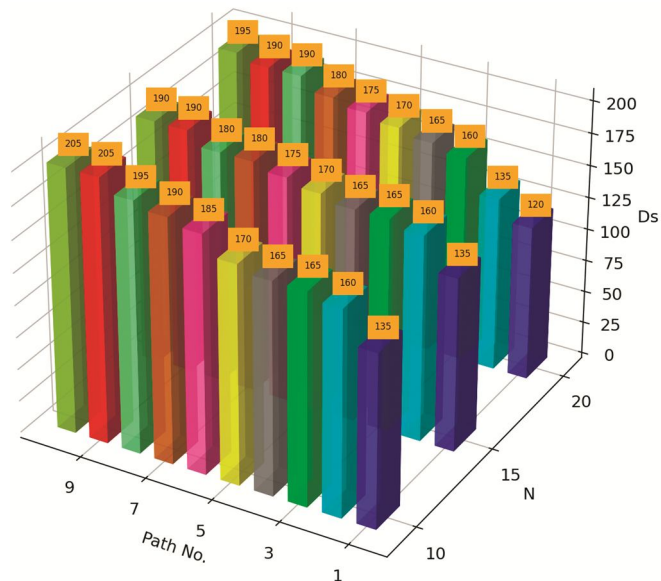


Рис. 5. Диаграмма отображения длины каждого пути

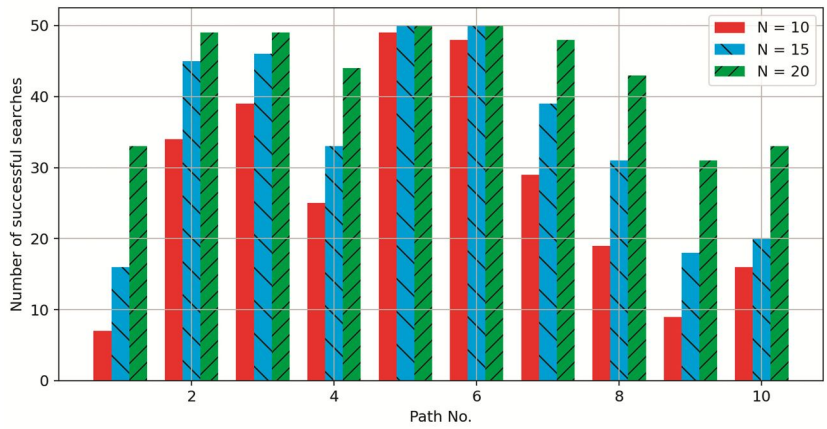


Рис. 6. Диаграмма сравнения количества успешного поиска для каждого маршрута

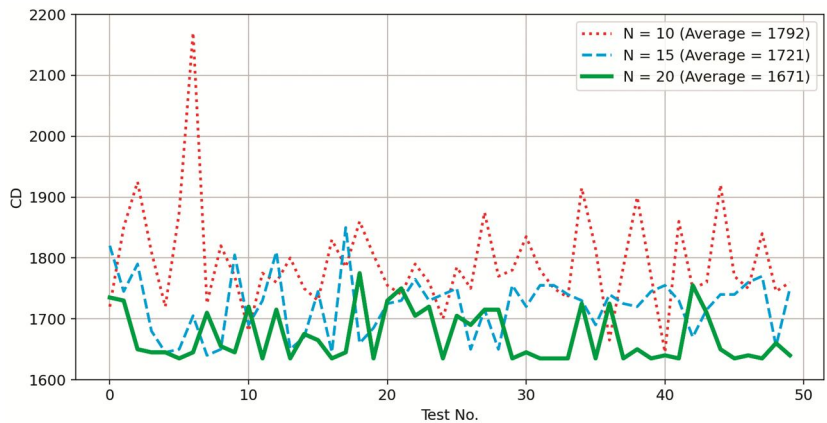


Рис. 7. График отображения значения CD для каждого запуска

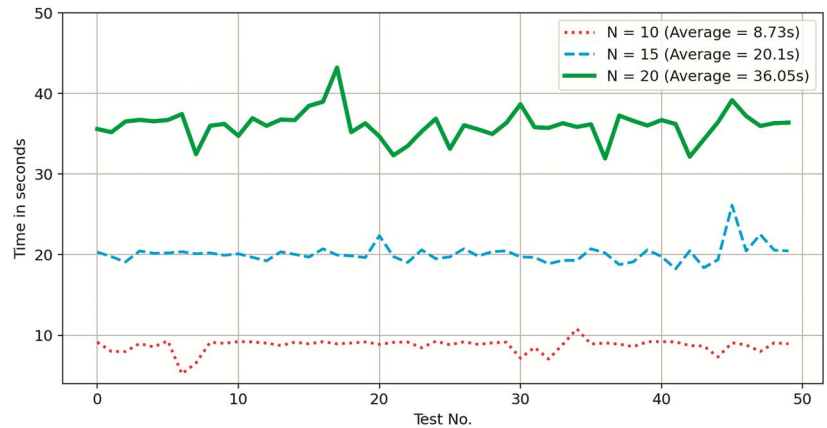


Рис. 8. Время выполнения алгоритма светлячков с разными размерами популяции

Из рис. 6 видно, что при значении $N=20$ алгоритм роя светлячков находил маршруты по табл. 1 более точно. Аналогично, на рис. 7 при значении $N=20$ (зеленая линия), общая длина всех маршрутов наименьшая (среднее значение ($CD = 1671 < 1721 < 1792$)). Однако рис. 8 показывает, что время выполнения при значении $N=20$ самое большое, почти вдвое больше при $N=15$ и в четыре раза больше при $N=10$.

Кроме того, в работе проведено экспериментальное исследование и сравнительный анализ алгоритма роя светлячков (FA) с двумя другими алгоритмами, относящимися к системе алгоритмов роевого интеллекта, а именно, с алгоритмом искусственной пчелиной колонии (ABC) и генетическим алгоритмом (GA). Параметры алгоритма роя светлячков задаются следующим образом:

$N = 20$; $Max = 1000$; $\gamma = 1$; $\alpha_0 = 1$; $\beta_0 = 1$. Используемые параметры ABC: $N = 20$; $Max = 1000$. Используемые параметры GA: размер популяции $N=20$, количество итераций $Max = 1000$, вероятность кроссовера $P_c = 0.9$ и вероятность мутации $P_m = 0.9$.

В классическом генетическом алгоритме вероятность мутации обычно очень мала ($0.01 \leq P_m \leq 0.1$). Но для задачи многопутевой маршрутизации большая вероятность мутации создает разнообразие для популяции, тем самым давая лучшие результаты.

Из рис. 11 и 12 видно, что алгоритм роя светлячков находил кратчайшие пути и показывал лучшие результаты, чем алгоритм искусственной пчелиной колонии и генетический алгоритм: $CD = 1645 < 1765 < 2335$.

Result of firefly algorithm										
Algorithm	K_paths	CD	Ds	I, %	AV	SD	MxVL	MnVL	J, %	
1	FA	10	1645	120	13.5	15	8.7	30	5	36.84
2				135	12	15	5.8	25	5	
3				160	10.1	17.8	6.7	25	5	
4				165	9.8	18.3	12.9	50	5	
5				165	9.8	18.3	9.1	35	5	
6				170	9.5	18.9	8.1	30	10	
7				175	9.2	19.4	18.6	70	5	
8				180	9	22.5	6.1	30	15	
9				185	8.7	20.6	17.4	65	5	
10				190	8.4	21.1	13.5	55	10	
11	ABC	10	1765	135	12.9	15	5.8	25	5	34.15
12				160	10.9	17.8	6.7	25	5	
13				165	10.5	18.3	9.1	35	5	
14				165	10.5	18.3	12.9	50	5	
15				170	10.2	18.9	8.1	30	10	
16				175	9.9	19.4	18.6	70	5	
17				190	9.1	21.1	13.5	55	10	
18				195	8.9	21.7	16.2	65	10	
19				205	8.5	20.5	14.9	55	5	
20				205	8.6	22.8	18.9	70	5	
21	GA	10	2335	160	14.3	17.8	6.7	25	5	38.46
22				205	11.2	29.3	17.4	65	5	
23				225	10.2	25	17.6	70	5	
24				235	9.7	23.5	15.7	65	5	
25				235	9.7	29.4	20.4	65	5	
26				250	9.2	27.8	25	95	5	
27				250	9.2	27.8	19.7	80	5	
28				255	9	25.5	18.9	75	5	
29				260	8.7	26	22.6	90	5	
30				260	8.8	26	19.5	80	5	

K_paths = 10

Рис. 9. Результаты работы алгоритмов FA, ABC и GA

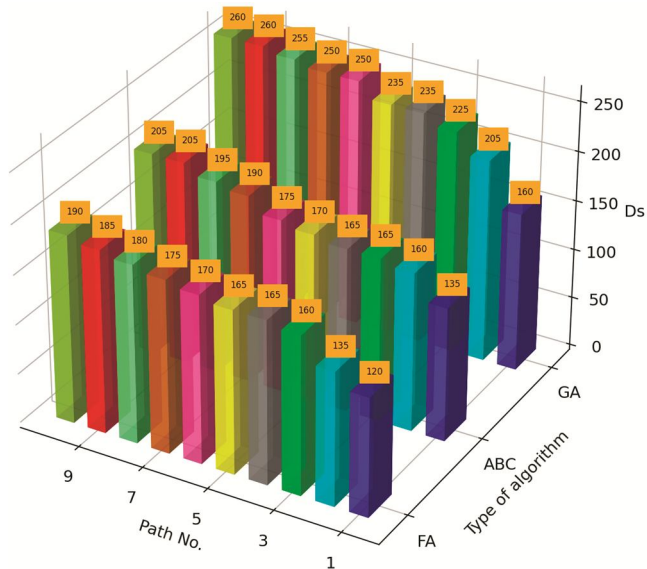


Рис. 10. Диаграмма отображения длины каждого пути

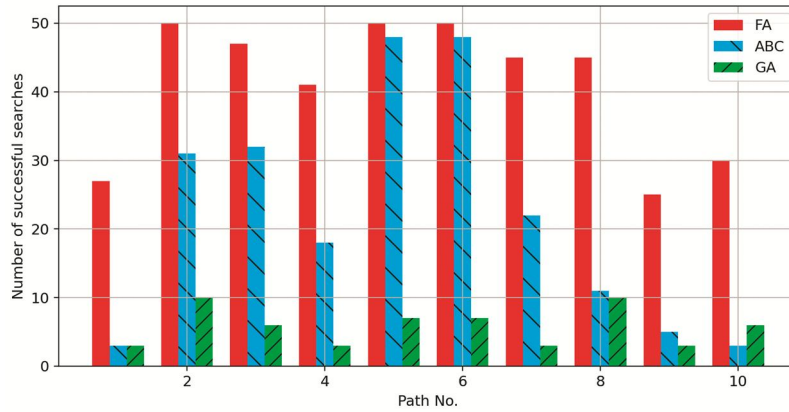


Рис. 11. Диаграмма сравнения алгоритмов FA, ABC и GA

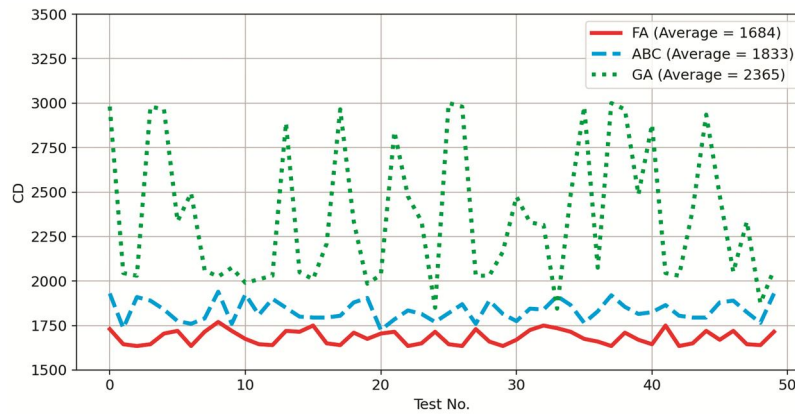


Рис. 12. График сравнения между FA, ABC и GA по значению CD

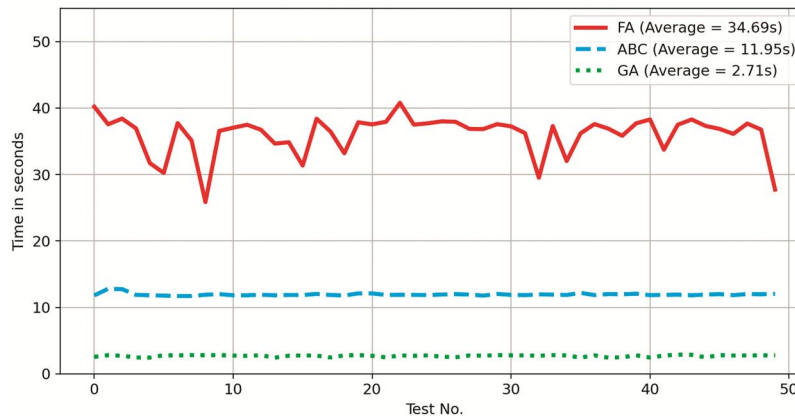


Рис. 13. График сравнения алгоритмов FA, ABC и GA по времени выполнения

На рис. 11 показано, что алгоритм роя светлячков находил оптимальные маршруты более точно по сравнению с двумя другими рассматриваемыми алгоритмами. На рис. 12 показано, что алгоритм роя светлячков (красная линия) имеет наименьшее значение по длине всех найденных маршрутов для каждого запуска алгоритма. Среднее значение CD после 50 запусков алгоритма роя светлячков также ниже, чем у алгоритма искусственной пчелиной колонии и генетического алгоритма. Однако время выполнения предложенного алгоритма самое высокое (рис. 13).

Заключение

В работе предложен подход интеллектуальной многопутевой маршрутизации в ПКС на основе модели поведения роя светлячков. Алгоритм роя светлячков основан на естественной биологии и применяется для решения раз-

личных задач оптимизации. Алгоритм вдохновлен ночным мигающим поведением светлячков. В статье спроектирована экспериментальная топология ПКС и разработана визуальная программная система SDNLoadBalancer, позволяющая детально исследовать процессы многопутевой маршрутизации в ПКС на основе предложенного подхода. Также в работе выполнено сравнение предложенного подхода с результатами работы алгоритма Йена, генетического алгоритма и алгоритма искусственной пчелиной колонии. Результаты экспериментальных исследований показали эффективность применения модели и алгоритма поведения роя светлячков для решения задачи многопутевой маршрутизации в ПКС, позволили получить близкие к оптимальным результаты, уменьшить джиттер задержки передачи и повысить общую производительность всей сети.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) и Правительства

Литература

1. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Программно-конфигурируемые сети. Учебник для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2020. 288 с.
2. Солозобов А.С. Масштабируемость и надёжность программно-конфигурируемых сетей. Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. Т. 2. № 3. С. 111-115.
3. Коляденко Ю.Ю., Белоусова Е.Э. Программно-конфигурируемые сети на базе протокола openflow и их характеристики. ScienceRise. 2016. Т. 3. № 2 (20). С. 11-16.
4. Волков А.С., Баскаков А.Е. Разработка процедуры двунаправленного поиска для решения задачи маршрутизации в транспортных программно-конфигурируемых сетях. Труды МАИ. 2021. № 118.
5. Полежаев П.Н., Бахарева Н.Ф., Шухман А.Е. Разработка эффективного генетического алгоритма маршрутизации и обеспечения качества обслуживания для программно-конфигурируемой сети. Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 1 (176). С. 229-233.
6. Полежаев П.Н., Ушаков Ю.А., Поляк Р.И., Мионов А.П. Применение методов муравьиной колонии в разработке эффективных алгоритмов маршрутизации и обеспечения QoS для корпоративных программно-конфигурируемых сетей. Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2014. № 4. С. 106-113.
7. Koryachko V.P., Perepelkin D.A., Ivanchikova M.A., Byshov V.S., Tsyganov I.Yu. Analysis QoS Metrics in Software Defined Networks. Proceedings MECO 2017 – IEEE 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO-2017), 2017, pp. 374-378. DOI: 10.1109/MECO.2017.7977240.
8. Манов И.А. Эффективная многопараметрическая маршрутизация трафика в программно-конфигурируемых сетях. В сборнике: Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019. Доклады 21-й Международной конференции. 2019. С. 215-220.
9. Venkatesh K., Srinivas L., Krishnan M.M., Shanthini A. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications. Future Generation Computer Systems 2019; 93: 256–65.
10. Sahhaf S., Tavernier W., Colle D., Pickavet M. Adaptive and reliable multipath provisioning for media transfer in SDN-based overlay networks. Computer Communications 2017; 106: 107-16
11. Ejaz S., Iqbal Z., Shah P. A., Bukhari B. H., Ali A. Traffic load balancing using software defined networking (SDN) controller as virtualized network function. IEEE Access 2019, Vol. 7, pp. 46646-46658. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909356.
12. K. Rajasekaran, Kannan Balasubramanian. Energy Conscious based Multipath Routing Algorithm in WSN. International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS), Vol.8, No.1, pp.27-34, 2016. DOI: 10.5815/ijcnis.2016.01.04
13. Kulakov Y., Kohan A. Traffic orchestration in data center network based on software-defined networking technology. International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications ICCSEEA 2019: Advances in Computer Science for Engineering and Education II, pp. 228-237 (2019).
14. Перепелкин Д.А. Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки. Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 8. С. 602-610.
15. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Иванчикова М.А., Бышов В.С., Цыганов И.Ю. Программная инфраструктура и визуальная среда распределенной обработки потоков данных в программно-конфигурируемых сетях. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 44-54. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-44-54.
16. Никульчев Е.В., Паян С.В., Плужник Е.В. Динамическое управление трафиком программно-конфигурируемых сетей в облачной инфраструктуре. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (45). С. 54-57.
17. Леохин Ю.Л., Фатхулин Т.Д. Оценка возможности предоставления гарантированной скорости передачи данных в программно-конфигурируемой оптической сети. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 45-59. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-45-59.
18. Ушакова М.В., Ушаков Ю.А. Исследование сети виртуальной инфраструктуры центра обработки данных с гибридной программно-конфигурируемой коммутацией. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 34-43. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-34-43.
19. Перепелкин Д.А., Нгуен В.Т. Исследование и анализ процессов многопутевой маршрутизации и балансировки потоков данных в программно-конфигурируемых сетях на основе генетического алгоритма. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 79. С. 31-48. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-79-31-48.
20. Перепелкин Д.А., Нгуен В.Т. Интеллектуальная многопутевая маршрутизация в программно-конфигурируемых сетях на основе алгоритма искусственной пчелиной колонии. Информационные технологии. 2022. Т. 28. № 8. С. 395-404. DOI: 10.17587/it.28.395-404.
21. Перепелкин Д.А., Иванчикова М.А., Нгуен В.Т. Интеллектуальная многопутевая маршрутизация в программно-конфигурируемых сетях на основе алгоритмов оптимизации муравьиной колонии. Информационные технологии. 2022. Т. 28. № 10. С. 520-528. DOI: 10.17587/it.28.520-528.
22. Перепелкин Д.А., Иванчикова М.А., Нгуен В.Т. Интеллектуальная многопутевая маршрутизация в программно-конфигурируемых сетях на основе алгоритма миграции стаи птиц. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 44-59. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-44-59.