

مجازی‌سازی قطعی کارکردهای شبکه



دانشکده مهندسی
کامپیوتر و فناوری اطلاعات

پرهام الوانی

۴ بهمن ۱۳۹۹

دانشکده مهندسی کامپیوتر

دکتر بهادر بخشی

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۳ مرور ادبیات

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۳ مرور ادبیات

۴ مسالهی پیشنهادی

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۳ مرور ادبیات

۴ مسالهی پیشنهادی

۱. مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

شبکه‌های سنتی

- ◀ یک سرویس شبکه به صورت تعدادی **کارکرد مشخص** که ترافیک با **ترتیب مشخصی** از آن‌ها عبور می‌کند، تعریف می‌شود.
- ◀ کارکردهای شبکه به صورت سخت‌افزار و نرم‌افزار اختصاصی تهیه شده از سازندگان مختلف استفاده می‌شوند.
- ◀ کارکردها باید در **مکان مناسب** در شبکه قرار گیرند و ترافیک به سمت آن‌ها **هدایت** شود.

شبکه‌های سنتی

◀ افزایش نیازمندی به سرویس‌های **متنوع** با **عمر کوتاه** و **نرخ بالای ترافیک**

- خریداری، انبارداری و استقرار سخت‌افزارهای اختصاصی
- افزایش هزینه‌های خرید، آموزش و انبارداری
- کاهش فضای فیزیکی
- سربار آموزش کارکنان
- محدودیت نوآوری در سخت‌افزار و سرویس

Network Functions Virtualization

مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

شبکه‌های سنتی

- ◀ ترافیک کاربر باید از تعدادی کارکرد شبکه به ترتیب معینی عبور کند.
 - ◀ کارکردها به صورت سخت‌افزاری به یکدیگر متصل هستند و ترافیک با استفاده از جداول مسیریابی به سمت آن‌ها هدایت می‌شود.
 - ◀ نیاز به تغییر همبندی سریع و یا مکان کارکردها برای سرویس‌دهی بهتر
- استقرار و تغییر ترتیب کارکردها دشوار است
 - امکان رخ دادن خطاهای متعدد

Service Function Chaining

زنجیره‌سازی کارکرد سرویس

◀ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

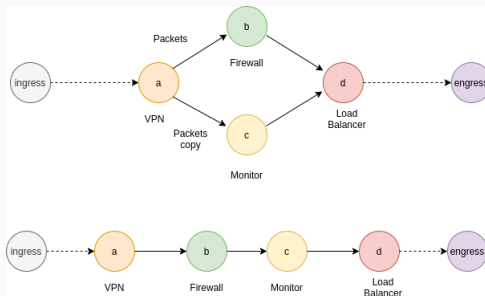
- اواخر سال ۲۰۱۲، ETSI NFV ISG توسط هفت اپراتور جهانی شبکه تأسیس شد.
- اکنون بیش از ۲۵۰ سازمان با آن همکاری می‌کنند.
- اجرای کارکردها بر روی سرورهای استاندارد با توان بالا به وسیله مجازی‌سازی کارکردها
- کاهش نیاز به تجهیزات سخت‌افزاری خاص منظوره
- اشتراک گذاری منابع بین کارکردها
- کاهش هزینه‌های تجهیزات و مصرف انرژی از طریق تجمیع کارکردها

◀ زنجیره‌سازی کارکرد سرویس

- امکان تعریف زنجیره کارکردها به صورت پویا و بدون تغییر در زیرساخت فیزیکی
- قابل اجرا بر بستر شبکه‌های سنتی یا نرم‌افزار بنیان
- RFC 7665

راهکار NFV

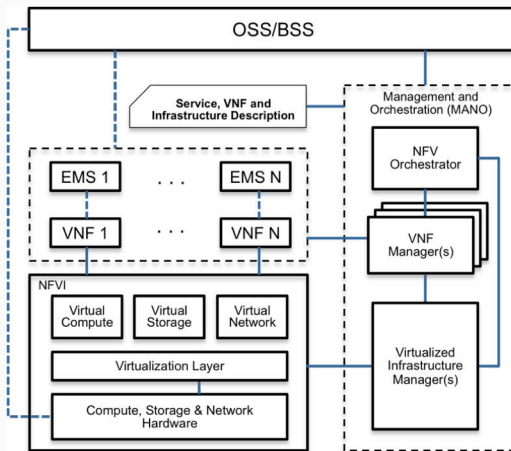
- ◀ زنجیره‌های مرتب تمام
- ◀ زنجیره‌های مرتب جزئی



شکل ۱: زنجیره‌های مرتب جزئی و کامل

Song Yang et al. "Recent Advances of Resource Allocation in Network Function Virtualization". In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 32.2 (Feb. 2021), pp. 295–314. DOI: 10.1109/tpds.2020.3017001. URL: <https://doi.org/10.1109/tpds.2020.3017001>

راهکار NFV



شکل ۲: معماری سطح بالای مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

راهکار NFV

- ◀ NFVO وظیفه‌ی استقرار زنجیره‌های کارکرد سرویس را برعهده دارد.
- ◀ VNFM مسئول چرخه‌ی زندگی کارکردهای مجازی شبکه می‌باشد.

تخصیص منابع

◀ جایگذاری کارکردهای مجازی شبکه به همراه مسیریابی ترافیک

VPTR: VNF Placement and Traffic Routing

◀ جایگذاری کارکردهای مجازی شبکه

VNFP: VNF Placement

◀ مسیریابی ترافیک

TRR: Traffic Routing

◀ بازاستقرار و تثبیت کارکردهای مجازی شبکه

VRC: VNF Redeployment and Consolidation

اهداف

◀ هزینه

- مساله‌ی پایه‌ای در بحث تخصیص منابع
- وجود جواب با برآورده شدن محدودیت‌های نودها و لینک‌ها
- NP-Hard

◀ کیفیت سرویس

• تاخیر

- انتشار
- انتقال
- صف
- پردازش

• دسترسی پذیری

اهمیت تاخیر

- ◀ کیفیت سرویس انتها به انتها یک زنجیره در واقع معیار کارآیی است که توسط کاربران احساس می‌شود.
- ◀ ظهور اینترنت اشیا و شبکه‌های نسل پنجم
 - Tactile Internet
 - شبکه‌های باتاخیر بسیار کم

مدل‌سازی تاخیر

- ◀ برای محاسبه تاخیر نیاز به مدل‌سازی می‌باشد.
- ◀ می‌توان تاخیر را ثابت فرض کرده یا آن را به صورت معین در نظر گرفت.
- ◀ تاخیر تصادفی
 - تئوری صف: حالت میانه را پیدا می‌کند.
 - **Network Calculus**: بدترین حالت را پیدا می‌کند و می‌بایست مدل مناسب با کمترین فاصله را بدست آورد.

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۳ مرور ادبیات

۴ مساله‌ی پیشنهادی

۲. شبکه‌های قطعی

مقدمه

- ◀ حضور کاربردهای بلادرنگ بسیار حساس به تاخیر و خرابی
 - Controller (HDMI)، Interface Multimedia High-Definition etc. bus)، (CAN Network Area
 - مهاجرت از شبکه‌های خاص‌منظوره به شبکه‌های IP
 - تاخیر قطعی در مقابل تاخیر احتمالی

- ◀ عدم قطعیت ذاتی شبکه‌های فعلی
 - الگوریتم‌های زمان‌بندی
 - ازدحام
 - خرابی
 - ...

- ◀ نیاز به ایجاد قطعیت در معماری شبکه

شبکه‌سازی حساس به زمان (Time Sensitive Networking)

- ◀ کارگروه IEEE 802.1 TSN
- ◀ تمرکز بر لایه پیوند داده
- ◀ جریان TSN: یک ارتباط شبکه‌ای تک‌پخشی یا چندپخشی از یک ایستگاه انتهایی به یک ایستگاه انتهایی دیگر

شبکه‌سازی حساس به زمان (Time Sensitive Networking)

- ◀ Flow Concept: A TSN flow (data link flow) is characterized by the QoS properties.
- ◀ Flow Synchronization: IEEE 802.1AS Time Synchronization for Time-Sensitive Applications
- ◀ Flow Management: Enables operators to dynamically discover, configure, monitor, and report bridge and end station capabilities.
- ◀ Flow Control: Specifies how frames belonging to a prescribed traffic class are handled within TSN enabled bridges.
- ◀ Flow Integrity: Deliver frames regardless of the dynamic network conditions, including physical breakage and link failures.

شبکه‌سازی قطعی (Deterministic Networking)

- ◀ کارگروه IETF DetNet
- ◀ تمرکز بر لایه شبکه
- ◀ برای شبکه‌هایی با مدیریت مشترک یا تحت مدیریت گروه کوچک
- ◀ شبکه‌سازی قطعی نمونه‌ای از سرویس گارانتی‌شده IntServ می‌باشد.
- ◀ جریان‌های DetNet بر اساس کلاس‌های کیفیت سرویس مشخص می‌شوند.
- ◀ در نظر گرفتن جریان‌های DetNet در کنار جریان‌های non-DetNet اهداف
 - کران معین برای تاخیر
 - کران معین تغییرات تاخیر
 - کمترین میزان از دست رفتن بسته

شبکه‌سازی قطعی (Deterministic Networking)

Norman Finn et al. *Deterministic Networking Architecture*. RFC 8655. Oct. 2019. DOI: 10.17487/RFC8655. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8655.txt>

Balazs Varga et al. *Deterministic Networking (DetNet) Data Plane Framework*. RFC 8938. Nov. 2020. DOI: 10.17487/RFC8938. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8938.txt>

Balazs Varga et al. *Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: IP*. RFC 8939. Nov. 2020. DOI: 10.17487/RFC8939. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8939.txt>

معماری شبکه‌سازی قطعی

◀ کیفیت سرویس در شبکه‌های قطعی:

- کران بالا و پایین برای تاخیر انتها به انتها از مبدا به مقصد، تغییرات تاخیر کران‌دار، ارسال زمان‌دار
- نسبت از دست رفتن بسته‌ها تحت فرض‌های مختلف
- کران بالا برای بسته‌های خارج از ترتیب

◀ تنها دغدغه در شبکه‌سازی قطعی بدترین حالت‌ها می‌باشند.

◀ اینجا حالت‌های میانگین و ... از اهمیت کمی برخوردار هستند.

◀ تکنیک‌های برآورده ساختن نیازمندی‌های کیفیت سرویس

- تخصیص منابع
- حفاظت از سرویس
- مسیرهای صریح

معماری شبکه‌سازی قطعی

◀ تخصیص منابع

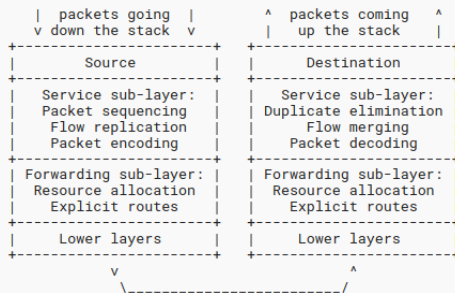
- بدست آوردن کیفیت سرویس با از بین بردن یا کاهش اثر از دست رفتن بسته‌ها در اثر ازدحام
- کاهش تغییرات تاخیر

◀ حافظت از سرویس با تحمل یا از بین بردن از دست رفتن بسته‌ها در اثر خرابی تجهیزات

- ارسال به ترتیب بسته‌ها
- تکرار بسته‌ها
- کد کردن بسته‌ها

◀ مسیرهای صریح در اثر تغییرات بلافاصله تغییر نمی‌کند و تلاش می‌کند تا حد امکان تغییر نکند.

معماری شبکه‌سازی قطعی

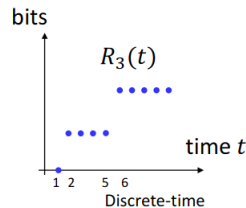
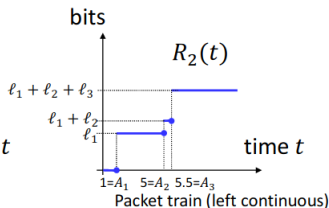
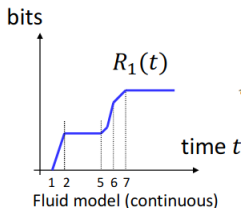


شکل ۳: معماری پشته شبکه‌های قطعی

آشنایی با Network Calculus

◀ جریان‌های تجمعی

$$R(t), \text{ non-decreasing, } R(0) = 0$$

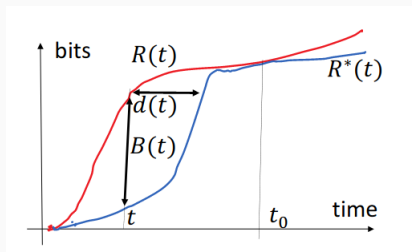


شکل ۴: انواع جریان‌ها

آشنایی با Network Calculus



شکل ۵: معماری سیستم



شکل ۶: جریان ورودی و خروجی

آشنایی با Network Calculus

◀ اندازه بافر

$$\text{backlog}(t) = R(t) - R^*(t)$$

◀ تاخیر

$$d(t) = \inf\{d \mid R(t) \leq R^*(t + d)\}$$

آشنایی با Network Calculus

◀ $(R \cup +\infty, \wedge, +)$

◀ جمع تبدیل به محاسبه‌ی infimum می‌شود.

◀ ضرب به جمع تبدیل می‌شود.

$$(3 \wedge 4) + 5 = (3 + 5) \wedge (4 + 5) = 8 \wedge 9 = 8$$

◀ پیچیش کمینه - جمع

$$(f \otimes g)(t) = \int_0^t f(t-s)g(s)ds$$

$$(f \otimes g)(t) = \inf_{0 \leq s \leq t} \{f(t-s) + g(s)\}$$

آشنایی با Network Calculus

◀ **منحنی ورودی**، جریان R با $\alpha(\cdot)$ محدود شده است.

$$R(t) - R(s) \leq \alpha(t - s)$$

◀ **منحنی سرویس** برای جریان ورودی R و جریان خروجی R^* برابر با b :

$$R^* \geq R \otimes b$$

آشنایی با Network Calculus

◀ منحنی ورودی برای یک سطل سوراخ دار

$$\alpha(t) = rt + b$$

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۳ مرور ادبیات

۴ مساله‌ی پیشنهادی

۳. مرور ادبیات

◀ مرور کارها از جهت پارامترهای کیفیت سرویس و چگونگی مدل‌سازی

مرجع [۱]

- ◀ مساله‌ی زمان‌بندی سرویس‌های شبکه
- ◀ سرویس‌های شبکه در قالب تعداد کارکرد مجازی با عمر محدود
- ◀ کارکردهای مجازی شبکه به صورت store-and-forward عمل می‌کنند.
- ◀ تاخیر انتقال و تاخیر پردازش
- ◀ این مقاله محدودیت پردازش برای نودها و ظرفیت برای لینک‌ها را در نظر گرفته است.
- ◀ کارکردها می‌توانند میزان جریان عبوری را تغییر دهند. مثلاً دیوار آتش می‌تواند بسته‌ها را عبور ندهد.

Long Qu, Chadi Assi, and Khaled Shaban. "Delay-Aware Scheduling and Resource Optimization With Network Function Virtualization". In: *IEEE Transactions on Communications* 64.9 (Sept. 2016), pp. 3746–3758. DOI: 10.1109/tcomm.2016.2580150. URL: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2016.2580150>

مرجع [۳]

- ◀ ارائه‌ی یک چهارچوب مدیریتی براساس مدل تاخیر ارائه شده
- ◀ تاخیر پردازش برای تعداد مشخصی نمونه از کارکرد
- ◀ دسته‌بندی کارکردها
 - وابسته به اندازه بسته (exponential)
 - مستقل از اندازه بسته (deterministic)

Qing Li et al. "Quokka: Latency-Aware Middlebox Scheduling with dynamic resource allocation". In: *Journal of Network and Computer Applications* 78 (Jan. 2017), pp. 253–266. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.10.021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.021>

مرجع [۸]

- ◀ تاخیر انتقال و تاخیر پردازش
- ◀ در نظر گرفتن زنجیره‌های مرتب جزئی و تاثیر آن‌ها بر تاخیر
- ◀ قطعه قطعه کردن زنجیره‌های مرتب جزئی برای تبدیل آن‌ها به تعدادی زنجیره مرتب کامل

Song Yang et al. "Delay-Sensitive and Availability-Aware Virtual Network Function Scheduling for NFV". In: *IEEE Transactions on Services Computing* (2019), pp. 1–1. DOI: 10.1109/tsc.2019.2927339. URL: <https://doi.org/10.1109/tsc.2019.2927339>

مرجع [۶]

- ◀ تاخیر انتقال ثابت در نظر گرفته شده است.
- ◀ زنجیره‌ها نیازمندی تاخیر انتها به انتها دارند.
- ◀ مساله‌ی بهینه‌سازی چند دوره‌ای
- ◀ به اشتراک گذاری نمونه‌ها
- ◀ گسترش عرضی و طولی
- ◀ عدم توانایی در نظر گرفتن همه این شرایط در مساله‌ی بهینه‌سازی

Meitian Huang et al. "Maximizing Throughput of Delay-Sensitive NFV-Enabled Request Admissions via Virtualized Network Function Placement". In: *IEEE Transactions on Cloud Computing* (2019), pp. 1–1. DOI: 10.1109/tcc.2019.2915835. URL: <https://doi.org/10.1109/tcc.2019.2915835>

مرجع [۴]

- ◀ یافتن کران پایین سرویس‌دهی و استفاده از Network Calculus برای زنجیره‌سازی آن‌ها
- ◀ در نظر گرفتن نمایه Latency Rate (LR) برای سرویس‌ها

$$P[r, \theta](t) = \max\{0, r(t - \theta)\}$$

θ : latency

r : rate

Qiang Duan. "Modeling and Performance Analysis for Service Function Chaining in the SDN/NFV Architecture". In: *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*. IEEE, June 2018. DOI: 10.1109/netsoft.2018.8460068. URL: <https://doi.org/10.1109/netsoft.2018.8460068>

[۷] مرجع

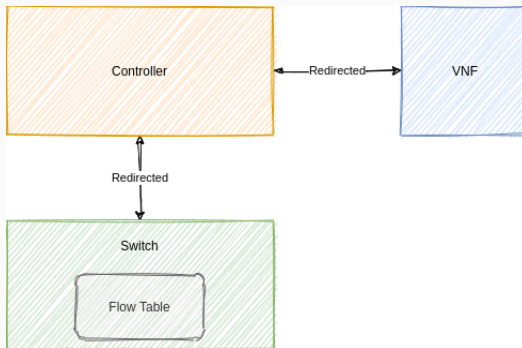
- ◀ ارائه یک چهارچوب برای محاسبه کران تاخیر
- ◀ Stochastic Network Calculus
- ◀ کران با احتمال تخطی

Wang Miao et al. "Stochastic Performance Analysis of Network Function Virtualization in Future Internet". In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 37.3 (Mar. 2019), pp. 613–626. DOI: 10.1109/jsac.2019.2894304. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2019.2894304>

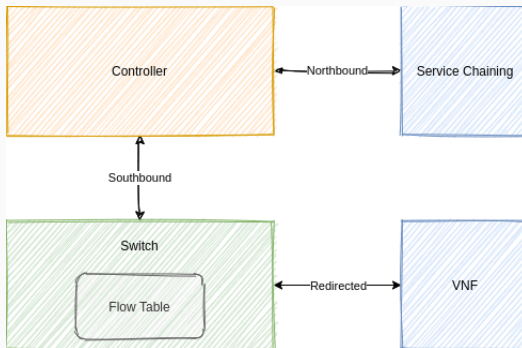
◀ در نظر گرفتن دو معماری مختلف برای ترکیب شبکه‌های SDN و NFV

- Controller interacts with VNFs
- Switches interacts with VNFs

Ahmed Fahmin et al. "Performance Modeling of SDN with NFV under or aside the Controller". In: *2017 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*. IEEE, Aug. 2017. DOI: 10.1109/ficloudw.2017.76. URL: <https://doi.org/10.1109/ficloudw.2017.76>



شکل ۷: معماری SDN و NFV در کنار یکدیگر



شکل ۸: معماری SDN و NFV در کنار یکدیگر

سابقه‌ی کارها

جدول ۱: جمع‌بندی مقالات کیفیت سرویس

مرجع	مدل‌سازی	تئوری صف	Net. Calculus	انتشار	انتقال	صف	پردازش	اندازه بافر
#								
[۷]	—	✓	—	—	—	✓	✓	✓
[۱]	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
[۳]	✓	—	—	—	✓	—	—	—
[۸]	✓	—	—	✓	—	✓	—	—
[۶]	✓	—	—	—	✓	✓	—	—
[۴]	—	✓	✓	✓	✓	✓	—	—

فهرست

۱ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۲ شبکه‌های قطعی

۳ مرور ادبیات

۴ مسالهی پیشنهادی

۴. مسالهی پیشنهادی

مسالهی پیشنهادی

- ◀ نیازمندی‌های شبکه‌های قطعی
- ◀ کران بالای پارامترهای غیرقطعی
- ◀ مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

مسالهی پیشنهادی

جایگذاری قطعی زنجیره‌های کارکرد در زیرساخت مجازی‌سازی شبکه

روش پیشنهادی

۱. مدل‌سازی تاخیر با استفاده از Network Calculus برای محاسبه کران‌های بالا
۲. مدل‌سازی مساله‌ی بهینه‌سازی
۳. تخمین مساله‌ی بهینه‌سازی با یادگیری تقویتی و ...

یادگیری تقویتی

۱. استفاده از عامل‌های یادگیری تقویتی در مساله عامل برنامه‌ریزی خطی

صحیح

Yunhao Tang, Shipra Agrawal, and Yuri Faenza. "Reinforcement Learning for Integer Programming: Learning to Cut". In: *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*. Ed. by Hal Daumé III and Aarti Singh. Vol. 119. Proceedings of Machine Learning Research. PMLR, 2020, pp. 9367–9376. URL: <http://proceedings.mlr.press/v119/tang20a.html>

۲. استفاده از عامل‌های یادگیری تقویتی در مساله جایگذاری سرویس‌های مجازی شبکه

۳. در این قسمت می‌توان برای آموزش عامل از الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند DQN استفاده کرد.

Jianing Pei et al. "Optimal VNF Placement via Deep Reinforcement Learning in SDN/NFV-Enabled Networks". In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 38.2 (Feb. 2020), pp. 263–278. DOI: 10.1109/jsac.2019.2959181. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2019.2959181>

مراجع ۱

- [1] Long Qu, Chadi Assi, and Khaled Shaban. "Delay-Aware Scheduling and Resource Optimization With Network Function Virtualization". In: *IEEE Transactions on Communications* 64.9 (Sept. 2016), pp. 3746–3758. DOI: 10.1109/tcomm.2016.2580150. URL: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2016.2580150>.
- [2] Ahmed Fahmin et al. "Performance Modeling of SDN with NFV under or aside the Controller". In: *2017 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*. IEEE, Aug. 2017. DOI: 10.1109/ficloudw.2017.76. URL: <https://doi.org/10.1109/ficloudw.2017.76>.

مراجع ۲

- [3] Qing Li et al. "Quokka: Latency-Aware Middlebox Scheduling with dynamic resource allocation". In: *Journal of Network and Computer Applications* 78 (Jan. 2017), pp. 253–266. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.10.021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.021>.
- [4] Qiang Duan. "Modeling and Performance Analysis for Service Function Chaining in the SDN/NFV Architecture". In: *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*. IEEE, June 2018. DOI: 10.1109/netsoft.2018.8460068. URL: <https://doi.org/10.1109/netsoft.2018.8460068>.

مراجع ۳

- [5] Norman Finn et al. *Deterministic Networking Architecture*. RFC 8655. Oct. 2019. DOI: 10.17487/RFC8655. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8655.txt>.
- [6] Meitian Huang et al. "Maximizing Throughput of Delay-Sensitive NFV-Enabled Request Admissions via Virtualized Network Function Placement". In: *IEEE Transactions on Cloud Computing* (2019), pp. 1–1. DOI: 10.1109/tcc.2019.2915835. URL: <https://doi.org/10.1109/tcc.2019.2915835>.

مراجع ۴

- [7] Wang Miao et al. “Stochastic Performance Analysis of Network Function Virtualization in Future Internet”. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 37.3 (Mar. 2019), pp. 613–626. DOI: 10.1109/jsac.2019.2894304. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2019.2894304>.
- [8] Song Yang et al. “Delay-Sensitive and Availability-Aware Virtual Network Function Scheduling for NFV”. In: *IEEE Transactions on Services Computing* (2019), pp. 1–1. DOI: 10.1109/tsc.2019.2927339. URL: <https://doi.org/10.1109/tsc.2019.2927339>.

مراجع ۵

- [9] Jianing Pei et al. "Optimal VNF Placement via Deep Reinforcement Learning in SDN/NFV-Enabled Networks". In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 38.2 (Feb. 2020), pp. 263–278. DOI: 10.1109/jsac.2019.2959181. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2019.2959181>.

مراجع ۶

- [10] Yunhao Tang, Shipra Agrawal, and Yuri Faenza. “Reinforcement Learning for Integer Programming: Learning to Cut”. In: *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*. Ed. by Hal Daumé III and Aarti Singh. Vol. 119. Proceedings of Machine Learning Research. PMLR, 2020, pp. 9367–9376. URL: <http://proceedings.mlr.press/v119/tang20a.html>.
- [11] Balazs Varga et al. *Deterministic Networking (DetNet) Data Plane Framework*. RFC 8938. Nov. 2020. DOI: 10.17487/RFC8938. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8938.txt>.

- [12] Balazs Varga et al. *Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: IP*. RFC 8939. Nov. 2020. DOI: 10.17487/RFC8939. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8939.txt>.
- [13] Song Yang et al. "Recent Advances of Resource Allocation in Network Function Virtualization". In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 32.2 (Feb. 2021), pp. 295–314. DOI: 10.1109/tpds.2020.3017001. URL: <https://doi.org/10.1109/tpds.2020.3017001>.