

XU HƯỚNG & MÔ HÌNH TRIỂN KHAI MẠNG 5G ĐỘC LẬP THUẦN IPV6



NGUYỄN VĂN BÌNH



Mạng di động 5G và giao thức mạng thế hệ mới IPv6 được xem là hai yếu tố chính làm thay đổi cục diện Internet hiện tại và trong tương lai. Điều này đồng nghĩa với các công nghệ và hệ thống cũ sẽ dần được thay thế. Chính vì thế cần có sự đánh giá đúng về hiện trạng và những xu thế triển khai của hai yếu tố công nghệ này trên thế giới để xây dựng những giải pháp chuyển đổi phù hợp nhất.

Tốc độ chuyển đổi sang IPv6 đã tăng lên không ngừng trong những năm gần đây và các quốc gia trên thế giới đã đưa ra những chương trình hành động và mục tiêu rất cụ thể. Tại Việt Nam, mục tiêu của chương trình IPv6 For GOV đến năm 2025 là 100% Bộ, Ngành, địa phương hoàn thiện chuyển đổi IPv6 cho các hệ thống CNTT và sẵn sàng triển khai thuần IPv6. Các doanh nghiệp viễn thông Internet đạt trong nước sẽ đạt 100% người dùng IPv6 [1]. Tỷ lệ chuyển đổi IPv6 tại Việt Nam hiện đã đạt 50,92% [2]. Tại Mỹ, chính phủ yêu cầu đến năm 2025, 80% hệ thống mạng của chính quyền liên bang sẽ hoạt động thuần IPv6 [3]. Đối với Trung Quốc, dự tính đến cuối năm 2025 sẽ đạt con số 800 triệu người dùng IPv6, 400 triệu kết nối IoT là IPv6 và toàn bộ các ứng dụng, thiết bị đầu cuối, các nền tảng mới đều triển khai thuần IPv6 [4].

Đã có nhiều giải pháp ra đời giúp chuyển đổi các hệ thống mạng từ thế hệ IPv4 sang IPv6 và được chia làm hai nhóm chính: Tiếp cận IPv6 (IPv6-Introduction) và thuần IPv6 (IPv6-Only). Các giải pháp tiếp cận IPv6 cho phép triển khai IPv6 dựa trên nền IPv4 hoặc chạy song đôi. Việc này không làm thay đổi kiến trúc hệ thống mạng hiện tại, ít gây gián đoạn các dịch vụ đang cung cấp và các nhân sự vận hành khai thác có thời gian tiếp cận để làm chủ giao thức IPv6. Nhưng hạn chế của các giải pháp này là vẫn không giải quyết triệt để những tồn tại của IPv4, không mang đến cơ hội quy hoạch hoặc triển khai nâng cấp hệ thống theo hướng hiện đại để đáp ứng những nhu cầu mới. Vì thế xu hướng triển khai thuần IPv6 là mục tiêu hướng đến của tất cả các quốc gia, tổ chức và doanh nghiệp.

Đối với mạng di động 5G, đến tháng 2/2022, hệ sinh thái thiết bị đầu cuối đã có tổng 1.276 thiết bị hỗ trợ 5G đến từ 190 nhà sản xuất trên toàn thế giới [5] và có 206 nhà mạng từ 81 quốc gia đã triển khai thương mại hóa dịch vụ 5G [6]. Trung Quốc hiện là quốc gia triển khai 5G lớn nhất thế giới với hơn 1,42 triệu trạm phát sóng 5G và tiến tới 2 triệu trạm cuối năm 2022 [7]. Tại Việt Nam, ba nhà mạng Viettel, VNPT và MobiFone đã thử nghiệm thương mại tại 16 tỉnh thành và dự kiến triển khai thương mại trong năm 2022.

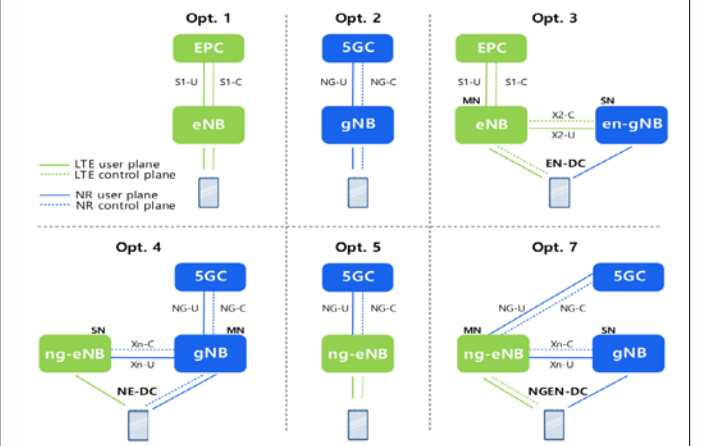
Phần lớn các mạng 5G trên thế giới hiện nay đang triển khai theo mô hình “5G phụ thuộc” (5G NSA – Non StandAlone) sử dụng chung hạ tầng mạng truy nhập (Access Network) và mạng lõi (Core Network) sẵn có của mạng 4G. Việc này tận dụng thiết bị cũng như vùng phủ hiện có nên giúp giảm chi phí, nâng cao hiệu quả đầu tư và rút ngắn thời gian triển khai. Nhưng mô hình 5G NSA chỉ mới chỉ giúp cải thiện tốc độ truyền dữ liệu (eMBB-enhanced Mobile Broadband) mà chưa giải quyết được yêu cầu độ trễ cực thấp (urLLC-

ultra reliable Low Latency Communications) và đáp ứng số lượng kết nối đồng thời cực lớn trong cùng một phạm vi (mMTC-massive Machine Type Communications). Có thể nói thị trường của mô hình 5G NSA chỉ mới là điện thoại di động và máy tính bảng. Vì thế đây không phải là mô hình để hướng đến mục tiêu lâu dài. Mô hình “5G độc lập” (5G SA – StandAlone) được coi là mô hình 5G thực thụ với sự tách bạch hoàn toàn hệ với hệ thống mạng 4G. Theo thông báo của tổ chức GSA, đến tháng 1/2022, đã có 99 nhà mạng tại 50 quốc gia/lãnh thổ đã và đang đầu tư triển khai mạng 5G SA công cộng, trong đó ít nhất 20 nhà mạng tại 16 quốc gia/lãnh thổ hiện đã cung cấp dịch vụ. Có 5 nhà mạng đã triển khai nhưng chưa cung cấp hoặc chỉ mới cung cấp thử nghiệm và ít nhất 25 nhà mạng đang triển khai hoặc thí điểm [8].

Việc triển khai theo mô hình 5G NSA là một giai đoạn rất quan trọng mang đến sự trải nghiệm dịch vụ 5G cho người dùng nhưng giờ đây, với sự chín muồi về công nghệ thì mô hình 5G SA cần được cân nhắc, đánh giá kỹ càng hơn và nên là tâm điểm cần xem xét trong chiến lược 5G của các nhà mạng [9]. Qua đây cho thấy, IPv6-Only và 5G SA là một xu thế triển khai chung của các nhà mạng trên thế giới. Đơn cử như nhà mạng T-Mobile: Tháng 4/2012 hoàn thành triển khai IPv6 cho toàn bộ hệ thống mạng [10], tháng 6/2014 chuyển đổi sang IPv6-Only [11], tháng 6/2019 công bố dịch vụ 5G đầu tiên [12] và đến tháng 8/2020 đã triển khai dịch vụ 5G SA trên toàn quốc [13].

Mô hình triển khai 5G và lộ trình chuyển đổi sang mạng 5G SA

Nhóm chuẩn hóa về mạng di động 3GPP đã đưa ra các kịch bản kiến trúc cho mạng 5G như Hình 1, gồm có 7 mô hình chính và được chia thành 2 nhóm kịch bản.



Hình 1. Các kịch bản kiến trúc cho mạng 5G

Nhóm 5G SA gồm các mô hình: 1, 2 và 5

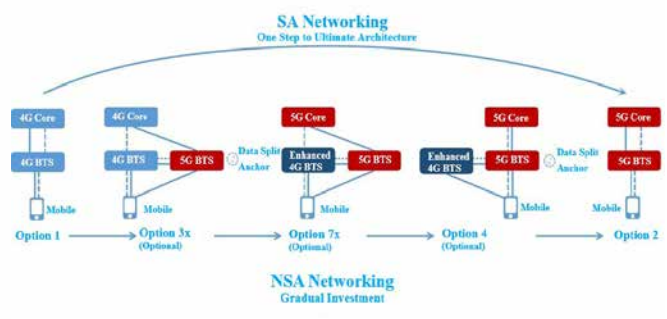
Nhóm 5G NSA gồm các mô hình: 3, 4 và 7

Qua thực tế triển khai của các nhà mạng thì mô hình 3 được sử dụng phổ biến nhất nhằm tận dụng hệ thống và vùng phủ hiện tại của mạng 4G. Mô hình 2 là kiến trúc mục tiêu mà các nhà mạng hướng đến để có được mạng 5G thực thụ. Nếu chọn triển khai mô hình 3 thì nhà mạng sẽ cần một thời gian khá dài để chuyển đổi sang mô hình 2 trong tương lai. Các mô hình 4, 5 và 7 được gọi là mô hình bổ sung nhằm kết hợp năng lực của hệ thống Core 5G (5GC) cùng với vùng phủ của 4G. Tuy nhiên mô hình 5 được cho là không mang lại nhiều lợi ích vì không tận dụng sức mạnh của chuẩn vô tuyến 5G NR (New Radio) [14]. Trong khi đó mô hình 4 và 7 cho phép kết nối kép (Dual) 4G và 5G, không cần chuyển tiếp (Hand-over) giữa các hệ thống Core hoặc Access của hai mạng. Vào ngày 25/02/2022 vừa qua, Samsung và SK Telecom tuyên bố đã thử nghiệm thương mại thành công mô hình 4 lần đầu tiên trên thế giới. Đây có thể coi là một phương án phù hợp cho việc xây dựng mạng Core 5G.

Với những mô hình như trên, câu hỏi đặt ra là lộ trình chuyển đổi từ 4G sang mạng 5G SA sẽ diễn ra như thế nào? Đã có những đề xuất và trao đổi về lộ trình này, thực tế tựu trung hai lộ trình chính:

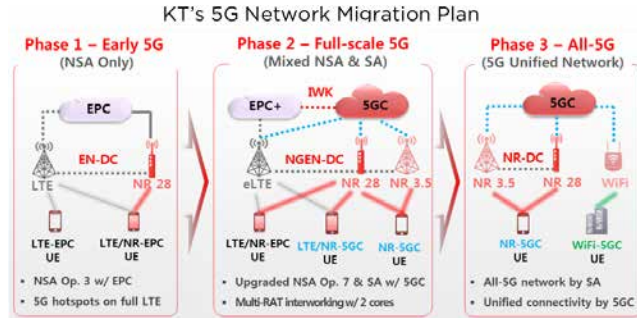
Lộ trình 1: Chuyển đổi trực tiếp sang mô hình 2. Việc này đòi hỏi đầu tư khá lớn từ ban đầu về cả tài lực và nhân lực.

Lộ trình 2: Chuyển đổi trung gian từ mô hình 1 => 3 => 7 => 4 => 2. Các bước trung gian này là tùy chọn, không nhất thiết thực hiện đầy đủ các bước trung gian.



Hình 2. Lộ trình chuyển đổi trung gian từ mạng 4G sang 5G

Lộ trình 2 trông rất phức tạp và tổng chi phí cũng như thời gian sẽ cao hơn so với đầu tư một lần nhưng việc triển khai sẽ gặp ít rủi ro và việc đầu tư từng giai đoạn phù hợp với nhiều nhà mạng. Hình 3 là lộ trình minh họa cho chiến lược chuyển đổi sang mạng 5G SA của nhà mạng KT của Hàn Quốc.



Hình 3. Mô hình chuyển đổi sang 5G độc lập từ nhà mạng KT Hàn Quốc

Giải pháp IPv6-Only cho mạng di động

Đối với nhóm giải pháp IPv6-Introduction, có 2 kỹ thuật chuyển đổi IPv6 được sử dụng rộng rãi trên thế giới đó là sử dụng song song IPv4/IPv6 Dual-Stack và khai báo đường hầm Tunnel (ví dụ như 6to4, 6RD, 6PE/6VE, ...). Có một câu nói liên quan hai kỹ thuật này là "Dual-stack when you can, tunnel when you must", có nghĩa là ưu tiên sử dụng Dual-stack nếu có thể và sau đó mới là sử dụng Tunnel. Hiện có hơn 50% nhà mạng, đặc biệt là nhà mạng Internet cố định sử dụng cơ chế Dual-Stack.

Đối với nhóm giải pháp IPv6-Only, tuy không có nhiều giải pháp như đối với IPv6-Introduction nhưng cũng có một số kỹ thuật chuyển đổi được đánh giá cao và áp dụng thành công như DS-Lite, NAT64/DNS64 và 464XLAT. Và khi một hệ thống mạng đã chuyển hoàn toàn sang IPv6 thì lúc này các kết nối đến các nền tảng IPv4 được xem như là một dịch vụ của mạng IPv6-Only.

Các nhà mạng di động trên thế giới cũng áp dụng 2 nhóm giải pháp trên. Kỹ thuật phổ biến được lựa chọn để triển khai IPv6-Only là sử dụng giải pháp 464XLAT. Hình 4 là danh sách giải pháp chuyển đổi IPv6 của các nhà mạng di động trên thế giới [15].

Country	Transition Mechanism (NAT64/464xlat, 6rd, DS-Lite, Dual Stack, ...)	Network Type (mobile, DSL, fiber, cable, satellite,...)
US	?	Mobile
BT	Dual Stack	Mobile
GB	464XLAT	Mobile
TT	Dual Stack	Mobile
DE	464XLAT, NAT64	mobile (2G,3G,4G)
DE	Dual Stack	mobile (2G,3G,4G)
EE	dual stack	mobile
TW	Dual Stack	Mobile
VN	dual stack	LTE
NO	Dual stack	3GPP
FR	Dual-stack	Mobile
PL	464XLAT	Mobile
IN	464XLAT	Mobile
CA	NAT64/464XLAT	Wireless
US	464XLAT	mobile
US	464XLAT, NAT64	mobile
SE	Dual stack	3GPP
AU	464XLAT	mobile
DK,SE	Dual stack	3GPP
US	Dual-stack	mobile

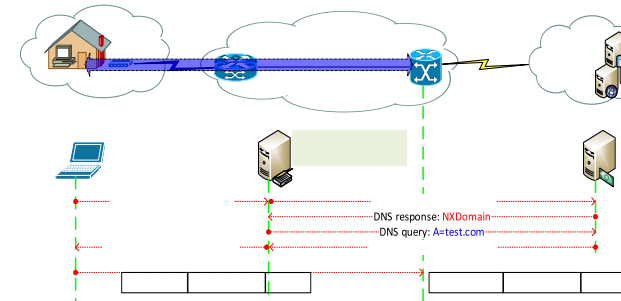
Hình 4. Thống kê giải pháp triển khai IPv6 của mạng di động tại một số quốc gia

Sau khi chuyển sang IPv6-Only, để một máy trạm có thể kết nối đến một máy đích IPv4-Only bên ngoài thì cần có sự chuyển đổi giữa 2 địa chỉ, vì thế kỹ thuật NAT64 (RFC 6146) đã được đề xuất cùng với sự kết hợp của kỹ thuật DNS64 (RFC 6147). Dưới đây là những thành phần chính và hoạt động của giải pháp kết hợp này:

- **NAT64 prefix:** đây là một Prefix (tiền tố) IPv6 kết hợp địa chỉ IPv4 đích để trở thành địa chỉ đích IPv6 tổng hợp (Synthesized). Nat64 Prefix này có thể được quy định (Well Known Prefix - WKP) là dãy 64:ff9b::/96 hoặc do nhà mạng quy hoạch (Network Specific Prefix - NSP).

- **DNS64 server:** Hoạt động như một DNS Server thông thường nhưng nếu truy vấn bản ghi AAAA cho một tên miền không tồn tại thì nó sẽ tiếp tục truy vấn bản tin A. Địa chỉ IPv4 của bản tin A sẽ được chuyển đổi sang dạng HEXA rồi kết hợp với NAT64 Prefix để trở thành địa chỉ IPv6 tổng hợp và sau đó trả về trường AAAA cho máy tính IPv6-Only.

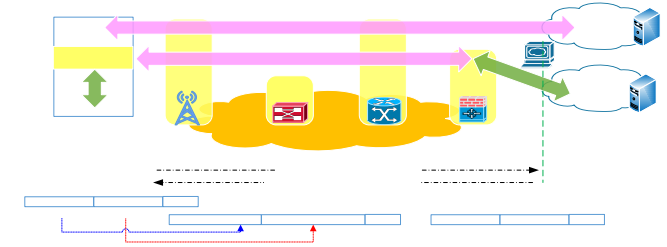
- **NAT64 router:** Router này có nhiệm vụ chuyển đổi IPv6 nguồn thành địa chỉ IPv4 và địa chỉ đích IPv6 tổng hợp thành địa chỉ đích IPv4 ban đầu. Để các gói tin có đích là IPv6 tổng hợp đi đến NAT64 Router thì Router này cần phải quảng bá NAT64 Prefix cho toàn bộ mạng IPv6-Only.



Hình 5. Giải pháp chuyển đổi sang thuần IPv6 DNS64/NAT64

Giải pháp DNS64/NAT64 dù giải quyết được phần lớn các yêu cầu truy cập IPv4 qua môi trường IPv6-Only nhưng vẫn tồn tại trường hợp một số ứng dụng không sử dụng tên miền mà sử dụng địa chỉ IPv4 trong phần IP Payload (gọi là Literal IP). Hoặc nếu một điện thoại di động chuyển sang chế độ phát sóng Wifi (Hot-spot) cho các thiết bị khác (Tethering device) và các thiết bị đó chỉ hỗ trợ IPv4-Only thì không thể truy cập qua mạng IPv6-Only. Có một vấn đề khác cần chú ý đó là DNS64 thực hiện chuyển đổi địa chỉ IPv4 thành IPv6 nên nó không thể hoạt động trong trường hợp sử dụng giao thức bảo mật DNSSEC.

Chính vì thế kỹ thuật 464XLAT (RFC 6877) đã ra đời. Kỹ thuật này giải quyết triệt để những vấn đề của giải pháp DNS64/NAT64. Dưới đây là thành phần chức năng và hoạt động của giải pháp 464XLAT [16].



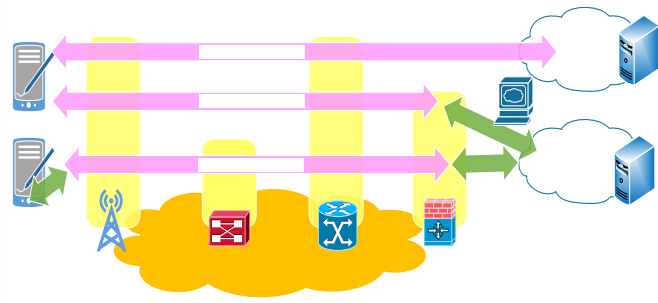
Hình 6. Giải pháp chuyển đổi sang thuần IPv6 464XLAT

- **CLAT (Customer-side transLATOR - RFC6145):** Đây là chức năng hoạt động tại thiết bị đầu cuối (UE) như điện thoại di động, có nhiệm vụ chuyển đổi địa chỉ IPv4 nguồn và đích thành IPv6 (NAT46). Thiết bị UE được gán một IPv6 Prefix /64, từ đó lấy ra Prefix /96 (NAT46 Prefix) để kết hợp với địa chỉ IPv4 nguồn để tạo ra địa chỉ nguồn IPv6 tổng hợp. Đối với địa chỉ đích IPv4 thì UE sẽ tự động gửi một truy vấn AAAA có tên "ipv4only.arpa" đến DNS64 Server và Server này trả về địa chỉ IPv6 tổng hợp có chứa NAT64 Prefix như trình bày ở giải pháp trước. Sau đó kết hợp với địa chỉ IPv4 đích để tạo ra địa chỉ đích IPv6 tổng hợp. Việc thực hiện ở đây theo kiểu NAT 1:1 nên được gọi là Stateless NAT.

- **PLAT (Provider-side transLATOR - RFC6416):** Có nhiệm vụ thực hiện chuyển đổi từ địa chỉ IPv6 tổng hợp (nguồn và đích) sang IPv4 và ngược lại. Để tiết kiệm địa chỉ IPv4 thì việc NAT địa chỉ nguồn được thực hiện theo kiểu N:1 hay còn gọi là Statefull NAT. Router PLAT quảng bá NAT64 Prefix nên các những gói tin có địa chỉ đích IPv6 tổng hợp sẽ đi qua PLAT. PLAT có thể can thiệp được lớp ứng dụng (Application Layer Gateways - ALG) để thay đổi địa chỉ IPv4 nếu có trong IP Payload.

Có thể nói giải pháp 464XLAT kết hợp DNS64 rất đơn giản và dễ dàng triển khai nên là được các nhà mạng ưu tiên lựa chọn cho mô hình IPv6-Only. Nếu doanh nghiệp cung cấp đồng thời dịch vụ di động và cố định có thể sử dụng chung giải pháp 464XLAT này để tiết kiệm chi phí đầu tư và vận hành. Có một yêu cầu đối với giải pháp 464XLAT đó là thiết bị đầu cuối bắt buộc phải hỗ trợ tính năng CLAT. Đối với điện thoại di động, hệ điều hành Android và Windows đã hỗ trợ tốt tính năng này còn iOS thì không hỗ trợ. Thay vào đó Apple yêu cầu từ ngày 01/6/2016, tất cả các ứng dụng đăng ký lên AppStore phải hỗ trợ IPv6-Only [17].

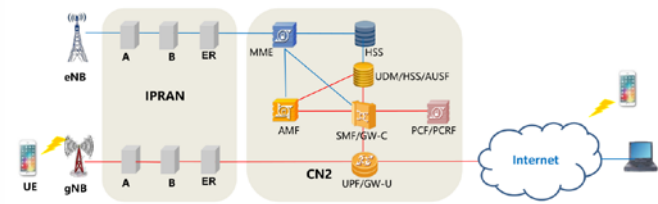
Như vậy giải pháp DNS64/NAT64 sẽ hỗ trợ các thiết bị IPv6-Only có thể truy cập được các dịch vụ có đích là IPv4-Only và giải pháp 464XLAT hỗ trợ các ứng dụng sử dụng nguồn và đích là địa chỉ IPv4. Một số nhà mạng triển khai đồng thời cả 2 giải pháp này và được xem như là giải pháp triệt để nhất cho hệ thống mạng IPv6-Only [18].



Hình 7. Giải pháp chuyển đổi sang thuần IPv6 kết hợp

Kinh nghiệm từ nhà mạng China Telecom

Thực hiện chiến lược quốc gia về chuyển đổi sang IPv6, từ năm 2003 nhà mạng China Telecom đã đẩy mạnh các dự án về IPv6. Giai đoạn ban đầu nhà mạng này cũng đã áp dụng giải pháp Dual-Stack và sớm nhận ra hạn chế của giải pháp này, vì thế họ đã nghiên cứu chuyển sang giải pháp IPv6-Only. Trong khi đó mạng 5G của họ cũng phát triển rất mạnh, cuối tháng 2/2022 số thuê bao 5G của nhà mạng này đã lên đến 196,1 triệu [19]. Với hệ thống mạng 5G thì giao diện mặt phẳng điều khiển (Control-Plane) đã là IPv6-Only, chỉ còn mặt phẳng người dùng (User-Plane) là sử dụng Dual-Stack [20]. Trước xu thế các nhà mạng trên thế giới đã chuyển đổi thành công sang mạng IPv6-Only và triển khai mô hình 5G SA nên vào năm 2020, China Telecom đã tiến hành thử nghiệm thành công giải pháp IPv6-Only cho mạng 5G SA với mô hình bên dưới. Họ đã phát hiện và khắc phục được nhiều vấn đề kỹ thuật liên quan trong suốt quá trình thử nghiệm.



User plane
IPv6-only field test in Jiangsu and Sichuan province have been carried out in 2020

SGC and gNB
Interconnection for the SGC equipment and wireless gNB are IPv6-only
RAN/STN
SRv6/6VPE-based IPv6 channel provided to the SGC core and gNB

Hình 8. Mô hình thử nghiệm mạng 5G độc lập và thuần IPv6 của nhà mạng China Telecom

Quá trình thử nghiệm được chia làm 4 giai đoạn:

1. Phân tích và xây dựng giải pháp kỹ thuật

Đầu tiên nhóm thử nghiệm đã phân tích kỹ các yêu cầu về mặt công nghệ của giải pháp IPv6-Only cho mạng 5G độc lập, của mạng truy nhập (Access), mạng lõi (Core), nhóm hỗ trợ kỹ thuật, hệ thống giám sát, các thiết bị đầu cuối ... và cuối cùng là đề xuất được một giải pháp kỹ thuật tổng thể.

Ngoài ra, việc đánh giá sự phổ biến về công nghệ và khả năng tiết kiệm đầu tư cũng được xem xét. Nhóm đã đánh giá danh sách những thiết bị có thể hỗ trợ tính năng NAT64 và DNS64 và xem xét các thiết bị Firewall cũ có thể nâng cấp lên để hỗ trợ những tính năng này.

2. Kiểm tra đánh giá thiết bị chính

Xây dựng kịch bản đánh giá tính năng NAT64 cho các thiết bị Firewall phổ biến gồm 12 mục về kiểm tra chức năng và 5 mục về hiệu suất. Qua thử nghiệm, phần lớn các Firewall đều hỗ trợ tính năng NAT64 nhưng vẫn có một số thiết bị cần cải thiện về hiệu suất.

3. Kiểm tra và hiệu chỉnh hệ thống mạng hiện tại

Nhóm đã thực hiện kiểm tra kết nối toàn tuyến (End-to-End) trên hệ thống mạng của China Telecom tại 2 tỉnh Giang Tô và Tứ Xuyên và cũng đồng thời đánh giá tính năng CLAT trên các thiết bị đầu cuối 5G.

Đã có 20 thiết bị dành cho mạng 5G SA của 12 nhà sản xuất đã được thử nghiệm, trong đó bao gồm các hệ điều hành đang phổ biến trên thị trường và các loại Chip khác nhau. Có tổng cộng 19 bài kiểm tra đã được đánh giá đạt.

Đồng thời 16 hạng mục kiểm tra khác cũng đã được thực hiện gồm: Chuyển vùng cuộc gọi, chuyển giao giữa 4G/5G, kiểm tra truy cập 100 ứng dụng phổ biến nhất tại Trung Quốc. Tất cả các bài kiểm tra đều cho kết quả tốt trong môi trường IPv6-Only.

4. Đánh giá trải nghiệm của người dùng

Việc đánh giá trải nghiệm của người dùng cũng được thực hiện trong môi trường mạng thật IPv6-Only. Trong suốt thời gian đánh giá, không có khác biệt nào được ghi nhận.

Quá trình thử nghiệm cho thấy rằng các thiết bị đầu cuối của mạng 5G độc lập có thể truy cập các dịch vụ Internet bình thường thông qua mạng thuần IPv6 và trải nghiệm của người dùng đáp ứng tốt. Việc sử dụng một mình giao thức IPv6 trên hệ thống mạng 5G giúp việc khai thác, vận hành và bảo trì hệ thống trở nên đơn giản hơn.

Đây là một số ý nghĩa chính sau quá trình đánh giá thử nghiệm:

China Telecom là đơn vị quốc nội tiên phong trong việc chuyển đổi sang mạng 5G độc lập và thuần IPv6. Việc này sẽ là tiền đề và mô hình tham khảo cho việc triển khai đại trà và quy mô lớn hơn tại Trung Quốc.

Thành công của giải pháp thuần IPv6 cho mạng di động có thể được áp dụng cho các hệ thống tương tự khác như IoT. Giải pháp sẽ giúp tăng đáng kể lưu lượng IPv6 và sẽ có nhiều nội dung, ứng dụng và hệ thống sẽ chuyển sang thuần IPv6.



được lựa chọn hơn. Mạng 5G độc lập sẽ mở ra một kỷ nguyên mới, tạo ra những cơ hội mới và đáp ứng được những nhu cầu tiên tiến và đột phá hơn.

IPv6 và 5G được xem là đang làm thay đổi hệ sinh thái mạng [22]. Việc nhận thức về sự thay đổi này sẽ mang lại cơ hội và lợi thế khi hòa nhập xu thế đi trước thời cuộc như của một số nhà mạng. Vì thế việc phát triển 5G tại Việt Nam cần có lộ trình phát triển phù hợp và tối ưu nhất dựa trên kinh nghiệm triển khai của các nhà mạng trên thế giới.

THÔNG TIN & THUYẾT TRÌNH

Tài liệu tham khảo:

[1]. <https://vietnamnet.vn/vn/cong-nghe/vien-thong/cong-bo-chuong-trinh-ho-tro-chuyen-doi-sang-ipv6-cho-co-quan-nha-nuoc-den-nam-2025-705889.html>

[2]. <https://www.aelius.com/njh/google-ipv6/>

[3]. <https://www.arin.net/blog/2020/03/04/u-s-federal-government-plans-for-ipv6-only-readiness/>

[4]. <https://www.stackoverflow.com/blog/china-plan-ipv6-adoption/>

[5]. <https://gsacom.com/paper/5g-ecosystem-february-2022/>

[6]. <https://gsacom.com/paper/nts-statistics-february-2022/>

[7]. <https://asia.nikkei.com/Spotlight/5G-networks/China-s-5G-network-to-reach-2m-base-stations-this-year>

[8]. <https://gsacom.com/paper/5g-standalone-january-2022-member-report-with-annex/>

[9]. https://www.t-mobile.com/content/dam/tfb/pdf/TFB_TechTarget-whitepaper_SA-NSA-5G.pdf?cid=TFB_TMO_P_20CONTENT_EFTB9174KOUY53MNG23700

[10]. <https://www.extremetech.com/mobile/127213-ipv6-now-deployed-across-entire-t-mobile-us-network>

[11]. <https://www.internetsociety.org/resources/deploy360/2014/case-study-t-mobile-us-goes-ipv6-only-using-464xlat/>

[12]. <https://www.tmonews.com/2019/06/t-mobile-galaxy-s10-5g-launch-network-six-cities/>

[13]. <https://www.t-mobile.com/news/network/standalone-5g-launch>

[14]. <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/white-papers/0107-5g-standalone-architecture/>

[15]. <https://www.etsi.org/newsroom/news/1814-2020-08-etsi-ipv6-white-paper-outlines-best-practices-challenges-benefits-and-the-way-forward>

[16]. https://www.apnic.net/wp-content/uploads/2017/01/IPv6_Migration_Strategies_for-Mobile_Networks_Whitepaper.pdf

[17]. <https://developer.apple.com/support/ipv6/>

[18]. https://www.esnog.net/gore20/gore20-files/ipv6-cellular_v6.pdf

[19]. <https://www.mobileworldlive.com/asia/asia-news/china-5g-connection-growth-continues>

[20]. http://www.cac.gov.cn/2021-11/25/c_1639439849620158.htm

[21]. <https://www.iab.org/2016/11/07/iab-statement-on-ipv6/>

[22]. <https://www.osti.gov/biblio/1642737>