

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN TỬ VIỄN THÔNG

Wi-Fi Mesh Module Documentation

GVHD: Nguyễn Văn Hiếu

Sinh viên thực hiện:
Nguyễn Tấn Minh – 22KTMT1
Phạm Đình Chiến – 22KTMT2

Đà Nẵng, 2025

PHÂN CÔNG CÔNG VIỆC

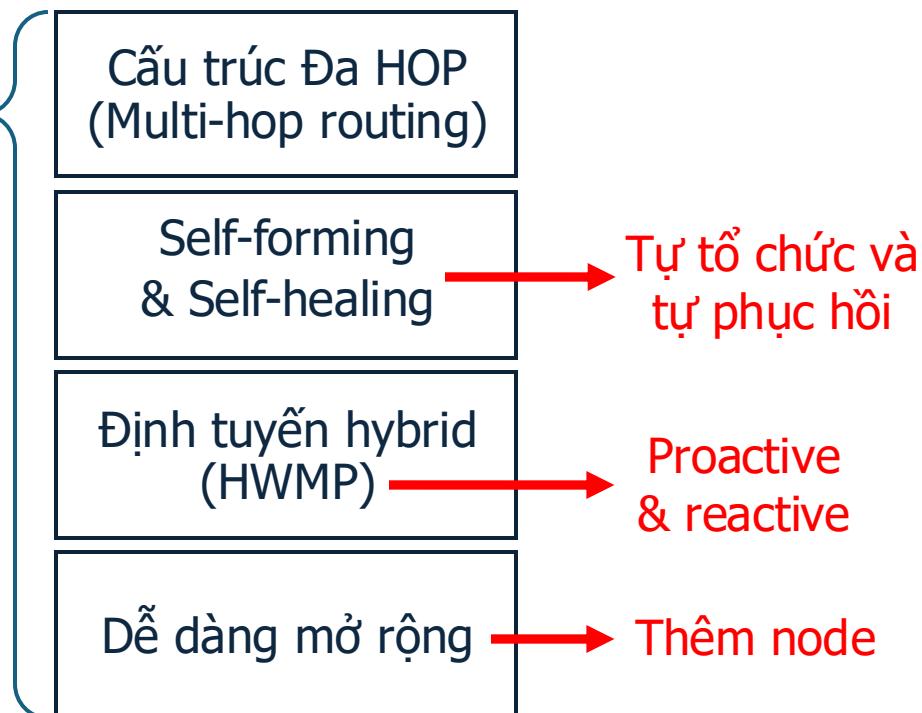
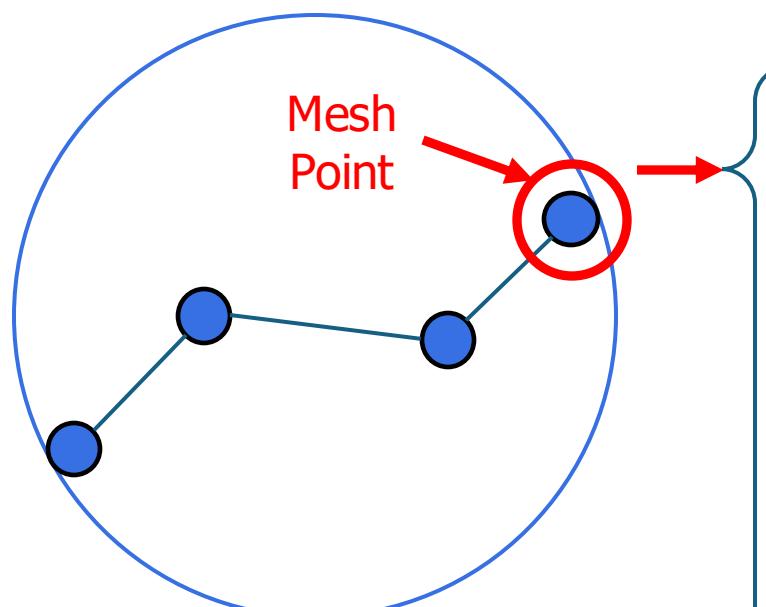
| STT | HỌ VÀ TÊN | NHIỆM VỤ | KHỐI LƯỢNG |
|-----|-----------------|---|------------|
| 01 | Nguyễn Tân Minh | Cơ bản & Chuẩn bị Lý thuyết Tổng kết lý thuyết và kiểm định Tìm kiếm thông tin, chuẩn bị dữ liệu. Làm báo cáo | 50% |
| 02 | Phạm Đình Chiến | Test và hiệu chỉnh chương trình, đẩy lên github Triển khai và kiểm tra chương trình Tìm kiếm thông tin, chuẩn bị dữ liệu. Làm báo cáo | 50% |

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

I. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

WI-FI MESH (802.11s)

Là mạng không dây dạng lưới chuẩn IEEE 802.11s khác với mô hình Wi-Fi truyền thống (AP-Client)



*Chuẩn 802.11s trong ns-3 gồm:
lớp MeshHelper, Mô đun Peer
Management Protocol, Hybrid
Wireless Mesh Protocol (HWMP)*

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

I. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

KIẾN TRÚC WI-FI MESH TRONG NS-3

Mesh Point Device

- Đại diện cho một nút trong mạng Mesh
- Có thể bao gồm nhiều interface Wi-Fi (MAC/PHY)
- Thực hiện chức năng bridging giữa các interface

Peer Management Protocol (PMP)

- Thiết lập và duy trì quan hệ "peering" giữa các nút lân cận
- Quá trình: khám phá nút lân cận → mở kết nối → xác nhận → duy trì
- Chỉ các nút đã peering mới có thể trao đổi dữ liệu

Mesh Wi-Fi MAC (802.11s MAC)

- Mở rộng từ MAC chuẩn 802.11
- Hỗ trợ: forwarding frame, quản lý link, quản lý topology
- Xử lý các frame đặc biệt của Mesh (Mesh Data, Mesh Management)

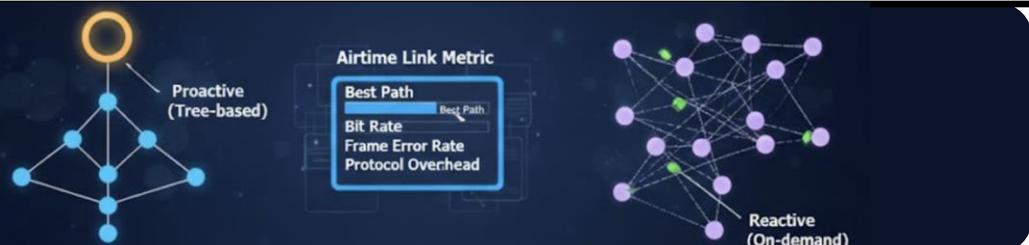
CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

I. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

KIẾN TRÚC WI-FI MESH TRONG NS-3

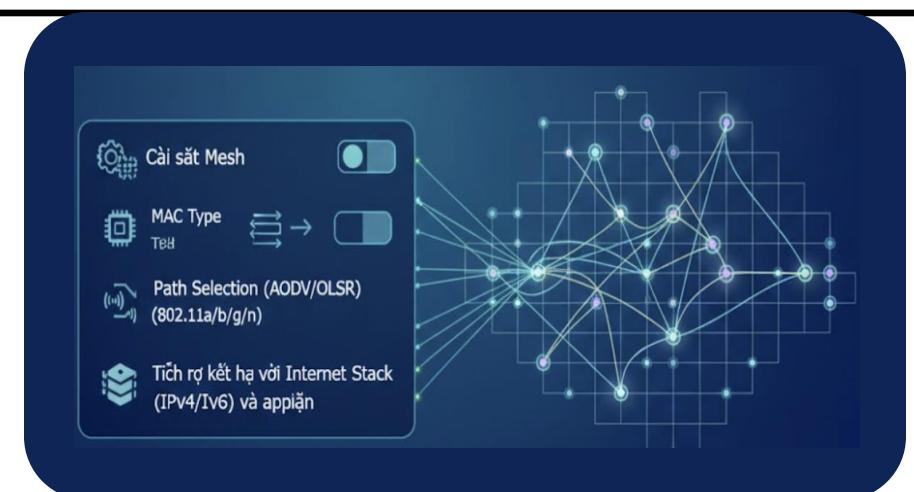
Path Selection Protocol - HWMP

- HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)**: giao thức định tuyến hybrid theo chuẩn 802.11s
- Kết hợp hai cơ chế:
 - Proactive (tree-based)**: Duy trì cây đường đi từ các node đến Root (Mesh Portal)
 - Reactive (on-demand)**: Khám phá đường đi khi cần (giống AODV)
- Airtime Link Metric**: Đánh giá chất lượng link dựa trên:
 - Tốc độ truyền (bit rate)
 - Tỷ lệ lỗi frame (frame error rate)
 - Overhead của protocol



MeshHelper trong ns-3

- Lớp tiện ích để cài đặt và cấu hình Mesh
- Cho phép lựa chọn: loại MAC, giao thức path selection, tham số PHY
- Hỗ trợ kết hợp với Internet stack (IPv4/IPv6) và ứng dụng

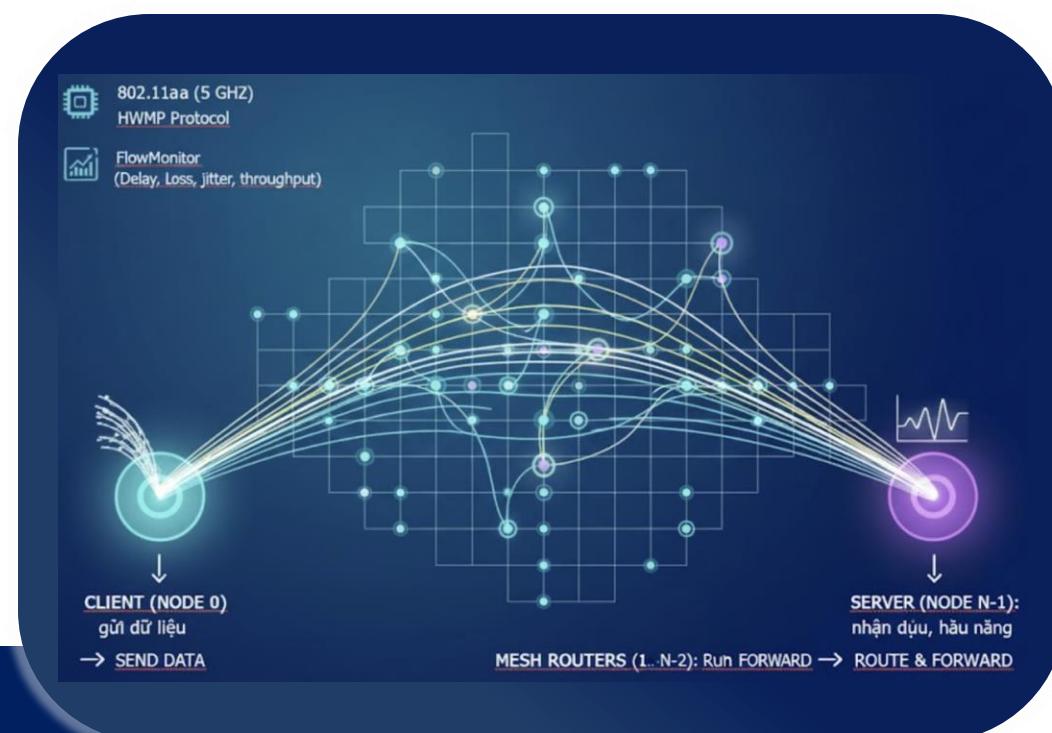


CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG/MẠNG

Cấu hình chung:

- Chuẩn Wi-Fi 802.11a (5 GHz), tốc độ 6 Mb/s
- Giao thức định tuyến HWMP
- Ứng dụng: UDP Echo Client-Server
- Kích thước gói tin: 1024 bytes
- Khoảng thời gian gửi 1 gói tin (interval): 0.04 s
- Thời gian mô phỏng: 20 s
- Phân tích FlowMonitor
(delay, loss, jitter, throughput)



Vai trò các nút:

- **Client (Node 0):** gửi dữ liệu
- **Mesh routers (Node 1...N-2):** định tuyến, chuyển tiếp
- **Server (Node N-1):** nhận dữ liệu, đo hiệu năng

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

III. KỊCH BẢN MÔ HÌNH

TIÊU CHÍ ĐÁNH GIÁ

| Ký hiệu | Ý nghĩa | Đơn vị |
|---------|--------------------|--------|
| TX | Số gói gửi | packet |
| RX | Số gói nhận | packet |
| Loss | Tỉ lệ mất gói | % |
| Delay | Độ trễ end-to-end | μs |
| Jitter | Dao động độ trễ | ms |
| Thr | Throughput thực tế | kbps |

Kịch bản 1:

Thay đổi khoảng cách (**D - Distance**)
Số node cố định là 6
D từ 41m đến 53m (step = 1m)

Kịch bản 2:

Thay đổi số nút (**Nodes**)
Khoảng cách cố định là 50m
D từ 4 đến 15 (step = 1)

PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

I. KẾT QUẢ KỊCH BẢN 1

```
pham-dinh-chien@pham-dinh-chien-VivoBook-ASUSLaptop-X512JAU-F512JA:~/ns-allinone-3.41/ns-3.41$ ./ns3 run  
--startNodes=6 --endNodes=6 --startDistance=41 --endDistance=53 --stepDistance=1 --packets=600 --interv  
time=20"  
ninja: no work to do.  
Xoa cac file XML cu...
```

--- BANG SO SANH ---

| Case | Nodes | Dist | TX | RX | Lost | Loss(%) | Delay(us) | Jitter(ms) | Thr(kbps) |
|------|-------|------|-----|-----|------|---------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 6 | 41 | 400 | 396 | 4 | 1.00 | 32685 | 5.47089 | 208.799 |
| 2 | 6 | 42 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 5660 | 2.34085 | 210.907 |
| 3 | 6 | 43 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 1895 | 0.26316 | 210.901 |
| 4 | 6 | 44 | 400 | 395 | 5 | 1.25 | 27794 | 4.38071 | 208.271 |
| 5 | 6 | 45 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 1762 | 0.24812 | 210.898 |
| 6 | 6 | 46 | 400 | 397 | 3 | 0.75 | 5215 | 1.87879 | 209.327 |
| 7 | 6 | 47 | 400 | 399 | 1 | 0.25 | 1916 | 0.27136 | 210.380 |
| 8 | 6 | 48 | 400 | 364 | 36 | 9.00 | 40385 | 7.59229 | 191.922 |
| 9 | 6 | 49 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 2003 | 0.32581 | 210.900 |
| 10 | 6 | 50 | 400 | 393 | 7 | 1.75 | 3718 | 1.42602 | 207.212 |
| 11 | 6 | 51 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 2114 | 0.39850 | 210.907 |
| 12 | 6 | 52 | 400 | 0 | 400 | 100.00 | 0 | 0.00000 | 0.000 |
| 13 | 6 | 53 | 400 | 0 | 400 | 100.00 | 0 | 0.00000 | 0.000 |

Hoan tat!

Ngưỡng khoảng cách hoạt động ổn định: nhỏ hơn 50 – 51 m

Khoảng cách tối ưu: 42 – 47 m

- loss $\leq 1\%$
- delay $\approx 2\text{ ms}$
- thr $\approx 210\text{ kbps}$

PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

II. KẾT QUẢ KỊCH BẢN 2

```
• pham-dinh-chien@pham-dinh-chien-VivoBook-ASUSLaptop-X512JAU-F512JA:~/ns-allinone-3.41/ns-3.41$ ./ns3 run  
"meshwifi --startNodes=4 --endNodes=15 --startDistance=50 --endDistance=50 --stepDistance=2  
--packets=600 --interval=0.04 --time=20"  
[0/2] Re-checking globbed directories...  
ninja: no work to do.  
Xoa cac file XML cu...
```

| --- BẢNG SO SÁNH --- | | | | | | | | | |
|----------------------|-------|------|-----|-----|------|---------|-----------|------------|-----------|
| Case | Nodes | Dist | TX | RX | Lost | Loss(%) | Delay(us) | Jitter(ms) | Thr(kbps) |
| 1 | 4 | 50 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 486 | 0.20050 | 210.922 |
| 2 | 5 | 50 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 2930 | 1.25815 | 210.913 |
| 3 | 6 | 50 | 400 | 399 | 1 | 0.25 | 6288 | 2.40704 | 210.380 |
| 4 | 7 | 50 | 400 | 400 | 0 | 0.00 | 1344 | 0.35589 | 210.916 |
| 5 | 8 | 50 | 400 | 277 | 123 | 30.75 | 42380 | 7.84783 | 146.047 |
| 6 | 9 | 50 | 400 | 398 | 2 | 0.50 | 3172 | 0.55668 | 209.844 |
| 7 | 10 | 50 | 400 | 398 | 2 | 0.50 | 4317 | 1.54912 | 209.828 |
| 8 | 11 | 50 | 400 | 394 | 6 | 1.50 | 5549 | 1.59033 | 207.735 |
| 9 | 12 | 50 | 400 | 339 | 61 | 15.25 | 7761 | 3.02663 | 178.725 |
| 10 | 13 | 50 | 400 | 398 | 2 | 0.50 | 2989 | 0.59950 | 209.836 |
| 11 | 14 | 50 | 400 | 339 | 61 | 15.25 | 42401 | 10.35207 | 178.700 |
| 12 | 15 | 50 | 400 | 360 | 40 | 10.00 | 16432 | 5.01114 | 189.781 |

Hoan tat!

Số nút tối ưu: 4 – 7

- độ trễ < 6 ms
- loss ≈ 0 %
- thr = 210 kbps

Từ 8 nút trở lên:

hiệu năng bắt đầu dao động do tăng hop-count và overhead định tuyến.

PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

III. TÓM TẮT KẾT QUẢ

Kịch bản 1

| D | Loss | Delay | Jitter | Thr | Nhận xét | |
|-------|----------|------------|-----------|-----------|-------------------------|--|
| 41–51 | 0 – 1.75 | 1.7k – 33k | 0.2 – 5.4 | 207 – 211 | Ổn định, chất lượng tốt | |
| 48 | 9.00 | 40.4 k | 7.6 | 191.9 | Link bắt đầu suy giảm | |
| 52–53 | 100 | 0 | 0 | 0 | Mất kết nối hoàn toàn | |

Kịch bản 2

| Nodes | Loss | Delay | Jitter | Thr | Nhận xét |
|-------|-----------|-----------|---------|---------|-------------------------------------|
| 4–7 | 0–0.25 | 486–6288 | 0.2–2.4 | ~210 | Mạng rất ổn định, throughput tối đa |
| 8 | 30.75 | 42 380 | 7.85 | 146 | Nghẽn đường truyền, mất gói cao |
| 9–11 | 0.5 – 1.5 | 3000–5500 | 0.5–1.6 | 207–210 | Hoạt động ổn định |
| 12 | 15.25 | 7 761 | 3.03 | 179 | Suy giảm do độ trễ mạng cao |
| 13 | 0.50 | 2 989 | 0.60 | 210 | Mạng phục hồi, định tuyến tối ưu |
| 14 | 15.25 | 42401 | 10.35 | 179 | Nút quá nhiều, overhead cao |
| 15 | 10.00 | 16432 | 5.01 | 189 | Suy giảm ổn định mạng |

PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

IV. PHÂN TÍCH & ĐÁNH GIÁ

Phân tích

| Yếu tố | Xu hướng ảnh hưởng | Kết luận |
|---------------------------|---|--|
| Khoảng cách | Tăng → Mất gói và delay tăng mạnh | Giới hạn khoảng 51 m |
| Số nút | Tăng vừa phải (≤ 7) → ổn định; Tăng quá → overhead cao | Nên giữ 4 – 7 nút trong ≈ 50 m |
| Throughput | Ôn định ≈ 210 kbps $< 3\%$ sai số so với lý thuyết | Hiệu quả băng thông rất cao |
| Delay & Jitter | Ôn định ở các case chuẩn; dao động lớn ở loss cao | Đáp ứng QoS cho VoIP/video |
| Self-healing | Các case 9, 13 (phục hồi ổn định sau mạng suy giảm) | HWMP thực hiện đúng chức năng |

Đánh giá

| Đánh giá | Tiêu chuẩn | Yêu cầu | Kết quả | Đánh giá |
|----------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|----------|
| | ITU-T G.114 (Delay) | < 150 ms | ≤ 42 ms | ✓ Đạt |
| | Cisco (Jitter) | < 30 ms | ≤ 10 ms | ✓ Đạt |
| | ITU Y.1541 (Loss) | $< 3\%$ (bình thường) | $\leq 1\%$ ở vùng chuẩn | ✓ Đạt |
| | 3GPP (Throughput) | $\geq 90\%$ tối đa | $\approx 100\%$ | ✓ Đạt |

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Kết luận

- Đã xây dựng thành công và triển khai hệ thống mô phỏng **Wi-Fi Mesh 802.11s** sử dụng thư viện mô-đun MeshHelper trong NS-3.
- Đã thu thập được hai bộ dữ liệu thực nghiệm, chứng minh tác động của **Khoảng cách** và **Số lượng nút** đối với hiệu năng mạng lưới
- Xác định được các ngưỡng giới hạn ổn định của giao thức định tuyến **HWMP**

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Để mở rộng và tăng cường tính thực tiễn của đề xuất, nhóm đề xuất các hướng nghiên cứu sau:

- Phát triển QoS:** Bổ sung mô hình **802.11e QoS EDCA** để ưu tiên các luồng dữ liệu thời gian thực (real-time traffic).
- So sánh Giao thức:** Thực hiện so sánh hiệu năng của **HWMP** với các giao thức định tuyến không dây phổ biến khác như **AODV** và **OLSR** trong cùng một cấu trúc liên kết (topology).
- Đánh giá chuyên sâu:** Đánh giá bổ sung các tiêu chí quan trọng khác như **năng lượng tiêu thụ** và **thời gian học đường đi** (route discovery time) của giao thức.



THANK YOU

Đà Nẵng, 2025