

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN TỬ VIỄN THÔNG**



**BÁO CÁO
LẬP TRÌNH MẠNG**

Wi-Fi Mesh Module Documentation

Sinh viên thực hiện

Tên

<i>Tên</i>	<i>Lớp MSSV</i>
1. Nguyễn Trần Minh	22KTMT1
2. Phạm Đình Chiến	22KTMT2

Lớp MSSV

106220224
106220246

Giảng viên hướng dẫn

Nguyễn Văn Hiếu

Đà Nẵng, 2025.

BÁO CÁO ĐỒ ÁN MÔ PHỎNG MẠNG WI-FI MESH SỬ DỤNG NS3

Đề tài:

Phân tích giới hạn vùng phủ sóng và độ ổn định của giao thức định tuyến HWMP trong mạng Wireless Mesh Network sử dụng NS-3.

1. Phân công công việc (10%)

STT	HỌ VÀ TÊN	NHIỆM VỤ	KHỐI LUỢNG
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 trình Tìm kiếm thông tin, chuẩn bị dữ liệu Làm báo cáo	50%

2. Cơ sở lý thuyết và Mô hình hệ thống (20%)

2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Wi-Fi Mesh (802.11s).

Là mạng không dây dạng lưới (mesh topology) theo chuẩn IEEE 802.11s, trong đó các nút (mesh point) kết nối với nhau theo cấu trúc đa hop, tạo thành một mạng tự tổ chức (self-forming) và tự phục hồi (self-healing). Khác với mô hình Wi-Fi truyền thống (AP-

Client), mỗi nút trong mạng Mesh vừa là thiết bị đầu cuối, vừa thực hiện chức năng định tuyến và chuyển tiếp gói tin cho các nút khác.

Đặc trưng chính:

- Tự tổ chức (Self-forming), tự phục hồi (Self-healing).
- **Multi-hop routing:** gói tin được chuyển qua nhiều nút trung gian
- **Định tuyến hybrid (HWMP):** kết hợp proactive (cây gốc Portal) và reactive (Route Discovery theo nhu cầu).
- **Scalability:** dễ dàng mở rộng bằng cách thêm nút mới vào mạng

Chuẩn 802.11s trong ns-3 bao gồm: lớp MeshHelper, mô đun **Peer Management Protocol** để quản lý kết nối giữa các nút, và **Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)** để lựa chọn đường đi.

2.1.2. Kiến trúc Wi-Fi Mesh trong ns-3

Mô hình Wi-Fi Mesh trong ns-3 tuân theo chuẩn IEEE 802.11s, bao gồm các thành phần:

a) 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

b) 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)

c) 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

d) 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

e) 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

2.2. Mô hình hệ thống/mạng

Đồ án thực hiện hai kịch bản mô phỏng để đánh giá hiệu năng mạng Wi-Fi Mesh theo hai yếu tố khác nhau:

- **Kịch bản 1: Ảnh hưởng của khoảng cách giữa các nút**
- **Kịch bản 2: Ảnh hưởng của số lượng nút trong 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

2.3. Các kịch bản mô phỏng

Kịch bản	Mục đích	Thông số chính
Kịch bản 1: Thay đổi khoảng cách	Đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách truyền sóng tới hiệu năng khi số nút = 6	Dist = 41 → 53 m (step = 1 m)
Kịch bản 2: Thay đổi số nút	Đánh giá ảnh hưởng của độ dày mạng lưới (hop-count) tới hiệu năng ở khoảng cách định (50 m)	Nodes = 4 → 15, Dist = 50 m

Cả hai kịch bản được chạy qua **một hàm mô phỏng tái sử dụng (RunScenario)**,
tự động tạo XML file NetAnim và ghi kết quả tổng hợp ra bảng.

Lệnh chạy mô phỏng:

- Kịch bản 1:
. /ns3 run "meshwifi --startNodes=4 --endNodes=15 --startDistance=50 --
endDistance=50 --packets=600 --interval=0.04 --time=20"
- Kịch bản 2:
. /ns3 run "meshwifi --startNodes=4 --endNodes=15 --startDistance=50 --
endDistance=50 --stepDistance=2 --packets=600 --interval=0.04 --time=20"

3. Phân tích kết quả mô phỏng (30%)

3.1. Các metrics 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

3.2. Kết quả Kịch bản 1 – Thay đổi khoảng cách (Nodes = 6)

Kết quả thực tế sau khi chạy mô phỏng:

```
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 --interval=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!
```

Từ kết quả chạy thực tế, ta có bảng thống kê hiệu năng mạng khi khoảng cách thay đổi

Case	Dist	TX	RX	Loss	Delay	Jitter	Thr	Trạng thái
1	41	400	396	1.00	32,685	5.47	208.8	Ôn định thấp
2	42	400	400	0.00	5,660	2.34	210.9	Tốt
3	43	400	400	0.00	1,895	0.26	210.9	Rất tốt

4	44	400	395	1.25	27,794	4.38	208.3	Suy hao nhẹ
5	45	400	400	0.00	1,762	0.25	210.9	Rất tốt
6	46	400	397	0.75	5,215	1.88	209.3	Suy hao nhẹ
7	47	400	399	0.25	1,916	0.27	210.4	Tốt
8	48	400	364	9.00	40,385	7.59	191.9	Bất ổn định
9	49	400	400	0.00	2,003	0.33	210.9	Tốt
10	50	400	393	1.75	3,718	1.43	207.2	Suy hao nhẹ
11	51	400	400	0.00	2,114	0.40	210.9	Tốt (Cận biên)
12	52	400	0	100	0	0	0.0	Mất kết nối
13	53	400	0	100	0	0	0.0	Mất kết nối

Tóm tắt hiệu quả hoạt động:

D	Loss	Delay	Jitter	Thr	Nhận xét
41–51	0 – 1.75	1.7k – 33k	0.2 – 5.4	207 – 211	Ôn 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

Ngưỡng khoảng cách hoạt động ổn định: $\leq 50 – 51$ m

Khoảng cách tối ưu: $42 – 47$ m (loss $\leq 1\%$, delay ≈ 2 ms, thr ≈ 210 kbps)

3.3. Kết quả kịch bản 2 thay đổi số nút (Node = 4 → 15, Dist = 50 m)

Kết quả thực tế sau khi chạy mô phỏng:

```

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...

==== BANG SO SANH ====
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!

```

Từ kết quả chạy thực tế, ta có bảng thống kê hiệu năng mạng khi khoảng cách thay đổi

Case	Nodes	TX	RX	Loss	Delay	Jitter	Throughput	Trạng thái
1	4	400	400	0.00	486	0.20050	210.922	Rất tốt
2	5	400	400	0.00	2930	1.25815	210.913	Tốt
3	6	400	399	0.25	6288	2.40704	210.380	Tốt
4	7	400	400	0.00	1344	0.35589	210.916	Rất tốt
5	8	400	277	30.75	42380	7.84783	146.047	Bất ổn định
6	9	400	398	0.50	3172	0.55668	209.844	Suy hao nhẹ
7	10	400	398	0.50	4317	1.54912	209.828	Suy hao nhẹ
8	11	400	394	1.50	5549	1.59033	207.735	Suy hao nhẹ (gần bát ổn)
9	12	400	339	15.25	7761	3.02663	178.725	Bất ổn định
10	13	400	398	0.50	2989	0.59950	209.836	Suy hao nhẹ
11	14	400	339	15.25	42401	10.35207	178.700	Bất ổn định mạnh
12	15	400	360	10.00	16432	5.01114	189.781	Bất ổn định

Tóm tắt hiệu quả hoạt động:

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

- ✓ **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**.

Mối liên hệ:

- Nút quá ít → độ phủ kém, ít đường dự phòng.
- Nút vừa đủ → đa đường ổn định, self-healing hoạt động hiệu quả.
- Nút quá nhiều → gói điêu khiển tăng, gây nhiễu và cạnh tranh kenh.

3.4. Phân tích so sánh giữa hai kịch bản

<u>Yếu tố</u>	<u>Xu hướng ảnh hưởng</u>	<u>Kết luận</u>
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 phạm vi ≈ 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

3.5. Đánh giá theo chuẩn hiệu năng

<u>Tiêu chuẩn</u>	<u>Yêu cầu</u>	<u>Kết quả</u>	<u>Đánh giá</u>
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

3.6. Kết luận tổng hợp

- **Khoảng cách tối đa ổn định:** ~ 50 m với 802.11a
- **Số nút tối ưu:** 4 – 7 nút/mesh domain
- **Hiệu năng:** Throughput ≈ 210 kbps ($\approx 100\%$), loss $\approx 0\%$, delay < 6 ms
- **Nguyên nhân suy giảm:** Fading tín hiệu (với khoảng cách > 51 m) và overhead HWMP (khi > 10 nút).
- **Kết quả phù hợp với lý thuyết propagation (Free Space Path Loss) và thực tế đo lường.**

4. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

4.1. Kết luận

Đồ án đã:

- Xây dựng thành công hệ thống mô phỏng Wi-Fi Mesh 802.11s trên ns-3.
- Thu được hai bộ dữ liệu phản ánh tác động của khoảng cách và số nút lưới tới hiệu năng.
- Chứng minh mạng Mesh đạt hiệu suất cao, ổn định với QoS đáp ứng chuẩn VoIP & video realtime.

4.2. Đề xuất phát triển

- Bổ sung **802.11e QoS EDCA** để ưu tiên luồng thời gian thực.
- Mở rộng mô phỏng **nhiều, di động, fading** thực tế.
- So sánh **HWMP** với **AODV** và **OLSR** trong cùng topo.
- Đánh giá thêm tiêu chí **năng lượng và thời gian học đường đi**.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *ns-3 Wi-Fi Mesh Documentation*,
<https://www.nsnam.org/docs/models/html/mesh.html>
2. IEEE 802.11s-2011 – Wireless LAN Mesh Standard
3. ITU-T G.114 (Delay Recommendation)
4. ITU-T Y.1541 (Network Performance)
5. Cisco QoS Design Guide (VoIP Delay & Jitter)

Tóm tắt:

- Wi-Fi Mesh 802.11s hoạt động hiệu quả với khoảng cách ≤ 50 m và 4–7 nút.
- Hiệu năng cao và ổn định (Throughput $\approx 100\%$, Loss $\approx 0\%$).
- Từ ngưỡng > 50 m hoặc > 10 nút,
hiệu năng giảm do giới hạn vật lý và overhead routing.
- Các chỉ số đáp ứng đầy đủ các chuẩn QoS quốc tế.