



**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

PHẠM HÙNG

**NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT LẬP LỊCH CHO
MẠNG THÔNG TIN DI ĐỘNG THỂ HỆ MỚI**

Chuyên ngành: **Kỹ thuật viễn thông**

Mã số: **9.52.02.08**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SỸ KỸ THUẬT

Hà nội - 2021

Công trình được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban.

PGS.TS. Đặng Hoài Bắc

Phản biện 1: PGS.TS. Nguyễn Tài Hưng.

Phản biện 2: PGS.TS. Trần Đức Tân.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Hiện nay nhu cầu sử dụng dịch vụ di động ngày càng lớn do tính phổ biến và tiện dụng của các thiết bị đầu cuối di động. Bên cạnh đó, các ứng dụng mới trong kỷ nguyên của IoT sẽ tiếp tục đặt ra nhiều cơ hội cũng như thách thức cho sự phát triển của ngành di động. Các hệ thống camera giám sát sẽ rất phổ biến và theo dõi xã hội mọi nơi và mọi lúc. Các động vật cũng được giám sát và theo dõi sức khỏe từ xa như con người. Các ô tô tự lái sẽ được nối mạng để nhận biết môi trường cũng như các nguy cơ tiềm ẩn theo thời gian thực. Các bác sĩ có thể cứu chữa cho bệnh nhân từ xa qua mạng thông tin di động, không còn phụ thuộc môi trường địa lý. Việc tương tác hai chiều sẽ đòi hỏi mạng thông tin di động có chất lượng cao hơn về tốc độ, độ tin cậy và độ trễ.

Mạng di động các thế hệ đầu tiên như 2G và 3G chủ yếu phục vụ nhu cầu thoại của người dùng với công nghệ chuyển mạch kênh là chủ yếu. Chỉ đến 4G thì tốc độ dữ liệu của người dùng mới được cải thiện và mạng lõi đã hoàn toàn sử dụng công nghệ chuyển mạch gói, tuy nhiên tài nguyên vô tuyến vẫn rất hữu hạn. Một đặc điểm khác của mạng vô tuyến là sự biến thiên theo thời gian, theo tần số và cả không gian. Vì vậy, lập lịch được sử dụng như một lớp thích nghi với sự biến đổi của môi trường vô tuyến và các yêu cầu khác nhau về chất lượng dịch vụ của mạng lõi chuyển mạch gói. Tuy nhiên, các kỹ thuật lập lịch cho mạng 4G được giới hạn chủ yếu vào các nhóm sau:

- Tối ưu tốc độ hệ thống: kỹ thuật lập lịch sẽ chọn ra các thuê bao có chất lượng kênh truyền tốt nhất để phục vụ nhằm đạt được tốc độ hệ thống cao nhất. Tuy nhiên, nhược điểm của kỹ thuật này là các thuê bao ở trạng thái kênh truyền kém sẽ không được phục vụ.
- Bình quân về tốc độ: kỹ thuật lập lịch sẽ phục vụ mọi thuê bao sao cho dung lượng sử dụng của mọi thuê bao sẽ gần bằng nhau nhất. Đây là kỹ thuật được sử dụng chủ yếu khi triển khai thực tế của mạng 4G. Tuy nhiên, nhược điểm của kỹ thuật này là tốc độ hệ thống đạt được sẽ kém hơn nhiều so với kỹ thuật tối ưu tốc độ hệ thống.

Mạng 5G đem lại sự thay đổi rất lớn so với các mạng trước đây cả về độ rộng băng tần sử dụng và đặc biệt là sử dụng số lượng ăng ten cỡ rất lớn phía trạm gốc. Dung lượng hệ thống tăng tỷ lệ thuận với số lượng ăng ten sử dụng nên dung lượng của trạm gốc trong 5G sẽ tiệm cận với 10 Gbps tức là gấp 10 lần tốc độ của mạng 4G. Sử dụng sóng mmWave với dải tần từ 28 Ghz đến 300 Ghz khiến tài nguyên vô tuyến lớn hơn rất nhiều so với mạng 4G. Vì vậy, kỹ thuật lập lịch áp dụng cho mạng 5G cần hướng tới việc đảm bảo chất

lượng người dùng hoặc tối ưu về hiệu quả sử dụng hơn là đơn thuần nhằm tăng tốc độ hệ thống hoặc phục vụ bình quân cho mọi thuê bao.

Các hướng nghiên cứu chính về kỹ thuật lập lịch trong mạng 5G hiện nay là:

- Tăng dung lượng hệ thống nhờ đặc tính kênh truyền hệ thống ăng ten cỡ rất lớn là ổn định theo thời gian nên có thể sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền để ước lượng kênh truyền hiện tại của thuê bao. Nhờ đó, giảm được tài nguyên ước lượng kênh truyền mà vẫn có thể phục vụ thêm thuê bao.
- Do số lượng ăng ten là rất lớn nên có thể lựa chọn các ăng ten có kênh truyền tốt nhất để phục vụ mà không cần tiêu tốn công suất và các ăng ten không ở trong điều kiện tối ưu cho thuê bao. Xuất hiện hướng nghiên cứu của kỹ thuật lập lịch về các tiêu chí để lựa chọn tập thuê bao và tập ăng ten phục vụ.
- Do dung lượng hệ thống của 5G đã đạt được tốc độ cao nên bắt đầu quan tâm đến việc bảo đảm tốc độ tối thiểu cho thuê bao. Lúc này bài toán lập lịch không chỉ phục vụ thuê bao bằng mọi giá mà còn phải đánh giá xem tốc độ phục vụ của thuê bao có đạt được yêu cầu của chất lượng dịch vụ QoS hay không.
- Lập lịch đảm bảo độ trễ tối thiểu cho thuê bao. Đây là hướng lập lịch đảm bảo chất lượng dịch vụ QoS hướng đến các ứng dụng đòi hỏi độ trễ thấp trong mạng 5G.

Tuy nhiên, do đặc tính về chất lượng dịch vụ trong mạng lõi dựa trên công nghệ IP phức tạp hơn rất nhiều so với nhưng kỹ thuật lập lịch hiện nay trong các nghiên cứu về mạng 5G nên cần có những cải tiến hơn nữa về kỹ thuật lập lịch để đáp ứng được nhu cầu của người dùng.

2. Những vấn đề còn tồn tại

Việc áp dụng thông tin lão hóa kênh truyền để làm tăng dung lượng hệ thống cho mạng 5G đã góp phần tăng mạnh dung lượng hệ thống tuy nhiên các nghiên cứu hiện nay về kỹ thuật lập lịch áp dụng thông tin lão hóa kênh truyền chưa quan tâm đến việc sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền có thể dẫn đến tình trạng tốc độ đạt được của thuê bao là không cao khi sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền quá cũ. Trường hợp khác có thể xảy ra là các nghiên cứu về kỹ thuật lập lịch sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền không chỉ ra được số thuê bao tối ưu cần được phục vụ là bao nhiêu. Dẫn đến trong nhiều trường hợp số lượng thuê bao được phục vụ là quá lớn dẫn đến tốc độ trung bình của các thuê bao sẽ bị giảm xuống. Vì vậy, cần tham chiếu các thông số về chất lượng dịch vụ của phần mạng lõi IP để tác động lên quá trình lập lịch nhằm đảm bảo được chất lượng dịch vụ cho người dùng.

Hiện tại, có một số nghiên cứu về kỹ thuật lập lịch đang chú trọng về đảm bảo một tốc độ tối thiểu cho toàn bộ thuê bao và sử dụng các thuật toán vét cạn để tìm lời giải tối ưu. Tuy nhiên thực tế là các ứng dụng chạy trên mạng thông tin di động có nhiều yêu cầu về tốc độ tối thiểu khác nhau. Việc sử dụng các tính toán quá phức tạp sẽ dẫn đến độ trễ xử lý trong việc lập lịch của thuê bao. Vì vậy, cần thiết đề xuất ra kỹ thuật lập lịch cho người dùng với nhiều tốc độ tối thiểu khác nhau và kỹ thuật đề xuất cần đơn giản trong tính toán nhằm giảm thời gian tính toán, đáp ứng được yêu cầu về độ trễ của người dùng.

Hơn nữa, các thông số về chất lượng dịch vụ trong mạng lõi không chỉ là độ trễ mà còn có các thông tin về độ ưu tiên của dịch vụ. Độ ưu tiên của dịch vụ khác nhau có thể dẫn đến sự khác biệt hoàn toàn về giá cước dịch vụ giữa các người dùng. Vì vậy, thông số về độ ưu tiên của dịch vụ trong mạng lõi nên là một tham số đánh giá trong quá trình lập lịch.

3. Mục tiêu nghiên cứu

Xuất phát từ những phân tích ở trên, luận án tập trung thực hiện các mục tiêu chính sau đây:

- Đề xuất kỹ thuật lập lịch và tính toán ảnh hưởng của việc sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền lên tốc độ của từng thuê bao cũng như toàn hệ thống để đảm bảo rằng các thuê bao được phục vụ sẽ được cung cấp một tốc độ tối thiểu trong khi vẫn cải thiện dung lượng hệ thống.
- Đề xuất kỹ thuật lập lịch và thực hiện mô hình hóa toán học để đảm bảo các thuê bao được phục vụ sẽ có được tốc độ tối thiểu theo yêu cầu và chọn ra được tập thuê bao tối ưu để dung lượng hệ thống là cao nhất. Hơn nữa kỹ thuật lập lịch sẽ tính đến độ ưu tiên của dữ liệu, đảm bảo rằng khi các yếu tố khác là như nhau thì thuê bao có độ ưu tiên cao hơn sẽ được phục vụ trước.
- Đề xuất kỹ thuật lập lịch để khai thác đặc tính của kênh truyền trực giao trong mạng 5G. Dựa vào đặc tính kênh truyền để xây dựng ngưỡng giới hạn để tìm ra tập thuê bao có đặc tính kênh truyền cần tìm kiếm, từ đó giảm bớt được thời gian tìm tập thuê bao phục vụ tối ưu.

Chương 1: Tổng quan về kỹ thuật lập lịch

Chương này trình bày tổng quan về kỹ thuật ước lượng kênh và xử lý tuyến tính của hệ thống thông tin di động thế hệ mới 5G. Từ đó xác định các ưu điểm và thách thức chung của mạng 5G, và tiếp theo là khảo sát các kỹ thuật lập lịch hiện nay. Đó là những lý thuyết nền tảng cho những đề xuất ở các chương tiếp theo của luận án.

1. Hệ thống thông tin di động 5G

Các nghiên cứu về ghép kênh không gian đã chuyển từ MIMO truyền thống sang hệ thống MIMO đa người dùng (MU-MIMO), nơi mà BS có nhiều ăng ten sẽ phục vụ nhiều thuê bao chỉ có một ăng ten. Điều này rất quan trọng trong thực tế vì lý do kích thước và pin của điện thoại mà việc tăng số ăng ten tại trạm gốc là dễ dàng hơn tại thuê bao. Càng nhiều ăng ten tại trạm gốc thì độ lợi về ghép kênh không gian càng tăng lên, đi cùng với nó là sự phức tạp trong tính toán và đắt đỏ trong phần cứng.

Marzetta đã chứng minh rằng khi số lượng ăng ten vô cùng lớn thì chỉ cần sử dụng các phép toán tuyến tính đơn giản như kết hợp tỷ lệ cực đại MRC cho đường lên cũng có thể đạt được hiệu quả gần tối ưu như trong MIMO truyền thống. Hệ thống như vậy được gọi là Massive MIMO.

Tăng băng thông hệ thống là một cách để tăng thông lượng hệ thống. Tuy nhiên hiện nay dải phổ phù hợp nhất cho liên lạc vô tuyến ở dưới 6 GHz đã sử dụng gần hết. Vì vậy mạng thông tin di động 5G đang nghiên cứu sử dụng phổ tần ở băng sóng mmWave.

Massive MIMO và mmWave là các công nghệ hứa hẹn cho mạng thông tin 5G. Tuy nhiên, còn rất nhiều thách thức được đặt ra do có rất nhiều thuê bao được phục vụ đồng thời như vấn đề can nhiễu giữa các thuê bao, thu thập thông tin về chất lượng kênh và cuối cùng là dung lượng hệ thống phụ thuộc rất nhiều vào kỹ thuật lập lịch để chọn ra tập thuê bao tối ưu.

2. Kỹ thuật lập lịch ở mạng vô tuyến

Xét mạng thông tin di động 5G gồm một trạm gốc gNB và các thuê bao trong vùng phủ của nó. Trong mỗi khung thời gian mà chất lượng kênh hầu như không đổi, gNB sẽ chọn ra một tập con thuê bao để gửi tín hiệu hoa tiêu, và sau đó tùy theo thông tin về $\{CSI\}$, một tập con thuê bao sẽ được gNB phục vụ. Toàn bộ quá trình này được gọi là lập lịch. Có rất nhiều kỹ thuật được xây dựng dựa trên các tiêu chí khác nhau như độ trễ, sự công bằng giữa các thuê bao, hoặc tối ưu tốc độ toàn hệ thống... Các kỹ thuật với mục tiêu khác nhau dẫn đến sự khác nhau đáng kể về hiệu suất của hệ thống và khác biệt về chất lượng dịch vụ của thuê bao. Vì vậy, vấn đề lập lịch luôn là một vấn đề quan trọng thu hút được nhiều sự quan tâm và nghiên cứu ở cả trong và ngoài nước.

3. Kết luận chương

Trong chương này, luận án đã trình bày những cơ sở lý thuyết nền tảng của hệ thống thông tin di động 5G nói chung và một số kỹ thuật lập lịch tiêu biểu hiện nay nói riêng cùng với hạn chế của các kỹ thuật này. Trên cơ sở đó, luận án đề ra hướng nghiên cứu về kỹ thuật lập lịch gồm ba phần: (i) thứ nhất, luận án nghiên cứu kỹ thuật lập lịch sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền để làm tăng dung lượng toàn hệ thống và đảm bảo mọi thuê bao thỏa mãn yêu cầu về tốc độ tối thiểu, (ii) thứ hai, luận án phát triển kỹ thuật lập lịch có thể đảm bảo cho các thuê bao có thể có nhiều tốc độ tối thiểu khác nhau, cũng như sử dụng các tham số về độ ưu tiên hoặc độ rút gói, thay vì chỉ dừng lại ở tham số về độ trễ như các nghiên cứu hiện nay, (iii) thứ ba là luận án nghiên cứu kỹ thuật lập lịch sử dụng đặc tính trực giao kênh truyền của mạng thông tin di động cỡ rất lớn để giảm thời gian xác định tập thuê bao phục vụ.

Chương 2 Kỹ thuật lập lịch đảm bảo tốc độ tối thiểu của thuê bao dựa trên thông tin lão hóa kênh truyền

Trong chương này luận án sẽ trình bày mô hình hệ thống về vấn đề lão hóa kênh truyền, kỹ thuật ước lượng kênh truyền lão hóa và tốc độ có thể đạt được khi sử dụng hai phương pháp tiền mã hóa là MRT và ZF. Từ đó đề xuất kỹ thuật lập lịch sao cho việc sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền vẫn đảm bảo được tốc độ tối thiểu cho thuê bao, hơn nữa là không ảnh hưởng đến chất lượng dịch vụ của các thuê bao khác.

1. Kỹ thuật lập lịch đề xuất QoS-Aware

Sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền CSI có thể làm tăng độ lợi về ghép kênh nhưng nó có thể dẫn tới tốc độ trung bình của thuê bao bị giảm dần và có thể không đảm bảo yêu cầu về tốc độ tối thiểu của thuê bao theo các cam kết về chất lượng dịch vụ QoS.

Để giải quyết vấn đề này, luận án đề xuất một kỹ thuật lập lịch không những phục vụ được nhiều thuê bao hơn để tăng độ lợi về ghép kênh mà còn đảm bảo tốc độ tối thiểu của thuê bao nhằm thỏa mãn các yêu cầu về chất lượng dịch vụ QoS. Ý tưởng chính của kỹ thuật đề xuất là kiểm soát tốc độ có thể đạt được của các thuê bao được phục vụ và các thuê bao đang được xem xét phục vụ để đảm bảo việc thêm các thuê bao mới này vào nhóm lập lịch vẫn đảm bảo yêu cầu về tốc độ tối thiểu của mỗi thuê bao.

Bước tiếp theo là xác định đối tượng của việc lập lịch và các ràng buộc của nó. Trạm gốc BS thu thập thông tin trạng thái kênh truyền \mathbf{H} , tổng công suất phát P và yêu cầu về tốc độ tối thiểu R_k của các thuê bao được phục vụ theo các yêu cầu về QoS. Dựa trên thông tin thu thập được, kỹ thuật lập lịch tối đa hóa tốc độ tổng của toàn hệ thống bằng cách lựa chọn ra tập thuê bao tối ưu nhất $\mathbb{K}_{\mathbf{s}}[n]$ từ tập thuê bao được ước lượng kênh $\mathbb{K}_{\mathbf{p}}[n]$ và thông tin lão hóa kênh truyền trong mỗi chu kỳ khung.

Algorithm 1 Kỹ thuật lập lịch QoS-Aware

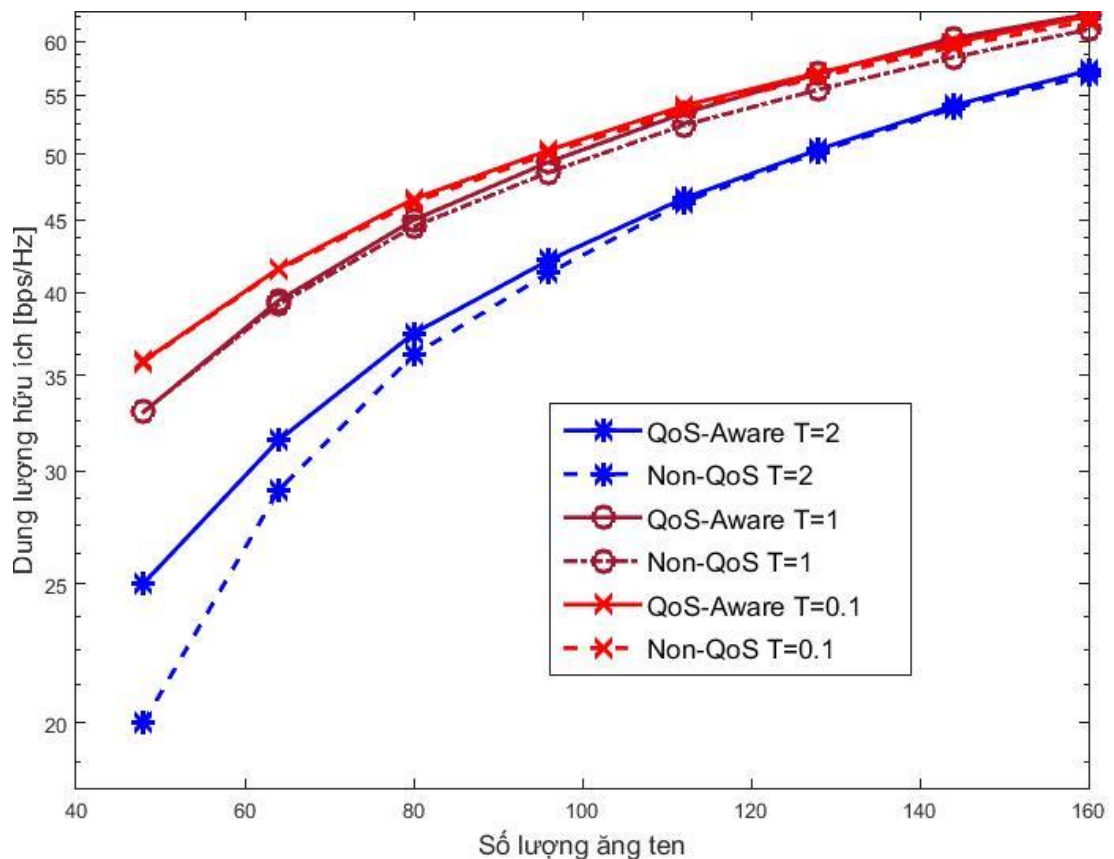
- 1: Ước lượng hệ số biến đổi kênh truyền
 $\delta_k[n] = \alpha_k^{n-l_k}, \forall k \in \mathbb{K}_a$
 - 2: Lựa chọn tập thuê bao hoa tiêu
 $\mathbb{K}_p[n]$ từ tập \mathbb{K}_a
 - 3: Ước lượng kênh truyền
Cập nhật $(l_k, \hat{\mathbf{h}}_k[l_k], n, \hat{\mathbf{h}}_k[n])$ cho thuê bao $k \in \mathbb{K}_p[n]$
 - 4: Lựa chọn tập thuê bao phù hợp $\mathbb{K}_s[n]$
 - 5: Truyền dữ liệu chiều xuống cho tập $\mathbb{K}_s[n]$
-

2. Kết quả mô phỏng

Để đo lường hiệu quả của kỹ thuật QoS-Aware, nhiều trường hợp mô phỏng đã được thực hiện trên nền hệ thống Massive MIMO bằng phần mềm Matlab để so sánh giữa các kỹ thuật lập lịch sau:

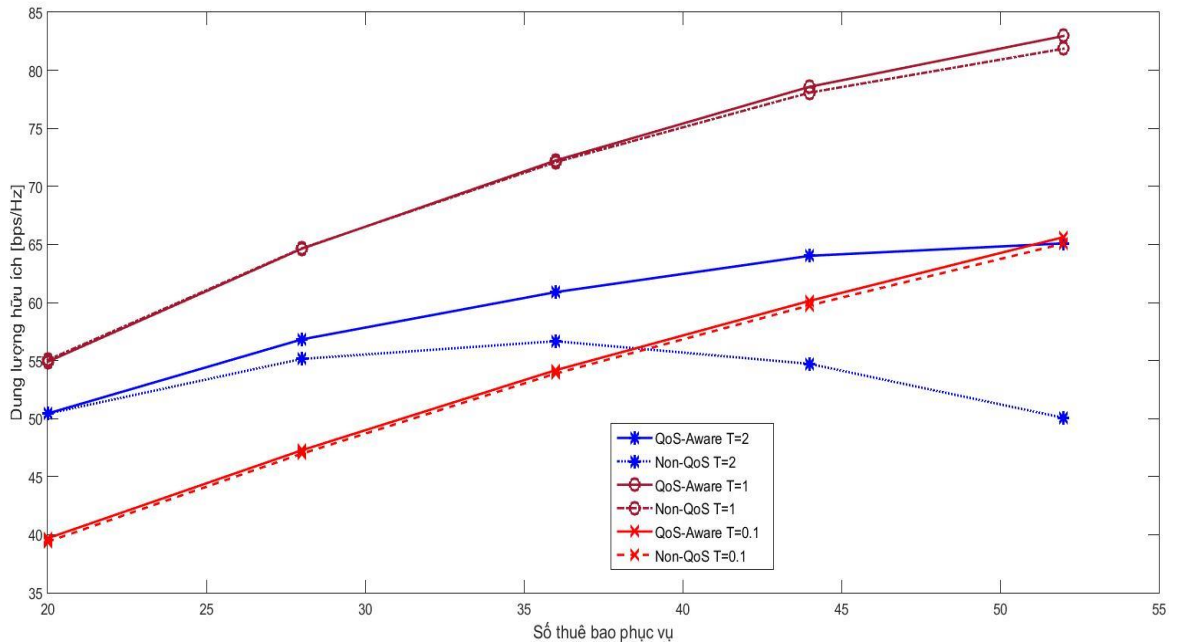
- Kỹ thuật Non-QoS.
- Kỹ thuật QoS-Aware

Hình sau so sánh dung lượng hữu ích giữa QoS-Aware và Non-QoS khi số lượng ăng ten của trạm gốc BS tăng dần và $K_a=40$ cho các trường hợp tốc độ tối thiểu khác nhau là $T=0.1, 1$ và 2 (bit/s/Hz). Cả hai kỹ thuật đều sử dụng tiền mã hóa MRT. Có thể thấy rằng dung lượng hữu ích của hệ thống tăng dần khi số lượng ăng ten tại trạm gốc M tăng lên. Hơn nữa, dung lượng hữu ích của kỹ thuật QoS-Aware luôn cao hơn dung lượng hữu ích của kỹ thuật Non-QoS. Nếu như yêu cầu về tốc độ tối thiểu của thuê bao T giảm dần thì sự khác biệt giữa dung lượng hữu ích của hai kỹ thuật cũng giảm dần. Đặc biệt là với $T=0.1$ thì dung lượng hữu ích của QoS-Aware và Non-QoS gần như giống nhau. Cuối cùng, khi T giảm thì dung lượng hữu ích của cả hai kỹ thuật đều tăng dần.



Hình sau biểu diễn dung lượng hữu ích của hệ thống khi số thuê bao K_a tăng dần và cố định số ăng ten $M=128$. Bình thường khi thêm thuê bao sẽ làm tăng dung lượng hữu ích của hệ thống. Tuy nhiên, nếu sử dụng kỹ thuật Non-QoS và T cao thì dung lượng hữu ích sẽ giảm xuống ví dụ như trường hợp $T=2$. Điều đó có nghĩa là nếu sử dụng kỹ thuật Non-

QoS thì khi phục vụ thêm thuê bao sẽ dẫn tới có nhiều thuê bao có lưu lượng không hữu ích. Hiện tượng này xảy ra nhiều hơn khi tốc độ trung bình của thuê bao nhỏ hơn tốc độ yêu cầu tối thiểu T . Tuy nhiên, với $T=2$ thì khi sử dụng kỹ thuật QoS-Aware chúng ta thấy rằng lưu lượng hữu ích vẫn tăng lên khi thêm vào thuê bao mới bởi vì kỹ thuật chỉ lựa chọn các thuê bao có chất lượng kênh truyền tốt nhất và vẫn luôn đảm bảo rằng việc thêm thuê bao vẫn thỏa mãn điều kiện về QoS.



3. Kết luận chương

Trong chương 2 của luận án đã đề xuất kỹ thuật lập lịch có thể đảm bảo được tốc độ tối thiểu cho các thuê bao khi sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền. Kết quả mô phỏng đã xác nhận dung lượng hữu ích của kỹ thuật đề xuất vượt trội so với kỹ thuật lập lịch đã được công bố sử dụng thể so sánh. Lưu lượng không hữu ích tức là không đáp ứng yêu cầu tốc độ của khách hàng không đáng kể. Dung lượng hữu ích của kỹ thuật đề xuất không bị giảm đi khi số thuê bao có mặt trong trạm phát sóng tăng lên nhờ vào việc kỹ thuật sẽ giới hạn số thuê bao phục vụ để đảm bảo rằng tất cả thuê bao được chọn phục vụ đều được đảm bảo về tốc độ tối thiểu. Cuối cùng là nếu như số ăng ten tăng lên vô hạn thì lưu lượng không hữu ích sẽ tiến tới không, mọi thuê bao đều chỉ có dung lượng hữu ích. Hạn chế của kỹ thuật đề xuất là nếu ngưỡng tốc độ tối thiểu là quá thấp so với tốc độ trung bình của thuê bao thì việc áp dụng kỹ thuật QoS-Aware là không cần thiết.

Chương 3 Kỹ thuật lập lịch cho hệ thống ăng ten cỡ rất lớn đảm bảo đa tốc độ tối thiểu

Chương này của luận án đề xuất kỹ thuật lập lịch hướng tới cho phép thuê bao có thể yêu cầu tốc độ tối thiểu khác nhau. Kỹ thuật cũng xây dựng công thức tính toán chính xác công suất tối thiểu mà thuê bao cần có để đạt được tốc độ tối thiểu tùy ý. Hơn nữa, kỹ thuật cũng đề xuất sử dụng tham số về độ ưu tiên của lưu lượng để đảm bảo rằng trong các điều kiện như nhau thì lưu lượng có độ ưu tiên cao hơn sẽ được phục vụ trước.

1. Giải pháp đề xuất

Đầu tiên, công suất vừa đủ đáp ứng yêu cầu về tốc độ của mỗi khách hàng sẽ được xác định. Ở đây, giải pháp tiên mã hóa MRT sẽ được sử dụng:

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k) \geq T_k$$

$$\gamma_k \geq 2^{T_k} - 1$$

$$\frac{p_k |\mathbb{E}\{\mathbf{h}_k^T \mathbf{f}_k\}|^2}{\sum_{l=1}^{K_s} p_l \mathbb{E}\{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{f}_l|^2\} - p_k |\mathbb{E}\{\mathbf{h}_k^T \mathbf{f}_k\}|^2 + \sigma^2} \geq 2^{T_k} - 1.$$

Công suất p_k ở trên được tính theo công thức nghịch đảo kênh truyền:

$$\mathbf{f}_k^{MRT} = \mathbf{h}_k^*.$$

$$\gamma_k = \frac{(\frac{\tau_p p_p \beta_k}{\sigma^2 + \tau_p p_p \beta_k}) \beta_k M^2 P}{(2^{T_k} - 1)(\beta_k M P + \sigma^2)} \geq K_s.$$

Rõ ràng rằng tốc độ tối thiểu của thuê bao k chỉ phụ thuộc vào các tham số β_k , K_s và P , không phụ thuộc vào các thuê bao khác. Vì thế nghiên cứu sinh có thể mở rộng kết quả trên cho trường hợp các thuê bao có tốc độ tối thiểu khác nhau.

Tập thuê bao K_s được chọn bằng cách lựa chọn các thuê bao có tiêu chí cao nhất. Tiêu chí của thuê bao k là một hàm số của phụ thuộc vào công suất sử dụng của thuê bao p_k , chất lượng kênh truyền h_k , và độ ưu tiên của lưu lượng ψ_k tại khung n :

$$\rho_k[n] = (1 + f_w(k)) \frac{|\mathbf{h}_k|^2}{\psi_k^\alpha p_k} \frac{T_k[n]}{\bar{R}_k[n]},$$

trong đó, α là một hệ số dùng để điều chỉnh độ ưu tiên của lớp.

$T_k[n]$ là tốc độ truyền dẫn mong muốn của thuê bao tại khung n .

$\bar{R}_k[n]$ là dữ liệu trung bình đã truyền trong quá khứ của thuê bao k tại khung n .

Ví dụ, sau khi thuê bao k được chọn thì phần công suất còn lại sẽ bị giảm đi $f_k^2 p_k$. Quá trình này lặp đi lặp lại cho đến khi không còn đủ công suất cho thuê bao hoặc không còn

thuê bao cần phục vụ. Chi tiết hoạt động của kỹ thuật được miêu tả chi tiết trong thuật toán 3.

Algorithm 3 Thuật toán QoS-Assurance

```

1: Trạm gốc BS khởi tạo  $S(1 : K_p) = 0, \mathbb{K}_p = \{1, 2, \dots, K_p\}, i = 1$ 
2: Tính toán  $f_w(k), K_s, p_k, \rho_k[n]$  for  $\forall k \in \mathbb{K}_p$  in 3.16, 3.32, 3.23, 3.33
3: Lựa chọn thuê bao thứ  $i$ :
    $stop = 0;$ 
    $\rho_i[n] = \operatorname{argmax} \rho_k[n], \forall k \in \mathbb{K}_p$ 
4: if  $P \geq \|f_i\|^2 p_i$  then
    $\mathbb{K}_p = \mathbb{K}_p \setminus i;$ 
    $stop = 1;$ 
    $P = P - \|f_i\|^2 p_i;$ 
    $S(i) = 1;$ 
5: end if
6: if  $stop = 1$  then
   Quay lại bước 3
7: else
   Thuật toán kết thúc.
8: end if

```

2. Kết quả mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả của kỹ thuật lập lịch QoS-Assurance, một số trường hợp điển hình được mô phỏng bằng phần mềm Matlab để so sánh hiệu năng giữa các kỹ thuật sau:

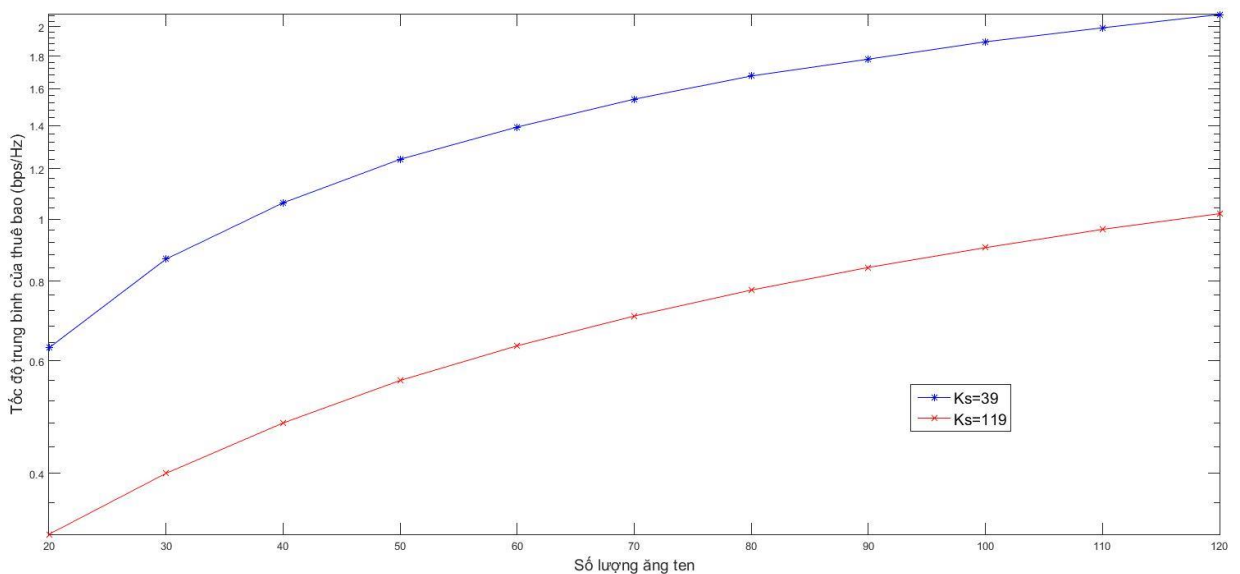
- Kỹ thuật MR.
- Kỹ thuật QoS Scheduler.
- Kỹ thuật QoS-Assurance.

Bảng 3.1 liệt kê những tham số mô phỏng chính. Ở đây các thuê bao được chia thành hai lớp dịch vụ có mong muốn tốc độ tối thiểu khác nhau. Lớp thứ nhất với tốc độ 2 (bit/s/Hz) tương đương với tốc độ 200 Mbps và lớp thứ hai có tốc độ tối thiểu 1 (bit/s/Hz) tương đương với tốc độ 100 Mbps khi trạm BTS sử dụng băng thông 100 MHz. Các kịch bản mô phỏng là tăng dần số ăng ten để kiểm tra sự hội tụ về tốc độ mong muốn của thuê bao trong từng lớp, so sánh tốc độ tổng của hệ thống giữa hai lớp dịch vụ khác nhau, và so sánh dung lượng hữu ích của kỹ thuật đề xuất và kỹ thuật MR khi số lượng thuê bao phục vụ tăng dần.

Bảng 3.1: Tham số mô phỏng

Tham số mô phỏng	
Tham số	Giá trị
Số lượng lớp C	2
Tốc độ tối thiểu của lớp thuê bao lớp 1	2 (bit/s/Hz)
Tốc độ tối thiểu của lớp thuê bao lớp 2	1 (bit/s/Hz)

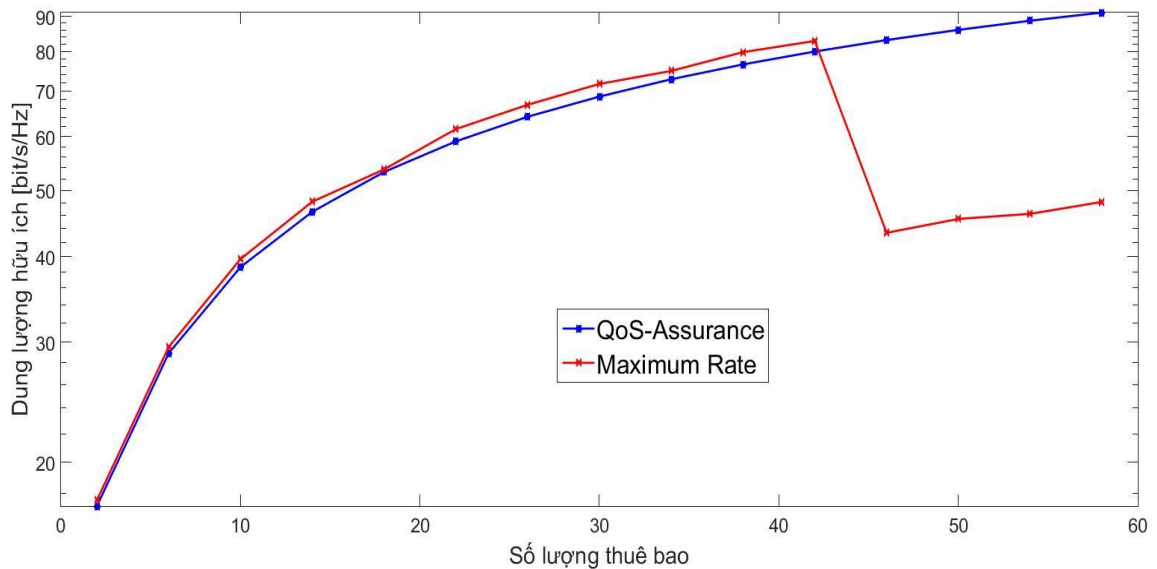
Hình 3.1 thể hiện tốc độ mỗi thuê bao khi sử dụng kỹ thuật QoS-Assurance khi số ăng ten của trạm gốc tăng dần. Trong trường hợp này, nghiên cứu sinh giả định rằng tất cả thuê bao trong tế bào đều được ước lượng kênh và phục vụ để xem tốc độ trung bình mà mỗi thuê bao sẽ đạt được. Nghiên cứu sinh nghiên cứu hai trường hợp: một là $K_p = K_s = 39$, hai là $K_p = K_s = 119$. Chúng ta có thể thấy từ kết quả, với $K_s = 39$ tốc độ trung bình mỗi thuê bao sẽ tiến tới 2 (bit/s/Hz). Với $K_s = 119$ tốc độ trung bình mỗi thuê bao sẽ tiến tới 1 (bit/s/Hz). Kết quả này khẳng định kỹ thuật QoS-Assurance có thể đảm bảo bất kỳ tốc độ tối thiểu nào cho thuê bao bằng cách điều khiển số lượng thuê bao được phục vụ K_s .



Hình 3.1 Tốc độ mỗi thuê bao khi sử dụng kỹ thuật QoS-Assurance

Hình 3.2 thể hiện dung lượng hữu ích của các thuê bao tức là chỉ có dung lượng mà đáp ứng được về tốc độ tối thiểu của các thuê bao được tính. Đối với kỹ thuật MR, có thể thấy rằng khi $K_p \geq 39$, phần lớn số thuê bao sẽ nhận được tốc độ nhỏ hơn 2 (bit/s/Hz) vì vậy hầu hết thuê bao được phục vụ thuộc về lớp thứ nhất sẽ không có lưu lượng hữu ích. Kết quả là, lưu lượng hữu ích của kỹ thuật MR sẽ giảm mạnh trước khi tăng nhẹ trở lại do số thuê bao thuộc lớp thứ hai được phục vụ tăng lên. Bên cạnh đó, các thuê bao thuộc lớp thứ nhất

sẽ được thỏa mãn về tốc độ yêu cầu 2 (bit/s/Hz) và các thuê bao thuộc lớp thứ hai được thỏa mãn yêu cầu 1 (bit/s/Hz) khi sử dụng kỹ thuật QoS-Assurance. Vì vậy mọi lưu lượng khi sử dụng kỹ thuật QoS-Assurance đều là lưu lượng hữu ích. Điều đó cho thấy kỹ thuật MR cung cấp tốc độ tổng lớn nhất nhưng kỹ thuật QoS-Assurance có lưu lượng hữu ích cao hơn, cải thiện được độ công bằng giữa các lớp dịch vụ, và đặc biệt là đảm bảo được các tốc độ tối thiểu khác nhau của thuê bao.



Hình 3.2 So sánh lưu lượng hữu ích giữa hai kỹ thuật

3. Kết luận chương

Trong chương này, luận án đề xuất kỹ thuật lập lịch cho phép thuê bao có thể đạt được tốc độ tối thiểu tùy ý, và trạm gốc có thể phục vụ các thuê bao có tốc độ tối thiểu khác nhau trong cùng một chu kỳ khung. Đây là điểm mới so với các kỹ thuật lập lịch khác chỉ có thể phục vụ một tốc độ tối thiểu duy nhất. Thực nghiệm cho thấy bằng cách thay đổi công suất của từng thuê bao kỹ thuật có thể đảm bảo tốc độ tối thiểu cho thuê bao mà hoàn toàn không phụ thuộc vào tốc độ của các thuê bao khác. Và thực nghiệm cũng cho thấy để phục vụ các thuê bao yêu cầu tốc độ tối thiểu cao sẽ làm giảm dung lượng hệ thống. Nếu giảm dần sự khác nhau về độ ưu tiên thì thuật toán của hệ thống sẽ tiến tới dung lượng của thuật toán tối đa hóa tốc độ hệ thống. Hạn chế của kỹ thuật đề xuất là dung lượng tổng của hệ thống vẫn kém hơn so với kỹ thuật lập lịch MR.

Chương 4. Kỹ thuật lập lịch cho hệ thống ăng ten bước sóng mm sử dụng các bộ ADC phân giải thấp

Trong chương này luận án sẽ trình bày mô hình hệ thống ăng ten cỡ rất lớn bước sóng mm, mô hình lượng tử hóa, phương pháp tiền mã hóa hai giai đoạn và tốc độ có thể đạt được. Từ đó đề xuất kỹ thuật lập lịch sử dụng hệ số trực giao của kênh truyền giữa các thuê bao để lựa chọn thuê bao một cách nhanh và tối ưu hơn. Đây là điểm khác biệt so với kỹ thuật lập lịch truyền thống như MR phải sử dụng thuật toán vét cạn.

1. Kỹ thuật đề xuất

Luận án đề xuất một kỹ thuật lập lịch (NOUS) bao gồm năm bước: đầu tiên trạm gốc BS đặt toàn bộ thuê bao vào tập ứng cử viên \mathcal{C}_1 và khởi tạo một tập rỗng \mathbb{K}_s cho tập thuê bao được lựa chọn, mỗi vòng lặp thứ i trạm gốc BS sẽ tìm thuê bao tốt nhất thứ i trong tập ứng cử viên \mathcal{C}_i để phục vụ sao cho tối đa hóa tốc độ tổng và loại bỏ thuê bao được lựa chọn trong tập ứng cử viên \mathcal{C}_i tại bước 2. Ở bước 3, kỹ thuật tính thành phần trực giao $\mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(i)}$ của thuê bao thứ i mới được lựa chọn đối với tập cơ sở $\{\mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(1)}, \dots, \mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(i-1)}\}$. Tại bước 4, kỹ thuật sẽ loại bỏ các thuê bao trong tập ứng cử viên không thỏa mãn điều kiện trực giao với thuê bao mới được lựa chọn $\mathbb{K}_s(i)$ và cuối cùng kỹ thuật sẽ quay lại bước 2 trừ khi kỹ thuật đã lựa chọn đủ thuê bao hoặc không tìm thấy ứng cử viên nào phù hợp. Kỹ thuật đề xuất được trình bày như sau:

Algorithm 4 Kỹ thuật lập lịch bán trực giao NOUS

- 1: Trạm gốc BS khởi tạo $\mathcal{C}_1 = \{1, 2, \dots, \mathbb{K}_a\}$, $\mathbb{K}_s = \emptyset$, $i = 1$
- 2: Sử dụng tốc độ tổng trong 4.17, trạm gốc BS lựa chọn thuê bao thứ i như sau:

$$\mathbb{K}_s(i) = \underset{k \in \mathcal{C}_i}{\operatorname{argmax}} \mathcal{R}([\bar{\mathbf{H}}(\mathbb{K}_s), \bar{\mathbf{h}}_k])$$
 và cập nhật $\mathbb{K}_s = \mathbb{K}_s \cup \mathbb{K}_s(i)$, $\mathcal{C}_i = \mathcal{C}_i \setminus \mathbb{K}_s(i)$
- 3: Tính toán thành phần trực giao của $\bar{\mathbf{h}}_{\mathbb{K}_s(i)}$ đối với tập cơ sở $\{\mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(1)}, \dots, \mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(i-1)}\}$

$$\mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(i)} = \bar{\mathbf{h}}_{\mathbb{K}_s(i)} \left(\mathbf{I} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(j)}^H \mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(j)}}{\|\mathbf{g}_{\mathbb{K}_s(j)}\|^2} \right)$$
- 4: Lựa chọn các thuê bao còn lại đáp ứng được yêu cầu trực giao với thuê bao $\mathcal{S}(i)$

$$\mathcal{C}_{i+1} = \{k \in \mathcal{C}_i \mid \frac{|\bar{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{g}_{\mathcal{S}(i)}|}{\|\bar{\mathbf{h}}_k\| \|\mathbf{g}_{\mathcal{S}(i)}\|} \leq \xi\} \quad (4.19)$$

- 5: Nếu $i < M_S$ và $\mathcal{C}_{i+1} \neq \emptyset$, cập nhật $i = i + 1$. Ngược lại, kỹ thuật kết thúc.
-

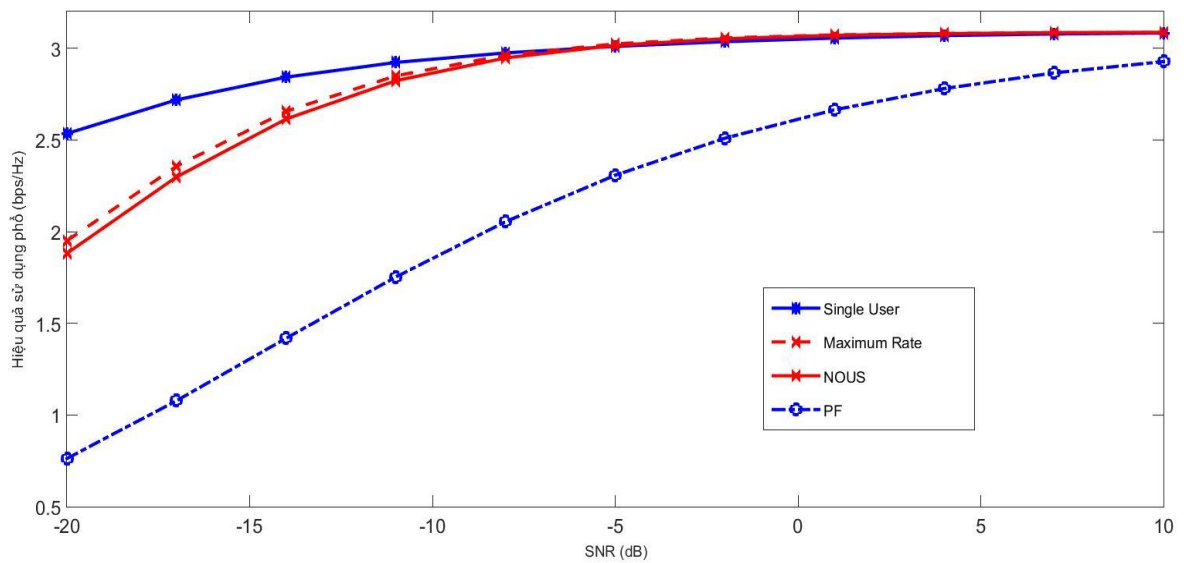
2. Kết quả mô phỏng

Để đo lường hiệu quả của kỹ thuật NOUS, một số tình huống mô phỏng đã được nghiên cứu dựa trên hệ thống mmWave bằng phần mềm Matlab để so sánh các kỹ thuật lập lịch sau:

- NOUS.

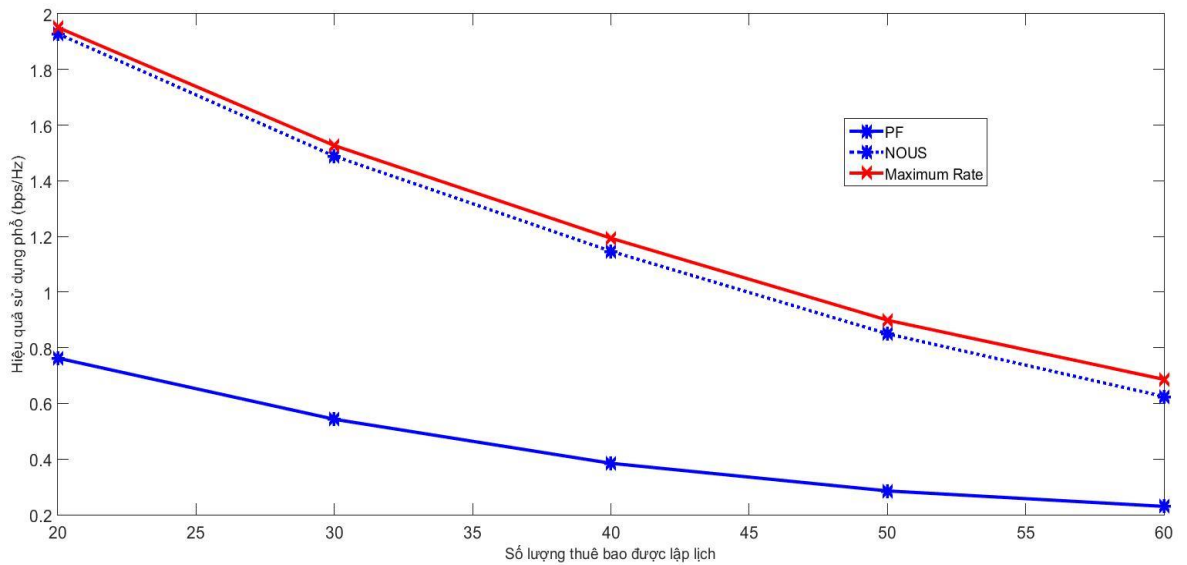
- MR.
- PF.
- Một thuê bao.

Trong hình 4.1 luận án so sánh hiệu quả sử dụng phổ theo tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu SINR. Luận án xem xét với $M_{BS} = 256$ ăng ten ở trạm gốc, $M_{MS} = 16$ ăng ten tại thuê bao, $M_s = 20$ thuê bao sẽ được lựa chọn để phục vụ, $\mathbb{K}_a = 160$ thuê bao trong tế bào, số bit ADC là $b=2$ (bit) và SINR tăng từ -20 đến 10 dB. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng cả hai kỹ thuật NOUS và MR có thể tiệm cận hiệu quả sử dụng phổ của trường hợp một thuê bao khi SINR có giá trị rất lớn. Hiệu quả sử dụng phổ của kỹ thuật NOUS gần như xấp xỉ với kết quả của kỹ thuật MR với thời gian tìm kiếm ngắn hơn. Kỹ thuật toán PF tập trung vào độ công bằng giữa các thuê bao nên không thể có hiệu quả sử dụng phổ cao. Khoảng cách giữa các kỹ thuật giảm xuống khi SINR tăng lên vì sai số của quá trình lượng tử hóa sẽ giảm đi khi SINR ở miền giá trị cao. Kỹ thuật được đề xuất NOUS có thể hoạt động tốt ngay cả miền SINR nhỏ vì sai số lượng tử tăng lên làm giảm độ trực giao của kênh truyền.



Hình 5.1 Hiệu quả sử dụng phổ theo SINR

Ở hình 5.2, luận án xem xét trường hợp số lượng thuê bao được phục vụ K_s tăng từ 20 lên 60 thuê bao, $\mathbb{K}_a = 160$ và $\rho = 3$ dB. Nó chỉ ra rằng nếu trạm gốc BS phục vụ nhiều thuê bao hơn thì hiệu quả sử dụng phổ của mỗi thuê bao sẽ giảm xuống vì công suất nhận được của mỗi thuê bao bị giảm xuống. Hơn nữa, càng khó tìm thấy nhiều thuê bao trực giao vì chúng ta đã giữ tổng số thuê bao \mathbb{K}_a không đổi trong khi lại tăng số thuê bao được phục vụ vì thế hiệu quả sử dụng phổ của NOUS sẽ giảm xuống một chút so với MR.



Hình 5.2 Hiệu quả sử dụng phổ theo K_s

3. Kết luận chương

Trong chương này, luận án đã đề xuất kỹ thuật lập lịch dựa trên mức độ trực giao của kênh truyền giữa các thuê bao. Từ đó có thể giảm thiểu thời gian xác định tập thuê bao tối ưu trong khi vẫn hướng đến mục tiêu tối đa hóa dung lượng hệ thống. Thực nghiệm cho thấy thuật toán đề xuất có hiệu quả sử dụng phổ tiệm cận với thuật toán MR và đánh bại được thuật toán PF trong cả hai trường hợp xét ảnh hưởng của bộ ADC phân giải thấp và trường hợp coi như bộ ADC là hoàn hảo (No-ADC). Và thực nghiệm cũng cho thấy nếu như số thuê bao phục vụ trong hệ thống tăng lên thì khả năng tìm thấy tập thuê bao bán trực giao sẽ giảm xuống làm giảm hiệu quả sử dụng phổ so với kỹ thuật MR.

KẾT LUẬN

Luận án đã tiến hành nghiên cứu những kiến thức nền tảng của lớp vật lý của hệ thống thông tin di động 5G như kỹ thuật ước lượng kênh, tiền mã hóa và các kỹ thuật lập lịch hiện có. Từ đó xác định những yếu tố ảnh hưởng mới và then chốt của mạng 5G so với các kỹ thuật lập lịch hiện có. Từ đó, luận án đã đề xuất các kỹ thuật lập lịch nhằm đảm bảo chất lượng cho các thuê bao sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền, kỹ thuật lập lịch cho phép thuê bao có thể có nhiều tốc độ tối thiểu khác nhau trong cùng một chu kỳ khung và kỹ thuật lập lịch dựa trên xác định tập thuê bao trực giao. Tóm tắt những đóng góp của luận án cũng như đề xuất một số hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai được tác giả trình bày dưới đây.

Kết quả của luận án

- Đề xuất kỹ thuật lập lịch đảm bảo chất lượng kênh truyền cho thuê bao sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền nhằm đối phó sự biến thiên của kênh truyền trong thực tế
Luận án đã tính toán tốc độ mà thuê bao có thể đạt được khi sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền cũng như thuật toán kiểm tra khi thêm vào các thuê bao được phục vụ nhằm đảm bảo rằng việc phục vụ các thuê bao sử dụng thông tin lão hóa kênh truyền không làm ảnh hưởng tới chất lượng của các thuê bao khác trong hệ thống.
- Kỹ thuật lập lịch đảm bảo đa tốc độ tối thiểu cho thuê bao
Luận án đã tính toán công suất tối ưu cho từng thuê bao cho phù hợp với yêu cầu về tốc độ tối thiểu của thuê bao. Kỹ thuật cũng đã sử dụng thông tin về độ ưu tiên của lưu lượng khi phục vụ thuê bao để đảm bảo rằng lưu lượng có độ ưu tiên cao hơn sẽ được phục vụ trước các lưu lượng có độ ưu tiên thấp hơn. Đây là điểm mới so với các nghiên cứu trước đây tập trung về độ trễ của lưu lượng.
- Kỹ thuật lập lịch cho hệ thống mmWave sử dụng bộ ADC phân giải thấp
Luận án đã nghiên cứu hệ thống mmWave sử dụng bộ ADC phân giải thấp và tính toán tốc độ của từng thuê bao và cả hệ thống có thể đạt được. Từ đó luận án đã xây dựng điều kiện bán trực giao về kênh truyền giữa các thuê bao của hệ thống mmWave sử dụng bộ ADC phân giải thấp. Điều này giúp giải thiểu thời gian tìm ra tập thuê bao phục vụ tối ưu so với các kỹ thuật truyền thống trước đây như MR hay PF.