

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ, THẢO LUẬN

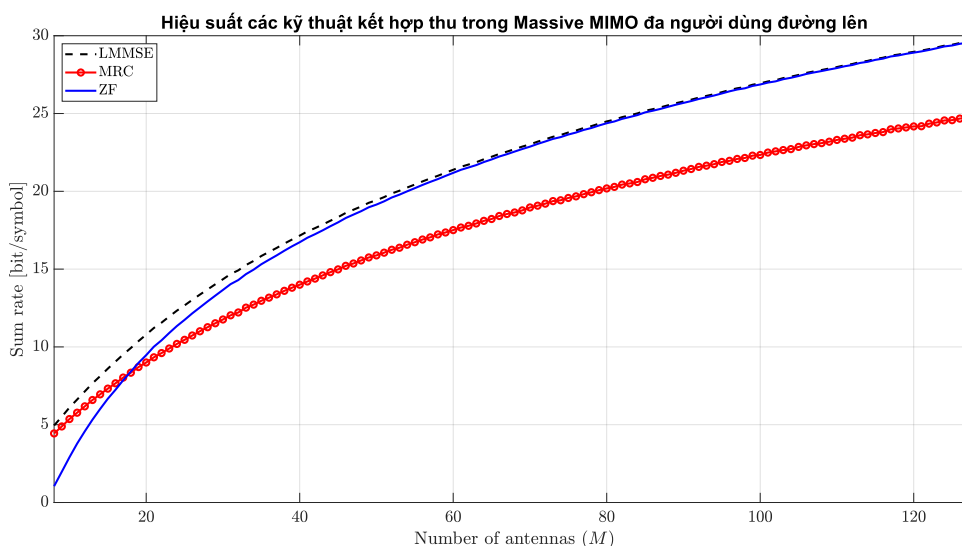
Chương này sẽ đi sâu vào các kết quả đạt được từ việc mô phỏng, phân tích và nhận xét các kết quả này dựa trên lý thuyết thực tiễn ở chương 2 và 3. Thảo luận và tổng kết ưu và nhược điểm, điều kiện hoạt động tối ưu đối với từng kỹ thuật xử lý tuyến tính.

4.1 MỤC TIÊU MÔ PHỎNG

Với đề tài của khóa luận nghiên cứu này cùng với mục tiêu của mô phỏng đã được xác định rõ ràng ở chương 3. Với chương này, chúng ta sẽ đi vào phân tích, nhận xét các kết quả đạt được ở mô phỏng so với các tiêu chí đánh giá. Nhưng trước khi đi vào phần chính, chúng ta sẽ sơ lược nhanh lại các kịch bản mà chúng ta mô phỏng. Đầu tiên, chúng ta sẽ mô phỏng hiệu suất của các kỹ thuật kết hợp như MRC, ZF, LMMSE cho từng người dùng với mức phân bổ công suất đều ở Massive MIMO đa người dùng đường lên. Tiếp theo, ở đường xuống cũng tương tự như đường lên, tuy nhiên sẽ sử dụng các kỹ thuật tiền xử lý như LMMSE, RZF, ZF và MRT. Trong ZF, sẽ khảo sát 2 trường hợp khi phân bổ công suất đều và tối ưu sử dụng vào thuật toán Water-filling.

4.2 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG MASSIVE MIMO ĐA NGƯỜI DÙNG ĐƯỜNG LÊN

4.2.1 Ảnh hưởng của số lượng anten đến hiệu suất các kỹ thuật kết hợp



Hình 4.1: Hiệu suất các kỹ thuật kết hợp thu với sự thay đổi số lượng anten

Biểu đồ ở Hình 4.1 biểu thị hiệu suất của từng kỹ thuật xử lý tuyến tính được sử dụng ở hệ thống Massive MIMO đường lên ở mức SNR thấp (-10dB), theo sự thay đổi về số lượng anten. Đồ đồ biểu thị tổng tốc độ (Sum Rate) của K người dùng khi sử dụng

lần lượt các kỹ thuật kết hợp thu tuyến tính (receive linear combining) như: LMMSE (đường màu đen nét đứt), MRC (đường màu đỏ chấm tròn) và ZF (đường màu xanh dương liền thẳng), theo trục hoành là các giá trị M anten và trục tung chính là các giá trị hiệu suất về mặt dung lượng tương ứng với các giá trị M anten.

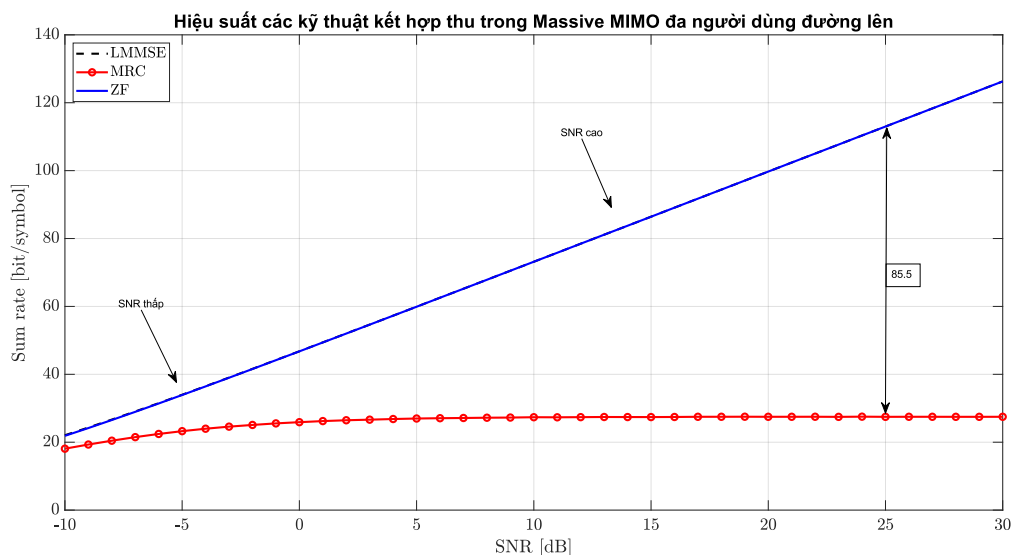
Nhận định ban đầu về biểu đồ này chính là khi tăng giá trị M anten lên thì kéo theo hiệu suất tức tổng tốc độ tăng lên. Nhận định này rút ra được khi quan sát biểu đồ, các đường biểu diễn đều có xung hướng đi lên mạnh mẽ khi M tăng. Điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết MIMO đặc biệt là Massive MIMO, được đề cập trong tài liệu [1]. Ở mức SNR thấp (-10dB), khi thay đổi giá trị M anten thì thấy rõ sự khác biệt về hiệu suất giữa các kỹ thuật với nhau. Điều này được diễn giải cụ thể như sau: Khi số anten M nhỏ (từ 8 đến 20), khi mới bắt đầu mô phỏng ($M = 8$), kỹ thuật LMMSE cho hiệu suất cao nhất (5 bit/symbol) so với MRC (4.5 bit/symbol) và ZF rất thấp (1 bit/symbol). Bởi vì LMMSE là kỹ thuật kết hợp thu có hiệu suất tối ưu nhất trong các kỹ thuật tuyến tính còn lại, nó cân bằng giữa việc triệt tiêu nhiễu liên người dùng và giảm thiểu tác động của nhiễu trắng (AWGN). Điều này, xuất phát từ công thức (19) của bộ kết hợp LMMSE, vector kết hợp này tối thiểu hóa sai số bình phương trung bình (MSE) $\mathbb{E}\{|x_k - \hat{x}_k|^2\}$ giữa tín hiệu nhận và tín hiệu ước lượng dựa vào cả ma trận kênh và ma trận hiệp phương sai của nhiễu. Khi $M \gg K$ (64 đến 128 anten), ảnh hưởng của nhiễu trắng giảm đi, LMMSE sẽ tiệm cận với hiệu suất của ZF. Đối với những giá trị M anten này thì hiệu suất của kỹ thuật này vẫn tăng ổn định từ 22 bit/symbol đến gần 30 symbol.

Đối với kỹ thuật kết hợp thu ZF, hiệu suất của kỹ thuật gần như tối ưu so với LMMSE khi số lượng anten M rất lớn (64 đến 128). Bởi vì kỹ thuật này hoạt động bằng cách tạo ra các bộ lọc không gian để triệt tiêu hoàn toàn nhiễu từ các người dùng khác. Điều kiện tiên quyết là số anten tại trạm gốc phải lớn hơn hoặc bằng số người dùng ($M \geq K$). Khi $M = 8 = K$ thì ZF mới có đủ bậc tự do để triệt tiêu nhiễu, do vậy hiệu suất ở thời điểm này tương đối thấp (1 bit/symbol). Tuy nhiên, thế mạnh của kỹ thuật này chính là việc triệt tiêu nhiễu hoàn toàn cũng có thể làm tăng cường nhiễu trắng (noise enhancement). Khi M tăng lên đáng kể so với K , ảnh hưởng của nhiễu trắng trở nên ít đáng kể hơn so với lợi ích từ việc triệt tiêu nhiễu, do vậy hiệu suất ZF (22 bit/symbol) tiệm cận với LMMSE.

Cuối cùng, hiệu suất của MRC là thấp nhất so với hai kỹ thuật còn lại. Hiệu suất của MRC là thấp nhất trong số các bộ thu được khảo sát. Mặc dù hiệu suất về mặt tốc độ có tăng khi M anten tăng, nhưng sự tăng trưởng này (từ 4.5 bit/symbol đến 25 bit/symbol) không nhanh bằng ZF và LMMSE, khoảng cách giữa hiệu suất giữa MRC với các kỹ thuật khác ngày càng lớn lên đến 5, khi số lượng anten tăng (64 đến 128). Lý giải cho điều này chính là kỹ thuật kết hợp thu MRC hoạt động bằng cách kết hợp tín hiệu từ tất cả các anten để tối đa hóa công suất tín hiệu mong muốn của người dùng mong muốn. Tuy nhiên, MRC không quan tâm đến việc triệt tiêu nhiễu liên người dùng khác, do vậy khi M anten tăng thì công suất tín hiệu mong muốn tăng nhưng kéo theo công suất nhiễu từ những người dùng khác cũng tăng theo. Với bản chất MRC không thể giảm thiểu hiệu quả tác động của nhiễu, nên làm cho hiệu suất về mặt tổng thể của nó bị giới hạn nhiều so với ZF hay LMMSE vốn có khả năng triệt nhiễu tốt hơn.

4.2.2 Ảnh hưởng của SNR đối với hiệu suất các kỹ thuật kết hợp thu

Biểu đồ Hình 4.2 biểu diễn hiệu suất các kỹ thuật kết hợp trong hệ thống Massive MIMO đường lên với số lượng 64 anten, theo sự thay đổi mức SNR khác nhau từ -10dB đến 30dB. Biểu đồ bao gồm ba đường biểu diễn tổng tốc độ K người dùng khi sử dụng lần lượt ba kỹ thuật: LMMSE (đường màu đen nét đứt), MRC (đường màu đỏ chấm tròn) và ZF (đường thẳng màu xanh dương). Ba đường trên được biểu diễn theo tổng tốc độ (sum rate) (trục tung) và SNR (trục hoành).



Hình 4.2: Hiệu suất các kỹ thuật kết hợp thu với sự thay đổi SNR

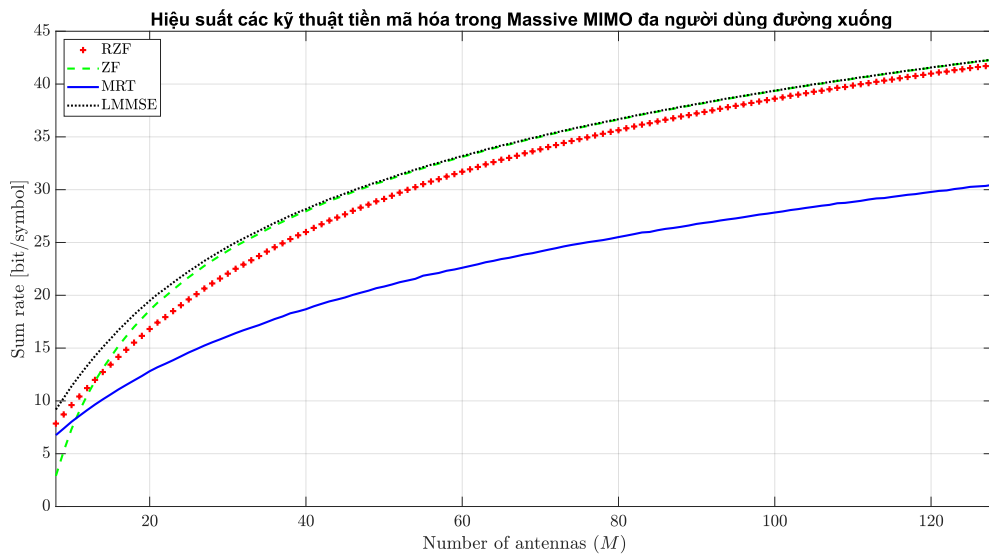
Một cách trực quan thì LMMSE cho hiệu suất ổn định hơn các kỹ thuật còn lại, bởi vì đường màu đen nét đứt có xu hướng tăng gần như tuyến tính với các mức SNR (từ -10dB đến 15dB). Ở mức SNR thấp (-10dB), LMMSE và MRC có hiệu suất gần tương đương nhau (22 bit/symbol), lớn hơn so với hiệu suất của ZF (18 bit/symbol). Giải thích cho điều này chính là ở mức SNR thấp, hiệu suất hệ thống bị giới hạn đáng kể bởi sự gia tăng của nhiễu nền (noise-enhancement). Do vậy, hiệu suất của ZF bị giảm đi nhiều bởi ZF chỉ triệt tiêu nhiễu liên người dùng rất tốt, tuy nhiên nó lại làm khuếch đại nhiễu mức nền lên. Điều này được giải thích thông qua công thức (29), chúng ta thấy rằng ZF nghịch đảo công suất nhiễu nền (N_0), khi mức công suất này tăng thì SINR thấp xuống, kéo theo hiệu suất tức tổng tốc độ (sum rate) của người dùng giảm. Tuy nhiên, ở mức SNR trung bình (6dB) thì hiệu suất ZF lại tăng lên so với MRC (27 bit/symbol), điều này cho thấy rằng khi mức SNR tăng lên đồng nghĩa với việc nhiễu liên người dùng cao hơn so với nhiễu nền, dẫn đến lợi thế của ZF được phát huy và kéo theo hiệu suất tăng lên. Khi ở mức SNR cao kết hợp với số anten lớn hơn nhiều so với số người dùng, hiệu suất ZF được nâng cao và tiệm cận với LMMSE (126 bit/symbol ở 30dB).

Còn đối với LMMSE và MRC, dựa vào lý thuyết chương 2 biết rằng bản chất LMMSE chính là kỹ thuật cân bằng giữa việc khuếch đại tín hiệu mong muốn và triệt tiêu nhiễu, hoạt động hiệu quả ở các mức SNR. Đây chính là lý giải cho điều trên rằng tại sao ở mức SNR thấp thì LMMSE lại có mức công suất cao tương đối (22 bit/symbol). Bên cạnh đó, ta thấy được ở mức SNR thấp thì hiệu suất LMMSE tiệm cận với MRC, còn ở mức SNR cao thì tiệm cận với ZF. Cuối cùng, MRC lúc ban đầu ở mức SNR thấp thì cho mức hiệu suất tương đối ổn định. Tuy nhiên, càng về sau với mức SNR tăng, cho thấy được sự tăng chậm từ 18 bit/symbol ở mức SNR = -10dB đến 26.5 bit/symbol ở mức 2dB. Và khi mức SNR cao (10dB) trở đi, hiệu suất của MRC dần trở nên bão hòa (27.5 bit/symbol). Lý giải cho điều này chính là MRC là kỹ thuật chỉ khuếch đại tín hiệu mong muốn nhưng lại không quan tâm đến việc triệt tiêu nhiễu từ những người dùng khác, dẫn đến khi SNR tăng dẫn đến nhiễu vẫn còn tồn đọng không được xử lý. Bên cạnh đó, mức công suất bị giới hạn ở đường lên, khiến cho lợi ích từ MRC không phát huy được trong khi nhược điểm của nó lại chính điểm then chốt để cải thiện hiệu suất thì lại không được khắc phục.

Một điều nữa được rút ra ở chính là ở mức SNR trung bình (5dB) trở đi, khoảng cách giữa LMMSE và ZF so với kỹ thuật còn lại bắt đầu lớn, đặc biệt khi giá trị SNR cao, khoảng cách này lên đến 85.5 so với MRC. Mặc khác, khi tăng số lượng anten lên thì hiệu suất của ZF dường như tiệm cận hoàn toàn với LMMSE toàn dải SNR và tất nhiên là hiệu suất của ba kỹ thuật này sẽ thường tỷ lệ thuận với số anten (đã đề cập ở phần trước).

4.3 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG MASSIVE MIMO ĐA NGƯỜI DÙNG ĐƯỜNG XUỐNG

4.3.1 Ảnh hưởng của số lượng anten đến hiệu suất các kỹ thuật tiền mã hóa



Hình 4.3: Hiệu suất các kỹ thuật tiền mã hóa với sự thay đổi số lượng anten

Biểu đồ trong Hình 4.3 mô tả các hiệu suất các kỹ thuật xử lý tiền mã hóa tuyến tính trong hệ thống Massive MIMO đa người dùng đường xuống ở mức SNR = -5dB. Biểu đồ biểu thị 4 đường tương ứng lần lượt 4 kỹ thuật tiền mã hóa cần khảo sát, đường dấu cộng màu đỏ (RZF), đường màu xanh lá nét đứt (ZF), đường màu xanh dương (MRT), đường chấm đen (LMMSE). Các đường này biểu diễn hiệu suất về mặt tổng tốc độ đạt được của K người dùng khi sử dụng từng kỹ thuật tiền mã hóa (trục tung) theo số lượng anten được thay đổi (trục hoành).

Dựa vào biểu đồ trên, có thể dễ dàng thấy được hiệu suất của kỹ thuật có sự khác biệt đáng kể. Kỹ thuật MRT nhìn chung cho kết quả thấp nhất trong toàn bộ miền khảo sát. Tại $M = 8$, hiệu của MRT chỉ đạt xấp xỉ 7 bit/symbol, khi tăng số M anten lên, hiệu suất của MRT tăng nhưng tương đối, không vượt trội so với các kỹ thuật còn lại. Điều này là do MRT chỉ tối đa hóa công suất tín hiệu mong muốn mà không triệt tiêu nhiễu

xuyên người dùng, tuy nhiên, khi M anten tăng đủ lớn so với số lượng người dùng như trong Massive MIMO, sẽ xuất hiện lợi ích về truyền dẫn thuận lợi (favorable propagation), dẫn đến MRT dù không thể triệt tiêu hoàn toàn nhiễu liên người dùng nhưng về mặt hiệu suất tổng thể vẫn tăng lên. Tuy vậy, về bản chất việc xử lý triệt để hoặc cân bằng nhiễu vẫn là một trong những yếu tố then chốt giúp cho hiệu suất được nâng cao và ổn định hơn về dài hạn. Ví dụ, trong biểu đồ Hình 4.3, MRC có hiệu suất vẫn tăng nhưng có thể thấy khoảng cách khác biệt so với những kỹ thuật khác ở số anten lớn (ở mức $M = 128$, khoảng cách này lên đến 12).

Đối với kỹ thuật ZF (đường màu xanh lá) cho hiệu suất rất thấp khi $M < 16$ do nghịch đảo ma trận kênh gây khuếch đại nhiễu nền. Đặc biệt, khi $M = K$, tỷ lệ anten trên số người dùng ($M/K = 1$), hiệu suất của ZF tương đối thấp (2.3 bit/symbol). Điều này được giải thích là ZF thật sự hoạt động khi số anten bằng hoặc lớn hơn số lượng người dùng, khi này ZF mới có đủ bậc tự do để xử lý nhiễu liên người dùng. Tuy nhiên, khi số anten vượt ngưỡng này, hiệu suất tăng mạnh và đạt 42.3 bit/symbol tại $M = 128$, tiệm cận với LMMSE. Còn kỹ thuật RZF (đường màu đỏ) đạt hiệu suất ổn định và cao hơn so với ZF trong vùng $M = 8$ đến $M = 14$. Ví dụ, tại $M = 8$ thì RZF đạt khoảng 7.8 bit/symbol, cao hơn hẳn so với hiệu suất ZF khoảng 5.5 bit/symbol. Từ đây, có thể thấy được với những số lượng anten thấp, trong khi ZF mới bắt đầu hoạt động và cho hiệu suất cực kỳ thấp thì RZF (một phiên bản cải tiến so với ZF với hệ số điều chuẩn), lại cho hiệu suất cải thiện hơn nhiều. Tuy nhiên, Khi tăng M anten lên đủ và hệ thống ở mức SNR cao thì hiệu suất RZF tiệm cận với ZF và LMMSE. Điều này, cho thấy được một mối quan hệ rõ ràng về RZF so với hai kỹ thuật ZF và LMMSE.

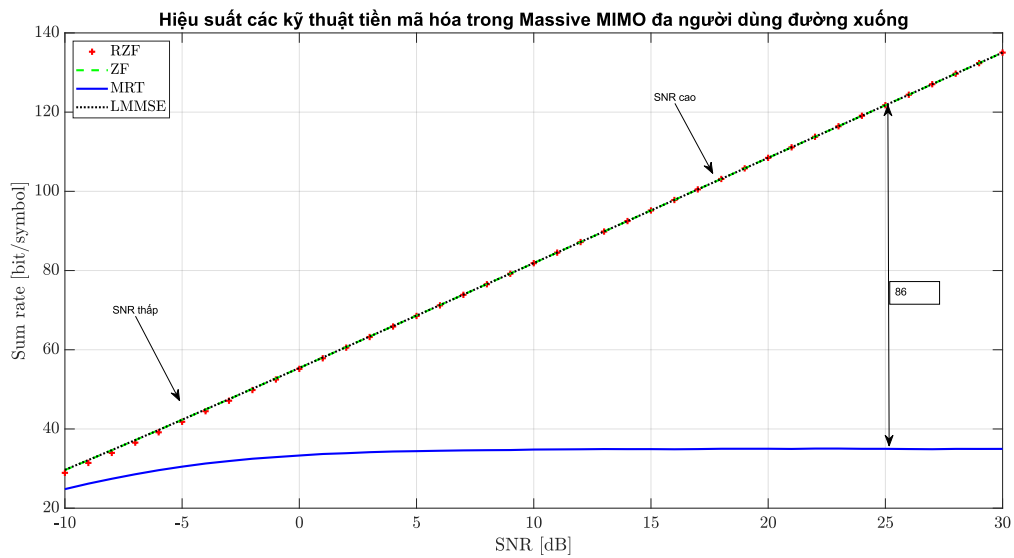
Cuối cùng, kỹ thuật LMMSE (đường chấm đen) luôn nằm trong nhóm có hiệu suất cao nhất trong cả kịch bản đường lên hay đường xuống của Massive MIMO đa người dùng dù ở mức SNR thấp hay cao. Từ $M = 24$ trở đi, LMMSE gần như tiệm cận với RZF và ZF ở mức tối đa khoảng 75 bit/symbol. Điều này cho thấy khả năng cân bằng đồng thời cả việc xử lý nhiễu liên người dùng và khuếch đại tín hiệu mong muốn của LMMSE là vượt trội, đặc biệt khi SNR cao (10dB).

Tổng thể, khi số lượng anten tăng lên, tất cả các kỹ thuật đều có xu hướng tăng hiệu suất do hiện tượng truyền dẫn thuận lợi (favorable propagation) và tăng độ phân giải không gian. Tuy nhiên, MRT bị giới hạn bởi nhiễu liên người dùng, ZF thì cần một

số lượng anten đủ lớn để tránh khuếch đại nhiễu. Trong khi đó, RZF và LMMSE cho hiệu suất tối ưu và ổn định hơn trong hầu hết các điều kiện.

4.3.2 Ảnh hưởng của SNR đến hiệu suất các kỹ thuật tiền mã hóa

Biểu đồ Hình 4.4 mô tả hiệu suất các kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính theo sự thay đổi SNR trong Massive MIMO đa người dùng đường xuống với 128 anten, bao gồm 4 đường biểu thị hiệu suất các kỹ thuật RZF (đường dấu cộng đỏ), MRT (đường màu xanh dương), RZ (đường màu xanh lá nét đứt) và LMMSE (đường chấm đen) theo tổng tốc độ dữ liệu (sum rate) (trục tung) với mỗi mức SNR (trục hoành).



Hình 4.4: Hiệu suất các kỹ thuật tiền mã hóa với sự thay đổi SNR

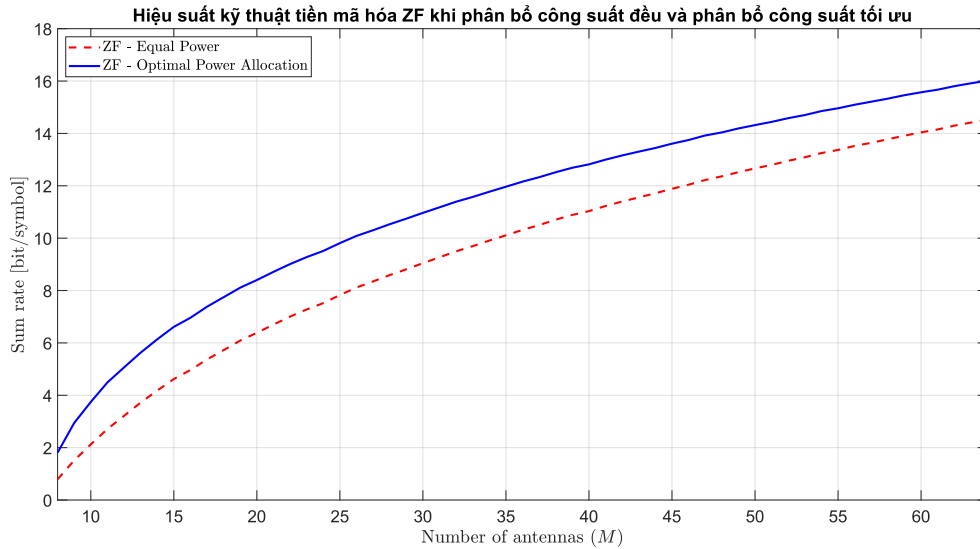
Từ biểu đồ Hình 4.4 cho thấy hiệu suất của các kỹ thuật có xu hướng tăng lên khi tăng giá trị SNR lên. Ở số anten $M=128$, đây là mức anten tương đối lớn đảm bảo điều kiện hoạt động tối ưu cho các kỹ thuật xử lý tuyến tính, cho thấy rằng với mức SNR thấp (-10dB), các kỹ thuật ZF, LMMSE, RZF tiệm cận với nhau và cho hiệu suất khoảng gần 30 bit/symbol còn MRT với hiệu suất tương đối thấp gần 25 bit/symbol. Khi tăng mức SNR lên kết hợp với số lượng anten tương đối lớn, các kỹ thuật ZF, LMMSE, RZF không có gì khác biệt, hiệu suất nhìn chung tăng tuyến tính với mức tăng SNR, từ khoảng 30 bit/symbol ở mức SNR = -10dB cho đến 135 bit/symbol ở mức SNR = 30dB. Tuy nhiên đối với kỹ thuật tiền mã hóa MRT ở mức SNR trung bình đến cao (3dB đến 30dB) thì hiệu suất gần như bão hòa (35 bit/symbol), điều này dẫn đến một khoảng cách rất lớn giữa MRT so với các kỹ thuật còn lại, ví dụ ở mức SNR = 25dB thì khoảng cách này lên đến 86.

Tổng kết lại ở Massive MIMO đa người dùng đường xuống, khi tăng mức SNR của hệ thống lên, kết quả đạt được về bản chất tương tự như việc số lượng anten tại trạm gốc lên. Trong đó, LMMSE vẫn là một kỹ thuật được đánh giá cao về mặt hiệu suất với mọi mức SNR. Các kỹ thuật khác như RZF, ZF về mặt hiệu suất có thể tiệm cận LMMSE ở một số điều kiện cụ thể, nhưng xét về mặt ổn định vẫn kém hơn LMMSE. Còn MRT với bản chất chỉ khuếch đại tín hiệu mong muốn mà bỏ qua việc xử lý nhiễu nên khi tăng mức SNR hoặc số lượng anten lên thì vẫn cho hiệu suất trung bình, không được đánh giá cao.

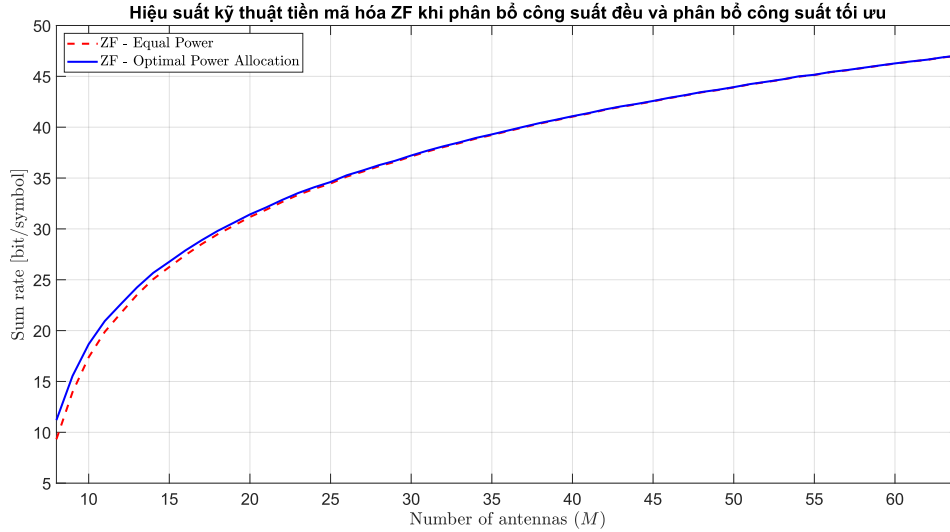
4.3.3 Ảnh hưởng của phân bổ công suất đến hiệu suất kỹ thuật tiền mã hóa ZF

4.3.3.1 Hiệu suất kỹ thuật tiền mã hóa ZF với sự thay đổi số lượng anten

Trong phần mô phỏng này, sẽ thực hiện khảo sát hiệu suất của kỹ thuật tiền mã hóa Zero-Forcing (ZF) trong hệ thống Massive MIMO đường xuống, khi áp dụng hai chiến lược phân bổ công suất: phân bổ đều (equal power) và phân bổ tối ưu (optimal power allocation) dựa trên thuật toán water-filling. Mô phỏng được thực hiện trên mô hình kênh Rayleigh fading kết hợp với thành phần suy hao đường truyền (pathloss), với số lượng người dùng cố định là $K = 8$, số lượng anten tại trạm gốc thay đổi từ $M = 8$ đến $M = 64$, và hai mức SNR là -5dB và 10dB. Sau khi mô phỏng, kết quả đạt được như Hình 4.5 và Hình 4.6



Hình 4.5: Hiệu suất kỹ thuật tiền mã hóa ZF khi phân bổ công suất đều và tối ưu ở mức SNR = -5dB



Hình 4.6: Hiệu suất kỹ thuật tiền mã hóa ZF khi phân bổ công suất đều và tối ưu ở mức SNR = 10 dB

Hai biểu đồ tương ứng hai kết quả mô phỏng được ở hai mức SNR bao gồm mức thấp (SNR = -5dB) như Hình 4.5 và mức cao (SNR = 10dB) như Hình 4.6. Mỗi biểu đồ bao gồm hai đường biểu thị lần lượt hiệu suất kỹ thuật tiền mã hóa ZF với phân bổ công suất đều (đường nét đứt màu đỏ) và phân bổ công suất tối ưu sử dụng thuật toán Water-filling (đường nét liền màu xanh dương). Hiệu suất kỹ thuật được biểu diễn theo hai trục: Tổng tốc độ tính theo bit/symbol (trục tung) và số lượng anten (trục hoành).

Thông qua kết quả cho thấy rằng, tại mức SNR thấp (SNR = -5dB) trong Hình 4.5, kỹ thuật tiền mã hóa ZF với phân bổ công suất tối ưu giúp cải thiện rõ rệt hiệu suất so với phân bổ đều. Cụ thể, khi $M = 8$ ($M/K = 1$), tổng tốc độ đạt được với phân bổ tối ưu là khoảng 1.81 bit/symbol so với 0.79 bit/symbol khi sử dụng phân bổ đều, hiệu suất tăng gấp 2.29 lần (129%). Một ví dụ khác, khi số lượng anten $M = 32$ ($M/K = 4$), phân bổ công suất tối ưu cho tổng tốc độ khoảng 11.39 bit/symbol trong khi phân bổ đều chỉ đạt 9.49 bit/symbol, hiệu suất tăng khoảng 20%. Những sự chênh lệch này cho thấy được hiệu suất của kỹ thuật ZF được cải thiện đáng kể khi sử dụng chiến lược phân bổ công suất tối, đặc biệt quan trọng trong vùng SNR thấp, nơi mà việc phân bổ công suất tối ưu đến các người dùng dựa vào điều kiện kênh, giúp khai thác hiệu quả nguồn tài nguyên công suất phát.

Điều giải thích trên là phù hợp với nguyên lý của thuật toán water-filling. Thuật toán này ưu tiên phân bổ mức công suất nhiều hơn cho các người dùng có điều kiện

kênh truyền tốt (λ^{-1} nhỏ) và phân bổ mức công suất ít hoặc không phân bổ công suất cho những người dùng có điều kiện kênh kém (λ^{-1} lớn). Mục tiêu của thuật toán phân bổ công suất này hướng đến giải quyết bài toán tối đa hóa tổng tốc độ (Maximize Sum Rate). Trong mô hình kênh Rayleigh fading kết hợp thành phần suy hao đường truyền (pathloss). Mục tiêu của việc kết hợp này chính là tạo ra kênh truyền có tính không đồng nhất và nổi bật sự khác biệt về chất lượng kênh giữa người dùng với nhau, mỗi người dùng có thể trải qua mức độ suy hao khác nhau. Do đó, việc phân bổ công suất tối ưu giúp tối đa hóa hiệu suất của kỹ thuật ZF nói chung và các kỹ thuật khác nói riêng.

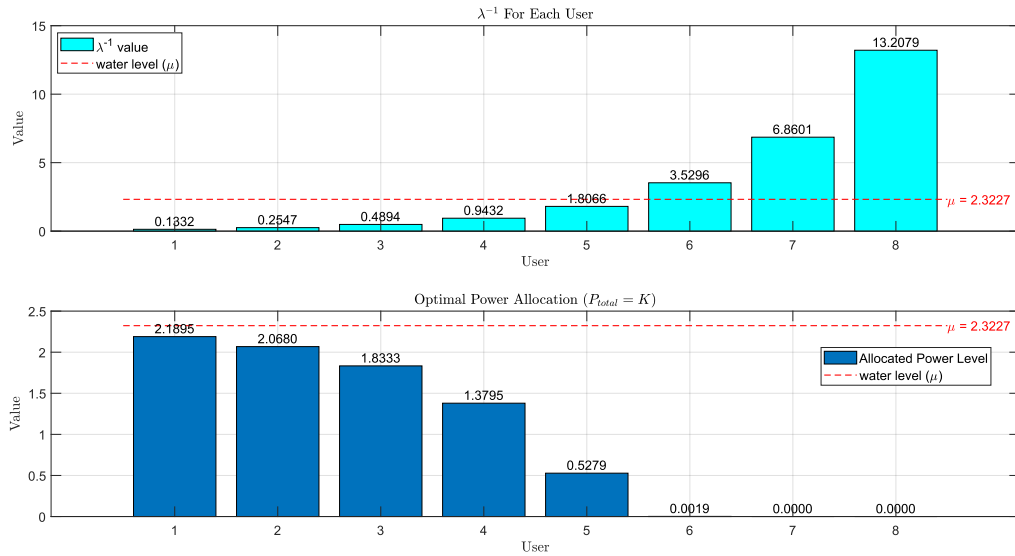
Tiếp theo, mô phỏng tiếp cận với trường hợp mức SNR cao (SNR=10 dB) như Hình 4.6, cho thấy rằng khoảng cách hiệu suất giữa hai chiến lược phân bổ công suất trở nên thu hẹp lại đáng kể. Ví dụ, tại $M = 8$, hiệu suất kỹ thuật ZF đạt được với phân bổ công suất tối ưu khoảng 11.19 bit/symbol, hiệu suất đạt được này tăng 20% so với phân bổ đều chỉ đạt 9.31 bit/symbol. Tuy nhiên, mức hiệu suất này so với trường hợp ở mức SNR thấp thì bị giảm đi rất nhiều, từ 129% xuống 20%. Một ví dụ khác, tại $M = 32$, hiệu suất kỹ thuật ZF đạt được với phân bổ công suất tối ưu là khoảng 38.12 bit/symbol, mức này chỉ lớn hơn một chút (tăng 0.21%) so với phân bổ đều (38.04 bit/symbol). Và khi M càng tăng lên đến 64 anten ($M/K = 8$), chênh lệch này trở nên không đáng kể. Lý do là ở SNR cao, nhiễu nền trở nên ít ảnh hưởng hơn so với nhiễu liên người dùng – vốn được ZF loại bỏ hoàn toàn, trong điều kiện lý tưởng, khi kênh đủ trực giao tức số anten lớn hơn rất nhiều lần so với số người dùng ($M \gg K$), hiệu suất của ZF gần như đạt ngưỡng bão hòa và không còn phụ thuộc đáng kể vào chiến lược phân bổ công suất. Điều này còn ngụ ý rằng, thuật toán water-filling trong việc phân bổ công suất tối ưu chỉ thực sự mang lại hiệu suất đáng kể khi ở mức SNR thấp hoặc số anten tương đối thấp ($M \leq 4K$ và đặc biệt là $M = K$), đối với kênh truyền có tính chất không đồng nhất. Ngoài ra, việc tăng số lượng anten M giúp hệ thống có thêm bậc tự do không gian, từ đó cải thiện trực giao giữa các luồng tín hiệu và giảm ảnh hưởng của fading. Điều này được phản ánh qua sự tăng liên tục của hiệu suất của ZF theo M trong cả hai trường hợp.

Tóm lại, kết quả mô phỏng cho thấy phân bổ công suất tối ưu bằng thuật toán water-filling mang lại lợi ích rõ ràng trong điều kiện SNR thấp hoặc hệ số kênh không đồng đều. Trong khi ở SNR cao, với sự gia tăng của số lượng anten tại trạm gốc thì

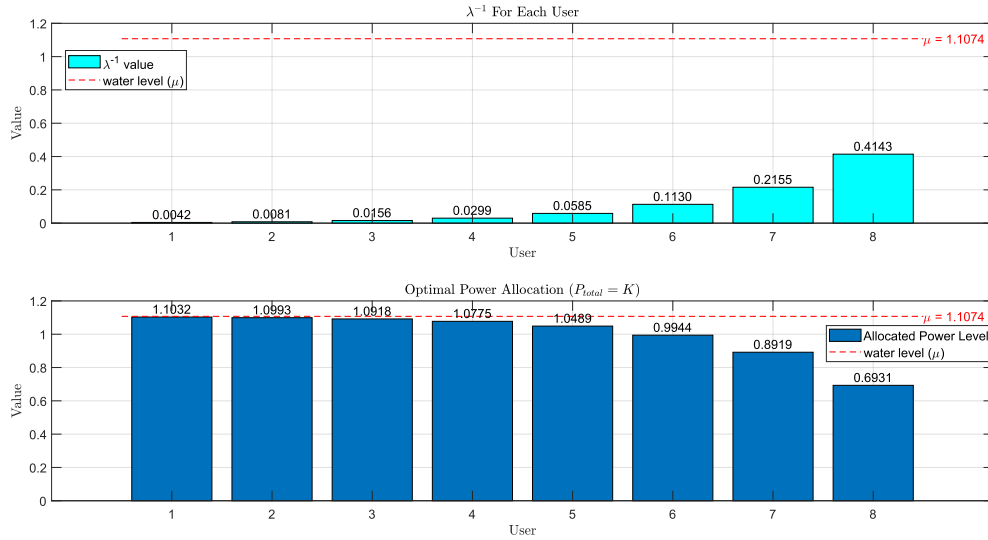
chiến lược phân bổ đều công suất cũng đã đủ để khai thác gần như tối đa hiệu suất của tiền mã hóa ZF trong hệ thống Massive MIMO đa người dùng đường xuống.

4.3.3.2 Mối quan hệ giữa mức phân bổ công suất (P_k^{opt}) và λ_k^{-1} trong thuật toán water-filling

Để khảo sát diễn tả mối quan hệ giữa nghịch đảo của hệ số lambda (λ^{-1}) và mức công suất được phân bổ tối ưu (P_k^{opt}) cho từng người dùng trong thuật toán water-filling, trong kỹ thuật tiền mã hóa ZF ở hệ thống Massive MIMO đa người dùng đường xuống. Mô phỏng được thực hiện với $K = 8$ người dùng, số anten tại trạm gốc cố định là $M = 32$, trong hai mức SNR thấp (-5dB) và cao (10dB). Kết quả thu được sau mô phỏng như trong Hình 4.7 và Hình 4.8



Hình 4.7: Mối quan hệ giữa λ^{-1} với mức công suất phân bổ trong thuật toán water-filling ở mức SNR = -5dB



Hình 4.8: Mối quan hệ giữa λ^{-1} với mức công suất phân bổ trong thuật toán water-filling ở mức SNR = 10dB

Ở mức SNR = -5dB (Hình 4.7), sự khác biệt rõ rệt về mức phân bổ công suất giữa các người dùng. Cụ thể, các người dùng có giá trị λ^{-1} thấp (tương ứng với kênh mạnh hơn) như người dùng 1 đến 4 ($\lambda^{-1} \approx 0.1332, 0.2547, 0.4894, 0.9432$) được cấp phát công suất lớn hơn đáng kể ($P_1 \approx 2.18, P_2 \approx 2.06$), trong khi các người dùng khác có kênh yếu như người dùng 7 đến 8 ($\lambda^{-1} \approx 6.86, 13.2$) hầu như không được cấp phát công suất (P_4 và $P_8 \approx 0$). Điều này phản ánh bản chất của thuật toán water-filling rằng chỉ những người dùng có $\lambda_k^{-1} < \mu$ (với μ là mực nước) mới được cấp công suất, theo công thức:

$$p_k = \mu - \lambda_k^{-1}, (p_k > 0).$$

Ví dụ, với mực nước $\mu \approx 2.3227$ thì chỉ những người dùng có kênh đủ tốt mới được phân bổ công suất hiệu quả.

Ở mức SNR = 10dB (Hình 4.8), hành vi phân bổ công suất trở nên đồng đều hơn, thể hiện qua các thanh giá trị mức công suất gần như bằng nhau, dao động quanh giá trị xấp xỉ bằng 1. Điều này phản ánh rằng trong điều kiện kênh tốt, nhiều liên người dùng không còn là yếu tố chi phối đến hiệu suất và phân bổ công suất tối ưu dựa vào thuật toán water-filling sẽ có xu hướng tiệm cận với chiến lược phân bổ đều giữa những người dùng. Giá trị λ_k^{-1} ở mức SNR cao cũng thấp hơn đáng kể ($\lambda_{\max}^{-1} \approx 0.4143$), điều này sẽ

hiện mực nước ($\mu \approx 1.1074$) được chọn đủ cao để tất cả người dùng đều nhận được công suất dương ($p_k > 0$).

Kết quả mô phỏng cho thấy rõ rằng hiệu quả của chiến lược phân bổ công suất phụ thuộc mạnh vào điều kiện kênh và mức SNR. Trong điều kiện suy hao nghiêm trọng (SNR thấp), thuật toán water-filling chủ động bỏ qua các người dùng có kênh yếu để tập trung công suất vào các kênh mạnh nhằm tối đa hóa tổng tốc độ dữ liệu (maximum sum rate). Ngược lại, trong điều kiện SNR cao, sự khác biệt giữa các người dùng được giảm thiểu thì chiến lược phân bổ công suất tối ưu tiệm cận với phân bổ đồng đều giữa những người dùng với nhau.

Điều này hoàn toàn phù hợp với nguyên lý của thuật toán water-filling trong bài toán tối ưu hoá tổng dung lượng, cũng như với đặc điểm của kỹ thuật tiền mã hóa ZF, vốn loại bỏ nhiễu liên người dùng nhưng vẫn phụ thuộc vào điều kiện kênh qua ma trận $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$. Thành phần $\lambda_k^{-1} = BN_0 \left[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \right]_{kk}$ chính là yếu tố phản ánh độ mạnh hay yếu của kênh người dùng k sau khi qua quá trình tiền mã hóa sử dụng kỹ thuật ZF, để dựa vào đó tính được mực nước tối ưu và quyết định mức công suất phân bổ cần thiết để người dùng k đạt được mức SINR mục tiêu.

4.4 KẾT LUẬN

Với mục tiêu của khóa luận này chính là nghiên cứu các kỹ thuật xử lý tuyến tính Massive MIMO đa người dùng đường lên và đường xuống, thì khóa luận đã xây dựng mô hình bài toán thực tế và các bước mô phỏng phù hợp. Từ mô phỏng, khóa luận đã khảo sát được sự ảnh hưởng của SNR, tỷ lệ M/K đối với hiệu suất của các kỹ thuật kết hợp (combining) trong kịch bản đường lên và các kỹ thuật tiền mã hóa (precoding) trong kịch bản đường xuống. Trong kịch bản đường xuống, khóa luận còn khảo sát được tầm quan trọng của phân bổ công suất tối ưu dựa trên thuật toán water-filling so với phân bổ đều đối với hiệu suất của kỹ thuật tiền mã hóa ZF. Việc khảo sát được thực hiện và đạt được những kết quả khả quan thông qua các mô phỏng với những sự thay đổi của mức SNR từ thấp đến cao và tỷ lệ M/K (tăng số anten từ $M = 8$ đến $M = 128$).

Dựa trên các kết quả thu được sau quá trình mô phỏng, có thể dựa vào đó mà đánh giá hiệu suất của các kỹ thuật một cách trực quan, mang tính định lượng rõ ràng với những số liệu cụ thể, nhận xét và giải thích được tại sao lại có những kết quả như

vậy. Chi tiết cho điều này chính là kỹ thuật ZF và RZF thể hiện hiệu suất cao trong điều kiện $M > K$, đặc biệt ở SNR cao. Còn kỹ thuật MRC/MRT phù hợp trong điều kiện SNR thấp hoặc $M \approx K$, nhưng kém hiệu quả khi có nhiễu liên người dùng lớn. LMMSE thì cho hiệu suất trung gian và ổn định trong nhiều điều kiện. Ngoài ra, chiến lược phân bổ công suất tối ưu theo thuật toán water-filling giúp nâng cao hiệu suất đáng kể trong điều kiện SNR thấp và môi trường kênh không đồng nhất và bị ảnh hưởng bởi các thành phần như suy hao đường truyền (pathloss) hay bị che khuất (shadowing).

Thông qua chương này, có thể kiểm chứng lại tính đúng đắn của lý thuyết so với kết quả mô phỏng đạt được. Hơn nữa, còn có thể phát hiện được những điểm hạn chế trong quá trình mô phỏng nói riêng và khóa luận nói chung. Từ đó, đề xuất những giải pháp phù hợp để cải thiện hay đề ra các hướng phát triển mới và điều này sẽ được trình bày một cách chi tiết và rõ ràng ở chương tiếp theo.