

THIẾT KẾ TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH CHO KÊNH TRUYỀN TWO-WAY RELAY

LINEAR PRECODING DESIGNS FOR TWO-WAY RELAY CHANNELS

Nguyễn Lê Hùng¹, Nguyễn Duy Nhật Viễn², Tăng Tân Chiến²

¹Đại học Đà Nẵng; Email: nlhung@dut.udn.vn

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: ndnvien@dut.udn.vn, ttchien@ac.udn.vn

Tóm tắt – Gần đây, phương thức truyền dẫn two-way relay được xem là một giải pháp để mở rộng khả năng truy cập vô tuyến cho các dịch vụ tốc độ dữ liệu cao, là kỹ thuật được nhắm đến thực hiện trong các mạng di động thế hệ sau. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu kỹ thuật mã hóa cho kênh truyền MIMO two-way relay khuếch đại và chuyển tiếp, trong đó, truyền dẫn đường xuống và đường lên có thể được thực hiện trong hai khe thời gian. Ngoài ra, kỹ thuật tiền mã hóa ở trạm gốc và các relay cũng được thiết kế kết hợp để đảm bảo nhiễu đồng kênh có thể được loại bỏ hoàn toàn. Mô phỏng Monte-Carlo cũng được thực hiện để chứng tỏ hiệu năng của giao thức truyền dẫn kết hợp mã hóa mạng và tiền mã hóa đề xuất.

Từ khóa – thiết kế tiền mã hóa; dung lượng; two-way relay; SDMA; ZF.

1. Đặt vấn đề

Trong các hệ thống truyền thông vô tuyến thế hệ tiếp theo, relay là một trong những kỹ thuật then chốt để mở rộng vùng phủ sóng đồng thời cải thiện dung lượng mạng [1][2]. Thông thường, các relay hoạt động ở chế độ bán song công với mục đích giảm độ phức tạp của relay. Lúc này, relay không thể vừa nhận và vừa phát tín hiệu một cách đồng thời mà phải mất đến 4 khe thời gian để thu và phát. Điều này làm giảm hiệu quả phổ.

Để khắc phục nhược điểm này, phương thức truyền dẫn two-way relay dựa trên cơ sở mã hóa mạng đã được nghiên cứu trong rất nhiều công trình khác nhau [3][4] do nó có thể trao đổi chuyển các thông điệp từ các node nguồn đến các node đích với số khe thời gian nhỏ hơn 4.

Trong nhiều đề xuất trước đây, [5][6], các tác giả giả sử các bản tin được truyền từ 2 nguồn đến relay là không có mặt của bất kỳ nguồn nhiễu nào. Trong các bài báo [7][8], relay không tiến hành điều chế và giải điều chế mà chỉ chuyển tiếp bản tin hỗn hợp là chồng chập các bản tin từ nguồn cùng với nhiễu kênh với mục đích giảm sự phức tạp cho relay. Trong [9], mã hóa mạng được áp dụng cho đường lên và trong [10], mã hóa mạng được áp dụng cho truyền quảng bá. Trong nghiên cứu [14], các tác giả đã thiết kế bộ tiền mã hóa cho đường lên lẫn đường xuống, nhưng với điều kiện ma trận kênh phải khả nghịch.

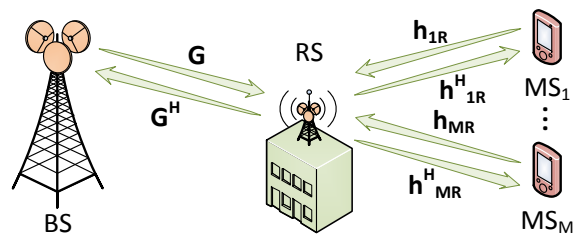
Trong bài báo này, chúng tôi tổng quát hoá nghiên cứu [14] với mô hình two-way relay trong các hệ thống thông tin di động đa người dùng (multi-user) gồm một trạm gốc BS (Base Station) có M anten để phục vụ cho M thiết bị đầu cuối di động MS (Mobile Station) đơn anten do hạn chế về không gian và năng lượng và một relay RS (Relay Station) trang bị M anten. Giao thức mã hóa mạng SDMA (Space-Division Multiple Access) được phát triển cho 2M đường lên và xuống trong hai khe thời gian. Kỹ thuật Zero-Forcing (ZF) được áp dụng để ngăn ngừa nhiễu

Abstract – Two-way relaying has recently been considered as an efficient solution to extend the coverage area of wireless networks with high data rate services. As a result, the relay transmission technique can be used for the next generation mobile networks. In this paper, we study precoding techniques for MIMO two-way relay channels where full-duplex transmission can be implemented by using two timeslots. In addition, precoding techniques at the base station and relays are also designed to ensure that co-channel interference can be removed completely. Monte-Carlo simulations have been conducted to demonstrate the performance of the proposed relay networks using precoding.

Key words – precoding design; capacity; two-way relay; SDMA; ZF.

đồng kênh cho mô hình này.

2. Mô hình hệ thống



Hình 1: Mô hình hệ thống

Xét kịch bản với M thuê bao di động, một trạm gốc và một relay. Mỗi thuê bao có 1 anten còn relay và trạm gốc đang hoạt động đều với M anten. Giả sử các kênh truyền chịu fading Rayleigh đồng nhất và độc lập gần như không đổi (quasi-static) và không có đường truyền trực tiếp giữa trạm gốc và thuê bao.

Trong khe thời gian thứ nhất, trạm gốc truyền phiên bản tiền mã hóa của thông tin mang các ký tự $\mathbf{P}\mathbf{s}$, trong đó, $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_M]^T$ và \mathbf{P} là ma trận tiền mã hóa $M \times M$ ở trạm gốc. Giả sử rằng công suất phát tại mỗi anten ở trạm gốc hoặc các thuê bao bằng 1. Như vậy, ma trận tiền mã hóa phải thỏa mãn ràng buộc công suất $\text{trace}\{\mathbf{P}\mathbf{P}^H\} \leq M$. \mathbf{P}^H là phép lấy Hermitan của ma trận \mathbf{P} . Cũng trong khe thời gian này, các thuê bao gửi bản tin của nó \mathbf{u}_i , $i=1, \dots, M$ đến trạm gốc.

Như vậy, cuối khe thời gian thứ nhất, relay nhận tín hiệu:

$$\mathbf{r} = \mathbf{G}\mathbf{P}\mathbf{s} + \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{mR}\mathbf{u}_m + \mathbf{n}_R \quad (1)$$

Trong đó, \mathbf{G} là ma trận $M \times M$ giữa trạm gốc và relay, \mathbf{h}_{mR} là vector $M \times 1$ kênh giữa relay và thuê bao di động thứ m , \mathbf{n}_R là vector $M \times 1$ nhiễu trắng cộng.

Trong khe thời gian thứ hai, relay truyền phiên bản tiền mã hóa của thông tin nhận được trước đó. Gọi \mathbf{W} là ma trận tiền mã hóa ở relay. Relay sẽ phát $\mathbf{W}\mathbf{r}$ đến tất cả các thuê bao cũng như trạm gốc. Tương tự như ở trạm gốc, công suất phát của relay bị giới hạn nên $\text{trace}\{\mathbf{W}\mathbf{r}\mathbf{r}^H\mathbf{H}^H\} \leq M$. Do đó, trong khe thời gian thứ hai, tín hiệu thu được tại trạm gốc là:

$$\mathbf{y}_{BS} = \mathbf{G}^H \mathbf{W} \left(\mathbf{G}\mathbf{P}\mathbf{s} + \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{mR} \mathbf{u}_m + \mathbf{n}_R \right) + \mathbf{n}_{BS}. \quad (2)$$

Tín hiệu thu được tại thuê bao thứ m là:

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{h}_{mR}^H \mathbf{W} \left(\mathbf{G}\mathbf{P}\mathbf{s} + \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{mR} \mathbf{u}_m + \mathbf{n}_R \right) + \mathbf{n}_m. \quad (3)$$

Trong đó, \mathbf{n}_m và \mathbf{n}_{BS} là nhiễu nhiệt tại thuê bao thứ m và trạm gốc tương tự như \mathbf{n}_R .

Từ (3) ta thấy rằng để bắt cặp cho mỗi thuê bao với một anten thì khó có thể giải điều chế chính xác do có sự hiện diện của can nhiễu xuyên kênh. Ví dụ, \mathbf{s}_n và \mathbf{u}_n có thể gây nhiễu lớn lên tín hiệu thu được bởi thuê bao thứ m , ($i \neq j$), và ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng thu của thuê bao. Vì vậy, phải xử lý sao cho dữ liệu gửi cho thuê bao khác m đến thuê bao m bằng 0. Trong khi đó, việc xử lý nhiễu xuyên kênh tại trạm gốc có thể được thực hiện bởi chính trạm gốc nên độ ưu tiên xử lý thấp hơn. Hơn nữa, do trạm gốc biết được tất cả bản tin nó gửi đi nên nhiễu xuyên kênh trong (3) dễ dàng được loại bỏ. Tóm lại, ta chỉ cần quan tâm đến việc xử lý các nhiễu xuyên kênh cho các thuê bao sao cho thuê bao thứ i chỉ nhận được duy nhất bản tin thứ i .

2.1. Thiết kế ma trận tiền mã hóa tại trạm gốc

Việc thiết kế ma trận tiền mã hóa tại trạm gốc và relay phải thỏa mãn hai điều kiện. Một là công suất phát tại trạm gốc và relay phải thỏa điều kiện giới hạn, và điều kiện thứ hai đó là mỗi thuê bao không thu được thông tin của các thuê bao khác. Ngoài ra, ý tưởng chính của giao thức mã hóa mạng đề xuất là relay cố gắng nhóm các bản tin đến và từ các thuê bao (\mathbf{s}_m và \mathbf{u}_m) lại với nhau. Theo [14], ma trận tiền mã hóa sẽ là bao gồm nghịch đảo của ma trận \mathbf{G} . Tuy nhiên, không phải lúc nào ma trận \mathbf{G} cũng khả nghịch. Ở đây, ta xác định được ma trận tiền mã hóa \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \mathbf{G}^+ \mathbf{H}\mathbf{A} \quad (4)$$

trong đó, phát và \mathbf{G}^+ là phép lấy ma trận giả đảo Moore–Penrose của ma trận \mathbf{G} : $\mathbf{G}^+ = \mathbf{G}^H (\mathbf{G}\mathbf{G}^H)^{-1}$, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_{1R}, \dots, \mathbf{h}_{MR}]$ và \mathbf{A} là ma trận đường chéo để đảm bảo công suất phát tại trạm gốc thỏa điều kiện hữu hạn của thiết bị (trạm gốc). Khi đó, relay có thể nhóm các bản tin đến và từ các thuê bao dưới dạng:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + \mathbf{n}_R \quad (5)$$

với $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M]^T$. Để tìm ma trận chuẩn hóa công suất \mathbf{A} , ta sẽ tính công suất phát tổng cộng tại trạm gốc với ma trận tiền mã hóa \mathbf{P} :

$$\begin{aligned} \text{trace}\{\mathbf{P}\mathbf{P}^H\} &= \text{trace}\{\mathbf{G}^+ \mathbf{H}\mathbf{A}^2 (\mathbf{G}^+ \mathbf{H})^H\} \\ &= \text{trace}\{(\mathbf{G}^+ \mathbf{H})^H \mathbf{G}^+ \mathbf{H}\mathbf{A}^2\} \end{aligned} \quad (6)$$

Giả sử mỗi anten có công suất phát bằng 1. Do đó, để thỏa yêu cầu giới hạn công suất phát, ta chỉ cần chọn:

$$\mathbf{A} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\mathbf{h}_{1R}^H (\mathbf{G}^+)^H \mathbf{G}^+ \mathbf{h}_{1R}}}, \frac{1}{\sqrt{\mathbf{h}_{2R}^H (\mathbf{G}^+)^H \mathbf{G}^+ \mathbf{h}_{2R}}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{\mathbf{h}_{MR}^H (\mathbf{G}^+)^H \mathbf{G}^+ \mathbf{h}_{MR}}} \right\} \quad (7)$$

Tổng công suất phát tại trạm gốc là:

$$\begin{aligned} P_{BS} &= \text{trace}\{\mathbf{P}\mathbf{P}^H\} \\ &= \text{trace}\{(\mathbf{G}^+ \mathbf{H})^H \mathbf{G}^+ \mathbf{H}\mathbf{A}^2\} \\ &= M, \end{aligned} \quad (8)$$

thỏa yêu cầu giới hạn công suất.

2.2. Thiết kế ma trận tiền mã hóa \mathbf{W} tại relay

Để triệt giao thoa tại các node, sử dụng ma trận tiền mã hóa \mathbf{W} kích thước $M \times M$ tại relay. Sau khi áp dụng ma trận tiền mã hóa \mathbf{P} tại trạm gốc, bản tin relay phát có dạng:

$$\mathbf{W}\mathbf{r} = \mathbf{W}(\mathbf{H}(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + \mathbf{n}_R) \quad (9)$$

Trong khe thời gian thứ hai, relay sẽ phát phiên bản tiền mã hóa của bản tin nó nhận trong khe thời gian thứ nhất. Tín hiệu thu được tại thuê bao sẽ là:

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{h}_{mR}^H \mathbf{W}(\mathbf{H}(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + \mathbf{n}_R) + \mathbf{n}_m. \quad (10)$$

Để hạn chế giao thoa tại các thuê bao thì ma trận tiền mã hóa \mathbf{W} phải thỏa điều kiện:

$$\mathbf{H}^H \mathbf{W}\mathbf{H} = \text{diag}\{\xi_1, \dots, \xi_M\} \quad (11)$$

trong đó giá trị của ξ_i phụ thuộc vào ma trận tiền mã hóa. Ma trận tiền mã hóa \mathbf{W} được chọn như sau:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H)^+ \mathbf{B}\mathbf{H}^+, \quad (12)$$

với \mathbf{B} là ma trận đường chéo dùng để đạt điều kiện giới hạn công suất.

Từ (12), suy ra công suất phát tại relay là:

$$\begin{aligned} P_{RS} &= \text{trace} \left\{ \mathbf{W}\mathbf{H}(\mathbf{A}^2 + \mathbf{I}_M)\mathbf{H}^H \mathbf{W}^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{W}\mathbf{W}^H \right\} \\ &\approx \text{trace} \left\{ (\mathbf{H}^H)^+ \mathbf{B}(\mathbf{A}^2 + \mathbf{I}_M)\mathbf{B}^H \mathbf{H}^+ \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

trong đó, ρ là tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR, biểu thức gần đúng khi tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR lớn. Vì trace có tính chất hoán vị chu kỳ nên:

$$P_{RS} = \text{trace} \left\{ (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^+ \mathbf{B}^2 (\mathbf{A}^2 + \mathbf{I}_M) \right\} \quad (14)$$

Do đó, để đạt điều kiện giới hạn $P_{RS} \leq M$, để đơn giản, ta chọn:

$$b_{ii} = \sqrt{\frac{1}{\text{trace}\left\{(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^+ (\mathbf{A}^2 + \mathbf{I}_M)\right\}}} \quad (15)$$

với b_{ii} là thành phần trên ma trận đường chéo \mathbf{B} . Khi đó, tín hiệu thu được tại mỗi thuê bao là:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m &= \mathbf{h}_{mR}^H [\mathbf{W}\mathbf{B}(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + \mathbf{W}\mathbf{n}_R] + \mathbf{n}_m \\ &= \mathbf{h}_{mR}^H (\mathbf{H}^H)^+ \mathbf{B} \left[(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + (\mathbf{H})^+ \mathbf{n}_R \right] + \mathbf{n}_m \quad (16) \\ &\approx (d_{sm}\mathbf{s}_m + \mathbf{u}_m) + \tilde{\mathbf{h}}_m \mathbf{n}_R + d_{rm}^{-1} \mathbf{n}_m \end{aligned}$$

trong đó d_{sm} và d_{rm} là phần tử thứ m của đường chéo chính của ma trận \mathbf{A} và \mathbf{B} tương ứng; $\tilde{\mathbf{h}}_m$ là vector hàng thứ m của \mathbf{H}^+ . Từ (16), ta thấy rằng thuê bao thứ m chỉ thu được bản tin \mathbf{s}_m và \mathbf{u}_m ; còn các bản tin khác, \mathbf{s}_j và \mathbf{u}_j với $j \neq m$ được loại bỏ bởi ma trận tiền mã hóa. Tín hiệu thu được tại trạm gốc là:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{BS} &= \mathbf{G}^H \mathbf{W} (\mathbf{H}(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + \mathbf{n}_R) + \mathbf{n}_{BS} \\ &= \mathbf{G}^H \left((\mathbf{H}^H)^+ \mathbf{B}(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{u}) + (\mathbf{H}^H)^+ \mathbf{B}\mathbf{H}^+ \mathbf{n}_R \right) + \mathbf{n}_{BS} \quad (17) \end{aligned}$$

Hiển nhiên, việc sử dụng hai ma trận tiền mã hóa đã làm tăng độ phức tạp tín hiệu thu được tại trạm gốc, tuy nhiên do trạm gốc biết được toàn bộ bản tin gửi đi \mathbf{s} nên nó có thể đảm bảo được chất lượng giải điều chế.

3. Phân tích hiệu năng

Với mô hình tín hiệu trong công thức tính tín hiệu thu được tại thuê bao và trạm gốc, các phương pháp phát hiện dữ liệu khác nhau đều có thể thực hiện được, trong bài báo này, kỹ thuật ZF được áp dụng do tính đơn giản của nó. Chú ý rằng kỹ thuật zero forcing có thể đạt được cùng hiệu năng như thuật toán phát hiện MMSE khi SNR lớn. Ta thấy rằng, mô hình tín hiệu trạm gốc và thuê bao di động khác nhau, điều này dẫn đến một vài sự khác biệt trong triển khai kết quả phân tích.

Từ các phương trình (16) và (17), ta tính được dung lượng hệ thống theo công thức sau

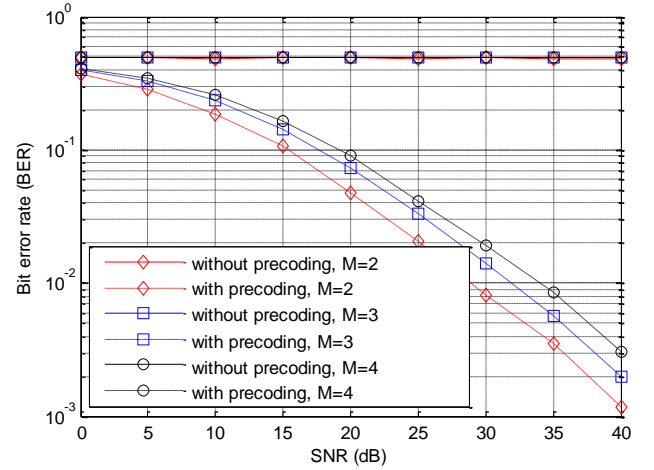
$$\begin{aligned} R &= \log_2 \left| \mathbf{I} + \left(\mathbf{H}^+ (\mathbf{H}^H)^+ \sigma_R^2 + \mathbf{B}\mathbf{H}^H \mathbf{U} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{H}\mathbf{B}^{-1} \sigma_m^2 \right)^{-1} \right| \\ &\quad + \sum_{m=1}^M \log_2 \left| \mathbf{I} + \left(\tilde{\mathbf{h}}_m \tilde{\mathbf{h}}_m^H \sigma_R^2 + \sigma_m^2 \right)^{-1} \right| \quad (18) \end{aligned}$$

Trong đó, thành phần đầu tiên là dung lượng đường lên (của tín hiệu từ tất cả thuê bao gửi đến BS thông qua relay) và thành phần thứ hai là dung lượng đường xuống (của tín hiệu từ BS gửi đến tất cả các thuê bao thông qua relay).

4. Kết quả mô phỏng

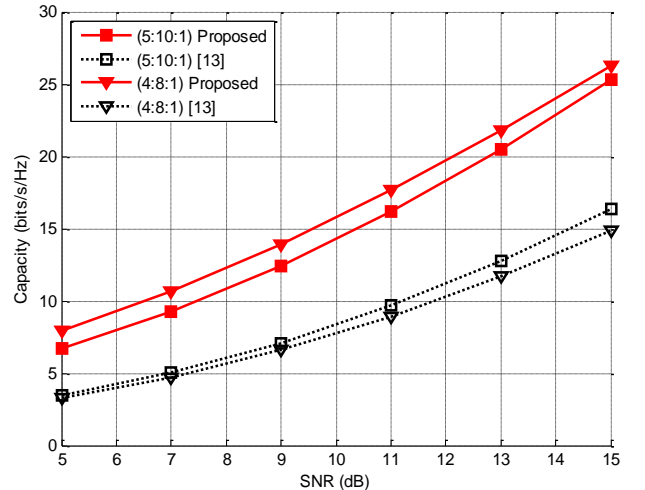
Phần này trình bày việc áp dụng kỹ thuật tiền mã hóa được đề xuất trong các phần trên cho kênh truyền two-way relay và đánh giá hiệu năng qua mô phỏng Monte-Carlo. Các kịch bản được đưa ra trong trường hợp

hệ thống two-way relay không và có áp dụng kỹ thuật tiền mã hóa với số lượng thuê bao khác nhau với tín hiệu được điều chế 4-QAM, 16-QAM, 32-QAM và 64-QAM.



Hình 2: BER của tín hiệu thu nhận được tại user.

Hình 2 mô tả tỷ lệ lỗi bit của tín hiệu thu được tại user được điều chế 4-QAM khi không và có áp dụng kỹ thuật tiền mã hóa. Từ hình vẽ, ta thấy rằng khi không sử dụng tiền mã hóa thì tỷ lệ lỗi bit rất cao (~ 0.5), còn khi có sử dụng kỹ thuật tiền mã hóa ZF thì chất lượng tín hiệu nhận được tốt hơn nhiều. BER có thể đạt khoảng 10^{-3} khi số thuê bao bằng 2 và cao hơn khi số thuê bao tăng ($M=3,4$). Kỹ thuật tiền mã hóa đã loại bỏ được nhiễu xuyên kênh tại thuê bao. Nhưng khi tăng số thuê bao thì do ảnh hưởng ma trận kênh nhân với nhiễu trắng ($\tilde{\mathbf{h}}_m \mathbf{n}_R$) có mặt trong công thức (17) làm giảm hệ số tín hiệu trên nhiễu SNR của tín hiệu nhận được tại thuê bao.



Hình 3: Dung lượng hệ thống so với [13].

Hình 3 biểu diễn tỷ lệ bit lỗi BER của tín hiệu thu được tại user khi thay đổi kiểu điều chế tín hiệu. Ta thấy rằng, khi tăng mức điều chế QAM thì tỷ lệ lỗi bit cũng tăng theo, chất lượng tín hiệu thu được giảm do tỷ lệ năng lượng bit trên nhiễu E_b/N_0 giảm. Ngoài ra, khi tăng mức điều chế QAM, khoảng cách giữa các điểm của tín hiệu gần nhau hơn, xác suất nhận nhầm ký hiệu cao hơn nên BER giảm.

Hình 3 biểu diễn dung lượng như là một hàm của SNR của tất cả các node của hai hệ thống khác nhau (giả sử SNR các node là như nhau). Ký hiệu mô hình anten của hệ thống ($M:N_B:N_R$). Từ hình vẽ này ta thấy rằng khi số anten của toàn bộ hệ thống tăng thì dung lượng tăng. Ngoài ra, hình vẽ còn thể hiện dung lượng của phương án đề xuất cao hơn so với phương pháp tiền mã hoá trong [13].

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày mô hình hệ thống truyền thông tin di động multi-user two-way relay, thiết kế bộ tiền mã hoá tại BS và RS để triệt giao thoa. Kết quả phân tích được triển khai để kiểm chứng hiệu năng của phương thức đề xuất. Qua kết quả phân tích lý thuyết lẫn mô phỏng, ta thấy rằng kỹ thuật tiền mã hoá là cần thiết trong hệ thống two-way relay cũng như phương pháp tiền mã hoá ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng của hệ thống. Trên cơ sở của bài báo này, ta có thể tiếp tục triển khai cho các hệ thống multi-user multi-relay cũng như multi-antennas.

Tài liệu tham khảo

- [1] 3GPP, TSG RAN WG1 R1-084136, "Relaying for LTE-Advanced", Nov. 2008.
- [2] 3GPP, TSG RAN WG1, R1-082327, "Relaying with Network Coding", Jun. 2008.
- [3] P. Popovski and H. Yomo, "Wireless network coding by amplify-and forward for bi-directional traffic flows", *IEEE Communication Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 16-18, Jan. 2007.
- [4] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half duplex fading relay channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.
- [5] G. Foschini and M. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [6] R. Ahlswede, N. Cai, S. R. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, pp. 1204-1217, Jul. 2000.
- [7] S. Zhang, S. Liew, and P. Lam, "Physical layer network coding", in *Proc. 12th Ann. Int. Conf. Mobile Comput. Netw. (ACM MobiCom 2006)*, Sep. 2006, pp. 63-68.
- [8] S. Katti, S. Gollakota, and D. Katabi, "Embracing wireless interference: Analog network coding", *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 397-408, Sep. 2007.
- [9] Z. Ding, K. K. Leung, D. L. Goeckel, and D. Towsley, "On the study of network coding with diversity", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, pp. 1247-1259, Mar. 2009.
- [10] Y. Chen, S. Kishore, and J. Li, "Wireless diversity through network coding", in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Mar. 2006, pp. 1681-1686.
- [11] Z. Ding, T. Ratnarajah, and K. K. Leung, "On the study of network coded af transmission protocol for wireless multiple access channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, pp. 118-123, Jan. 2009.
- [12] C. Fragouli, J. Widmer, and J. Y. L. Boudec, "A network coding approach to energy efficient broadcasting: From theory to practice", in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (Infocom)*, Apr. 2006.
- [13] Zhang, Jianshu, Florian Roemer, and Martin Haardt. "Beamforming design for multi-user two-way relaying with MIMO amplify and forward relays." *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011.
- [14] Ding, Zhiguo, et al. "Physical layer network coding and precoding for the two-way relay channel in cellular systems." *Signal Processing, IEEE Transactions on* 59.2, pp: 696-712, 2011
- [15] M. Rupp, C. Mecklenbrauker, and G. Gritsch, "High diversity with simple space time block codes and linear receivers", *Proc. GLOBECOM*, vol. 2, pp. 302-306, Dec. 2003.

(BBT nhận bài: 10/12/2013, phản biện xong: 29/12/2013)