

MIMO – Công nghệ truyền dẫn vô tuyến tốc độ cao

Trần Xuân Nam - Đinh Thế Cường - Nguyễn Tuấn Minh (*Học viện Kỹ thuật Quân sự*)
- Nguyễn Vĩnh Hạnh (*Phòng Kỹ thuật, Bộ Tư lệnh Lãng*)

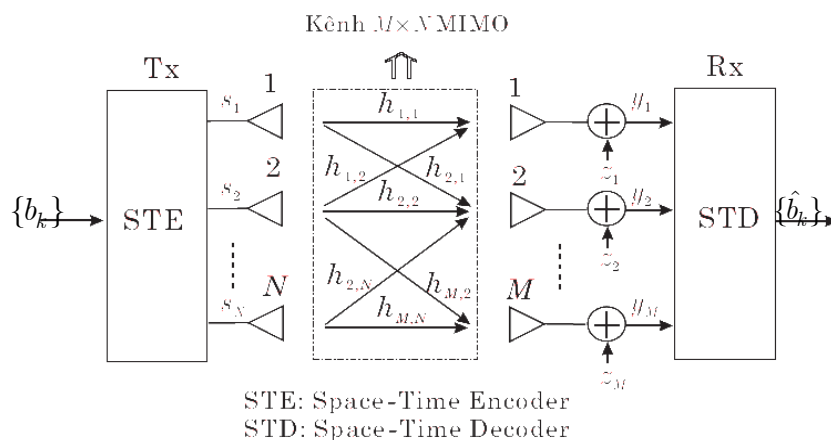
1. Lời giới thiệu

Cùng với sự phát triển của xã hội thông tin, nhu cầu về thông tin mọi lúc mọi nơi đang ngày càng trở nên cần thiết. Từ những nhu cầu đơn giản về thông tin thoại hay điện báo ban đầu, đến nay nhu cầu truy cập và trao đổi các nguồn thông tin đa phương tiện, hình ảnh video chất lượng cao đang ngày càng trở nên bức thiết. Bên cạnh nhu cầu về tốc độ truy cập, tính di động cho phép truy cập mọi lúc, mọi nơi cũng là một yêu cầu không thể thiếu. Các hệ thống thông tin di động thế hệ thứ 3 đang được triển khai sử dụng công nghệ WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) kết hợp với giao thức truy cập tốc độ cao HSPDA (High Speed Downlink Protocol Access) cho phép download dữ liệu với tốc độ lên tới 14.4 Mbps. Tuy nhiên, đối với các dịch vụ truyền hình trực tuyến tốc độ cao, nhu cầu truy cập tốc độ hàng trăm Mbps, thậm chí lên tới Gbps, vẫn còn là một thách thức đòi hỏi phải có đầu tư nghiên cứu nhiều hơn nữa. Để đáp ứng được yêu cầu truyền dữ liệu tốc độ cao ở thế hệ thứ 4 của thông tin vô tuyến di động, thì các hệ thống truyền dẫn đa đầu vào đa đầu ra (MIMO: Multiple Input Multiple Output) đang là một ứng cử viên triển vọng nhất.

Bài báo này trình bày tổng quan về công nghệ MIMO vô tuyến và các kỹ thuật mã hóa, tách tín hiệu đi kèm với nó, đồng thời chỉ ra một số hướng phát triển nghiên cứu về MIMO đang được quan tâm.

2. Mô hình hệ thống MIMO

MIMO là các hệ thống truyền dẫn vô tuyến sử dụng đồng thời nhiều anten ở máy phát và máy thu như ở Hình 1. Chuỗi tín hiệu phát $\{b_k\}$ được mã hóa theo cả hai miền không gian (theo hướng các anten phát) và thời gian nhờ bộ mã hóa không gian-thời gian (STE: Space-Time Encoder). Tín hiệu sau khi được mã hóa không gian-thời gian (KG-TG) $\{s_k\}$ được phát đi nhờ N anten phát. Máy thu sử dụng phân tập thu với M anten thu. Kênh tổng hợp giữa máy phát (Tx) và máy thu (Rx) có N đầu vào và M đầu ra, và vì vậy, được gọi là kênh MIMO $M \times N$.



Hình 1: Mô hình một hệ thống MIMO điển hình

2.1. Dung lượng kênh MIMO

Dung lượng kênh truyền được định nghĩa là tốc độ truyền dẫn tối đa với một xác suất lỗi tương đối nhỏ nào đó. Đối với kênh truyền không sử dụng phân tập, có độ lợi h , chịu ảnh hưởng của tạp âm cộng trắng Gauss thì dung lượng kênh truyền có thể tính được theo định lý Shannon [4] như sau:

$$C_{\text{SISO}} = W \log_2(1 + \rho |h|^2) \quad [\text{bit/s}] \quad (8)$$

trong đó W là băng tần của kênh truyền tính bằng Hz và $\rho|h|^2$ chính là tỉ số tín hiệu trên tạp âm (SNR) tại đầu vào máy thu. Từ các công thức (8) chúng ta thấy rằng với một kênh vô tuyến có độ rộng băng tần nhất định không sử dụng phân tập không gian (SISO: Single Input Single Output) thì dung lượng kênh truyền tỉ lệ với SNR ở đầu vào máy thu theo luật logarit nên. Vì vậy, muốn tăng dung lượng kênh truyền thì chỉ có cách tăng công suất phát. Tuy nhiên, do mối quan hệ logarit nên dung lượng kênh truyền SISO tăng rất chậm.

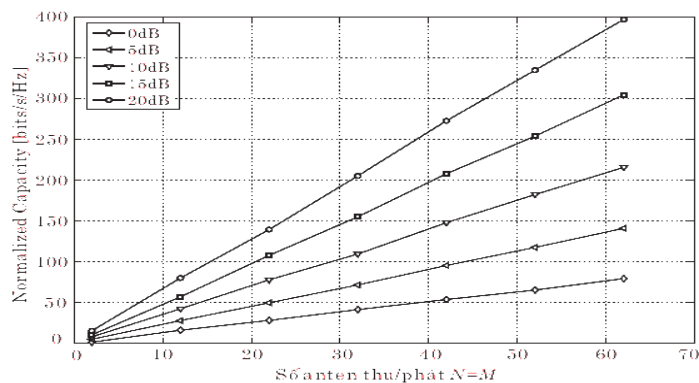
MIMO được đề xuất để khắc phục hạn chế về dung lượng kênh truyền của các hệ thống SISO. Với N anten phát và M anten thu, trong môi trường pha-đỉnh Rayleigh giàu tán xạ và biến đổi chậm, kênh MIMO $N \times M$ như ở Hình 1, cho phép đạt được dung lượng kênh truyền [1], [2]

$$\bar{C}_{\text{MIMO}} = \begin{cases} MW \log_2(1 + \rho) & \text{nếu } M < N \\ NW \log_2\left(1 + \rho \frac{M}{N}\right) & \text{nếu } M \geq N \end{cases} \quad (9)$$

Xem xét công thức (9) chúng ta thấy rằng dung lượng của kênh MIMO tăng tuyến tính theo số anten phát hoặc thu và có thể đạt đến $r = \min(M, N)$ lần dung lượng của một kênh truyền SISO. Hình 2 biểu diễn sự tăng tuyến tính của dung lượng kênh MIMO theo số anten thu phát.

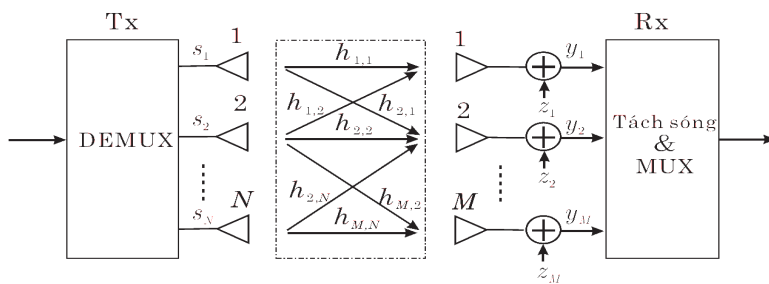
2.2. Các phương pháp truyền dẫn MIMO

Kết quả nghiên cứu về dung lượng kênh truyền MIMO đã thúc đẩy một làn sóng nghiên cứu các kỹ thuật truyền dẫn nhằm đạt được dung lượng lý thuyết mong muốn. Tiếp theo công trình chung với Gans [3], Foschini đề xuất một hệ thống truyền dẫn theo lớp kết hợp với mã hóa nhằm đạt được dung lượng kênh truyền mong muốn như kết quả ở công thức (9). Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu của Foschini [4] cho thấy dung lượng kênh truyền MIMO ở (9) thực tế chỉ là một đường giới hạn trên có thể đạt được nhờ kết hợp các phương pháp mã hóa và thuật toán có độ phức tạp hay giữ chậm không có giới hạn. Vì vậy, để có được các hệ thống truyền dẫn MIMO hiệu quả có thể ứng dụng trong thực tế, các công trình nghiên cứu về MIMO đã tập trung vào việc đề xuất các phương pháp truyền dẫn thỏa mãn được sự cân bằng giữa độ lợi thu được từ kênh MIMO và độ phức tạp cần thiết. Các phương pháp truyền dẫn này có thể phân loại thành hai nhóm sau: Phân kênh theo không gian (SDM: Spatial Division Multiplexing) và mã hóa không gian thời gian (STC: Space-Time Coding).



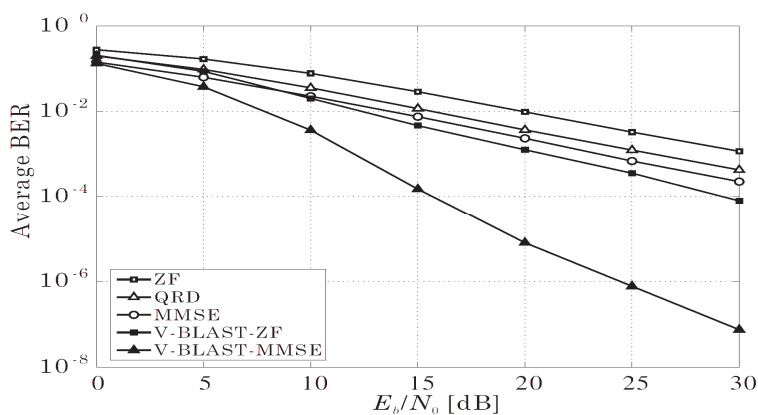
Hình 2: Biểu diễn dung lượng kênh MIMO theo $r = \min(M, N)$

3. Phân kênh theo không gian



Hình 3: Sơ đồ phân kênh theo không gian

Ở sơ đồ phân kênh theo không gian, dòng dữ liệu phát, sau khi được ánh xạ thành các dấu (symbol) của một bộ tín hiệu (constellation) được phân (DEMUX) thành N luồng song song và truyền đồng thời qua N anten phát. Vì vậy, tốc độ truyền dẫn tăng N lần so với hệ thống sử dụng một anten phát, một anten thu (SISO) thông thường. Tuy nhiên, do các luồng dữ liệu thu được tại máy thu bị nhiễu lẫn nhau nên tăng số lượng anten phát N đồng nghĩa với việc tăng nhiễu đồng kênh giữa các luồng tín hiệu, và vì vậy làm tăng BER. Để giảm nhỏ BER của hệ thống máy thu sử dụng $M \geq N$ anten và một bộ tách tín hiệu qua để thực hiện tách riêng từng luồng tín hiệu.

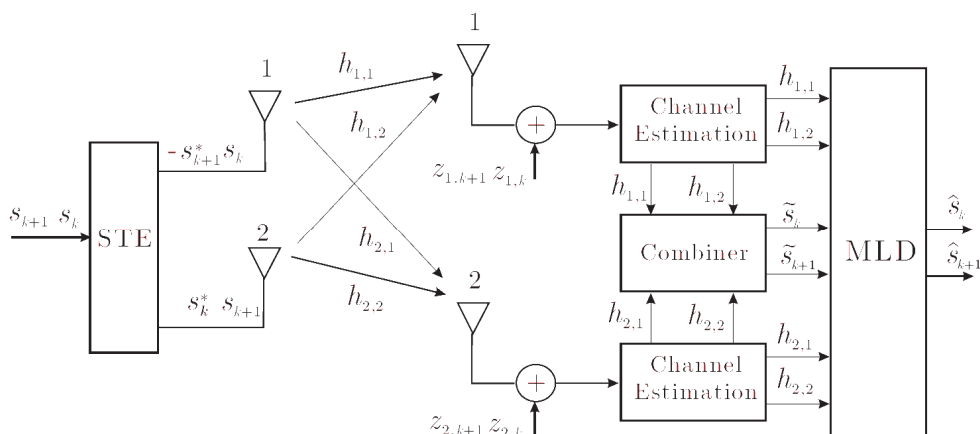


Hình 4: So sánh phẩm chất BER của các bộ tách tín hiệu khác nhau

Hình 4 so sánh phẩm chất BER của một số bộ tách tín hiệu bằng mô phỏng sử dụng điều chế BPSK và $M=N=4$. Chúng ta có thể nhận thấy phẩm chất vượt trội của V-BLAST so với các bộ tách tín hiệu tuyến tính hay QR.

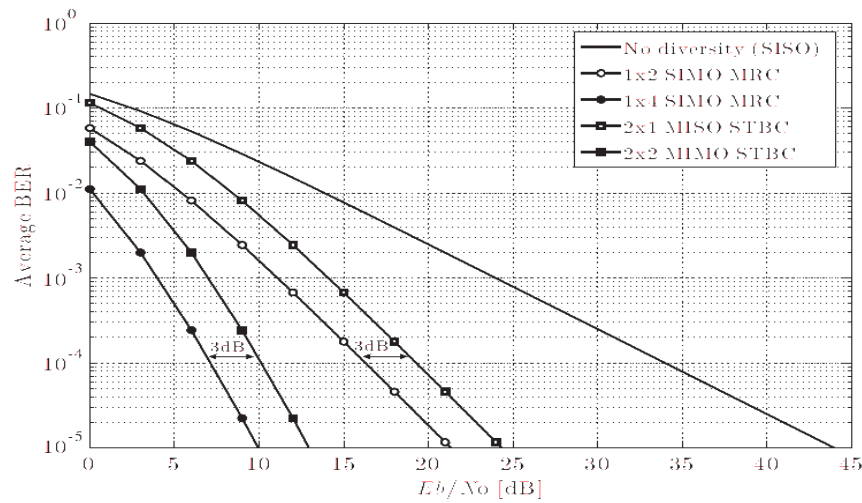
4. Mã hóa Không gian-Thời gian

Mã hóa không gian-thời gian là phương pháp mã hóa cho các hệ thống phân tập phát. Phương pháp mã hóa không gian-thời gian đưa đồng thời tương quan trong cả hai miền không gian và thời gian vào trong tín hiệu phát, kết hợp với kỹ thuật tách tín hiệu ở máy thu nhằm đạt được độ lợi phân tập và có thể cả độ lợi mã hóa. Mã không gian-thời gian có thể được phân loại thành hai loại: *mã khối không gian-thời gian* (STBC: Space-Time Block Code) và *mã lưới không gian-thời gian* (STTC: Space-Time Trellis Code). Mã STBC có ưu điểm thiết kế và giải mã đơn giản. Tuy nhiên, mã STBC lại chỉ cung cấp độ lợi phân tập phát mà không cung cấp độ lợi mã hóa. Ngược lại, mã STTC cho phép thu được cả độ lợi phân tập và mã hóa, nhưng việc thiết kế và giải mã lại phức tạp. Trong các sơ đồ mã hóa không gian-thời gian thì phương pháp STBC do Alamouti đề xuất năm 1998 [6] được đánh giá là phương pháp hiệu quả nhất. Phương pháp của Alamouti sử dụng phương pháp mã hóa và giải mã đơn giản, tuy nhiên lại cho phép đạt được đầy đủ cả tốc độ mã và độ phân tập cho các bộ tín hiệu phức.



Hình 5: Sơ đồ hệ thống MIMO sử dụng mã STBC của Alamouti.

Hình 5 mô tả cấu hình một hệ thống MIMO sử dụng mã STBC của Alamouti sử dụng hai anten phát và hai anten thu. Số lượng anten phát bị giới hạn bằng $N = 2$ trong khi số anten thu M có thể tăng lên bất kỳ để thu được độ lợi phân tập tốt hơn. Nguyên lý, mã hóa của Alamouti như sau: tại thời điểm k , anten phát thứ nhất phát đi s_k trong khi anten phát thứ hai phát đi s_{k+1} , với dấu $*$ biểu diễn phép toán lấy liên hợp phức. Tại thời điểm tiếp theo, anten phát thứ nhất phát đi $-s_{k+1}^*$, trong khi anten phát thứ hai phát đi s_k^* . Do tín hiệu phát đi từ hai anten phát trực giao với nhau nên việc giải mã được đơn giản hóa nhờ sử dụng các bộ kết hợp (combiner) tuyến tính kết hợp với tách tín hiệu hợp lẽ tối đa (MLD: Maximum Likelihood Detector).



Hình 6: Phẩm chất BER của STBC của Alamouti so với phương pháp MRC

Hình 6 so sánh phẩm chất BER của STBC Alamouti với hệ thống không sử dụng phân tập (SISO) và hệ thống phân tập thu (SIMO) sử dụng kết hợp tỉ lệ tối đa (MRC: Maximum Ratio Combining). Từ hình vẽ chúng ta có thể thấy rằng sơ đồ STBC của Alamouti cho phép cải thiện BER đáng kể so với hệ thống SISO. So với hệ thống sử dụng phân tập thu SIMO MRC, sơ đồ của Alamouti cho phép thu được cùng cấp độ phân tập (cùng độ dốc), tuy nhiên bị thiệt hại 3dB về công suất do điều kiện chuẩn hóa công suất phát sao cho tổng công suất phát từ 2 anten phát bằng với công suất phát trên một anten của hệ thống SIMO MRC [6]. Ngoài mã STBC của Alamouti, các sơ đồ mã STBC và STTC khác có thể tham khảo chi tiết thêm ở [7].

5. Kết luận và các hướng nghiên cứu mở

MIMO là một phương thức truyền dẫn dữ liệu mới cho phép tăng nhanh dung lượng của kênh truyền vô tuyến. Việc ứng dụng MIMO vào thông tin vô tuyến đã được triển khai ứng dụng và đề xuất cho các hệ thống 3G trở đi. Tuy nhiên, xây dựng được một hệ thống MIMO đạt được hiệu quả cao nhất vẫn đang là vấn đề được đặt ra. Một trong các hướng nghiên cứu vẫn cần tiếp tục phát triển là việc đề xuất ra các bộ tách tín hiệu MIMO hiệu quả, có phẩm chất BER tốt trong khi lại không yêu cầu độ phức tạp tính toán cao. Một hướng nghiên cứu khả thi khác là việc tích hợp mã không gian thời gian vào các hệ thống băng rộng với nhiễu đồng kênh (CCI) và nhiễu tương tác giữa các dấu (ISI) [7].

Tóm tắt

Cung cấp dung lượng vượt trên giới hạn Shannon, các hệ thống vô tuyến đa đầu vào đa đầu ra (MIMO: Multiple-Input Multiple-Output), đang được biết đến như một nền tảng cho công nghệ truyền dẫn thế hệ thứ 4 (4G). Sử dụng đa anten phát và đa anten thu, các hệ thống MIMO cho phép truyền dẫn dữ liệu với tốc độ lên tới gigabit trong các môi trường truyền sóng không có tia truyền thẳng (NLOS: Non Line of Sight). Bài báo này giới thiệu tổng quan về công nghệ MIMO, các kỹ thuật truyền dẫn tiềm ẩn bên trong, và các hướng ứng dụng của nó trong các hệ thống thông tin thế hệ tiếp theo.

Summary

With the integration of Internet and multimedia applications in next generation wireless communications, the demand for wide-band high rate communication services is growing. As the radio spectrum is limited, higher data rates can be achieved only by designing more efficient signaling techniques. Recent research on information theory showed that large gain in capacity of communication over wireless channels is feasible in multiple-input multiple output (MIMO) systems. The MIMO channel is constructed with multiple element array antennas at both ends of the wireless link. Space-time coding is a set of practical signal design techniques aimed at approaching the information theoretic capacity limit of MIMO channels.

Tài liệu tham khảo

[1].I. E. Telatar (1999), "Capacity of multiantenna Gaussian channels," *European Transactions on Telecommunications*, vol.10, no.6, pp.585–595, November/December.

[2].G.J. Foschini and M.J. Gans (1998), "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol.6, pp.311–335.

[3].G.J. Foschini (1996), "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Technical Journal*, pp.41–59, Autumn,.

[4].C.E.Shannon (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press.

[5].P.W.Wolniansky, G. Foschini, G. Golden, and R.A. Valenzuela (1998), "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel" in *Proceedings URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*, (IEEE, New York, NY, USA), pp. 295-300.

[6].S.M. Alamouti (1998), "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458,

[7]. B. Vucetic and J. Yuan (2003), *Space-Time Coding*, Wiley & Sons Ltd.