

Ứng dụng kỹ thuật điều chế chỉ số SM-MIMO trong nghiên cứu phát triển thiết bị mạng 5G

Nguyễn Quốc Dinh*

*ThS, Khoa Kỹ thuật điện tử, Học viện Công nghệ Bưu chính-Viễn thông

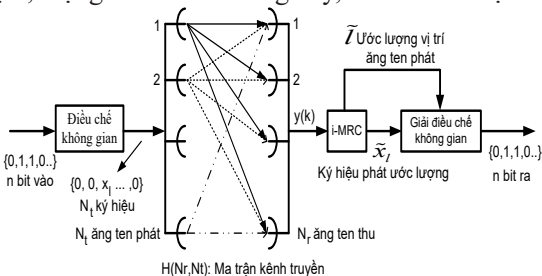
Received: 20/10/2023; Accepted: 10/11/2023; Published: 17/11/2023

Abstract: Existing multi-input multi-output systems (MIMO) using spatial modulation (SM) have proven superior as reducing complexity while increasing the performance of the radio communication system. The essence of this method is to perform modulation on spatial and temporal domains. The objective of this paper is to give an overview of index modulation SM-MIMO and and to introduce a research orientation to develop and extend this index modulation technique to the frequency domain by applying combined index modulation in traditional OFDM systems. In this way, we hope this new index modulation method will compromise spectrum efficiency, bit error quality, as well as processing complexity. It will create a premise for research and development of 5G network equipments.

Keywords: SM-MIMO systems, spatial modulation, index modulation.

1. Đặt vấn đề

Nhu cầu truyền dẫn, trao đổi dữ liệu tốc độ cao của người sử dụng đã đặt ra thách thức cho các hệ thống vô tuyến thế hệ sau. Nhiều kỹ thuật đã được nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần và tăng dung lượng kênh truyền như hệ thống MIMO (Multi-input multi-output) hay OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing). Gần đây, một phương pháp cải tiến hệ thống MIMO gọi là điều chế không gian (SM: Spatial modulation) [1] được đánh giá là ứng cử viên tiềm năng cho các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ sau, bao gồm cả mạng di động thế hệ 5, mạng cảm biến không dây, Wimax thế hệ 2....



Hình 1.1: Sơ đồ điều chế không gian.

Khác với các hệ thống MIMO thông thường, hệ thống MIMO sử dụng SM chỉ truyền luồng dữ liệu trên một hoặc một nhóm các ăng ten. Một điểm đặc biệt cần chú ý của SM là thông tin cần truyền đi có thể được ánh xạ vào chỉ số của một ăng ten hoặc một nhóm ăng ten và ánh xạ vào chòm sao tín hiệu điều chế cầu phương (QAM) hoặc khóa dịch pha (PSK). Chính vì vậy, các hệ thống SM vẫn đạt được độ lợi

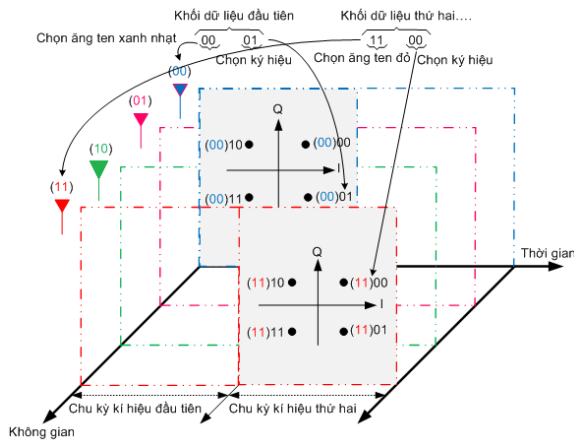
ghép kênh và phân tập không gian như các hệ thống MIMO thông thường trong khi chỉ kích hoạt một hoặc một số ăng ten phát trong toàn bộ ăng ten phát. Do đó số lượng các máy phát vô tuyến (RF) giảm đi, độ phức tạp của hệ thống sẽ giảm, dẫn tới giá thành hệ thống giảm và hiệu quả năng lượng của toàn hệ thống được cải thiện [2].

Các kỹ thuật SM- MIMO thông thường có thể được xem là một phương thức điều chế chỉ số. Hiện tại kỹ thuật này xuất hiện nhiều các biến thể mở rộng được đề xuất. Trong những hướng nghiên cứu mới nhất, người ta đã bắt đầu chú ý tới việc kết hợp SM-MIMO với các chỉ số khác. Tuy nhiên, tất cả các hướng đi này còn đang sơ khai và chưa đưa ra được các đánh giá một cách đầy đủ. Bài báo này nhằm đánh giá chi tiết về kỹ thuật SM-MIMO đến thời điểm hiện tại, đồng thời cũng đề cập tới hướng phát triển và mở rộng kỹ thuật điều chế này sang cả miền tần số bằng cách áp dụng điều chế chỉ số vào các sóng mang con (tương tự các sóng mang con trong kỹ thuật điều chế OFDM truyền thống). Bằng cách này, tác giả hy vọng trong tương lai sẽ có thêm các công nghệ truyền dẫn vô tuyến mới cho phép dung hòa giữa hiệu quả phổ tần, phẩm chất lỗi bit, cũng như độ phức tạp tính toán, xử lý tín hiệu.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Kỹ thuật điều chế không gian (SM)

Kỹ thuật điều chế không gian được giới thiệu lần đầu tiên vào năm 2001. Sau đó, nhiều biến thể khác nhau của nó đã được nghiên cứu trong tài liệu tham khảo[2-4].



Hình 2.1. Minh họa SM-MIMO với bốn ăng-ten phát 4-QAM

Trong hệ thống SM, máy phát kích hoạt một trong số n_T phần tử ăng ten phát tại mỗi chu kỳ tín hiệu và phát đi một tín hiệu được điều chế biên độ cầu phương (QAM) hoặc khóa dịch pha (PSK) với chòm sao tín hiệu M điểm. Nhờ đó, thông tin được truyền đi bởi cả ký hiệu được điều chế và chỉ số (hay vị trí) của phần tử ăng ten được kích hoạt để phát đi ký hiệu này. Nguyên tắc mã hóa (ánh xạ) các bit thông tin vào các chỉ số ăng ten (miền không gian) và chỉ số ký hiệu (miền thời gian) trong SM-MIMO được minh họa ở hình 2 cho trường hợp $n_T = 4$ ăng-ten phát và chòm sao 4-QAM (kích thước $M = 4$). Theo hình 2.1 ta thấy bộ mã hóa xử lý các bit thông tin theo từng khối bốn bit một. Một cách tổng quát, tốc độ truyền dẫn của phương pháp này là $R_{SM} = (\log_2 n_T + \log_2 M)$ bit cho mỗi lần sử dụng kênh (bpcu: bit per channel use).

Ưu điểm chính của SM là không cần đồng bộ ăng ten đồng thời loại bỏ nhiễu đồng kênh do tại một thời điểm chỉ có một ăng ten được kích hoạt và phát tín hiệu. Chỉ số của ăng ten phát lúc này được sử dụng để mang thông tin, cho nên so với hệ thống đơn ăng ten truyền thống, hệ thống này thu được tăng ích ghép kênh theo không gian. Tuy nhiên, hiệu suất phổ tần không cao vì phụ thuộc vào logarit cơ số 2 của số ăng ten phát. Đồng thời hệ thống MIMO sử dụng SM chỉ có phân tập thu mà không có phân tập phát. Trong khi đó, điều này thực sự cần thiết khi triển khai các mạng di động.

Một phân tích so sánh phẩm chất lỗi bit của các hệ thống sử dụng kỹ thuật điều chế SM và VBLAST với cùng hiệu suất phổ tần đã cho kết quả thú vị. Đó là, khi tách sóng bằng thuật toán ML, dù cả ba hệ thống có BER tương đương nhau, bộ giải mã ML của

hệ thống SM có độ phức tạp thấp hơn so với bộ giải mã ML của hệ thống VBLAST do không phải chịu tác động của nhiễu đồng kênh. Một phân tích khác lại cho thấy với cùng một hiệu suất phổ tần, hệ thống SM có hiệu suất năng lượng cao hơn so với các hệ thống VBLAST do các hệ thống VBLAST cần tiêu thụ một công suất lớn hơn so với hệ thống SM để đạt cùng giá trị BER.

2.2. Các biến thể của SM

Trong [3] Jeganathan và các cộng sự đề xuất một kỹ thuật, được xem là trường hợp đặc biệt của SM, gọi là khóa dịch không gian (SSK: Space Shift Keying). Trong hệ thống SSK, người ta phát đi một mức năng lượng nào đó từ một ăng ten được lựa chọn phù hợp với các bit thông tin cần truyền đi mà không phát đi các ký hiệu được điều chế QAM hay PSK. Mặc dù cả SM và SSK được chứng minh là có phẩm chất lỗi bit tốt hơn so với một số kỹ thuật MIMO đã đề nghị. Tuy nhiên để chống ảnh hưởng của pha đỉnh thì hai cấu trúc đòi hỏi phải thiết lập số ăng ten thu đủ lớn. Trong [4], các kỹ thuật truyền dẫn SM/SSK được đề xuất bằng cách tăng số lượng ăng ten kích hoạt trong cụm ăng ten phát nhằm cải thiện tốc độ truyền tin. Tuy nhiên, do việc chọn nhóm ăng ten kích hoạt tại đầu phát làm cho việc giải mã tín hiệu tại đầu thu trở nên phức tạp hơn. Một số tác giả khác lại đưa ra các phương pháp mã hóa sử dụng số lượng ăng ten truyền khác nhau trong từng khoảng thời gian tín hiệu khác nhau so với hệ thống trong [3]. Lúc này, tốc độ truyền dẫn là hàm tuyến tính của tổng số ăng ten phát. Điểm hạn chế của phương pháp này là số lượng các nhánh máy phát phải bằng số lượng ăng ten phát thì mới đạt tốc độ truyền dẫn cao nhất. Điều này làm cho quá trình mã hóa giải mã phức tạp hơn và lượng điện năng tiêu thụ giảm không đáng kể.

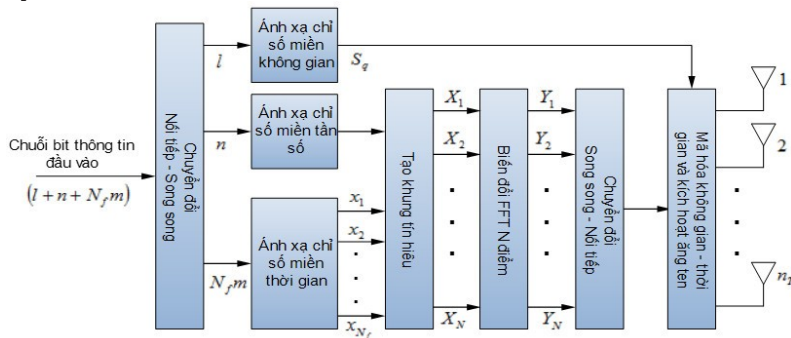
Trong khi đó, Sugiura và các cộng sự mở rộng khái niệm SM trên miền thời gian và không gian, tạo ra kiến trúc mới gọi là “Khóa dịch thời gian – không gian” (STSK: Space time shift keying). Trong hệ thống STSK, các bit thông tin được ánh xạ vào cả chỉ số của các ma trận phân tán và chỉ số ký hiệu trong chòm sao tín hiệu. Hệ thống này có ưu điểm là dung hòa giữa bậc phân tập và hiệu suất phổ tần một cách mềm dẻo thông qua việc tối ưu hóa số lượng, kích thước của các ma trận phân tán và số lượng ăng ten phát và thu. Tại máy thu, có thể sử dụng tách sóng ML đơn ăng ten để khôi phục tín hiệu. Tuy nhiên, các hệ thống này gặp vấn đề trong việc thiết kế các ma trận phân tán, đặc biệt là khi số lượng ăng

ten phát và/hoặc kích thước chòm sao tín hiệu tăng lên. Chính vì lý do đó, nhiều nhà nghiên cứu đã đưa ra đề xuất cải tiến hiệu quả trong việc thiết kế các ma trận phân tán. Trong [5], các tác giả đề xuất kỹ thuật SM-OSTBC (Spatially Modulated Orthogonal Space-Time Block Coding) cho phép thiết kế ma trận từ mã chòm sao tín hiệu không gian (SC: Spatial Constellation) mà không cần tới sự trợ giúp của máy tính. Mã SM-OSTBC có thể được áp dụng cho hệ thống MIMO có trên ba ăng ten phát và đạt được phân tập phát bậc hai.

2.3. Kỹ thuật SM-MIMO mở rộng sang miền tần số

Kỹ thuật OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) có các ưu điểm chính như: 1) giảm tác động của hiện tượng pha đỉnh chọn lọc tần số, từ đó làm giảm ảnh hưởng của hiện tượng nhiễu liên ký hiệu (ISI: intersymbol interference), tối phẩm chất lỗi bit của hệ thống và 2) bộ san bằng kênh (equalizer) ở máy thu đơn giản. Tuy nhiên, hệ thống OFDM yêu cầu sự đồng bộ chặt chẽ giữa máy phát và máy thu.

Trong hình 2.2, chúng tôi đề cập tới một mô hình phối hợp điều chế chỉ số trong miền tần số dựa trên kỹ thuật OFDM với SM-MIMO.



Hình 2.2. Cấu trúc máy phát SM-MIMO sử dụng OFDM.

Trong mô hình này, dữ liệu không chỉ truyền qua miền không gian và thời gian, mà còn truyền trên miền tần số. Các bit thông tin cần truyền đi được ánh xạ trên cả ba miền: không gian (thông qua ăng-ten), tần số (thông qua các sóng mang con), và thời gian (thông qua các điểm trong chòm sao tín hiệu). Cụ thể là, mỗi nhóm $(l + n + N_f \cdot m)$ bit thông tin được chia thành l bit trong miền không gian, n bit trong miền tần số, và $N_f \cdot m$ bit trong miền thời gian. Nói cách khác, mô hình hệ thống này truyền tải thông tin không chỉ bằng các ký hiệu dữ liệu như trong OFDM truyền thống mà còn bằng chỉ số của các sóng mang con tích cực được sử dụng để truyền các ký hiệu M-ary tương ứng.

3. Kết luận

Các hệ thống điều chế chỉ số SM-MIMO mang lại những lợi thế hấp dẫn so với các đối thủ truyền thống, bao gồm giảm độ phức tạp của máy thu, linh hoạt, hiệu suất phổ và hiệu suất năng lượng cao. Từ góc độ này, SM-MIMO nổi lên như một công nghệ MIMO xanh và tiết kiệm năng lượng. Hiệu suất năng lượng tính bằng Mb/s/J, cải thiện lên tới 46% so với V-BLAST cho các loại trạm gốc (BS) khác nhau được trang bị nhiều ăng-ten. Dù SM có tồn tại nhược điểm như đã phân tích, tác giả vẫn kết luận rằng SM-MIMO mang lại sự cân bằng thú vị giữa độ phức tạp mã hóa/giải mã, hiệu suất phổ và hiệu suất lỗi. Kết quả là, công nghệ SM-MIMO đang được coi là ứng cử viên để phát triển mạng không dây thế hệ mới tiết kiệm năng lượng và phổ tần.

Mô hình điều chế chỉ số kết hợp OFDM cũng đã chỉ ra rằng tiềm năng của hướng nghiên cứu này có thể mang lại những lợi thế hấp dẫn so với OFDM cổ điển, vốn là một phần không thể thiếu trong nhiều tiêu chuẩn truyền thông không dây và cũng được coi là ứng cử viên mạnh mẽ cho sự ra đời các thiết bị mạng 5G mới.

Tài liệu tham khảo

- [1] M.Di Renzo, H.Haas, A.Ghrayeb, S.Sugiura, and L.Hanzo, "Spatial Modulation for Generalized MIMO: Challenges, Opportunities, and Implementation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, pp. 56-103, 2014.
- [2] A.Stavridis, S.Sinanovic, M.Di Renzo, H.Haas, and P.Grant, "An energy saving base station employing spatial modulation," in *CAMAD, 2012 IEEE 17th International Workshop on*, 2012, pp. 231-235.
- [3] J.Jeganathan, A.Ghrayeb, L.Szczecinski, and A.Ceron, "Space shift keying modulation for MIMO channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 3692-3703, 2009.
- [4] F.Jinlin, H.Chunping, X.Wei, Y.Lei, and H.Yonghong, "Generalised spatial modulation with multiple active transmit antennas," in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE*, 2010, pp. 839-844.
- [5] L.Minh-Tuan, N.Vu-Duc, M.Hong-Anh, and T.Xuan Nam, "Spatially Modulated Orthogonal Space-Time Block Codes with Non-Vanishing Determinants," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 62, pp. 85-99, 2014.