**Giới thiệu về kỹ thuật điều chế không gian**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Lê Minh Tuấn  Sở KH & CN Hà Nội  Số 5, Nguyễn Trãi, Hà Đông, Hà Nội  Email: tuan.hdost@gmail.com | Nguyễn Tiến Đông, Trần Xuân Nam  Học viện Kỹ thuật Quân sự  100 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội  Email: [qttdong@gmail.com](mailto:qttdong@gmail.com) | Nguyễn Quốc Dinh, Lê Nhật Thăng  Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông  Nguyễn Trãi, Hà Đông, Hà Nội  Email: dinhptit@gmail.com |

**Abstract:** Multiple-Input Multiple Output (MIMO) transmission techniques play a critical role in improving error performance and data rate in modern wireless communication systems, yet at the cost of high system complexity. Among various multiple-antenna transmission approaches, Spatial Modulation (SM), a recently proposed technique, can offer improved data rates compared to conventional Single–Input–Single–Output (SISO) systems and robust error performance with very low system complexity. This paper provides a brief introduction to SM, describes how it works, how signal detection in a SM system is performed and evaluates energy efficiency of SM technique.

**Tóm tắt:** Các kỹ thuật truyền dẫn nhiều lối vào nhiều lối ra (MIMO) đóng một vai trò quan trọng trong việc cải thiện phẩm chất lỗi bit và nâng cao tốc đọ dữ liệu trong các hệ thống thông tin vô tuyến hiện đại, nhưng phải trả giá về độ phức tạp cao của hệ thống. Trong số các hệ phương thức truyền dẫn nhiều ăng ten, điều chế không gian (SM), một kỹ thuật mới được đề xuất gần đây, có thể giúp cải thiện tốc độ dữ liệu so với các hệ thống đơn ăng ten (SISO) truyền thống và có phẩm chất lỗi tốt với độ phức tạp hệ thống thấp. Bài báo này giới thiệu sơ lược về kỹ thuật SM, mô tả cách thức hoạt động của nó, mô tả cách khôi phục tín hiệu trong một hệ thống SM đồng thời đánh giá hiệu suất năng lượng của kỹ thuật này.

1. **Giới thiệu**

Các kỹ thuật truyền dẫn nhiều đầu vào – nhiều đầu ra (MIMO) với nhiều ăng ten được trang bị ở máy phát và/hoặc máy thu đã thu hút được sự quan tâm nghiên cứu rất lớn trong thập kỷ vừa qua, cả trong học thuật và ứng dụng thực tế [1]. Người ta nhận thấy rằng các hệ thống MIMO hiện nay có các nhược điểm chính là độ phức tạp và giá thành hệ thống cao. Các nguyên nhân chính dẫn đến việc tăng độ phức tạp và giá thành của các hệ thống MIMO bao gồm [2]:

* Nhiễu xuyên kênh (ICI), gây ra bởi việc chống lấn giữa nhiều luồng tín hiệu độc lập được phát đi từ nhiều ăng ten.
* Đồng bộ giữa các ăng ten (IAS), là giả thiết căn bản cho các phương pháp mã hóa không gian – thời gian.
* Nhiều máy thu phát tần số vô tuyến (RF), dùng để phát đi các tín hiệu một cách đồng thời và thường có giá thành cao.

Một trong những kỹ thuật truyền dẫn MIMO mới được Mesleh và các cộng sự đề xuất gần đây là kỹ thuật điều chế không gian [3]-[4]. Kỹ thuật này được phát triển với mục tiêu giảm độ phức tạp và giá thành của các hệ thống nhiều ăng ten mà không làm suy giảm phẩm chất lỗi bit đồng thời vẫn đảm bảo tốc độ dữ liệu đủ lớn. Trong hệ thống SM, máy phát kích hoạt một trong số  phần tử ăng ten phát tại mỗi chu kỳ tín hiệu và phát đi một tín hiệu được điều chế bằng các kỹ thuật điều chế truyền thống, như điều chế biên độ cầu phương (QAM) hoặc khóa dịch pha (PSK) với chòm sao tín hiệu  điểm [2]. Bằng cách đó, thông tin được truyền đi bởi cả ký hiệu được điều chế và chỉ số của ăng ten được kích hoạt để phát đi ký hiệu này. Một trường hợp đặc biệt của SM, được gọi là khóa dịch không gian (SSK), đã được đề xuất bởi Jeganathan và các cộng sự trong [6] bằng cách 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. Sự đơn giản và hiệu quả của kỹ thuật SM được thể hiện qua những đặc điểm sau [2]:

* Tại mỗi chu kỳ tín hiệu, chỉ một ăng ten phát được kích hoạt để truyền dữ liệu. Điều này giúp cho SM tránh hoàn toàn hiện tượng ICI, loại bỏ yêu cầu đồng bộ giữa các ăng ten phát và chỉ cần sử dụng một máy thu phát RF. Hơn nữa, việc chỉ kích hoạt một ăng ten phát cho phép hệ thống SM thực hiện tách sóng hợp lẽ tối ưu (ML) tại máy thu với độ phức tạp thấp [5].
* Vị trí không gian của mỗi ăng ten phát trong mảng ăng ten được sử dụng như là một nguồn tin thông qua việc ánh xạ một – một giữa các bit thông tin cần truyền đi với chỉ số của các ăng ten phát. Vì vậy, kỹ thuật SM cho phép chúng ta thu được tăng ích ghép kênh theo không gian khi so với hệ thống đơn ăng ten truyền thống.

Như thảo luận trong [7], các hệ thống thông tin vô tuyến trước đây và hiện nay luôn tập trung để nâng cao hiệu suất phổ tần, một thông số có liên hệ chặt chẽ với dung lượng Shannon [8]. Hiệu suất phổ tần được xem là một trong những chỉ số phẩm chất chính đóng vai trò quan trọng trong thiết kế và tối ưu các hệ thống thông tin vô tuyến nói chung và các mạng thông tin tế bào nói riêng. Vì vậy, hầu hết các công nghệ truyền dẫn và giao thức trong các mạng thông tin di động và tế bào đang hoạt động đều được thiết kế dựa trên nhiều yếu tố như dung lượng, chất lượng dịch vụ, khả năng mở rộng, …, mà không xét đến năng lượng tiêu thụ. Với phương pháp thiết kế này, các hệ thống thông tin tế bào hiện tại chỉ có thể tiết kiệm được năng lượng tiêu thụ bằng cách đánh đổi chất lượng hoặc dung lượng [7]. Do đó, các công nghệ truyền dẫn và giao thức cho các mạng thông tin tế bào thế hệ mới cần phải được thiết kế và tối ưu bằng cách sử dụng nhiều tiêu chí phẩm chất hơn, đặc biệt là tiêu chí về năng lượng tiêu thụ.

Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu về kỹ thuật SM với các nội dung chính bao gồm: i) mô tả phương thức điều chế, ánh xạ thông tin trong một hệ thống SM; ii) mô tả các thuật toán khôi phục tín hiệu trong một hệ thống SM đồng thời đánh giá hiệu suất năng lượng của kỹ thuật thông qua mô phỏng máy tính này nhằm làm rõ những ưu điểm của kỹ thuật SM.

1. **Phương thức hoạt động và mô hình hệ thống**
   1. Phương thức hoạt động của hệ thống SM

QAM/PSK Modulator











Spatial Modulation













*Hình 1: Minh họa về máy phát điều chế không gian*

Hình 1 minh họa nguyên lý hoạt động của một máy phát điều chế không gian. Trong mỗi chu kỳ tín hiệu, một ăng ten được kích hoạt và phát đi một ký hiệu trong chòm sao QAM hoặc PSK. Theo Hình 1,  là cụm dữ liệu nhị phân đến bao gồm  bit thông tin, với  là kích thước chòm sao QAM/PSK. Cụm bit thông tin  sẽ được tách ra thành 2 phần: một phần là bao gồm  bit được ánh xạ vào một ký hiệu QAM/PSK , , phần còn lại  bao gồm  bit sẽ xác định ăng ten nào được kích hoạt để phát đi .

Với  ăng ten phát và sử dụng điều chế 4-QAM, hệ thống SM có thể truyền đi 4 bit trong mỗi chu kỳ tín hiệu với phép ánh xạ được mô tả trên Bảng 1. Ví dụ, khi cụm bit đầu vào là  thì ký hiệu  sẽ được phát đi từ ăng ten số 1. Nếu 2 bit đầu đổi từ  thành  thì ký hiệu  sẽ được phát đi từ ăng ten số 2.

*Bảng 1: Minh họa phép ánh xạ các cụm bit thông tin vào chỉ số ăng ten và ký hiệu được điều chế 4-QAM*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Cụm bit*** | ***Cụm bit*** | ***Chỉ số ăng ten*** | ***Cụm bit*** | ***Ký hiệu phát*** |
| 0000 | 00 | 1 | 00 |  |
| 0001 | 00 | 1 | 01 |  |
| 0010 | 00 | 1 | 10 |  |
| 0011 | 00 | 1 | 11 |  |
| 0100 | 01 | 2 | 00 |  |
| 0101 | 01 | 2 | 01 |  |
| 0110 | 01 | 2 | 10 |  |
| 0111 | 01 | 2 | 11 |  |
| 1000 | 10 | 3 | 00 |  |
| 1001 | 10 | 3 | 01 |  |
| 1010 | 10 | 3 | 10 |  |
| 1011 | 10 | 3 | 11 |  |
| 1100 | 11 | 4 | 00 |  |
| 1101 | 11 | 4 | 01 |  |
| 1110 | 11 | 4 | 10 |  |
| 1111 | 11 | 4 | 11 |  |

* 1. Mô hình hệ thống

Trong hệ thống SM, ta biểu diễn véc tơ tín hiệu phát  như sau [5]:

 (1)

Trong đó  biểu thị chuyển vị của véc tơ .  bao gồm  phần tử trong đó chỉ có một phần tử duy nhất khác 0 là  tại vị trí ăng ten thứ , . Chúng ta giả thiết công suất phát được chuẩn hóa sao cho . Phép ánh xạ giữa  và  là phép ánh xạ một – một. Véc tơ  được phát đi qua kênh MIMO để tới máy thu.

Véc tơ tín hiệu thu, , kích thước  được cho bởi biểu thức sau:

 (2)

Trong đó,  là ma trận kênh truyền kích thước  với  là cột thứ . Mỗi phần tử của ma trận  được giả thiết là các biến ngẫu nhiên độc lập đồng nhất (i.i.d.) có phân bố Gauss với trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng 1. Nói cách khác,  là một kênh MIMO pha đinh phẳng.  là véc tơ tạp âm kích thước  với các phần tử được giả thiết là các biến ngẫu nhiên i.i.d. có phân bố Gauss với trị trung bình bằng 0 và phương sai .  biểu thị tỷ số công suất tín hiệu trên công suất tạp âm (SNR) tại máy thu.

Trong phạm vi bài báo này, chúng ta giả thiết kênh truyền là cận tĩnh, tức là  giữ không đổi trong một khoảng  chu kỳ tín hiệu và thay đổi độc lập sau mỗi  chu kỳ.

1. **Các thuật toán khôi phục tín hiệu**

Sử dụng kỹ thuật điều chế không gian, dữ liệu được mã hóa trong một ký hiệu QAM hoặc PSK và một chỉ số ăng ten. Vì vậy, việc khôi phục tín hiệu phát được thực hiện bằng cách ước lượng cả chỉ số ăng ten phát ký hiệu QAM/PSK. Trong mục này chúng tôi trình bày hai thuật toán khôi phục tín hiệu trong điều chế không gian.

* 1. Thuật toán khôi phục tín hiệu i-MRC:

Trong thuật toán này, với giả thiết máy thu biết chính xác các hệ số kênh truyền, véc tơ tín hiệu thu  được lần lượt tính thử với các hệ số kênh truyền nhằm ước lượng cả ký hiệu thông tin từ phía phát và vị trí ăng ten phát. Thuật toán được mô tả theo các bước như sau [3]:

*Bước 1: Tính với .*

*Bước 2: Xác định chỉ số ăng ten phát theo biểu thức .*

*Bước 3: Xác định ký hiệu phát theo biểu thức , với  là toán tử quyết định hay lượng tử hóa.*

*Bước 4: Khôi phục cụm bit thông tin truyền đi dựa vào  và  .*

Theo thảo luận và chứng minh trong [5], kết quả mô phỏng sử dụng thuật toán i-MRC chỉ đúng trong trường hợp các cột của ma trận kênh truyền thỏa mãn điều kiện , trong đó  biểu thị chuẩn (norm) Frobenius của véc tơ . Áp dụng bất đẳng thức Cô si, ta thấy rằng  chính là điều kiện cần để việc ước lượng chỉ số ăng ten không bị sai trong trường hợp không có tạp âm. Một cách để đảm bảo điều kiện này là tạo ra một kênh truyền MIMO có ràng buộc thông qua việc chuẩn hóa kênh trước khi truyền tin [5], tức là kênh truyền được chuẩn hóa sao cho , với  là một hằng số.

* 1. Thuật toán khôi phục tín hiệu tối ưu:

Bộ tách tối ưu tìm kiếm đồng thời cả chỉ số ăng ten và tín hiệu phát dựa trên nguyên tắc hợp lẽ tối ưu (ML) như sau [5]:

 (3)

với ,  là hàm mật độ phân bố xác suất của  khi biết trước  và .

Công thức (3) cho ta thấy rằng, phương pháp điều chế SM cho phép thực hiện tách sóng ML một cách đơn giản do đã loại trừ hoàn toàn nhiễu đồng kênh.

1. **Kết quả mô phỏng và thảo luận**

Trong mục này, chúng tôi sử dụng mô phỏng Monte Carlo để đánh giá phẩm chất lỗi bit (BER) cũng như hiệu suất năng lượng của hệ thống SM và so sánh với phẩm chất lỗi bit và hiệu suất năng lượng của hệ thống VBLAST [15]. Chúng tôi giả thiết rằng thông tin về trạng thái kênh truyền được máy thu biết rõ. Để thuận tiện, chúng tôi ký hiệu một hệ thống MIMO với ăng ten phát và  ăng ten thu là .

1. *Đánh giá phẩm chất lỗi bit*



*Hình 2: Các đường BER của hệ thống SM (4, 4) so với các đường BER của các hệ thống VBLAST (2, 4) và (4, 4); hiệu suất phổ tần 4 bpcu.*

Trong Hình 2 chúng tôi so sánh phẩm chất lỗi bit của hệ thống SM (4, 4) với phẩm chất lỗi bit của các hệ thống VBLAST (2, 4) và (4, 4). Các hệ thống SM (4, 4) và VBLAST (2, 4) sử dụng điều chế 4-QAM trong khi hệ thống VBLAST (4, 4) sử dụng điều chế BPSK để đạt hiệu suất phổ tần là 4 bit trong mỗi lần sử dụng kênh truyền (bpcu). Hệ thống SM (4, 4) được tách sóng bằng các thuật toán i-MRC và ML như trình bày ở trên. Cả hai hệ thống VBLAST được tách sóng bằng thuật toán ML và sai số bình phương trung bình tối thiểu triệt nhiễu nối tiếp (MMSE-SIC) [15].

Từ Hình 2 ta thấy rằng cả hai hệ thống VBLAST khi được tách sóng bằng MMSE-SIC đều có BER thấp hơn hệ thống SM khi được tách sóng bằng i-MRC. Việc phẩm chất lỗi bit tốt hơn này bị đánh đổi bởi độ phức tạp cao hơn của thuật toán MMSE-SIC so với thuật toán i-MRC. Trái lại, khi được tách sóng bằng thuật toán ML, hệ thống SM lại có BER thấp hơn so với cả hai hệ thống VBLAST.



*Hình 3: Các đường BER của hệ thống SM (8, 4) so với các đường BER của các hệ thống VBLAST (3, 4) và (6, 4); hiệu suất phổ tần 6 bpcu.*

Trong Hình 3 chúng tôi so sánh phẩm chất lỗi bit của hệ thống SM (8, 4) với phẩm chất lỗi bit của các hệ thống VBLAST (3, 4) và (6, 4). Các hệ thống sử dụng các kỹ thuật điều chế khác nhau (xem Hình 3) để đạt hiệu suất phổ tần là 6 bpcu. Từ Hình 3 ta thấy rằng hệ thống VBLAST (3, 4) được tách sóng bằng MMSE-SIC vẫn có BER thấp hơn hệ thống SM được tách sóng bằng i-MRC. Trái lại, khi được tách sóng bằng thuật toán ML, cả ba hệ thống có BER tương đương nhau. Tuy nhiên, bộ giải mã ML của hệ thống SM có độ phức tạp thấp hơn so với bộ giải mã ML của các hệ thống VBLAST do không phải chịu tác động của nhiễu đồng kênh.

1. *Đánh giá hiệu suất năng lượng*

Ngành công nghiệp thông tin di động toàn cầu đang phát triển với tốc độ cao. Hiện nay đã có khoảng 6,8 tỷ thuê bao di động trên toàn thế giới [9]. Rõ ràng là với lượng thuê bao lớn như vậy, năng lượng tiêu thụ của các mạng di động trên thế giới cũng tăng cao, góp phần làm trầm trọng thêm hiện tượng nóng lên của trái đất. Trước tình hình đó, dự án EARTH [10]- [12] đã được tiến hành xây dựng một phương pháp đánh giá, so sánh hiệu suất năng lượng của các phương pháp thiết kế mạng thông tin tế bào vô tuyến.

Một thông số quan trọng trong đánh giá hiệu suất năng lượng của các mạng di động là tổng công suất tiêu thụ của một trạm gốc (BTS). Công suất này được tính bằng công suất bức xạ và công suất tiêu tán của các mạch điện cấu thành. Trong các hệ thống MIMO, công suất tiêu tán được quyết đinh bởi số lượng các máy thu phát RF, hay số lượng các bộ khuếch đại công suất [13]-[14]. Mô hình công suất EARTH biểu diễn tổng công suất tiêu thụ của một trạm gốc theo công suất phát RF như sau [14]:

 (4)

Trong đó,  là số lượng máy thu phát RF,  là công suất tiêu thụ tối thiểu của một máy thu phát RF khi trạm gốc hoạt động,  biểu thị độ dốc của đường đặc tuyến công suất tiêu thụ phụ thuộc tải,  là công suất phát của một máy phát RF,  là công suất phát lớn nhất của một ăng ten, và  là công suất tiêu thụ của trạm gốc ở chế độ ngủ (sleep). Thông thường, ta chọn  bằng  [14].

*Bảng 2: Các thông số mô phỏng*

|  |  |
| --- | --- |
| **Thông số mô phỏng** | **Giá trị** |
| Kiểu trạm BTS | Macro đô thị |
| Thông số mô hình công suất | SOTA 2010 [16] |
| Tần số sóng mang | 2000 MHz |
| Mô hình suy hao đường truyền | 3GPP NLOS [50] với độ cao ăng ten trạm BTS là 28 m. |
| Băng thông | 5 MHz |
| Nhiệt độ | 298 K |
| Khoảng cách từ BTS tới thiết bị mobile | 250 m |
| Công suất tiêu thụ tối đa | 1350 W |

Hình 4 trình bày phẩm chất lỗi bit của các hệ thống SM (4, 4), (8, 4) và các hệ thống VBLAST (2, 4), (4, 4), (3, 4) và (6, 4) dựa trên mô hình công suất EARTH với giả thiết các hệ thống này được triển khai tại một trạm BTS macro đô thị. Các thông số mô phỏng được tổng hợp trong Bảng 2. Các hệ thống SM chỉ trang bị 1 máy thu phát RF trong khi các hệ thống VBLAST trang bị  máy thu phát RF.

Kết quả trên Hình 4 cho ta 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 được cùng một giá trị BER. Cụ thể, tại BER= 10-4 và hiệu suất phổ tần 4 bpcu, hệ thống VBLAST (2, 4) và (4, 4) cần tương ứng tiêu thụ một mức công suất lớn hơn khoảng 1,2 dB và 3 dB so với hệ thống SM. Một điểm đặc biệt là khi tăng hiệu suất phổ tần lên 6 bpcu thì cả hai hệ thống VBLAST (3, 4) và (6, 4) đều không thể đạt được BER dưới 10-4 mặc dù đã tiêu thụ công suất tối đa là 1350 W (61,3 dBm).



*Hình 4: Các đường BER của các hệ thống SM (4, 4), (8,4), và các hệ thống VBLAST (2, 4), (4, 4), (3, 4) và (6, 4) theo công suất tiêu thụ của một trạm BTS macro đô thị.*

1. **Kết luận**

Trong bài báo này chúng tôi giới thiệu về phương thức hoạt động, các thuật toán giải mã khôi phục tín hiệu và đánh giá hiệu suất năng lượng của kỹ thuật điều chế không gian. Kỹ thuật điều chế không gian khai thác được tăng ích ghép kênh của hệ thống MIMO đồng thời khác phục triệt để hiện tượng ICI. Nhờ đó, các bộ giải mã tín hiệu có độ phức tạp tính toán thấp. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi hiệu suất phổ tần nhỏ, hệ thống SM có thể đạt phẩm chất lỗi bit tốt hơn so với hệ thống VBLAST. Hơn nữa, hệ thống SM có lợi thế lớn về hiệu suất năng lượng so với hệ thống VBLAST. Vì vậy, kỹ thuật SM có nhiều ưu thế trong các hệ thống thông tin vô tuyến ghép kênh theo không gian thân thiện với môi trường.

Tuy nhiên, điều chế không gian cũng có một số nhược điểm lớn bao gồm: i) độ tăng ích ghép kênh theo không gian thấp; ii) và không có phân tập phát. Đây là các yếu điểm hiện đang được các nhà khoa học trong và ngoài nước tập trung nghiên cứu, khắc phục.

**Tài liệu tham khảo**

[1] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. H. Gerstacker, and P. A. Hoher, “Multiple–antenna techniques for wireless communications – A comprehensive literature survey”, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 11, no. 2, pp. 87–105, 2nd quarter 2009.

[2] M. Di Renzo, H. Haas, and P. M. Grant, “Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: A survey,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 12, pp. 182191, Dec. 2011.

[3] R. Mesleh, H. Haas, C. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation – a new low complexity spectral efficiency enhancing technique,” in *Proc. First International Conf. Commun. Netw.*, Beijing, China, pp. 1–5, Oct. 2006.

[4] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, July 2008.

[5] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, “Spatial modulation: optimal detection and performance analysis,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545–547, Aug. 2008.

[6] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron, “Space shift keying modulation for MIMO channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692–3703, July 2009.

[7] M. Di Renzo, H. Haas, A. Ghrayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo, “Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation”, *Proc. Of the IEEE,* vol. 102, no. 1, pp. 56 – 103, Jan. 2014.

[8] G. Y. Li, Z. Xu, C. Xiong, C. Yang, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, “Energy–efficient wireless communications: Tutorial, survey, and open issues”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 6, pp. 28–35, Dec. 2011.

[9] International Telecommunication Union, “The world in 2013: ICT Facts and Figures,” tải về tại http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/facts/default.aspx.

[10] M. Gruber, O. Blume, D. Ferling, D. Zeller, M. A. Imran, and E. Calvanese-Strinati, “EARTH — Energy Aware Radio and Network Technologies,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Cannes, France, 2008.

[11] J. T. Louhi and H.-O. Scheck, “Energy efficiency of cellular networks,” in *Proc. Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Lapland, Finland, 2008.

[12] L.M. Correia, D. Zeller, O. Blume, D. Ferling, Y. Jading, I. Godor, G. Auer, L. Van der Perre, “Challenges and Enabling Technologies for Energy Aware Mobile Radio Networks,” *IEEE Communications Magazine* special issue on green radio, pp. 66-72, Nov. 2010.

[13] A. Stavridis, S. Sinanovic, M. Di Renzo, H. Haas, and P. M. Grant, “An energy saving base station employing spatial modulation,” *IEEE Int. Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks*, pp. 1-6, Sep. 2012.

[14] A. Stavridis, S. Sinanovic, M. Di Renzo, and H. Haas, “Energy evaluation of spatial modulation at a multi-antenna base station,” *IEEE Veh. Technol. Conf. - Fall*, pp. 1-5, Sep. 2013.

[15] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, “Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication architecture”, *Electron.Lett*., vol. 35, no. 1, pp. 14-15, Jan. 1999.

[16] G. Auer, V. Giannini, I. Godor, P. Skillermark, M. Olsson, M. Imran, D. Sabella, M. Gonzalez, C. Desset, and O. Blume, “Cellular energy efficiency evaluation framework,” *Vehicular Technology Conference*, pp. 1–6, Yokohama, May 2011.