## 3.6 Mã hóa không gian thời gian lớp BLAST

Sau khi khám phá ra khi các đường tán xạ đủ lớn kênh truyền đa đường vô tuyến có khả năng cung cấp một dung lượng khá lớn nhờ vào các kiến trúc xử lý thích hợp. Năm 1996, G.J. Foschisi thuộc phòng thí nghiệm Bell đã đưa ra kiến trúc D-BLAST (Diagonal-Bell Laboratories Layered Space-Time) sử dụng đa anten phát và thu với kỹ thuật mã hóa phân lớp theo đường chéo, từng khối dữ liệu sẽ được truyền theo đường chéo. Trong môi trường tán xạ Rayleigh, kiến trúc này có thể cung cấp dung lượng tăng tuyến tính theo số anten phát và anten thu (với giả sử rằng số anten phát và thu là bằng nhau) và có thể đạt tới gần 90% dun glượng Shanon. Tuy nhiên sự phức tạp của kiến trúc D-BLAST khó có thể thực hiện được. Năm 1996 Wolniansky cùng với Foschini, Golden và Valenzuela đã đưa ra kiến trúc V-BLAST, kiến trúc này đã thực hiện thực thời gian thực trong phòng thí nghiệm Bell với hiệu suất băng thông lần đầu tiên lên tới 20-40 bps/Hz tại mức tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR từ 24 đến 34 dB

### 3.6.1 Kiến trúc V-Blast

V-BLAST không giống như các kĩ thuật ghép kênh sử dụng chiều tần số, thời gian hay chiều mã để tăng dung lượng kênh, VBLAST có thể tăng dung lượng của hệ thống đáng kể nhờ vào chiều không gian do hệ thống MIMO cung cấp. Không giống như CDM, V-BLAST chỉ sử dụng một khoảng băng thông nhỏ cần thiết cho hệ thống QAM truyền thống. Không giống như FDM, mỗi symbol phát chiếm toàn bộ băng thông của hệ thống. Và cuối cùng không giống như TDM, toàn bộ băng thông hệ thống được sử dụng đồng thời để truyền các symbol tại mọi thời điểm

V-BLAST sử dụng NT anten phát và NR anten thu với NT≤ NR (như hình 3.13). Ở phía phát, vector coder sẽ sắp xếp các bit của chuỗi dữ liệu gốc thành các symbol và chia thành NT luồng dữ liệu con. Trong V-BLAST không cần mã hóa liên luồng vì từng luồng con có thể được mã hóa theo các kiểu mã hóa truyền thống riêng. Các luồng dữ liệu con này sẽ được NT bộ phát điều chế theo cùng một chòm sao QAM và phát đồng thời trên NT anten phía trên cùng một tần số với tốc độ 1/TS symbol/s, mỗi lần bộ phát sẽ phát thành từng chùm L symbol. Công suất phát mỗi luồng tỉ lệ với 1/NT vì vậy tổng công suất phát là hằng số và không phụ thuộc vào số anten phát. Ở phía thu, mỗi anten thu sẽ thu tín hiệu từ NT anten phát, các tín hiệu thu được từ NR anten phát sẽ được xử lý bằng giải thuật V-BLAST như Zero-Forcing hay MMSE để trả lại dữ liệu gốc ban đầu



Hình 3.13 Hệ thống V-BLAST

Kênh truyền MIMO được mô hình bằng kênh truyền H. Giả sử kênh truyền là quasi-stationary, kênh truyền biến đổi không đáng kể trong khoảng thời gian L.TS vì vậy kênh truyền được ước lượng chính xác bằng chuổi huấn luyện gửi theo chum L symbol pha

Giả sử, việc đồng bộ symbol ở bộ thu là lý tưởng. Ta kí hiệu vector symbol phát là , vector symbol thu sẽ là  .

 (3.52a)

*r = Hx + n* (3.52b)

với r biểu diển tín hiệu nhận từ NR chiều (NR anten)

 x biểu diễn tín hiệu nhận từ NT chiều (NT anten )

 n là vector nhiễu AWGN NR chiều mô hình theo I.I.D, tức là có phân bố giống nhau và độc lập với nhau

Bộ xử lý V-Blast ở phía thu sẽ sử dụng phương pháp kết hợp triệt tiêu tuyến tính (linear combinatorial nulling), để tách ra từng luồng dữ liệu con. Mỗi luồng con khi đến lượt giải mã sẽ được xem là tín hiệu mong muốn, các luồng còn lại được xem là nhiễu. Việc triệt tiêu sẽ được thực hiện bằng cách tổ hợp tuyến tính theo trọng số các tín hiệu thu để giải mã tín hiệu theo một tiêu chí nào đó như MMSE (minimum mean-squared error) hay ZF (zero-forcing)

### 3.6.2 Bộ Thu V-BLAST ZERO-FORCING

Vector tín hiệu thu ở symbol thứ m được biểu diễn như sau

  (3.53)

với hi là cột thứ i của H

xi[m] là dòng dữ liệu truyền lên anten thứ i, các dòng dữ liệu này điều độc lập với nhau

Chỉ chú ý tới dòng dữ liệu thứ k, ta có thể viết lại (3.53) như sau

  (3.54)

Biểu thức trên cho thấy dòng dữ liệu thứ k bị xuyên nhiễu bởi NT-1 dòng dữ liệu còn lại. Ý tưởng để loại bỏ các xuyên nhiễu này là chiếu vector thu r[m] lên không gian con Vk trực giao với các vector  có thể tượng trưng bởi ma trận Qk kích thước  gồm  hàng là các vector cơ sở của không gian Vk , hợp thành. Việc chiếu vector thu r[m] được thực hiện bằng cách nhân r[m] với vector triệt tiêu Wi trực giao với  , Wi sẽ triệt tiêu nhiễu xuyên luồng từ NT-1 dòng dữ liệu còn lại và trích ra dòng dữ liệu thứ k. Luồng dữ liệu k sau khi được tách ra sẽ cho qua bộ Matched-Filter, sự kết hợp giữa phép chiếu và bộ Matched-Filter được gọi là bộ thu Zero-forcing hay là bộ Decorrelator hay bộ Interference Nulling. Tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR sau bộ Matched-Filter sẽ là

  (3.54)

Nếu ta giải mã từng luồng kết hợp triệt tiêu nhiễu IC (Interference Cancellation) bằng cách loại trừ luồng k ra khỏi vector thu r, vector thu r lúc này chỉ còn là tổ hợp tuyến tính của NT - k luồng dữ liệu con. Tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR sau bộ match filter khi này sẽ là

  (3.56)

Trong trường hợp giải mã kết hợp triệt tiêu nhiễu liên tiếp,nhiễu được triệt tiêu liên tiếp dẫn tới  nên 

*Vector trọng số ZF*

  (3.57)

Với Wi là vector trọng số để giải mã luồng dữ liệu thứ i.

 (H)j là cột thứ j của ma trận kênh truyền.

Luồng thứ i sẽ được giải mã theo biểu thức sau

  (3.58)

Sau khi giải mã, luồng i sẽ được loại trừ ra khỏi vector thu r, vector thu r lúc này có chỉ còn là tổ hợp tuyến tính của NT – i luồng dữ liệu con, vì vậy các luồng tiếp theo sẽ được giải mã chính xác hơn. Do việc giải mã các luồng dữ liệu theo các thứ tự khác nhau sẽ cho tỉ lệ sai bit BER khác nhau, vì vậy để có được BER nhỏ nhất , ta cần phải tìm ra thứ tự tối ưu và giải mã các luồng con theo thứ tự này.

Vector Wi chỉ tồn tại khi số dòng dữ liệu nhỏ hơn hoặc bằng anten thu. Do đó số anten được sử dụng để phát NT phải nhỏ hơn số anten thu NR .( ) nên  .

*Thứ tự tối ưu*

Thứ tự giải mã tối ưu sẽ được tìm ra dựa trên các tính toán từ vector trọng số và ma trận kênh truyền.

Vector trọng số thoả mãn biểu thức (3.57) Wi chính là hàng thứ i của ma trận  là ký hiệu của ma trận kênh có được bằng cách bỏ đi các cột 1,2,…,i-1 trong ma trân kênh truyền H, H+là ký hiệu của ma trận giả nghịch đảo Moore-Penrose. Ta sẽ dễ nhận ra thứ tự tối ưu khi xét ví dụ giải mã symbol đầu tiên trong vector thu.

Giả sử symbol thứ i trong vector thu sẽ được giải mã đầu tiên

 (3.59a)

 (3.59b)

 (3.59c)

  (3.59d)

Với 

Ta nhận thấy vector trọng số tuy triệt tiêu xuyên nhiễu giữa các luồng nhưng lại có tác dụng khuyếch đại nhiễu nền.

Symbol đầu tiên được giải mã sẽ là symbol thứ i sao cho nhiễu  có phương sai nhỏ nhất, do các nhiễu  là I.I.D nên điều này tương đương với việc tìm Wi sao cho  nhỏ nhất

Dựa trên ý tưởng trên, thứ tự giải mã tối ưu là  là một hoán vị của {1,2,…, NT } sẽ được tìm như sau

 i 🡨1

  (3.60)

  (3.61)

 i=i+1

Với (G)i là hàng thứ i của ma trận G

Quá trình giải mã sẽ được thực hiện như sau

Bước 1: Sử dụng vector triệt tiêu để giải mã luồng dữ liệu con thứ k

  (3.62)

Bước 2: Sử dụng chòm sao điều chế ở phía phát để ước lượng  từ 

  (3.63)

Bước 3: Giả sử  chính là symbol gốc ban đầu , loại bỏra khỏi tín hiệu thu r1 để thu được tín hiệu thu sửa đổi r2

  (3.64)

với là cột thứ k1 của ma trận H



Hình .14 Máy thu V-BLAST Zero-forcing

Toàn bộ giải thuật ZF triệt tiêu liên tiếp theo thứ tự tối ưu như sau

 khởi động

 

 Lặp i = 1 🡪NT

 

Sơ đồ máy thu dùng giải thuật Zero Forcing triệt nhiễu liên tiếp theo thứ tự tối ưu



Hình 3.15 Máy thu V-BLAST Zero-forcing theo thứ tự tối ưu

Tốc độ truyền dữ liệu của luồng dữ liệu thứ k theo định lý Shanon sẽ là

  bit/s/Hz (3.65)

Tốc độ truyền của hệ thống sẽ là

  bit/s/Hz (3.66)

Trong môi trường fast-fading, kênh truyền sẽ biến đổi, do tốc độ truyền tối đa của kênh truyền sẽ được tính trung bình

  bit/s/Hz (3.67)

Khi tỉ số tin hiệu trên nhiễu SNR cao,ta có thể sắp xĩ CZF theo biểu thức sau

 (3.68a)

  (3.68b)

Trường hợp giải mã có kết hợp triệt tiêu nhiễu liên tiếp

  (3.69)

Khi tỉ số trên nhiễu SNR cao ,  được xấp xỉ theo biểu thức sau:

  (3.70)

cho qua bộ Matched-Filter. Vì bộ Match-Filter hoạt động rất hiệu quả khi SNR cao.

Khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu thấp, nhiễu gauss trắng lấn át các luồng dữ liệu, tương tự như khi hoạt động ở SNR cao, bộ thu Zero-forcing cũng triệt xuyên nhiễu khỏi luồng dữ liệu giải mã do các luồng dữ liệu khác gây ra, tuy nhiên khi xét thứ tự giải mã tối ưu, ta đã biết phép chiếu vector tín hiệu thu lên không gian con trực giao có tác dụng khuyếch đại nhiễu Gauss Hạn chế của Zero-forcing.

Khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu cao thì nhiễu Gauss trắng trong hệ thống không đáng kể, các luồng dữ liệu gây nhiễu lẫn nhau là chủ yếu và lấn át nhiễu Gauss trắng. Sau khi vector tín hiệu thu được chiếu lên không gian con trực giao để triệt nhiễu xuyên luồng (Inter-Stream Interference ), nhiễu còn lại chỉ là nhiễu trắng chiếm một lượng không đáng kể, tín hiệu sau đó được trắng (thành phần chính gây ra nhiễu tới luồng dữ liệu giải mã khi SNR thấp ), tuy bộ Matched-filter hoạt động rất hiệu quả khi không có xuyên nhiễu nhưng lúc này nhiễu Gauss trắng được khuyếch đại lên rất nhiều so với trước khi thực hiện phép chiếu chính vì lý do này, bộ thu ZF hoạt đông không hiệu quả khi SNR thấp.

Để bộ thu hoạt động hiệu quả, ta phải thiết kế bộ thu tối ưu theo tỷ số tín hiệu trên xuyên nhiễu và nhiễu trắng SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) dù SNR thấp hay cao. Vì bộ Matched-Filter hoạt động hiệu quả khi không có xuyên nhiễu, nên nếu ta dùng một giải thuật khác có tác dụng giảm nhiễu xuyên luồng nhưng không khuyếch đại nhiễu trắng, sau đó sử dụng bộ Matched-filter, thì sẽ thu được tín hiệu có tỷ số tín hiệu trên xuyên nhiễu và nhiễu trắng SINR tốt hơn cho bộ thu ZF ở SNR thấp. Bộ thu có thể tối ưu sự thương nhượng giữa xuyên nhiễu giữa các luồng và nhiễu nền Gauss chính là bộ thu MMSE

### 3.6.3. Bộ thu phát V-Blast Minimum Mean-squared error

Khi SNR cao, bộ thu Minimum Mean-Squared Error (MMSE) hoạt động giống như bộ thu ZF, và khi SNR thấp bộ thu sẽ tận dụng ưu thế của bộ Matched-Filter .

Xét tín hiệu thu tổng quát có dạng sau:

  (3.71)

Với z là nhiễu màu phức vòng có ma trận tương quan khả đảo Kz , h là vector cột bất kì và x là symbol chưa biết cần được ước lượng, giả sử x và z không tương quan. Ta đã biết nếu nhiễu trắng thì bộ Match filter là bộ lọc tối ưu sẽ cho SNR ngõ ra cực đại, vì vậy đối với trường hợp nhiễu màu, ta sẽ làm phẳng nhiễu màu thành nhiễu trắng trước khi cho tín hiệu qua bộ Match filter. Đầu tiên y sẽ nhân với  để làm phẳng nhiễu

 (3.72)

Khi này  sẽ là nhiễu trắng

  (3.73)

 Với  (3.74)

Trong đó U và  được phân tách từ Kz. Do Kz khả đảo nên Kz có thể viết như sau

  (3.75)

Trong đó U là ma trận quay và  là ma trận đường chéo,ma trận là căn bật hai của ma trận 

  (3.76)

  (3.77)

Sau đó, tín hiệu ra  sẽ được chiếu theo hướng  bằng cách nhân với 

 (3.78a)

 (3.78b)

Từ biểu thức trên bộ thu MMSE sẽ được biểu diễn thông qua vector

  (3.79)

Tín hiệu x sẽ được ước lượng bằng cách nhân y với

  (3.80)

Sau đó tín hiệu sẽ được qua bộ Match filter .

Người ta chỉ ra rằng với sự co giãn thích hợp trung bình của bình phương sai biệt của tín hiệu ước lượng có thể được cực tiểu, vì vậy bộ thu này được gọi là bộ thu tối thiểu bình phương sai biệt lỗi MMSE (minimum Mean-Squared Error). Tỷ số SINR của tín hiệu tại ngõ ra bộ Matched-Filter có biểu thức như sau

  (3.81)

Bộ thu MMSE cho giải thuật V-Blast khi này sẽ giải mã từng luồng tín hiệu

  (3.82)

  (3.83)

Giả sử công suất của luồng tín hiệu i là Pi, do nhiễu n[m] là I.I.D và các luồng tín hiệu độc lập nên ta có ma trận tương quan nhiễu như sau.

  (3.84)

Vector MMSE được định nghĩa như sau

  (3.85)

=>  (3.86)

SINR ở ngõ ra bộ Matched-filter có biểu thức như sau

Bước 1: Sử dụng vector  để tách luồng dữ liệu con thứ k

  (3.88) Bước 2: Sử dụng chòm sao điều chế ở phía phát để ước lượng xk từ yk

  (3.89)

 Bước 3: Giả sử  chính là symbol gốc ban đầu xk , loại bỏ xk ra khỏi tín hiệu thu rk­ để thu được tín hiệu thu sửa đổi rk+1

  (3.90)

 với hk là cột thứ k của ma trận H

Sơ đồ máy thu MMSE giải mã kết hợp triệt tiêu nhiễu như hình 3.21



Hình 3.16 Máy thu V-BLAST MMSE

Toàn bộ giải thuật MMSE triệt tiêu liên tiếp như sau

Khởi động

 r1 = r

 Lặp 

 

Với  là ma trận thu được từ ma trận H sau khi bỏ k cột đầu tiên .

Tốc độ truyền dữ liệu của luồng dữ liệu thứ k theo định lý Shanon sẽ là

  bit/s/Hz (3.91)

  bit/s/Hz (3.92)

  bit/s/Hz (3.93)

Trong môi trường fast-fading, kênh truyền sẽ biến đổi, công suất được chia đều cho các luồng  ,tốc độ truyền tối đa của kênh truyền sẽ được tính trung bình như sau:

  (3.94)