

What is VHT Beamforming Report?

Sorachi Kato[†]

[†]Watanabe Laboratory, Osaka University

1 MIMO

まず MIMO のことから書かないといけないのが遠回りですが...

MIMO は Multi Input Multi Output の略称で、無線通信において送受信器とも複数のアンテナを利用して通信する方式のことを指します。MIMO は単純にストリームの数が増える分だけスループットが上がるだけでなく、適切に位相を処理しつつ各アンテナから信号を送信することで、狙った位置において振幅を増幅する、いわゆるビームフォーミングができるという利点もあります。

2 Multipath Fading

無線通信でもっとも問題になるのが、反射波や回折波がオリジナルの信号を乱すノイズになってしまう、いわゆる「マルチパスフェージング」です。無線通信は通信媒体が空気ですから、通信をしているデバイス間で最短距離で届く信号以外にも、物体や建物に反射し、減衰しながらデバイスに到達する波があるわけで、受信デバイスはこれらが合成された、ノイズの乗った信号を受け取ることになります。従来 (MIMO 以前) の無線通信では、受信側で誤り訂正を行うなど、論理的な手段でこのノイズを取り除いていました。

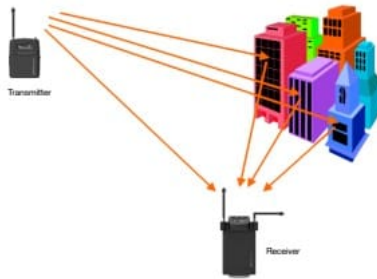


図1 Radio waves reflect, attenuate, and reach their targets through multiple paths.

3 Dealing with fading

MIMO では複数のアンテナを利用して通信していることを活かして、「通信路の特性を推定し、受信波を受信してから分離する」という手法を用いて並列送受信を実現しています。ここでいう「通信路の特性」とは、乱暴に言えば、送信側から送出された信号が受信側に到達する頃にはどう変化しているかを表したものの、です。

この記事では以降、AP はシングルユーザと通信すると考えます。デバイスは送信信号を事前にアンテナ数に従って分割し、これらを各アンテナから並行して送信するという状況を仮定します。

複数アンテナ間での通信は、以下の式によってモデル化されます。

$$\vec{y} = H\vec{x} + \vec{n}$$

x は送信信号ベクトル、 y は受信信号ベクトルで、 H は通信路特性を表現する行列、 n はノイズベクトルです。 H のサイズは x の形状によって決まり、 x のベクトル長はアンテナ数で決まります。式の意味を言葉で説明すると、「受信される信号は、送信側から発出された後、空間の反射状態などの特性に従いながら進行し、ノイズが乗った状態で届いたもの」ということになります。

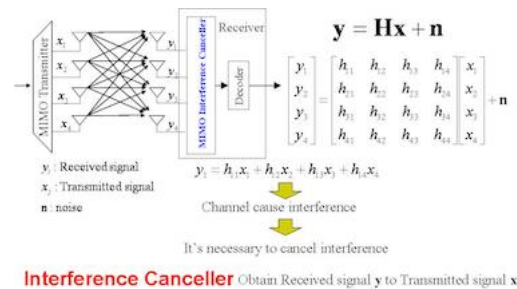


図 2

送信側ではアンテナごとに別々の信号を送りますが、アンテナ自体に指向性があるわけではないので、上の図のように受け取る側はあらゆる信号をミックスした形で受信することになります。図を見れば理解しやすいと思いますが、受信信号ベクトルの各要素は、送出された送信信号ベクトルの重み付き和で表現されています。

しかし上記の式に従えば、デバイスが行列 H を知っているならば、受信した信号からノイズを除去し、行列 H の逆行列をかけることで、元の信号ベクトルを復元することができます。

通信路行列 H は送信アンテナ数と受信アンテナ数でサイズが決まり、各要素はそれぞれのアンテナ対 (ストリーム) に対応します。

4 CSI

一般にこの行列 H は **Channel State Information**(以下 CSI) と呼ばれています。では AP やデバイスは、どのようにして CSI の情報を得るのでしょうか？

CSI を得るために、AP はチャネルサウンディングという作業を行います。手順は次のとおりです。まず AP はデ

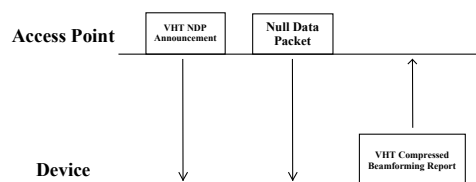


図 3

バイスに向けて、チャネルサウンディングを行うことを知らせる VHT NDP Announcement というフレームを創出します。続いて Null Data Packet を送信します。Null Data Packet は AP とデバイスの両方で既知のフレームです。受信側は、届いた NDP がオリジナルの状態からどのように変化したかを確認し、行列 H を推定して、その内容を AP に返却します。これが、推定された行列 \hat{H} であり、いわゆる CSI です。

通信路行列 H は各要素が複素数であり、実部と虚部をそれぞれ 1 バイトで表現したものが CSI として AP に返却されます。

さらに 802.11ac の OFDM-MIMO では、一つの通信チャンネルに数十～数百本のサブキャリアが内包されていて、CSI はその全てに対して推定されます。すなわち CSI は、

$$\text{送信アンテナ数} \times \text{受信アンテナ数} \times \text{サブキャリア数}$$

の次元を持つテンソルとして表現できます。

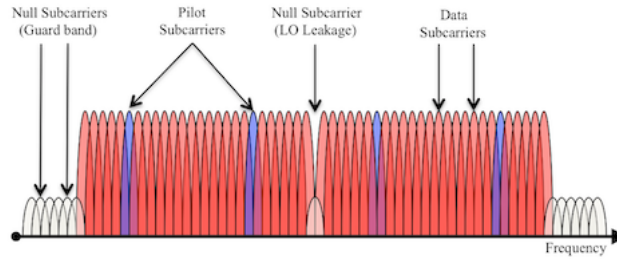


図 4

5 Eigenbeam-Space Division Multiplexing

NDP パケットのやり取りによって、AP とデバイス は CSI を得ることができました。では、この情報をそっくりそのまま利用しているのでしょうか？

前述のように、送信信号を予めセグメントに分割して、それぞれを異なるアンテナから並行して送信し、受信側で通信路行列の逆行列を掛け合わせて分離する方式は、**空間分割多重** (以下 SDM) と呼ばれ、通信路特性を考慮した通信方式としては、これが最も単純に実現できる実装です。しかし、資料^{*1}によれば、推定した H の逆行列を受信信号

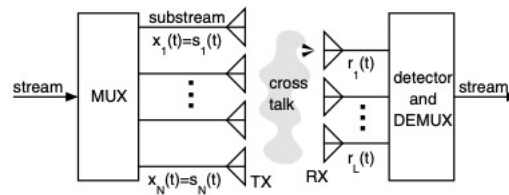


図 5

に掛け合わせる方式は Zero Force 法と呼ばれ、簡単な回路で実現できる反面、伝送特性が劣ることが指摘されています。理論上は逆行列との積を取ることで信号を分離できても、実際の伝送路上で信号が混合 (cross-talk) しているからです。

この問題を解決するために、固有ビーム空間分割多重方式 (以下 E-SDM) という通信方式が用いられています。単純な SDM では各サブストリーム (分割して送信される信号の流れ) は全て同じ平均電力で送信されます。一方 E-SDM では、通信路行列に対して特異値分解という数学的処理を施し、得られた特異値行列を事前に送信信号に掛け合わせることで直交したビーム空間を形成し、受信時に単純な行列演算で混信のない信号をそのまま受け取ることができるように工夫しています。

具体的な計算を以下に示します。

まず特異値分解とは、任意の行列 M を以下のように三つの行列に分解する処理のことを言います。

$$M = U\Sigma V^*$$

ここで U と V はユニタリ行列であり、 $*$ (アスタリスク) は随伴行列を表します。さらに Σ は、 $(\sigma_1, \sigma_2, \dots)$ なる要素を対角成分に持つ対角行列です。この σ は特異値と呼ばれる値です。

E-SDM では送信信号に対し、事前に特異値分解で得た V を乗じることで直交ビーム空間を形成しています。

E-SDM における具体的な信号処理の流れを見てみます。

まず、通信路行列 H はデバイスにとって既知で、かつその特異値分解 $U\Sigma V^*$ も既知であると仮定します。AP は信号を送信する前に、送信信号ベクトルに V を乗じます。

^{*1} <https://www.ntt.co.jp/journal/0411/files/jn200411023.pdf>

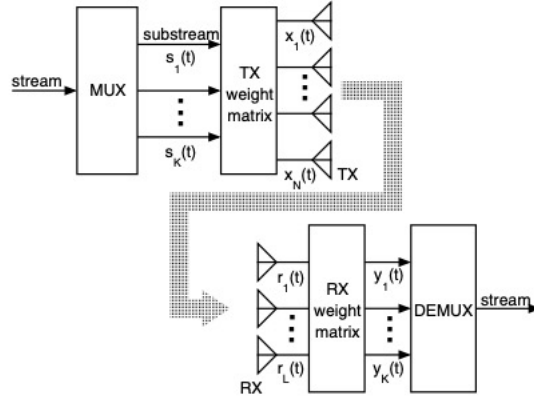


図 6

この信号が、特性行列 H に従う空間を通過してデバイスに到達した場合、前述の通信路モデルの式に従えば、受信信号 \vec{y} は

$$\begin{aligned}\vec{y} &= H\vec{x} \\ &= U\Sigma V^*V\vec{x} \\ &= U\Sigma\vec{x}\end{aligned}$$

と表すことができます。この受信信号に対し、受信側のデバイスで U^* を左側から乗じれば

$$U^*U\Sigma\vec{x} = \Sigma\vec{x}$$

を得ることができます。 Σ は特異値を成分にもつ対角行列ですから、これは送信信号ベクトル \vec{x} の各成分が、特異値によってスカラー倍されたものと見なすことができます。それぞれのサブストリームに特異値が乗じられていることで、受信した時に結果的に信号の利得が最大になります*2。さらに Σ が対角行列なので、それぞれの受信アンテナで、対応する送信アンテナからの信号を直接受け取ったかのように信号を分離することができます。

6 Compressed Beamforming Report

「4. CSI」の節で、デバイスは AP から送られてきた NDP に基づいて CSI を返却すると書きました。しかし前節の特異値分解を用いた通信方式の話からすると、AP にとって必要なのは送信信号ベクトルに乘じる V の情報だけだということが分かると思います。

多くの市販の AP では、生の CSI を全て返すのではなく、この V だけを AP に返却しているのです。本記事では分かりやすさのために、返却された V のことを **Beamforming Report** と呼ぶことにします。

通信路行列全体を返却するのではなく、特異値分解によって得た行列の一部を返却することで固有ビーム空間多重を実現しているわけですが、前述の通り V は複素行列です。後の節で詳細を述べますが、例えば送信アンテナ 3 つ・受信アンテナ 3 つの通信の場合、 V は 3 行 3 列になり、各要素の実部と虚部をそれぞれ 8bit で表現するとしたら全体で 144bit 必要になります。この V 全体をより少ない値で表現し、さらに圧縮して表現する方法があります。

Beamforming Report を圧縮したものが、本記事の主題である、**VHT Compressed Beamforming Report** です。長かった...

Beamforming Report の圧縮には、ギブズ回転と呼ばれる演算を利用します。ギブズ回転の細かな定義はここには書きませんが、以下のように V は分解することができます。

$$\mathbf{V}^{basis} = \left[\prod_{i=1}^{\min(N_c, N_r-1)} \left[D_i \left(1_{i-1} e^{j\phi_{i,i}} \dots e^{j\phi_{N_r-1,i}} 1 \right) \prod_{l=i+1}^{N_r} G_{li}^T(\psi_{li}) \right] \right] \mathbf{I}_{N_r \times N_c}$$

*2 注水定理というものが関係しているらしい

N_c と N_r はそれぞれ、受信アンテナ数と送信アンテナ数です。また、行列 G と D は以下のように定義されます。

$$G_{li}(\psi_{li}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{i-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_{li}) & 0 & \sin(\psi_{li}) & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I}_{l-i-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\psi_{li}) & 0 & \cos(\psi_{li}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_{N_r-l} \end{bmatrix}$$

$$D_{li}(\psi_{li}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{i-1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \exp(j\phi_{i,i}) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \exp(j\phi_{N_r-1,i}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

添字付きの 1 は、添字の数だけ 1 を並べたベクトルです。

上記の式に登場する ψ と ϕ は、その個数が N_c と N_r の組み合わせで決定されることが分かります。限られた個数ですが、この角度情報があればもとの V は計算によって復元することができ、この角度情報こそ、Compressed Beamforming Report の中身です。

具体例を考えてみましょう。 $N_c=2$ 、 $N_r=3$ の場合、総乗のインデックスは

- $i = 1, l = 2$
- $i = 1, l = 3$
- $i = 2, l = 3$

の 3 通りがあり、これら全ての組み合わせから、 $\phi_{11}, \phi_{21}, \psi_{21}, \psi_{31}, \phi_{22}, \psi_{32}$ の 6 つの角度が得られることになります。

通信路行列は、複数のサブキャリアを内包するチャンネルではサブキャリアの個数分だけ取得できます。したがって上記の例ではサブキャリアの個数 \times 6 つの角度情報が得られ、それら全てをまとめたものが Compressed Beamforming Report として送信されます。

7 Detail

ここまでに書いた理論的な Compressed Beamforming Report の組み立てを踏まえて、ここからは実際にバイナリとして Beamforming Report のパラメータがどのように規定され、どのように表現されているかについて書きます。だんだん疲れてきたので、一旦書いとして、修正の必要な箇所があったら後日修正します。

この節の内容は主に IEEE の仕様書^{*3}の該当箇所をまとめたモノです。

7.1 Action No Ack

まず、Compressed Beamforming Report が含まれる Wifi フレームは、サブタイプ 0x000e (通称 **Action No Ack**) のフレームです。この中には、Compressed Beamforming Report だけでなく、アンテナ数や角度情報 ψ と ϕ のビット数などを規定するためのパラメータが含まれています。順に見ていきましょう。

7.2 VHT MIMO Control Field

VHT MIMO Control Field は以下の情報を含んでいます。

^{*3} <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7786995>

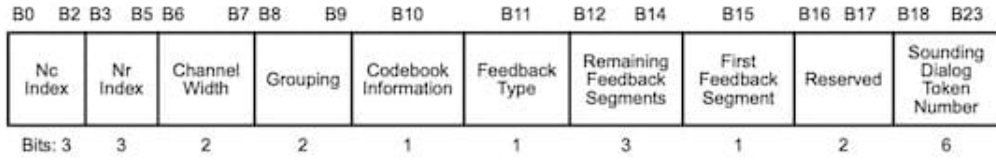


図 7

Subfiled	ビット数	説明	値
N_c index	3bit	受信デバイスのアンテナ数	0 → 1 つ 1 → 2 つ ... 7 → 8 つ
N_r index	3bit	送信デバイスのアンテナ数	0 → 1 つ 1 → 2 つ ... 7 → 8 つ
Channel Width	2bit	チャネル幅	0 → 20MHz 1 → 40MHz 2 → 80MHz 3 → 160MHz
Grouping	2bit	サブキャリアのグループ数	0 → 1 つ (NoGroup) 1 → 2 つ 2 → 4 つ
Codebook Information	1bit	ψ と ϕ の表現に使うビット数	0 → ψ 2bit/ ϕ 4bit 1 → ψ 4bit/ ϕ 6bit
Feedback Type	1bit	MIMO の種別	0 → SU – MIMO 1 → MU – MIMO
Remaining Feedback Segments	3bit	分割されたセグメントの順序	0 → 最後尾 or セグメント分けされていない 1 → 最後尾ではない
First Feedback Segments	1bit	最初のセグメントかどうか	0 → 最初でない or レポートがない 1 → 最初ではない or セグメント分けされていない
SoundingDialog Token Number	6bit	フィードバックを励起した NDPAnnounce の識別番号	

7.3 VHT Compressed Beamforming Report Information

VHT Compressed Beamforming Report information は以下のような構成です。

Field	ビット数	説明
Average SNR of Space-Time Stream 1	8bit	1 目目のストリームの平均 SN 比
Average SNR of Space-Time Stream 2	8bit	2 目目のストリームの平均 SN 比
\vdots	\vdots	\vdots
Average SNR of Space-Time Stream N_c	8bit	N_c 番目のストリームの平均 SN 比
CompressedBeamformingFeedbackMatrix for subcarrier0	$N_a \times (\psi + \phi)/2bit$	0 番目のサブキャリアの角度情報
CompressedBeamformingFeedbackMatrix for subcarrier1	$N_a \times (\psi + \phi)/2bit$	1 番目のサブキャリアの角度情報
\vdots	\vdots	\vdots
CompressedBeamformingFeedbackMatrix for subcarrier($N_s - 1$)	$N_a \times (\psi + \phi)/2bit$	$(N_s - 1)$ 番目のサブキャリアの角度情報

7.4 Quantization of ψ and ϕ

角度情報である ψ と ϕ はそれぞれ $0 \sim \pi/2$ 、 $0 \sim 2\pi$ に収まる角度です。量子化後の値と角度との関係式は以下の通りです。

$$\psi = \frac{k\pi}{2^{b_\psi+1}} + \frac{\pi}{2^{b_\psi+2}} \quad (k = 0, 1, \dots, 2^{b_\psi} - 1)$$

$$\phi = \frac{k\pi}{2^{b_\phi-1}} + \frac{\pi}{2^{b_\phi}} \quad (k = 0, 1, \dots, 2^{b_\phi} - 1)$$

例えば ψ が 4bit で表現されているなら、 $0 \sim \pi/2$ の角度が 16 段階に量子化されます。

7.5 N_a

7.3 節の表に登場する N_a は、一つの通信路行列から得られる角度情報の個数を示します。実際のバイナリでは、規定された順に角度情報が並べられており、その順序は以下のように決められています。

Size of V ($N_r \times N_c$)	N_a	Order
2×1	2	ϕ_{11}/ψ_{21}
2×2	2	ϕ_{11}/ψ_{21}
3×1	4	$\phi_{11}/\phi_{21}/\psi_{21}/\psi_{31}$
3×2	6	$\phi_{11}/\phi_{21}/\psi_{21}/\psi_{31}/\phi_{22}/\psi_{32}$
3×3	6	$\phi_{11}/\phi_{21}/\phi_{31}/\psi_{21}/\psi_{31}/\psi_{41}$
\dots	\dots	\dots

例えば 3x2 の場合、Compressed Beamforming Report は次のようになります。

$$\overbrace{01001001}^{\text{SNR}_1} \overbrace{01011100}^{\text{SNR}_2} \overbrace{101101}^{\phi_{11}} \overbrace{001001}^{\phi_{21}} \overbrace{0101}^{\psi_{21}} \overbrace{1000}^{\psi_{31}} \overbrace{001001}^{\phi_{22}} \overbrace{0101}^{\psi_{32}}$$

7.6 N_s

N_s はチャネル幅ごとのサブキャリア数です。資料*4の 768 ページに、チャネル帯域ごとの N_s がまとめられています。

*4 <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7786995>