MIMO は何故マルチパスが必要か？

同じ周波数を使いながら混信せずに複数の信号ストリームを流すことが出来る MIMO(Multiple Input Multiple Output)は、携帯電話や Wi-Fi の伝送速度向上に欠くことの出来ない重要な無線技術です。ところでこの凄技､MIMO はマルチパスを積極的に利用する方式であるという記事はよく見かけるのですが、何故 MIMO にとってマルチパスが必要かを解説した文献は少ないように思います。そこで今回のコラムでは、2×2MIMO を例に取って、このあたりを説明したいと思います。

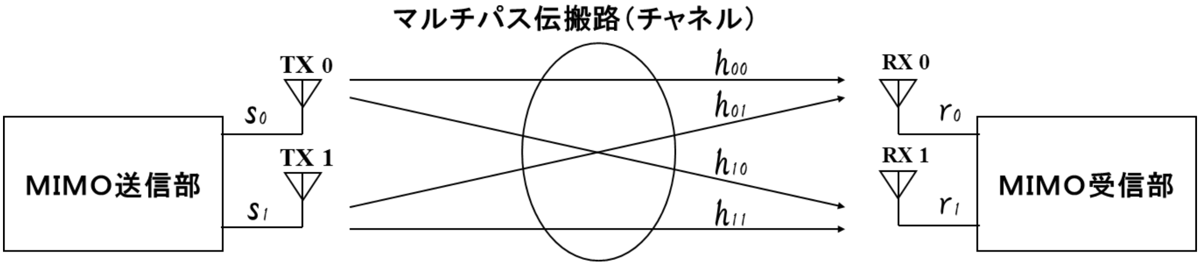

図 1 MIMO 通信系

図 1 は 2×2 MIMO のシステム全体を表したものです。この系において s_0, s_1 は送信シンボルで、マルチパス伝搬路を通って r_0, r_1 として受信されます。マルチパス伝搬路の h_{00}～h_{11} はチャネル推定値で、直接波とマルチパスを合計した結果として、送信→受信の間で振幅と位相がどのように変化したかを示す値です。変調シンボルには CP(Cyclic Prefix) や GI(Guard Interval)が付加されて、マルチパスが合成されても元の波形が乱れないことが前提です。図 1 の関係を式にすると受信点におけるノイズも考慮して、

$$r_0 = h_{00}\,s_0 + h_{01}\,s_1 + n_0 \qquad r_1 = h_{10}\,s_0 + h_{11}\,s_1 + n_1$$

となります。これを行列の形にまとめると次の(1)式のようになりますが、SN 比が十分高いときはノイズを無視して(2)式のように表すことが出来ます

$$\begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_0 \\ n_1 \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots \ (1) \qquad \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots \ (2)$$

受信側で知りたいのは、送信側が送ったシンボル s_0, s_1 は何か？ですが、これは(2)式から、逆行列を使って(3)式のように求められます。

$$\begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{h_{00}h_{11} - h_{01}h_{10}} \begin{pmatrix} h_{11} & -h_{01} \\ -h_{10} & h_{00} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots \ (3)$$

以上がシンプルな MIMO の分離法ですが、マルチパスが無い場合にこの MIMO 分離がどのようにな

るかを図2で調べてみましょう。

図2は100m離れた2×2MIMOのシステムで、マルチパスは無く、送受ともアンテナ間隔は5㎝とします。このとき、

Tx_0→Rx_0の距離：100m　　　　　Tx_1→Rx_0の距離：100.0000125m

Tx_0→Rx_1の距離：100.0000125m　　Tx_1→Rx_1の距離：100m

となるので、Tx_0からの信号とTx_1からの信号の距離の差、行路差は僅か0.0125㎜です。この行路差では受信レベルへの影響はほぼ0ですし、比較的差が表れ易い位相差についても、例えば周波数が3GHz(波長λ=10㎝=100㎜)のとき、

360°×(0.0125㎜/100㎜)=0.045°

と非常に小さな値です。これではチャネル推定値間の差はほとんどなくなり、$h_{00} \fallingdotseq h_{01} \fallingdotseq h_{10} \fallingdotseq h_{11}$となるため(3)式の分母の行列式、$h_{00}h_{11}-h_{01}h_{10}$は、≒0になります。従って(3)式の計算はオーバーフローして結果が求まりません。このためチャネル推定値に差が出るよう、伝搬路に行路差が必要なことが分かります。

これが光であれば、たとえ0.0125㎜の行路差でも光の波長の数十倍程度にはなるので、それなら十分大きな差分です。この差分のおかげで目のいい人なら100m先の5㎝間隔のアンテナも区別出来ることでしょう。但しこれは光のように極めて波長が短い場合に成り立つ話です。

また図2において送受ともアンテナ間隔が50㎝あれば行路差が1.25㎜になるので、例えば周波数が60GHz(波長λ=5㎜)では位相差が90°になります。これだけの位相差があればMIMOも問題なく復調出来ます。実際、このような条件で、マルチパスを使わず見通し内通信だけを利用するLOS-MIMO(Line of Sight MIMO)という技術も実用化されています。

但し以上は極めて波長が短いか、波長が短くてアンテナ間隔が広い場合に有効であって、一般の移動通信の周波数/アンテナ間隔では実現は無理です。

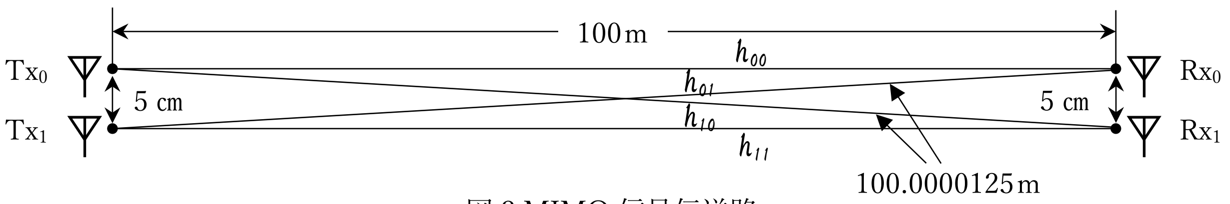

図2 MIMO信号伝送路

図2は送受のアンテナが正対していますが、例えばRx_1を左右に数㎝動かしてRx_0との間に行路差を付けたらどうなるでしょうか？この場合、Tx_0～Rx_1とTx_1～Rx_1はほぼ同じように伸縮するため、h_{10}/h_{11}の値に変化はほとんどありません。問題は、行列式$h_{00}h_{11}-h_{01}h_{10} \fallingdotseq 0$となることですが、この式を変形すると、$h_{00}/h_{01} \fallingdotseq h_{10}/h_{11}$と書けます。上記のように$Rx_1$を動かしてもこの右辺の値が変わらないわけですから、行列式は相変わらず≒0のままです。他のアンテナを動かしても同様の結果になります。

この結果から分かることは、MIMOの信号分離を行うためには「Tx_0からの信号とTx_1からの信号を、Rx_0及びRx_1で受信したときに、両者が比例関係にならないことが必要」だということです。

では、ここにマルチパスも加わるとどうなるでしょうか？ 図3は直接波にマルチパスが1波加わった状態を示したものです。

図のようにマルチパスは放射角θ_t、入射角θ_rを持つため、送信側･受信側共に、アンテナ間で比較的大きな行路差l_t、l_rが発生します。例えば周波数が3GHz(波長λ=10 ㎝)で、$\theta_t = \theta_r$=30°のとき、

$l_t = l_r$ = 5 ㎝×sin30°= 2.5 ㎝

360°×(2.5 ㎝/10 ㎝)=90°

と、90°の位相差が生じます。

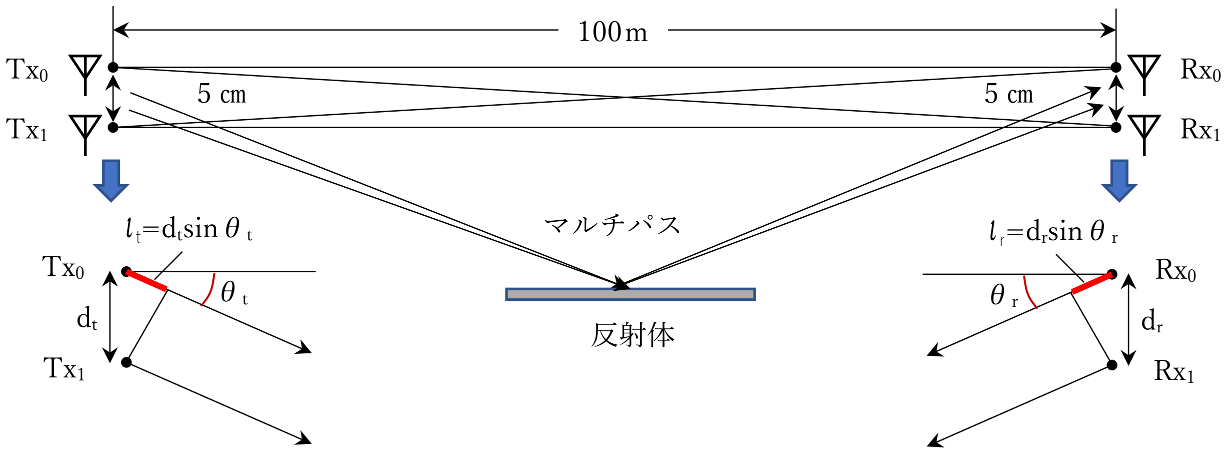

図3 MIMO信号伝送路(マルチパス追加)

直接波はどのアンテナ間もほぼ同じ信号を受信するのに対してマルチパスは複数の位相を持った信号が到来するので、マルチパスの最短経路、Tx_1→Rx_1の位相を基準(0°)とすると、受信信号は次のように表せます。

Rx_0：Tx_0の直接波+ Tx_0のマルチパス(-180°)+ Tx_1の直接波+Tx_1のマルチパス(-90°)

Rx_1：Tx_0の直接波+ Tx_0のマルチパス(-90°)+ Tx_1の直接波+Tx_1のマルチパス(0°)

このようにRx_0とRx_1とでは受信するマルチパスが全く異なります。このためMIMO信号分離の要件、「Tx_0からの信号とTx_1からの信号を、Rx_0及びRx_1で受信したときに、両者が比例関係にならないことが必要」を満足します。従って行列式は0にならず、(3)式によってMIMOの分離が可能です。ここでは直接波が存在する状態で検討していますが、2波以上のマルチパスが有りさえすれば上記の条件を満足することも同様にして確認出来ます。

このようにマルチパスがあると複数の種類の行路差(位相差)が生じて、その結果MIMOの分離が可能になります。

(補足)

以上、出来るだけ定性的にMIMO分離におけるマルチパスの必要性を説明して来ましたが、マルチパスがあると行列式≒0にならないことを、チャネル推定値による計算でも確認しておきましょう。

チャネル推定値は振幅と位相の成分を持つため、次のような複素表示で表すことが出来ます。

直接波のチャネル推定値：$h_{00}\,,h_{01}\,,h_{10}\,,h_{11} = ae^{j\theta},\ ae^{j\theta},\ ae^{j\theta},\ ae^{j\theta}$
マルチパスのチャネル推定値：$h_{00}\,,h_{01}\,,h_{10}\,,h_{11} = be^{j(\phi-pt-pr)},\ be^{j(\phi-pr)},\ be^{j(\phi-pt)},\ be^{j\phi}$

ここで、直接波のチャネル推定値は全て同じ $ae^{j\theta}$ と置いており、マルチパスのチャネル推定値は位相基準である Tx_1→Rx_1 のチャネル推定値を $be^{j\phi}$ と置いて、他のチャネル推定値は振幅は同じ、位相は送信側の行路差 l_t による位相遅れを p_t、受信側の行路差 l_r による位相遅れを p_r として求めています。

トータルのチャネル推定値は、直接波の成分とマルチパスの成分を加算すればよいので、

$$h_{00}\,,h_{01}\,,h_{10}\,,h_{11} = ae^{j\theta}+be^{j(\phi-pt-pr)},\ ae^{j\theta}+be^{j(\phi-pr)},\ ae^{j\theta}+be^{j(\phi-pt)},\ ae^{j\theta}+be^{j\phi}$$

となります。このチャネル推定値を使って行列式を計算すると、途中の計算は省略しますが次のような結果が求まります。

$$\begin{aligned} h_{00}h_{11}-h_{01}h_{10} &= \{\, ae^{j\theta}+be^{j(\phi-pt-pr)} \}\times\{\, ae^{j\theta}+be^{j\phi}\ \}-\{\, ae^{j\theta}+be^{j(\phi-pr)} \}\times\{\, ae^{j\theta}+be^{j(\phi-pt)} \} \\ &= ab\ e^{j(\theta+\phi)}\{\, 1+e^{-j(pt+pr)}-e^{-jpt}-e^{-jpr}\, \} \end{aligned} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (4)$$

(4)式は仮に、$p_t=0(\theta_t=0)$、$p_r=0(\theta_r=0)$とすると、

$$ab\ e^{j(\theta+\phi)}\{\, 1+e^{-j(pt+pr)}-e^{-jpt}-e^{-jpr}\, \} = ab\ e^{j(\theta+\phi)}(\, 1+1-1-1\,) = 0$$

となって行列式＝0 となります。しかしマルチパスがありさえすればθ_tやθ_rが 0°ということにはならないので、行列式＝0 にはなりません。例えば図 3 の例のようにθ_tやθ_rが 30°あれば 90°の位相差が生ずるので、

$$\begin{aligned} ab\ e^{j(\theta+\phi)}\{\, 1+e^{-j(pt+pr)}-e^{-jpt}-e^{-jpr}\, \} &= ab\ e^{j(\theta+\phi)}\{\, 1+e^{-j(\pi/2+\pi/2)}-e^{-j\pi/2}-e^{-j\pi/2}\, \} \\ &= ab\ e^{j(\theta+\phi)}(\, 1-1-2e^{-j\pi/2}\,) = 2ab\ e^{j(\theta+\phi+\pi/2)} \end{aligned}$$

と計算され、$|\, e^{j(\theta+\phi+\pi/2)}|=1$ なので行列式は≒0 にはなりません。これは$\theta_t=\theta_r=30°$の場合ですが、θ_tやθ_rが数°程度あれば≒0 にならないことは容易に確認出来ます。