

ブロック伝送方式のための信号歪補償に関する研究

京都大学大学院情報学研究科 准教授
林 和 則

無線通信では送信機から送信された電波が空中を伝搬し受信機で受信されるわけですが、電波が伝搬する間に複数の経路に分かれて反射や散乱を繰り返すので、受信機に到着したときには送信信号とは似ても似つかない姿になっています。送られた情報を推定するために信号が通信路で受けた歪を取り除く必要がありますが、電池で動作する無線端末ではこの処理をいかに少ない計算量で行うかが重要になります。現在 OFDM と呼ばれる伝送方式が“地デジ”や無線 LAN など様々なシステムで採用されていますが、これは高速通信をしたときの信号歪を非常に効率的に補償できるからです。本研究では OFDM を特別な場合として含むブロック伝送方式を対象にしています。ここではその基礎となるアイデアについて説明したいと思います。

最初の例は図 1(a) に示すように信号 x を送信したときに受信信号が $r=ax$ (a :係数) となる場合です (実際には雑音 n の影響で $r=ax+n$ とすべきですが、通信路の影響だけを考えるために雑音は無視します)。受信機は r から x を求める必要がありますが、係数 a を既知とするとこの問題は 1 元 1 次方程式でありその解として x が簡単に求まります。これは通信速度が遅い場合によくあう通信路のモデルになっています。

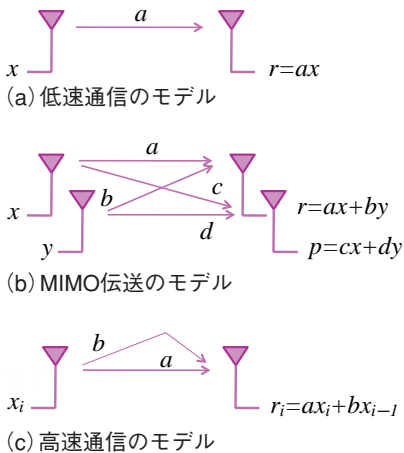
次に図 1(b) のように 2 つのアンテナから同時に信号 x と y をそれぞれ送信する場合を考えます。先ほどと同様の通信



路を仮定すると、受信信号は $r=ax+by$ (a, b :係数) となりますが、 r だけから x と y を求めることはできません。そこでもう 1 本受信アンテナを用意して、受信信号 $p=cx+dy$ (c, d :係数) を得たとします。すると連立方程式になりますから、これを解くことで x と y を求めることができます (“解なし”の場合は無視します)。この例は送信機と受信機のアンテナの本数を 2 本にすると、伝送速度を 2 倍にできることを示しています。これが現在盛んに研究されている MIMO 伝送システムの原理になっています。

そうでした、MIMO 伝送ではなく OFDM の原理について説明するのでした。では、1 本のアンテナの例に戻って高速な通信をする場合について考えます。はじめに述べたように無線通信では送信信号が複数の経路を通して受信機にたどり着くのですが、各経路は長さが異なるので信号が受信機に到着する時間に“ずれ”が生じます。高速通信ではこのずれによって信号が時間的に広がってしまう現象 (遅延広がり) が問題となります。例えば、経路が二つあって長い経路を通ってくる信号は短い経路からやってくる信号から一秒遅れて到着する通信路を考えます (図 1(c))。この通信路に一秒ごとに信号を送信す

図1：無線通信路のモデル



ると受信信号はどうなるでしょうか？時刻1に送信した信号 x_1 が短い経路を通過して受信機に到着したときの受信信号を r_1 とすると、このとき時刻0に送信された信号 x_0 も長い経路を通過して同時に受信機に到着するので、 $r_1 = ax_1 + bx_0$ （短い経路の係数： a ，長い経路の係数： b ）となります。その1秒後の受信信号は $r_2 = ax_2 + bx_1$ 、さらにその1秒後は $r_3 = ax_3 + bx_2$ となります。ではMIMO伝送のときのように連立方程式を解いて送信信号を求めましょう、と思ったのですが様子が違います。今度は未知数が x_0, x_1, x_2, x_3 の4つに対して式は3つしかありません。受信信号を増やして式を1つ追加しても、未知数も1つ増えますから、本質的に状況は変わりません。遅延広がりによる信号歪補償（通信路等化）に連立方程式による方法を適用するには工夫が必要です。そこで少しずるいですが、最初の信号 x_0 は実は x_3 と同じである（サイクリックプレフィックスといいます）ことにします。そうすると、未知数が x_1, x_2, x_3 の3つになってめでたく方程式を解くことができます。が、実

はサイクリックプレフィックスの恩恵はそれだけではないのです。ここで突然ですが、送信信号 x_1, x_2, x_3 はもともと送っていた信号 X_1, X_2, X_3 を逆離散フーリエ変換したものであり、 R_1, R_2, R_3 は受信信号 r_1, r_2, r_3 を離散フーリエ変換したものとします。このとき、 X_1, X_2, X_3 を未知数とする連立方程式は、 a と b の値にかかわらず $R_1 = AX_1, R_2 = BX_2, R_3 = CX_3$ （ A, B, C ：係数）という形になります。これは連立方程式というよりはむしろ3つの1元1次方程式ですので、簡単に解くことができます。離散フーリエ変換は高速フーリエ変換（FFT）アルゴリズムを用いて効率的に実行できるので、この方法はシステム全体で見ても計算量の少ない伝送方式となっています。これがOFDMを代表とするブロック伝送方式の根本にあるアイデアです。

現実的な通信環境では実際の受信信号が、上述の受信信号モデルとは異なるものになることがあります。少し専門的になりますが、サイクリックプレフィックスによる信号モデルは巡回行列という特別な構造をもつ行列で記述されます。本研究ではその様々な要因による受信信号のモデルからのずれが、構造の一部に欠陥をもつ巡回行列で記述できることを示し、さらにブロック伝送方式の一番の特長である要求計算量の少なさを損なうことなくこの欠陥を補償する一般的な手法を提案しました。ブロック伝送方式は線形代数の知見が美しい形で工学の問題に応用された非常に良い例ですが、決して究極の通信方式だとは思いません。さらに良い通信方式を日本から世界に発信できるように頑張っていきたいと思います。