



## 第6章 フェージング, 電波伝播とそのモデル

### 移動通信の電波伝播

佐藤 拓朗

Takuro Sato

#### フェージング

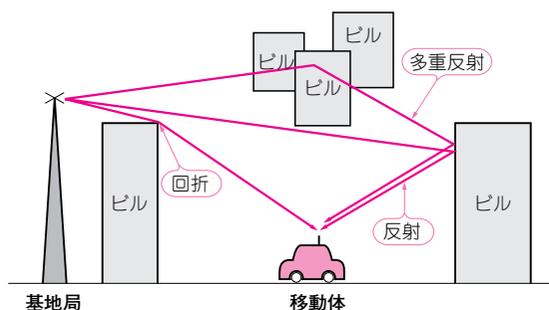
図1を見てください。基地局や移動端末から送信される電波は、周囲のビル、地面、樹木などで反射や回折を繰り返しながら伝播していきます。これを一般に多重反射といっています。電波は、その経路に応じて異なった遅延時間をもって受信されます。また、場所によって電波が強め合ったり弱め合ったりするため定在波が生じ、受信電力が変化します。

私たちはこのような定在波の中を移動電話をもって動きながら通信しますから、移動する速度に応じて、その定在波を受ける周期が変わります。これをフェージング周波数といいますが、フェージング周波数は、定在波の周期と移動速度で決まります。定在波の周期は、基地局や移動端末から送信される電波の波長ですから、一般に次式でフェージング周波数を求めることができます。

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $f_d$ ：フェージング周波数 [Hz]、 $v$ ：車速 [m/s]、 $\lambda$ ：波長 [m]

波長  $\lambda$  は電波の速さ(光の速さと同じ)から、次式を使って求められます。



〈図1〉 基地局からの電波が移動体へ到達するようす

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $c$ ：光の速さ ( $3 \times 10^8$ ) [m/s]、 $f$ ：周波数 [Hz]

例えば、移動電話で使われている周波数 2 GHz を使って、移動速度が 40 km/h とすると、フェージング周波数  $f_d$  は、次式から 74 Hz となります。

$$f_d = \frac{(40 \times 10^3 / 3600) \times 2 \times 10^9}{3 \times 10^8} \doteq 74 \text{ Hz} \quad \dots\dots (3)$$

#### 電波の減衰

電波は発信源からの距離の2乗に反比例して減衰していきます。図2に示すように、電波を放射すると、球面状に広がっていきます。球の面積は発信源から受信点までの距離を  $d$  とすると  $4\pi d^2$  です。単位面積あたりの受信電力を受信電力密度といい、次式で示されます。

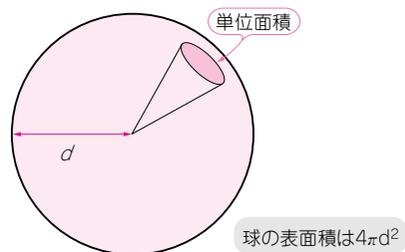
$$p_R = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし  $p_R$ ：受信電力密度 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]、 $P_T$ ：送信電力 [W]

電力密度が  $p_R$  の地点において、開口面積(アンテナの等価面積)が  $A$  [ $\text{m}^2$ ] のアンテナを使って受信した場合の受信電力  $P_R$  は、

$$P_R = A p_R \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表せます。たとえば出力 1 W で送信し、距離 1 km のところで、開口面積が  $1 \text{ m}^2$  のアンテナで受信した



〈図2〉 電波は球面状に広がっていく

球の表面積は  $4\pi d^2$

場合は、

$$P_R = \frac{1 \times 1}{4 \pi \times 1000^2} \approx 79.6 \times 10^{-9} \text{ [W]} \dots\dots\dots (6)$$

となります。しかし、これは宇宙のような自由空間での話で、実際にはビルや樹木や地面があるので、距離の2乗ではなく距離の3.5乗で減衰していきます。

次にアンテナの特性も入れて、実際の受信電力  $P_R$  について考えてみましょう。

## 電波伝播モデル

### ■ 電波の伝播特性

実際に電波の伝播特性について考えてみましょう。電波の送信/受信にはアンテナが必要です。図3にアンテナを含む伝播路モデルを考えます。送信電力は  $P_T$  Wで、送信アンテナ利得を  $G_T$  倍とします。送信アンテナ利得はアンテナが大ききほど増大します。送信された電波は伝播路中に放射され、距離と周波数の3.5乗に反比例して減衰していくものとします。

受信アンテナ利得も送信アンテナと同じく、その大きさに応じて利得が増大しますが、一般に受信アンテナには、どこから電波が受信しても良いように無指向性のアンテナを使うため利得はほとんどありません。

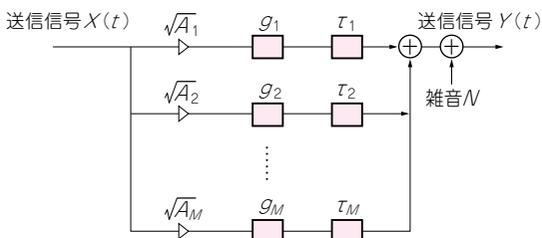
これらから、送受信点間の距離が  $d$  [m] ならば、受信電力  $P_R$  は次式で求めることができます。

$$P_R = P_T G_T \left( \frac{1}{4 \pi} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{3.5} G_R \dots\dots\dots (7)$$

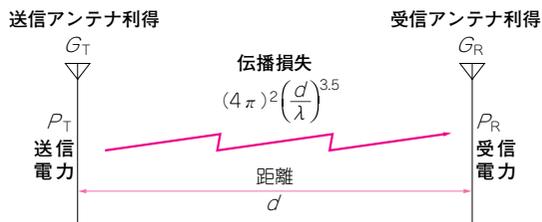
しかし、一般にはこの式を直接使わないで、両辺に  $10 \log$  を適用して対数表示した次式を使います。

$$P_R = P_T + G_T - 20 \log 4 \pi + 35 \log \left( \frac{\lambda}{d} \right) + G_R \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $P_R$  : 受信電力 [dBm],  $P_T$  : 送信電力 [dBm],  $G_T$  : 送信アンテナ利得 [dB],  $G_R$  : 受信アンテナ利得 [dB],  $\lambda$  : 波長 [m],  $d$  : 送受信間の距離 [m]



〈図4〉マルチパス・フェージングの伝播路モデル



〈図3〉アンテナを含む伝播路モデル

先に計算した送信電力 1 W, 送信アンテナ利得 10 dB, 受信アンテナ利得 0 dB, 周波数 2 GHz で距離 1 km 離れた位置での受信電力  $P_R$  は、

$$P_R = 30 + 10 - 20 \log(4 \pi) + 35 \log \left( \frac{0.15}{10^3} \right) + 0 \approx -115.8 \text{ [dBm]} \dots\dots\dots (9)$$

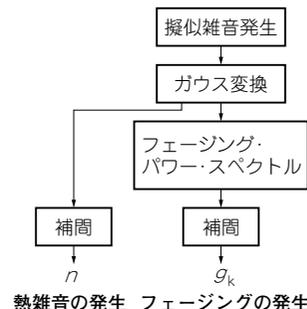
と非常に小さな値になります。

### ■ 伝播路モデル

無線伝播路はマルチパス・フェージングで表すことができます。一つ一つの伝播路パスは式(9)で示した減衰特性を受けるとともに、そのパス自体がフェージングの影響を受けています。したがって、一つ一つのパスは減衰特性の影響、フェージングの影響、伝播路距離に応じた遅延時間の影響を受けています。

伝播路モデルを図4に示しました。このすべての受信信号の合成が受信信号になります。実際に装置を作って、実際の伝播路で実験しては、いつまでたっても装置を作れませんから、すべてシミュレーションで評価します。この場合は実際に伝播路のシミュレーションにしたがって、計算によって受信特性を計算します。

図5にフェージングの発生方法を示します。ランダムな疑似雑音(PN)信号を発生させて、ガウス・フィルタを通したあと、図6の破線で示したフェージング周波数をカットオフ周波数としたフィルタを通すことにより自由にフェージング周波数を発生できます。この図は、フェージング周波数 50 Hz の場合です。



〈図5〉フェージングの発生方法