

# 電波研究の玉手箱

## 第5講 伝送誤りはなぜ起きる？

電気通信大学名誉教授  
唐沢 好男

毎号、電波技術の基本テーマの中に見え隠れする不思議を玉手箱につめてお届けしている。第5講は、ワイヤレス通信の中心的話題、電波で情報を送るときなぜ誤るのか？どのくらい誤るのか？を解説する。誤るには原因があり、ここでは、移動通信に現われるマルチパスフェージングを対象にする。一つ一つのパスにドップラー周波数や到着時間のばらつきがあることによって起きる誤りである。



### ✎ 誤りの原因

無線回線は伝搬劣化が大きく、光ファイバー通信に比べて信頼性が低いと思われる。そのとおりではあるが、そのことを知った上で、対策をしっかりとれば、まったく問題ない伝送が実現できる。それゆえ、システム構築に際しては、先ずは、原因を探り、劣化を定量的に把握することから始まる。

デジタル信号が誤る主な要因は図1にまとめた以下の4点である。

- ①電波が弱い：信号が雑音に負ける（雑音問題）
- ②通信路特性の時間変化が速い：高速移動体におけるドップラーシフトによる信号位相の変動（ドップラー問題）
- ③波形が歪む：マルチパス遅延による信号到達時間のばらつき（遅延問題）
- ④混信する：同じ周波数帯利用の他局のシステムからの信号との干渉（干渉問題）

①は距離が遠すぎるとか、伝搬路上の遮へいが大きすぎる等により、電波の受信強度が雑音レベルに近くなってしまった場合、④は、同じ周波数で運用される他局の干渉波が混入する場合で、両者の誤り発生は分かりやすいし、対策もとりやすい。一方、②と③は、伝搬路がマルチパス環境であることによって起こる誤りであり、影響度の定量的評価が難しい。この誤りは、信号強度を強くしても解決できないゆえに、軽減困難な誤り (irreducible error) と呼ばれる\*1。本講では、マルチパスフェージングが引き起こす②と③の誤り

(軽減困難な誤り) について解説する。

直感的イメージは、図2の視力検査に例えられる。視力検査では、視力表にあるサイズの異なるC型マーク（ランドルト環）の向きを指定距離から読みとる能力によって、視力が測定される。上下左右4通りの向きの判別は、QPSKの復調動作に通じる。そのとき、②は、視力表はよく見えるが、環が回転していて方向を読み誤ってしまう現象である。③はいろいろの向きのマークが重なったり歪んだりしてしまい、正しい向きが分からなくなってしまう現象である。

デジタル変調信号のシンボル周期を  $T_s$  とするとき、②による誤りの発生はシンボル周期内の位相の揺

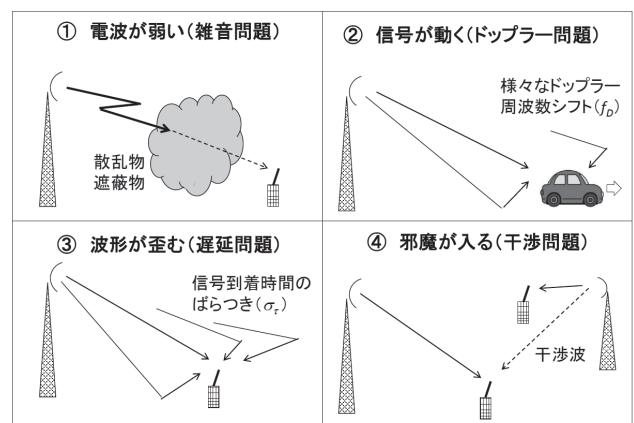


図1 伝送に誤りが起きる原因（本稿は②、③が対象。図中の  $f_D, \sigma_r$  は BER 推定に支配的な伝搬キーパラメータ）

\*1irreducible error を直訳すると「軽減不能の誤り」であるが、対策をすれば軽減できるので、日本語では「軽減困難な誤り」と言われることが多い。

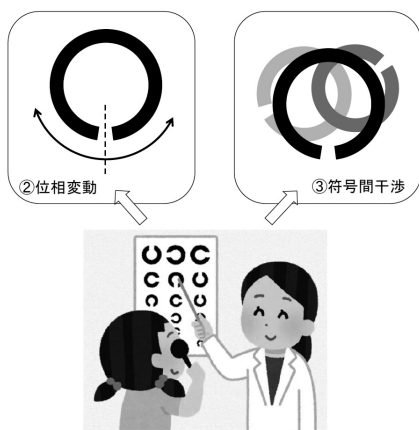


図2 誤りの発生を視力検査に例えると  
(下段のイラスト部分は「いらすとや」フリー画像より)

らぎであるため、 $T_s$ が大きくなると深刻になる。一方、③はマルチパス波の到着時間のばらつきなので  $T_s$ が小さくなると深刻になり、②とは反対の傾向を持つ。これらを予備知識として具体的な説明に入りたい。

### 👉 位相変動による誤り (②)

電波の到来方向を、進行方向を基準として  $\theta$  とすると、速度  $v$  で移動する端末は  $(v/\lambda)\cos\theta$  [Hz] ( $\lambda$  は電波の波長) のドップラー周波数偏移を受ける。波長は電波の周波数  $f_c$  に逆比例する量なので、通信周波数が高くなるほどドップラー偏移も大きくなる。ドップラー偏移の最大値  $f_D$  は  $\theta=0$  (あるいは  $\pi$ ) 方向なので、 $f_D=v/\lambda$  である。時速 100km/h の自動車では  $f_c=1\text{GHz}$ ,  $5\text{GHz}$ ,  $30\text{GHz}$  に対して  $f_D=93\text{Hz}$ ,  $463\text{Hz}$ ,  $2.8\text{kHz}$  になる。

図3は受信機の構成を示している。ドップラー問題では、検波時の基準位相を定める時間が長くなるとその間に受信信号の状態が変化してしまうので影響が大きくなる。一つのドップラー波だけなら、周波数調整で対応できるが、多くの異なる方向から異なる周波数偏移を受けた電波が到来するマルチパス環境では、それができなくなる。

ドップラー変動に最も強い通信方式は遅延検波である。1シンボル前の受信信号を位相基準にして検波復調する方式で移動通信などに力を発揮している。この場合には、1シンボル時間  $T_s$  内でフェージングの状態が変化しない、すなわち、1シンボル時間内の最大位相変化  $2\pi f_D T_s$  が  $2\pi$  に比べて十分小さければよい。よい通信を行うためには  $f_D T_s \ll 1$  が条件になる。実際には、 $f_D T_s$  の大きさに応じて誤りが発生する。レイリーフェージング環境下での平均ビット誤り

率 (BER) は以下の式で算定される [1]。

$$BER_{\text{位相変動}} = a(f_D T_s)^2 (< 0.1) \quad [\text{ビット/秒}]$$

係数  $a$  は変復調方式によって決まり、遅延検波 BPSK (DBPSK) では  $\pi^2/2$ 、遅延検波 QPSK (DQPSK) では  $\pi^2$  である。例えば、時速 100km、周波数 5GHz ( $f_D=463\text{Hz}$ ) において、影響が深刻になる目安値である  $f_D T_s=0.01$  では、 $T_s=21.6\text{ms}$  となり、帯域幅 ( $\equiv 1/T_s$ ) 約 50kHz 以下の狭帯域信号伝送に問題が発生する (= 何らかの対策が必要になる)。

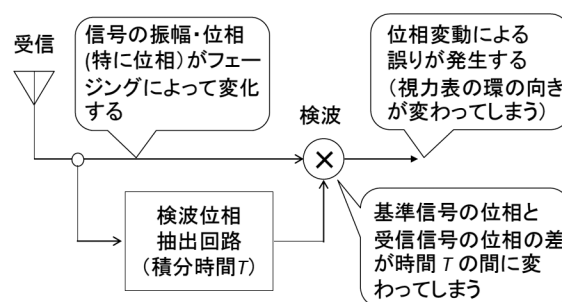


図3 受信機の基本構成と位相変動 (遅延検波の場合は  $T=T_s$  である)

### 👉 遅延のばらつきによる誤り (③)

たとえ話から入りたい。学校の運動会で百メートル競争をする。数人が一列に並んでピストルの音でスタート、テープを切った人から順位をつけ、終わると次の組がスタート。最近、この学校では生徒数が増え、効率化のためのやむを得ない措置として、前の組が全員ゴールに達する前に、次の組をスタートさせることにした。しかし、そのスタートの間隔を徐々に短くしてゆくと、後の組の速い生徒が前の組の遅い生徒を追い抜いてゴールに駆け込むことが起き、順位が正しくつけられなくなってしまった。「生徒数」「送りたい情報量」「後の組が前の組を追い抜いてしまうこと」を「101011・・・といった符号の順番が入れ替わること」と読み替えると、ここで述べる符号間干渉誤りのことになる。マルチパスによる、情報の到着時間のばらつきによって起きる電波伝搬問題になる。

例えば、通信信号の帯域幅  $B$  を 10kHz (昔)、1MHz、100MHz (これからの時代) とするとデジタル変調信号のシンボル周期  $T_s$  は  $1/B$  程度であるので、100 $\mu\text{s}$ 、1 $\mu\text{s}$ 、10ns になる。電波の進む距離に換算すると、それぞれ、30km、300m、3m である。屋内通信でも壁などの反射による通路長差のばらつきが 10m 程度はあるので、上記例え話の問題は現実である。

図4に示すようにシンボル周期  $T_s$  より小さい遅延差  $\Delta\tau$  が有る2波の合成を考えてみよう。この2波モデルの搬送波のそれぞれの振幅は  $r_1, r_2$ 、位相は  $\phi_1, \phi_2$  である。このとき、振幅比  $r_2/r_1$  を  $r$ 、位相差  $\phi_2 - \phi_1$  を  $\phi$  とする。図ではシンボル波形  $s(t)$  を矩形で表しているが、実際は帯域制限フィルタにより、連続的に変化する鈍った波形である。同図には  $\Delta\tau = 0.2T_s, r = 1$  (0dB) で、 $\phi = 0$  (同相) と  $\pi$  (逆相) のときのQPSKのアイパターンを示している。 $\phi = \pi$  では波形が大きく歪んでいて、このような状態で誤りが発生するだろうことが予想できる。

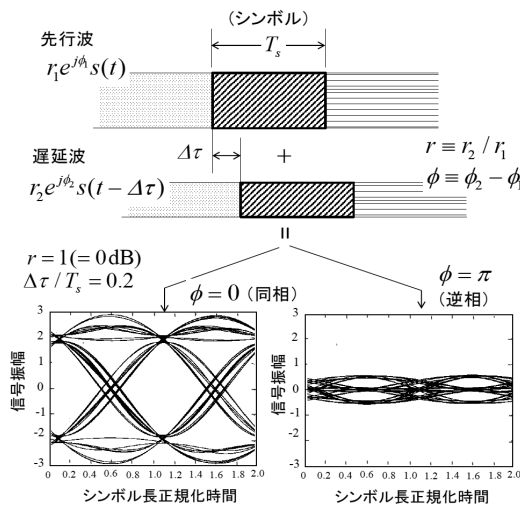


図4 遅延差がある2波の合成 (実際の波形  $s(t)$  は帯域制限フィルタにより矩形的な変化ではなく同図下側のアイパターンのように滑らかな変化に)

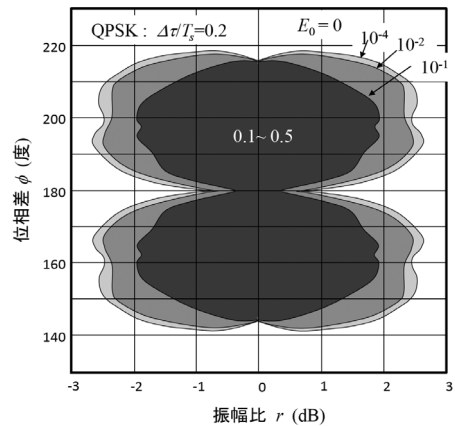
図4の2波モデルにおいて、変調方式QPSK,  $\Delta\tau = 0.2T_s$  のとき発生するBER  $E_0$  を振幅比  $r$  [dB] と位相差  $\phi$  に対して示したのが図5(a)である (計算機シミュレーションにより求めているが理論値を代理していると思ってほしい)。筆者等はこの表示を地図に見立ててBERマップと呼んでいる。最悪値として予想される  $r = 1$  (0dB),  $\phi = \pi$  ( $180^\circ$ ) を中心とする狭い繭形の領域に誤りの発生が集中している。同じ土俵で、64kbpsのモデムを用いた実測値を図5(b)に示す。実測値の方が、雑音等の誤差が入り込みやすいため、誤り発生エリアが広がっているが、繭形は共通である (この図作成の苦労話は図のキャプションの後に)。

筆者等は、BERマップ利用の簡易なBER推定モデル (等価伝送路モデルと呼んでいる) を構築し、レイリーフェージング下での符号間誤り (平均BER) の推定式を次式により得ている [2]。

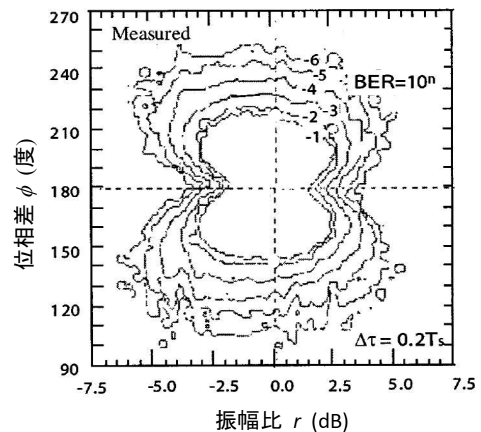
$$BER_{\text{符号間干渉}} = b(\sigma_\tau / T_s)^2 (< 0.1) \text{ [ビット/秒]}$$

ここで  $\sigma_\tau$  は遅延量のばらつきの標準偏差で、遅延スプレッドと呼ばれる量、係数  $b$  は変復調方式によって決まり、BPSK, QPSK, 16QAM に対して、0.07, 0.78, 2.0 である。この値から分かるようにBPSKは極めて符号間干渉に強い変調方式であると言える。

以上述べたように、この伝搬問題は信号到着時間のばらつきという時間領域の現象であるが、これを周波数領域で見ると特性の不均一が現われ、これによる波形ひずみ問題と言う見方もできる。後者の見方でのマルチパス現象は周波数選択性フェージングと呼ばれる。



(a) 計算機シミュレーション (理論値の代理)



(b) 64kbps モデムを用いた実測 [下記余話]

図5 2波モデルで見える誤り発生状況 (QPSK,  $\Delta\tau/T_s = 0.2$ ; 変復調方式によって発生エリアの形は変わる)

【余話：図5(b)を作成したのは筆者が企業の研究所に勤務していた1992年。当時研究所にあった64kbpsのQPSKモデムを用いた。2波の振幅比・位相差を定めて一つの点のBERを得るのに約2分(測定1分、設定1分)。0.2dB, 2°刻みで約6000点、時間に直して延べ約200時間、集中して行っても3週間(以上)。この測定をしてくれたのは大学の卒業研究生として筆者が指導したK君。自動測定ができなかった当時、この単純作業をストライキ無しに根気よく行ってくれたお陰でこの図ができた。K君の苦行に対しては感謝しかなく、心に残る思い出としてこれを記しておきたい。】

## ☞ もう一つの誤り要因：サイクルスリップ (② + ③)

前項で述べたように、理論上、BPSKはQPSKに比べて符号間干渉に非常に強い。しかし実際に屋外で移動受信してみると、BPSKもQPSKに近い誤りが起きる。その原因が、受信信号から再生されるクロックの時間揺らぎ（受信信号のサンプルタイミングがシンボル周期の範囲を超えて動く）によるものであることを見出したのは、京大の池上教授の研究グループ、現象はサイクルスリップと名づけられた [3]。サイクルスリップはフェージングに時間領域と周波数領域の両方の変動（図1の②+③：二重選択性フェージングと呼ばれる）があるときに発生し、受信機のクロック再生回路がフェージングの動きにだまされるのである。

論より証拠、このサンプルタイミングの動きを計算機シミュレーションで見たい。図6は $f_D T_s = 0.01$ 、 $\sigma_r / T_s = 0.05$ に設定したときのサンプルタイミング（=クロック位相）の揺れである。通常はシンボル周期内（図の-0.5～0.5内）に収まり問題は起きないが、ごく稀にこれを超えて急激に動く現象が見られる。下段の時間拡大図からもわかるように急激とは言っても、

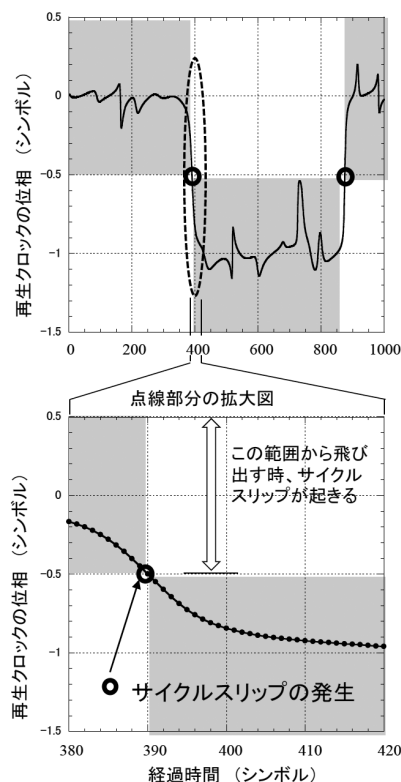


図6 時間と周波数領域の両方に変動がある環境で起きる再生クロックの位相変動とサイクルスリップ（この設定での発生頻度の理論値は 2.2 回 / 1000 シンボル）

シンボル単位で見ればゆっくりとした変動である。このように、0.5の壁を越える毎にサイクルスリップが発生し、一旦発生すると同期が外れ、次に同期が確立するまで誤り続ける。この問題は、連続的に信号が送出されるような場合には必ず起きるが、影響の深刻度は信号のフレーム構成に依存する。

この現象のメカニズムと推定を述べることはここではできないが、1秒間当たり発生する回数 $N$ はレイリーフェージング環境では次式で算定できる [1]。

$$N = \sqrt{2\pi} f_D \sigma_r / T_s \quad [\text{回/秒}]$$

発生回数は伝搬環境を表す二つのパラメータの積 $f_D \sigma_r$ に比例していることが分かる。この新たな伝搬指標 $f_D \sigma_r$ はスプレッドファクタと呼ばれている。

## ☞ 信頼性の高い通信を実現するために

無線通信の発展の歴史は電波伝搬問題との戦い、そしてその克服の歴史と言っても過言ではない。

無線通信の時代の方向は、

- 1) より大容量・高通信速度へ
- 2) より高い周波数の利用へ
- 3) より高速移動体への適用へ

と向かっている。1)では③が、2),3)では②の伝搬問題が実現の隘路になる。1)では③の問題を克服するために遅延に強いOFDM（直交周波数分割多重）が採用されるが、シンボル周期を長くすることから、今度は②の問題が生まれてくる。②と③は信号設計に関して対策の方向が逆であるので、一方を立てれば一方が立たなくなるジレンマがある。そして、その対策の延長線上に、②+③の環境において、何をしてもこれ以上の伝送はできない（=手の打ちようがない）と言う物理限界が現われてくる。そのときに鍵となる伝搬パラメータが、サイクルスリップの話の中で見えてきたスプレッドファクタ $f_D \sigma_r$ である。では、具体的に、5G, 6Gの移動通信では限界に対してどのあたりまで来ているのだろうか、と言うことが気になると思う。この点について、今後の講で話を展開していきたい。

<参考文献>

- [1]唐沢好男, 改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2016.03.
- [2]唐沢好男, “等価伝送路モデルによる符号間干渉誤りの完備な計算法,” 技術報告, YK-054(私報), 2020.10.  
[http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR\\_YK\\_054\\_ETP\\_Calculation\\_Formula.pdf](http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_054_ETP_Calculation_Formula.pdf)
- [3]S. Yoshida, S. Onoe, and F. Ikegami, "The effect of sample timing on bit error rate performance in a multipath fading channel," IEEE Trans. Vehicul. Tech., vol. VT-35, pp. 168-174, 1986.