日本学術会議URSI-F会合 第622回 (March. 19, 2018)

電波伝搬視点からのディジタル伝送特性解析

~最大比合成ダイバーシチ適用時の 符号間干渉誤り特性~

唐沢 好男

電波伝搬的視点からのディジタル伝送特性解析の第四弾として、最大比合成ダイバーシ チ適用時の符号間干渉推定モデルを示す。ここで提示する推定モデルは、BERマップ利用と 言う計算の段取りに手間暇かかる部分があり、必ずしも実用的ではない。しかしながら、そ の結果の意味を肌感覚で理解したいと言う場合、すなわち、原因である電波伝搬と結果で あるディジタル伝送特性の物理的な結びつきを知りたい場合において、本稿で述べる推定 法はおおいに役立つものと確信している。(また、得られた式もきわめて簡易である)。

広帯域信号の伝送においては、マルチパスによる遅延量のばらつきによる符号間干渉が 伝送誤りの原因になる。符号間干渉によるビット誤り率を定量的に求めることは、電波伝搬 と通信方式が複雑に関連していて容易ではない。筆者等は、遅延広がりとドップラー広がり が共に存在する環境において同期はずれ誤りを引き起こす再生クロックのサイクルスリップ 現象の解析のために、独自の伝搬モデル:等価伝送路モデル(Equivalent Transmission-Path モデル)を編み出し、これを応用して、仲上・ライスフェージング環境での符号間干渉誤りの 推定法を構築している。このモデルによって、電波伝搬と通信方式の普遍的な結びつきが 明らかになり、また、定量的評価の手段を得ている。

本発表では、仲上・ライスフェージングの極限に位置づけられるレイリーフェージングを対象に、最大比合成ダイバーシチ適用時の符号間干渉誤りを推定するための伝搬モデルを 示す。このモデル化では、等価伝送路モデルをベースとし、物理に裏打ちされた汎用的な取り組みを行う。

本発表の論文形式レポートは、唐沢研ホームページ <u>http://www.radio3.ee.uec.ac.jp</u> トップページ \rightarrow 技術レポート公開ページ \rightarrow <u>YK-011</u> に置いている。



- 1) 周波数選択性フェージングと符号間干渉誤り そのスペースダイバーシチ適用時には?
- 2) モデル化の第1ステップ
 ・2波モデル近似とその妥当性
 ・BERマップの基本的性質
 ・推定の基本式
- 3) モデル化の第2ステップ
 - ・電波伝搬の鍵関数:振幅比・位相差結合確率分布の導出
- 4) 推定モデルの精度評価とダイバーシチ合成特性
 - •精度評価
 - ・ダイバーシチ合成特性
 - ・変復調方式に依存しない非常に簡易な符号間干渉評価式



スペースダイバーシチと符号間干渉誤り抑圧



電波伝搬的視点からの符号間干渉誤りのBER推定



帯域内で伝達関数*T*(*f*)が同じ→発生する誤りも同じ 第一次近似: ① 伝達関数の値 *T*(*f*₀)が同じ

② 伝達関数の微分係数(傾き) T'(f₀) が同じであればよいが、さらに、符号間干渉誤りでは、伝達関数の値そのものにはよらないので

③ $T'(f_0)/T(f_0)$ の値が同じところでは、誤り発生も同じになるはず



delay





 τ_i



 $\Delta \tau_e$

0

2波モデルでの誤りの発生分布(CQPSK: BERマップ)





この形状相似形は、計算機シミュレーションによっても、また、理論的考察に よっても確認している(詳細はスライド28に示したレポートYK-011の付録1) → 一つの変復調方式に対してBERマップを一枚準備すれば、他のΔτについて は、スケーリングによって得られる



符号間干渉誤り推定の基本式 (SISO) $P_e\left(=\left\langle P_0\right\rangle\right)=\int_0^\infty\int_0^{2\pi} f_p\left(r,\phi;\Delta\tau\right)P_0\left(r,\phi;\Delta\tau/T_s\right)d\phi\,dr$ 電波伝搬 システム(BER map) 仲上・ライスフェージング $f_p(r,\phi;K,\tau_m,\sigma_{\tau R})$ $= \frac{\sigma_{\tau,R}^{2} \tau_{m}^{2} r}{\pi (\sigma_{\tau,R}^{2} r^{2} + \tau_{m}^{2})^{2}} \left(1 + \frac{K \tau_{m}^{2} (\tau_{m}^{2} + \sigma_{\tau,R}^{2})}{\sigma_{\tau,R}^{2} (\sigma_{\tau,R}^{2} r^{2} + \tau_{m}^{2})} \right)$ $\times \exp\left\{-\frac{K\left(\tau_m^2 + \sigma_{\tau,R}^2\right)}{\sigma_{\tau,R}^2}\left(1 - \frac{\tau_m^2}{\sigma_{\tau,R}^2 r^2 + \tau_m^2}\right)\right\}$

$$f_{p}^{(\text{Rayleigh})} = f_{p}(r, *; 0, \sigma_{\tau}, \sigma_{\tau}) = \frac{r}{\pi (r^{2} + 1)^{2}}$$
唐沢、コロナ社(2016) (式(7.67))より

11





第一ステップ: 任意伝搬環境を2波モデルに近似してよいか?

「ディジタル伝送シミュレーション」と「2波モデル近似のMERマップ読み取り」



The number of antennas: N

第一ステップの結論: ダイバーシチの場合でも2波モデル近似 OK

符号間干渉によるBERフロア値はこの形で求められる

 $P_{e}(\sigma_{\tau},N)\left(\equiv \langle P_{0}\rangle\right) = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} f_{r\phi}(r,\phi:N) P_{0}(r,\phi:\Delta\tau_{e}/T_{s}) d\phi dr$ 伝搬環境(*r, φ*)の 2波モデルのBER特性 結合確率分布 (BERマップ) 鍵となる物理量 $f_{r\phi}(r,\phi:N)$ 具体的な導出 $f_{r\phi}(r,\phi) = f_r(r) f_{\phi}(\phi | r)$

振幅比 r の確率分布: *f_r*(*r*)を求める (1/4)

それぞれの合成信号の振幅: r_1 , r_2 , その比: $r \equiv r_2 / r_1$ 先行波の平均電力: P_{e1} , 遅延波の平均電力: P_{e2} , その比: $\gamma \equiv P_{e2} / P_{e1}$

 $\gamma=0$ 、すなわち、完全なMRCであれば、合成振幅 r_0 は仲上m分布

$$f_{Nm}(r_0;m,\Omega) = \frac{2m^m}{\Omega^m \Gamma(m)} r_0^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} r_0^2\right)$$

今回のケースはウェイト不完全なMRC

$$w = \sum_{i=1}^{L} a_i / w_0 = \frac{a_{e1} + a_{e2}}{\|a_{e1} + a_{e2}\|}$$

それでも、分布の中央値付近の近似には、仲上m分布でよい

先行波 $f_1 = f_{Nm}(r_1; m_1, \Omega_1)$ 遅延波 $f_2 = f_{Nm}(r_2; m_2, \Omega_2)$

振幅比 r の確率分布: f_r(r)を求める (2/4)

$$\gamma \equiv P_{e2} / P_{e1}$$
 N:ブランチ数(アンテナ数)

先行波振幅の分布のパラメータ値(*)

$$\Omega_{1} = \frac{N + \gamma}{1 + \gamma} P_{e1}$$
$$m_{1} = \frac{(N + \gamma)^{2}}{N + 2\gamma N + \gamma^{2}}$$

遅延波振幅の分布のパラメータ値

$$\Omega_2 = \frac{1 + \gamma N}{1 + \gamma} P_{e2}$$
$$m_2 = \frac{(\gamma N + 1)^2}{\gamma^2 N + 2\gamma N + 1}$$

(* 導出はスライド28に示す資料に) 17

振幅比 r の確率分布: f_r(r)を求める (3/4)

先行波振幅 r_1 の分布 $f_1 = f_{Nm}(r_1; m_1, \Omega_1)$ 遅延波振幅 r_2 の分布 $f_2 = f_{Nm}(r_2; m_2, \Omega_2)$ その比 $r = r_2/r_1$ の分布 $f_r(r)$



	$2\Gamma(m_1 + m_2)\lambda^{m_1}r^{2m_2 - 1}$	$\lambda = \frac{\Omega_2 m_1}{\Omega_2 m_1}$
_	$\overline{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)(\lambda+r^2)^{m_1+m_2}}$	$\Omega_1 m_2$

振幅比 r の確率分布: f_r(r)を求める (4/4)

今回のモデリングでは $P_{e_1} = P_{e_2}$ に設定しているので、

$$m_1 = m_2 = \frac{(N+1)^2}{3N+1} \equiv m$$
$$\Omega_1 = \Omega_2 = \frac{N+1}{2} P_{e1} \equiv \Omega$$

$$f_r(r) = \frac{2\Gamma(2m)r^{2m-1}}{\left\{\Gamma(m)\right\}^2 (1+r^2)^{2m}}$$

$$f_x(x) = \frac{1}{b} \exp\left(\frac{x}{b}\right) f_r\left(\exp\frac{x}{b}\right)$$

 $(b \equiv 8.686)$





位相差の条件付確率分布: $f_{\phi}(\phi|r)$ を求める(2/3)

$$f_{r\phi}(r,\phi) = f_r(r) f_{\phi}(\phi | r) \approx f_r(r) f_{\phi}(\phi | r = 1)$$
こちらに作戦変更

$$f_{\phi}(\phi | r=1)$$
 を求めるのはどうか?

それでも難しい?

位相差の条件付確率分布: $f_{\phi}(\phi|r)$ を求める(3/3)

位相差の条件付確率分布 $f_{\phi}(\phi|r=1)$: シミュレーション実験と関数近似



符号干渉による間誤りBERフロア値の計算式 (BERマップの相似性を利用した)

$$P_{e} = \eta^{2} \Delta x_{ref} \Delta \phi_{ref} \sum_{i_{x}=1}^{I_{x}} \sum_{i_{\phi}=1}^{I_{\phi}} f_{x\phi} \left\{ x(i_{x}), \phi(i_{\phi}) \right\} P_{0_ref}(i_{x}, i_{\phi})$$

$$\begin{split} f_{x\phi}(x,\phi;N) &\approx f_x(x;N) f_{\phi}(\phi \mid r=1;N) \\ x(i_x) &= \eta \left(\frac{1-I_x}{2} + i_x - 1\right) \Delta x_{ref} \\ \phi(i_{\phi}) &= \pi + \eta \left(\frac{1-I_{\phi}}{2} + i_{\phi} - 1\right) \Delta \phi_{ref} \qquad \eta \equiv \frac{\Delta \tau}{\Delta \tau_{ref}} \end{split}$$

 $\Delta x_{ref}, \Delta \phi_{ref}$: BERマップの x, ϕ の刻み幅 $i_x, i_\phi: I_x \times I_\phi$ で作成されたBERマップのx- ϕ 座標での位置 BERフロア特性: 推定値 vs シミュレーション値



最大比合成ダイバーシチ適用時のBERフロア特性: CQPSK



$$P_e(\sigma_{\tau}, N) = \alpha \,\beta^{N-1} (\sigma_{\tau} / T_s)^{2N}$$

$$(\alpha = 0.78, \beta = 6.3)$$

最大比合成ダイバーシチ適用時のBERフロア特性: DQPSK



熱雑音と符号間干渉が共に存在する環境でのBER特性

 $BER(\Gamma_0, \sigma_{\tau}, N) \approx BER_{TN}(\Gamma_0, N) + BER_{ISI}(\sigma_{\tau}, N)$



CNR Γ_0 (dB)

まとめ

- 単一アンテナ対向システム(SISO)で構築した等価伝送路 モデルを、最大比合成ダイバーシチへ適用時の符号間干 渉誤り特性評価モデルに拡張した
- ② 電波伝搬の鍵となる関数:2波モデルの振幅比·位相差 結合確率分布の式を導出した
- ③ 解析の結果、BERのフロア値(BER_{ISI})は変復調方式に依 存しない汎用的な形の計算式で表すことができ、変復調 方式に対しては係数 α, βで定められる

$$BER_{ISI}(\sigma_{\tau}, N) = \alpha \beta^{N-1} (\sigma_{\tau} / T_s)^{2N}$$

このスライドに提示した式の根拠や導出、その内容の詳細は下記資料にまとめています <u>http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-011_MRC-Diversity.pdf</u> YK-011 最大比合成ダイバーシチ適用時の符号間干渉誤り推定



BER マップの形状相似性 (CQPSK: 計算機シミュレーション)



(形はほとんど同じだが、縦軸・横軸のスケールが2倍う)

30

BER マップの形状相似性 (CQPSK 64kbpsモデムによる実測)



DQPSK $\Delta \tau / T_s = 0.2$ のBERマップ



(CQPSKとだいぶ形が異なっているが、誤り発生の多いコアの部分(濃く色付けした部分)は 類似している。このため、BER特性そのものは、あまり違いがでない(スライド25,26)