

フェージング通信路における不均一誤り訂正符号に関する基本特性 (第2報) - 周波数選択性フェージング対策 -

山崎 悟史[†] デービッド アサノ^{††}

† 信州大学大学院 総合工学系研究科 システム開発工学専攻 †† 工学部 情報工学科
〒380-8553 長野市若里 4-17-1

E-mail: †satoshi.yamazaki@tel.com

あらまし どの情報にも均一な符号を施すのではなく、情報の重要度に応じた誤り訂正を施すことで、システム全体として高い信頼性、性能が期待できる。前報にて、このような不均一誤り訂正符号を用いた情報伝送システムを提案した。しかし、それはフェージングにより受ける位相補正を補償しており、改善点を残していた。本稿では、この位相補償機構を外し、周波数選択性フェージング対策として適応等化器の導入を提案する。信号点配置に基づく特性評価を行い、計算機シミュレーションによって、提案方式の有効性を確認した。

キーワード 不均一誤り訂正符号, トレリス符号化変調, 周波数選択性フェージング対策, 適応等化器
信号点配置 (RING型, TRAP型), 各符号器ビット誤り, 符号器推定誤り

Performance Evaluation of Unequal Error Correcting Codes in Fading Channels - The second report (Frequency selective Fading Measure) -

Satoshi YAMAZAKI[†] and David K ASANO[†]

† Department of Information Engineering, Shinshu University Nagano-shi, 380-8553 Japan
E-mail: †satoshi.yamazaki@tel.com

Abstract We proposed an unequal error protection (UEP) scheme using trellis coded modulation and an adaptive equalizer for use in mobile fading channel communication environments. We proposed two types of signal constellations, TRAP and RING, to realize unequal error protection and showed their performance using computer simulations.

Keyword Unequal Error Protection (UEP), Trellis-Coded Modulation (TCM), Adaptive Equalizer, Fading Channel

1. まえがき

様々な情報通信システムにおいて、送信する情報に対して、全て均一な誤り訂正を施すのではなく、重要な情報により高い誤り訂正を施す不均一誤り訂正特性 (UEP 特性) が要求されている。具体的には、重要度の高い情報には十分な誤り訂正を行い、重要度の低い情報には簡単な誤り訂正を行うことにより、どの情報にも均一な符号化を施した場合に比べ、システム全体として高い信頼性、性能などが期待できるからである。例えば、ATM 通信では、固定長 53byte をもつ情報転送単位である ATM セルのうち、5byte を ATM ヘッダに割り当てている[1]。ATM ヘッダは ATM セルの司令塔のため、他の 48byte より強く保護されることが望ましい。なぜなら、この部分の情報を失うと、通信に大きな支障をきたす可能性があるからである。このように、多くの情報通信システムにおいて、重要度に応じ

て保護する情報を区別する UEP 特性を有することは、大変意味がある。そこで我々は、トレリス符号化変調を用いた UEP システムを検討してきた[2,3]。

ところで近年、携帯電話などデジタル移動通信に対する要求が高まっている。しかし、ワイヤレス通信環境下では、マルチパスフェージングなどの影響により、送信信号が劣化する。フェージング補償技術として、適応等化技術、ダイバーシチ技術、アダプティブアンテナ技術などが挙げられる[4]。本稿では、装置の小型化の実現を想定し、周波数選択性フェージング補償に向く、適応等化技術に着目した。そこで、前報[2,3]にて評価したトレリス符号化変調を用いた UEP システムに適応等化器の導入を提案する。

以下、2. において UEP の従来方式、3. において提案方式を述べる。4. において提案方式に従い計算機シミュレーションを行い、5. において特性評価を行う。6. にて結論と課題を述べる。

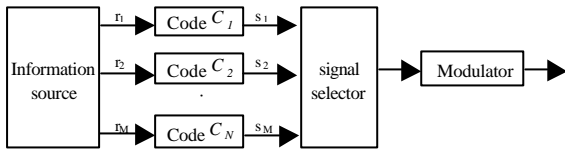


Fig.1 マルチレベル符号器

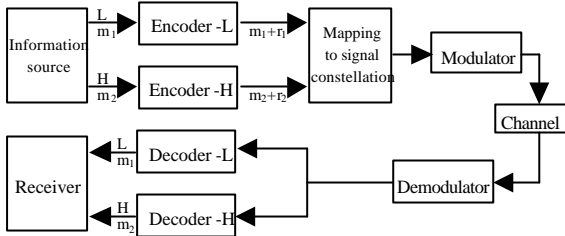


Fig.2 時分割多重化方式におけるシステム構成

2. 従来方式

従来、UEP 実現に向けて様々なアプローチがとられてきた。初期の研究[5]-[6]では、ブロックまたは畳み込み符号が用いられているため、符号化利得は帯域幅の広さに比例するし、不均一誤り特性を作り出す方法として、マルチレベル符号が用いられている。この問題点は、各符号化は単純であるが、全体の復号化は複雑になることである。また、マルチレベル符号器を用いると、符号化利得を達成するために、余分な符号ビットを必要とする為、帯域幅の効率化が図られていない。

それに対し、帯域幅の効率化を目的として、一様な信号点配置と非一様な信号点配置と符号化変調の時間分割多重化方式がある[7],[8]。符号化変調を用いた不均一誤り特性を作り出す一例（重要度2レベル）を Fig.2 に示す[8]。重要度の高いグループに対しては、より強力な符号(符号器1)、重要度の低いグループに対しては、符号化しないか低い符号(符号器2)を用いる。Fig.2 の構成では、符号器1と符号器2からの出力を用いて信号点配置へマッピングするので、式(1)を満たさなければならない。

$$m_1 + r_1 = m_2 + r_2 \quad (1)$$

ただし、 m_1 、 m_2 はそれぞれ重要度の高い情報ビットと重要度の低い情報ビットを表し、 r_1 、 r_2 はそれぞれ符号器1と符号器2で付加された冗長ビットを表す。受信側では、各符号器に対応した復号器を用意し、復号する。これらの従来方式では、重要度は2レベルを前提とし、重要度の高い情報と低い情報がビット毎に切り替わるか、ある規則的なデータ列で切り替わるものが多かった。また、通信路としてAWGN通信路での評価を前提としたシステム構成が多く、フェージング通信路における評価がなされているものは、マルチレベル符号を用いた[9]に見られる程度である。

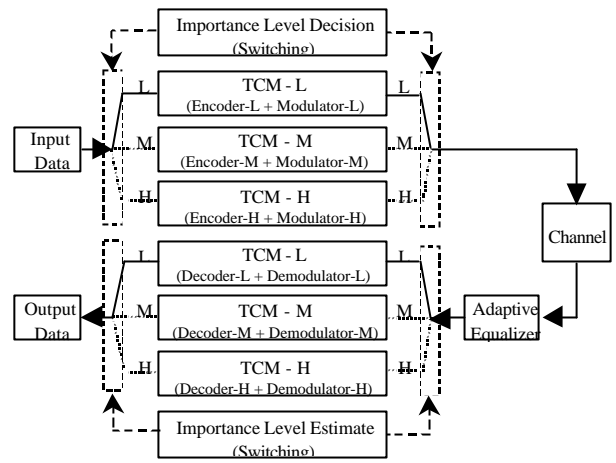


Fig.3 提案方式におけるシステム構成

3. 提案方式

3.1. システム構成

提案するシステム構成を Fig.3 に示す。これは、符号器、変調器または復調器、復号器を3つ並列に配置させた重要度を3レベル考慮したシステム構成である。従来方式[7,8]同様、時間分割多重化方式を利用するが、トレリス符号化変調により変調と符号化を一体で行い、システムを簡素化している。トレリス符号化変調を用いることによって、符号化により送信ビット数が増大するが、その分、変調多値数を増大させ、帯域幅を不変に保ったまま、復調における信頼度を高くしている。また、各符号器に対してそれぞれ変調器を用意しスイッチにより切り替えるため、信号点配置へのマッピングにおける制約がない。つまり、従来方式における式(1)の関係が満たされなくても良い。

ところで、ワイヤレス通信環境下では、熱雑音による影響に加えて、建物などによる反射、回折、散乱や移動体の走行に伴って、受信信号の包絡線(振幅)と位相を急激に変化させるフェージングの影響が顕著となる。このようなフェージングの影響は、信号を構成する周波数成分が一様に減衰する周波数非選択性フェージングと、信号の周波数成分によって異なる減衰を受ける周波数選択性フェージングの2種類に分類される。伝送路の特性に依存するが、後者は、一般に広帯域信号を伝送する場合に検討すべきフェージングであり、多重波伝播遅延を無視することができない。提案方式では、この周波数選択性フェージングに着目して、適応等化器を具備する。他の方式(ダイバーシチ、アレーアンテナ)は、複数のアンテナを要する為、大規模な装置が必要になるが、適応等化器であれば、デジタル信号処理で実現できるため、携帯端末などにも実装可能であり、装置の小型化が期待できる。

3.2. 適応等化器の構成（モデルの改良点）

提案方式に導入する適応等化器について述べる。シミュレーションモデル（Fig.5）の点線部分が、本稿にて導入した適応等化器である。つまり、この部分が、前報[3]にて評価したモデルからの改良点である。適応等化器として、正規化LMSアルゴリズムにもとづいたFIR型線形等化フィルタを用いる。LMSアルゴリズムは、一般に収束特性が良く、FIR型は安定性に優れているからである。また、適応等化器はトレーニングモードとトラッキングモードを有する構成とした[10]。トレーニングモードとは、受信側でトレーニング信号と呼ばれる送信信号と同じ信号を発生している状態である（Fig.5における(a)に相当）。しかしこの状態では、実質的な情報伝送が行われなため、一定時間経過後、トラッキングモードに切替る。トラッキングモードとは、適応等化器の出力の符号判定値を所望信号とする状態である（Fig.5における(b)に相当）。このような仕組みによって、適応等化器の所望信号を復元されるべき送信信号に近づけ、フェージング補償対策として有効に作用させる。

3.3. 処理概要

提案システムにおける処理概要を述べる。入力信号は0,1のランダムなビット列とし、入力信号の情報の重要度はNビット毎に変化するものとする。本稿では、こういった情報が、重要度が高いか低いかといった点については考慮しない。つまり、通信システムを評価する上で、あるビット列Nを重要度が高いと解釈する。また、それぞれの重要度の情報が偏って発生した場合、均一な誤り訂正を施したものに近づくため、それぞれの重要度の情報は同確率で発生するものとする。符号器では、畳み込み符号を用いて符号化する。符号化率は、情報の重要度が高いものほど低く設定し、誤りが起こりにくくする。受信側では、同一通信路から送信された信号を受信し、各復号器および復調器で並列に処理される。またこの流れと並列に符号器推定処理を行う。手順としては、受信した信号と変調に用いる各信号点との最小距離を算出し、その最小距離をなす信号点番号を決定し、どのレベルの重要度をもつ送信信号、受信信号なのかを推定する。この符号器推定処理を符号器切替速度Nビット毎に行う。その結果、最も適切な符号器の出力をNビット毎にまとめて採用する。この符号器推定は文献[3]にて詳細に述べている。

3.4. 信号点配置

本システムを評価するにあたり信号点配置として、2RING, 3RING, TRAPの3タイプを考案した[3]。各信号点配置をfig.4の(a)~(c)に示す。

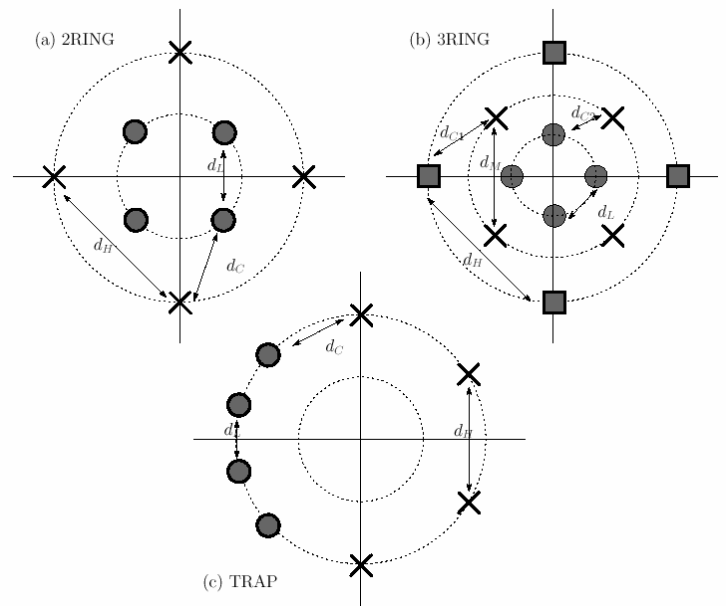


Fig.4 信号点配置

Table 1 信号点距離

type	2RING	3RING	TRAP
d_L	1.414	1.414	1.035
d_M	-	2.828	-
d_H	2.828	4.243	2.0
d_C	1.0	-	1.531
d_{C1}	-	2.0	-
d_{C2}	-	1.474	-

Fig.4における各円の半径長を1として、各信号点距離の計算結果をTable 1に示す。

4. 計算機シミュレーション

4.1. シミュレーションモデル

3.で述べた提案方式に従い、計算機シミュレーションによって特性評価を行う。重要度が2レベルの場合のシミュレーションモデルをfig.5に示す。重要度が高い情報に対しては、誤りから強く保護したいため、符号化を行う。一方、重要度が低い情報に対しては、さほど誤りから保護されなくてもよいため、符号化を行わないものとする。送信側において、畳み込み符号によって符号化し、マトリックスインターリーブを用いて、ビット誤り率改善を図る。デジタルタイマーを用いて、適応等化器におけるトレーニングモードとトラッキングモードを切替える。また、受信側では、ビタビ復号によって復号化し、マトリックスデインターリーブを用いる。AWGN通信路で加える雑音は、2ないし3つの重要度に使う信号点の平均電力に対する雑音比率を考え、ガウス雑音は情報ビット当たりの

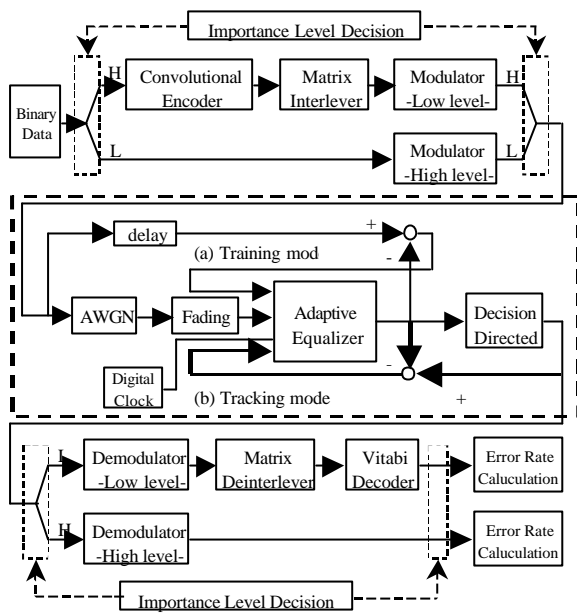


Fig.5 シミュレーションモデル

Table 2 シミュレーション緒元

Receiver Speed	0.1km/h, 10km/h, 50km/h
Matrix Interleaver Size	1024 (32*32)
Signal Constellations	2RING, 3RING, TRAP
Importance Level	2 (2RING, TRAP), 3 (3RING)
Encoding	Convolutional code (high and medium importance levels)
Encoding rate	3/4 (middle importance level) 1/2 (high importance level)
Constraint length	2
hannel	Rician fading
Rician Parameter	K=0 (2RING, 3RING) K=0, 5 (TRAP)
Decoding	hard-decision Viterbi decoder
Trace back length	10
Equalizer structure	FIR transversal filter
Equalizer algorithm	NLMS
Number of filter weights	11
Equalizer step size	0.01
Equalizer gain constant b	0.05

SNR を考える。つまり、符号化率 $1/2$ で符号化したビット列に含まれる情報ビットを $1/T$ とすると、符号化しないビット列に含まれる情報ビットは $2/T$ となる。情報ビット当たりの SNR を等しくすることで、両者を公平に評価する。また、通信路における雑音電力であるが、RING 型では、RING によって異なるため、送信点の信号電力の平均値を用いる。以上の条件の下、各符号器での誤り発生と符号器判定による誤り発生は独立であるとして、各々の特性を取得し、評価を行う。

4.2. シミュレーション緒元

主なシミュレーション緒元を Table2 に示す。提案した 3 つの信号点配置 (2RING 型, 3RING 型, TRAP 型) に対して、送信局 (移動体) の速度をパラメータとし

た場合の E_b/N_0 に対するビット誤り率 (BER) 特性評価する。速度は、0.1 km/h, 10 km/h, 50 km/h の 3 通りを測定した。尚、システム評価として、ライスパラメータ $K=0$ (つまり、レイリーフェージング通信路) を前提に評価するが、TRAP 型に関してのみ、 $K=5$ についても評価を行う (理由は 5.1.(2) にて後述する)。

5. 特性評価

5.1. 各符号器におけるビット誤り率の評価

2RING 型, 3RING 型, TRAP 型における各符号器でのビット誤り率を Fig.6 ~ 9 に示す。図中において、 \square は重要度高、 \square は重要度中、 \square は重要度低を示し、記号がない単なる線は、重要度の高い符号器で均一な符号化を施した場合である。2RING 型 (Fig.6) にて、適応等化器 (Adaptive Equalizer) 有りの場合と無しの場合のデータを示した。

(1) RING 型 におけるビット誤り評価

2RING 型 (Fig.6), 3RING 型 (Fig.7) の場合、移動体の速度に関わらず、より重要度が低い情報は均一な場合より悪い特性を示しているが、より重要度が高い情報は、どの情報も均一な符号化を施した場合より、良い特性を示している。結果、UEP を用いることによって、全体として効率的が良く、システム全体として高い信頼性、性能が期待できる。また、適応等化器 (Adaptive Equalizer) の導入前は、エラーフロアが生じていたが、導入後、その回避を確認できた。

(2) TRAP 型 におけるビット誤り評価

TRAP 型 (Fig.8) の場合、速度 0.1 km/h の場合は、RING 型同様、不均一誤り保護が実現できているが、速度 10, 50 km/h, エラーフロアが発生している。原因として、重要度低い点同士の間隔 d_L が 1.035 であることが関係していると思われる。これは、Table.1 より、各符号器のビット誤り率に關係する d_C, d_L and d_H の中で最小値である。また、TRAP 型は全ての点が同一円上に存在していることや非均一な信号点配置なども影響していると考えられる。

一般に、ライスパラメータ K の値を上げると、直接波がレイリー波(素波)と比較して支配的になるため、レイリー波が信号点に与える振幅と位相のひずみが小さくなり、特性が良くなる。そこで、 K の値を上げて評価したところ、TRAP 型においても $K=5$ 以上で設計すれば、エラーフロアが回避できることがわかった。 $K=5$ の場合を Fig.11 に示す。また、受信局の速度が小さければ、フェージングの影響を受けにくくなり特性が良くなるが、3 km/h 以下であれば、エラーフロアが回避できることもわかった。

5.2. 符号器推定における誤り率の評価

3.5 で示した重要度推定アルゴリズムにもとづき、符号器推定を行う。ここでは、移動体の速度が最大の0.1 km/hで、重要度が2レベルのRING型とTRAP型の比較を行った。符号器切替速度（重要高のビット列 N bit）を一定にし、情報ビットを増加させた場合の符号器推定誤り率をFig.10に示す。また、情報ビットあたりのSNRを一定にし、符号器切替速度を増加させた場合の符号器推定誤り率をFig.11に示す。

(1) SNRに対する符号器推定誤り評価

符号器切替速度 $N=100$ で評価を行った結果をFig.10に示す。TRAP型の方がRING型より良い特性を示している。RING型に関しては、情報ビットあたりのSNRが増加しても符号器推定誤りがほとんど改善されていないことがわかる。これは、外側のRINGに配置された信号が、内側のRINGに入ってしまう、符号器推定が困難になっていたと推定される。TRAP型に関しては、SNRが増加に伴い、特性が改善されている。これは、TRAP型は全ての点が同一RING上に存在するため、フェージングにより振幅が落ち込んでも、異なる重要度に対する信号点同士にさほど影響を与えていないと推定される。

(2) 符号器推定速度に対する符号器推定誤り評価

情報ビットあたりのSNRを10 dBで評価を行った結果をFig.11に示す。TRAP型の方がRING型より良い特性を示している。TRAP型に関しては、符号器切替速度 $N=100$ 以上になると、符号器誤りが改善されている。RING型に関しても、 N を十分大きくとると、良好な特性を示している。

5.3. 総合評価

提案したUEPシステムにおける各符号は、3つの信号点距離 (d_C, d_L, d_H) に関係する。同一符号における符号間距離 (d_L, d_H) が各符号器における特性に影響するのに対して、異種符号の符号間距離 (d_C) は、符号器推定の特性に影響する。これらの信号点距離 (d_C, d_L, d_H) は、幾何学的に拘束があり、互いに相関がある為、信号点距離と各符号器の特性、符号器推定の特性には、トレードオフが存在することがわかった。

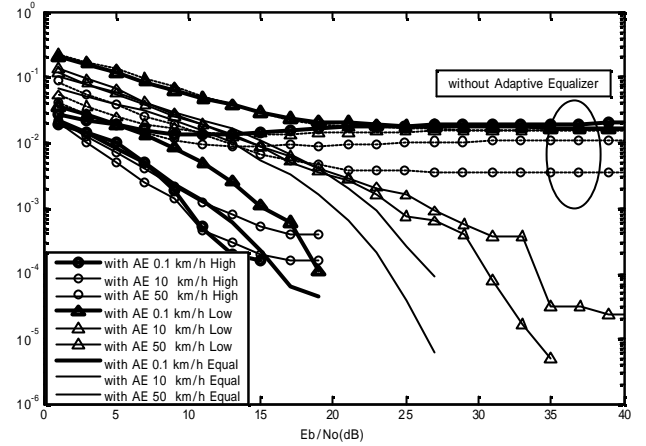


Fig. 6 2RING Probability of Bit Error (K=0)

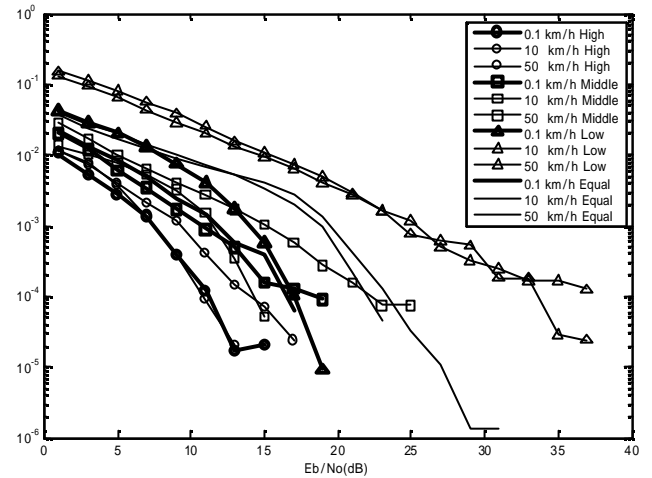


Fig. 7 3RING Probability of Bit Error (K=0)

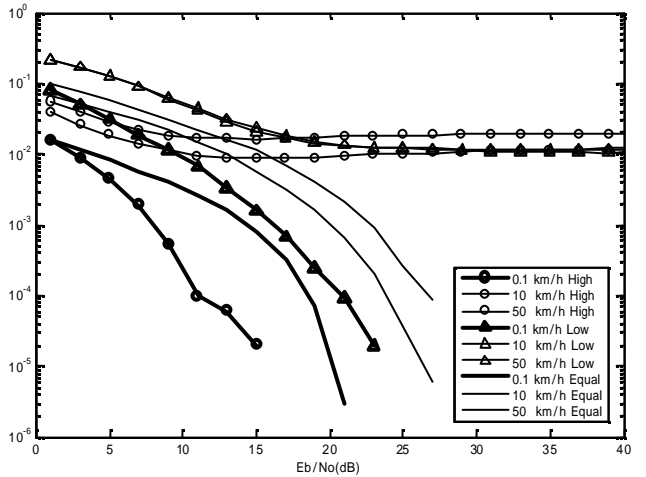


Fig. 8 TRAP Probability of Bit Error (K=0)

6. むすび

移動体通信環境での利用を想定して、フェージング通信路における不均一誤り保護符号の実現を目的に、トレリス符号化変調と適応等化器を用いたシステムを提案した。RING型とTRAP型の信号点配置を用いて、

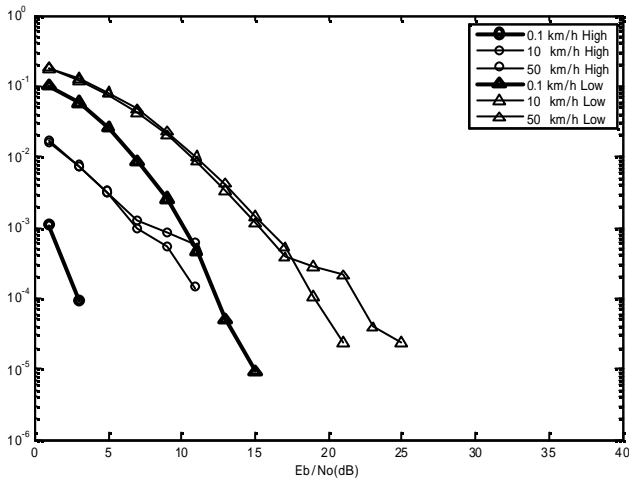


Fig.9 TRAP Probability of Bit Error (K=5)

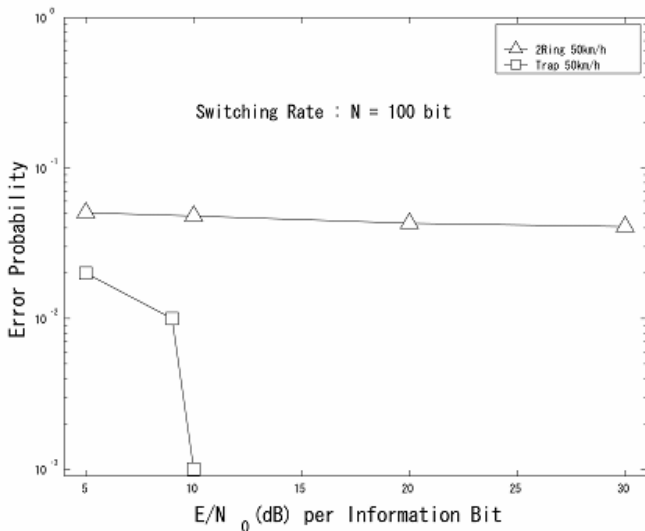


Fig.10 SNR に対する符号器推定誤り率

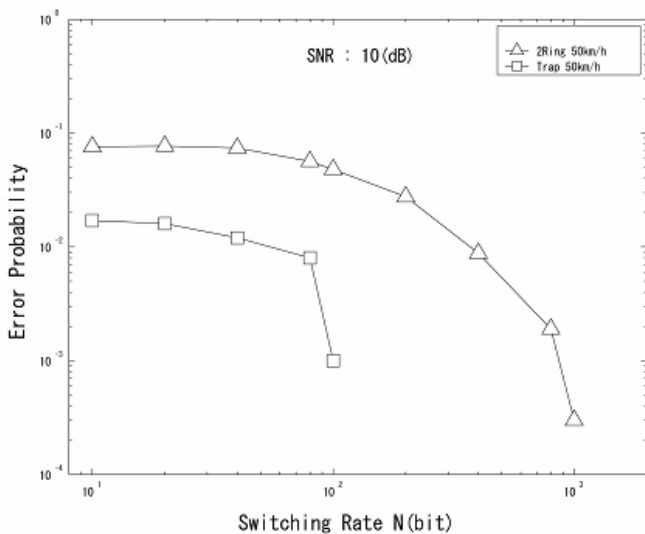


Fig.11 符号器切替速度に対する符号器推定誤り率

計算機シミュレーションを行い、システムの有効性を確認できた。主な結論を以下に示す。

- (1) フェージング通信路において、提案した UEP システムで、重要度に応じた誤り保護を受けることを示せた。重要度の高い部分は、均一に誤り保護した場合より、高い誤り保護を受けることを示せた。
- (2) フェージング補償対策として、適応等化器の導入を提案し、その有効性を確認した。
- (3) TRAP 型では、ライスパラメータ $K=5$ 以上または、移動体の速度を 3 km/h 以下で設計すれば、エラーフロアが回避でき、UEP システムとして有効に動作できることがわかった。
- (4) 各符号器での誤りを低減するには、RING 型のような配置が有効であり、符号器推定での誤りを低減するには、TRAP 型のような配置が有効であることがわかった。これは、信号点距離のトレードオフであり、今後さらなる検討が必要である。

今後の課題は、信号点配置がビット誤り率に与える理論解析、今回用いた適応等化器の最適パラメータ値の探求や他の構成を有する適応等化器の検討などである。

文献

- [1] 李 還幫, “ブロック符号化変調技術”, トリケプス, 1999
- [2] David K. Asano and Ryuji Kohno, “Serial Unequal Error-Protection Codes based on Trellis-Coded Modulation”, IEEE Trans. on Commun. vol.45, pp633-636, June 1997
- [3] S. Yamazaki, D.K. Asano, “Performance Evaluation of Unequal Error Correcting Codes in Fading Channels”, IEICE Technical Report, RCS2007-85(2007-10), p. 31-36, Oct. 19, 2007
- [4] Andrea Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge Univ Pr, 2005
- [5] H. Imai and S. Hirakawa, “A new multilevel coding method using error correcting codes”, IEEE Trans. Inform. Theory, pp. 371-377, May. 1977.
- [6] J. W. Modestino and D. G. Daut, “Combined source-channel coding of images”, IEEE Trans. Commun., pp. 1644-1659, May. 1977.
- [7] A. R. Calderbank and N. Seshadri, “Multilevel codes for unequal error protection”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 39, pp. 1234-1248, July. 1993.
- [8] L. -F. Wei, “Coded modulation with unequal error protection”, IEEE Trans. Commun, vol. 41, pp. 1439-1449, Oct. 1993.
- [9] N. Seshadri and C. -E. W. Sundberg, “Multilevel trellis coded modulations for the Rayleigh fading channel”, IEEE Trans. Commun., pp.1300-10, September 1993.
- [10] S.V.H. Qureshi, “Adaptive equalization”, Proc. IEEE, vol.73, no.9, pp.1349-1387, 1985.