

時分割信号点配置切換えに基づく不均一誤り保護と 周波数領域等化を融合した移動通信システム

—RING 型と TRAP 型配置の特性比較—

山崎 悟史[†] David K Asano^{††}

[†]沼津高専 制御情報工学科 〒410-8501 沼津市大岡 3600

^{††}信州大学工学部 情報工学科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

E-mail:[†]s-yamazaki@numazu-ct.ac.jp

あらまし これまで筆者らは、情報の重要度に応じて2つの異なる信号点配置を持つ符号を切り替え、トレリス符号化変調を施す不均一誤り保護法を提案してきた。さらに、フェージング補償として、提案方式がブロック毎に符号(重要度)を切り替える特徴を活かし周波数領域等化を導入し、RING 型配置に関して、理論解析ならびにシミュレーションによる有効性を示した。本報では、理論解析および計算機シミュレーションによって、非対称な信号点配置(TRAP 型)の特性を示している。また、すでに報告している対称配置(RING 型)との特性比較も行っている。

キーワード 不均一誤り保護, 時分割信号点配置切換え, 周波数領域等化, RING 型, TRAP 型

A serial UEP System Based on Time-Multiplexing Codes and MMSE-FDE - Performance Evaluation for a RING type and a TRAP type Constellation -

Satoshi YAMAZAKI[†] David K. ASANO^{††}

[†]Dept. of Control and Computer Engineering, Numazu National College of Technology 3600 Ooka, Numazu-city, Shizuoka, Japan

^{††}Department of Information Engineering, Shinshu University Nagano-city, 380-8553 Japan

E-mail:[†]s-yamazaki@numazu-ct.ac.jp

Abstract To achieve unequal error protection, the proposed scheme encodes the data by randomly switching between two codes which use different signal constellations. Also, we introduced frequency domain equalization based on the minimum mean square error criterion (MMSE-FDE) into the proposed UEP system to combat fading. The effectiveness of the proposed system using RING type signal constellations was shown using computer simulations and theoretical analyses. In this report, to further show the effectiveness of the proposed system, we evaluate and analyze the proposed system using asymmetrical signal constellations, which are called TRAP type, and compare them with the RING type, which was reported for the analysis.

Keyword Unequal Error Protection (UEP), Time-Multiplexing Codes, frequency-domain equalization(FDE), RING type, TRAP type

1. はじめに

多くの情報通信システムにおいて、送信情報に対して、全て均一な誤り訂正を施すのではなく、重要度が高い情報をより強く保護し、重要度が低い情報に弱い保護を施すことにより、システム全体として高性能、高信頼性を狙う不均一誤り保護(UEP, Unequal Error Protection)特性が要求される場合が多く[1]、これまで多くの方式が研究、提案されている[2]-[6]。筆者らは、情報の重要度に応じて2つの異なる信号点配置を持つ符号を切り替え、トレリス符号化変調を施す不均一誤り保護法を提案、評価してきた[7]-[9]。円形の対称配置(RING 型)に関して、加法性白色雑音(AWGN, additive white Gaussian noise)環境下における理論解析と計算機シミュレーションにより提案方式の有効性を示した[8]。さらに、フェージング補償として、提案方式が複数シンボル毎に重要度を切り替える特徴を活かし周波数領域等化を導入し、その適用効果を確認した[9]。

本報では、文献[7]で提案された台形(Trapezoid)のような非対称信号点配置(Trap 型)に関する理論解析、計算機シミュレーションにおける特性評価を中心に、RING 型との特性比較を行う。

以降、2.で提案方式について概説し、3.で TRAP 型配置に関する理論解析、4.で計算機シミュレーションによる特性評価を行い、5.で結論と課題を述べる。

2. 提案方式

文献[8]にて AWGN 環境における提案システムの詳細、および、従来方式との相違について述べており、文献[9]にてフェージング環境における提案システムの詳細について述べているため、本報ではその概要を述べる。

2.1. システム構成

図 1 にシステム構成(フェージング環境)を示す[9]。図中にシステム構成(AWGN 環境)[8]との相違も明示している。以下、各処理を示す。

Step1. 情報源から 0 と 1 のランダムなビット列が入力情報として送信され、それは重要度判定器(Importance Level Decision)にも入力される(#1)。

Step2. 重要度判定にて N_c シンボル毎に重要度がランダムに判定される(#2)。その出力にもとづきスイッチを切り替える。重要度高と判定されれば、 H の方に切り替わり、重要度低と判定されれば、 L の方に切り替

わる(#3). この時, 図 2 のように信号点配置(符号)を切り替える.

- Step3. RING 型配置において, 重要度高に対しては, 振幅の大きな符号(QPSK)を, 重要度低に対しては, 振幅の小さな符号(QPSK)を割り当てる. 各符号(重要度)において, 4 状態のトレリス符号化変調により, 符号化, 変調される. ただし, フェージング環境の場合, 符号化の後, シンボル単位でインターリーブを施す(#4).
- Step4. Step2.で判定された重要度に基づき, N_c シンボル毎に重要度をスイッチにて選択する(#5).
- Step5. N_c シンボルを 1 ブロックとみなし, その送信ブロックの先頭部分にブロックの後方部 N_g サンプルをサイクリックプレフィックス(Cyclic Prefix; CP)として挿入する(#6).
- Step6. 雑音として AWGN の影響を受ける(#7).
- Step7. マルチパスによるフェージングの影響を受ける(#8).
- Step8. CP を取り除く(#9).
- Step9. N_c シンボル毎に周波数領域等化を行う(#10).
- Step10. 等化されたデータは, 重要度に関わらず全ての復号器に送信される(#11).
- Step11. 通信路出力は, 重要度推定器 (Importance Level Estimation) にも送信される(#12). 各符号(重要度)において, 等化されたデータを復調(同期検波)し, デインターリーブを施した後, トレリス線図にもとづいてビタビ復号化される(#13). 一方, 重要度推定器では, 最尤検出法に基づいた符号推定アルゴリズム[8]によって, 送信側でどの符号器で処理されたかを N_c シンボル毎に推定する(#14).
- Step12. 重要度推定器において推定された重要度にもとづき, N_c シンボル毎にデータが出力される(#15).

2.2. 信号点配置

図 3 に示すように, 情報の重要度に応じて 2 つの異なる信号点配置を持つ符号を提案する.

(a) 2RING 型

振幅(エネルギー)の異なる 2 重の QPSK を配置し, 重要度高の信号点には, 振幅の大きな QPSK を, 重要度低の信号点には, 振幅の小さな QPSK を割り当てる.

(b) TRAP 型

y 軸に対し左右対称に, 位相が異なる信号点を 4 点ずつ配置し, 重要度高には右側 4 点を, 重要度低には左側 4 点を割り当てる. 図 3(b)のように, 回転角 $\theta(0 < \theta < \pi)$ をとると, θ の値により図 4 のような配置をとる.

2.3. 仮定したシステム条件

評価にあたり, 以下のシステム条件を仮定する[7]-[9].

- (a) 移動通信システムの物理層における評価を目的としているため, 重要度の定義や重要度を決定する方法については触れない.
- (b) UEP 特性に焦点を当てた評価するため, 受信側は送信側に対して理想的なフレーム同期を実現する.

3. 理論解析

既に 2RING 型の理論解析およびその妥当性を確認しているため[8], 本報では, 図 3(b)に示す TRAP 型を解析する. 尚, 比較のため, 各諸量において RING 型のそれも示す[8].

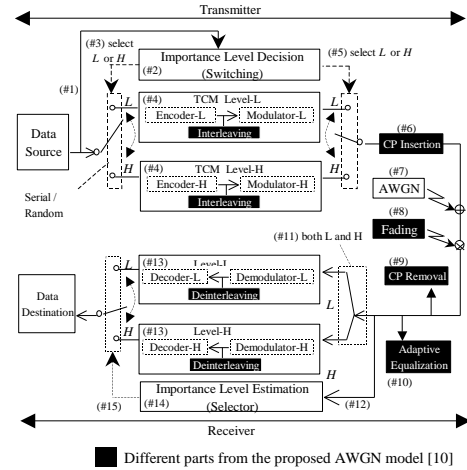


Fig.1 The proposed UEP scheme in fading channels for two levels of importance [8].

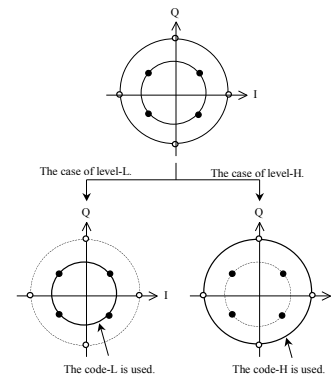


Fig.2 The proposed concept to realize UEP for two levels of importance.

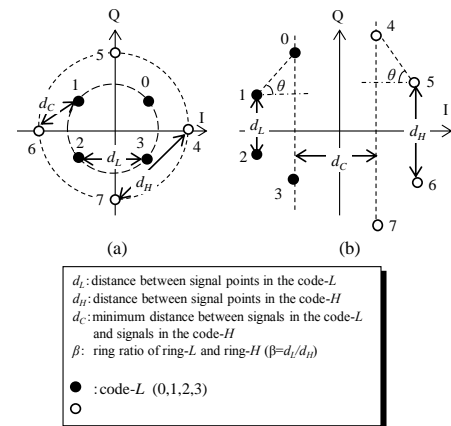


Fig.3 Proposed Signal Constellation. (a) 2RING type, (b) TRAP type

3.1. 幾何学的拘束条件

重要度低の信号点距離 d_L , 重要度高の信号点距離 d_H , 重要度低と重要度高の符号間最小距離を d_c とすると, RING 型同様, 式(1), (2)の関係が成り立つ.

$$d_L = \beta d_H, \quad 0 < \beta < 1, \text{ for 2RING and TRAP} \quad \dots\dots(1)$$

$$d_H = \gamma d_c \quad , \text{ for 2RING and TRAP} \quad \dots\dots(2)$$

RING 型においては, γ と β には式(3)の関係が成り立つ.

$$\gamma^2 = \frac{2}{\beta^2 - \sqrt{2}\beta + 1} \quad , \text{ for 2RING} \quad \dots\dots(3)$$

3.2. 平均送信エネルギー \bar{E}

各信号は異なる送信エネルギーをもつため, 式(4)で定義される平均エネルギー \bar{E} を用いる.

$$\bar{E} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E_i \quad \dots\dots(4)$$

図 4 の(a)-(d)の配置において, \bar{E} 値は全て一定となる. ここで, K : 信号点数, E_i : 信号点 i の送信エネルギーである. 各信号点配置の \bar{E} 値は, 図 3(b)より式(5)となる.

$$\bar{E} = \begin{cases} \left[\frac{1 + \beta^2}{2(\beta^2 - \sqrt{2}\beta + 1)} \right] d_c^2 & , \text{ for 2RING} \\ \frac{1}{8} [2 + 2\gamma(1 + \beta)\cos\theta + \gamma^2(1 + \beta^2)(3 + 2\sin\theta)] d_c^2 & , \text{ for TRAP} \end{cases} \quad \dots\dots(5)$$

3.3. 重要度推定誤り率 P_{le}

送信側で重要度高(あるいは低)の符号が, 2.1 Step11 で述べた受信側の重要度推定において, 誤って重要度低(あるいは高)の符号と推定された誤り率(重要度推定誤り率)について, 2RING 型の近似式, TRAP 型の理論上界を式(6)に示す(導出は省略).

$$P_{le} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\pi-2}{4\pi N}} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{Nd_c^2 \bar{E}}{4N_0}} - \sqrt{\frac{N}{\pi}} \right] & , \text{ for 2RING} \\ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{Nd_c^2}{4N_0}} \right] & , \text{ for TRAP} \end{cases} \quad \dots\dots(6)$$

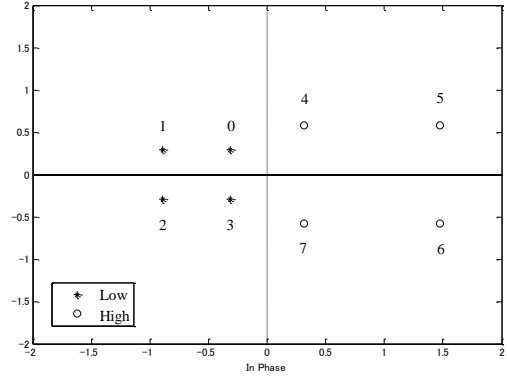
3.4. 信号点配置と誤り率の関係

誤り率特性は信号点間距離に大きく依存する. すなわち, 重要度高, 重要度低の各符号における BER 特性は d_H , d_L , 重要度の推定誤り率 P_{le} は d_c と関係する. 信号点配置と誤り率の関係を評価するにあたり, 最小二乗距離を平均送信エネルギーで正規化した値 d_c^2/\bar{E} , d_H^2/\bar{E} , d_L^2/\bar{E} を導入する. それらは, 図 3(b)より式(7)-(9)となる.

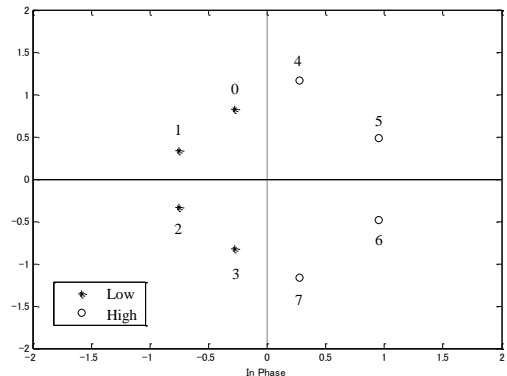
$$\frac{d_H^2}{\bar{E}} = \begin{cases} -\frac{4\beta^2}{1 + \beta^2} + 4 & , \text{ for 2RING} \\ \frac{8\gamma^2}{2 + 2\gamma(1 + \beta)\cos\theta + \gamma^2(1 + \beta^2)(3 + 2\sin\theta)} & , \text{ for Trap} \end{cases} \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{d_L^2}{\bar{E}} = \begin{cases} 4 - \frac{d_H^2}{\bar{E}} & , \text{ for 2RING} \\ \beta^2 \frac{d_H^2}{\bar{E}} & , \text{ for Trap} \end{cases} \quad \dots\dots(8)$$

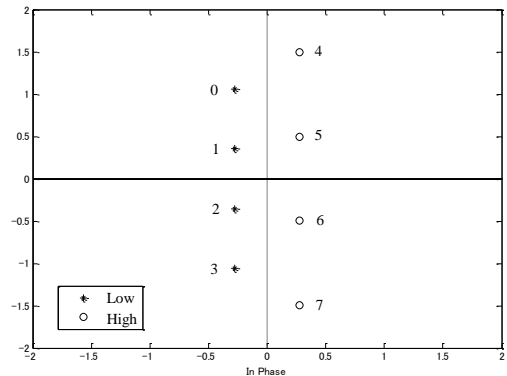
$$\frac{d_c^2}{\bar{E}} = \begin{cases} \frac{2(\beta^2 - \sqrt{2}\beta + 1)}{1 + \beta^2} & , \text{ for 2RING} \\ \frac{1}{\gamma^2} \frac{d_H^2}{\bar{E}} & , \text{ for Trap} \end{cases} \quad \dots\dots(9)$$



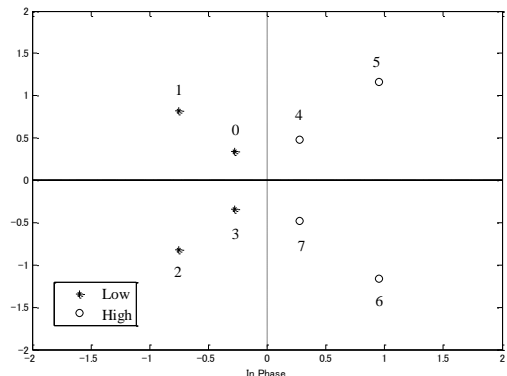
(a) $\theta=0, \beta=1/\sqrt{2}$



(b) $\theta=\pi/4, \beta=1/\sqrt{2}$



(c) $\theta=\pi/2, \beta=1/\sqrt{2}$



(d) $\theta=3\pi/4, \beta=1/\sqrt{2}$

Fig.4 Operation Examples of Trap Constellation.

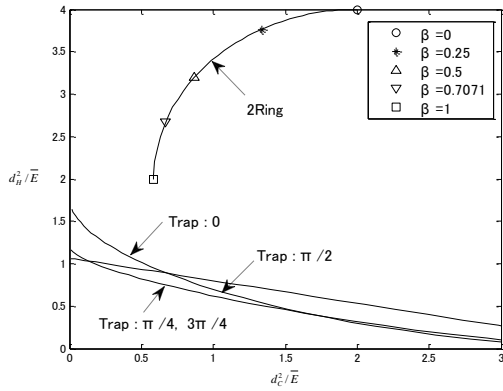


Fig.5 d_c^2/\bar{E} versus d_H^2/\bar{E} ($\beta=1/\sqrt{2}$ for Trap).

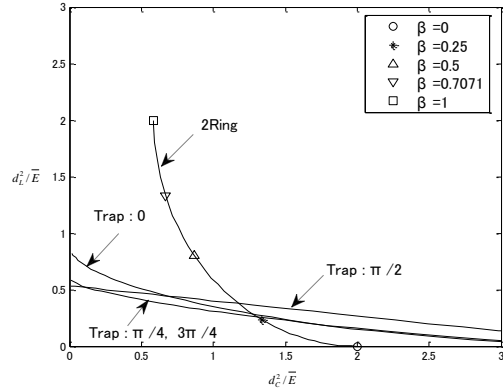


Fig.6 d_c^2/\bar{E} versus d_L^2/\bar{E} ($\beta=1/\sqrt{2}$ for Trap).

図 5 に d_c^2/\bar{E} 対 d_H^2/\bar{E} ，図 6 に d_c^2/\bar{E} 対 d_L^2/\bar{E} を示す。2RING 型は β を可変としているが，TRAP 型で $\beta=1/\sqrt{2}$ (固定)し， θ を可変としている。図 5，図 6 より，重要度高，重要度低のいずれにおいても，同一の β に対して 2RING 型の方が TRAP 型より大きな距離を確保している。一方，TRAP 型は 2RING 型に比べて，より大きな d_c が確保可能となる。以上より，各符号の BER 特性改善には 2RING 型が，重要度の推定誤り率の特性改善には TRAP 型が適しているといえる。

3.5. 符号化漸近利得

非符号化に対する符号化の改善度として符号化漸近利得を検討する。それは式(10)で定義される。

$$G = \frac{(d_{\min}^2/\bar{E})_{\text{coded}}}{(d_{\min}^2/\bar{E})_{\text{uncoded}}} \dots\dots\dots (10)$$

提案方式では，4 状態のトレリス符号化変調(符号化率 1/2)を用いているので，最小平均自乗ユークリッド距離は式(11)となる。

$$d_{\min}^2 = d^2(4,6) + d^2(4,5) + d^2(4,6) \dots\dots\dots (11)$$

比較対象である非符号化変調方式として BPSK を用いる。この場合，式(10)の分母値は 4 となる。重要度高の符号化漸近利得は，各配置に対する式(11)の結果を式(10)に代入して式(12),(13)を得る。

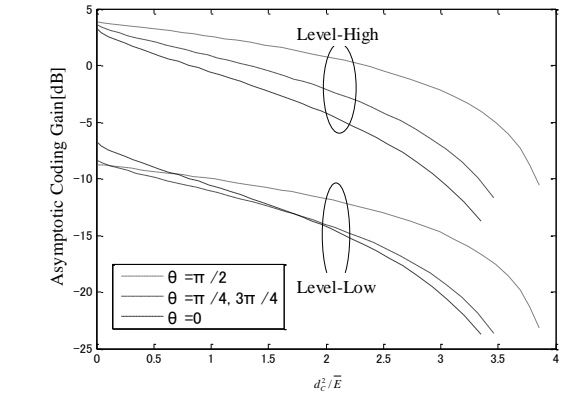


Fig.7 Asymptotic coding gain as a function d_c^2/\bar{E} ($\beta=1/\sqrt{2}$).

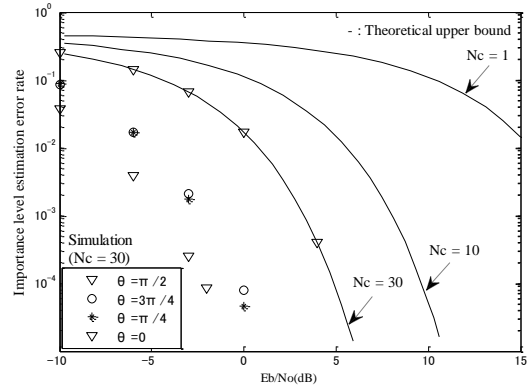


Fig.8 Importance level estimation error rate versus E_b/N_0 . ($\beta=1/\sqrt{2}$, $d_c^2/\bar{E}=0.3$)

$$G_{\text{High}} = \begin{cases} 10 \log \left(\frac{5}{1+\beta^2} \right) [\text{dB}] & , \text{for } 2RING \dots\dots\dots (12) \\ 10 \log \left(\left(\frac{5+4\sin\theta}{4} \right) \frac{d_H^2}{\bar{E}} \right) [\text{dB}] & , \text{for } TRAP \end{cases}$$

$$G_{\text{Low}} = \begin{cases} 10 \log \left(\frac{\beta^2}{1+\beta^2} \right) [\text{dB}] & , \text{for } 2RING \dots\dots\dots (13) \\ 10 \log \left(\frac{\beta^2}{4} \frac{d_H^2}{\bar{E}} \right) [\text{dB}] & , \text{for } TRAP \end{cases}$$

図 7 は，一例として $\beta=1/\sqrt{2}$ に対して， d_c^2/\bar{E} 対符号化漸近利得 G_{High} ， G_{Low} を示したものである。 d_c の増加に対して， G_{High} ， G_{Low} ともにほぼ線形に減少している。特に， d_c^2/\bar{E} の値が 2 より大きな領域で顕著となる。これは β 一定で，より d_c を大きくすれば，平均送信エネルギー一定に保つには， d_H ， d_L が小さくなることに起因する結果である。

Table1 Simulation parameters.

Transmitted Data	0, 1 (random)
Noise	AWGN
Pulse shaping	None
Synchronization	Ideal
Importance level M	2 (High, Low)
Occurrence Probability of importance	High: 1/2, Low: 1/2
Ring ratio β	0.25, 0.5, 0.7071
Importance switching rate N_c	16, 32, 64 [symbols]
Channel coding rate	High: 1/2, Low: 1
Demodulation	Coherent
Decoding	Viterbi decoding
Detection	Hard-decision

4. 特性評価

計算機シミュレーションにより, 3.で述べた理論解析の妥当性, および TRAP 型の有効性を確認する. 表 1 にシミュレーション緒元を示す. まず, AWGN 環境において評価する. 図 8 に一例として $\beta=1/\sqrt{2}$, $d_c^2/\bar{E}=0.3$ の場合の E_b/N_0 対重要度推定誤り率 P_{le} を示す. 合わせて, 3.3 で示した重要度推定誤り率 P_{le} の理論上界を示した. 重要度切換え速度 N_C を小さくすると, 理論特性が劣化する. これは, N_C を小さくするにつれ, 重要度の切換え速度が増加し, 重要度判定が誤り易くなることに起因する結果である. $\theta=\pi/2$ で特性が一番劣化している. これは, 図 4(C)の配置からわかるように, 重要度高と重要度低の信号点距離が近いことに起因する. 一方, $\theta=0$ では逆のことがいえる. また, $\theta=\pi/4, 3\pi/4$ ではそれらの配置からほぼ重要度推定誤り特性が同等になる. さらに, $N_C=30, \theta=\pi/2$ (TRAP 型において重要度推定誤り率が一番劣化する時)において, 理論上界と特性が一致していることから, (6)式の妥当性が確認できる. 以上より, TRAP 型配置の有効性が示された.

5. むすび

これまで情報の重要度に応じて 2 つの異なる信号点配置を持つ符号を切り替え, トレリス符号化変調を施す不均一誤り保護システムを提案した. 本報では, 非対称な信号点配置(TRAP 型)に関して, 理論解析および, 計算機シミュレーションによる特性評価を行い, AWGN 環境における有効性を示した. 現在, フェージング環境における TRAP 型の特性評価を進めている.

文 献

- [1] S. Lin and D. Costello, Jr., Error Correcting Coding, 2nd ed., Prentice Hall, 2004.
- [2] B. Masnick and J. K. Wolf, "On linear unequal error protection codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 3, pp. 600-607, 1967.
- [3] H. Imai and S. Hirakawa, "A new multilevel coding method using error correcting codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, pp. 371-377, 1977.
- [4] L. -F. Wei, "Coded modulation with unequal error protection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, pp. 1439-1449, 1993.
- [5] A. R. Calderbank and N. Seshadri, "Multilevel codes for unequal error protection," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 39, pp. 1234-1248, 1993.
- [6] M. Isaka et al., "Multilevel Coded Modulation for Unequal Error Protection and Multistage Decoding - Part II: Asymmetric Constellations," *IEEE Transactions on Commun.*, vol. 48, no. 5, pp. 774 -786, 2000.
- [7] D. K. Asano and R. Kohno, "Serial Unequal Error-Protection Codes based on Trellis-Coded Modulation," *IEEE Trans. on Commun.* Vol. 45, pp.633-636, 1997.
- [8] S. Yamazaki and D. K. Asano, "A Serial Unequal Error Protection Code System using Multilevel Trellis Coded Modulation with Ring Type Signal Constellations for AWGN Channels," *IEEJ Transactions on Electrics and Electronics*, vol.5, No.6, pp. 708-716, 2010.
- [9] S. Yamazaki and D. K. Asano, "A Serial Unequal Error Protection Codes System using MMSE-FDE for Fading Channels," *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol.E95-A, No.7, pp.3763-3767, Jul. 2012.