

An Accurate Error Rate Detection Scheme by Pseudo Error Monitoring

Shunsuke ISHIZAKI*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received April 18, 2008)

Pseudo error monitoring is an error rate detection scheme of digital transmission path to assess the link quality. The detection performance of the scheme is influenced by interference signals. In this paper, we propose a new error rate detection scheme. In the scheme, accurate error rate is estimated by combining a number of estimation methods. As an example to show the effectiveness of the estimation scheme, a diversity combining scheme accommodating the proposed error detection scheme in frequency-selective fading is presented.

Key words : pseudo error, link quality estimation, bit error rate, wireless communications

キーワード : 擬似誤り, 回線品質推定法, ビット誤り率, 無線通信

擬似誤りに基づくビット誤り率推定法の高精度化に関する検討

石崎 俊輔, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. はじめに

近年, OFDM 適応変調方式をはじめとする適応制御技術の研究が盛んに行われている. 移動通信環境では伝送路の状態変化が固定無線通信環境と比較して著しく, 正確な適応制御を実現するためには高速かつ高精度に伝送路の状況推定を行うことが求められる. このような背景から, 擬似誤りを用いた回線品質推定法が再注目されている¹⁻⁷⁾.

擬似誤りを用いたビット誤り率推定法とは, 受信側において誤り率特性がある程度劣化するような誤り増加要因を人為的に加え, この増加させた誤り率(=擬似誤り)を検出し, 事前に求めておいた擬似誤りと真の誤り率との対応関係を用いて伝送路のビット誤り率を推定する手法である. 一般に擬似誤

りを用いて検出する誤り率は真の誤り率よりも大きくなるので, 短い時間で真のビット誤り率を精度良く推定することができる. また, 擬似誤りを用いたビット誤り率推定は既知信号の送信を必要としないため, 信号伝送のオーバーヘッドにならないという利点がある.

擬似誤りの概念は古くからあり, 1960 年代頃から研究が進められてきた⁸⁻¹²⁾. しかし, 当初の研究では, 適用対象が固定無線通信であったために移動無線通信特有の誤り発生要因は考慮されてこなかった. このような擬似誤りを用いたビット誤り率推定法を, 移動通信環境にも適用する検討が進められている¹⁻⁷⁾. 移動通信分野でも, 伝送路状態に応じた最適な通信方式を選択する適応変調技術が一般

* Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6355, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

化しており、また、移動通信環境特有のフェージングによる高速な伝送路状況の変化に追従するため、より少ないビット数により高精度なビット誤り率推定を行うことが求められている。さらに近年、コグニティブ無線技術としてシステムの内外を問わず最適な通信システムを選択し、移動無線通信環境全体としての効率化を図ることを目的とした研究が行われている^{13,14)}。電波の利用状況を把握し、最適な通信システムを選択するためには、より高速かつより高精度な回線品質推定が求められる。擬似誤りによる回線品質推定はこれらのような対象に適している。

従来の擬似誤りを用いたビット誤り率推定法では、回線品質劣化の原因を区別せず、その推定結果は全ての劣化要因を包含するものとして扱ってきた。しかし、厳密には熱雑音や干渉信号等による信号点の分布は異なっており、これが誤り率推定性能の劣化要因となっている。そこで本稿では、熱雑音に加え、干渉信号の強度に応じた高精度なビット誤り率推定を行うため、複数のビット誤り率推定法を同時利用することを提案する。具体的には、受信側で検出した SNR (Signal to Noise power Ratio) やパラメータを変化させるなどして得た擬似ビット誤り率(以下まとめて特徴量と呼ぶ)と真の誤り率との対応関係を事前に求めておき、実際の受信信号から得られた複数の特徴量から真の誤り率を推定する。ビット誤り率の推定方法は既にいくつか検討されているが、雑音・干渉・位相変動等の誤り発生要因に応じて適切な手法・パラメータを選択する必要があると考えられる。複数の推定法を同時に用いる場合には、それに加えて、適用する複数の推定法の組み合わせも状況に合わせて適切に選択する必要があると考えられる。干渉信号や位相変動が存在する場合の推定性能の比較を行うことにより、これらの関係を明らかにする。

2. 擬似誤りを用いたビット誤り率推定法

擬似誤りによるビット誤り率推定は、本来の信号検出方法と異なる復調方法で発生させたビット系列からその誤り発生確率(以下 $PBER$: Pseudo Bit

Error Rate)と真の誤り率(以下 BER : Bit Error Rate)との対応関係を用いて BER を推定する方法である。擬似誤りの発生方法としては、雑音の付加・検波位相の回転・判定軸のオフセット・周波数などの同期をずらす・非線形歪みを加える等が考えられる。

ここでは、擬似誤りの発生方法の一例として $BPSK$ 変調方式において判定軸をオフセットさせる方法についてその原理を説明する。Fig. 1(a)(b)はそれぞれ、擬似誤り発生方法の概念図とそれを実現する受信機の構成例を示している。なお、Fig. 1(a)では信号振幅を1に正規化している。通常の受信では二つの信号点の中央(A_0)をスレッショルド($Th.$)として受信ビット系列を判定する。それに対して、信号点方向に $a/2$ と $-a/2$ だけオフセットしたスレッショルド(A_+ と A_-)を用いて判定する。これらのビット系列が異なった場合に擬似誤りが発生したとする。すなわち、この方法によって生成した擬似誤りビットは、Fig. 1(a)の斜線の領域に受信信号が存在する場合に相当する。受信ビット系列に誤りが発生するのは、雑音などの影響により、判定軸(A_0)を越えて本来の信号点とは逆の半平面に受信信号点が移動する場合である。この現象が発生する確率と、Fig. 1(a)の斜線部分に受信信号点が存在する確率には一定の相関がある。Fig. 2はこの構成を仮定した場合の $AWGN$ (Additive White Gaussian Noise)チャネルに対する BER と $PBER$ の特性を示している。なお、判定軸オフセット量 a の値は0.5としている。この BER と $PBER$ の関係を事前に求めておき、Fig. 1(b)の構成により受信時の $PBER$ を算出することによって情報伝送時でも BER を推定することが可能となる。

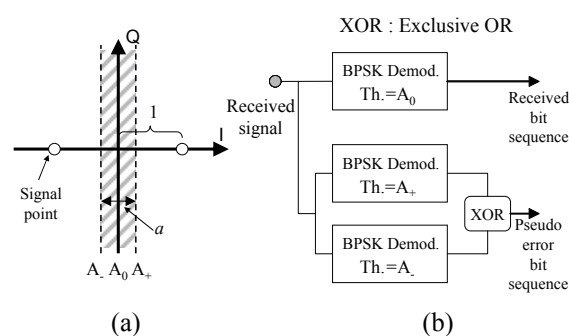
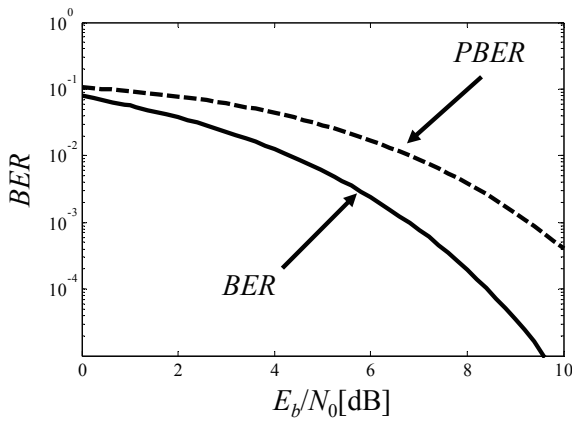


Fig. 1. Generation of pseudo error.

Fig. 2. PBER versus E_b/N_0 .

3. 検討の対象とするビット誤り率推定法

ビット誤り率の推定方法には前述のとおりいくつかの方法がある。本稿では文献7)と同様、受信側で検出した SNR を用いる方法、判定軸オフセット・判定軸回転によって発生させた擬似誤りによる方法の検討を行う。以下、それぞれの方法について QPSK 変調同期検波方式を対象として説明する。

3.1. 受信側で検出した SNR を用いる方法

受信信号の信号点と判定後の信号点の距離の二乗平均を算出し、その値と AWGN における BER との対応関係から BER を推定する方法である。この方法の概念を Fig. 3 に示す。信号点のばらつきは二次モーメントは雑音電力に相当するため、最も直接的な推定方法であり、AWGN 環境では高精度な推定が可能である。しかし Fig. 3 に示すように、低 SIR (Signal to Interference power Ratio) 環境下では、干渉信号の影響を大きく受け推定精度が劣化する⁷⁾という問題点がある。

3.2. 擬似誤りを用いる方法

3.2.1. 判定軸オフセットを用いる方法

判定軸に $\pm a/2$ のオフセットを与え、判定結果の異なるビットを擬似誤りと判定する。この方法の概念を Fig. 4 に示す。これは Fig. 1 を QPSK に適用したものと同義である。Fig. 4 に $a=0.5$ とした場合の推定特性を示す。 SNR 検出を用いた推定方法よりも SIR に対する推定特性の劣化が改善されていること

がわかる。

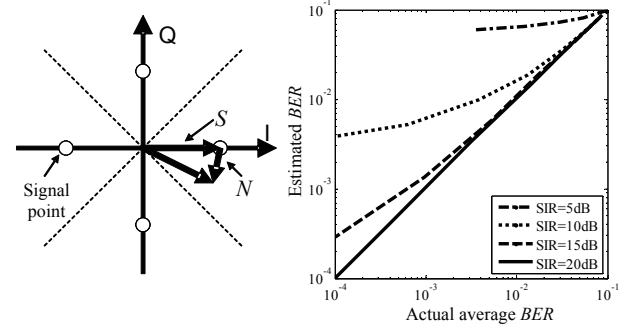
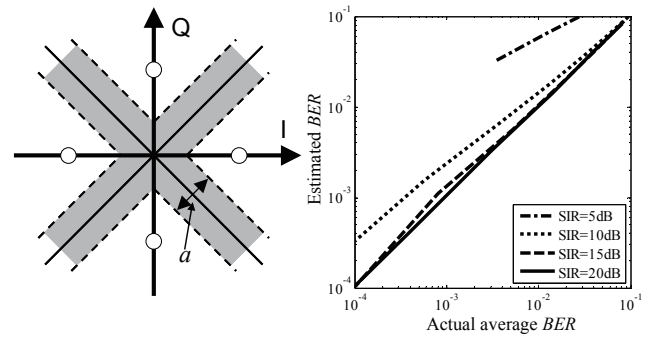
Fig. 3. Measured SNR .

Fig. 4. Measured PBER (offset).

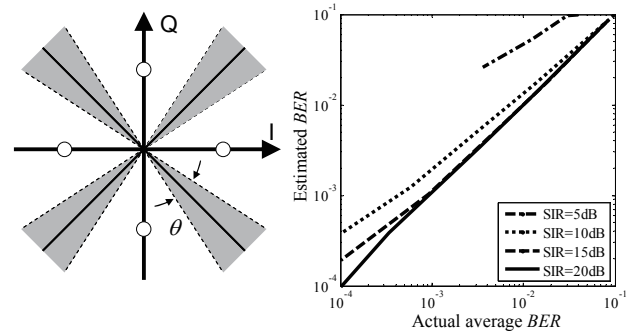


Fig. 5. Measured PBER (phase).

3.2.2. 判定軸回転を用いる方法

判定軸を $\pm\pi/2$ だけ回転させ、その判定結果の異なるビットを擬似誤りと判定する。この方法の概念を Fig. 5 に示す。Fig. 1 の場合と同様に、得られる擬似ビット誤り率は Fig. 5 の判定軸付近に信号点が存在する確率に相当する。Fig. 5 は $\theta=\pi/10$ [rad.] とし

た場合の推定特性である．判定軸オフセット法と同様， SNR 検出を用いた推定方法よりも SIR に対する特性が改善されていることがわかる．

4. 複数の擬似誤りを用いたビット誤り率推定

従来の擬似誤りを用いたビット誤り率推定法では，事前に用意しておく BER と $PBER$ の対応関係は，雑音以外の誤り率劣化要因が無い環境を想定していた．これは干渉信号等雑音以外の誤り発生要因が存在する場合でもある程度の推定精度が得られるためであるが，より高精度なビット誤り率推定を行うためには，雑音だけでなく他の誤り発生要因も考慮した BER と $PBER$ の対応関係を事前に求めておけばよい．

本稿では，雑音に加え干渉信号を考慮した高精度なビット誤り率推定を行うことを目的として，受信信号から得た 2 種類の特徴量を用いて BER を推定する方法について検討する．Fig. 6 は判定軸オフセット法のオフセット量 a を 0.5 とした場合の $PBER$ 特性である．このように， SIR の変化によって $PBER$ の値は変化するため BER 推定の精度を劣化させる要因となる．しかし，雑音同様，干渉信号による BER の劣化と $PBER$ の変化には一定の相関がある．

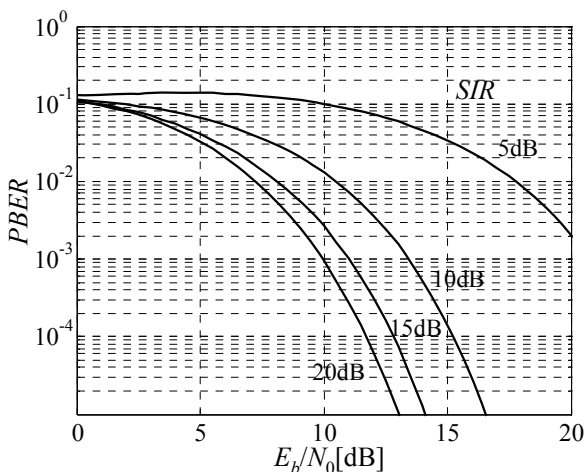


Fig. 6. $PBER$ versus E_b/N_0 when SIR is varied.

そこで，推定方法や擬似誤りの発生パラメータ (判定軸オフセット法におけるオフセット量 a など)

を変化させることによって得られる推定の特徴量 (受信側で検出した SNR や $PBER$) の組み合わせを用いて BER の推定を行うことを検討する．2 種類の擬似誤りを用いた場合の本方式の受信機モデルを Fig. 7 に示す．受信信号から $PBER$ を算出する構成を 2 系統用意し，それぞれから得られる特徴量を元に真の BER を推定する．

この操作は 2 変数 (E_b/N_0 と SIR) 関数の解を求めるために 2 つの拘束条件 (特徴量) を用いることと同義である．以下，2 種類の特徴量から BER を推定する方式を，従来の推定方式と区別して，連立 BER 推定法と呼ぶこととする．

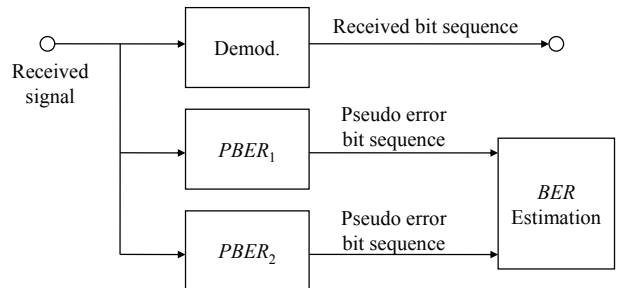


Fig. 7. Model of receiver.

5. シミュレーションによる特性評価

計算機シミュレーションによる連立 BER 推定法 の特性評価を行う．まず 5.1 では干渉信号の存在下における提案方式による推定性能を確認する．5.2 では，他の移動通信特有のビット誤り率劣化要因として検波位相に誤差が生じている場合の特性を示す．従来方法の評価と同様に，信号伝送には QPSK 変調同期検波方式を用い，シンボルタイミングはカンニングにより理想状態とした．5.1 では検波位相も理想状態と仮定する．シミュレーションでは，推定に十分と考えられる 2^{17} ビットを送受信し，Fig. 8, 9 の横軸は各環境において QPSK 送受信を行った 2^{17} ビット分の平均 BER ，縦軸は 2^{17} ビット分の受信信号を用いて各推定手法により推定した BER である．2 種類の特徴量の同時利用の検討として，対象としたビット誤り率推定法の組み合わせは以下の通りとした．

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| (a) offset ($a=0.5$) | – offset ($a=0.2$) |
| (b) phase ($\theta=\pi/10$ [rad.]) | – phase ($\theta=\pi/18$ [rad.]) |
| (c) offset ($a=0.5$) | – phase ($\theta=\pi/18$ [rad.]) |
| (d) offset ($a=0.5$) | – SNR |
| (e) phase ($\pi/10$ [rad.]) | – SNR |
| (f) SNR | – 3 rd mom. |

ただし、判定軸オフセット法を[offset], 判定軸回転法を[phase], SNR 検出法(受信信号点の 2 次モーメント利用)を[SNR], 受信信号点の 3 次モーメントの利用を[3rd mom.]と略記した. (f)の 3 次モーメントの利用とは, SNR 検出法が信号点からの距離の 2 乗平均を用いるのに対し, 信号点からの距離の 3 乗平均を用いる方法である.

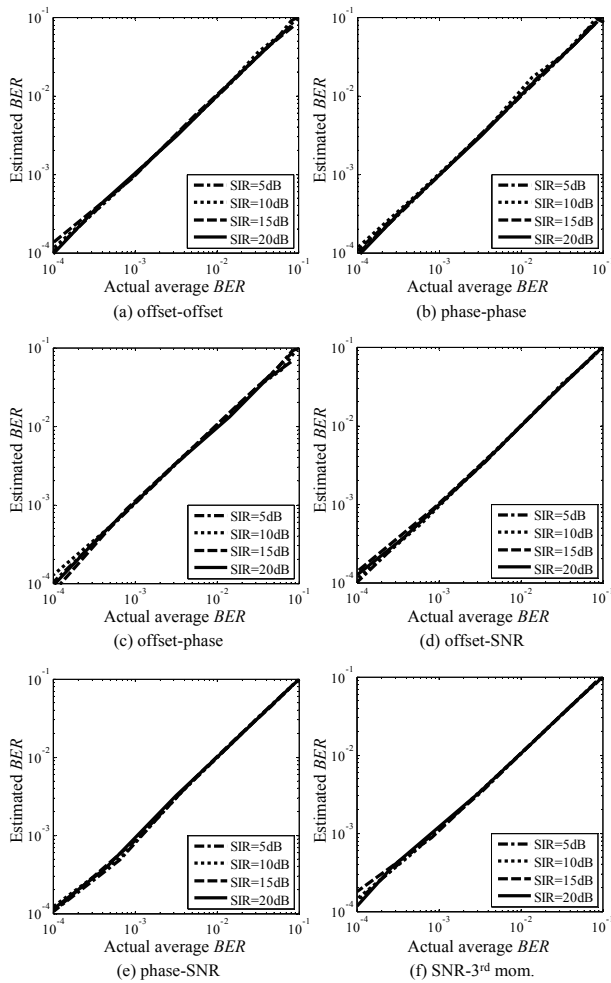


Fig. 8. Estimated BER characteristics when SIR is shifted.

5. 1. 干渉信号存在下での推定性能の確認

Fig. 8 に, 本検討で考慮したビット誤り率の劣化要因である干渉信号が存在する環境における 2 種類の推定法の組み合わせ(a)~(f)の推定特性を示す. SIR は 5~20dB の範囲で変化させた. 全ての組み合わせにおいて, 一つの特徴量からビット誤り率を推定する従来方式(Fig. 3, 4, 5)よりも干渉信号に対する推定性能が改善されていることがわかる. ただし, 擬似誤りを複数用いることから推定速度の低下が予想される. これについては 5.3 で検討する.

5. 2. 判定軸に位相誤差がある場合の特性

移動通信環境ではドップラ変動により検波位相に誤差が生じる可能性がある. そこで, 判定軸が回転している場合の各推定法の特性を Fig. 9 に示す.

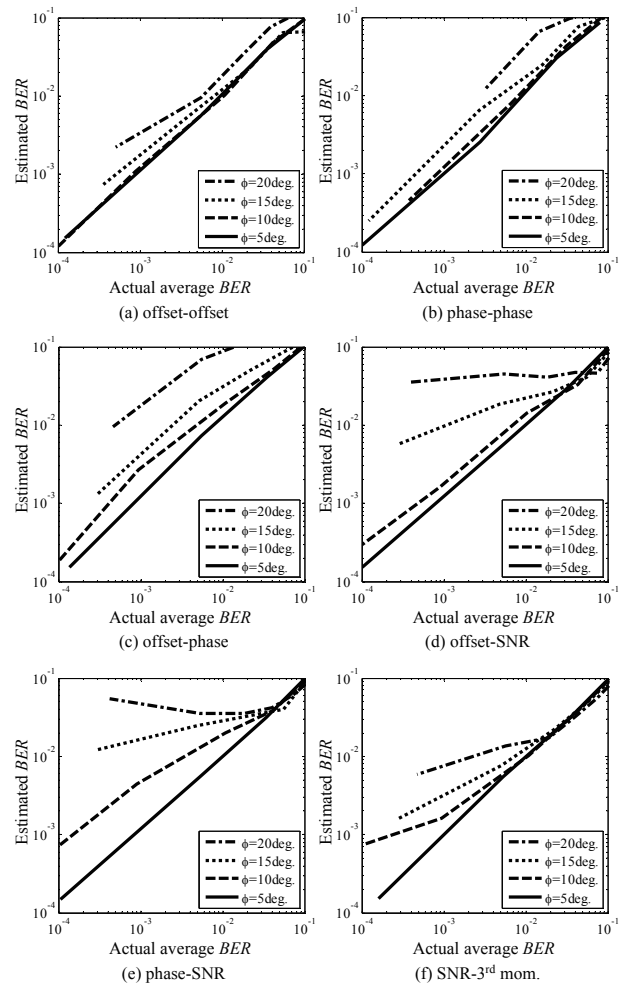


Fig. 9. Estimated BER characteristics when amplitude of phase error is shifted.

ここで、検波位相誤差は $\phi=5\sim 20\text{deg}$ の範囲で与えた。判定軸オフセット法および判定軸回転法を用いる場合((a)~(c))と比較して、SNR 検出法を用いる場合((d)~(f))の方が、検波位相誤差の影響が大きいことがわかる。これは(a)~(c)の場合には、検波位相誤差による $PBER$ の値の変化が干渉信号の存在による $PBER$ の値の変化と類似するためだと考えられる。SNR 検出法では、判定軸付近だけでなく全ての受信点を考慮するため、判定軸の位相誤差の影響を大きく受け、推定性能に劣化が生じる。

5.3. 推定の分散特性(推定速度)

これまで述べてきたように、一般に擬似誤りを用いた回線品質推定は、既知信号を用いた測定に比べ高速である。それは誤り発生確率を人為的に増加させるため、同じビット数では推定の分散が小さくなり、精度が高くなるからである。この特性は擬似誤りを発生させるパラメータ(判定軸オフセット法ではオフセット量 a)の値に依存する。Fig. 10 は、従来の擬似誤りを一回用いた推定法において、判定軸オフセット法を用いた場合の分散特性を示している。ここで、推定には 4096 ビット分の信号を用いた推定操作を 1000 回行い、縦軸は推定 BER の累積確率分布における 10%値と 90%値の比である。オフセット量 a の値を 0.1~0.5 の範囲で変化させた特性と、比較のため受信側での SNR 検出による推定方法を用いた場合および 4096 ビット全ての信号を既知信号とした場合の分散特性も併せて示している。特性が途切れている部分は 10%値がゼロとなり比を取ることができない場合である。同図から、擬似誤りの発生確率が大きい場合の方がそうでない場合と比較して同じビット数でより小さい BER を推定でき、分散特性も優れていることがわかる。しかし推定精度は擬似誤り発生確率が小さい方が優れている⁷⁾ため、一般に推定精度と推定速度はトレードオフの関係にあると言える。

Fig. 11 に $SIR=10\text{dB}$ の環境における連立 BER 推定法の分散特性を示す。連立 BER 推定法では、Fig. 10 と比較して、全体的に推定速度が低下していることが確認できる。これは 2 つの推定法を用いることか

ら、推定値の分散が大きくなるためである。また、同図より、SNR 検出法を用いた場合 ((d)(e)(f) の 3 種類)は、その他の組み合わせと比較して分散値が小さく、より小さい BER まで推定できていることがわかる。これは他の擬似誤りを用いた推定法が、該当領域に受信点が存在する確率を用いるのに対して、SNR 検出法では全ての受信点を考慮することになるので高い推定速度が得られると考えられる。

これまで述べてきたように、擬似誤りによるビット誤り率推定法と比較して、SNR 検出法は判定軸位相誤差の存在下において推定精度の劣化が大きい、推定速度の点では優れている。したがって、実際の利用には、要求される推定速度や、対象システムのパラメータ、フェージング速度等の使用環境を考慮して適宜最適なものを選択する必要がある。

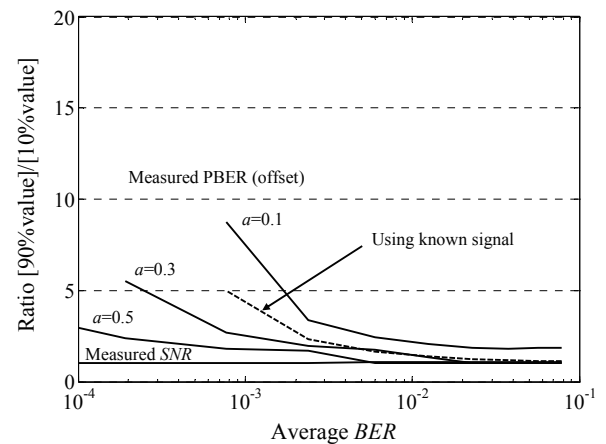


Fig. 10. Variance characteristic (pseudo error 1 time).

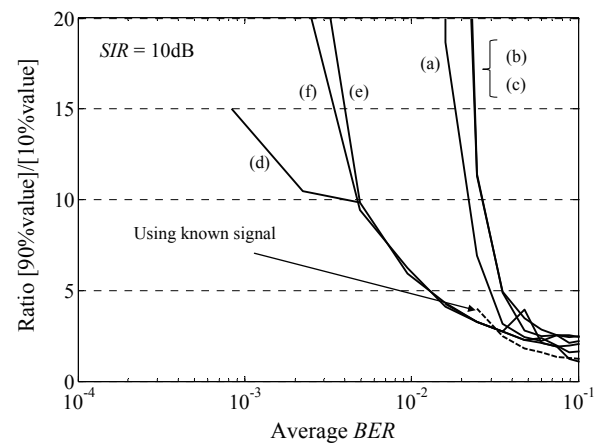


Fig. 11. Variance characteristic (proposed method).

5.4. ダイバーシチ合成への適用例

ここまで示したように、本稿では雑音と干渉信号を区別して、より高精度なビット誤り率推定を行うことを検討した。そこで、提案方式を周波数選択性フェージング環境における選択合成ダイバーシチに利用した例を Fig. 12 に示す。変調方式には QPSK 同期検波方式を用い、正規化遅延スプレッド σ_r/T_s を 0.15 とした。ビット誤り率推定には、判定軸オフセット法($\alpha=0.5$ および 0.2)を用い、推定周期は 2048 ビットとした。ダイバーシチブランチ数は 2 および 4 を用いた。また、同図では比較のため、ダイバーシチ合成を行わない場合のビット誤り率特性を併せて示している。図中の Measured SNR は、受信側で検出した SNR を元に選択合成を行った場合を示しており、また、Pseudo error (1 time)とは、従来検討である擬似誤り(判定軸オフセット法 $\alpha=0.5$)を用いて BER を推定した場合の特性である。Fig. 12 より、提案方式による BER 推定結果を元に選択合成を行った場合が、検出した SNR のみを用いて選択合成を行った場合および擬似誤りを一回用いた場合と比較して、ビット誤り率において優れていることがわかる。これは、提案手法では、遅延波による伝送特性の劣化と雑音による伝送特性の劣化の違いを考慮し高精度にビット誤り率が推定できるためである。また、同図において、 E_b/N_0 が低い点では、受信側で検出した SNR を用いた場合の特性がダイバーシチ合成を行わない場合よりも劣化していることがわかる。これは受信側で SNR を検出する方式ではビット誤りの増加により検出精度が著しく劣化するためである。しかし、擬似誤りを用いた場合は、判定軸付近に信号点が存在する確率を用いるので、判定誤りの影響を軽減することができる。

6. まとめ

擬似誤りを用いたデジタル伝送路のビット誤り率の推定法について、干渉信号の存在下でも高精度な推定を可能にするため、受信側で検出した SNR

と擬似ビット誤りなど、受信信号を元に得られる複数の特徴量を利用することを提案し、その特性評価を行った。まず提案方式による、干渉信号の存在下におけるビット誤り率推定の高精度化を確認した。提案方式では、2 種類の特徴量を用いることにより推定速度が大きく劣化するが、検波位相誤差の影響による推定精度の劣化よりも推定速度が要求される環境では、推定速度に優れた SNR 検出による推定法と、擬似誤りを用いた推定法を組み合わせることにより、推定速度の改善が可能である。最後に本方式の適用例として、周波数選択性フェージング環境での選択合成ダイバーシチ効果を示した。今後の課題としては、より具体的なシステムを想定し、その適用方法と性能について詳細な検討を行う必要がある。

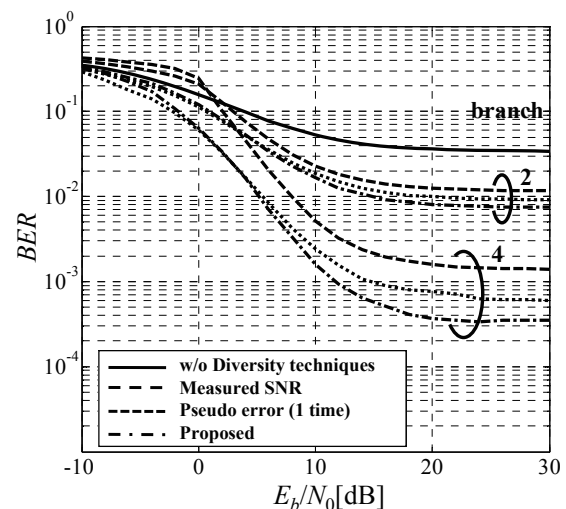


Fig. 12. Estimation method performance.

参考文献

- 1) 安部克明, 村上豊, 彦久保恒雄, "適応変調における通信品質推定方式の一検討," 2002 年信学総大, B-5-99, 2002.
- 2) 坂本剛憲, 安倍克明, "DSRC システムにおける擬似誤り検出法を用いた適応変調の性能評価," 2003 年信学総大, A-17-6, 2003.
- 3) 漆原伴哉, 坂本剛憲, 宮野謙太郎, 安倍克明, 松岡剛史, "IEEE802.11a における擬似誤り検出法を用いた適応変調の性能評価," 2004 年信学総大, B-17-5, 2004.
- 4) 水谷祥典, 笹岡秀一, "無線 LAN における擬似誤り率による回線品質推定を用いた適応マルチコード伝送方式の検討," 信学技報, RCS2004-302, pp. 71-76,

2004.

- 5) 渡邊貴志, 岩井誠人, 笹岡秀一, "擬似誤りによる回線品質推定法を用いた OFDM 適応変調方式," 同志社大学理工学研究報告, 47, pp. 19-29, 2006.
- 6) 高井信人, 岩井誠人, 笹岡秀一, "回線品質推定を用いた高効率ハイブリッド ARQ に関する研究," 信学技報, IT2005-132, pp. 217-222, 2006.
- 7) 岩井誠人, 渡邊貴志, 高井信人, 笹岡秀一, "擬似誤りに基づくビット誤り率の推定法," 信学技報, AP2006-15, pp. 35-40, 2006.
- 8) D. J. Gooding, "Performance monitor techniques for digital receivers based on extrapolation of error rate," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, Vol. COM-16, pp. 380-387, June 1968.
- 9) S. Takenaka, T. Katoh, H. Kurihara, M. Fukui, H. Nakamura, "Bit error monitor for four phase PSK system," *ICC'80 Conference record*, pp. 251-256, 1980.
- 10) E. A. Newcombe, S. Pasupathy, "Error rate monitoring for digital communication," *Proceedings of IEEE*, Vol. 70, No.8, pp. 805-828, 1982.
- 11) I. M. Kostić, "Pseudo error rate of a PSK system with hardware imperfections, noise and cochannel interference," *IEE Proceedings*, Vol. 136, Pt. I, No. 5, pp. 333-338, 1989.
- 12) J. M. Keelty, K. Feher, "On-line pseudo-error monitors for digital transmission systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 26, No. 8, pp. 1275-1282, 1978.
- 13) Kimtho Po, Jun-ichi Takada, "Performance Analysis of Signal Detection for Cognitive Radio," 信学技報, SR2007-4, pp. 21-24, 2007.
- 14) D. Cabric, A. Tkachenko, R. W. Brodersen, "Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection," *IEEE Milcom 2006*, pp. 1-7, 2006.