

フェージング環境下における ダイバシチ復号方式の特性評価

Performance evaluation for a diversity decoding scheme under fading environment

大谷 雅和*
Masakazu OTANI

小川 明*
Akira OGAWA

Abstract— This paper is concerned with the performance evaluation for the diversity decoding scheme in which the diversity and error correcting decoding are effectively combined. In this scheme, the information gained by the decoding process on the first diversity branch is utilized for decoding on the second diversity branch and vice versa. This is repeated, and it is combined at the end. This paper describes the performance evaluation for the diversity decoding scheme under fading environment through the computer simulation.

Keywords— Space diversity, Viterbi algorithm, Diversity decoding scheme

1 はじめに

近年、次世代携帯電話や無線 LAN のような高速移動体通信の需要が高まっている。移動体通信では、通常に比べて劣悪な電波伝搬環境下での通信となるため、より受信性能を高める必要がある。その方法として、空間ダイバシチ技術と誤り訂正繰り返し復号を融合したダイバシチ復号方式と呼ばれる受信方式が考えられている[1]。

本稿では、このダイバシチ復号方式が実際にどの程度の特性が得られるのかを調べるため、フェージング環境下におけるダイバシチ復号方式の特性を計算機シミュレーションによって評価する。

2 ダイバシチ復号方式

本節では、ダイバシチ復号方式について説明する。図1は、ダイバシチ復号方式の構成をブロック図で表したものである。ダイバシチ復号方式の特徴は、それぞれのダイバシチブランチにおいて信頼度の計算を行い、新たに得られた信頼性のある情報をもう一方のブランチへ入力し、再び誤り訂正を行うという操作を繰り返し行い、最後に合成する点である。この繰り返し復号の操作を実現するために、復号器として軟入力軟出力復号器（Soft-in Soft-out Decoder：SISO Decoder）が導入されている。以下に軟入力軟出力復号器と繰り返し復号に関して述べる。

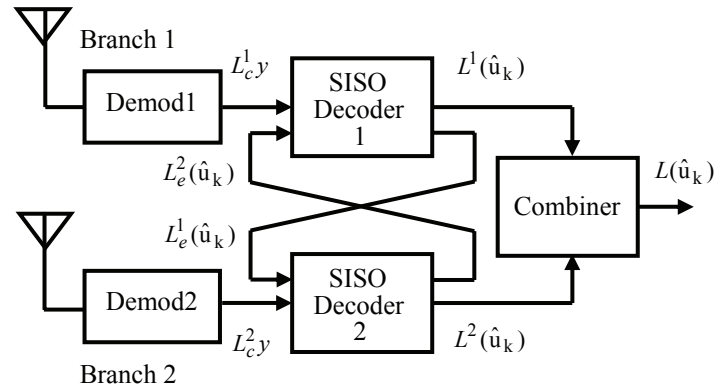


図1 ダイバシチ復号方式のブロック構成

2.1 軟入力軟出力復号器

ダイバシチ復号方式で用いられる軟入力軟出力復号器は、尤度領域で軟判定復号するものであり、その対数尤度比(Log-Likelihood Ratio; LLR)は以下の式で表される。

$$L(\hat{u}_k) = L(u_k) + L_c \cdot y + L_e(\hat{u}_k) \quad (1)$$

ここで、式(1)の第1項 $L(u_k)$ は時刻 k における情報

ビットに対する事前情報(a priori information)であり、送信ビットが1であるか-1であるかの確率の対数比を表しており、以下の式で表される。

$$L(u_k) = \log \frac{P(u_k = +1)}{P(u_k = -1)} \quad (2)$$

式(1)の第2項 $L_c \cdot y$ は受信信号 y から得られる通信

路値(the channel state information)である。 $L_c \cdot y$ に関しては、以下の過程で表現することができる。

第 k 番目の送信信号 x_k がフェージングと

AWGN(Additive White Gaussian Noise)チャネルを通過

して受信された信号値 y_k は以下の式で表される。

$$y_k^m = a_k^m x_k + n_k^m \quad (3)$$

*名城大学大学院理工学研究科情報科学専攻 〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501, Department of Information Sciences Graduate School of Science and Technology Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi Tenpaku Nagoya 468-8502, Japan.

ここで m はダイバシチブランチの数, a はフェージングによるランダム振幅値, n はガウス分布によるランダム変数を表す.

また, 受信信号が y であるとき, 送信信号値が x である条件付確率(事後確率) $p(x|y)$ は Bayes 定理より, 以下の式で表される.

$$P(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)} \quad (4)$$

ここで $P(y|x)$ は分散 σ^2 のガウス雑音の確率密度関数より, 以下の式で表される.

$$P(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y-ax)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

また, 事後確率 $p(x|y)$ の対数尤度比 $L(x|y)$ は式(4), (5)より以下のように算出される.

$$\begin{aligned} L(x|y) &= \ln \left[\frac{P(x=+1|y)}{P(x=-1|y)} \right] \\ &= \ln \left[\frac{P(y|x=+1)P(s=+1)}{P(y|x=-1)P(s=-1)} \right] \\ &= \ln \left[\frac{P(y|x=+1)}{P(y|x=-1)} \right] + \ln \left[\frac{P(s=+1)}{P(s=-1)} \right] \\ &= \ln \left[\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2}\right)}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y+a)^2}{2\sigma^2}\right)} \right] + L(s) \\ &= \frac{2a}{\sigma^2} y + L(s) \\ &= 4a \left(\frac{E_s}{N_0} \right) y + L(s) \\ &= L_c \cdot y + L(s) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, E_s/N_0 は送信シンボルのエネルギー対雑音電力比である. ゆえに, $L_c \cdot y$ は以下の式で表される.

$$L_c \cdot y = 4 \left(\frac{E_s}{N_0} \right) a_k \cdot y \quad (7)$$

また, $L(s)$ は事前情報であり, $L(u_k)$ とも表される.

式(1)の第3項 $L_e(\hat{u}_k)$ は外部情報(the extrinsic information)であり, 復号により選択されたパスにおける確からしさ(メトリック)として表される値である. この外部情報は, ビタビアルゴリズムをベースに軟入力から軟出力を得る SOVA(Soft output Viterbi

algorithm)により求める. この SOVA の時刻 k における i 番目のパスメトリックは, 以下の式で表すことができる.

$$M_k(s^i) = M_{k-1}(s^{i'}) + \frac{1}{2} L(u_k) u_k^i + \frac{1}{2} \sum_{v=1}^n L_c y_{k,v} x_{k,v}^{(i)} \quad (8)$$

ここで $s^{(i)}$ は時刻 k における i 番目のパスの状態, u_k^i

は情報ビット系列, $x_{k,v}^{(i)}$ は時刻 k における i 番目のパスの符号化されたビット系列である.

SOVA における外部情報の算出方法を図2に示し, 以下に述べる[1]. 外部情報を求めるにあたり, まず一通り復号を行い, 1 本パスを決定する. 次に時刻 k において選ばれたパスのメトリックと, その時刻で捨てられたもう1本のパスのメトリックとの差をとる. これを式に表すと

$$\Delta_k = M_k(s^i) - M_k(s^{i'}) \geq 0 \quad (9)$$

となる. この操作をすべての時刻において行い, 得られた差の最小値をとる. よって $L(\hat{u}_k)$ は以下のように表される.

$$L(\hat{u}_k) \approx u_k \cdot \min_{k=0, \dots, \delta} \Delta_k \quad (10)$$

ここで δ はトレリスにおける最終時刻を表す. この最小値は, 異なる軟判定値によって $\hat{u}_k$ となる非生存パスに対してのみ実行される. 最終的に外部情報は, SOVA の軟出力から事前情報を引き,

$$L_e(\hat{u}_k) = L(\hat{u}_k) - L(u_k) \quad (11)$$

として求めることができる.

2.2 繰り返し復号

軟入力軟出力復号器における繰り返し復号は以下の手順で行われる. まず1回目の誤り訂正において各ブランチで得られる出力メトリックは次のように表される.

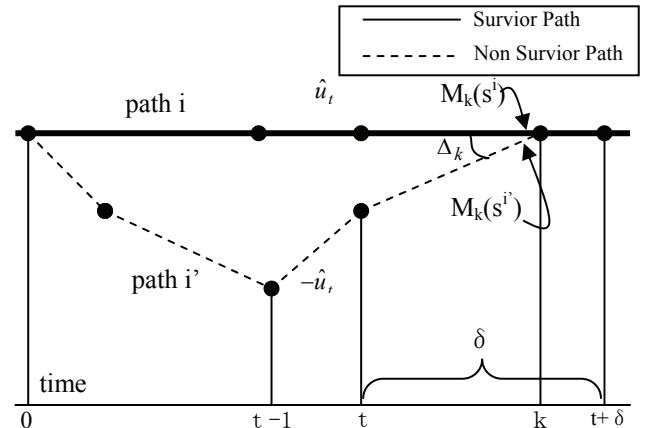


図2 SOVA における外部情報の算出方法

$$L^{(1,0)}(\hat{u}_k) = L_c^1 y + L_e^{(1,0)}(\hat{u}_k) \quad (12)$$

$$L^{(2,0)}(\hat{u}_k) = L_c^2 y + L_e^{(2,0)}(\hat{u}_k) \quad (13)$$

ここで(1,0)とはダイバシチブランチ1で繰り返し回数0回目であることを示し、他方のブランチにおいても同様の意味を示す。

2回目の誤り訂正（繰り返し回数1回目）では、先ほどの計算で得られた外部情報 $L_e(\hat{u}_k)$ をもう一方のブランチの事前情報として利用する。つまり、次のように表される。

$$L^{(1,1)}(\hat{u}_k) = L_e^{(2,0)}(\hat{u}_k) + L_c^1 y + L_e^{(1,1)}(\hat{u}_k) \quad (14)$$

$$L^{(2,1)}(\hat{u}_k) = L_e^{(1,0)}(\hat{u}_k) + L_c^2 y + L_e^{(2,1)}(\hat{u}_k) \quad (15)$$

3回目以降の計算も同様の操作を繰り返す。繰り返し回数 N 回目におけるメトリックは以下の式で表される。

$$L^{(1,N)}(\hat{u}_k) = L_e^{(2,N-1)}(\hat{u}_k) + L_c^1 y + L_e^{(1,N)}(\hat{u}_k) \quad (16)$$

$$L^{(2,N)}(\hat{u}_k) = L_e^{(1,N-1)}(\hat{u}_k) + L_c^2 y + L_e^{(2,N)}(\hat{u}_k) \quad (17)$$

この操作を所定回数繰り返した後に、最終的に得られた2つのメトリックを合成すると

$$L(\hat{u}_k) = L_c y_k^{(1)} + L_c y_k^{(2)} + L^{(1)}(u_k) + L^{(2)}(u_k) \quad (18)$$

が得られる。

3 計算機シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

フェージング環境下におけるダイバシチ復号方式の特性を評価するため、計算機によるシミュレーションを行う。

シミュレーションパラメータを表1に、シミュレーションの流れ図を図3に示す。

今回は以下の条件でシミュレーションを行う

- SOVA の繰り返し回数を変えた場合
- フェージング、AWGN 環境下におけるダイバシチ復号方式の特性
- 両ブランチの E_b/N_0 が異なる場合

3.2 シミュレーション結果

3.2.1 レイリーフェージング

レイリーフェージング環境下でSOVAの繰り返し回数を変えた場合の特性を図4に示す。繰り返し回数4回までは特性の向上が見られるが、それ以上繰り返してもほとんど意味がないことが分かった。この結果からSOVAの繰り返し回数は4回が妥当であると判断し、これ以降のシミュレーションでもSOVAの繰り返し回数は4回で行う。

AWGN 環境下、レイリーフェージング環境下におけ

るダイバシチ復号方式の特性を図5に示す。ダイバシチ復号方式によってAWGN環境下で約3dBの利得が得られていることが分かる。また、レイリーフェージング環境下ではAWGN環境下にくらべてより大きな利得が得られていることも分かる。

表1 シミュレーションパラメータ

変調方式	BPSK
誤り訂正符号	非組織的畳み込み符号
符号化率	$R = 1/2$
拘束長	$K = 3$
復号法	SOVA
通信チャネル	AWGN レイリーフェージング マルチパスフェージング
繰り返し回数	2～8回
2ブランチ間の E_b/N_0 の差	0dB, ± 3 dB

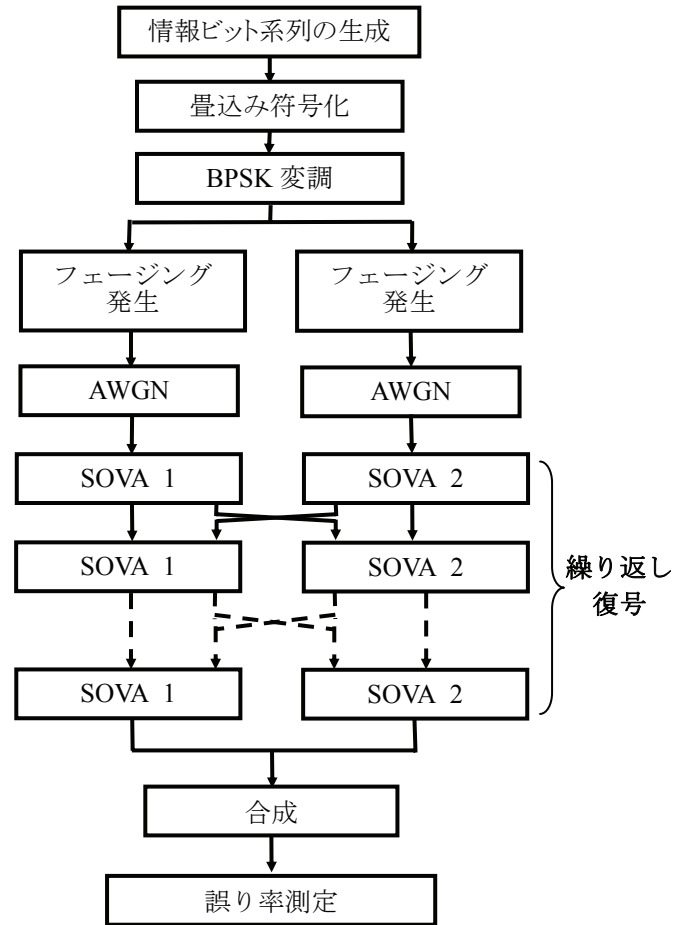


図3 シミュレーションの流れ

レイリーフェージング環境下において、ブランチ間の E_b/N_0 を変化させた場合の特性を図 6 に示す。図 5 の特性は両ブランチの E_b/N_0 が等しいという条件でシミュレーションを行った結果得られたものであるが、ここではブランチ 1 に対して、ブランチ 2 の E_b/N_0 を +3dB, -3dB と変えてシミュレーションを行った。ブランチ 2 の E_b/N_0 がブランチ 1 の E_b/N_0 より 3dB 高い場合、両ブランチの E_b/N_0 が等しい場合に比べて約 2dB の利得を得られることが分かった。

3.2.2 マルチパスフェージング

マルチパスフェージング環境下におけるダイバシチ復号方式のシミュレーション結果を図 7 に示す。ここで DUR とは、直接波対遅延波の電力比を示している。これより、マルチパス環境下においてもダイバシチ復号方式の効果を確認できた。

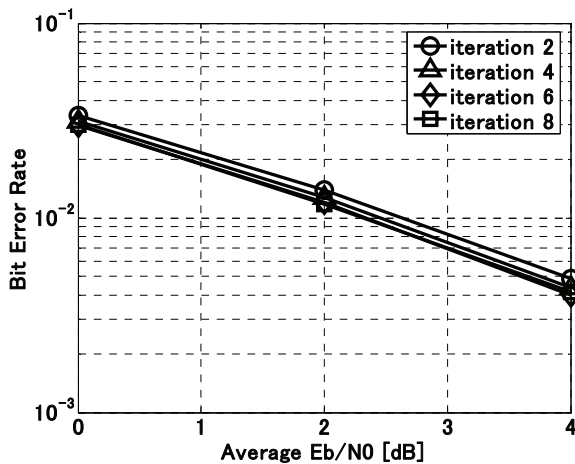


図 4 繰り返し回数を変えた場合の比較

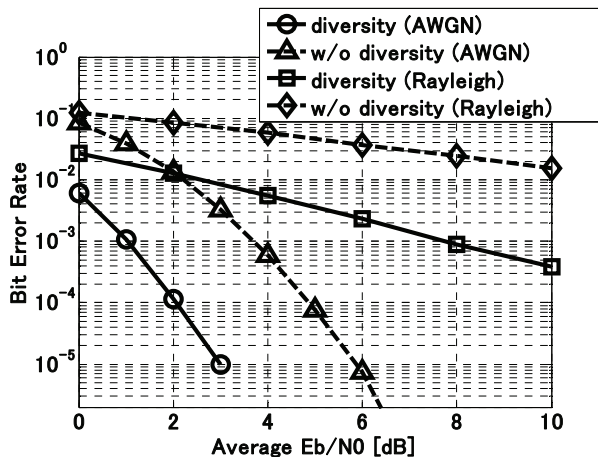


図 5 AWGN, レイリーフェージング環境下の比較

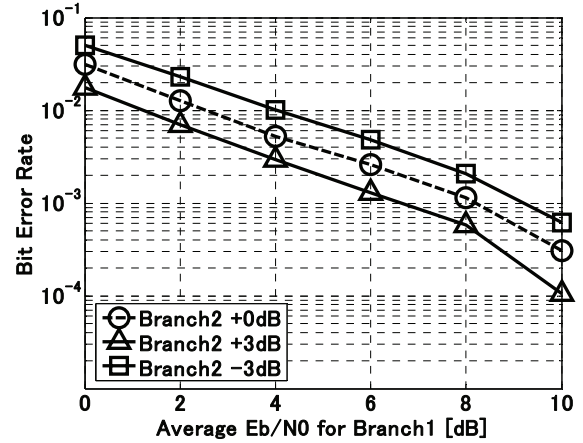


図 6 両ブランチの E_b/N_0 が異なる場合の比較

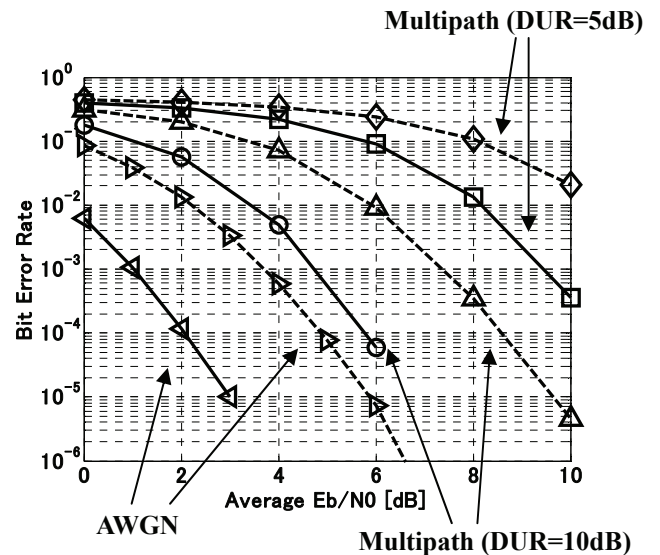


図 7 AWGN, マルチパス環境下の比較

4 まとめ

本稿では、空間ダイバシチ技術と誤り訂正繰り返し復号を融合したダイバシチ復号方式について、フェージング環境下におけるダイバシチ復号方式の特性を計算機シミュレーションによって評価した結果を示した。その結果として、ダイバシチ復号方式はフェージング環境下において効果を発揮することが分かった。

参考文献

- [1] Joachim Hagenauer, Fellow, IEEE, Elke Offer, and Papke "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes", IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL.42, NO.2, MARCH 1996