

マンチェスタ符号化PN系列対を用いるCSKの ジッタ特性に関する一検討

伊藤あづみ[†] 羽瀨 裕真^{††}

[†] 茨城大学大学院理工学研究科

^{††} 茨城大学工学部

〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1

E-mail: †nm03002x@cis.ibaraki.ac.jp, ††habuchi@mx.ibaraki.ac.jp

あらまし 本稿では、コードシフトキーイング(CSK/SS)方式の問題点である受信信号の同期追跡に着目している。本同期追跡法では、ポーラ符号化PN系列とマンチェスタ符号化PN系列を対で利用することで、従来の遅延ロックループよりも簡易な同期システムを実現している。これまでに著者らは、本同期追跡法を外部同期法の1つである情報用系列と同期用系列を並列伝送するシステムについて理論解析を行っている。そこで本稿では、本同期追跡法を内部同期法の1つである遅延検波器を利用した同期法に適用し、シングルユーザ環境でのジッタ特性を理論解析により評価している。更に、外部同期法に適用したときの性能との比較を行っている。その結果、本稿で導出したジッタ特性は、 E_b/N_0 が10[dB]のとき、外部同期法に適用したときの特性よりも約31%良好であることが明らかにされている。キーワード コードシフトキーイング、マンチェスタ符号、同期法、遅延ロックループ、ジッタ

The Jitter performance of CSK using the Manchester-Coded PN sequence pair

Azumi ITO[†] and Hiromasa HABUCHI^{††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

^{††} Faculty of Engineering, Ibaraki University

Nakanarusawa 4-12-1, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

E-mail: †nm03002x@cis.ibaraki.ac.jp, ††habuchi@mx.ibaraki.ac.jp

Abstract In this paper, the proposed tracking method for Code Shift Keying Spread Spectrum(CSK/SS) is used for the internal synchronization system that uses the differential detector. In the proposed system, a pair of synchronizing pseudo-noise (PN) sequences which consists of the Manchester-coded PN sequence and the Polar-coded PN sequence is used. The tracking error (jitter) performance is evaluated in a single-user case by theoretical analysis. Moreover, the jitter performance is compared with that of the external synchronization system. As the result, the jitter of the internal synchronization system is superior about 31% to that of the external synchronization system at $E_b/N_0=10$ [dB].

Key words Code Shift Keying, Manchester-Code, Synchronization, Delay Lock Loop, Tracking Error

1. まえがき

拡散符号により情報信号の帯域幅を拡大して伝送を行う直接拡散方式 (Direct Sequence/Spread Spectrum; DS/SS) 方式は、耐妨害性、耐干渉性、秘匿性などの利点を持つことから、移動体通信や無線 LAN などに適用され、ますます発展している。その DS/SS 方式を拡張した方式として、コードシフトキーイング (Code Shift Keying/SS; CSK/SS) 方式が注目されている。CSK/SS 方式は、送信側に M 個の直交符号系列を持ち、伝送データの値にしたがって M 個の中から 1 つの系列を選択して使用する方式である。この方式は、直交符号系列数 M の増加に伴ってビット誤り率及び情報伝送速度を改善できるため、DS/SS 方式よりも有用である。しかしながら、CSK/SS 方式には、受信同期タイミングを捕ることが難しいという問題点がある。1 つの拡散系列のみを用いる DS/SS 方式では、あらかじめ受信拡散系列が分かっているため同期獲得は容易に行うことができる。一方 CSK/SS 方式では、送信側で M 個の直交符号系列の中から 1 つを選択し、その系列に拡散系列を乗算して送信するため、受信拡散系列が変化する。そのために同期タイミングの獲得が困難となってしまう。

これまでに、CSK/SS 方式の同期法は様々な方法が検討されており、それらの方法は外部同期法、内部同期法に分けられる。外部同期法とは、送信信号エネルギーを情報用系列と同期用系列にそれぞれ割り当てて伝送を行う方式であり、

- 情報用系列と同期用系列を並列伝送する方法 [1] [2] [3]
- 全ての情報用系列の相関マップと同期用系列を利用して同期捕捉、追跡を行う方法 [4]

などが検討されている。一方、内部同期法は、情報信号に同期情報を埋め込んで伝送する方式である。例として、

- 遅延検波器を利用する方法 [5]
- アダマル行列の行ベクトルと競合カウンタを利用してフレーム同期を捕る方法 [6] [7]

などが検討されている。このような方式の同期追跡には主に遅延ロックループ (Delay Lock Loop; DLL) [8] が重要な役割を担っている。しかし DLL では、受信側で用意する参照同期用系列から 2 つの異なる位相をもつ系列を生成して利用するため、2 つの系列を出力するアームの利得を調整する必要があり、システムの煩雑さの要因になっている。

そこで本稿では、アーム間の利得調整を必要としない CSK/SS 方式の同期追跡法としてマンチェスタ符号化 PN 系列対を用いた方法を提案している。従来の DLL では、送受信側に同じ同期用系列を用いているのに対して、本同期追跡法はマンチェスタ符号化 PN 系列とポーラ符号化 PN 系列を対で用いている。これまでに著者らは、提案同期追跡法を外部同期法の 1 つに適用したシステムでを理論解析を行った [9] [10] [11] [12]。本稿では、内部同期法の 1 つである遅延検波器を用いた方法 [5] に提案同期追跡法を適用し、シングルユーザ環境でのジッタ特性について理論解析を行う。また、外部同期法で導出された特性と比較検討する。

表 1 に、本稿で使用される記号を示す。

表 1 記号

M	CSK 方式で用いる直交符号系列数
m	1 直交符号系列当たりのビット数 ($=\log_2 M[\text{bit}]$)
L	直交符号系列の系列長
T_c	直交符号系列の 1 チップ長
T	直交符号系列の周期 ($=LT_c$)
E_b/N_0	1 ビット当たりの送信信号エネルギー対雑音パワースペクトル密度 [dB]
B_n	ループフィルタの等価雑音帯域幅 ($=2 \times 0.53p_0$)
p_0	ループフィルタのカットオフ周波数 ($=k\frac{2\pi}{T}$)
k	ループフィルタの等価雑音帯域幅の係数

2. 遅延検波器による同期法

内部同期法の 1 つであるこの方式 [5] は、系列の構成を工夫した方式である。1 フレームを 2 つの PN 系列を連続接続することによって構成し、更に 2 つの接続する PN 系列の前半部 (anterior code) と後半部 (posterior code) を乗算すると、“ある特定の系列” が現れるように設定がなされている。図 1 に接続系列の構成を示す。

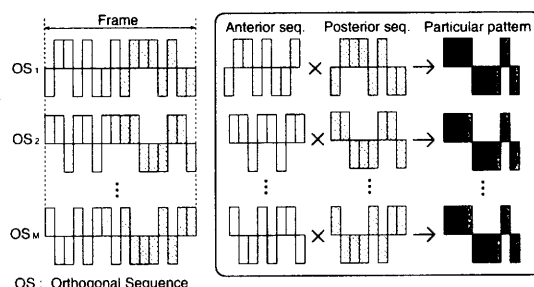


図 1 接続系列の構成

受信側では、受信信号とそれを 1 系列分遅延した系列の乗算を行うことで、同期系列パターンを発生させる (図 2)。この同期系列を利用して受信信号の同期タイミング獲得を行う。

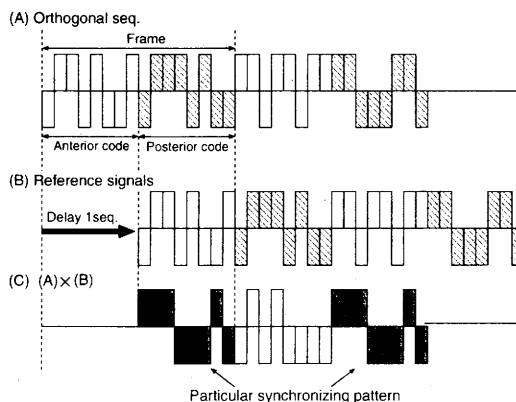


図 2 接続系列を用いる同期の原理

3. 提案同期追跡法

3.1 提案同期追跡法の原理

従来の DLL を用いた同期追跡法は、受信信号に含まれる同期用系列と同じ参照系列を受信側で生成し、更にはその参照系列を $\pm \Delta T_c$ [chip] 遅延させた Early 信号, Late 信号を生成して、受信信号と逆相加算することによって同期追跡を行っていた。本同期追跡法は、同期用系列として、ポーラ符号化 PN 系列とマンチェスタ符号化 PN 系列を対として用いることで、より簡易化した同期追跡システムを実現している。図 3 に本同期追跡法で使用する同期用 PN 系列対を示す。

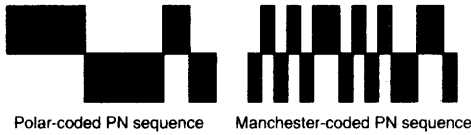


図 3 本同期追跡法で利用する同期用 PN 系列対

この系列対の相互相関を取ると図 4 のようになり、従来の DLL の S カーブと同様の形状を得ることができる。つまり、相互相関特性をそのまま DLL の S カーブとして使用することができ、従来のように受信側で Early, Late 信号を生成する必要がなくなる。したがって、アーム数が 1 つとなり、利得調整が不要となる。ここで、本同期追跡法の同期追跡範囲は $-\frac{T_c}{2} \leq t \leq \frac{T_c}{2}$ である。

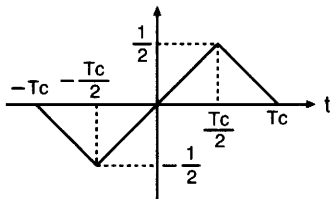


図 4 ポーラ符号化 PN 系列とマンチェスタ符号化 PN 系列の相互相関特性

また本同期追跡法は、ポーラ符号化 PN 系列とマンチェスタ符号化 PN 系列のどちらを送信側に用いても実現できる。この符号系列対は周波数表現での性質がそれぞれ異なり、ポーラ符号は直流成分で電力スペクトル密度がピークとなるが、マンチェスタ符号は直流成分で 0 となるため、伝送路特性によってどちらの同期用系列を送信側に使用するか選択すればよい。

3.2 システム構成

本稿では、提案同期追跡法を内部同期法の 1 つである遅延検波器を利用した方法 [5] に適用している。図 5 に、そのシステム図を示す。

送信機では、情報データは $m = \log_2 M$ [bit] のデータに変換される。変換されたデータの値にしたがって M 個の直交符号系列 $OS_j(t)$, ($j=1,2,\dots,M$) の中から 1 つを選択して送信する。ここで、伝送路には白色ガウス雑音が存在するものとする。

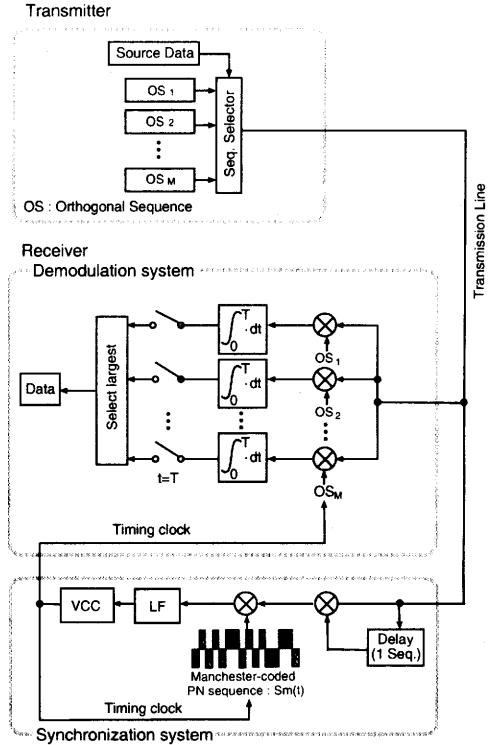


図 5 提案同期追跡法を用いた CSK/SS システム

受信側は、復調部と同期部から構成されており、受信信号は復調部と同期部にそれぞれ入力される。復調部は、 M 個の相関器を有している。受信信号は、送信側で用意したものと同じ M 個の直交符号系列 $OS_i(t)$, ($i=1,2,\dots,M$) と乗算を行う。これらの結果を相関器に入力し、積分を行う。 i 番目の相関器出力は

$$r_i = \int_0^T \{OS_j(t) + n(t)\} OS_i(t) dt \quad (1)$$

となる。ここで $n(t)$ は白色ガウス雑音を表している。相関器出力が最も大きくなる符号系列を送信符号系列と推定して、情報データを抽出する。

同期部は、遅延検波器、マンチェスタ符号化 PN 系列発生器、ループフィルタ (LF)、電圧制御クロック (VCC) で構成されている。まず、受信信号とそれを 1 系列分だけ遅延させた信号とを乗算し、同期用 PN 系列のパターンを生成する。この時の出力 $R(t)$ は

$$\begin{aligned} R(t) &= \{OS_j(t) + n(t)\} \times \{OS_j(t - T/2) + n(t - T/2)\} \\ &= OS_j(t)OS_j(t - T/2) + n(t)OS_j(t - T/2) \\ &\quad + n(t - T/2)OS_j(t) + n(t)n(t - T/2) \end{aligned} \quad (2)$$

次に生成した同期用 PN 系列をマンチェスタ符号化 PN 系列と乗算し、同期追跡を行う。乗算結果は LF に入力され、同期誤差が出力される。最後に、LF 出力に比例した周波数クロックが VCC で生成され、受信側の系列発生器のタイミングを調節する。

4. 性能評価

この節では、提案同期追跡法を内部同期法に適用したときのシングルユーザ環境におけるジッタ (同期誤差の分散) 特性を示す。同時に、従来の1Δ型DLLと2Δ型DLLのジッタ特性を示し、提案方法の性能と比較を行う。更に、これまでに著者らが検討した外部同期法に適用したときのジッタ特性と比較を行う。

本同期追跡法のジッタは以下の式で与えられる [8]。

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{P_{sync}} \int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega/p_0)|^2 G_{noise}(\omega) d\omega \quad (3)$$

ここで、 $P_{sync} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_b \log_2 M}{T} \right)^2$ は同期のために使用される信号の平均電力、 $|H(j\omega/p_0)|^2$ はループフィルタの伝達関数、 $G_{noise}(\omega)$ は、ジッタ特性に影響を及ぼす因子を示す。前節で、遅延検波器からの出力信号は (2) 式で与えられた。この信号はマンチェスタ符号化PN系列 $S_m(t)$ と乗算を行う。

$$R(t)S_m(t) = \{OS_j(t)OS_j(t-T/2) + n(t)OS_j(t-T/2) + n(t-T/2)OS_j(t) + n(t)n(t-T/2)\} S_m(t) \quad (4)$$

上式で示した信号はLFへ入力され、同期追跡を行う。ここで、ジッタ特性は上式の雑音を含む第2, 3, 4項から影響を受ける。第4項は十分小さいと考えられるので無視することとすると、 $G_{noise}(\omega)$ は

$$\begin{aligned} G_{noise}(\omega) &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} OS_j^2(t) dt \times \frac{N_0}{2} \\ &\quad + \frac{1}{T} \int_0^{T/2} OS_j^2\left(t - \frac{T}{2}\right) dt \times \frac{N_0}{2} \\ &= \frac{E_b N_0 \log_2 M}{2T} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、等価雑音帯域幅 B_n を

$$B_n = \int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega/p_0)|^2 d\omega \quad (6)$$

と表すと、ジッタ σ_j は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \sigma_j^2 &= \frac{1}{P_{sync}} \int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega/p_0)|^2 G_{noise}(\omega) d\omega \\ &= 2 \left(\frac{T}{E_b \log_2 M} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} B_n \times \frac{E_b N_0 \log_2 M}{2T} \\ &= \frac{B_n T}{\log_2 M (E_b/N_0)} \\ \sigma_j &= \sqrt{\frac{B_n T}{\log_2 M (E_b/N_0)}} \end{aligned} \quad (7)$$

図6は、等価雑音帯域幅 $B_n (= 2 \times 0.53 \times k \frac{2\pi}{T})$ の係数 k を変化させた時のジッタ特性を示している。ここで、直交符号系列数 $M=128$ 、 $E_b/N_0=10[\text{dB}]$ としている。この結果から、係数 k の値が小さく (等価雑音帯域幅が狭く) なるにつれて、ジッタは良好な特性を示していることが分かる。

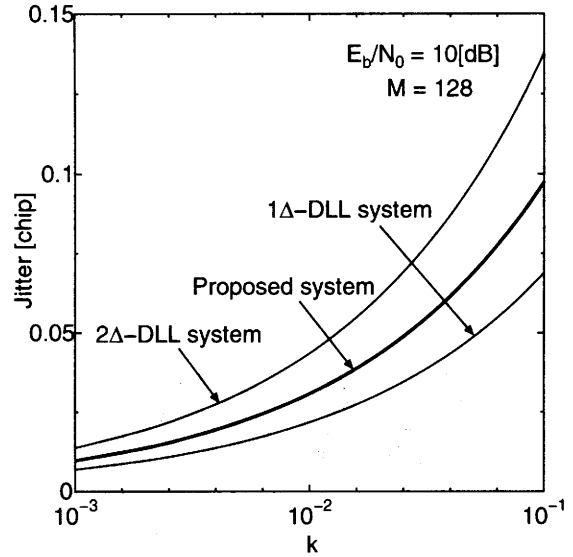


図6 等価雑音帯域幅の係数 k に対するジッタ特性

次に、シングルユーザ環境での提案同期追跡法、1Δ型DLL、2Δ型DLLの E_b/N_0 に対するジッタ特性を図7に示す。ここで、等価雑音帯域幅 B_n の係数 $k=0.01$ 、直交符号系列数 $M=128$ としている。図7より、本同期追跡法のジッタ特性は、従来の1Δ型DLLの特性と2Δ型DLLの特性の中間に位置している。

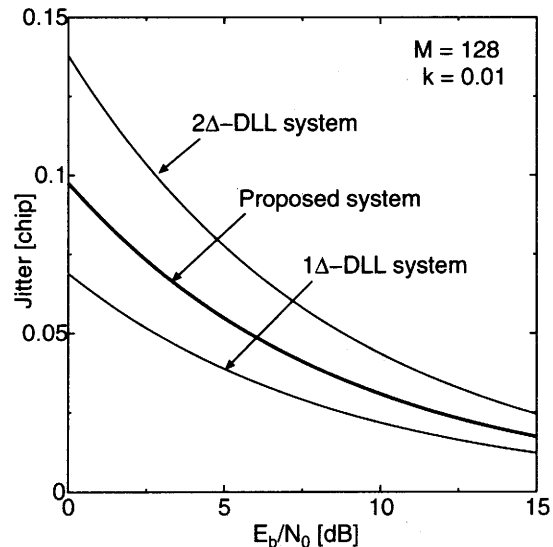


図7 E_b/N_0 に対するジッタ特性

図8では、今回導出したジッタ特性と、外部同期法へ適用したときのジッタ特性を示している。ここで、外部同期法では、送信信号エネルギーを情報用系列のエネルギー E_{info} と同期用系列のエネルギー E_{sync} に割り当てて使用している。これ

らのエネルギー比 $R (= E_{info}/E_{sync})$ をビット誤り率が最小となるように $R = 3.3$ に設定している [11][12]. この結果より、 $E_b/N_0 = 10$ [dB] のとき、今回適用した遅延検波器を利用する場合のジッタ特性は、外部同期法へ適用したときのジッタ特性よりも約 0.015 [chip] (約 31%) の改善が見られた。これは、外部同期法のシステムが同期追跡をする際に情報用の系列が干渉になってくること、またエネルギー比が $R > 1$ であるので同期用系列に割り当てられるエネルギーが少ないことに起因している。

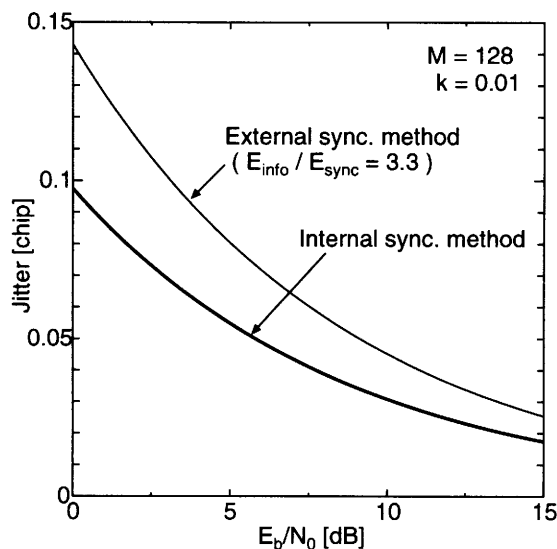


図 8 E_b/N_0 に対するジッタ特性
(内部同期法、外部同期法に適用した場合)

5. むすび

本稿では、CSK/SS 方式の同期追跡法として、同期用系列にマンチェスタ符号化 PN 系列とポーラ符号化 PN 系列を対にして利用する方法を、内部同期法の 1 つである遅延検波器を用いる方法に適用した。本同期追跡法は、同期用系列対の相互相関特性が DLL の S カーブと同様の形状であることを利用して同期追跡を行う方法であり、従来の DLL を利用する方法よりもシステムを簡易化することができる。

理論解析では、シングルユーザ環境でのジッタ特性を評価し、従来の DLL を利用する同期追跡法との比較を行った。結果として、ジッタ特性は等価雑音帯域幅を狭くするにつれて改善された。また、本同期追跡法のジッタ特性は、従来の 1Δ 型 DLL と 2Δ 型 DLL との中間の特性となった。更に、外部同期法に本同期追跡法を適用したときのジッタ特性との比較を行った結果、今回適用した内部同期法の 1 つである遅延検波器を用いた方法でのジッタ特性がより良好な特性を示した。

今後は、ジッタ特性を考慮したビット誤り率の導出、更にマルチユーザ環境でのジッタ特性、ビット誤り率特性について理論解析を行う。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費 (基盤研究 C) の援助により行われた。

文 献

- [1] 太刀川信一, 丸林元, “PN 系列による同期信号を用いた M-ary/SS 方式の一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, SSTA89-73, (1989-11)
- [2] H.Habuchi and S.Hosaka, “Bit Error Rate of Bi-orthogonal Systems Considering Synchronization Performance”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E79-A, No.12, pp.1982-1987, Dec. 1996
- [3] K.Ohuchi, H.Habuchi and T.Takebayashi, “A theoretical analysis of the synchronous SS-CSK/CDMA system”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E81-A, No.11, pp.2291-2297, Nov. 1998
- [4] 大島健一, 稲村英信, 太刀川信一, 丸林元, “相関マップを用いた M-ary/SS 方式の同期法に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, SST93-87, (1989-11)
- [5] Hiromasa Habuchi and Yasuo Usui, “A Novel Synchronization Method for Bi-orthogonal Modulation Systems”, Proc. PIMRC 2000 pp.610-614, September, 2000
- [6] K.Ohuchi, H.Habuchi and T.Hasegawa, “A study on the M-ary/SS communication systems using a frame synchronization method of PCM communication systems”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E77-A, No.11, pp.1942-1945, Nov. 1994
- [7] K.Ohuchi, H.Habuchi and T.Hasegawa, “Theoretical analysis of M-ary/SS communication systems using racing counters and a Hadamard matrix”, IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol.14, No.8, pp.1569-1575, Oct. 1996
- [8] J.J.Spilker, Jr., “Delay-Lock Tracking of Binary Signals”, IEEE Trans. Space Electronics and Telemetry, Vol.SET-9, pp.1-8, March. 1963
- [9] 羽濑裕真, 伊藤あづみ, “マンチェスタ符号化 PN 系列対を用いた CSK のための同期法”, 電子情報通信学会総合大会, A-5-13, (2003-3)
- [10] 伊藤あづみ, 羽濑裕真, “マンチェスタ符号化 PN 系列対を用いる CSK に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, SST2002-209, (2003-3)
- [11] Azumi Ito and Hiromasa Habuchi, “A Novel Synchronization Method for CSK/SS”, Proc. WPMC'03, Vol.3/3, pp.(V3-222)-(V3-226), Oct. 2003
- [12] Azumi Ito and Hiromasa Habuchi, “Performance Analysis of CSK/SS with Manchester-coded PN Sequence Pair”, IS-PACS'03 (2003 年 12 月 発表予定)