

平成3年度科学研究費補助金〔一般研究（C）〕研究成果報告書

デジタル衛星通信システムにおける
フレーム同期方式に関する研究

(課題番号02805041)

平成4年3月

研究代表者 高畑 文雄
(早稲田大学 理工学部 教授)

あらまし

デジタル無線伝送システムにおけるユニークワード（UW）検出方式ならびにフレーム同期方式に、実用面を考慮して、量子化された軟判定データを適用する有効性について検討する。

UW検出に関しては、多次元空間内に生起する代表点を用いて受信ベクトルを表現し、送信UWに対応するベクトル点とのユークリッド距離を尺度として、受信UWの判定がなされる。伝送系において白色ガウス雑音が付加されると仮定して、不検出、誤検出などの各種UW検出特性を、確率計算に基づき、理論的に求める方法を紹介する。その後、各種特性に関して、硬判定データを用いた従来のUW検出で得られる特性との定量的比較を行う。また、ハードウェアを用いて、実験的に取得したUW検出特性も示す。その結果、伝送システムの設計目標に準じて、軟判定データに対する量子化数を適宜設定することは、良好なUW検出特性を実現する上で有効であるとの結論が得られた。さらに、実験的に得られた特性と理論的に得られた特性とは、良好な一致を示すことが確認でき、量子化された軟判定データを適用したUW検出をハードウェア上に構築できることが明らかとなった。

フレーム同期に関しては、まず、上記UW検出特性からフレーム同期特性を理論的に導出する方法を明かにする。その後、同期引込み時間と同期はずれ検出・同期引込み時間の両評価基準に基づき、各種軟判定データおよび硬判定データをUW検出に適用した場合に得られるフレーム同期特性の比較・評価を行う。定量的検討の結果、量子化を施した軟判定データを用いてフレーム同期を確立する手法が、量子化なしの軟判定データ及び硬判定データを用いる両者の場合より、良好なフレーム同期特性が得られることが明らかとなった。

研究組織

研究代表者：高畑 文雄（早稲田大学理工学部教授）

研究経費

平成2年度	1,200千円
平成3年度	800千円
計	2,000千円

研究発表

- (1) 萩窪、高畑：“軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する特性”、1990年電子情報通信学会春季全国大会、B-218、1990年3月。
- (2) 萩窪、笹井、高畑：“軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する理論と特性”、電子情報通信学会、衛星通信研究会技術報告、SAT90-25、1990年8月。
- (3) 笹井、萩窪、高畑：“量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性”、1990年電子情報通信学会秋季全国大会、B-180、1990年10月。
- (4) 笹井、高畑、萩窪：“量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する理論的検討”、電子情報通信学会、衛星通信研究会技術報告、SAT91-75、1991年9月。
- (5) 竹薮、蓑毛、高畑：“量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する実験的検討”、電子情報通信学会、衛星通信研究会技術報告、SAT91-76、1991年9月。
- (6) 蓑毛、竹薮、高畑：“量子化された軟判定データを用いた16ビット長のユニークワード検出特性”、B-207、1992年電子情報通信学会春季全国大会

目次

第1章 まえがき	-----	1
第2章 ユニークワード検出特性	-----	2
2.1 理論的検討	-----	2
2.1.1 硬判定データを用いる場合	-----	2
2.1.2 軟判定データを用いる場合	-----	3
2.2 実験的検討	-----	8
2.2.1 実験系の構成	-----	8
2.2.2 DSPを用いた白色ガウス雑音の発生	-----	8
2.2.3 各種UW検出特性の取得方法	-----	11
2.3 ユニークワード検出特性の定量的評価	-----	16
2.3.1 理論計算による評価	-----	16
2.3.2 実験による評価	-----	20
第3章 フレーム同期特性	-----	25
3.1 理論的解析	-----	25
3.1.1 フレーム同期の概念	-----	25
3.1.2 各種フレーム同期特性の算出方法	-----	25
3.2 フレーム同期特性の定量的評価	-----	29
3.2.1 フレーム同期特性の評価方法	-----	29
3.2.2 フレーム同期特性の最小限界	-----	29
3.2.3 同期保持状態における最適パラメータ	-----	31
3.2.4 同期引込み状態における最適パラメータ	-----	41
3.2.5 検出特性を考慮したフレーム同期特性	-----	51
第4章 あとがき	-----	53
参考文献	-----	55
付録 (発表論文集)	-----	56

第1章 まえがき

デジタル無線伝送システムにおいて、フレーム内に配置されたユニークワード (Unique Word ; 以下、UW と称す。) の検出は不可欠な技術要素である。UW 検出として、受信側において復調ビットを "0" または "1" の 2 値に硬判定した後、ハミング距離を尺度とした相関特性をとる方法が広く採用されている^{(1),(2)}。近年、良好な符号誤り特性を実現できるという理由から、畳み込み符号化/ビタビ復号化や逐次復号化などの誤り訂正 (F E C ; Forward Error Correction) 方式をデジタル伝送方式へ積極的に適用する傾向にある。この種の伝送方式では、情報ビットは、多値の軟判定データとして、F E C 復号器に引き渡される。

UW 検出に関しても、従来のように復調信号を硬判定せず、情報ビットと同様に軟判定された復調データのままで処理することが可能である。軟判定データを用いた UW 検出を実行すれば、従来の 2 次元処理ではなく、多次元の信号処理ができるようになるため、UW 検出特性を改善できる可能性がある。

研究代表者らは、軟判定データが離散値、即ち量子化された値として、実用上取り扱われることを鑑み、量子化された軟判定データを用いた UW 検出の理論解析を確立し、その理論に基づき、不検出、誤検出などの各種 UW 検出特性を算出し、硬判定データ及び量子化なしの軟判定データを用いた場合の特性⁽³⁾との定量的比較を実施した^{(4),(5)}。更に、D S P (Digital Signal Processor) を用いたハードウェア上に、今まで検討を進めてきた UW 検出方式のアルゴリズムを構築して、UW 検出特性を評価する実験的検討を並行して実施した⁽⁶⁾。

次に、上記により得られた UW 検出特性を、UW 検出の組合せから構成されるフレーム同期方式に導入することによって、フレーム同期特性を改善できる可能性がある。事実、位相反転のないデジタル伝送システムにおいて、量子化なしの軟判定データを用いた UW 検出を、フレーム同期手順に組み込み、理論解析を行った結果、軟判定データを用いることによって、システムの要求に柔軟に対応することが可能となり、フレーム同期特性が改善されることが判明した^{(7),(8)}。また、実用システムへの適用を考慮して、量子化された軟判定データを用いた UW 検出をフレーム同期方式に適用し、その特性を評価した結果、良好なフレーム同期特性が得られることが明らかになった⁽⁹⁾。特に、フレーム同期特性に関しては、従来から評価基準として採用されてきた同期引込み時間に加えて、伝送システムに瞬断が発生し、再びシステムが正常に稼働するまでに要する時間として、同期はずれ検出・同期引込み時間という新しい評価基準を定義し、両評価基準に基づく定量的検討を実施した。

以下、本報告書では、第 2 章において、UW 検出特性に関する理論ならびに実験的検討を明らかにした後、両検討によって得られた各種 UW 検出特性に対して定量的評価を加える。第 3 章においては、フレーム同期特性を理論的に導出する手法を紹介した後、各種フレーム同期特性を示し、結果に対して定量的評価を加える。

第2章 ユニークワード検出特性

本章では、各種UW検出特性を確率計算に基づき理論的に導出する方法、ハードウェアを用いて実験的に取得する方法を述べた後、得られた特性を定量的に評価する。なお、変調方式としては、絶対符号化された2相PSKを仮定し、伝送系において、白色ガウス雑音が付加されるものと想定する。また、本章で述べる方法に基づき、多相PSK、例えば4相PSKへの拡張が可能である⁽⁴⁾。

2.1 理論的検討

2.1.1 硬判定データを用いる場合^{(1),(2)}

UWを検出する際には、伝送路上で発生するビット誤りの影響を考慮して、通常、受信信号中に ϵ 個以下のビット誤りが含まれていても、UWを検出したと判断する。この ϵ を許容誤りビット数という。

個々のビットの誤り率 p_e は、次式で与えられる。

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2.1)$$

ここで、 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ は誤差補関数、 E_b は受信信号の1ビット当りの信号電力、 N_0 は白色ガウス雑音の片側雑音電力密度であり、 E_b/N_0 は1ビット当たりの信号電力対雑音電力密度比と呼ばれている。

UW正検出確率 P_c 、位相誤検出確率 P_p は、各々ビット誤り率 p_e を用いて、以下のよう表される。

$$P_c = \sum_{i=0}^{\epsilon} M C_i p_e^i q^{M-i} \quad (2.2)$$

$$P_p = \sum_{i=M-\epsilon}^M M C_i p_e^i q^{M-i} \quad (2.3)$$

$$q = 1 - p_e \quad (2.4)$$

ここで、 M はUW長 [ビット] である。

一方、UW不検出確率 P_m は、上記正検出確率 P_c 、位相誤検出確率 P_p を用いて、次式で与えられる。

$$P_m = 1 - P_c - P_p = \sum_{i=\epsilon+1}^{M-\epsilon-1} M C_i p_e^i q^{M-i} \quad (2.5)$$

次に、UW誤検出は、①UWの位置から前後にずれた位置で起こる場合、及び②情報ビット中で起こる場合がある。UWの前後には情報ビットが続いており、その系列はランダム・ビット系列からなると考えられる。

上記①に相当するUW位置から b ビットだけ偏位した位置でのUW誤検出確率 P_b は、次式で与えられる。

$$P_{\Gamma}(E_m) = \sum_{i=E_m-\varepsilon}^{E_m} E_m C_i p_c^i q^{E_m-i} \sum_{j=0}^{\varepsilon-E_m+i} M-E_m-b C_j p_c^j q^{M-E_m-b-j} \sum_{k=E_m+b-\varepsilon-i+j}^b b C_k \left(\frac{1}{2}\right)^b \quad (2.6)$$

$$\therefore P_{\Gamma b} = \sum_{m=1}^2 P_{\Gamma}(E_m) \quad (2.7)$$

但し、 E_m は m 番目の再生位相状態 ($m=1$: 正しい位相、 $m=2$: 反転した位相) における UW 検出器と UW 位置との交差部分におけるビット・パターン中の不一致ビット数である。

一方、②の場合の UW 誤検出確率 P_{FM} は、式(2.6)において、 $E_m=0$ 、 $b=M$ とした次式で与えられる。

$$P_{FM} = \sum_{k=M-\varepsilon}^M M C_k \left(\frac{1}{2}\right)^M \times 2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{M-1} \sum_{k=0}^{\varepsilon} M C_k \quad (2.8)$$

2.1.2 軟判定データを用いる場合

(1) UW 検出の概念

受信 UW の各ビットには、それぞれ独立にガウス雑音が重畳されるため、これら雑音が付加された受信 UW 中の各ビットは互いに直交して分布する。即ち、受信 UW は、UW 長 (M ビット) と一致する次数を有する多次元 (M 次元) 空間内のベクトルで表現でき、共分散が 0 の多変量ガウス分布に従う。故に、多次元空間内のベクトルとして与えられる送信 UW と受信 UW との間のユークリッド距離を尺度とした相関をとることにより、UW の判定を行うことができる。

伝送系において、各ビットに雑音が付加された UW パターンに対応する受信ベクトル \vec{Y} と雑音付加なしの送信 UW パターンに対応する UW ベクトル \vec{P} 及び送信 UW パターン中の全ビットが反転した \overline{UW} パターンに対応する \overline{UW} ベクトル \vec{P} との間のユークリッド距離を、各々 R_0 及び R_1 、許容ユークリッド距離を d とした場合、UW が正検出、不検出及び位相誤検出される条件は、各々次式で与えられる。

$$\text{(正検出)} \quad (R_0 \leq d \text{ かつ } R_0 < R_1) \quad (2.9)$$

$$\text{(位相誤検出)} \quad (R_1 \leq d \text{ かつ } R_0 > R_1) \quad (2.10)$$

$$\text{(不検出)} \quad \{ (R_0 > d \text{ かつ } R_1 > d) \text{ または } (R_0 = R_1 \leq d) \} \quad (2.11)$$

ここで、受信ベクトル \vec{Y} と UW ベクトル \vec{P} 及び \overline{UW} ベクトル \vec{P} との間の距離が等しく、かつその距離が許容ユークリッド距離 d 以下の状態 ($R_0 = R_1 \leq d$) は、特別な状態を意味しており、上記条件のいずれに含めることも可能であるが、ここでは、(2.11)式に示すように、UW 不検出として取り扱うこととする。

また、情報ビットを含む受信ベクトル \vec{Y} と UW ベクトル \vec{P} 及び \overline{UW} ベクトル \vec{P} との間のユークリッド距離を、各々 r_0 及び r_1 とした場合、受信ベクトル \vec{Y} が UW として誤って検出される UW 誤検出の条件は、次式で与えられる。

$$\text{(誤検出)} \quad \{ (r_0 \leq d \text{ または } r_1 \leq d) \text{ かつ } r_0 \neq r_1 \} \quad (2.12)$$

なお、上式は、変調方式として、絶対符号化された2相PSKを想定していることから、 UW と \overline{UW} の両パターンに対する誤検出を考慮する必要性があることを意味している。

(2) 量子化を施さない (丸めのない) 軟判定データを用いる場合⁽³⁾

UW 正検出確率 P_c 、不検出確率 P_m は、各々次式で与えられる。

$$P_c = P_d \left[\|\vec{Y} - \vec{P}\| < d \mid \vec{P} \right] = \int_0^d \frac{2}{\Gamma\left(\frac{M}{2}\right)} \frac{r_M^{M-1}}{(\sqrt{N_0})^M} \exp\left(-\frac{r_M^2}{N_0}\right) dr_M \quad (2.13)$$

$$P_m = P_d \left[\|\vec{Y} - \vec{P}\| \geq d \mid \vec{P} \right] = P_p = \exp\left(-\frac{E_b}{N_0} (2\delta)^2\right) \sum_{k=0}^{\frac{M-2}{2}} \frac{(2\delta)^{M-2-2k}}{\Gamma\left(\frac{M-k}{2}\right)} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{\frac{M-2}{2}-k} - P_p \quad (2.14)$$

$$\delta \equiv \frac{\epsilon}{2\sqrt{E_b}} \quad (2.15)$$

ここで、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数、 P_p は位相誤検出確率を示す。

一方、 UW パターンに対するハミング距離が f である符号語 A が、誤検出される確率 P_f は、次式で表される。

$$P_f = P_d \left[\|\vec{Y} - \vec{P}\| < d \mid \vec{A} \right]$$

$$= \frac{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{\frac{M}{2}}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{M-1}{2}\right)} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^{M-2} \phi_M \exp\left(-\frac{E_b}{N_0} 4f \cos^2 \phi_M\right) d\phi_M \int_0^{2\delta} t^{M-1} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0} (t - 2\sqrt{f} \sin \phi_M)^2\right) dt \quad (2.16)$$

なお、(2.14)式において必要となる UW 位相誤検出確率 P_p は、 UW パターンと \overline{UW} パターンとの間の不一致ビット数、即ちハミング距離 f が M に等しいことから、(2.16)式において、 $f=M$ と代入することによって算出される。

最後に、 UW 位置より b ビットだけ偏位した位置での UW 誤検出確率 P_{fb} は、次式で与えられる。

$$P_{fb} = \sum_{m=1}^2 p_{fb}(E_m) \quad (2.17)$$

$$P_{\text{th}}(E_m) = \sum_{i=E_m}^{E_m+b} \frac{b C_i E_m}{2^b} P_{r=i} \quad (2.18)$$

(3) 量子化された軟判定データを用いた理論^{(4),(5)}

送信ビット振幅 x (ビット"1"に対して1、ビット"0"に対して-1) に対する受信信号振幅 r は、次式で与えられる。

$$r = \sqrt{E_b} x + n \quad (2.19)$$

但し、 n は平均値0で分散 $N_0/2$ のガウス雑音の振幅である。

量子化数 Q の軟判定データは、上式で与えられる受信信号振幅 r が、予め定められた軟判定閾値 b_i ($i=0 \sim Q, b_0=-\infty, b_Q=+\infty$) によって分割された Q 個の軟判定領域のいずれに属するかにより、その領域に対応する量子化された値 g_i ($i=0 \sim Q-1$) として表現される。隣接する閾値の間隔は、 E_b/N_0 と量子化数 Q によって決定される定数である⁽¹⁰⁾。

送信ビット振幅が x のとき、復調器で信号振幅 r を復調する確率 $P(r, x)$ は、次式で与えられる。

$$P(r, x) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left\{-\frac{(r - x\sqrt{E_b})^2}{N_0}\right\} \quad (2.20)$$

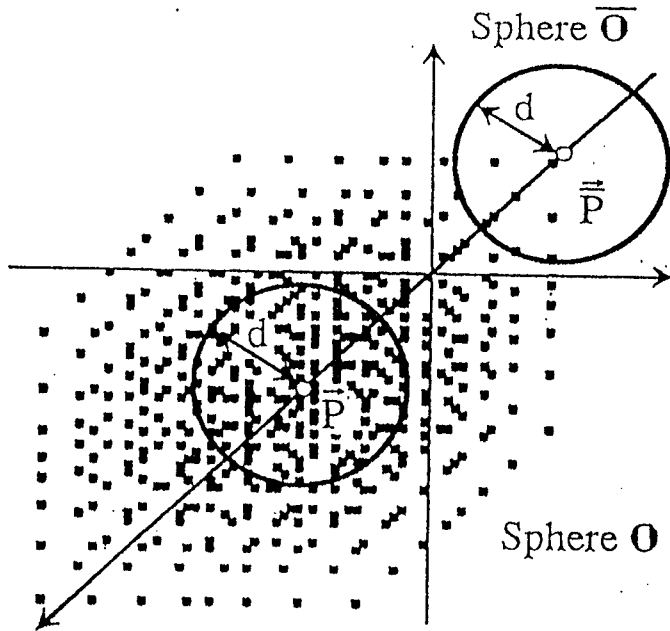
UW検出において、ユークリッド距離を算出する際に用いる信号振幅値 a_i 、即ち多次元空間内の受信ベクトル \vec{Y} を構成する各要素としては、受信信号振幅 r が区間 (b_i, b_{i+1}) に落ち込む確率から算出される期待値を採用する。換言すると、区間 (b_i, b_{i+1}) に落ち込む受信信号振幅 r を信号振幅値 a_i に代表させる。このとき、量子化された軟判定データ g_i が復調され、信号振幅値 a_i が採用される確率 $Q(a_i, x)$ は、次式で与えられる。

$$Q(a_i, x) = \int_{b_i}^{b_{i+1}} P(r, x) dr \quad (2.21)$$

なお、信号振幅値 a_i は、受信側においてビット"1"と"0"のいずれが送信されているのか不明である点を考慮して、次式を用いて算出する。

$$a_i = \frac{\int_{b_i}^{b_{i+1}} r \frac{P(r, 1) + P(r, -1)}{2} dr}{\int_{b_i}^{b_{i+1}} \frac{P(r, 1) + P(r, -1)}{2} dr} = \frac{\int_{b_i}^{b_{i+1}} r \{P(r, 1) + P(r, -1)\} dr}{Q(a_i, 1) + Q(a_i, -1)} \quad (2.22)$$

以上より、UW長 M ビット、 Q 値量子化された軟判定データを用いる場合、量子化された受信ベクトル \vec{Y} は、 M 次元空間内の Q^M 個の代表点として表現されることになる。一例として、図2.1に、UW長3ビット ($M=3$)、8値量子化 ($Q=8$) の場合の受信UWに対する代表点の分布の様子を示す。



\vec{P} : UW vector $\vec{\bar{P}}$: \overline{UW} vector
 d : Allowable Euclidian distance

図 2.1 3次元空間における8値量子化された軟判定データの受信ベクトルの分布

UWベクトルを $\vec{P} = \{x_0 \sim x_{M-1} \mid x_i \in \{1, -1\}\}$ 、受信ベクトルを $\vec{Y} = \{y_0 \sim y_{M-1} \mid y_i \in \{a_i \mid i=0 \sim Q-1\}\}$ とすると、受信ベクトル \vec{Y} の生起確率 $P_r(\vec{Y})$ は次式で与えられる。

$$P_r(\vec{Y}) = \prod_{i=0}^{M-1} Q(y_i, x_i) \quad (2.23)$$

なお、各種UW検出特性の確率値は、前項(1)において、(2.9)式から(2.12)式で示した条件を満足する代表点の生起確率の総和として、理論的に算出することができる。

(4) 許容ユークリッド距離比と許容誤りビット数

前項では、軟判定データを用いたUW検出を述べる際、許容ユークリッド距離 d を導入したが、本項では、直感的に理解しやすい許容ユークリッド距離比 α を定義し、従来の硬判定データを用いたUW検出における一般的なパラメータである許容誤りビット数 ϵ との関係性を明らかにする。

不一致ビット数が f の異なる2種類の符号語間の多次元空間内のユークリッド距離は $2\sqrt{fE_b}$ で与えられる。従って、UW長が M ビットの場合、次式で与えられるユークリッド距離 d_0 は、UWベクトル \vec{P} と \overline{UW} ベクトル $\vec{\bar{P}}$ との間のユークリッド距離の $1/2$ に等しくなる。

$$d_0 = \sqrt{ME_b} \quad (2.24)$$

そこで、許容ユークリッド距離 d を

$$d = \sqrt{\alpha} d_0 = \sqrt{\alpha M E_b} \quad (2.25)$$

とおき、 $\alpha = 1$ のとき、許容ユークリッド距離 d が UW ベクトル \vec{p} と \overline{UW} ベクトル $\vec{\bar{p}}$ との間のユークリッド距離の $1/2$ になるように、許容ユークリッド距離比 α を定義する。

次に、軟判定データを用いた UW 検出における許容ユークリッド距離比 α と硬判定データを用いた UW 検出における許容誤りビット数 ϵ との対応関係について考える。 UW パターンと ϵ ビットだけ異なる符号語に対応する送信ベクトル \vec{A} と UW ベクトル \vec{p} との間のユークリッド距離 r_ϵ は、次式で与えられる。

$$r_\epsilon = 2\sqrt{\epsilon E_b} \quad (2.26)$$

従って、上式と(2.25)式から、次式のような対応づけが得られる。

$$\alpha = \frac{4\epsilon}{M} \quad (2.27)$$

以上より、硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ は整数値しか取り得ないことから、 UW 長 M が 4 の倍数のときにのみ、軟判定データにおける $\alpha = 1$ と等価な状態が生じ、その他の M の値に対しては、その種の状態が生じないことがわかる。

2.2 実験的検討⁽⁶⁾

前節で述べた理論解析の正当性を検証すべく、実験を実施した。本節では、実験系の構成を紹介した後、ハードウェアを用いた各種UW検出特性の取得方法について述べる。

2.2.1 実験系の構成

UWの送信、受信及び雑音発生 of 3機能を、テキサス・インスツルメント(TI)社のDSP(TMS320C25)上に構築した。特に、UWの受信部において、UW検出のアルゴリズムをハードウェア的に実現して、各種UW検出特性を取得した。なお、TMS320C25は、64kワードのプログラムメモリ空間とデータメモリ空間を有し、命令実行時間100 ns、演算精度16ビットの固定小数点演算型DSPである。

図2.2は、本実験系における機能のブロック構成を示したものであり、各種UW検出特性は、DSP上のデータメモリに格納されたデータ値を読み出し、別途計算機で処理することによって導出した。なお、変復調方式として絶対符号化同期検波PSKを想定しているが、UW検出は、通常ベースバンドのデジタル信号に対して実行されることから、雑音の発生も含めて、すべてベースバンド信号に対する処理によって、実験系を構成した。

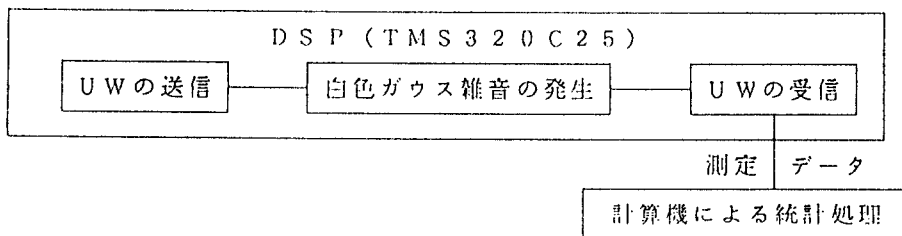


図2.2 実験系の機能ブロック図

2.2.2 DSPを用いた白色ガウス雑音の発生

本節では、Box & Muller法に基づき、DSP上で白色ガウス雑音を発生させる方法を述べた後、実際に発生させた白色ガウス雑音に対して評価を加える。

(1) 白色ガウス雑音の発生

Box & Muller法は、0から1までの間で一様に分布する乱数 X_t を次式に代入することによって、分散1、平均0の正規分布に従う乱数 Z_t を得る方法である。

$$Z_{2t} = \sqrt{-2\log_e X_{2t}} \times \sin(2\pi X_{2t+1}) \quad (2.28)$$

$$Z_{2t+1} = \sqrt{-2\log_e X_{2t}} \times \cos(2\pi X_{2t+1})$$

ここで、 t は整数値であり、時刻を表す。

さて、白色ガウス雑音は、次式で示される確率密度関数 $p(x)$ に従う正規乱数で与えられる。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left(-\frac{x^2}{2N}\right) \quad (2.29)$$

但し、 N は雑音電力であり、ベースバンド信号1ビット当りのエネルギー E_b 、片側雑音電力密度 N_0 及びベースバンド信号の振幅 A を用いて、次式で表される。

$$N = \frac{A^2}{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)} \quad (2.30)$$

従って、目的の白色ガウス雑音は、Box & Muller法に基づき(2.28)式で与えられる分散1、平均0の正規乱数に標準偏差 \sqrt{N} を乗ずることによって得ることができる。

(2) DSPで発生させた白色ガウス雑音の特性

図2.3から図2.5は、前節で述べた方法を用いて、 $A=1$ 、 $E_b/N_0=0$ dB、3 dB、6 dBの条件下で、実際にDSP上で発生させた白色ガウス雑音の振幅分布を示したものである。これらの図において、サンプル数は65,536個であり、雑音分布は振幅を0.05間隔で区切った各範囲内のデータ数の累積により表現している。また、図中実線を用いて示した理論値は、次式を用いて算出した。

$$65536p(x) = \frac{65536}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left(-\frac{x^2}{2N}\right) \quad (2.31)$$

これらの図から明かなように、発生させた白色ガウス雑音は、理論曲線に沿って分布している。従って、UW検出特性の評価に使用する雑音として、十分に耐え得るものと判断できる。

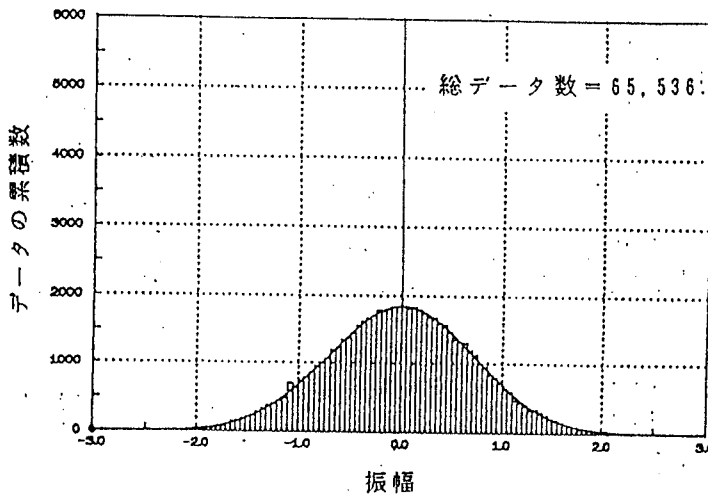


図2.3 $E_b/N_0=0$ dBの条件下における白色ガウス雑音の振幅分布

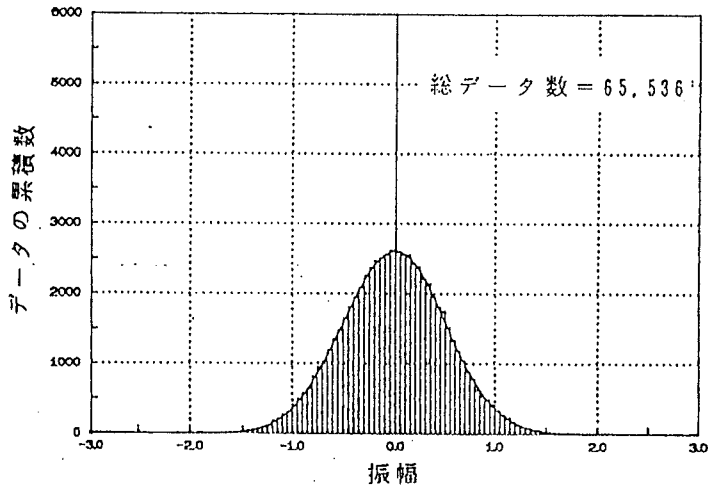


図 2.4 $E_b/N_0 = 3 \text{ dB}$ の条件下における白色ガウス雑音の振幅分布

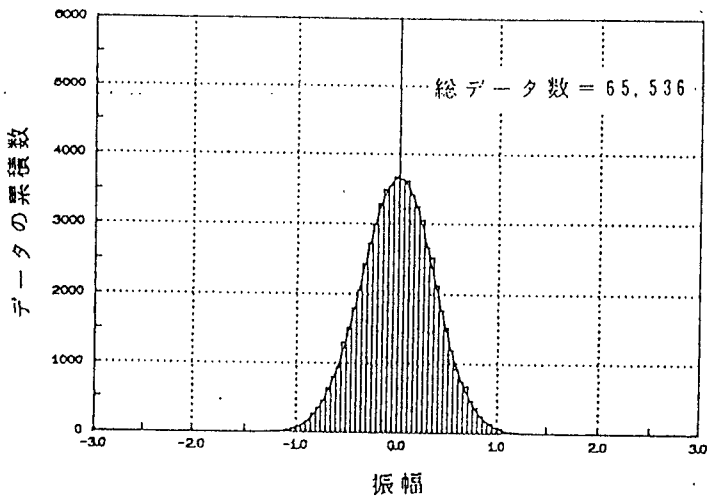


図 2.5 $E_b/N_0 = 6 \text{ dB}$ の条件下における白色ガウス雑音の振幅分布

2.2.3 各種UW検出特性の取得方法

(1) 硬判定データを用いたUW検出

2.1.1節で述べたように、UWパターン中に含まれる各ビットに白色ガウス雑音が付加された受信信号振幅の正負を検出して、正の場合"1"、負の場合"0"と各ビットを硬判定する。

① UW不検出確率と位相誤検出確率の取得方法

全測定回数、即ちUWを繰り返し送信し、受信した総回数をD、UWパターンとkビット異なるパターンが受信された回数を D_k 、UW長をMビットとすると、許容誤りビット数 ϵ に対するUW不検出確率 $P_m(\epsilon)$ は、次式で与えられる。

$$P_m(\epsilon) = \frac{\sum_{k=\epsilon+1}^{M-\epsilon-1} D_k}{D} \quad (2.32)$$

また、UW位相誤検出確率 $P_p(\epsilon)$ は、次式で与えられる。

$$P_p(\epsilon) = \frac{\sum_{k=M-\epsilon}^M D_k}{D} \quad (2.33)$$

以上、UW不検出確率と位相誤検出確率は、各々(2.32)式と(2.33)式に基づき、取得データを処理することによって算出される。

② ランダムビット中のUW誤検出確率の取得方法

UW誤検出確率を得るために、乱数により発生させたランダムビット系列を送信信号と見なし、その各ビットに白色ガウス雑音を付加した信号を受信信号と想定する。具体的には、まず、白色ガウス雑音が付加された受信信号の各ビットを、0または1の2値に硬判定する。そして、その硬判定されたビット系列とUWパターンとの比較の後、異なるビット数kをパラメータとした分類を行う。受信データの総数をD、UW長をM、許容誤りビット数を ϵ 、kビット異なるパターンが受信された回数を D_k とすると、許容誤りビット数 ϵ に対するUW誤検出確率 $P_f(\epsilon)$ は、次式で与えられる。

$$P_f(\epsilon) = \frac{\sum_{k=0}^{\epsilon} D_k + \sum_{k=M-\epsilon}^M D_k}{D} \quad \left[0 \leq \epsilon \leq \frac{M}{2} \right] \quad (2.34)$$

(2) 軟判定データを用いたUW検出

2.1.2節で述べたように、UW検出は、UW長[Mビット]と等しい次元を有する多次元(M次元)空間内の受信ベクトル $\vec{y}(y_0 \sim y_{M-1})$ と同空間内のUWベクトル $\vec{p}(x_0 \sim x_{M-1})$ 及び \overline{UW} ベクトル $\vec{\bar{p}}(-x_0 \sim -x_{M-1})$ との間のユークリッド距離を尺度として実行される。

ここで、UW検出に適用する軟判定データの形態として、量子化なし、4値量子化、8値量子化の3種類を検討対象とするが、量子化なしの軟判定データを用いる場合には、各ビット毎の受信振幅 y_i を直接使用して、受信ベクトル \vec{y} を求め、UWベクトル \vec{p} 及び \overline{UW} ベクトル $\vec{\bar{p}}$ との間のユークリッド距離を算出する。一方、量子化された軟判定データを用いる場合には、受信信号振幅 y_i が、最適しきい値間隔Tによって区切られた、量

子化数 Q に対応する Q 個の区間のいずれに属するかを判定した後、区間毎の代表値 a_i ($i=0\sim Q-1$)に置換する。なお、表2.1と表2.2は、各々4値及び8値量子化された軟判定データに対して使用した E_b/N_0 毎の最適しきい値間隔 T と、各区間の代表値 a_i を示したものである。

表2.1 4値量子化における各 E_b/N_0 に対する最適しきい値間隔 T と各区間の代表値 a_i

E_b/N_0 [dB]	最適しきい 値間隔 T	i	代表値 a_i	E_b/N_0 [dB]	最適しきい 値間隔 T	i	代表値 a_i
0	0.72	0	-1.393789	6	0.41	0	-1.037125
		1	-0.379100			1	-0.273180
		2	0.379100			2	0.273180
		3	1.393789			3	1.037125
1	0.64	0	-1.295288	7	0.38	0	-1.018816
		1	-0.346280			1	-0.266067
		2	0.346280			2	0.266067
		3	1.295288			3	1.018816
2	0.58	0	-1.217768	8	0.36	0	-1.008571
		1	-0.324172			1	-0.265461
		2	0.324172			2	0.265461
		3	1.217768			3	1.008571
3	0.52	0	-1.151015	9	0.34	0	-1.003159
		1	-0.301099			1	-0.262748
		2	0.301099			2	0.262748
		3	1.151015			3	1.003159
4	0.48	0	-1.102510	10	0.33	0	-1.001003
		1	-0.290355			1	-0.266900
		2	0.290355			2	0.266900
		3	1.102510			3	1.001003
5	0.44	0	-1.063845				
		1	-0.278636				
		2	0.278636				
		3	1.063845				

表2.2 8値量子化における各 E_b/N_0 に対する最適しきい値間隔 T と各区間の代表値 a_i

E_b/N_0 [dB]	最適しきい 値間隔 T	i	代表値 a_i	E_b/N_0 [dB]	最適しきい 値間隔 T	i	代表値 a_i
0	0.41	0	-1.717665	6	0.22	0	-1.107339
		1	-1.023343			1	-0.564112
		2	-0.621114			2	-0.350417
		3	-0.209875			3	-0.127826
		4	0.209875			4	0.127826
		5	0.621114			5	0.350417
		6	1.023343			6	0.564112
		7	1.717665			7	1.107339
1	0.37	0	-1.574608	7	0.21	0	-1.072158
		1	-0.926552			1	-0.541966
		2	-0.564172			2	-0.668915
		3	-0.191826			3	-0.127920
		4	0.191826			4	0.127920
		5	0.564172			5	0.668915
		6	0.926552			6	0.541966
		7	1.574608			7	1.072158
2	0.33	0	-1.441683	8	0.20	0	-1.044368
		1	-0.829642			1	-0.520167
		2	-0.506801			2	-0.657540
		3	-0.173629			3	-0.128366
		4	0.173629			4	0.128366
		5	0.506801			5	0.657540
		6	0.829642			6	0.520167
		7	1.441683			7	1.044368
3	0.29	0	-1.320450	9	0.18	0	-1.019283
		1	-0.732405			1	-0.472313
		2	-0.448752			2	-0.298792
		3	-0.155034			3	-0.120255
		4	0.155034			4	0.120255
		5	0.448752			5	0.298792
		6	0.732405			6	0.472313
		7	1.320450			7	1.019283
4	0.26	0	-1.228731	10	0.17	0	-1.008201
		1	-0.659669			1	-0.450631
		2	-0.405730			2	-0.287028
		3	-0.141925			3	-0.119755
		4	0.140925			4	0.119755
		5	0.405730			5	0.287028
		6	0.659669			6	0.450631
		7	1.228731			7	1.008201
5	0.24	0	-1.163035				
		1	-0.611890				
		2	-0.378228				
		3	-0.134892				
		4	0.134892				
		5	0.378228				
		6	0.611890				
		7	1.163035				

① UW不検出確率と位相誤検出確率の取得方法

2.1.2節で述べたように、受信ベクトル $\vec{Y}(y_0 \sim y_{M-1})$ とUWベクトル $\vec{P}(x_0 \sim x_{M-1})$ 及び \overline{UW} ベクトル $\vec{P}(-x_0 \sim -x_{M-1})$ との間のユークリッド距離（各々 R_0 と R_1 ）を許容ユークリッド距離 d と比較して、UW正検出ならびに位相誤検出の判定を行う。

具体的測定では、DSPにおける信号処理の容易性を考慮して、上記ユークリッド距離 R_0 と R_1 を計算することではなく、それらの2乗値（ R_0^2 と R_1^2 ）と許容ユークリッド距離 d の2乗値 d^2 との比較による判定を行った。また、UW不検出確率は、正検出確率と位相誤検出確率の和を1から減ずることにより導出した。

測定データに対する処理方法は、以下の通りである。

- (i) 受信ベクトル \vec{Y} とUWベクトル \vec{P} 及び \overline{UW} ベクトル \vec{P} との間のユークリッド距離 R_0 と R_1 の2乗値である R_0^2 と R_1^2 の大小関係により、正検出と位相誤検出のいずれになるかを判定する。
- (ii) 上記(i)の判定結果、即ち $R_0^2 < R_1^2$ と $R_0^2 > R_1^2$ に各々対応する2種類の配列（正検出用と位相誤検出用）を用意する。 $R_0^2 < R_1^2$ の場合、正検出用配列中の R_0^2 をアドレスとする格納場所に、その判定が生じた測定回数を累積する。一方、 $R_0^2 > R_1^2$ の場合、位相誤検出用配列の R_1^2 をアドレスとする格納場所に、その判定が生じた測定回数を累積する。なお、 $R_0^2 = R_1^2$ の場合、不検出と判定されるので、どちらの配列にも測定回数を累積しない。
- (iii) 許容ユークリッド距離 d を設定して、 d^2 のアドレス未満の測定回数を累積することによって、正検出あるいは位相誤検出と判定される合計の測定回数を算出し、それらを全測定回数で除することによって、正検出確率と位相誤検出確率を導出する。
なお、図2.6は、上述したデータ処理の概念を示したものである。

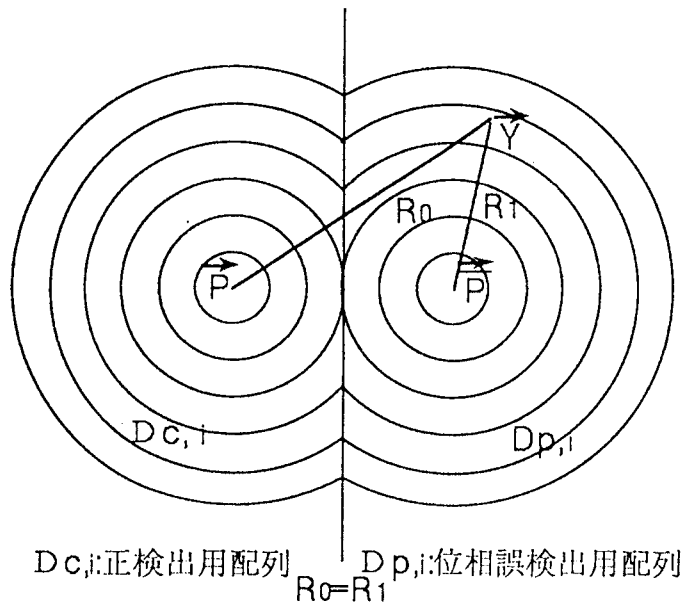


図2.6 UW正検出確率、位相誤検出確率を算出するためのデータ処理の概念

全測定回数を D 、正検出用配列と位相誤検出用配列のアドレス i に格納された測定回数を各々 $D_{c,i}$ 、 $D_{p,i}$ とすると、許容ユークリッド距離 d に対する UW 正検出確率 $P_c(d)$ 、位相誤検出確率 $P_p(d)$ 及び不検出確率 $P_m(d)$ は、各々次式で与えられる。

$$P_c(d) = \frac{\sum_{i=0}^{< d^2} D_{c,i}}{D}$$

$$P_p(d) = \frac{\sum_{i=0}^{< d^2} D_{p,i}}{D} \quad (2.35)$$

$$P_m(d) = 1 - \{P_c(d) + P_p(d)\}$$

以上の手順を採用することによって、許容ユークリッド距離 d 毎に測定を別途繰り返す必要はなく、UW 不検出確率、位相誤検出確率及び正検出確率と許容ユークリッド距離との関係を一括して取得することができる。

② ランダムビット中の UW 誤検出確率の取得方法

白色ガウス雑音が付加されたランダムビット系列からなる受信信号の各ビットに軟判定を施した結果得られる受信ベクトル \vec{Y} を計算する。この受信ベクトル \vec{Y} と UW ベクトル \vec{P} 及び \overline{UW} ベクトル $\vec{\bar{P}}$ との間のユークリッド距離（各々 r_0 と r_1 ）を許容ユークリッド距離 d と比較して、UW 誤検出の判定を行う。

$r_0 = r_1$ を除き、 r_0^2 と r_1^2 のいずれかが d^2 未満である場合、UW 誤検出と判定される。従って、1 個の配列を用意し、 $r_0^2 = r_1^2$ の場合を除いて、 r_0^2 または r_1^2 をアドレスとする格納場所に測定回数を累積した後、許容ユークリッド距離 d を設定して、アドレスが d^2 未満の格納場所の測定回数の総和をとることによって、誤検出と判定される総測定回数を算出することができる。受信データの総数を D 、配列のアドレス i に格納された測定回数を D_{fi} とすると、許容ユークリッド距離 d に対するランダムビット中の UW 誤検出確率 $P_f(d)$ は次式で表される。

$$P_f(d) = \frac{\sum_{i=0}^{< d^2} D_{fi}}{D} \quad (2.36)$$

2.3 ユニークワード検出特性の定量的評価

本節では、硬判定データ、量子化なしの軟判定データ、4値及び8値量子化された軟判定データを用いた場合の各種UW検出特性に関して、理論ならびに実験により求めた結果を示し、定量的な評価を加える。なお、UW長Mとしては、8ビットを検討対象とした。

2.3.1 理論計算による評価⁽⁵⁾

(1) UW不検出確率

図2.7は、 E_s/N_0 を0 dB、4 dB及び8 dBに固定し、許容ユークリッド距離比 α に対するUW不検出確率 $P_m(\alpha)$ の変化を、硬判定、量子化なしの軟判定データ及び8値量子化された軟判定データに対して示したものである。なお、硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ は、2.1.2節の(4)項で述べた対応づけにより、 α の値に換算している。また、 ϵ は離散的な値しかとらないので、その間の値は意味をもたない。その他、量子化なしの軟判定データを用いるUW検出に関する理論解析は、 $\alpha < 1$ の範囲に限定されるため、それ以上の α の値に対する特性曲線は表示していない。

軟判定データに量子化を施すことによって、不検出確率の変化は滑らかな特性曲線を示さなくなる。この現象は、 α を増大しても、多次元(M次元)空間内に離散的に存在する代表点によって表現される受信ベクトル \vec{Y} とUWベクトル \vec{P} (または \overline{UW} ベクトル \vec{P})との間の距離が許容ユークリッド距離d以上である限り、不検出確率が減少しないことに起因している。逆に、 α の増大により、上記ユークリッド距離がd以下になると、不検出確率は急激に減少する。

また、一定値以上の α に対して、不検出確率は低下せずに収束する。この状態の発生は、UWベクトル \vec{P} 及び \overline{UW} ベクトル \vec{P} から許容ユークリッド距離d以内の範囲内に、ほとんどすべての受信ベクトル \vec{Y} が存在することに起因している。不検出確率が収束する下限値は、ベクトル \vec{P} 及び \vec{P} までのユークリッド距離が等しい受信ベクトル \vec{Y} の生起確率の和に等しい。 E_s/N_0 が低い程、その生起確率の和が大きくなるために、不検出確率の下限値も高い値となる。

次に、硬判定データにおける不検出確率と同等の値を達成するという条件下で、軟判定データにおいて設定すべき α の値について検討する。図2.7の縦軸中の一定値を横にたどることによって、不検出確率の高い範囲では、8値量子化、量子化なしの順番に α の値が大きくなるのがわかる。一方、不検出確率が低い範囲では、その順番が逆転することがわかる。以上をまとめると、硬判定データを用いた場合と同等の不検出確率を得るためには、 E_s/N_0 が低く、 ϵ が小さい範囲では、量子化が細かい程、また、 E_s/N_0 が高く、 ϵ が大きい範囲では、量子化が粗い程、許容ユークリッド距離比 α を大きく設定する必要があると結論づけることができる。

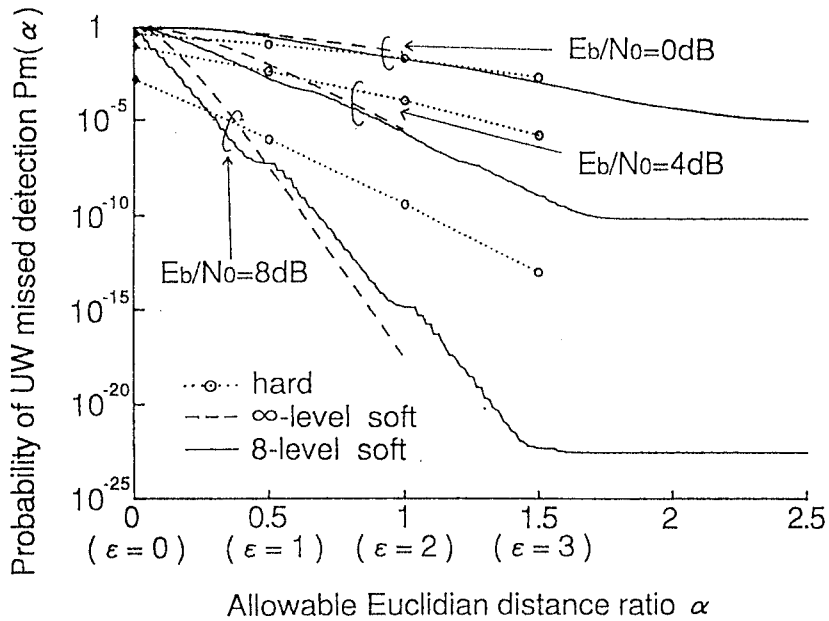


図 2.7 許容ユークリッド距離比に対する UW 不検出確率の変化

(2) ランダムビット中の UW 誤検出確率

情報ビット、即ちランダムビット中で UW を検索する状態における誤検出確率を考える。図 2.8 は、許容ユークリッド距離比 α に対する UW 誤検出確率 $P_f(\alpha)$ の変化を示したものである。同図に示すように、誤検出確率は、量子化の影響によって、階段状の特性を示す。 E_b/N_0 が 8 dB のように高く、受信ベクトル \vec{Y} が $2^M = 2^8$ 通りの符号語の近傍に集中して発生する場合、 $\alpha = 0.5, 1, 1.5$ の近傍で、誤検出確率が急激に増加し、階段形状が明確に現れる部分が生じる。これらの α の値は、硬判定データにおける許容誤りビット数 $\epsilon = 1, 2, 3$ の値に対応するもので、このときの誤検出確率は、硬判定データにおける特性値に近い値になる。なお、硬判定データを用いる場合、ランダムビット中の各ビットが "1" または "0" と判定される確率は、 E_b/N_0 の値にかかわらず、0.5 となるので、誤検出確率は、許容誤りビット数 ϵ にのみ依存し、各 ϵ に対して特定値を有する。

次に、図 2.9 から図 2.11 は、 E_b/N_0 を 0 dB、4 dB 及び 8 dB に固定した場合の、硬判定データ及び各種軟判定データにおける、UW 不検出確率と UW 誤検出確率の関係を示したものである。これらの図から、特定の UW 不検出確率（または誤検出確率）を設定したときに、達成可能な UW 誤検出確率（または不検出確率）を読み取ることができる。即ち、不検出及び誤検出の観点から、UW 検出特性の優劣を示したものである。具体的には、左下方に特性曲線が存在する程、良好な UW 検出特性となる。まず、硬判定データを用いた場合と軟判定データを用いた場合の特性を比較する。丸のプロットで表されている硬判定データの特性は、許容誤りビット数 $\epsilon = 0$ 以外では、軟判定データを用いた特性より劣化していることがわかる。次に、軟判定データを用いた場合の量子化数による特性を比較すると、 E_b/N_0 が高くなるにつれて、量子化数が大きい方が一概に良好

な特性を有することがわかる。 E_b/N_0 の値にかかわらず、一定の不検出確率を基準にとった場合、高い不検出確率の設定に対しては、粗く量子化された軟判定データ、低い不検出確率の設定に対しては、細かく量子化された軟判定データを用いたUW検出特性が良好になると結論づけることができる。

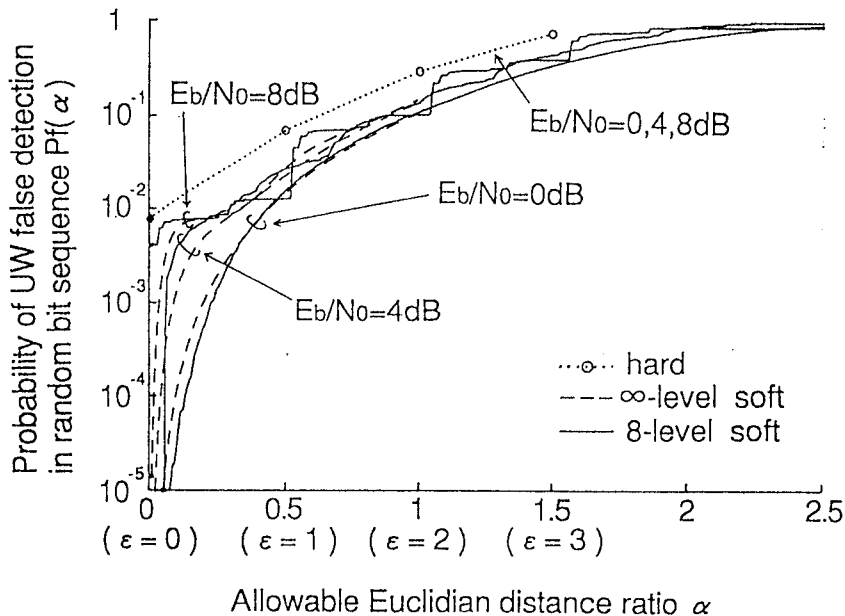


図 2.8 許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中のUW誤検出確率の変化

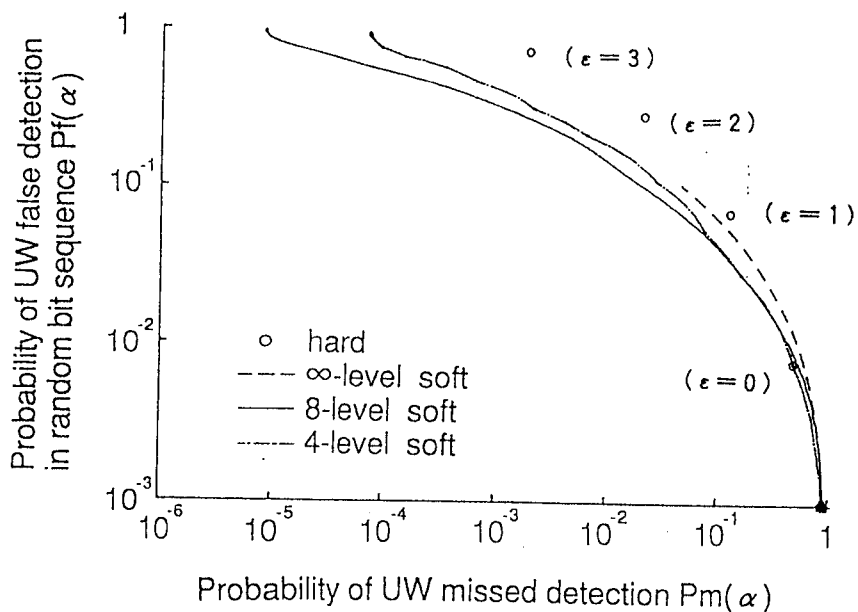


図 2.9 $E_b/N_0 = 0$ dB の状態下における UW 不検出確率とランダムビット中の UW 誤検出確率の関係

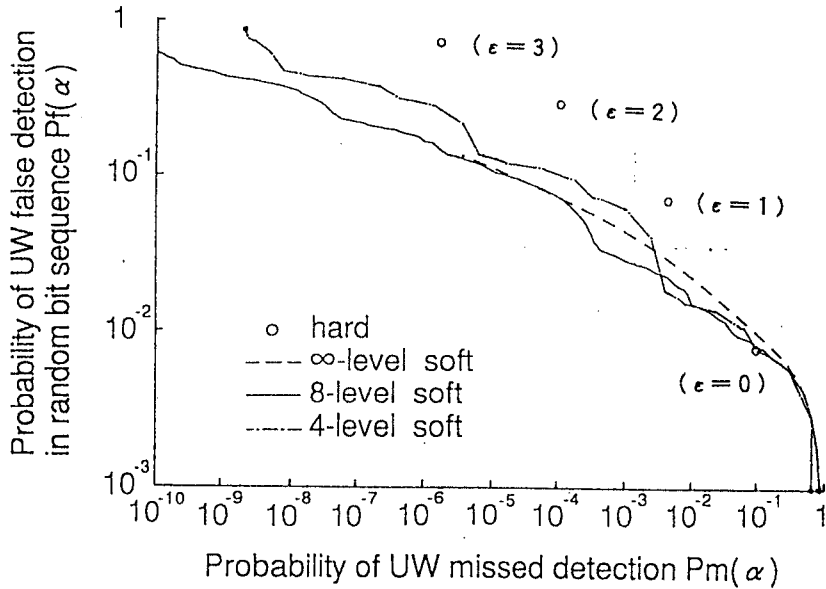


図2.10 $E_s/N_0 = 4$ dBの状態下におけるUW不検出確率とランダムビット中のUW誤検出確率の関係

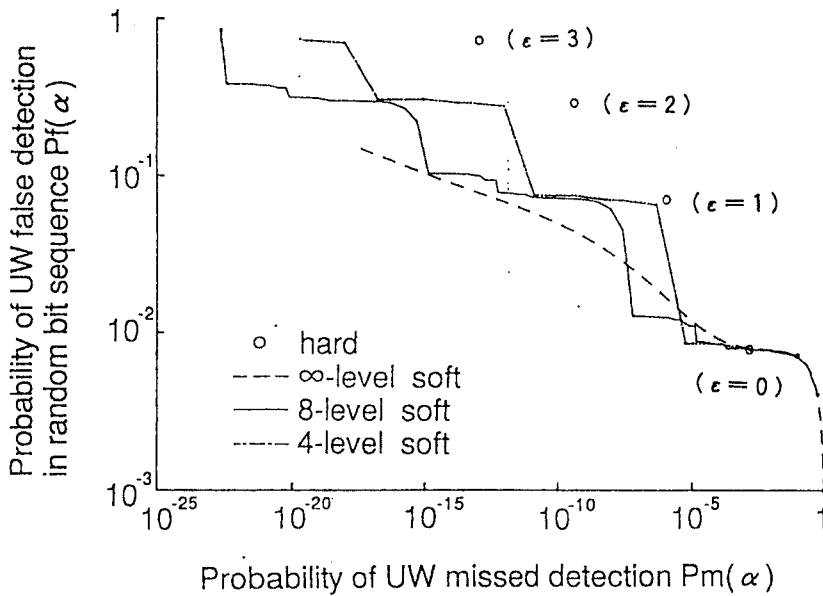


図2.11 $E_s/N_0 = 8$ dBの状態下におけるUW不検出確率とランダムビット中のUW誤検出確率の関係

(3) UW位相誤検出確率

図2.12は、許容ユークリッド距離比 α に対する UW 位相誤検出確率 $P_p(\alpha)$ の変化を示したものである。位相誤検出確率の値は、図の縦軸の範囲から、非常に小さい値であることがわかる。 E_b/N_0 の値にかかわらず、一般的に、位相誤検出確率は、量子化なしの軟判定データを用いる場合が最も低く、次に 8 値量子化、硬判定データという順番になる。

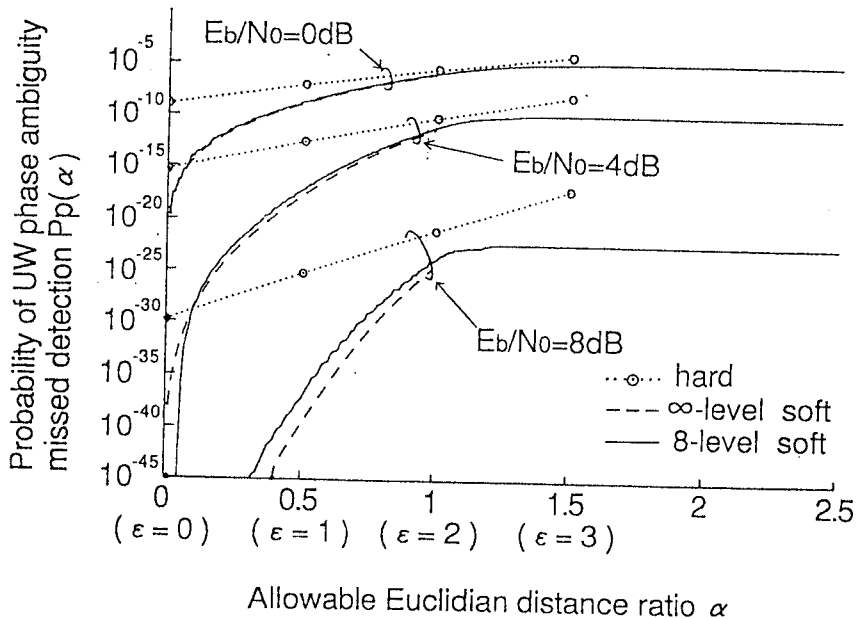


図2.12 許容ユークリッド距離比に対する UW 位相誤検出確率の変化

2.3.2 実験による評価⁽⁶⁾

実験で取得された測定データを統計処理することによって、許容誤りビット数 ϵ 及び許容ユークリッド距離比 α に対する、UW 不検出確率、ランダムビット中の誤検出確率及び位相誤検出確率をそれぞれ求めた。但し、実験において実施した送信 UW 数は、 9.83×10^8 であるため、以下に示す各種検出特性では、 10^{-7} 以上の確率値のみを表示することとする。

(1) UW 不検出確率

図2.13から図2.16は、UW 長 8 ビットに対して、 E_b/N_0 を 0 dB 及び 4 dB に固定し、硬判定データ及び量子化なし、4 値量子化、8 値量子化された軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比 α に対する UW 不検出確率 $P_m(\alpha)$ の変化を示したものである。

硬判定データを用いた場合の特性を示す図2.13より、実験値と理論値は、完全に一致していることがわかる。本結果より、発生させた白色ガウス雑音は、UW 検出特性の評価に十分適用可能であるものと判断される。なお、硬判定データを用いた場合の UW 検出特性は、本研究の主目的ではないため、以降では割愛することとする。

軟判定データを用いた特性に関しても、図2.14から図2.16より、実験値と理論値がよく一致していることがわかる。

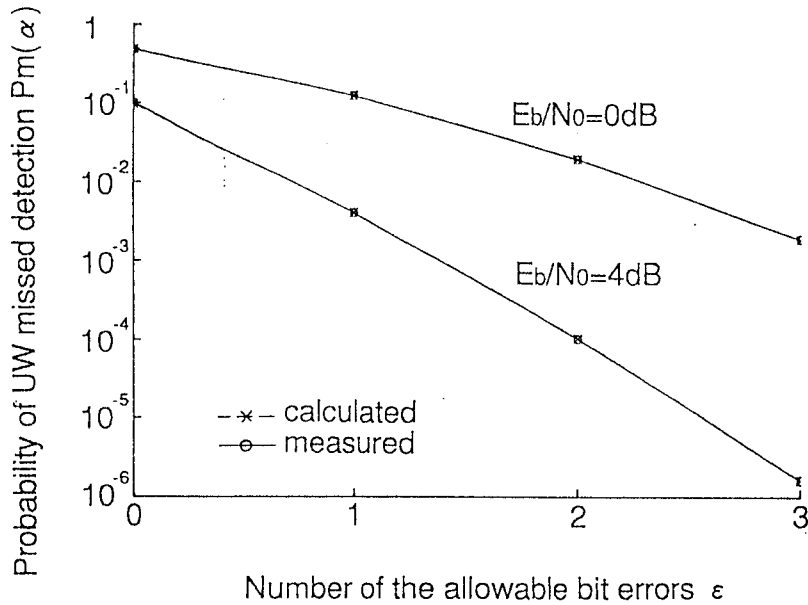


図2.13 硬判定データを用いた場合の許容誤りビット数に対するUW不検出確率の変化

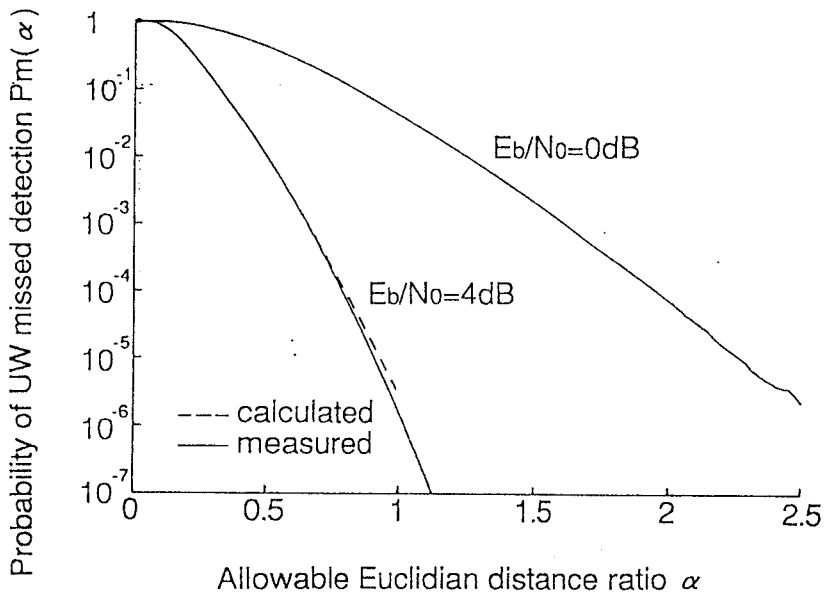


図2.14 量子化なしの軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比に対するUW不検出確率の変化

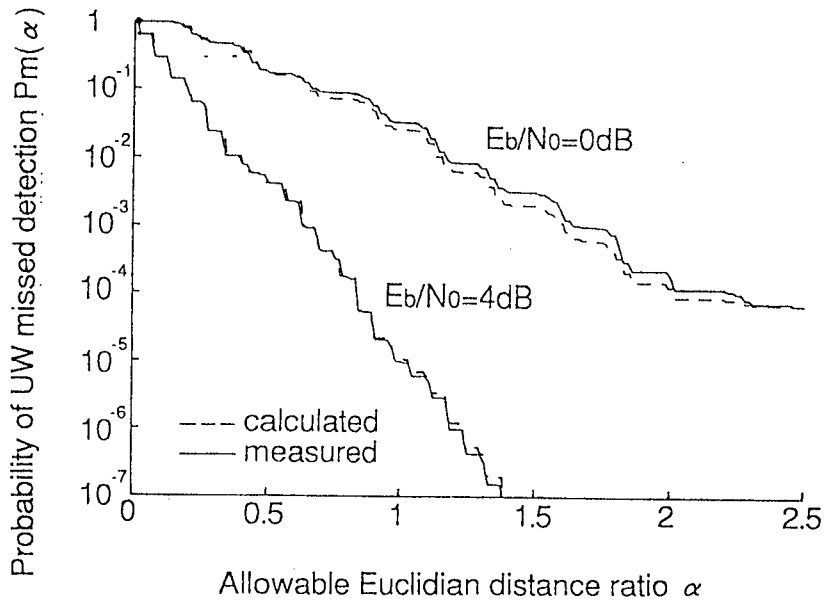


図2.15 4値量子化された軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比に対するUW不検出確率の変化

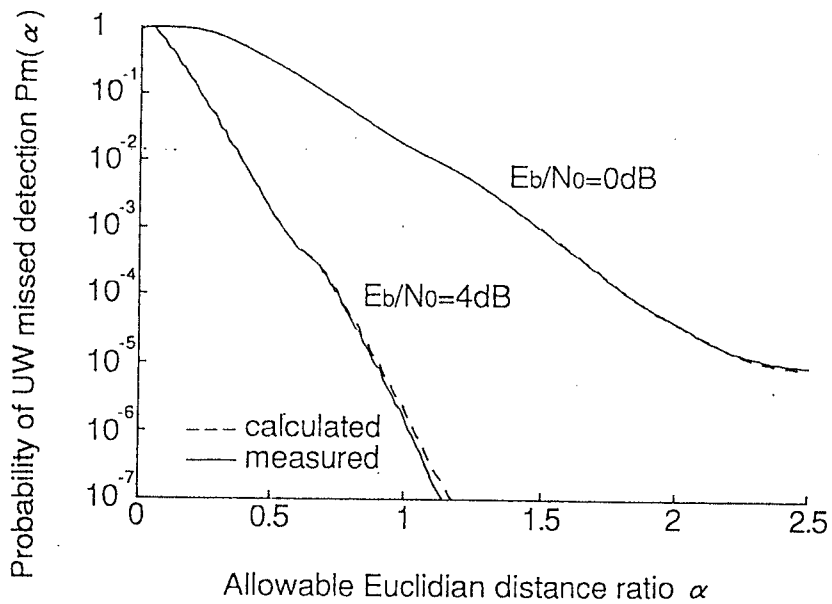


図2.16 8値量子化された軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比に対するUW不検出確率の変化

(2) ランダムビット中のUW誤検出確率

図2.17から図2.19は、ランダムビット中のUW誤検出確率 $P_f(\alpha)$ の変化を示したものである。いずれの軟判定データを用いた場合でも、実験値と理論値との間に良好な一致が得られている。

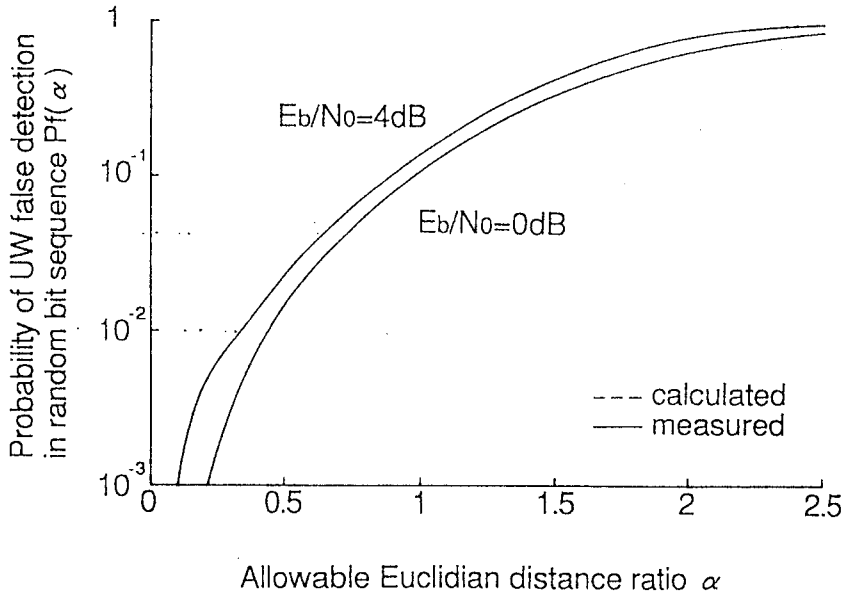


図2.17 量子化なしの軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中のUW誤検出確率の変化

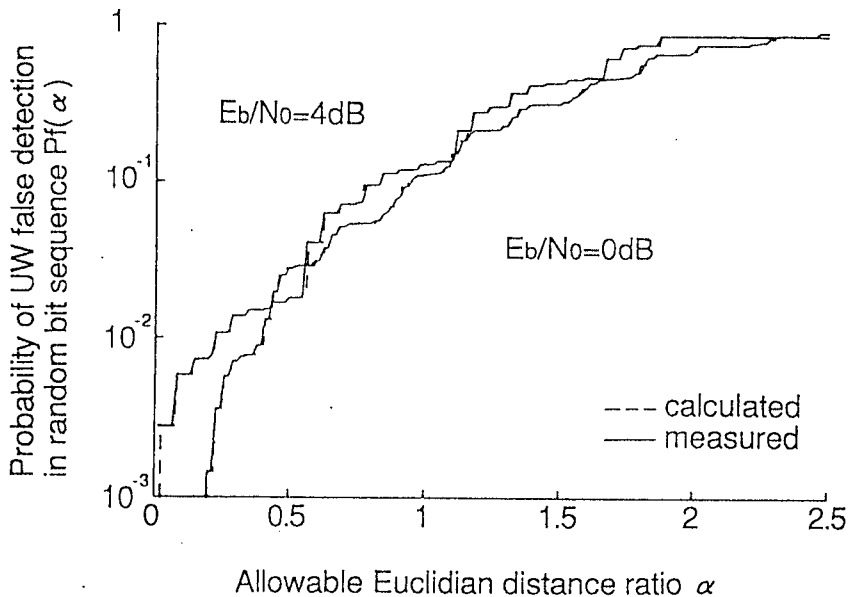


図2.18 4値量子化された軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中のUW誤検出確率の変化

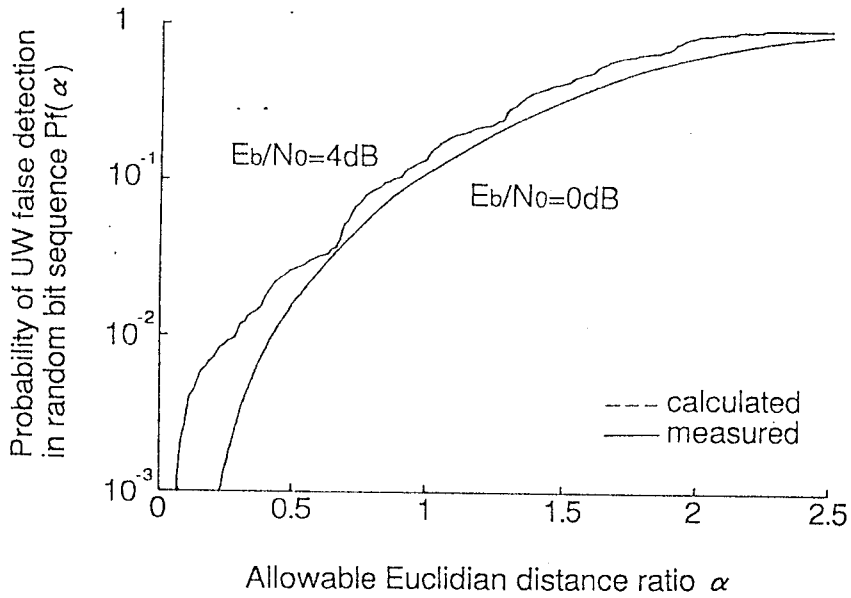


図2.19 8値量子化された軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中のUW誤検出確率の変化

(3) UW位相誤検出確率

図2.20は、 E_b/N_0 を0 dBに固定した場合の各種軟判定データに対するUW位相誤検出確率 $P_p(\alpha)$ の変化を示したものである。理論値と実験値との比較から、確率値が 10^{-7} の近傍において、若干の違いが見られるが、良好な一致が得られていることがわかる。

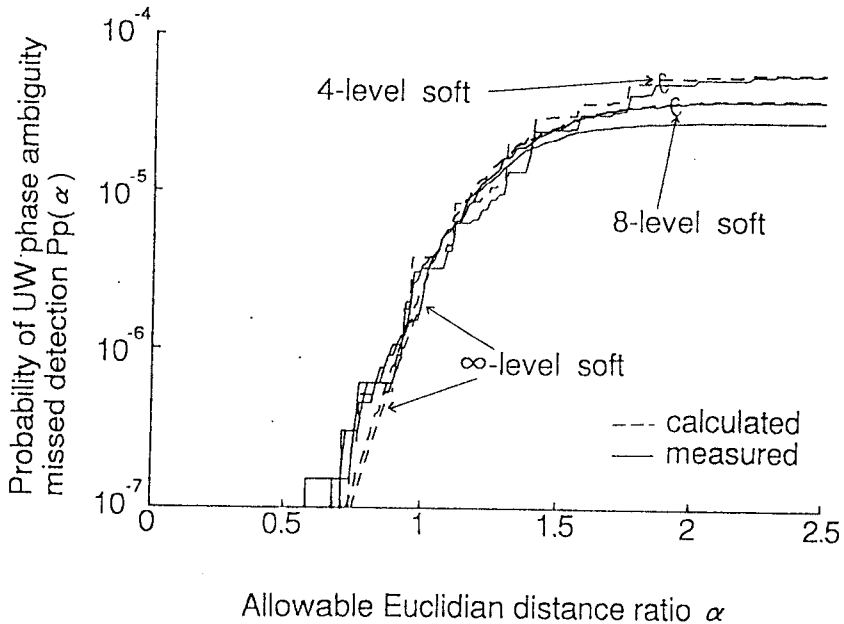


図2.20 許容ユークリッド距離比に対するUW位相誤検出確率の変化

第3章 フレーム同期特性

本章では、フレーム同期の概念及び各種フレーム同期特性を算出する手法を紹介した後、ユニークワード検出に軟判定データを使用した場合のフレーム同期特性を、従来の硬判定データを用いた場合の特性と定量的に比較・評価する。

3.1 理論的解析

3.1.1 フレーム同期の概念⁽¹¹⁾

図3.1は、フレーム同期フローを示したものである。同図において、状態 S_0 と S_1 は同期を保持している状態であり、状態 S_2 と S_3 は同期引込みを行っている状態を表している。また、誤った同期引込み及び同期はずれの確率を低く抑えるために、前方保護として N_1 段、後方保護として N_2 段を設ける。

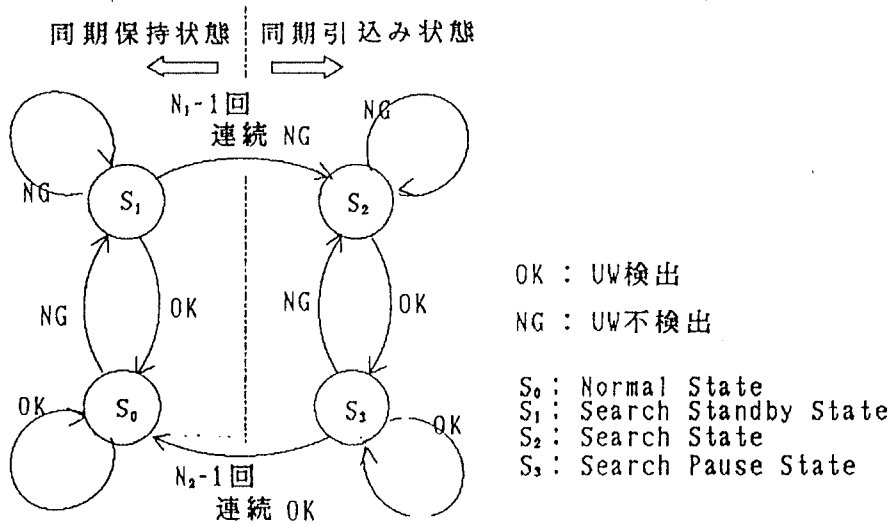


図3.1 フレーム同期の状態遷移図

3.1.2 各種フレーム同期特性の算出方法^{(2),(9),(11)}

(1) ミスフレーム

状態 S_0 は、UWを正確に検出し、同期を引き込んでいる状態であり、この状態から状態 S_1 を経て N_1 回連続してUWを不検出すると、誤って同期をはずすことになる。この状態遷移をミスフレームと呼び、状態遷移は、図3.2に示すシグナルフローグラフによって表される。同図中の節点 a_0 、 $a_{1,i}$ ($i=1 \sim N_1-1$)、 a_2 は、各々状態 S_0 、 S_1 、 S_2 に相当し、 p_0 、 p_1 は各々状態 S_0 、 S_1 におけるUW不検出確率、 L は1フレーム中のシンボル数、 Z は1シンボル分の時間遅延を意味する。

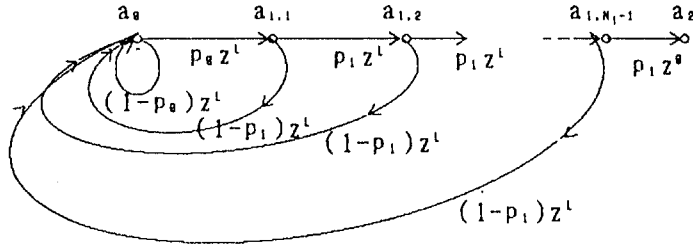


図 3.2 ミスフレームのフロー

図 3.2 より、状態 S_0 から状態 S_2 への伝達関数 $Q_L(Z)$ は、次式で与えられる。

$$Q_L(Z) = \frac{(1 - P_1 Z^L) P_0 P_1^{N_1-1} Z^{L(N_1-1)}}{1 - Z^L \{1 + (P_1 - P_0)(1 - Z^L) - (1 - P_1) P_0 P_1^{N_1-1} Z^{LN_1}\}} \quad (3.1)$$

従って、状態 S_0 から状態 S_2 への状態遷移に要する時間の期待値、即ち、平均ミスフレーム時間間隔 T_m は、以下ようになる。

$$T_m = Q'_L(1) = -L - \frac{L}{1 - P_1} + \frac{L(1 - P_1 + P_0)}{(1 - P_1) P_0 P_1^{N_1-1}} \quad [\text{シンボル}] \quad (3.2)$$

(2) 同期はずれ検出

状態 S_0 において、受信信号系列中の誤った位置で UW をとらえ、誤った同期を引き込んでいる場合、現在の状態が同期はずれであることを検出し、同期を取り直さなければならない。即ち、状態 S_0 から N_1 回連続して UW を誤検出せず、同期をはずして状態 S_2 へ移る。この同期はずれを検出するのに要する平均時間を、平均同期はずれ検出時間と呼ぶ。

UW 位置から i シンボルずれた位置での、状態 S_0 から状態 S_2 への伝達関数 $Q_D(Z, i)$ は、状態 S_0, S_1 における UW 誤検出確率を各々 $q_0(i), q_1(i)$ とすれば、図 3.2 に示したシグナルフローグラフにおいて、 p_0 を $1 - q_0(i)$ 、 p_1 を $1 - q_1(i)$ と置き換えればよいので、次式で与えられる。

$$Q_D(Z, i) = \frac{[1 - \{1 - q_1(i)\}Z^L] \{1 - q_1(i)\}^{N_1-1} \{1 - q_0(i)\}^{L(N_1-1)}}{1 - Z^L \{1 + \{q_0(i) - q_1(i)\}(1 - Z^L) - q_1(i)\{1 - q_0(i)\}\{1 - q_1(i)\}^{N_1-1} Z^{LN_1}\}} \quad (3.3)$$

従って、平均同期はずれ検出時間 T_d は、次式で与えられる。

$$T_d = Q'_D(1, i) = -L - \frac{L}{q_1(i)} + \frac{L\{1 + q_1(i) - q_0(i)\}}{q_1(i)\{1 - q_0(i)\}\{1 - q_1(i)\}^{N_1-1}} \quad [\text{シンボル}] \quad (3.4)$$

(3) 同期引込み

状態 S_2 では、受信信号系列中で、 UW を判定する位置を 1 シンボルずつずらして、正確な UW の位置を検索する。 UW を検出した場合には、検索を一時的に中止し、状態 S_3 へ移り、次のフレーム中の同じ位置において UW の判定を行う。状態 S_2 から N_2 回連続して、フレーム中の同じ位置で UW を検出できれば、検出器が正確な位置で UW をと

らえ、同期引込みに成功したと考える。ミスフレーム後、状態 S_2 から正しい同期を引込み、状態 S_0 へ移るまでに要する時間を平均同期引込み時間と呼び、その状態遷移図を図 3.3 に示す。

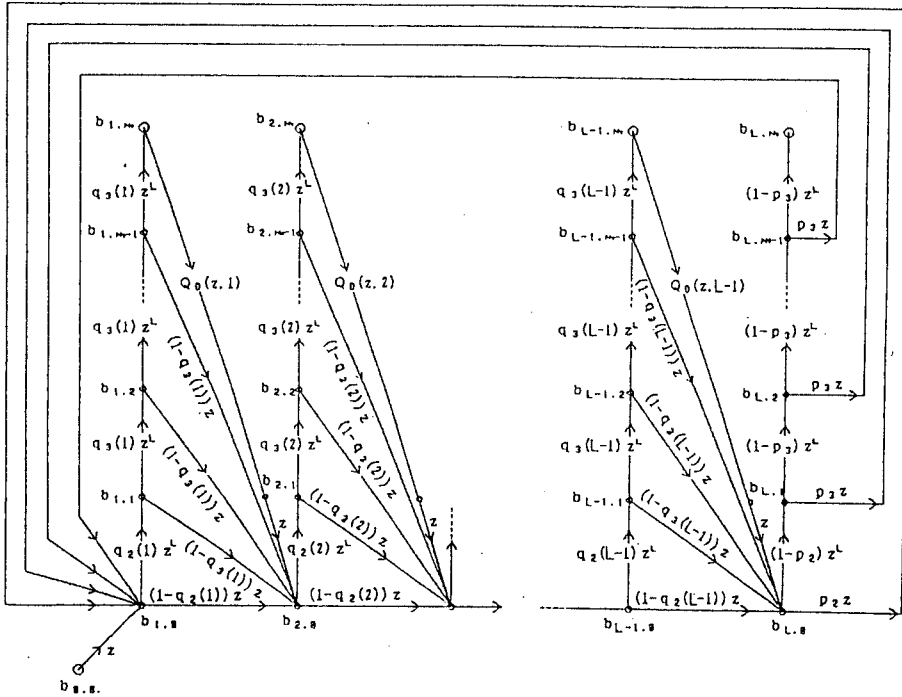


図 3.3 同期引込みのフロー

図 3.3 中の節点 $b_{i,0}$ ($i=0 \sim L$) は状態 S_2 、節点 $b_{i,j}$ ($i=1 \sim L$ 、 $j=1 \sim N_2-1$) は状態 S_3 に相当する。節点 b_{i,N_2} ($i=1 \sim L-1$) はフレーム中の誤った位置で同期を引き込んで状態 S_0 に存在すること、節点 b_{L,N_2} は正しく同期を引き込んで状態 S_0 に落ち着くことを表している。また、 $q_2(i)$ 、 $q_3(i)$ は、フレーム中の UW 位置より i シンボルシフトした位置での状態 S_2 、 S_3 における UW 誤検出確率、 p_2 、 p_3 は各々状態 S_2 、 S_3 における UW 位置での不検出確率を示す。

節点 $b_{0,0}$ から b_{L,N_2} への伝達関数、即ち、ミスフレーム後、状態 S_2 から正しく同期を引き込み、状態 S_0 へ移るまでの伝達関数 $Q_R(Z)$ は、次式で与えられる。

$$Q_R(Z) = \frac{Z \prod_{i=1}^{L-1} Q_B(Z, i) (1-p_2) Z^L \{(1-p_3) Z^L\}^{N_2-1}}{1 - \prod_{i=1}^{L-1} Q_B(Z, i) \left[p_2 Z + (1-p_2) Z^L p_3 Z \sum_{k=0}^{N_2-2} \{(1-p_3) Z^L\}^k \right]} \quad (3.5)$$

ここで、 $Q_B(Z, i)$ は $b_{i,0}$ から $b_{i+1,0}$ への伝達関数であり、次式で表される。

$$Q_B(Z, i) = \{1 - q_2(i)\} Z + \{1 - q_3(i)\} Z q_2(i) Z^L \sum_{k=0}^{N_2-2} \{q_3(i) Z^L\}^k + Q_D(Z, i) Z q_2(i) Z^L \{q_3(i) Z^L\}^{N_2-1} \quad (3.6)$$

但し、上式中の $Q_D(Z, i) Z$ は、節点 b_{i, N_2} から $b_{i+1,0}$ への伝達関数であり、 $Q_D(Z, i)$ は前出の式(3.3)で与えられる。

従って、ミスフレーム後、正しく同期を引き込むまでに要する時間の期待値、即ち、平均同期引込み時間 T_r は、次式で与えられる。

$$T_r = Q'_R(1) - L \\ = L(N_2 - 1) + 1 + \frac{\sum_{i=1}^{L-1} Q'_B(1, i) + p_2}{(1 - p_2)(1 - p_3)^{N_2-1}} + \frac{p_3 \sum_{k=1}^{N_2-1} (kL + 1)(1 - p_3)^{k-1}}{(1 - p_3)^{N_2-1}} \quad [\text{シンボル}] \quad (3.7)$$

(4) 同期はずれ検出・同期引込み

システムが稼動中に瞬断が起こった場合を想定すると、瞬断後、システムが再び稼動し始める時には、図 3.1 の状態 S_0 において、同期はずれ状態にあることを検出し、同期をはずして、正確な同期を引き込む必要がある。これは、図 3.3 中の節点 b_{i, N_2} ($i=1 \sim L-1$) から b_{L, N_2} への状態遷移に相当する。この伝達関数 $Q_{DR}(Z, i)$ は、次式で与えられる。

$$Q_{DR}(Z, i) = \frac{Q_D(Z, i) \prod_{j=1}^{L-1} Q_B(Z, j) (1 - p_2) Z^L \{(1 - p_3) Z^L\}^{N_2-1}}{1 - \prod_{j=1}^{L-1} Q_B(Z, j) \left[p_2 Z + (1 - p_2) Z^L p_3 Z \sum_{k=0}^{N_2-2} \{(1 - p_3) Z^L\}^k \right]} \quad (3.8)$$

瞬断後、再びシステムが稼動する位置をフレーム中の各シンボルに対して等確率であると仮定すると、同期はずれ検出・同期引込み時間の平均値 T_{sr} は、次式で与えられる。

$$T_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{L-1} Q'_{DR}(1, i)}{L - 1} \\ = Q'_R(1) - 1 + \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} Q'_B(1, i) - \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=1}^i Q'_B(1, j) \quad [\text{シンボル}] \quad (3.9)$$

3.2 フレーム同期特性の定量的評価⁹⁾

フレーム同期特性を定量的に評価するためには、システムのパラメータを設定する必要がある。ここでは、UW長8ビット、フレーム長256ビット、伝送速度64kbit/sのシステムを想定して、ユニークワード検出に硬判定データ及び軟判定データを用いた場合のフレーム同期特性を比較・評価する。

3.2.1 フレーム同期特性の評価方法

フレーム同期引込みにおける種々の状態遷移時間（平均同期引込み時間等）は、前方・後方保護段数（ N_1 、 N_2 ）、前節で示した図3.1中の状態 $S_0 \sim S_3$ のUW検出確率、 E_b/N_0 等、数多くのパラメータによって決定される。ここでは、次のような手順でフレーム同期特性の評価を行う。

- ① UWの判定基準となる許容ユークリッド距離比 α 及び許容誤りビット数 ϵ は、同期保持状態（状態 S_0 、 S_1 ）において α_1 、 ϵ_1 、同期引込み状態（状態 S_2 、 S_3 ）において α_2 、 ϵ_2 と2つに区別する。
- ② 初期条件として、平均ミスフレーム時間間隔をある一定値（1年）以上にする。
- ③ E_b/N_0 毎に、前方保護段数 N_1 、後方保護段数 N_2 、許容ユークリッド距離比 α_1 、 α_2 あるいは許容誤りビット数 ϵ_1 、 ϵ_2 を変化させて、各 E_b/N_0 に対する平均同期引込み時間 T_r 、平均同期はずれ検出・同期引込み時間 T_{sr} の最小値を導出して、量子化を施さない軟判定データ、量子化を施した軟判定データ、硬判定データを用いた場合の特性を比較・検討する。

3.2.2 フレーム同期特性の最小限界

平均ミスフレーム時間間隔1年以上という初期条件を与え、0から10dBの各 E_b/N_0 において、許容ユークリッド距離比 α 及び許容誤りビット数 ϵ 、前方・後方保護段数 N_1 、 N_2 を変化させ、平均同期引込み時間と平均同期はずれ検出・同期引込み時間の最小限界値を求めた結果を、図3.4と図3.5に各々示す。

図3.4より、平均同期引込み時間は、 E_b/N_0 が5dB以下のとき、8値量子化が最も短く、次が4値量子化、硬判定、量子化を施さない軟判定という順になることがわかる。特に、量子化を施さない軟判定は、他の場合より大きく劣っており、他の3つの場合の間にはあまり差がない。6dB以上の E_b/N_0 では、量子化を施さない軟判定はかなり特性が良くなり、8値量子化とほとんど同一になる。さらに8dBになると、僅かではあるが、量子化を施さない方が8値量子化より平均同期引込み時間は短くなる。4値量子化は、 $E_b/N_0=6$ 、7dBにおいては8値量子化、量子化を施さない軟判定より特性は悪いが、8dB以上ではほとんど差がなくなる。硬判定は、8dB以上の E_b/N_0 では、軟判定より1フレームほど平均同期引込み時間が長くなる。

図3.5の平均同期はずれ検出・同期引込み時間は、0から10dBの E_b/N_0 では、8値量子化が最も短くなる。4値量子化は、5dB以下の E_b/N_0 では8値量子化より2フレー

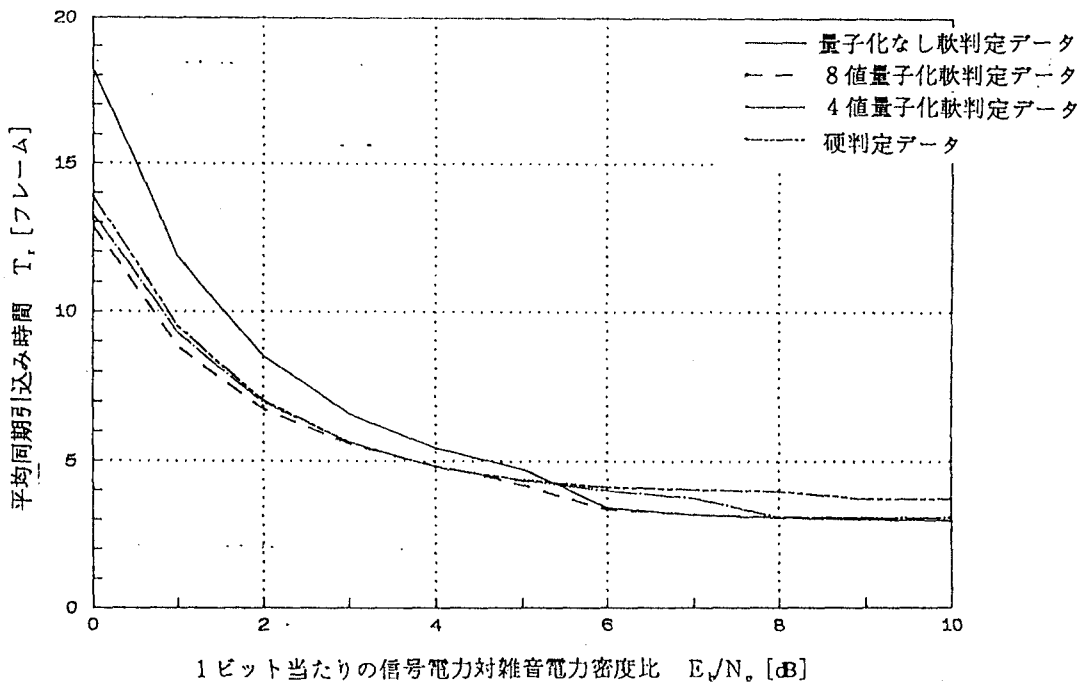


図 3.4 平均同期引込み時間の最小限界値

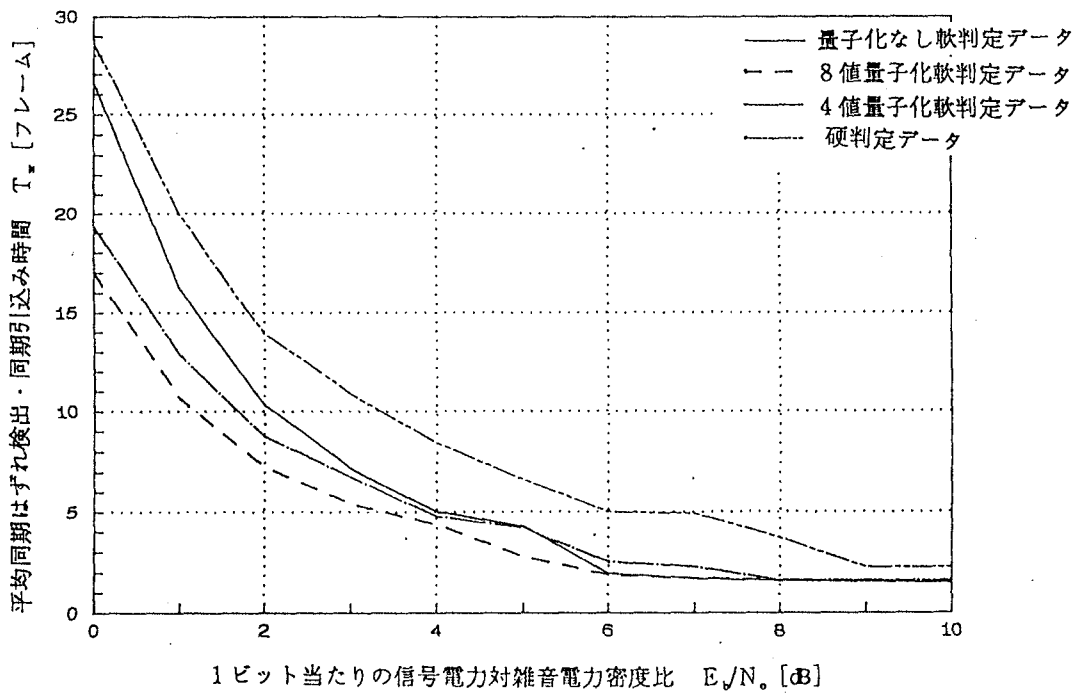


図 3.5 平均同期はずれ検出・同期引込み時間の最小限界値

μほど平均同期はずれ検出・同期引込み時間が長い、 E_b/N_0 が高くなり8 dBになると、8値量子化とほぼ同じ値になる。量子化を施さない軟判定は、 E_b/N_0 が0 dBのとき、量子化を施したものよりかなり悪い特性となるが、6 dB以上では8値量子化と同程度になる。硬判定は軟判定に比べて、0から10dBのどの E_b/N_0 に対しても、平均同期はずれ検出・同期引込み時間が長くなる。

3.2.3 同期保持状態における最適パラメータ

本節では、平均同期引込み時間が最小限界値をとるときの、同期保持状態のパラメータ (ϵ_1 及び α_1 、 N_1) の設定値、そのときのUW検出確率を示し、さらに同期保持状態におけるフレーム同期特性 (平均ミスフレーム時間間隔と平均同期はずれ検出時間) について検討を行う。なお、平均同期引込み時間の最小限界値をとる ϵ_1 及び α_1 と N_1 の組合せと、平均同期はずれ検出・同期引込み時間の最小値をとる ϵ_1 及び α_1 と N_1 の組合せは等しくなる。

(1) 前方保護段数 N_1

各 E_b/N_0 に対して、平均同期引込み時間が最小値をとるときの前方保護段数 N_1 を図3.6に表す。 E_b/N_0 が高くなるに従って、前方保護段数は小さくなる傾向にあるが、硬判定の4 dBと5 dBのときだけ、反転現象が生じる。硬判定と軟判定を比べると、0から10dBの E_b/N_0 に対して、8値量子化の N_1 が最も小さく、次が4値量子化、量子化なし、硬判定という順になる。軟判定はいずれも6 dB以上の E_b/N_0 では $N_1=1$ であるが、硬判定は9 dB以上でなければ $N_1=1$ とならない。

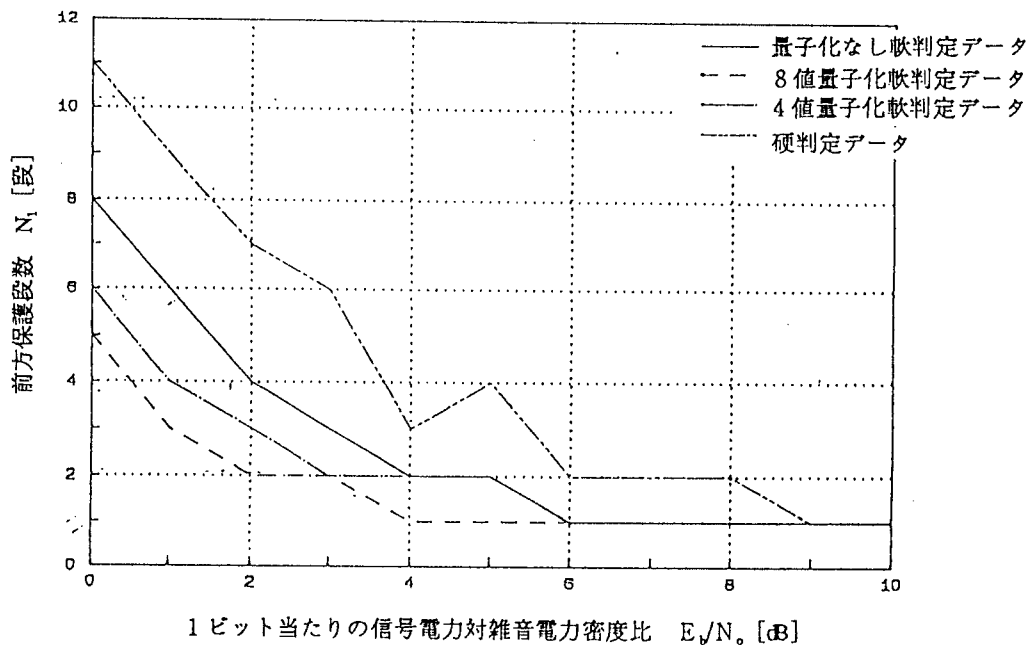


図3.6 平均同期引込み時間が最小値となるときの前方保護段数 N_1

(2) 許容誤りビット数 ϵ_1 と許容ユークリッド距離比 α_1

許容誤りビット数 ϵ_1 及び許容ユークリッド距離比 α_1 の設定を各々図 3.7 と図 3.8 に示す。また、その時の UW 不検出確率、1 ビットシフト状態における誤検出確率、ランダムビット中における誤検出確率を各々図 3.9、図 3.10、図 3.11 に表す。

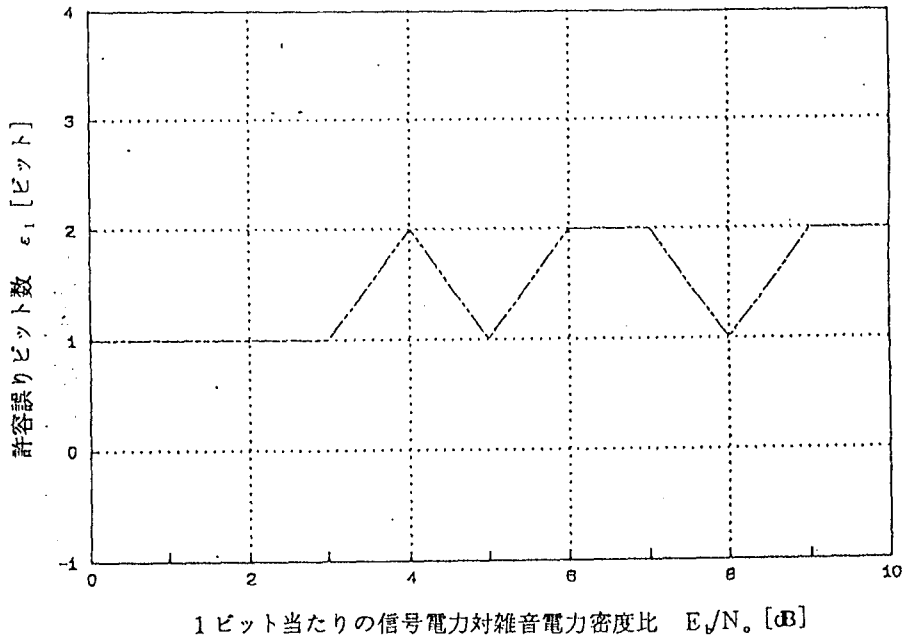


図 3.7 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態における許容誤りビット数 ϵ_1 (硬判定)

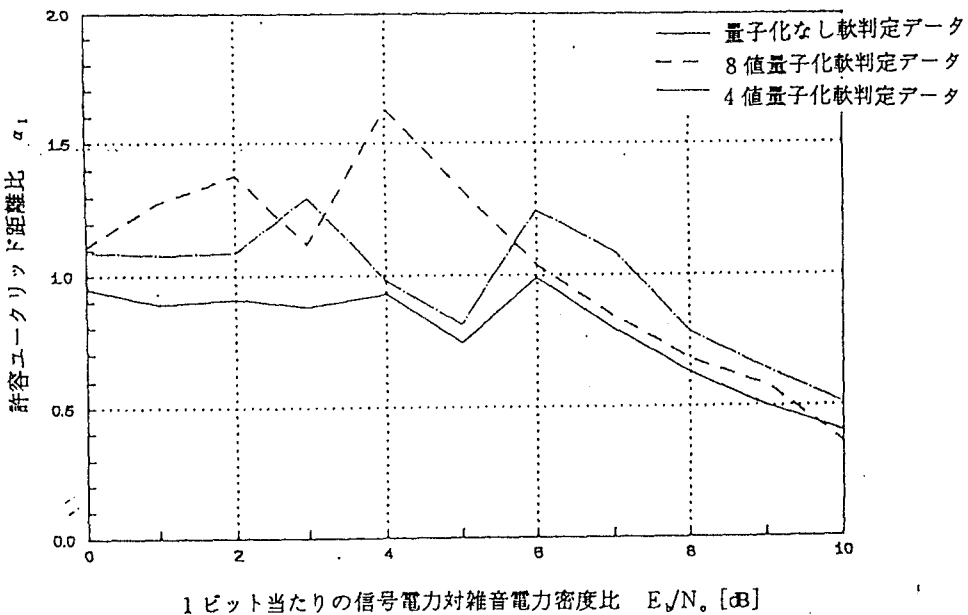


図 3.8 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態における許容ユークリッド距離比 α_1 (軟判定)

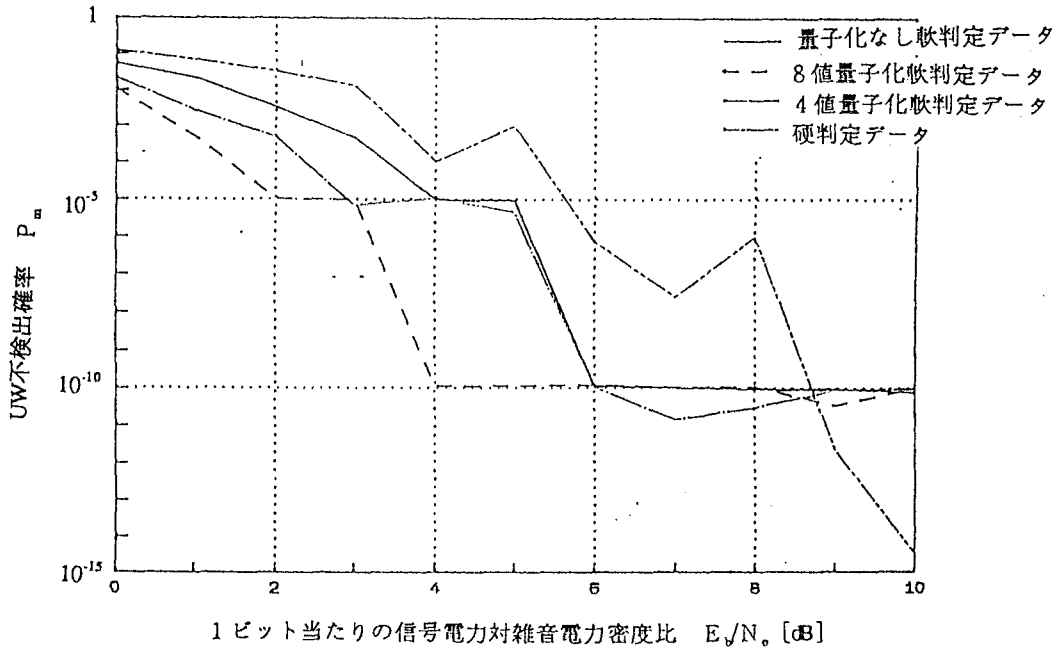


図3.9 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態におけるUW不検出確率

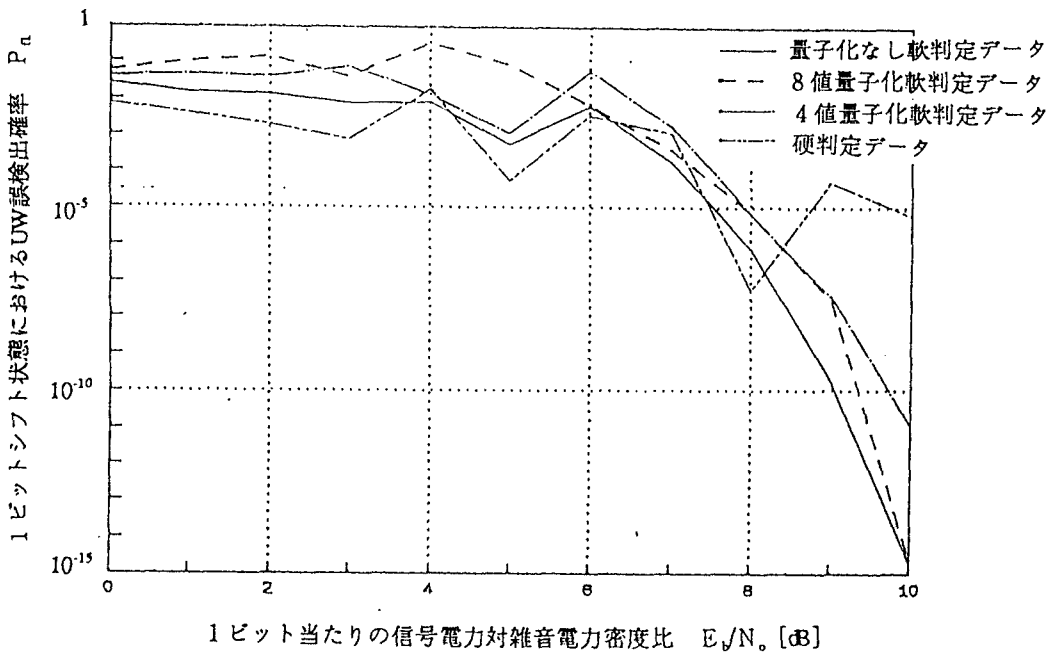


図3.10 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態における1ビットシフト状態のUW誤検出確率

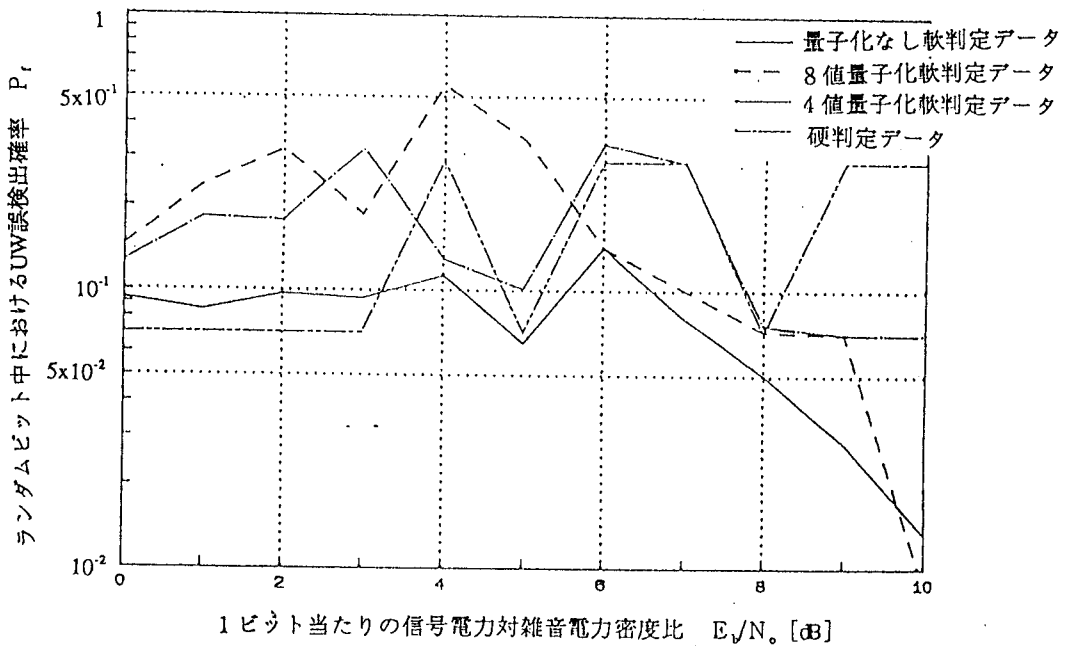


図3.11 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態におけるランダムビット中のUW誤検出確率

① 硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ_1 (図3.7参照)

硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ_1 は、3 dB以下の E_b/N_0 では $\epsilon_1 = 1$ で一定となるが、それ以上の E_b/N_0 では、1あるいは2と E_b/N_0 によって激しく入れ替わる。

② 軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α_1 (図3.8参照)

量子化を施した軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α_1 は、 E_b/N_0 が低いときには大きくなり、1.00以上の設定となる場合が多い。量子化を施さない軟判定データにおいても、 E_b/N_0 が低いとき α_1 を1.00以上にとることができれば良い特性(平均同期引込み時間)が得られる可能性はあるが、計算上 α_1 を1以上に設定できないため、 α_1 は1.00より小さい値となる。なお、6 dB以上の E_b/N_0 では、どの場合も、 α_1 は E_b/N_0 が高くなるに従って小さくなる。

③ UW不検出確率 (図3.9参照)

不検出確率と前方保護段数によって決まる平均ミスフレーム時間間隔の初期条件を1年以上に設定しているので、不検出確率が低ければ前方保護段数は小さくなり、不検出確率が高ければ前方保護段数は大きくなる。従って、不検出確率は図3.6に示した前方保護段数の変化に対応した形を表す。例えば、硬判定は軟判定に比べて不検出確率の値が高くなる ϵ_1 の設定となるために、前方保護段数 N_1 には大きい値が必要とされる。また、図3.6から $N_1 = 1$ となる、8値量子化の $E_b/N_0 = 4$ dB以上、4値量子化と量子化なしの6 dB以上、硬判定の9 dB以上のとき、不検出確率は 10^{-10} であれば十分であるが、量子化が粗いほど ϵ_1 及び α_1 の値の設定に自由度がないために、ちょうど 10^{-10} に設

定できず、それより低い不検出確率を得るような ϵ_1 及び α_1 の値の設定となる。

④ UW誤検出確率 (図3.10、図3.11参照)

1ビットシフト状態における誤検出確率は、6 dB以上の E_b/N_0 では、 E_b/N_0 が高くなるに従って急激に減少する。特に、軟判定の場合、それが顕著に現れる。また、 $E_b/N_0 = 9$ 、10dBを除いて、不検出確率が低い8値量子化ほど、誤検出確率が高くなり、不検出確率の高い硬判定データでは、誤検出確率が低くなる。

ランダムビット中の誤検出確率は、 E_b/N_0 が高くなっても、1ビットシフト状態のときほど、急激に減少することはない。硬判定データにおける誤検出確率は、 E_b/N_0 にかかわらず、 $\epsilon_1 = 1$ のとき0.0703125、 $\epsilon_1 = 2$ のとき0.2890625となる。硬判定と軟判定を比べると、3 dB以下の E_b/N_0 では1ビットシフト状態と同様に、硬判定の誤検出確率が最も低いが、4 dB以上では、量子化を施さない軟判定の誤検出確率の方が低くなる。

以上述べた同期保持状態におけるパラメータ (α_1 及び ϵ_1 、 N_1) とそれによって決まるUW検出確率から、平均ミスフレーム時間間隔と平均同期はずれ検出時間が計算できる。 E_b/N_0 に対する平均ミスフレーム時間間隔と平均同期はずれ検出時間の変化を各々図3.12と図3.13に示す。

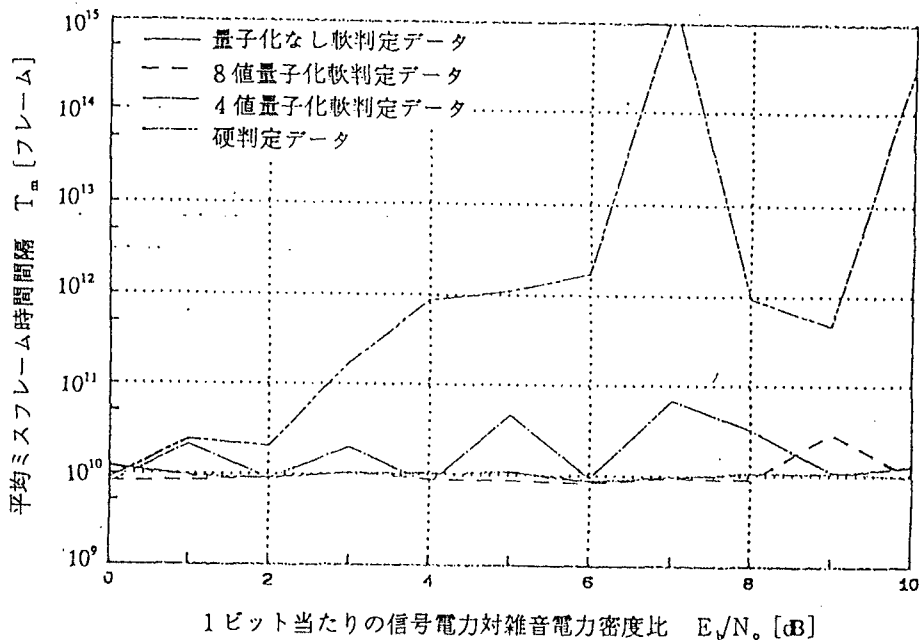


図3.12 平均同期引込み時間が最小値となるときの平均ミスフレーム時間間隔

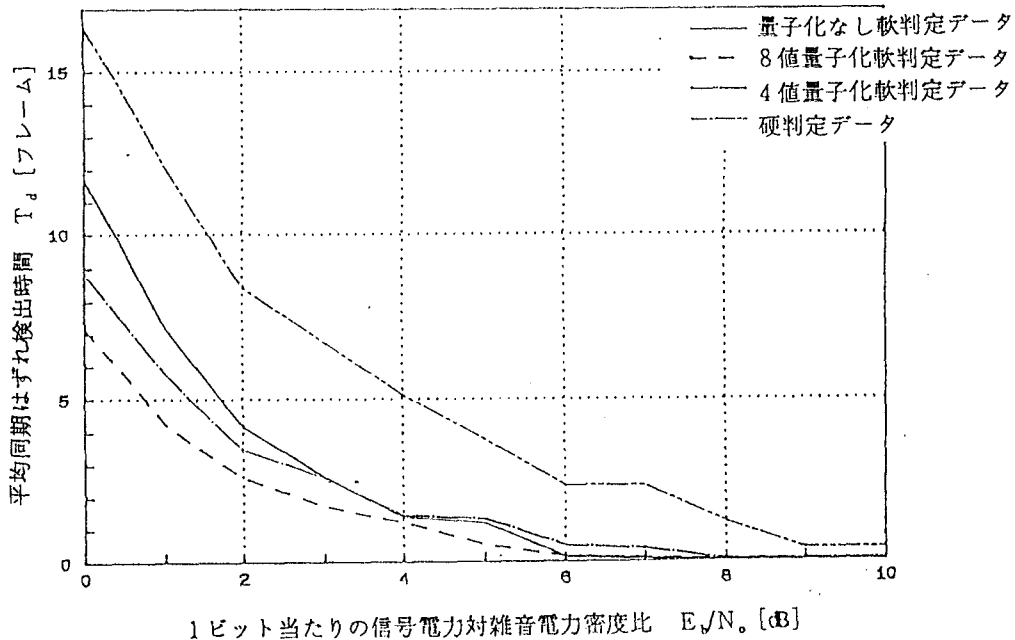


図3.13 平均同期引込み時間が最小値となるときの平均同期はずれ検出時間

(3) 平均ミスフレーム時間間隔 (図3.12参照)

量子化を施さない軟判定と8値量子化は、平均ミスフレーム時間間隔を1年 (7.884×10^9 [フレーム]) に近い値に設定できるが、4値量子化は数年程度になり、硬判定は非常に大きくなることもある。

(4) 平均同期はずれ検出時間 (図3.13参照)

平均同期はずれ検出時間は、 E_b/N_0 が高くなるに従って短くなる。軟判定は E_b/N_0 が高くなりUW検出特性が良好になると、図3.6に示した前方保護段数 N_1 の変化の形がそのまま現れる。各種データを比較すると、 $E_b/N_0 = 0$ dBのときは、8値量子化の平均同期はずれ検出時間が最も短くなり、次に4値量子化、量子化を施さない軟判定、硬判定という順になる。 $E_b/N_0 = 5$ dBになると、量子化を施さない軟判定の平均同期はずれ検出時間は、4値量子化より短くなり、さらに6 dBでは8値量子化と同程度まで短くなる。 $E_b/N_0 = 10$ dBのときは、軟判定はどの場合も0に非常に近い値となるが、硬判定は0.4フレーム程度になる。

(5) $E_b/N_0 = 0$ dBにおける平均ミスフレーム時間間隔とUW不検出確率、誤検出確率、平均同期はずれ検出時間の関係

表3.1は、 $E_b/N_0 = 0$ dBのとき、平均ミスフレーム時間間隔が1年以上となる N_1 と α_1 、 ϵ_1 の設定とその時のUW不検出確率、誤検出確率(ランダムビット中)と平均同期はずれ検出時間を示したものである。

N_1 と α_1 、 ϵ_1 の組合せは、同表に示すものがすべてではなく、他にも多数の組合せがあるが、ここでは平均同期引込み時間の最小値が得られる N_1 と α_1 及び ϵ_1 の組合せの前

後のものを示す。しかし、量子化を施さない軟判定は、計算上 $\alpha < 1$ という制約のために、 N_1 は 8 より小さくできない。また、硬判定は N_1 の値に対して柔軟に ϵ_1 を設定できないため、 ϵ_1 の値に対して平均ミスフレーム時間間隔が 1 年程度になる N_1 を選ぶ。

前方保護段数 N_1 を小さくすることは、同期はずれ検出時間の短縮につながるが、初期条件として平均ミスフレーム時間間隔を 1 年以上として与えることから、前方保護段数を小さくするには、同期保持状態における UW 不検出確率を低くする必要がある。これは、軟判定の α_1 、硬判定の ϵ_1 を大きくとることによって達成できる。しかしながら、この時、誤検出確率が逆に増大してしまうので、 α_1 、 ϵ_1 を大きく広げすぎても、平均同期はずれ検出時間は長くなる。即ち、誤検出確率が増大し過ぎない程度に α_1 及び ϵ_1 を広げて、不検出確率を小さくする。それによって、 N_1 を可能な限り小さく設定するとき、平均同期はずれ検出時間は最も短くなる。

表 3.1 N_1 と α_1 、 ϵ_1 の設定とその時の UW 不検出確率、誤検出確率 (ラングビット中) と平均同期はずれ検出時間 ($E_p/N_0 = 0$ dB) は最適パラメータ

	N_1	α_1 ϵ_1	不検出確率	ラングビット中の誤検出確率	平均同期はずれ検出時間 [フレーム]
軟判定 4 値量子化	4	1.35	2.73835×10^{-3}	2.96926×10^{-1}	9.351431
	5	1.16	7.57700×10^{-3}	2.06903×10^{-1}	9.502044
	6	1.09	2.24687×10^{-2}	1.26753×10^{-1}	8.848652
	7	0.91	3.75551×10^{-2}	9.31395×10^{-2}	9.496983
	8	0.89	4.99778×10^{-2}	7.76637×10^{-2}	1.065490×10
	9	0.68	7.86675×10^{-2}	5.12535×10^{-2}	1.077118×10
	10	0.65	9.38275×10^{-2}	4.56259×10^{-2}	1.199322×10
	11	0.63	1.21632×10^{-1}	3.73841×10^{-2}	1.287181×10
8 値量子化	4	1.32	3.24438×10^{-3}	2.36048×10^{-1}	7.158619
	5	1.11	1.04379×10^{-2}	1.44727×10^{-1}	7.151653
	6	0.95	2.24575×10^{-2}	9.75735×10^{-2}	7.689221
	7	0.86	3.86461×10^{-2}	7.48896×10^{-2}	8.632405
	8	0.80	5.68743×10^{-2}	6.01500×10^{-2}	9.639411
	9	0.75	7.52806×10^{-2}	5.00192×10^{-2}	1.068748×10
	10	0.70	1.00316×10^{-1}	4.15034×10^{-2}	1.167007×10
	11	0.67	1.19852×10^{-1}	3.62532×10^{-2}	1.276915×10
量子化なし	8	0.95	5.53701×10^{-2}	9.31739×10^{-2}	1.167044×10
	9	0.88	7.97034×10^{-2}	7.45935×10^{-2}	1.245990×10
	10	0.83	1.02572×10^{-1}	6.29122×10^{-2}	1.347396×10
	11	0.79	1.24851×10^{-1}	5.44820×10^{-2}	1.456102×10
硬判定	4	3	1.93012×10^{-3}	7.26563×10^{-1}	2.419733×10^2
	6	2	2.01504×10^{-2}	2.89063×10^{-1}	2.213904×10
	11	1	1.26106×10^{-1}	7.03125×10^{-2}	1.637588×10
	19	0	4.80724×10^{-1}	7.81250×10^{-3}	3.412533×10

① 硬判定の場合

不検出確率を低くするために、許容誤りビット数 ϵ_1 を大きくし $\epsilon_1 = 3, 2$ にすると、前方保護段数 N_1 は各々 4、6 となる。しかしながら、 $N_1 = 4, 6$ のとき、誤検出確率がかなり高くなるので、平均同期はずれ検出時間が非常に長くなる。一方、 $\epsilon_1 = 1$ とすれば、 N_1 は大きくなり 11 となるが、誤検出確率は低くなり、平均同期はずれ検出時間も短くなる。

② 4 値量子化の場合

N_1 の値に対して α_1 が柔軟に対応し、 $N_1 = 6$ のとき、平均同期はずれ検出時間は最短となる。

③ 8 値量子化の場合

$N_1 = 5$ のとき、平均同期はずれ検出時間は最短となる。

④ 量子化を施さない軟判定の場合

既に述べたように、 N_1 は 8 以上の値の設定となるが、 N_1 が最も小さい 8 のとき、平均同期はずれ検出時間は最短となる。

⑤ 硬判定と軟判定の比較

各場合における平均同期はずれ検出時間の最小値を比べると、最小値を得るときの N_1 の設定が小さいほど、平均同期はずれ検出時間は短く、即ち、 $N_1 = 5$ である 8 値量子化が最も短く、次が $N_1 = 6$ の 4 値量子化、 $N_1 = 8$ の量子化なし、 $N_1 = 11$ の硬判定という順になる。小さい N_1 で平均同期はずれ検出時間の最小値が得られるということは、UW 検出特性が優れているということである。また、平均同期はずれ検出時間が最小値をとるときの誤検出確率は、表 3.1 から、0.2 より低くしなければならぬといえる。

なお、平均同期はずれ検出時間が最も短くなる、 N_1 と α_1 、 ϵ_1 の組合せは、平均同期引込み時間が最短となるときのパラメータと一致する。

(6) $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ における平均ミスフレーム時間間隔と UW 不検出確率、誤検出確率、平均同期はずれ検出時間の関係

表 3.2 は、 $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ のとき、平均ミスフレーム時間間隔が 1 年以上となる N_1 と α_1 、 ϵ_1 の設定とその時の不検出確率、誤検出確率（ランダムビット中）と平均同期はずれ検出時間を示したものである。

$E_b/N_0 = 10\text{dB}$ のときには、どの場合も、誤検出確率は十分低いため、 $N_1 = 1$ のときの平均同期はずれ検出時間が最小値をとる。 $N_1 = 1$ のときの誤検出確率に関して、硬判定と軟判定を比較すると、8 値量子化が最も低く、次が量子化なし、4 値量子化、硬判定という順になる。従って、平均同期はずれ検出時間に関しても、8 値量子化が最も短く、次が量子化なし、4 値量子化、硬判定という順になる。

表3.2 N_1 と α_1 , ϵ_1 の設定とその時のUW不検出確率、誤検出確率(ラング'ビット中)と平均同期はずれ検出時間($E_b/N_0=10\text{dB}$) は最適パラメータ

	N_1	α_1 ϵ_1	不検出確率	ラング'ビット中の誤検出確率	平均同期はずれ検出時間[フレーム]
軟判定 4値量子化	1	0.51	1.0347×10^{-10}	6.97184×10^{-2}	7.313912×10^{-2}
	2	0.21	3.0562×10^{-7}	7.89708×10^{-3}	1.023198
	3	0.07	8.2663×10^{-5}	7.81209×10^{-3}	2.046010
8値量子化	1	0.36	9.8445×10^{-11}	8.70011×10^{-3}	8.509187×10^{-3}
	2	0.17	8.1257×10^{-6}	7.81828×10^{-3}	1.022962
	3	0.11	3.1142×10^{-4}	7.81029×10^{-3}	2.045999
量子化なし	1	0.40	7.6065×10^{-11}	1.32686×10^{-2}	1.306996×10^{-2}
	2	0.24	6.3494×10^{-6}	7.85344×10^{-3}	1.023067
	3	0.18	3.4377×10^{-4}	7.81124×10^{-3}	2.046005
硬判定	1	2	3.2511×10^{-15}	2.89063×10^{-1}	4.013554×10^{-1}
	2	1	4.1980×10^{-10}	7.03125×10^{-2}	1.227043
	3	0	3.0976×10^{-5}	7.81250×10^{-3}	2.046013

(7) UW正検出確率及び位相誤検出確率

平均同期引込み時間が最小となるときの同期保持状態における正検出確率、位相誤検出確率を、各々図3.14と図3.15に示す。

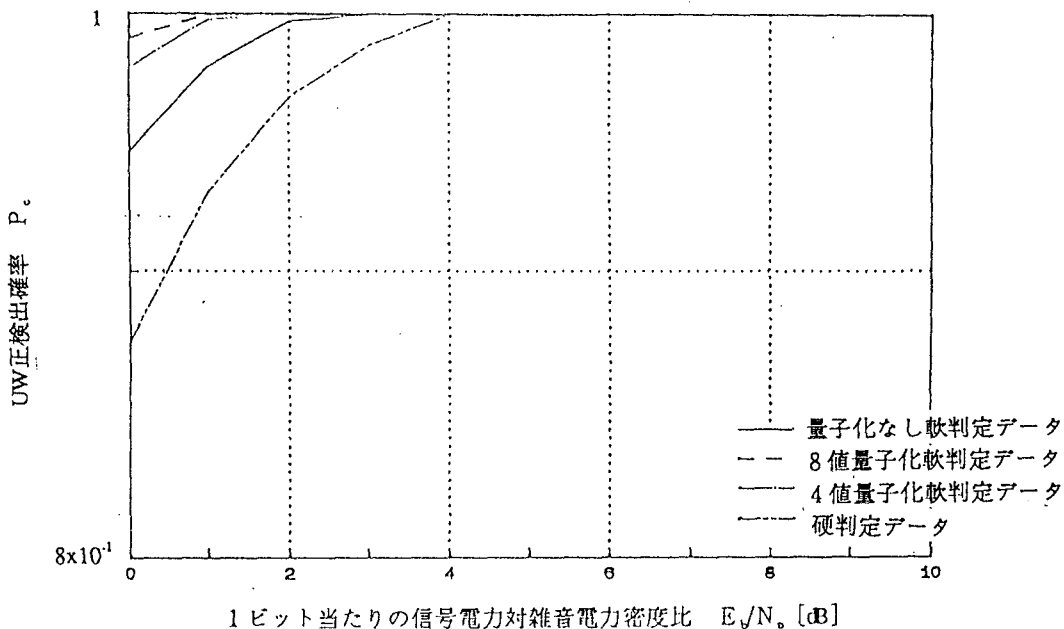


図3.14 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態におけるUW正検出確率

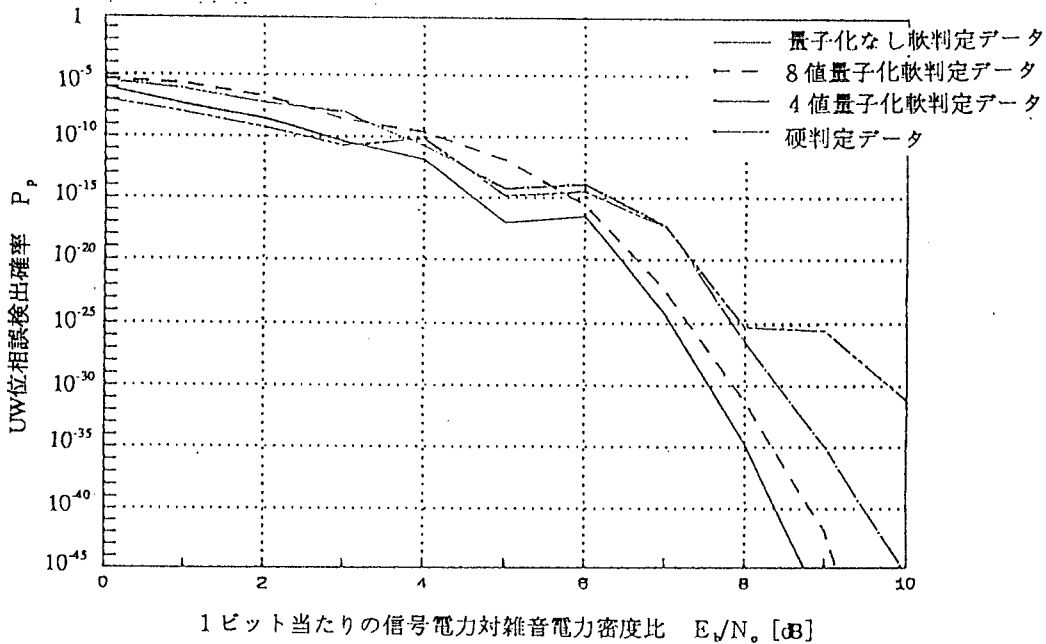


図3.15 平均同期引込み時間 が最小値となるときの同期保持状態における UW位相誤検出確率

① UW正検出確率 (図3.14参照)

正検出確率は、どの場合も非常に高い値となり、4 dB以上の E_b/N_0 ではほとんど1となる。 E_b/N_0 が低い範囲において、正検出確率の高い順に並べると、8値量子化、4値量子化、量子化を施さない軟判定、硬判定という順になるが、これは不検出確率が低く、誤検出確率が高い順でもある。

② UW位相誤検出確率 (図3.15参照)

位相誤検出確率は、どの場合も低く、特に E_b/N_0 が高くなると著しく減少する。硬判定、軟判定の各場合を比べると、 $E_b/N_0 = 0 \sim 3$ dBの範囲では、硬判定が最も低く、次が量子化を施さない軟判定、4値量子化、8値量子化という順になる。 E_b/N_0 が高くなるに従って、8値量子化における減少の割合が大きくなり、硬判定における減少の割合は小さくなる。 $E_b/N_0 = 8$ dBになると、量子化を施さない軟判定が最も低く、次が8値量子化、4値量子化、硬判定という順になる。

(8) データ損失の割合

同期保持状態においてデータを損失する割合は、同期保持状態における UW正検出確率と位相誤検出確率を用いて、次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} & \text{同期保持状態における位相反転によるデータ損失の割合} \\ &= \text{位相誤検出確率} / (\text{正検出確率} + \text{位相誤検出確率}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

図3.16は、上式より得られたデータ損失の割合を示したものである。正検出確率が1に近く、位相誤検出確率が非常に小さいために、データ損失の割合は、図3.15に示した位相誤検出確率とほぼ同じ傾向を示す。

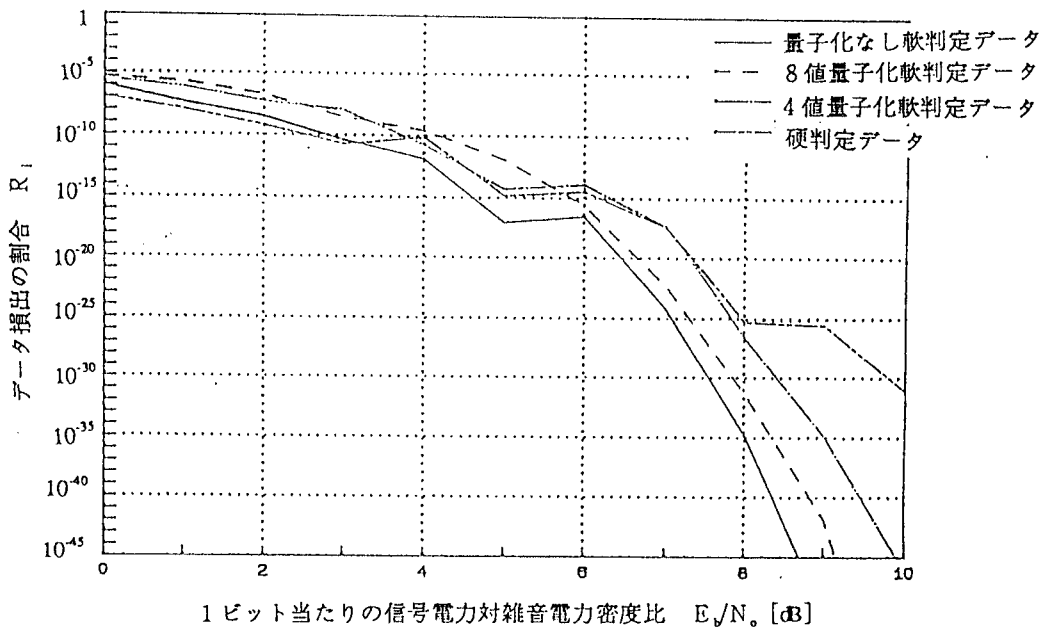


図3.16 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期保持状態におけるデータ損失の割合

3.2.4 同期引込み状態における最適パラメータ

平均同期引込み時間及び平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値をとるときの後方保護段数 N_2 と同期引込み状態における許容誤りビット数 ϵ_2 及び許容ユークリッド距離比 α_2 、その時のUW不検出確率、誤検出確率について検討を行う。平均同期引込み時間の最適パラメータと、平均同期はずれ検出・同期引込み時間の最適パラメータは、異なる値をとるため、個別に検討する。

〈平均同期引込み時間の最適パラメータ (ϵ_2 及び α_2 、 N_2) 〉

(1) 後方保護段数 N_2

平均同期引込み時間が最小値をとるときの後方保護段数 N_2 の変化を図3.17に示す。後方保護段数 N_2 は1あるいは2段であり、 E/N_0 が高くなると、 N_2 は1段になる。 $N_2=1$ となる E/N_0 は、8値量子化が最も小さく5 dBであり、4値量子化と量子化を施さない軟判定が6 dB、硬判定が最も大きく9 dBである。

(2) 許容誤りビット数 ϵ_2 と許容ユークリッド距離比 α_2

平均同期引込み時間が最小値をとるときの同期引込み状態における、硬判定の許容誤りビット数 ϵ_2 、軟判定の許容ユークリッド距離比 α_2 を、各々図3.18と図3.19に示す。また、そのときのUW不検出確率、1ビットシフト状態における誤検出確率、ランダムビット中の誤検出確率を、各々図3.20、図3.21、図3.22に示す。

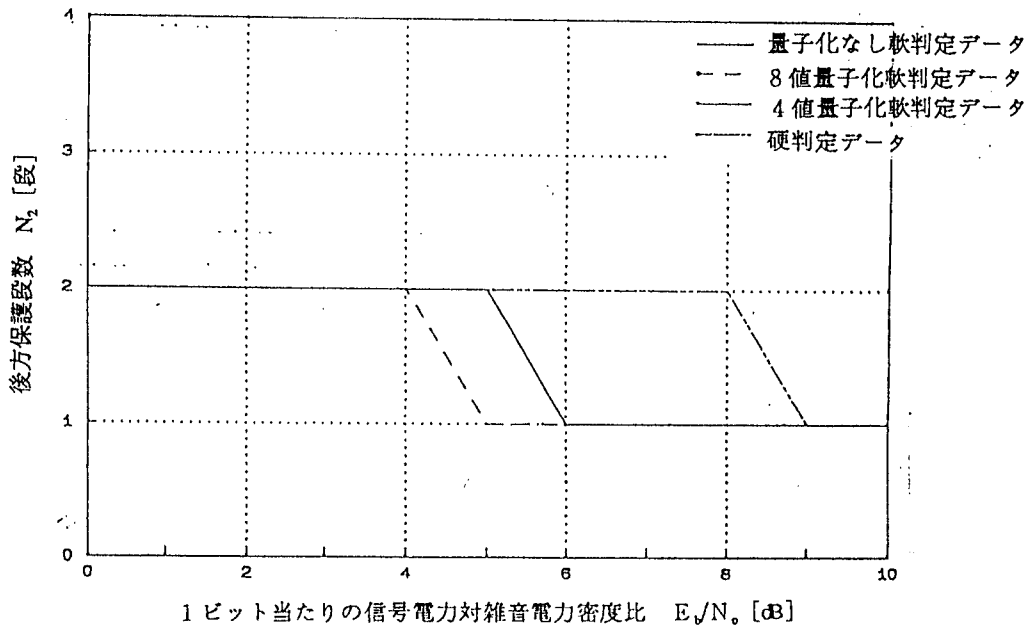


図3.17 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態における後方保護段数 N_2

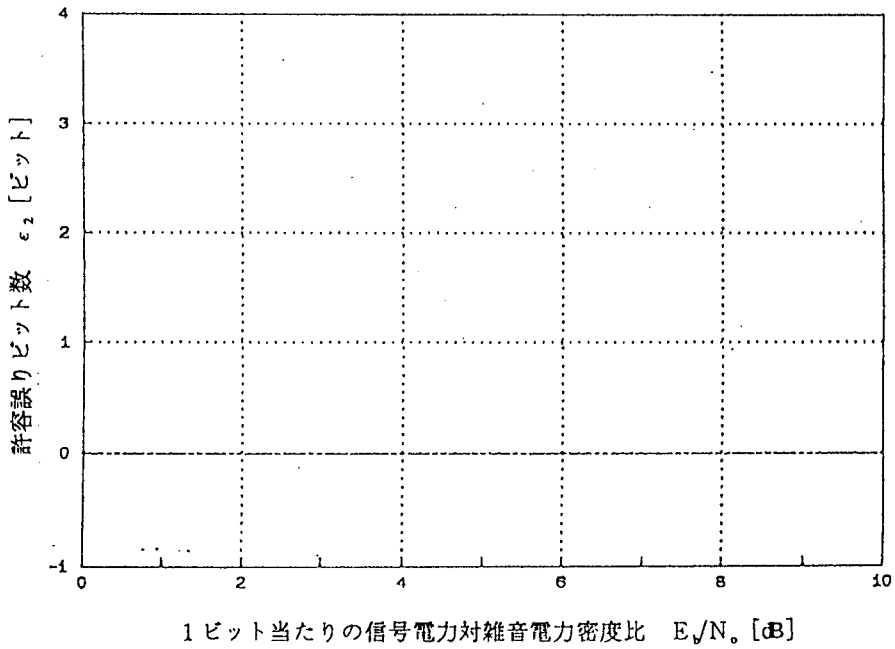


図3.18 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態における許容誤りビット数 ϵ_2 (硬判定)

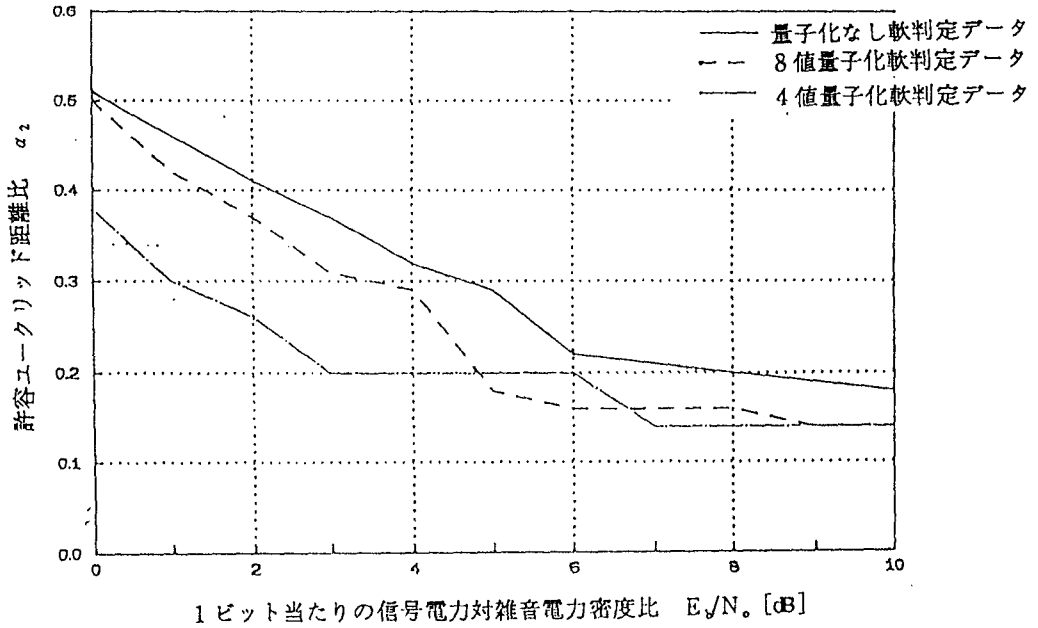


図3.19 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態における許容ユークリッド距離比 α_2 (軟判定)

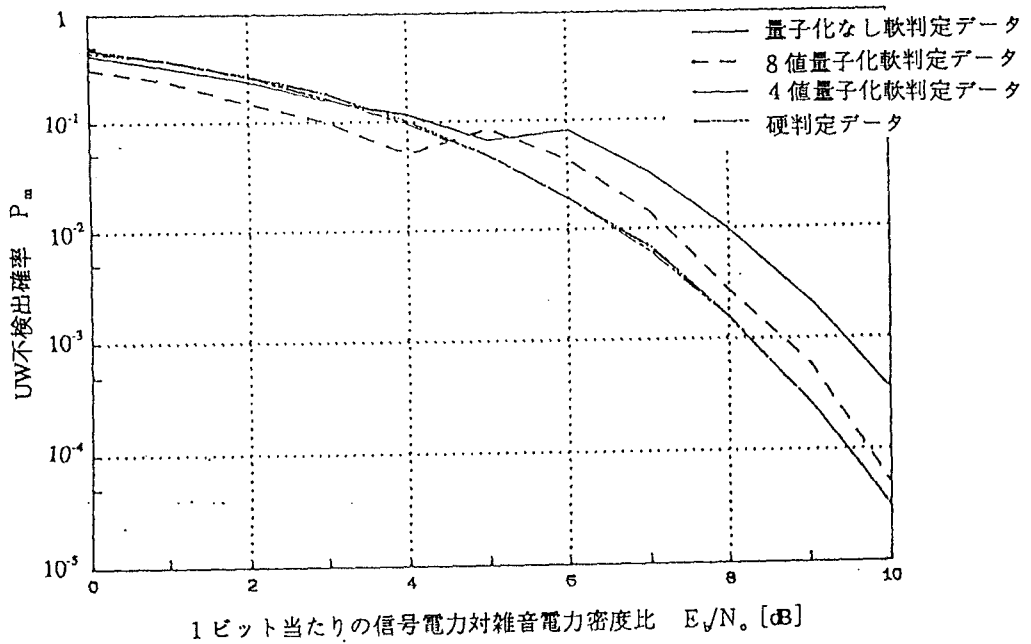


図3.20 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態におけるUW不検出確率

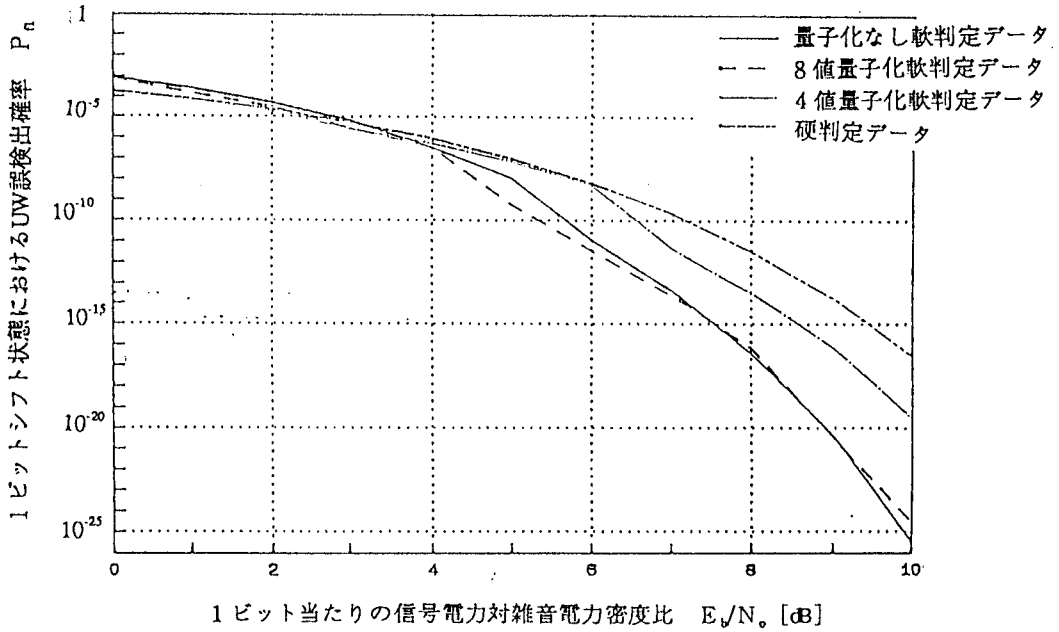


図3.21 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態における1ビットシフト状態のUW誤検出確率

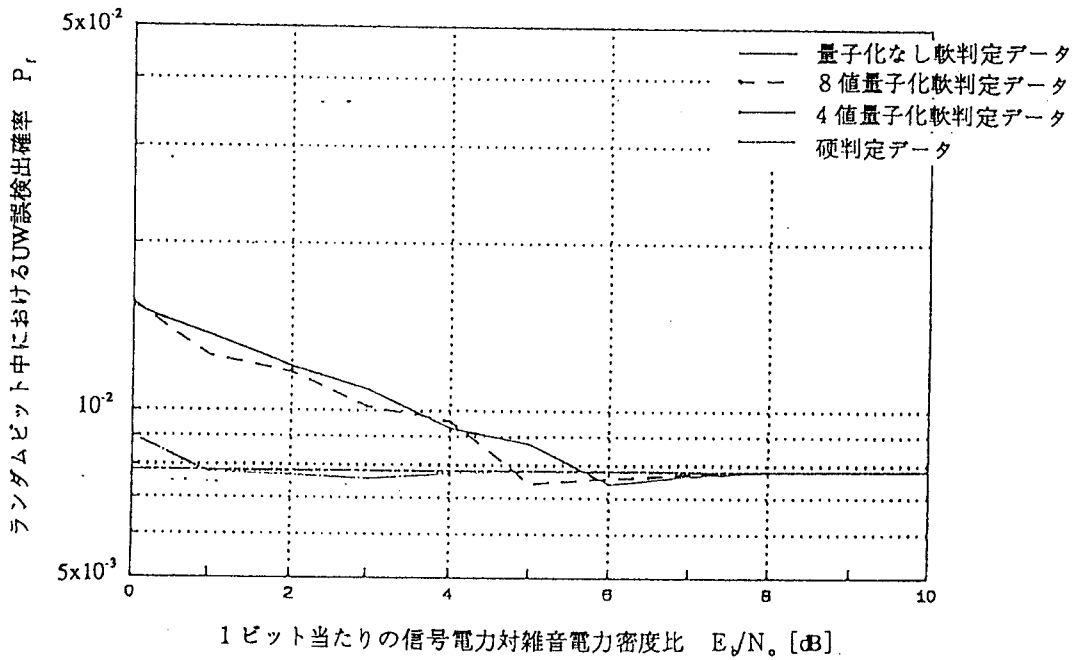


図3.22 平均同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態におけるランダムビット中のUW誤検出確率

① 硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ_2 (図3.18参照)

硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ_2 は、0 から10dBのすべての E_b/N_0 に対して、常に $\epsilon_2 = 0$ である。

② 軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α_2 (図3.19参照)

軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α_2 は、同期保持状態における α_1 と比べると、小さい値となる。また、どの軟判定データに対しても、 E_b/N_0 が高くなるに従って、 α_2 の値は小さくなる。

③ UW不検出確率 (図3.20参照)

まず、不検出確率は、4 値量子化と硬判定に対して、ほぼ等しい値になることがわかる。8 値量子化における不検出確率は、4 dB以下の E_b/N_0 では最も低く、5 dB以上では硬判定より高くなる。量子化を施さない軟判定は、4 dB以下の E_b/N_0 において、硬判定及び4 値量子化とほぼ等しい不検出確率となるが、6 dB以上では、硬判定よりも、さらに8 値量子化よりも高い不検出確率となる。

④ 1 ビットシフト状態におけるUW誤検出確率 (図3.21参照)

1 ビットシフト状態における誤検出確率は、8 値量子化と量子化を施さない軟判定データの場合、 $E_b/N_0 = 0 \sim 10$ dB に対してほぼ等しい値となり、硬判定と4 値量子化の誤検出確率は、6 dB以下では等しく、それ以上の E_b/N_0 では4 値量子化の方が低くなる。また、8 値量子化及び量子化を施さない軟判定と、4 値量子化及び硬判定の誤検出確率を比べると、3 dB以下の E_b/N_0 では、硬判定及び4 値量子化の方が低く、それ以上の E_b/N_0 では、8 値量子化及び量子化を施さない軟判定の方が低くなる。

⑤ ランダムビット中のUW誤検出確率 (図3.22参照)

ランダムビット中の誤検出確率は、硬判定と4 値量子化において、 E_b/N_0 の値にかかわらず、ほぼ一定値0.0078125 となる。量子化なしの軟判定と8 値量子化は、 E_b/N_0 が低い範囲では、硬判定よりも高い誤検出確率となるが、8 値量子化は5 dBで、量子化なしは6 dBで、硬判定とほぼ同じ値になり、さらに E_b/N_0 が高くなると0.0078125 に収束する。

⑥ 各検出確率のバランスを考慮したUW検出特性

図3.20、図3.21、図3.22を比較して、UW不検出確率、誤検出確率のバランスを考えながら、硬判定と量子化を施さない軟判定、8 値量子化、4 値量子化を各々用いた場合の同期引込み状態におけるUW検出特性を比較・検討する。

量子化を施さない軟判定と8 値量子化の誤検出確率は、0 から10dBの E_b/N_0 においてほぼ等しいが、不検出確率は、量子化を施さない場合の方が8 値量子化より高い値となる。即ち、量子化を施さない軟判定は、8 値量子化よりUW検出特性が劣っているといえる。

図3.20に示すように、硬判定と4 値量子化を比べると、不検出確率は等しいが、1 ビットシフト状態の誤検出確率は、図3.21に示すように、7 dB以上の E_b/N_0 において、4

値量子化の方が硬判定より低くなる。即ち、低い E_b/N_0 の範囲では、硬判定と4値量子化は同程度のUW検出特性であるが、高い E_b/N_0 の範囲では、4値量子化の方が僅かに優れている。

また、図3.20に示した不検出確率から、4 dB以下の E_b/N_0 では、量子化を施さない軟判定と硬判定及び4値量子化の不検出確率はほぼ等しい値となるが、この E_b/N_0 の範囲におけるランダムビット中の誤検出確率は、図3.22に示すように、量子化を施さない軟判定の方が高い値となる。即ち、4 dB以下の E_b/N_0 では、量子化を施さない軟判定のUW検出特性は、硬判定及び4値量子化よりも劣る。

E_b/N_0 が高い範囲では、どの場合もランダムビット中の誤検出確率は、硬判定の $\epsilon = 0$ に相当する誤検出確率0.0078125に収束する。UW不検出確率とランダムビット中の誤検出確率の観点からは、硬判定と4値量子化の特性はほぼ同等であるが、1ビットシフト状態における誤検出確率の差によって、僅かであるが4値量子化における特性の方が優れていると結論づけられる。従って、 E_b/N_0 が高い範囲に対する同期引込み状態におけるUW検出特性は、僅かの差で4値量子化が最も優れ、次に硬判定、8値量子化、量子化を施さない軟判定という順になる。

E_b/N_0 が低い範囲におけるUW検出特性の優劣に関して、図3.20～図3.22からわかることは、硬判定と4値量子化の特性がほぼ等しいことと、量子化を施さない軟判定の特性が最も悪いことである。 E_b/N_0 が低い範囲では、量子化を施さない軟判定と8値量子化の誤検出確率が、硬判定における $\epsilon = 0$ の誤検出確率よりかなり高いので、UW検出特性は、硬判定と4値量子化が最も良く、次が8値量子化、量子化を施さない軟判定という順となる。(この順位は、フレーム同期を行う際のUW検出特性の正確な順位とは言えない。UW検出特性を正確に比べるには、誤検出確率が等しいときの不検出確率、あるいは不検出確率が等しいときの誤検出確率を比べなければならない。しかし、フレーム同期を行う際の誤検出確率の最適値、あるいは不検出確率がどの場合も等しくなるとは限らない。従って、フレーム同期を行う際の正確なUW検出特性の優劣を示す順位は得られず、あくまでも予測される順位である。)

以上の検討をまとめると、 ϵ_2 及び α_2 を小さく設定する同期引込み状態におけるUW検出特性は、 E_b/N_0 が低いとき、硬判定と4値量子化が最も優れ、次が8値量子化、量子化を施さない軟判定という順になる。 E_b/N_0 が高くなると、4値量子化の方が硬判定より、僅かではあるが良好になる。

(3) ϵ_2 、 α_2 、 N_2 の設定

同期引込み状態における ϵ_2 及び α_2 は、同期保持状態における ϵ_1 及び α_1 に比べて、小さい値をとる。UW不検出確率と誤検出確率のバランスをとりながら、ランダムビット中の誤検出確率が0.078125程度になるように、 ϵ_2 及び α_2 を設定する場合に、平均同期引込み時間は最小値をとる。 N_2 の値に関しては、2あるいは1段で十分となる。

〈平均同期はずれ検出・同期引込み時間の最適パラメータ (ϵ_2 及び α_2 、 N_2) 〉

(1) 後方保護段数 N_2

平均同期はずれ検出・同期引込み時間が、各 E_b/N_0 に対して最小値をとるときの後方保護段数 N_2 の最適値を図3.23に示す。平均同期引込み時間が最小値となるときの N_2 と全く同じ変化となる。

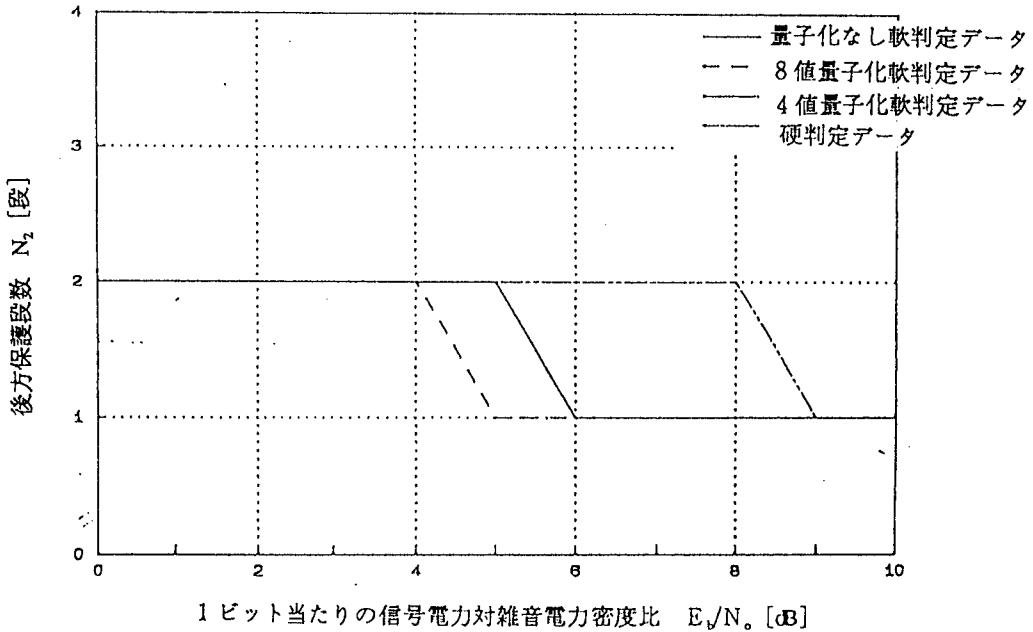


図3.23 平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるときの後方保護段数 N_2

(2) 許容誤りビット数 ϵ_2 と許容ユークリッド距離比 α_2

平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値をとるときの同期引込み状態における、硬判定の許容誤りビット数 ϵ_2 、軟判定の許容ユークリッド距離比 α_2 を、各々図3.24と図3.25に示す。また、そのときのUW不検出確率、1ビットシフト状態における誤検出確率、ランダムビット中の誤検出確率を、各々図3.26、図3.27、図3.28に示す。

① 硬判定データにおける許容誤りビット数 ϵ_2 (図3.24参照)

平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値をとるときの同期引込み状態における、硬判定データの許容誤りビット数 ϵ_2 は、 $\epsilon_2 = 0$ で一定となる。

② 軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α_2 (図3.25参照)

軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α_2 は、 E_b/N_0 が高くなるに従って、小さくなる傾向がある。量子化を施さない軟判定の α_2 は、8値量子化及び4値量子化に比べて、0から10dBの E_b/N_0 の範囲に対して、常に大きくなる。また、量子化を施さない軟判定に限らず、 α_2 の値の設定は、平均同期引込み時間が最小値をとるときの α_2 の値の設定より大きい。

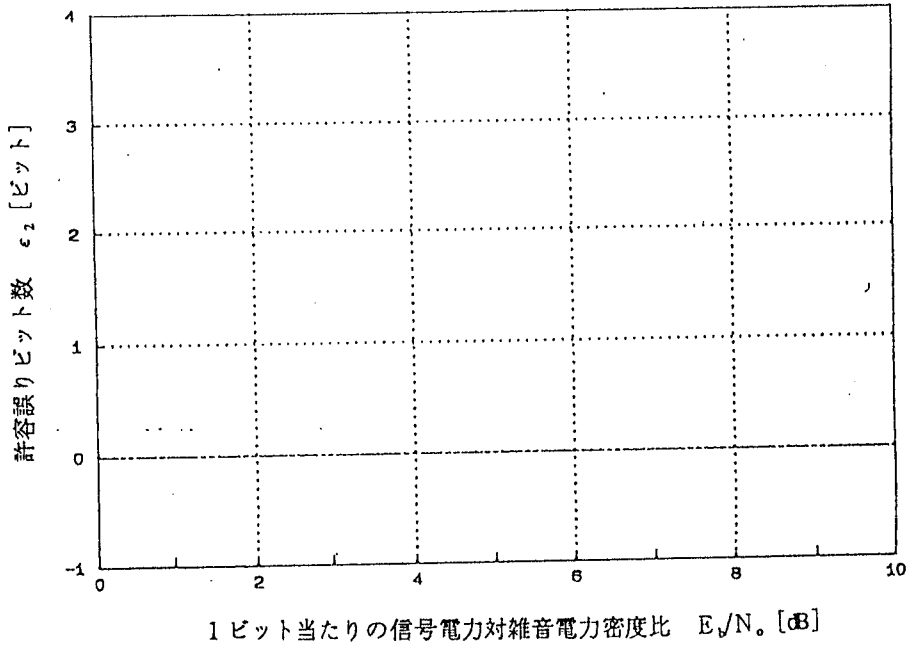


図3.24 平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるとき同期引込み状態における許容誤りビット数 ϵ_2 (硬判定)

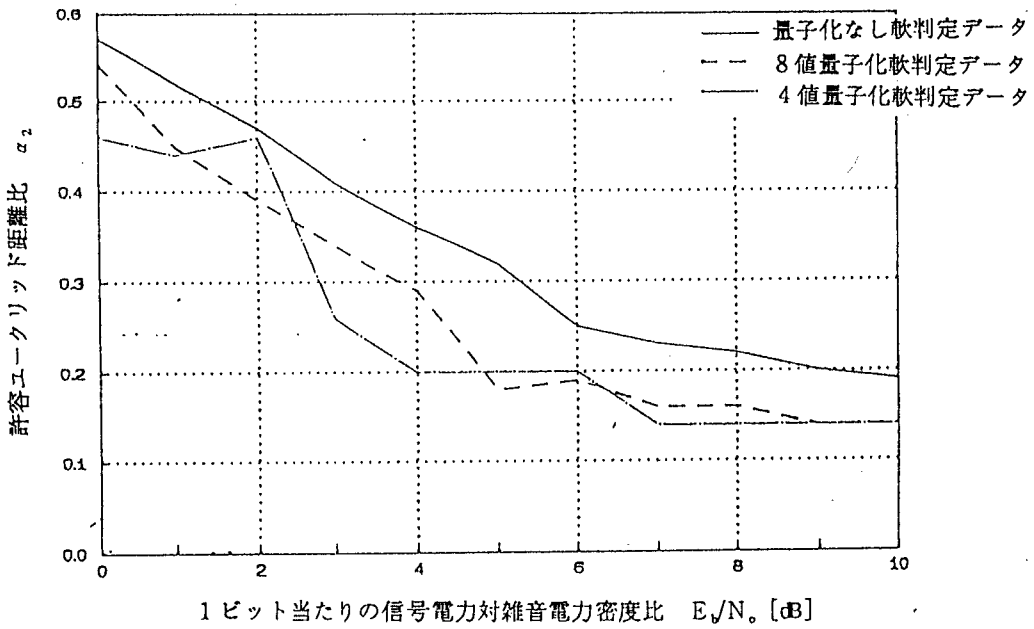


図3.25 平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるとき同期引込み状態における許容ユークリッド距離比 α_2 (軟判定)

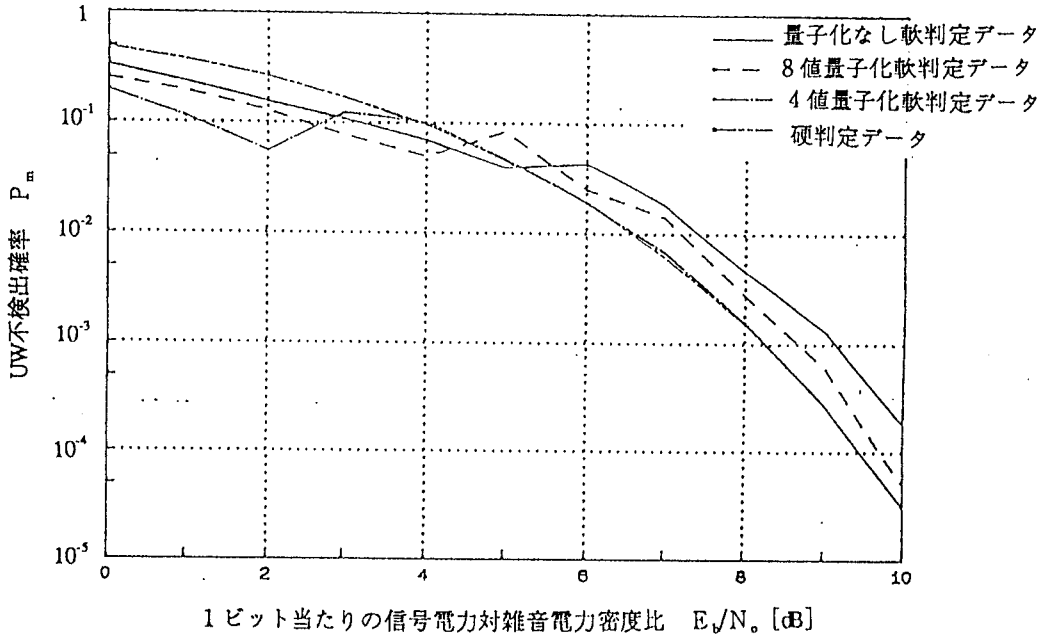


図3.26 平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態における UW不検出確率

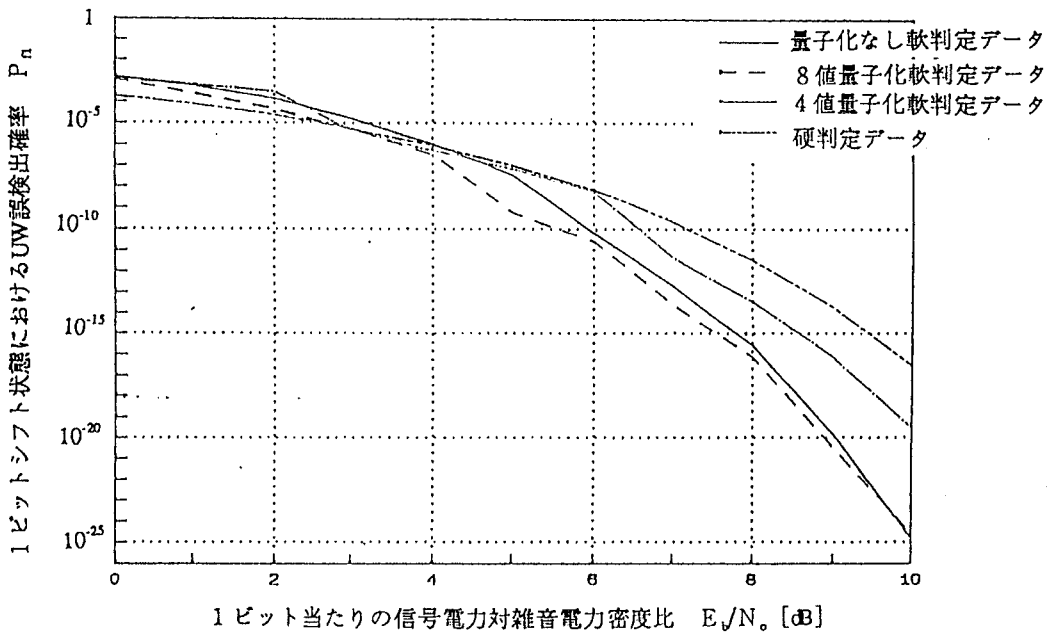


図3.27 平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態における 1 ビットシフト状態の UW誤検出確率

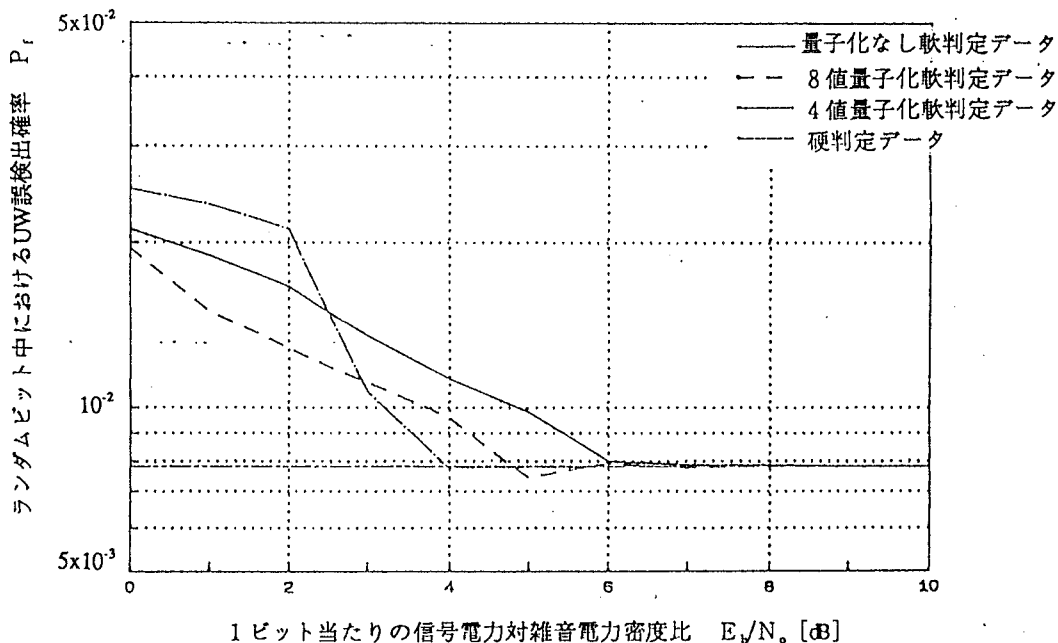


図3.28 平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるときの同期引込み状態におけるランダムビット中のUW誤検出確率

③ UW不検出確率 (図3.26参照)

不検出確率は、2 dB以下の低い E_b/N_0 においては、4値量子化が最も低く、次に8値量子化、量子化を施さない軟判定、硬判定という順になる。6 dB以上の高い E_b/N_0 では、8値量子化と硬判定の不検出確率はほぼ等しくなる。4値量子化の不検出確率は、6 dB以上では、8値量子化及び硬判定より高くなり、量子化を施さない軟判定の不検出確率は、4値量子化よりもさらに高くなる。

④ 1ビットシフト状態におけるUW誤検出確率 (図3.27参照)

1ビットシフト状態における誤検出確率に関しては、3 dB以下の E_b/N_0 では、硬判定の誤検出確率の方が軟判定より低く、3 dB以上では、軟判定の方が低くなる。軟判定の中では、8値量子化の誤検出確率が最も低く、量子化を施さない軟判定は、 E_b/N_0 が高い範囲において、8値量子化と同程度の誤検出確率となる。

⑤ ランダムビット中のUW誤検出確率 (図3.28参照)

ランダムビット中の誤検出確率に関しては、硬判定は0.078125で一定となり、軟判定も E_b/N_0 が高くなるに従って、硬判定と同じ値に収束する。4値量子化は4 dBで、8値量子化は5 dBで、量子化を施さない軟判定は6 dBで各々収束値に近づく。また、平均同期引込み時間が最小値となるときより、 α_2 の値が大きいので、誤検出確率は、平均同期引込み時間が最小値となるときの誤検出確率より、高くなる。特に、4値量子化の誤検出確率は、低い E_b/N_0 の範囲で、非常に増加する。

⑥ 各検出確率のバランスを考慮したUW検出特性

平均同期はずれ検出・同期引込み時間が最小値となるときの α_2 及び ϵ_2 の設定値は、平均同期引込み時間が最小値をとるときの設定値より若干大きい、UW検出特性の優劣はほぼ同様の順位になると考えられる。

3.2.5 UW検出特性を考慮したフレーム同期特性

本節では、同期保持状態と同期引込み状態における各々のUW検出特性及びフレーム同期特性について、各種軟判定と硬判定を比較し、その結果に基づいて、フレーム同期全体の特性を評価するための平均同期引込み時間と平均同期はずれ検出・同期引込み時間を検討する。

(1) 同期保持状態における比較

同期保持状態においては、同期引込み状態より、許容ユークリッド距離比 α_1 と許容誤りビット数 ϵ_1 を大きくとる設定となる。しかし、量子化を施さない軟判定は、計算上 $\alpha_1 < 1.00$ という制約があり、また、硬判定は E_b/N_0 が低いとき ϵ_1 を大きくとると、UW検出特性が著しく劣下する。従って、量子化を施した軟判定と量子化を施さない軟判定及び硬判定では、 α_1 及び ϵ_1 の値がかなり異なるので、UW不検出確率あるいは誤検出確率の値も大きく異なり、最適値をとるときのUW検出特性は比較できない。そこで、同期保持状態におけるフレーム同期特性として、平均同期はずれ検出時間を比較する。

平均同期はずれ検出時間は、

E_b/N_0 が低いとき

1. 8値量子化
2. 4値量子化
3. 量子化を施さない軟判定
4. 硬判定

E_b/N_0 が高いとき

1. 8値量子化
2. 量子化を施さない軟判定
3. 4値量子化
4. 硬判定

という順で短くなる。換言すると、上記は同期保持状態におけるフレーム同期特性が優れている順番である。また、 E_b/N_0 が高いとき、「3. 4値量子化」と「4. 硬判定」の相対的な差はかなり大きい。

(2) 同期引込み状態における比較

同期引込み状態においては、許容ユークリッド距離比 α_2 及び許容誤りビット数 ϵ_2 は、小さい値に設定される。軟判定のUW検出特性は、硬判定の $\epsilon_2 = 0$ における特性にほぼ相当すると考えてよい。同期引込み状態において、UW検出特性が優れている順を敢えて列挙すると、次のようになる。

1. 硬判定
1. 4値量子化
3. 8値量子化
4. 量子化を施さない軟判定

なお、 E_b/N_0 が高くなると、その差は縮まる。

(3) 平均同期引込み時間

図3.4に示した平均同期引込み時間の最小限界値は、同期保持状態と同期引込み状態におけるUW検出特性及びフレーム同期特性の両方の影響を受けた結果である。

① E/N_0 が低い範囲

同期保持状態及び同期引込み状態において特性の優れている8値量子化が、平均同期引込み時間は最も短くなる。量子化を施さない軟判定は、同期保持状態におけるフレーム同期特性が3番目であり、同期引込み状態におけるUW検出特性が最も悪いために、平均同期引込み時間は他の場合に比べて非常に長くなる。

② E/N_0 が高い範囲

同期引込み状態の影響がほとんどなくなるために、同期保持状態におけるフレーム同期特性の順位がそのまま現れる。

(4) 平均同期はずれ検出・同期引込み時間

平均同期はずれ検出・同期引込み時間に関しては、同期引込み状態の影響より同期保持状態の影響が強く、同期保持状態におけるフレーム同期特性の優劣が、そのまま順位として現れる。図3.5に示した平均同期はずれ検出・同期引込み時間は、図3.13に示した平均同期はずれ検出時間に、同期引込み状態におけるUW検出特性の影響を少し加味するとともに、 E/N_0 が低い範囲に対して量子化を施さない軟判定の特性のみを劣下させた形となる。

第4章 あとがき

実用システムへの適用を考慮して、量子化された軟判定データを用いたUW検出の理論を明らかにした後、8ビット長のUWを想定して、各種UW検出特性に関して、硬判定データ及び量子化なしの軟判定データを用いた場合との定量的な比較を行った。さらに、ハードウェア上にUW検出方式のアルゴリズムを構築して、UW検出特性を取得し、理論計算に基づく結果との比較・検討を行った。次いで、UW検出の組合せから構成されるフレーム同期方式に関して、各種フレーム同期特性を理論的に導出する方法を明らかにした後、UW長8ビット、フレーム長256ビット、伝送速度64 kbit/s、平均ミスフレーム時間間隔1年以上という基準を設けた伝送システムを想定して、上記により得られたUW検出特性を導入して、フレーム同期特性に関する定量的評価を実施した。

UW検出特性及びフレーム同期特性に関する定量的評価の結果、明らかになった主要な結論は、以下の通りである。

(1) UW検出特性

同等のUW不検出確率を基準にとった場合に得られるUW誤検出確率の優劣を評価した結果、低い不検出確率の基準に対しては、量子化が細かい程、高い不検出確率の基準に対しては、量子化が粗い程、UW検出特性が良好となることがわかった。即ち、設計目標に応じて、軟判定データに対する量子化数を適宜設定することによって、良好なUW検出特性が達成できることが明らかとなった。この事実は、量子化された軟判定データをUW検出に適用することによって、UW長が低減され、回線の利用効率が向上する可能性が存在すると換言することができる。

また、軟判定データを用いたUW検出方式が、DSPを用いたハードウェアにより具現化できることが明らかとなった。更に、各種UW検出特性に関しては、理論値とほぼ等しい実験結果を得ることができ、理論計算ならびにUW検出アルゴリズムの正当性を確認することができた。

理論解析では、量子化された軟判定データを用いる際に発生する多次元空間内の代表点の数は、UW長と量子化数の増大に伴って、急激に増加し、計算処理が膨大になることから、強力なコンピュータを使用しない限り、今回採用した8ビットのUW長が限界と考えられる。一方、実験的検討は、UW検出確率が低い範囲を除けば、UW長の制限を強く受けないという特徴を有するので、理論解析では、とうてい不可能と考えられる長いUW長に対する特性も取得可能である。

以上の点から、今後は、実験的検討を中心に、更に長いUW長に対する各種検出特性を取得し、特に、上述したUW長の低減効果の観点から、詳細な検討を進める予定である。また、低C/N条件下において、UW不検出確率を低減すべく、軟判定データを非線形変換して用いるUW検出法も提案されており⁽¹²⁾、各種観点からの検討が重要であると判断される。

(2) フレーム同期特性

フレーム同期特性における評価基準として、従来から採用されてきた平均同期引込み時間に加えて、システムの運用により直結した基準として、平均同期はずれ検出・同期引込み時間を新たに定義して、両基準に基づく検討を実施した。

平均同期引込み時間に関しては、 E_b/N_0 が低い範囲では、8値量子化された軟判定データをUW検出に適用した場合が最も優れ、次いで4値量子化された軟判定データ、硬判定データ、量子化なしの軟判定データという順番になることが明らかになった。 E_b/N_0 が高い範囲では、量子化なしの軟判定データと8値量子化された軟判定データを適用した場合が同程度で優れ、次いで4値量子化された軟判定データ、硬判定データという順番になった。

一方、平均同期はずれ検出・同期引込み時間に関しては、 E_b/N_0 が低い範囲では、8値量子化、4値量子化、量子化なしの軟判定データ、硬判定データという順で優れていることが明らかになった。 E_b/N_0 が高い範囲では、平均同期引込み時間と同様に、量子化なしと8値量子化された軟判定データをUW検出に適用した場合が同程度で優れ、次いで4値量子化された軟判定データ、硬判定データという順番になった。

上記のように、8値量子化された軟判定データをUW検出に適用した場合にフレーム同期特性が良好となることが多い。しかしながら、特性の優劣は設定条件によって異なるため、今後は、システムに課される条件とフレーム同期特性の最適化の関係を明かにすべく、なお一層の特性評価が重要である。また、UW検出と同様にハードウェアを用いてフレーム同期方式の具現化を図り、計算結果の正当性を確認することも課題として残されている。

参考文献

- (1) W. Schrempp and T. Sekimoto : "Unique word detection in digital burst communications", IEEE Trans. Commun., COM-16, 4, pp. 597-605 (Aug. 1968).
- (2) 山崎、野原、高畑 : "TDMA運用に基づく国際ビジネス衛星通信システムにおけるフレーム同期に関する検討"、信学技報、CS85-80、1985年10月。
- (3) 藤野 : "多次元軟判定ユニークワード検出方式の理論的考察"、信学論(B)、J69-B、11、pp.1516-1522、1986年11月。
- (4) 笹井、荻窪、高畑 : "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性"、1990年信学秋季全大、B-180、1990年10月。
- (5) 笹井、高畑、荻窪 : "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する理論的検討"、信学技報、SAT91-75、1991年9月。
- (6) 竹薮、蓑毛、高畑 : "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する実験的検討"、信学技報、SAT91-76、1991年9月。
- (7) 荻窪、高畑 : "軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する検討"、1989年信学秋季全大、B-133、1989年9月。
- (8) 荻窪、高畑 : "軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する特性"、1990年信学春季全大、B-218、1990年3月。
- (9) 荻窪、笹井、高畑 ; "軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する理論と特性"、信学技報、SAT90-25、1990年8月。
- (10) 安田、平田、小川 : "ヴィタビ復号における軟判定しきい値の最適間隔"、信学論(B)、J64-B、pp. 1297-1298、1981年11月。
- (11) R. Maruta : "A Simple Firmware Realization of PCM Framing Systems", IEEE Trans. Commun., COM-28, 8, pp. 1228-1233 (Aug. 1980).
- (12) 小島、三宅、藤野 : "非線形変換された軟判定データを用いるユニークワード検出方式"、1991年信学春季全大、B-234、1991年3月。

付録（発表論文集）

軟判定データを用いた フレーム同期方式の特性

Performance of a Frame Synchronization Method using Soft-decision Data

荻窪純一

高畑文雄

Junichi OGIKUBO

Fumio TAKAHATA

早稲田大学 理工学部

Waseda University

1. まえがき

ユニークワード (UW) 検出の際に軟判定データのまま処理する方式⁽¹⁾を、フレーム同期手順に組み込み⁽²⁾、種々のフレーム構成について、特性を評価した。

2. 評価対象としたフレーム同期特性

- ① 平均同期引き込み時間 T_r … 通常の運用状態において、ミスフレームによって同期はずれ状態に落ち込んでから、再び同期を引き込むまでの時間。
- ② 平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} … 瞬断が起こった後に、同期はずれ状態にあることを検出し、同期を引き込むまでにかかる時間。

3. 評価結果

図1は、UW長16ビット、フレーム長512ビットの場合の各種 E_b/N_0 に対する平均同期引き込み時間 T_r と平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} の最小限界値を示したものである。7 dB以下の E_b/N_0 では、 $T_r \cdot T_{sr}$ ともに軟判定データを用いた方が良い特性が得られている。

図2は、 $E_b/N_0=3$ dBの時の最適パラメータ (前方・後方保護段数、UW検出の際の許容誤りビット数・ユークリッド距離) を使い、各種 E_b/N_0 に対し、 $T_r \cdot T_{sr}$ を計算した結果である。図1と図2の比較から、軟判定データを用

いた方が、最小限界値からの劣化が小さい。また、 T_r と T_{sr} は、各々 0.2 フレーム、及び1フレーム程度短くなっている。

図3に $E_b/N_0=6$ dBの時のフレーム長に対する T_r の変化を示す。軟判定と硬判定を比べると、UW長、フレーム長によって、わずかに優劣が現れているが、同程度の特性となる。なお、本稿ではデータを割愛するが、 $E_b/N_0=3, 9$ dBに対しても、同様の傾向を示す。

図4 (a) (b) (c)に、各々 $E_b/N_0=3, 6, 9$ dBの時のフレーム長に対する T_{sr} の変化を示す。フレーム構成、 E_b/N_0 にかかわらず、軟判定データを用いた方が良い結果が得られる。 E_b/N_0 が低い程、絶対時間に関しては、硬判定との差が顕著となる。また、軟判定を用いた場合の硬判定に対する改善比に関しては、 $E_b/N_0=3, 6$ dBでは、UW長、及びフレーム長によって異なる傾向を示す。

4. あとがき

低い E_b/N_0 に対してシステム設計をする場合、軟判定データを用いてフレーム同期を確立する方法が、効果的であると考えられる。

[参考] (1) 藤野, 信学論(B), Vol. J69-B, No. 11, (1986)

(2) 荻窪, 高畑, 平成1年借学秋全大, B-133

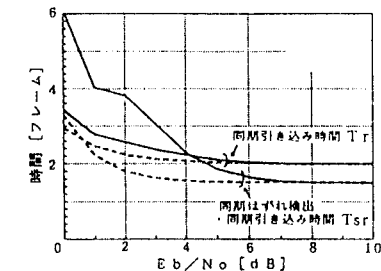


図1 E_b/N_0 に対する同期特性の最小限界値 (UW長: 16[bit], フレーム長: 512[bit])

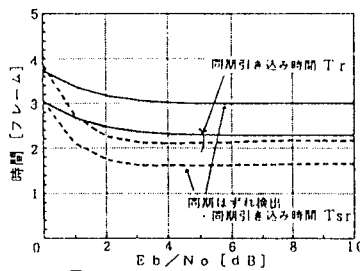


図2 $E_b/N_0=3$ [dB]の最適パラメータによる同期特性

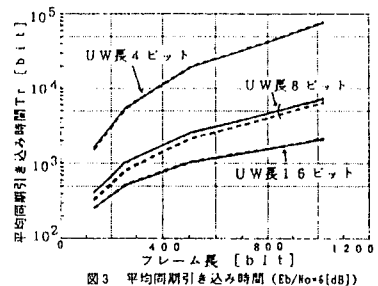
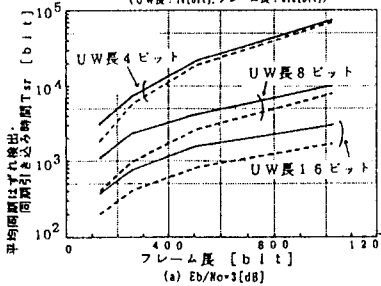


図3 平均同期引き込み時間 ($E_b/N_0=6$ [dB])



(a) $E_b/N_0=3$ [dB]

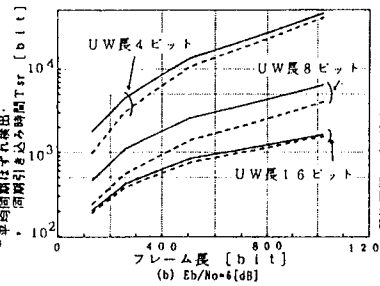
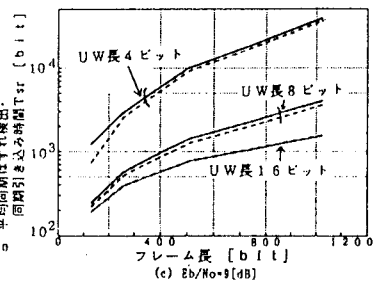


図4 平均同期はずれ検出・同期引き込み時間



(c) $E_b/N_0=9$ [dB]

(64[kbit/s]) BPSK連続信号、平均ミスフレーム時間間隔1年以上、
実線——硬判定データを用いた場合、破線----軟判定データを用いた場合)

SAT 90-25
M W 90-75

軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する
理論と特性

荻 窪 純 一・笹 井 裕 之
高 畑 文 雄
（ 早 大 ）

1990年8月24日

EIC 社団法人 電子情報通信学会

軟判定データを用いた フレーム同期方式に関する理論と特性

Theory and Performance of Frame Synchronization Method
using Soft-decision Data

荻窪 純一
Junichi OGIKUBO

笹井 裕之
Hiroyuki SASAI

高畑 文雄
Fumio TAKAHATA

早稲田大学 理工学部
Waseda University

1. まえがき

位相偏移変調 (PSK; Phase Shift Keying) 方式を用いたデジタル伝送システムにおいては、フレーム同期を確立することが不可欠であり、これらは通常、フレーム内に配置されたフレーム同期用ビットパターン (ユニークワード、以下 UW と称す) の検出によって行われる。

UW の受信は、受信側において復調ビットを "0" または "1" の 2 値に硬判定した後、ハミング距離を尺度とした相関特性をとることによって UW を検出する方法が広く採用されている。ところで、最近、良好な符号誤り率特性が達成できるという理由から、畳み込み符号化 / ビタビ復号化や逐次復号化などの誤り訂正 (FEC; Forward Error Correction) 方式を PSK 変復調方式と組み合わせるデジタル伝送方式が積極的に使用される傾向にある。このような伝送方式では、PSK 復調器からの出力信号は多値の軟判定データとして、FEC 復号器に引き渡される。

UW 検出に関しても、従来のように復調信号を硬判定せず、他の伝送情報ビットと同様に軟判定復調データのままで処理することが可能である。この軟判定データからフレーム同期を確立すれば、従来の 2 次元処理ではなく、多次元の信号処理ができるようになるため、フレーム同期特性を改善できる可能性がある。事実、丸めのない連続した値を有する軟判定データを用いた場合の UW 検出⁽¹⁾を拡張して、フレーム同期手順に組み込み、理論解析を行った結果、軟判定データを用いることによって、システムの要求に柔軟に対応することが可能となり、フレーム同期特性が改善されることが判明した。⁽²⁾⁽³⁾

本稿では、実用システムへの適用を考慮して、離散的な値を有する量子化された軟判定データを用いた場合の UW 検出方式の理論を新たに紹介する。なお、比較の対象とする丸めのない軟判定データを用いた場合の UW 検出方式についても、簡単に述べる。その後、フレーム同期方式の理論について述べ、量子化された軟判定データ、

丸めのない軟判定データ、硬判定データを各々用いた場合のフレーム同期特性について、定量的な比較、検討を行う。

2. 軟判定データを用いた UW 検出方式の理論

受信 UW の各ビットには、それぞれ独立にガウス雑音が重畳しているため、これらの雑音の付加した受信 UW は互いに直交するベクトル空間上に分布する。即ち、受信 UW は多次元空間内のベクトルで表現でき、共分散が 0 の多変量ガウス分布に従う。従って、多次元空間内のベクトルとして与えられる送信 UW と受信 UW とのユークリッド距離を尺度として相関をとることにより、UW の判定を行うことができる。

一例として、図 1 に示すように、UW 長を 3 ビットと仮定した場合の 3 次元ベクトル空間を考える。受信信号を 3 次元の受信ベクトル X で表し、UW パターンを 3 次元の UW ベクトル O で表すことにする。この時、許容ユークリッド距離 (しきい値) を ϵ とし与え、 $\|X - O\| \leq \epsilon$ の場合、即ち半径 ϵ の超球内に X が存在するとき、受信ベクトル X は UW として検出される。また、 X が超球外に存在する、 $\|X - O\| > \epsilon$ の場合、UW は不検出となる。

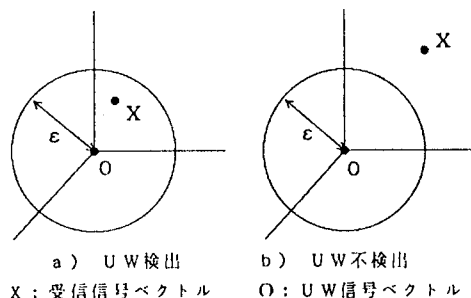


図 1 ユークリッド距離の概念に基づき
3次元空間内で考えた UW 検出

一方、UWパターンと異なる符号語が送信され、その受信ベクトルAとUWOとの間のユークリッド距離が、 $\|A-O\| \leq \epsilon$ の場合、UW誤検出となる。

2.1 丸めのない軟判定データを用いる場合

受信信号中の1ビット当りのエネルギーを E_b 、白色雑音の片側電力密度を N_0 とし、Mビットで構成される送信UWおよび受信データが、M次元空間内の原点O ($x_i = 0, i \in \{1, M\}$) および点X (座標: $(x_M, x_{M-1}, \dots, x_1) = X$) に存在する場合のUWの正検出確率 P_o 、不検出確率 P_n およびランダムビット系列中での誤検出確率 P_f は、各々次式で与えられる。(1)

$$P_o = P_r [\|X-O\| \leq \epsilon | O] \\ = \int_0^\epsilon \frac{2}{\Gamma(M/2)} \frac{r^{M-1}}{(\sqrt{N_0})^M} \exp \frac{-r^2}{N_0} dr \quad (1)$$

$$P_n = P_r [\|X-O\| > \epsilon | O] \\ = \exp \left[\frac{-E_b}{N_0} (2\delta)^2 \right] \frac{\Gamma(M/2)}{\Gamma(M/2-k)} \frac{(2\delta)^{M-2-2k}}{(E_b/N_0)^{M-2-k}} \quad (2)$$

$$P_f = P_r [\|X-O\| \leq \epsilon | A] \\ = \frac{2(E_b/N_0)^{M/2}}{\sqrt{\pi} \Gamma((M-1)/2)} \\ \cdot \int_0^\pi \cos^{M-2} \phi_n \exp \left[\frac{-E_b}{N_0} \cdot 4f \cos^2 \phi_n \right] d\phi_n \\ \cdot \int_0^{2\delta} r^{M-1} \exp \left[\frac{-E_b}{N_0} (l-2\sqrt{T} \sin \phi_n)^2 \right] dl \quad (3)$$

但し、 $\delta \equiv \epsilon/2\sqrt{E_b}$ 、 f は符号語AとUWOとの間のハミング距離である。

また、UW位置からbビット偏移した位置での誤検出確率 P_{fb} は次式で与えられる。

$$P_{fb}(E) = \frac{E+b}{E-b} \frac{C_1-E}{2b} P_{f-i} \quad (4)$$

ここで、Eは検出器とUWの交わり部分におけるビットパターンの不一致ビット数とする。

2.2 量子化された軟判定データを用いる場合

送信ビットx (1または-1) に対する軟判定データの信号レベルrは、次式で表される。

$$r = \sqrt{E_b} x + n \quad (5)$$

但し、nは平均値0で分散 $N_0/2$ のランダム変数である。

軟判定データは、予め定められた軟判定しきい値 b_n ($n = 1 \sim N-1, b_0 = -\infty, b_N = +\infty$) によって分割されたN個の軟判定領域のいずれに信号レベルrが属するかにより、その領域に対応する量子化された軟判定データ d_i ($i = 0 \sim N-1$) としてFEC復調器に引き渡される。

図2は信号レベルrをN値量子化した様子を示したものである。但し、図中のTは閾値間隔で、 E_b/N_0 、量子化数によって決まる定数である。

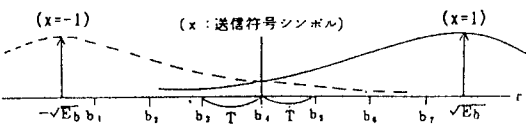


図2 軟判定データに対するN値量子化

さて、本稿で主題としているUW検出において用いる信号振幅値 a_n としては、信号レベルrが区間 (b_n, b_{n+1}) に落ち込む確率から算出される期待値を採用する。即ち、区間 (b_n, b_{n+1}) に落ち込む信号レベルrを信号振幅値 a_n に代表させる。

送信ビットがxのとき、復調器で信号レベルrを復調する確率 $P(r, x)$ は、

$$P(r, x) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \cdot \exp \frac{-(r-x\sqrt{E_b})^2}{N_0} \quad (6)$$

で与えられるので、量子化された軟判定データ d_n が出力され、信号振幅値 a_n が採用される確率 $Q(a_n, x)$ は次式で与えられる。

$$Q(a_n, x) = \int_{b_n}^{b_{n+1}} P(r, x) dr \quad (7)$$

なお、UW検出に用いる信号振幅値 a_n は、ビット“1”と“0”のいずれが送信されているのか不明である点を考慮して、次式を用いて算出する。

$$a_n = \frac{1}{\int_{b_n}^{b_{n+1}} \frac{P(r, 1)+P(r, -1)}{2} dr} \int_{b_n}^{b_{n+1}} r \frac{P(r, 1)+P(r, -1)}{2} dr \\ = \frac{1}{Q(a_n, 1)+Q(a_n, -1)} \int_{b_n}^{b_{n+1}} r (P(r, 1)+P(r, -1)) dr \quad (8)$$

UW長Mビット、N値量子化の場合、量子化された受信データ (信号振幅系列) はM次元空間内の N^M 個の代表点として表現される。UW長3ビット、8値量子化の代表点の様子を図3に示す。

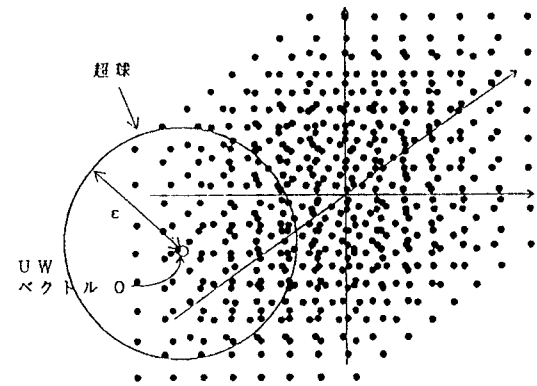


図3 3次元空間内における8値量子化の代表点

送信データを $X = \{x_0 \sim x_{M-1} | x_i \in \{0, 1\}\}$ 、受信データを $Y = \{y_0 \sim y_{M-1} | y_i \in \{a_n | n=0, \dots, N-1\}\}$ とすると、Yの生起確率 $P_r(Y)$ は次式で与えられる。

$$P_r(Y) = \prod_{i=0}^{M-1} Q(y_i, x_i) \quad (9)$$

許容ユークリッド距離を ϵ 、多次元空間内の個々の点で表される受信データYとUWとのユークリッド距離を r_0 とした場合、受信データYが正検出される条件は、 $r_0 \leq \epsilon$ で与えられ、 N^M 個の全ての点のうち、この条件を満足する点の生起確率の総和を次式のように求めるこ

とによって、正検出確率 P_o が得られる。

$$P_o = \sum_k P_r(Y_k) \quad (10)$$

(Σ は正検出される点についての総和)

例えば、図3においては、半径 ϵ の超球内に含まれる全ての点の生起確率の総和が正検出確率となる。

一方、 $r_{\theta} > \epsilon$ が成り立つとき、受信データ Y は不検出される。即ち、不検出確率 P_n は M 次元空間内で $r_{\theta} > \epsilon$ の条件を満足する全ての点の生起確率の総和として求められる。

$$P_n = \sum_k P_r(Y_k) \quad (11)$$

(Σ は不検出される点についての総和)

最後に、情報ビットを含む、受信データ Y が UW として誤って検出される、 UW 誤検出の条件は、正検出と同じく、 $r_{\theta} \leq \epsilon$ となる。誤検出には、 UW のパターンの一部と重複した位置で誤検出する場合と、ランダムビット系列と考えられる情報ビット中で誤検出する場合の2種類が存在する。前者の場合、 UW から b ビットずれた送信データ X のパターンの数は 2^b である。これらのパターンに $1 \sim 2^b$ まで番号をつけた、 $X_i (i=1 \sim 2^b)$ に対する M 次元空間内の各点の生起確率を $P_r(Y_{ik})$ とすれば、 X_i が誤検出される確率 P_{ri} は、次式で与えられる。

$$P_{ri} = \sum_k P_r(Y_{ik}) \quad (12)$$

(Σ は誤検出される点についての総和)

従って、 b ビットずれた場合の全誤検出確率 P_{rb} は、次式となる。

$$P_{rb} = \sum_{i=1}^b \frac{P_{ri}}{2^b} \quad (13)$$

また、後者のランダムビット系列からなる情報ビット中の全誤検出確率 P_{rn} は、式(13)において $b=M$ とおいた場合に等しく、次式で与えられる。

$$P_{rn} = \sum_{i=1}^M \frac{P_{ri}}{2^M} \quad (14)$$

3. フレーム同期方式の理論

図4はフレーム同期フローを示したものである。(5) 同図において、状態 S_0, S_1 は同期を保持している状態であり、状態 S_2, S_3 は同期引き込みを行っている状態である。また、誤った同期引き込みおよび同期はずれの確率を低く抑えるために、前方保護として N_1 段、後方保護として N_2 段を設ける。

3.1 ミスフレーム

状態 S_0 は、 UW を正確に検出し、同期を引き込んでいた状態であり、この状態から状態 S_1 を経て N_1 回連続して UW を不検出してしまつて同期をはずしてしまふ。この状態遷移をミスフレームと呼び、図5のシグナルフローグラフで表される。図中の節点 $a_0, a_{1..i} (i=1 \sim N_1-1), a_2$ は、各々状態 S_0, S_1, S_2 に相当し、 p_0, p_1 は各々状態 S_0, S_1 における UW 不検出確率であり、 M は1フレームのシンボル数、 Z は1シンボル分の時間遅延を意味する。

図5より、状態 S_0 から状態 S_2 への伝達関数 $Q_n(Z)$ は次式で与えられる。

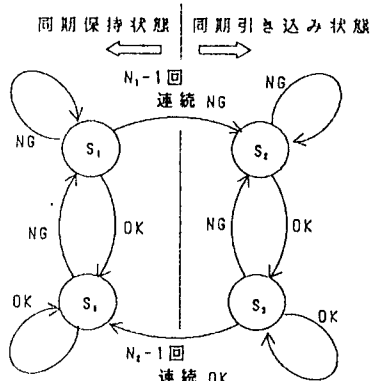
$$Q_n(Z) = \frac{(1-P_1 Z^M) P_n P_1^{M-1} Z^{M(N-1)}}{1-Z^M [1+(P_1-P_0)(1-Z^M) - (1-P_1) P_0 P_1^{M-1} Z^{MN}]} \quad (15)$$

また、状態 S_0 から状態 S_2 への状態遷移に要する時間の

期待値、即ち、平均ミスフレーム時間間隔は、

$$Q_n'(1) = -M - \frac{M}{1-P_1} + \frac{M(1-P_1+P_0)}{(1-P_1)P_0P_1^{M-1}} \quad [\text{シンボル}] \quad (16)$$

で与えられる。



○ K : UW 検出 NG : UW 不検出
 S_0 : Normal State S_2 : Search State
 S_1 : Search Standby State S_3 : Search Pause State

図4 フレーム同期の状態遷移図

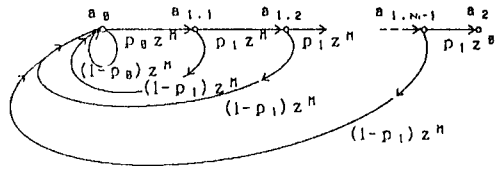


図5 ミスフレームのフロー

3.2 同期はずれ検出

状態 S_0 において、受信信号系列中の誤った位置で UW をとらえ、誤った同期を引き込んでいる場合、現在の状態が同期はずれであることを検出し、同期を取り直さなければならぬ。即ち、状態 S_0 から N_1 回連続して UW を誤検出せず、同期をはずして状態 S_2 へ移る。この同期はずれを検出するのに要する平均時間を平均同期はずれ検出時間と呼ぶ。

UW 位置から i シンボルずれた位置での、状態 S_0 から状態 S_2 への伝達関数 $Q_0(Z, i)$ は、状態 S_0, S_1 における UW 誤検出確率を各々 $q_0(i), q_1(i)$ とすれば、図5のシグナルフローグラフにおいて、 $p_0 = 1 - q_0(i)$ 、 $p_1 = 1 - q_1(i)$ と置き換えればよいので、次式で与えられる。

$$Q_0(Z, i) = \frac{[1 - (1 - q_1(i)) Z^M] (1 - q_0(i)) (1 - q_1(i))^{(N-1)} Z^{M(N-1)}}{1 - Z^M [1 + (q_0(i) - q_1(i)) (1 - Z^M) - q_1(i) (1 - q_0(i)) (1 - q_1(i))^{M-1} Z^{MN}]} \quad (17)$$

従って、平均同期はずれ検出時間は、次式で与えられる。

$$Q_0'(1, i) = -M - \frac{M}{q_1(i)} + \frac{M(1+q_1(i)-q_0(i))}{q_1(i)(1-q_0(i))(1-q_1(i))^{M-1}} \quad [\text{シンボル}] \quad (18)$$

3.3 同期引き込み

状態 S_2 では、受信信号系列中で、 UW を判定する位置を1シンボルずつずらして、正確な UW の位置を検索する。 UW を検出した場合には、検索を一時的に中止し、状態 S_3 へ移り、次のフレーム中の同じ位置において UW の判定を行う。状態 S_2 から N_2 回連続して、フレーム中の同じ位置で UW を検出できれば、検出器が正確な位置で UW をとらえ、同期引き込みに成功したと考える。ミスフレーム後、状態 S_2 から正しい同期を引き込み、状態 S_0 へ移るまでに要する時間を平均同期引き込み時間と呼び、その状態遷移図を図6に示す。

図6の節点 $b_{1,0}$ ($i=0 \sim M$) は状態 S_2 、節点 $b_{i,j}$ ($i=1 \sim M, j=1 \sim N_2-1$) は状態 S_3 に相当する。節点 $b_{i,n}$ ($i=1 \sim M-1$) はフレーム中の誤った位置で同期を引き込んで状態 S_0 に存在すること、節点 $b_{n,n}$ は正しく同期を引き込んで状態 S_0 に落ち着くことを表している。また、 $q_2(i)$ 、 $q_3(i)$ は、フレーム中の UW の位置より i シンボルシフトした位置での状態 S_2, S_3 における誤検出確率、 p_2 、 p_3 は各々状態 S_2, S_3 における UW 位置での不検出確率を示す。

節点 $b_{0,0}$ から $b_{n,n}$ への伝達関数、即ち、ミスフレーム後、状態 S_2 から正しく同期を引き込み、状態 S_0 へ移るまでの伝達関数 $Q_R(z)$ は、次式で与えられる。

$$Q_R(z) = \frac{z \prod_{i=1}^M Q_0(z, i) \{ (1-p_2)z^n \cdot \{ (1-p_3)z^n \}^{N_2-1} \}}{1 - \prod_{i=1}^M Q_0(z, i) \{ p_2z + (1-p_2)z^n p_3 z \sum_{k=0}^{N_2-2} \{ (1-p_3)z^n \}^k \}} \quad (19)$$

ここで、 $Q_0(z, i)$ は $b_{1,0}$ から $b_{i+1,0}$ への伝達関数で次式で表される。

$$Q_0(z, i) = (1-q_2(i))z + (1-q_3(i))zq_2(i)z^n \sum_{k=0}^{N_2-2} \{ q_3(i)z^n \}^k + Q_D(z, i)zq_2(i)z^n \{ q_3(i)z^n \}^{N_2-1} \quad (20)$$

但し、上式中の $Q_D(z, i) \cdot z$ は、節点 $b_{i,n}$ から $b_{i+1,0}$ への伝達関数であり、 $Q_D(z, i)$ は式(17)で与えられる。

従って、ミスフレーム後、正しく同期を引き込むまでに要する時間の期待値、即ち平均同期引き込み時間 T_r は次式で与えられる。

$$T_r = Q_R'(1) - M = M(N_2-1) + 1 + \frac{\sum_{i=1}^{N_2-1} Q_0'(1, i) + p_2}{(1-p_2)(1-p_3)^{N_2-1}} + \frac{p_3 \sum_{k=1}^{N_2-1} (kM+1)(1-p_3)^{k-1}}{(1-p_3)^{N_2-1}} \quad [\text{シグマ}] \quad (21)$$

3.4 同期はずれ検出・同期引き込み

システムが稼動している時に瞬断が起こった場合を想定すると、瞬断後、システムが再び稼動し始める時には、図4の状態 S_0 において、同期はずれ状態にあることを検出し、同期をはずして、正確な同期を引き込む必要がある。これは、図6の節点 $b_{i,n}$ ($i=1 \sim M-1$) から $b_{n,n}$ への状態遷移に相当する。この伝達関数 $Q_{DR}(z, i)$ は、次式で与えられる。

$$Q_{DR}(z, i) = \frac{Q_D(z, i) \cdot \prod_{j=1}^i Q_0(z, j) \cdot (1-p_2)z^n \cdot \{ (1-p_3)z^n \}^{N_2-1}}{1 - \prod_{j=1}^i Q_0(z, j) \cdot \{ p_2z + (1-p_2)z^n p_3 z \sum_{k=0}^{N_2-2} \{ (1-p_3)z^n \}^k \}} \quad (22)$$

瞬断後、フレーム中のどの位置から再びシステムが稼動するかを等確率と仮定すると、同期はずれ検出・同期引き込み時間の平均値 T_{sr} は、次式で与えられる。

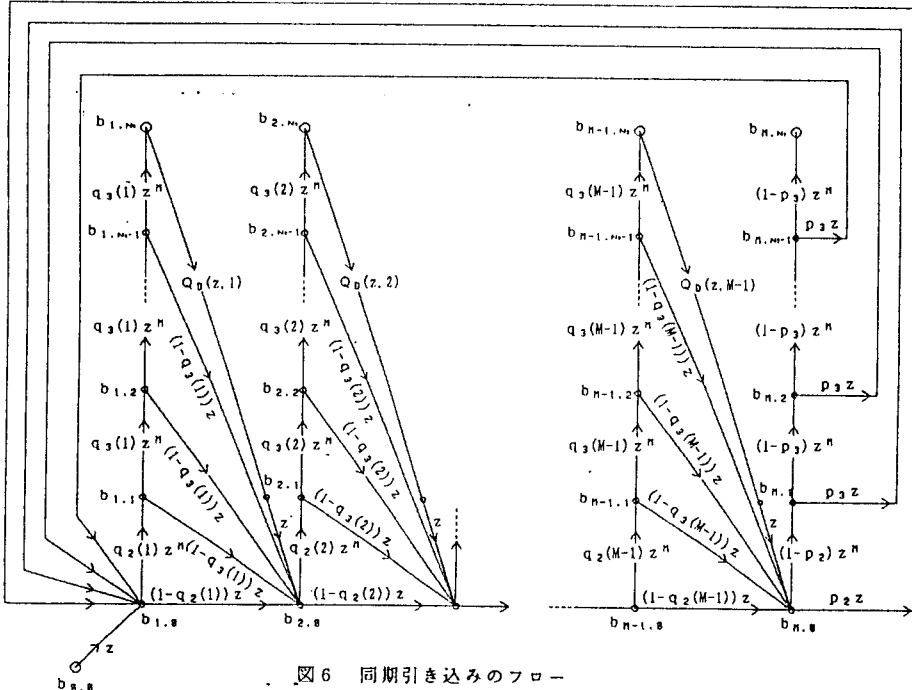


図6 同期引き込みのフロー

$$T_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1-1} Q_{DR'}(1, i)}{M-1}$$

$$= Q_R'(1) - 1 + \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{N_1-1} Q_D'(1, i)$$

$$- \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{N_1-1} \sum_{j=1}^i Q_B'(1, j) \quad \text{〔ツツ本 7〕 (23)}$$

4. フレーム同期特性の定量的評価

UWの判定基準となる許容ユークリッド距離は、同期保持状態(状態 S_0, S_1)において ε_1 、同期はずれ状態(状態 S_2, S_3)において ε_2 と区別して与える。初期条件として、平均ミスフレーム時間間隔を1年以上とし、0~10dBの各Eb/Noに対して、前方保護段数 N_1 、後方保護段数 N_2 、許容ユークリッド距離 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ を変化させて、各Eb/Noに対する平均同期引き込み時間 T_r 、平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} の最小値を導出して、丸めない軟判定データ、量子化を施した軟判定データ、硬判定データを用いた場合の特性を比較、検討する。

対象とするシステムは、差動符号化を施した64kbit/sの2相PSK連続信号とし、UW長とフレーム長の組み合わせとして、(4ビット, 128ビット)と(8ビット, 256ビット)を想定する。

UW長を4ビット、フレーム長を128ビットとした場合の平均同期引き込み時間 T_r 、平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} の各Eb/Noに対する最小値を、各々図7及び図8に示す。

これらの結果より、以下のことがわかる。

①平均同期引き込み時間 T_r に関しては、量子化を施さない(丸めない)軟判定データを用いた場合、Eb/No 4 dB以下では硬判定より悪い特性になる。一方、量子化を施したデータを用いた場合、4 dB以下でも良好な特性が得られ、4 dB以上では量子化を施さない軟判定データを用いた場合と同等の特性となる。量子化を施した軟判定データの使用は、量子化を施さない軟判定データと硬判定データで得られる特性の中間の値をとることはなく、Eb/No 0~10 dBのほぼ全域にわたって最良の特性を実現する。

②平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} は、量子化を施さない軟判定データでも、硬判定データより良好な特性が得られるが、量子化を施した軟判定データを用いることによって、さらに優れた特性が得られる。同様に、UW長を8ビット、フレーム長を256ビットとした場合の平均同期引き込み時間 T_r 、平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} の各Eb/Noに対する最小値を、各々図9及び図10に示す。

UW長4ビットの場合と同様に、平均同期引き込み時間 T_r と平均同期はずれ検出・同期引き込み時間 T_{sr} の両者とも、Eb/Noの低い範囲では量子化を施した軟判定データを用いる場合に最も良好な特性が得られる。また、Eb/Noの高い範囲では、量子化を施さない軟判定データを用いた場合と同等の特性になり、やはり最良となる。

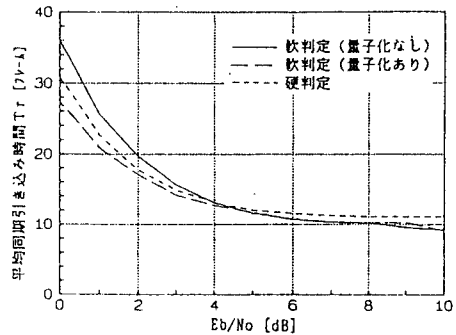


図7 Eb/Noに対する平均同期引き込み時間の最小値 (UW長: 4ビット、フレーム長: 128ビット)

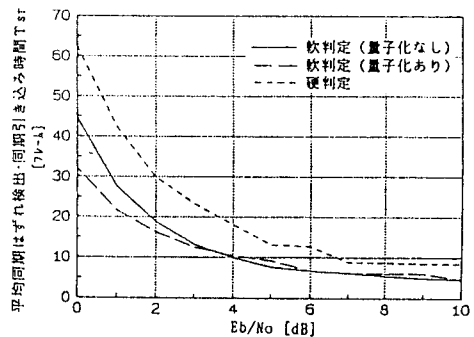


図8 Eb/Noに対する平均同期はずれ検出・同期引き込み時間の最小値 (UW長: 4ビット、フレーム長: 128ビット)

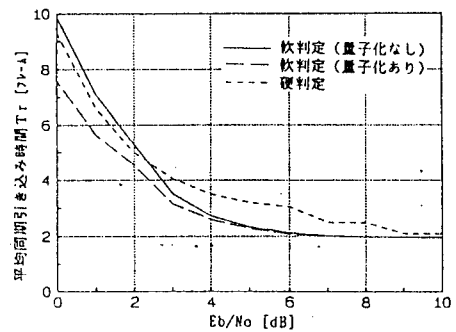


図9 Eb/Noに対する平均同期引き込み時間の最小値 (UW長: 8ビット、フレーム長: 256ビット)

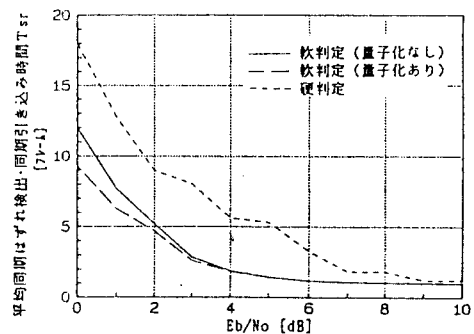


図10 Eb/Noに対する平均同期はずれ検出・同期引き込み時間の最小値 (UW長: 8ビット、フレーム長: 256ビット)

なお、参考として、図9に示した E_b/N_0 に対する平均同期引き込み時間の最小値をとるときの最適パラメータ（前方・後方保護段数 N_1, N_2 、軟判定データの許容ユークリッド距離 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 、硬判定データの許容誤りビット数 h_1, h_2 ）を、各々図11から図14に示す。

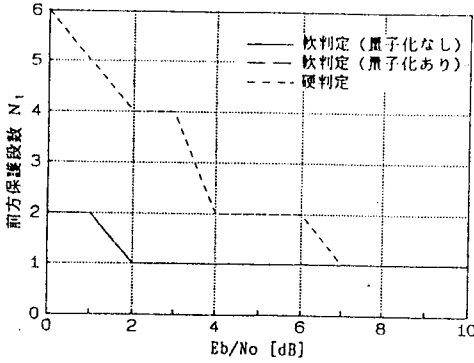


図11 E_b/N_0 に対する前方保護段数 N_1 の変化

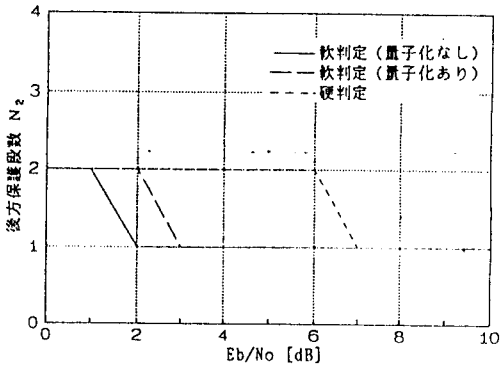


図12 E_b/N_0 に対する後方保護段数 N_2 の変化

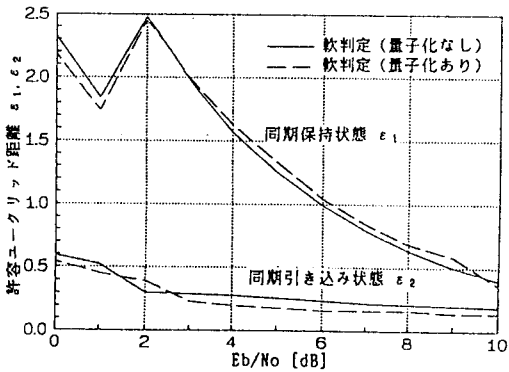


図13 E_b/N_0 に対する許容ユークリッド距離 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ の変化

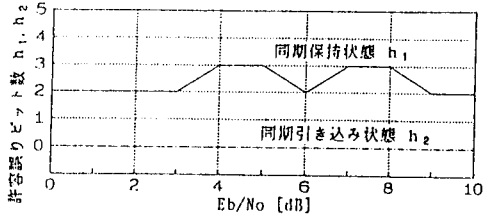


図14 E_b/N_0 に対する許容誤りビット数 h_1, h_2 の変化

5. あとがき

丸めのない（量子化を施さない）軟判定データ、及び実用システムへの適用を考えて、量子化を施した軟判定データを用いてUW検出を行う方式を、フレーム同期手順に組み込むことによって、フレーム同期特性の改善を追求した。

まず、軟判定データを用いたUW検出方式、及びフレーム同期方式の理論について述べた。

次に、フレーム同期特性として、定常状態の場合、平均同期引き込み時間、瞬断を想定した場合、平均同期はずれ検出・同期引き込み時間の2種類の特性を定量的に評価した。その結果、量子化を施した軟判定データを用いてフレーム同期を確立する手法が、丸めのない軟判定データ、及び硬判定データを用いる両者の場合より良好な特性が得られることが明らかとなった。

参考文献

- (1) 藤野：“多次元軟判定ユニークワード検出方式の理論的考察”，信学論(B), J69-B No.11, 1986年11月
- (2) 荻窪、高畑：“軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する検討”，平成1年度信学秋全大, B-133, 1989年9月
- (3) 荻窪、高畑：“軟判定データを用いたフレーム同期方式の特性”，平成2年度信学春全大, B-218, 1990年3月
- (4) 安田、平田、小川：“ウィタビ復号における軟判定しきい値の最適間隔”，信学論(B), J64-B No.11, 1981年11月
- (5) R. Maruta: "A Simple Firmware Realization of PCM Framing Systems", IEEE Trans. on, Vol. COM-28, No. 8, August 1980

B-180 量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出方式の特性

Performance of Unique-Word Detection Method with Quantized Soft-Decision Data

笹井 裕之 荻窪 純一 高畑 文雄
Hiroyuki SASAI Junichi OGIKUBO Fumio TAKAHATA

早稲田大学 理工学部
Waseda University

1. まえがき

連続振幅を有するPSK復調信号(軟判定データ)を用いたユニークワード(UW)検出方式については、既に報告がなされている。⁽¹⁾本稿では、実用システムへの適用を考慮して、PSK復調器から誤り訂正復調器に引き渡される量子化された軟判定データを用いたUW検出方式およびその特性について検討したので報告する。

2. 量子化された軟判定データを用いたUW検出方式

① 軟判定データの量子化

N値に量子化する場合、送信ビットx(または-1)に対する同期検波後のベースバンド信号レベルは、予め定められた軟判定閾値 $b_k = (N/2 - k)T$ ($k=1 \sim N-1, b_0 = -\infty, b_N = +\infty$)によってN個の軟判定領域に分割される。ここで、Tは E_b/N_0 、量子化数によって定まる最適軟判定閾値間隔である。⁽²⁾復調器では、シンボル・タイミング点での受信信号レベルrがどの軟判定領域に属するかを判定して、その領域に対応する量子化された軟判定データ d_n を復調データとして出力する。送信ビットがxのとき、復調器で信号レベルrを受信する確率 $P(r, x)$ は、

$$P(r, x) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{(r - x\sqrt{E_b})^2}{N_0}\right)$$

で与えられるので、 d_n を復調データとして出力する確率 $Q(d_n, x)$ は次式で与えられる。

$$Q(d_n, x) = \int_{b_n}^{b_{n+1}} P(r, x) dr$$

軟判定データを用いたUW検出において用いる受信信号振幅としては、信号振幅rが区間 $[b_n, b_{n+1})$ に落ち込む確率 $\{P(r, 1) + P(r, -1)\} / 2$ から算出される期待値を採用する。

② UW検出方式

UW長Mビット、N値量子化の場合、量子化された受信データ(信号振幅系列)は、M次元空間内の N^M 個の点として表現される。UW検出は送信UWと受信データとの間のユークリッド距離を求めることを行う。例えば、許容ユークリッド距離を ϵ とすると、UWを中心半径 ϵ の超球内に受信データが落ち込めば、正検出されることになる。

なお、量子化された軟判定データを用いる本方式では、多次元空間内に存在す

る受信データと正規または位相が反転したUWパターンとのユークリッド距離から各検出特性を得るため、連続振幅を有する軟判定データを用いたUW検出に関する理論解析で除外されている、超球が重なり合う領域にも適用できる。

3. 検出特性に関する評価

変調方式としてQPSK、UW4ビット(Pch:00, Qch:01)、8値量子化の場合の理論解析を行った。図2~図5は、許容ユークリッド距離 $\epsilon = \sqrt{\alpha M E_b/2} = \sqrt{2\alpha E_b}$ において、 α に対する各検出特性を計算した結果である。これらの図には、超球が重なり合わない、 $\alpha < 1$ の範囲に対して、量子化を行わない場合の特性⁽³⁾も点線で示した。

各特性とも、量子化されたデータを用いることにより、階段状の変化を示しており、特に E_b/N_0 が高くなるにつれ、その変化は顕著である。正検出及び不正検出に関しては、 E_b/N_0 が高いと、量子化を行う場合の方が良好な特性であり、 E_b/N_0 が低いと、 α が小さい範囲で量子化を行わない場合の方が良好な特性となる。位相誤検出に関しては、 E_b/N_0 が高いと、量子化を行わない場合の方が良好な特性であり、 E_b/N_0 が低いとほぼ同程度の特性を示す。誤検出に関しては、 E_b/N_0 が3dB以上で、 $\alpha = 0.5 \sim 1.0$ において、ほぼ一定の値をとる。

4. あとがき

実用システムへの適用に重点をおいて、量子化された軟判定データを用いたUW検出方式およびその特性について解析した。

- [参考] (1) 藤野, 信学論(B), Vol. J69-B, No. 11, (1986)
(2) 安田他, 信学論(B), Vol. J64-B, No. 11, (1983)
(3) 荻窪, 高畑, 平成2年信学春全大, B-218

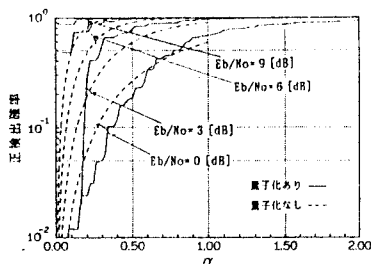


図2 正検出特性

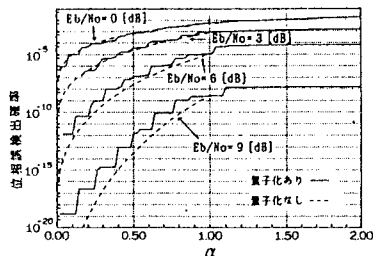


図3 位相誤検出特性

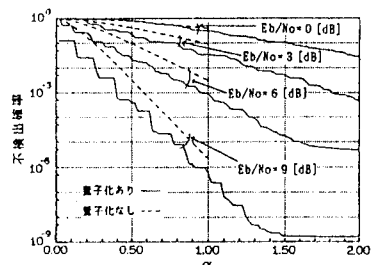


図4 不正検出特性

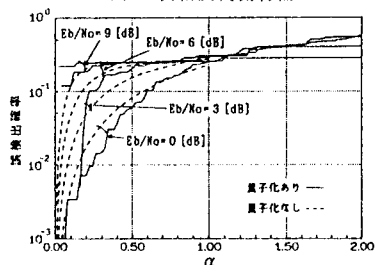


図5 誤検出特性

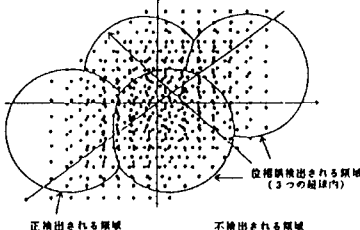


図1 3次元空間内におけるUW検出(正検出、不正検出、位相誤検出)

量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出
特性に関する理論的検討

笹井裕之・高畑文雄
(早大)
萩窪純一
(ソニー)

1991年9月19日

EIC 観電子情報通信学会

量子化された軟判定データを用いた ユニークワード検出特性に関する理論的検討

Theory of Unique Word Detection Characteristics using Quantized Soft-Decision Data

笹井 裕之*

荻窪 純一**

高畑 文雄*

Hiroyuki SASAI

Junichi OGIKUBO

Fumio TAKAHATA

*早稲田大学 理工学部

**ソニー株式会社

*Waseda University

**Sony Corporation

あらまし デジタル無線伝送システムにおけるユニークワード(UW)検出に、実用面を考慮して、量子化された軟判定データを適用する有効性について検討する。UW検出は、多次元空間内に生起する代表点を用いて受信信号をベクトル表現し、送信UWに対応するベクトル点との間のユークリッド距離を尺度としてなされる。伝送系において白色雑音が付加されると仮定して、理論的な確率計算で求めた不検出、誤検出、正検出などの各種UW検出特性と、硬判定データを用いた従来のハミング距離を尺度としたUW検出及び量子化のない軟判定データを用いたUW検出で得られる特性との定量的比較を行う。その結果、伝送システムの設計目標に準じて、軟判定データに対する量子化数を適宜設定することは、良好なUW検出特性を実現する上で有効であるとの結論が得られた。

1. まえがき

デジタル無線伝送システムにおいて、フレーム内に配置されたユニークワード(Unique Word; 以下、UWと称す。)の検出は不可欠な技術要素である。UW検出として、受信側において復調ビットを"0"または"1"の2値に硬判定した後、ハミング距離を尺度とした相関特性をとる方法が広く採用されている⁽¹⁾。近年、良好な符号誤り特性を実現できるという理由から、畳み込み符号化/ビタビ復号化や逐次復号化などの誤り訂正(FEC; Forward Error Correction)方式をデジタル伝送方式へ積極的に適用する傾向にある。この種の伝送方式では、情報ビットは、多値の軟判定データとして、FEC復号器に引き渡される。

UW検出に関しても、従来のように復調信号を硬判定せず、情報ビットと同様に軟判定復調データのまま処理することが可能である。軟判定データを用いたUW検出を実行すれば、従来の2次元処理ではなく、多次元の信号処理ができるようになるため、UW検出特性を改善できる可能性がある。事実、丸めのない(量子化なしの)軟判定データを用いたUW検出に関する理論解析が既に報告されている⁽²⁾。

筆者らは、軟判定データが離散値、即ち量子化され

た値として、実用上取り扱われることを鑑み、量子化された軟判定データを用いたUW検出の理論解析に関する検討を進めてきた^{(3)・(4)}。その後、特性評価に重点を置き、各種UW検出特性(不検出、誤検出、位相誤検出、正検出)を算出し、硬判定データ及び量子化なしの軟判定データを用いた場合の特性との定量的な比較を実施した。

以下、本稿では、第2章において、量子化された軟判定データを用いたUW検出の理論を紹介し、第3章において、今回詳細な検討を加えたUW検出特性に関する定量的評価を述べる。

2. 量子化された軟判定データを用いたUW検出

本章では、量子化された軟判定データを用いたUW検出の概念と理論について述べる。なお、変調方式としては、絶対符号化された2相PSKを仮定する。

2.1 軟判定データを用いたUW検出の概念

受信UWの各ビットには、それぞれ独立にガウス雑音が重畳しているため、これら雑音が付加された受信UWの各ビットは互いに直交して分布する。即ち、受信UWは多次元空間内のベクトルで表現でき、共分散が0の多変量ガウス分布に従う。故に、多次元空間内

のベクトルとして与えられる送信 UW と受信 UW との間のユークリッド距離を尺度として相関をとることにより、 UW の判定を行うことができる。

一例として、図1に示すように、3ビットの UW を仮定した場合の3次元ベクトル空間を考える。受信信号を受信ベクトル Y で表し、 UW パターンを UW ベクトル P 、 UW パターンの各ビットが反転した \overline{UW} パターンを \overline{UW} ベクトル \overline{P} で表すこととする。このとき、許容ユークリッド距離を d とすると、 P あるいは \overline{P} を中心とする半径 d の球内に Y が存在する、 $\|Y - P\| \leq d$ または $\|Y - \overline{P}\| \leq d$ の場合（但し、 $\|Y - P\| \neq \|Y - \overline{P}\|$ ）、受信ベクトル Y を UW として検出する。また、 Y が2個の球外に存在する、 $\|Y - P\| > d$ かつ $\|Y - \overline{P}\| > d$ の場合、あるいは P 及び \overline{P} から Y までの間のユークリッド距離が等しい、 $\|Y - P\| = \|Y - \overline{P}\|$ の場合、 UW 不検出とする。

一方、 UW パターンと異なる符号語が送信され、その受信ベクトル Y と P あるいは Y と \overline{P} との間のユークリッド距離が、 $\|Y - P\| \leq d$ または $\|Y - \overline{P}\| \leq d$ の場合（但し、 $\|Y - P\| \neq \|Y - \overline{P}\|$ ）、 UW 誤検出となる。

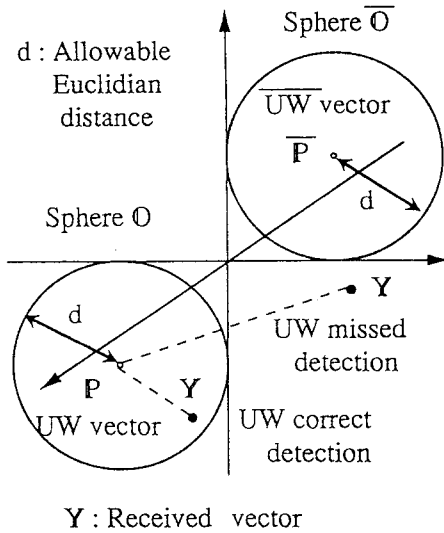


図1 ユークリッド距離の概念に基づき、3次元空間内で考えた UW 検出

2.2 量子化された軟判定データを用いた理論

送信ビット振幅 x （ビット“1”に対して1、ビット“0”に対して-1）に対する軟判定データの受信信号レベル r は、次式で表される。

$$r = \sqrt{E_b} x + n \quad (1)$$

但し、 E_b は1ビット当りの信号電力、 n は平均値0で分散 $N_0/2$ のガウス雑音の振幅である。

軟判定データは、予め定められた軟判定閾値 b_n ($n=1 \sim N-1, b_0=-\infty, b_N=+\infty$) によって分割された N 個の軟判定領域のいずれに信号レベル r が属するかにより、その領域に対応する量子化された値 g_i ($i=0 \sim N-1$) として表現される。隣接する閾値の間隔は、 E_b/N_0 （1ビット当りの信号電力対雑音電力密度比）と量子化数によって決まる定数である⁽⁵⁾。

UW 検出において、ユークリッド距離を算出する際に用いる信号振幅値 a_n としては、信号レベル r が区間 (b_n, b_{n+1}) に落ち込む確率から算出される期待値を採用する。即ち、区間 (b_n, b_{n+1}) に落ち込む信号レベル r を信号振幅値 a_n に代表させる。

送信ビット振幅が x のとき、復調器で信号レベル r を復調する確率 $P(r, x)$ は、

$$P(r, x) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \cdot \exp \frac{-(r - x \sqrt{E_b})^2}{N_0} \quad (2)$$

で与えられるので、量子化された軟判定データ g_n が復調され、信号振幅値 a_n が採用される確率 $Q(a_n, x)$ は次式で与えられる。

$$Q(a_n, x) = \int_{b_n}^{b_{n+1}} P(r, x) dr \quad (3)$$

なお、信号振幅値 a_n は、受信側においてビット“1”と“0”のいずれが送信されているのか不明である点を考慮して、次式を用いて算出する。

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{\int_{b_n}^{b_{n+1}} r \frac{P(r, 1) + P(r, -1)}{2} dr}{\int_{b_n}^{b_{n+1}} \frac{P(r, 1) + P(r, -1)}{2} dr} \\ &= \frac{\int_{b_n}^{b_{n+1}} r \{P(r, 1) + P(r, -1)\} dr}{Q(a_n, 1) + Q(a_n, -1)} \quad (4) \end{aligned}$$

UW 長 M ビット、 N 値量子化された軟判定データを用いる場合、量子化された受信ベクトルは M 次元空間内の N^M 個の代表点として表現される。図2は、 UW 長3ビット、8値量子化の場合の受信 UW に対する代表点の分布の様子を示したものである。

UW ベクトルを $P = \{x_0 \sim x_{M-1} \mid x_i \in \{1, -1\}\}$ 、受信ベクトルを $Y = \{y_0 \sim y_{M-1} \mid y_i \in \{a_n \mid n=0 \sim N-1\}\}$ とすると、 Y の生起確率 $P_r(Y)$ は次式で与えられる。

$$P_r(Y) = \prod_{i=0}^{M-1} Q(y_i, x_i) \quad (5)$$

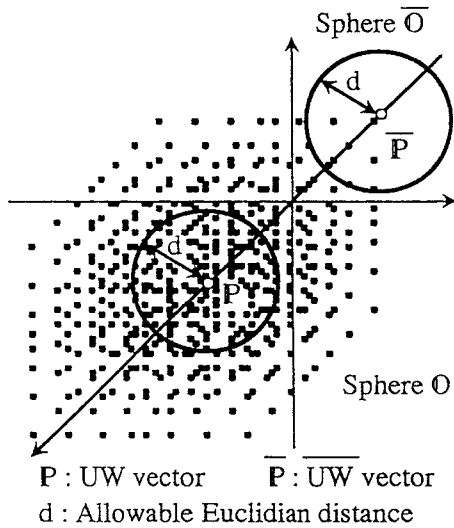


図2 3次元空間における8値量子化された軟判定データの受信ベクトルの分布

M次元空間内の個々の代表点で表される受信ベクトル \mathbf{Y} とUWベクトル \mathbf{P} 及び $\overline{\mathbf{UW}}$ ベクトル $\overline{\mathbf{P}}$ との間のユークリッド距離を、各々 R_0 及び R_1 とした場合、受信ベクトル \mathbf{Y} が正検出される条件は、 $(R_0 \leq d \text{ かつ } R_0 < R_1)$ で与えられ、 N^M 個の全ての点のうち、この条件を満たす点 k の生起確率の総和を次式を用いて算出することによって、正検出確率 P_c が得られる。

$$P_c = \sum_k P_r(\mathbf{Y}_k) \quad | \quad \Sigma: \text{正検出点の総和} \quad (6)$$

位相誤検出確率 P_p は、 $(R_1 \leq d \text{ かつ } R_0 > R_1)$ の条件を満たす点 k の生起確率の総和として与えられる。

$$P_p = \sum_k P_r(\mathbf{Y}_k) \quad | \quad \Sigma: \text{位相誤検出点の総和} \quad (7)$$

不検出確率 P_m は、 $\{(R_0 > d \text{ かつ } R_1 > d) \text{ または } (R_0 = R_1 \leq d)\}$ の条件を満たす全ての点 k の生起確率の総和として求められる。

$$P_m = \sum_k P_r(\mathbf{Y}_k) \quad | \quad \Sigma: \text{不検出点の総和} \quad (8)$$

最後に、情報ビットを含む受信ベクトル \mathbf{Y} とUWベクトル \mathbf{P} 及び $\overline{\mathbf{UW}}$ ベクトル $\overline{\mathbf{P}}$ との間のユークリッド距離を、各々 r_0 及び r_1 とした場合、受信ベクトル \mathbf{Y} がUWとして誤って検出されるUW誤検出の条件は、 $\{r_0 \neq r_1 \text{ かつ } (r_0 \leq d \text{ または } r_1 \leq d)\}$ となる。誤検出には、UWパターンの一部と重複した位置で誤検出する場合と、ランダムビット系列と考えられる情報ビット中で誤検出する場合の2種類が存在する。

前者の場合、UWから b ビットずれた符号語に対応する送信ベクトル \mathbf{A} の種類は 2^b である。これらの送信ベクトルに $1 \sim 2^b$ まで番号をつけた $\mathbf{A}_i (i=1 \sim 2^b)$ に対する受信ベクトルを \mathbf{Y}_i とする。この受信ベクトル \mathbf{Y}_i に対するM次元空間内の各点 k の生起確率を $P_r(\mathbf{Y}_{ik})$ とすれば、 \mathbf{Y}_i が誤検出される確率 P_{ri} は、次式で与えられる。

$$P_{ri} = \sum_k P_r(\mathbf{Y}_{ik}) \quad | \quad \Sigma: \text{誤検出点の総和} \quad (9)$$

従って、 b ビットずれた場合の全誤検出確率 P_{rb} は、 \mathbf{A}_i の発生確率が等しいと仮定すれば、次式となる。

$$P_{rb} = \sum_{i=1}^{2^b} \frac{P_{ri}}{2^b} \quad (10)$$

一方、後者のランダムビット系列からなる情報ビット中の全誤検出確率 P_r は、(10)式において $b=M$ と大きくことによって得られ、次式で与えられる。

$$P_r = \sum_{i=1}^{2^M} \frac{P_{ri}}{2^M} \quad (11)$$

3. UW検出特性に関する定量的評価

本章では、硬判定データ、量子化なしの軟判定データ、4値及び8値量子化された軟判定データを用いた場合の各種UW検出特性を定量的に比較評価する。なお、量子化された軟判定データを用いる際に発生する多次元空間内の代表点の数は、UW長と量子化数の増大に伴って急激に増加し、計算処理が膨大になることから、8ビット長のUWを想定した。この場合、8値量子化された軟判定データを用いたUW検出において発生する代表点の数は $8^8=16,777,216$ である。

3.1 許容ユークリッド距離比と許容誤りビット数

前章において、軟判定データを用いたUW検出に関して、許容ユークリッド距離 d を定義した。本章では、直感的に理解しやすい許容ユークリッド距離比 α を定義する。一方、硬判定データを用いたUW検出に関しては、良く知られている許容誤りビット数 ϵ を用いる。

不一致ビット数が f の異なる2種類の符号語間の多次元空間内のユークリッド距離は $2\sqrt{fEb}$ で与えられる。従って、UW長が M ビットの場合、多次元空間における超球の半径 d (許容ユークリッド距離) が次式で与えられるとき、UWベクトル \mathbf{P} を中心とする超球と $\overline{\mathbf{UW}}$ ベクトル $\overline{\mathbf{P}}$ を中心とする超球が接する。

$$d = \sqrt{MEb} \quad (12)$$

そこで、許容ユークリッド距離 d を

$$d = \sqrt{\alpha M E_b} \quad (13)$$

とおき、 $\alpha = 1$ のとき、超球が接するように許容ユークリッド距離比 α を定義する。なお、量子化なしの軟判定データを用いる場合、理論解析は超球が重ならない範囲に対してのみ適用可能であるため、 $\alpha < 1$ という制限が課せられる⁽²⁾。一方、量子化された軟判定データを用いる場合、 α の値には制限がない。

次に、軟判定データにおける許容ユークリッド距離比 α と硬判定データにおける許容誤りビット数 ε との対応関係について考える。UW ($\overline{U\overline{W}}$) パターンから ε ビットだけ異なる符号語に対応する送信ベクトル \mathbf{A} と UW ($\overline{U\overline{W}}$) ベクトル \mathbf{P} ($\overline{\mathbf{P}}$) との間のユークリッド距離 r_ε は、次式で与えられる。

$$r_\varepsilon = 2\sqrt{\varepsilon E_b} \quad (14)$$

上式と(13)式から、 α は ε 、 M と次式のように対応づけられる。

$$\alpha = \frac{4\varepsilon}{M} \quad (15)$$

なお、上式より、硬判定データにおける許容誤りビット数 ε は整数値しか取り得ないことから、 M が 4 の倍数のときにのみ、軟判定データの多次元空間において、超球が接する $\alpha = 1$ と等価な状態が生じ、その他の M の値に対しては、その種の等価な状態が生じないことがわかる。

3.2 UW 不検出確率

図 3 は、 E_b/N_0 を 0 dB、5 dB 及び 10 dB に固定し、 ε と α に対する UW 不検出確率の変化を、硬判定、量子化なしの軟判定データ及び 8 値量子化された軟判定デ

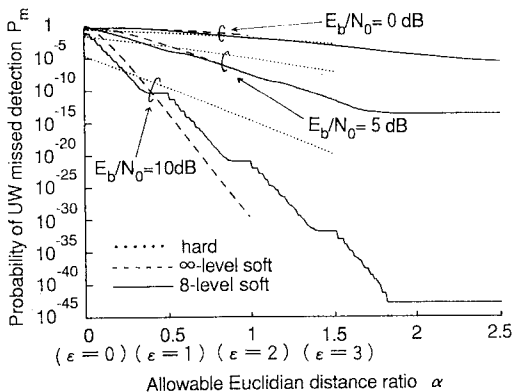


図 3 許容ユークリッド距離比に対する不検出確率の変化 (4 値量子化は省略)

ータに対して示したものである。

なお、硬判定データにおける ε は、前節で述べた対応づけにより、 α の値に換算している。また、 ε は離散的な値しかとらないので、その間の値は意味をもたないが、見やすさを考慮して直線で結んだ。その他、4 値量子化された軟判定データを用いた場合の UW 検出特性も算出した。しかしながら、特性曲線が多数になるため、図 3 からは割愛したが、考察の部分においては触れることとする。

① 8 値量子化された軟判定データにおける特性

軟判定データに量子化を施すことによって、不検出確率の変化は滑らかな特性曲線を示さなくなる。この現象は、 α を増大しても、多次元空間内に離散的に存在する代表点が超球の内部に含まれなければ、不検出確率が減少しないことに起因している。逆に、 α の増大により、代表点が突然多く超球内に含まれると、不検出確率は急激に減少する。

一定値以上の α に対して、不検出確率は低下せず収束する。これは、UW ベクトル \mathbf{P} 及び $\overline{U\overline{W}}$ ベクトル $\overline{\mathbf{P}}$ を中心とする 2 個の超球の内部に、ほとんどすべての代表点が含まれるためである。不検出確率が収束する下限値は、2 個の超球の接触面上に存在する代表点 (\mathbf{P} 及び $\overline{\mathbf{P}}$ とのユークリッド距離が等しい) の生起確率の和に等しい。 E_b/N_0 が低い程、接触面上に存在する代表点の生起確率の和が大きいために、不検出確率の下限値も高い値となる。

② 4 値量子化された軟判定データにおける特性

8 値量子化された軟判定データと同様の特性を示すが、8 値量子化よりも、はるかに代表点が少なくなるため、階段状の形状がはっきり現れる。

③ 軟判定データへの量子化の有無による特性の比較

特性の比較は、量子化なしの軟判定データを用いた UW 検出に関する理論解析が適用可能な $\alpha < 1$ の範囲に限定される。 α が一定値以下の範囲において、量子化なしの軟判定データにおける不検出確率は、量子化された軟判定データにおける不検出確率よりも大きく、 E_b/N_0 が低い程、その α の範囲は広い。 α の増大に伴い、量子化された軟判定データにおける不検出確率が一定値を示す平坦部分において、量子化なしの軟判定データにおける不検出確率が小さくなる。この現象が発生する α の値は、 E_b/N_0 が高い程小さい。量子化なしの軟判定データを用いた UW 検出は、理論解析が $\alpha < 1$ の範囲に限定されるだけであり、量子化数を増大すれば、それに限りなく近い特性を得ることができ、ハードウェア上では $\alpha > 1$ でも実現可能である。この場合、量

子化が細かいため、超球の接触面上に存在する代表点の生起確率は極めて小さくなるので、 $\alpha > 1$ の範囲においても、不検出確率が下限値をもつことはなく、単調に減少するものと考えられる。

④ 8 値量子化と 4 値量子化における特性の比較

一定値以下の α の範囲では、不検出確率の値に大きな差は生じない。4 値量子化された軟判定データを用いる方が、下限値を示す α の値は小さいが、その下限値は大きい。

⑤ 硬判定データと軟判定データにおける特性の比較

一定値以下の α の範囲では、硬判定データにおける不検出確率が小さく、 E_b/N_0 が低い程、その α の範囲は広い。 α が更に増大すると、軟判定データにおける不検出確率が小さくなるが、その現象が発生する α の値は、 E_b/N_0 が高い程小さい。

次に、硬判定データにおける不検出確率と同等の値を達成するという条件下で、軟判定データにおいて設定すべき α の値を検討する。表 1 は、 E_b/N_0 が 0 dB と 10 dB のときに同等の不検出確率を得る ϵ と α の対応関係を示したものである。

表 1 硬判定データにおける UW 不検出確率を達成するのに要する許容ユークリッド距離比 α

E_b/N_0	ϵ	不検出確率	量子化なし	8 値量子化	4 値量子化
0	0	4.81×10^{-1}	0.47	0.42	0.37
	1	1.26×10^{-1}	0.79	0.66	0.63
	2	2.02×10^{-2}	>1	0.97	1.09
	3	1.93×10^{-3}	>1	1.40	1.54
10	0	3.10×10^{-5}	0.22	0.16	0.14
	1	4.20×10^{-10}	0.38	0.33	0.51
	2	3.25×10^{-15}	0.54	0.64	0.71
	3	1.57×10^{-20}	0.70	0.83	1.07

(ϵ : 許容誤りビット数)

同表より、不検出確率が大きい、即ち E_b/N_0 が低く、 ϵ が小さい範囲では、4 値量子化、8 値量子化、量子化なしの順番に α の設定値が大きくなることがわかる。一方、不検出確率が小さい、即ち E_b/N_0 が高く、 ϵ が大きい範囲では、この順番が逆転する。軟判定データに対する量子化が粗い場合、 E_b/N_0 が低い範囲では、 α の若干の増大によって、多次元空間の超球内部に生起確率の高い代表点が含まれて、不検出確率が急激に低下する。この現象が有効に働いて、硬判定データと同等の不検出確率が、小さい値の α によって達成できる。一方、 E_b/N_0 が高い範囲では、量子化が細かい程、 α に対する不検出確率の低下が急峻なために、小さい値の

α によって硬判定データと同等の不検出確率が達成される。

3.3 UW 誤検出確率

3.3.1 ランダムビット中の UW 誤検出確率

情報ビット、即ちランダムビット中で UW を検索する状態における誤検出確率を考える。なお、変調方式として、絶対符号化された 2 相 P S K を想定しているので、UW と \overline{UW} の両パターンに対する誤検出を考慮する必要がある。

図 4 は、 ϵ と α に対する UW 誤検出確率の変化を示したものである。

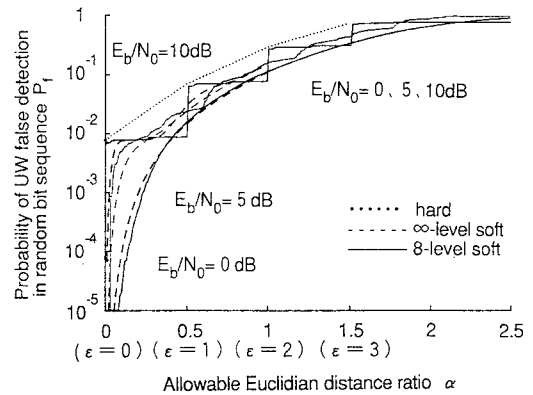


図 4 許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中における UW 誤検出確率の変化 (4 値量子化は省略)

① 8 値量子化された軟判定データにおける特性

誤検出確率は、量子化の影響によって、階段状の特性を示し、量子化なしの軟判定データと同様に、 α が一定値以下の範囲では、 E_b/N_0 が高い程大きい。 E_b/N_0 が 10dB のように高く、受信ベクトル \mathbf{Y} が 2^8 通りの符号語の近傍に集中して発生する場合、誤検出確率が急激に増加し、階段形状が明確に現れる部分が生じる。具体的には、 $\alpha = 0.5, 1, 1.5$ の近傍で急激に変化する。これらの α の値は、3.1 節で述べたように、硬判定データにおける $\epsilon = 1, 2, 3$ の値に対応するものである。即ち、 α が非常に小さく 0 の近傍でも、硬判定データにおける許容誤りビット数 $\epsilon = 0$ と同等の誤検出確率が得られ、 $\alpha < 0.5$ の範囲では、 α を大きくしても、生起確率の高い代表点新たに超球内部に含まれないため、誤検出確率は変化しない。 α の値が 0.5 を越えると、UW (\overline{UW}) パターンと 1 ビット異なる符号語に対応するベクトルの近傍の量子化された代表点が、多次元空間内における UW (\overline{UW}) ベクトル \mathbf{P} ($\overline{\mathbf{P}}$) を中心とする半径 d の超球に含まれるので、誤検出確率は、

硬判定データにおける許容誤りビット数 $\varepsilon = 1$ と同等な値となる。更に、 $\alpha = 1, 1.5$ が、各々 $\varepsilon = 2, 3$ に対応し、複数の符号語に対応するベクトルの近傍の代表点が超球内に含まれ、誤検出確率が急激に増加する。 α の値をなお一層増大すると、超球の半径が増大して、UWパターンから4ビット異なる符号語も含まれるようになる。これら符号語は \overline{UW} パターンとも同数のビットだけ異なるため、これらに対応するベクトルとUWベクトル \underline{P} 及び \overline{UW} ベクトル $\underline{\bar{P}}$ との間のユークリッド距離は等しい。従って、 E_b/N_0 が高い場合、ベクトル \underline{P} と $\underline{\bar{P}}$ を中心とする2個の超球の接触面上に存在して不検出と判定される代表点の生起確率が高くなる。そのため、誤検出確率は一定値に収束する。

一方、 E_b/N_0 が低いときには、UWパターンと4ビット異なる符号語に対応する受信ベクトル \underline{Y} の広がりが大きく、 α を増大するにつれて、大きく広がった受信ベクトル \underline{Y} が少しずつ超球内部に含まれて、誤検出確率は1に近づく。

② 4値量子化された軟判定データにおける特性

8値量子化された軟判定データにおける特性が、より階段状になるが、特性全体の傾向は同様である。

③ 軟判定データへの量子化の有無による特性の比較

誤検出確率が一定となる部分が現れ、量子化が粗いほど、その幅は広い。

④ 硬判定データと軟判定データにおける特性の比較

硬判定データを用いる場合、ランダムビット中の各ビットが“1”または“0”と判定される確率は、 E_b/N_0 の値にかかわらず、 $1/2$ となるので、誤検出確率は、許容誤りビット数 ε にのみ依存し、各 ε に対して特定値を有する。

まず、硬判定データにおける誤検出確率と同等の値を達成するという条件下で、軟判定データにおいて設定すべき α の値について検討する。量子化なしの軟判定データを用いるUW検出では、 $\alpha < 1$ という制限のために、硬判定データにおける $\varepsilon = 2, 3$ と同等な誤検出確率を得る α の値は不明である。それ以外の場合、硬判定データにおける誤検出確率と同等な値は、 α を適宜設定することによって得られる。

次に、同等の不検出確率を得る、表1に示した ε と α の組合せに対して、硬判定データと軟判定データにおける誤検出確率を比較検討する。表2は、 E_b/N_0 が0 dBと10 dBのときの各種データにおける誤検出確率、その値の小さい方から、硬判定及び軟判定データに対して順位づけをした結果を示したものである。

同表より、 ε が小さく、 E_b/N_0 が低い、即ち不検出確

率が高い程、粗く量子化された軟判定データにおけるUW検出特性が優れていることがわかる。一方、 ε が大きく、 E_b/N_0 が高い、即ち不検出確率が低い程、細く量子化された軟判定データにおけるUW検出特性が良好になると結論づけることができる。

表2 同等のUW不検出確率を達成する許容誤りビット数 ε と許容ユークリッド距離 α の組合せにおけるランダムビット中のUW誤検出確率と硬判定及び軟判定データに対する順位

E_b/N_0	ε	硬判定	量子化なし	8値量子化	4値量子化	
0	0	7.81×10^{-3}	1.21×10^{-2}	9.19×10^{-3}	7.81×10^{-3}	
		①	④	③	①	
	1	7.03×10^{-2}	5.45×10^{-2}	3.49×10^{-2}	3.74×10^{-2}	
		⑥	③	①	②	
	[dB] 2	2	2.89×10^{-1}	—	1.03×10^{-1}	1.27×10^{-1}
			③	順位不明	①	②
3	3	7.27×10^{-1}	—	2.78×10^{-1}	3.51×10^{-1}	
		⑤	順位不明	①	②	
10	0	7.81×10^{-3}	7.83×10^{-3}	7.82×10^{-3}	7.81×10^{-3}	
		①	④	③	①	
	1	7.03×10^{-2}	1.15×10^{-2}	8.70×10^{-3}	6.97×10^{-2}	
		④	②	①	③	
	[dB] 2	2	2.89×10^{-1}	3.82×10^{-2}	7.04×10^{-2}	7.09×10^{-2}
			④	①	②	③
	3	3	7.27×10^{-1}	6.60×10^{-2}	7.64×10^{-2}	2.89×10^{-1}
			④	①	②	③

(○：誤検出確率が小さい方からの順位づけ)

3.3.2 1ビット偏位状態におけるUW誤検出確率

フレーム中のUW位置から1ビットずれた状態におけるUW誤検出確率について検討する。

特性評価に採用したUWパターンは、“00110111”である。1ビット偏位状態におけるUWパターンの重複部分7ビット中の不一致ビット数は、UWパターンに対して3ビット、 \overline{UW} パターンに対して4ビットであり、前方及び後方偏位状態における不一致ビット数は等しい。軟判定データを用いる場合、8次元空間において、1ビット偏位状態における受信ベクトル \underline{Y} は、UWベクトル \underline{P} 及び \overline{UW} ベクトル $\underline{\bar{P}}$ から非常に離れた位置を中心として生起する。その結果、 E_b/N_0 が高いときには、許容ユークリッド距離比 α を極端に大きく設定しなければ、誤検出確率は非常に低くなる。 E_b/N_0 が低いときには、受信ベクトル \underline{Y} の広がりが大きいため、誤検出確率は高くなる。

以上の検討を踏まえて、硬判定データ、量子化なしの軟判定データ、4値及び8値量子化された軟判定データを用いる場合の1ビット偏位状態におけるUW誤検出確率について検討する。

図5は、 ε と α に対するUW誤検出確率の変化を示

したものである。

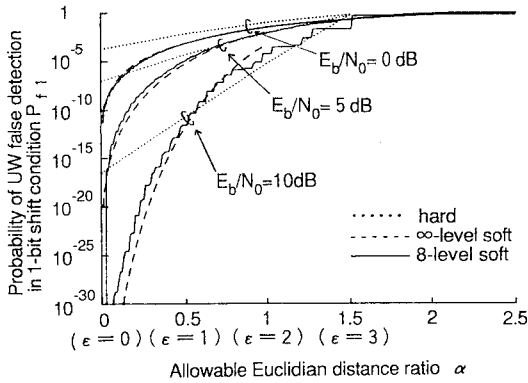


図5 許容ユークリッド距離比に対する1ビット偏移状態におけるUW誤検出確率の変化(4値量子化は省略)

① $\alpha = 1.5$ ($\varepsilon = 3$ に相当)における特性

UWパターンと3ビット異なる符号語が、確率1/2でUWベクトルPを中心とする半径dの超球に含まれるため、 E_b/N_0 が高い場合、 $\alpha = 1.5$ ($\varepsilon = 3$ に相当)の位置における誤検出確率は約0.5となる。

② 軟判定データにおける特性

E_b/N_0 が高い程、誤検出確率は低い。この特性は、ランダムビット中の誤検出確率と異なる。ランダムビット中では、UWと誤判定される符号語が一定の確率で発生し、 E_b/N_0 が高く、それら符号語をビット誤りなく検出する程、誤検出確率は高かった。一方、1ビット偏位状態においては、UWパターンとの不一致ビットを誤りなく検出することが誤検出確率の低下につながるから、 E_b/N_0 が高い程、誤検出確率は低くなる。

量子化された軟判定データを用いる場合、 α を増大しても、誤検出確率は1に近づかず、一定値に収束する。これは、多次元空間において、超球の接触面上の代表点は、誤検出ではなく不検出と判定されることに起因している。同様の理由により、不検出確率が下限値を有することを前節で述べたが、 E_b/N_0 が高い程、接触面上に存在する代表点の生起確率の総和が大きくなる点が異なる。UW不検出に関する検討では、多次元空間内のUWベクトルPを中心として代表点が生起したが、誤検出では、UWパターンとは異なる符号語に対応する信号ベクトルを中心として代表点が高い確率で生起し、しかも E_b/N_0 が高い程、超球の接触面上における代表点の生起確率が大きくなるからである。また、0近傍の α の値において、誤検出確率が0となる。この現象は、 α が非常に小さい場合、多次元空間にお

る超球内部に代表点が含まれないことに起因している。多次元空間において、量子化が粗い程、代表点の数が少なく、 E_b/N_0 が低い程、量子化間隔が広く、代表点の分布が粗くなるため、誤検出確率が0を示す α の範囲は広がる。

③ 軟判定データへの量子化の有無による特性の比較

E_b/N_0 が低い場合、誤検出確率の値にほとんど差がない。 E_b/N_0 が高い場合、誤検出確率は、量子化が細かい程、 α の小さい範囲において低く、量子化が粗い程、 α の大きい範囲において低い。

④ 硬判定データと軟判定データにおける特性の比較

硬判定データにおける誤検出確率と同等の値は、軟判定データにおける α の値を適宜設定することによって得られる。

なお、2ビット以上の偏位状態における誤検出確率は、偏位が小さい場合、1ビット偏位状態の特性に近く、偏位が大きい場合、ランダムビット中の特性に近くなるので、詳細な説明は省略する。

3.4 UW正検出確率及び位相誤検出確率

不検出確率、正検出確率、位相誤検出確率の総和は1となる。位相誤検出確率は、正検出確率に比べて非常に小さい。従って、正検出確率は不検出確率によるところが大きく、その特性の大部分は、不検出確率に関する記述内容から類推できる。そこで、特性曲線を示し、簡単な説明をするにとどめる。

3.4.1 正検出確率

図6は、 ε と α に対するUW正検出確率の変化を示したものである。

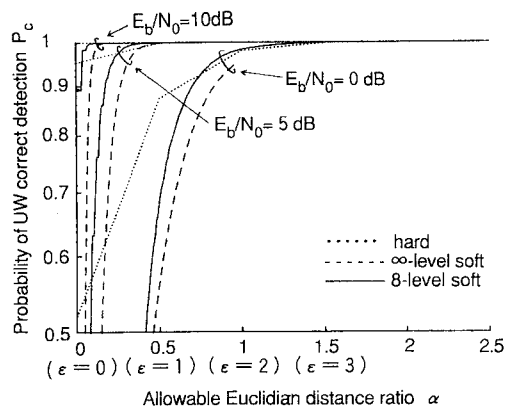


図6 許容ユークリッド距離比に対するUW正検出確率の変化(4値量子化は省略)

図3で示したUW不検出確率の特性からは、 $E_b/N_0 = 0$ dBにおける特性の差は正確に観察できないが、図6では、その差が明確に現れる。即ち、量子化なしの軟

判定データにおける不検出確率が、量子化された軟判定データにおける不検出確率よりも大きくなる α の範囲は、 E_b/N_0 が低い程広いことが再確認される。

3.4.2 位相誤検出確率

図7は、 ε と α に対するUW位相誤検出確率の変化を示したものである。

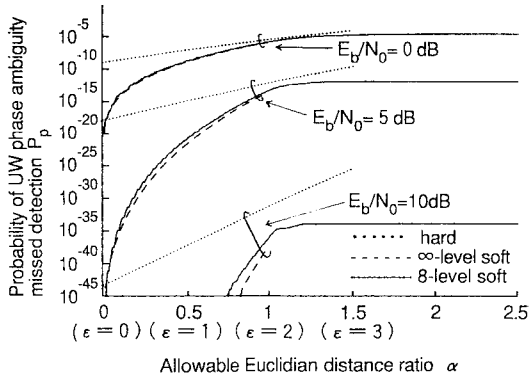


図7 許容ユークリッド距離比に対するUW位相誤検出確率の変化(4値量子化は省略)

位相誤検出確率の値は、図の縦軸の範囲から、非常に小さい値であることがわかる。 E_b/N_0 の値にかかわらず、位相誤検出確率は、量子化なしの軟判定データを用いる場合が最も低く、次に8値量子化、4値量子化、硬判定データという順番になる。

4. あとがき

実用システムへの適用を考慮して、量子化された軟判定データを用いたUW検出の理論について述べ、硬判定データ及び量子化なしの軟判定データを用いる場合の特性との定量的な比較を行った。

同等の不検出確率を基準にとった場合に得られる誤検出確率の優劣を評価した結果、低い不検出確率の基準に対しては、量子化が細かい程、高い不検出確率の基準に対しては、量子化が粗い程、UW検出特性が良好となることがわかった。即ち、設計目標に応じて、軟判定データに対する量子化数を適宜設定することによって、良好なUW検出特性が達成できることが明らかとなった。この事実は、量子化された軟判定データをUW検出に適用することによって、UW長が低減され、回線の利用効率が向上すると換言することができる。紙面の関係上、説明を割愛したが、4ビット長のUWに対しても、同様の結論が得られている。より一層長いUWに対する検討に関しては、理論計算の限界を考慮して、UW長の制限を強く受けないハードウェアを用いた特性評価を並行して進めている⁽⁶⁾。

文献

- (1) W. Schrempp and T. Sekimoto: "Unique word detection in digital burst communications", IEEE Trans. Commun., COM-16, 4, pp.597-605(Aug. 1968).
- (2) 藤野: "多次元軟判定ユニークワード検出方式の理論的考察"、信学論(B)、J69-B、11, pp.1516-1522(昭61-11)
- (3) 荻窪、笹井、高畑: "軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する理論と特性"、信学技報、SAT90-25(平2-8)。
- (4) 笹井、荻窪、高畑: "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出方式の特性"、1990信学秋季全大、B-180(平2-10)。
- (5) 安田、平田、小川: "ヴィタビ復号における軟判定しきい値の最適間隔"、信学論(B)、J64-B、11, pp.1297-1298(昭56-11)。
- (6) 竹藪、養毛、高畑: "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する実験的検討"、信学技報(衛星通信)、(平3-9)。

量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出
特性に関する実験的検討

竹 藪 雅 人 ・ 蓑 毛 研
高 畑 文 雄
(早 大)

1991年9月19日

EIC 観 電子情報通信学会

量子化された軟判定データを用いた ユニークワード検出特性に関する実験的検討

Experimental Study on Unique Word Detection Characteristics using Quantized Soft-Decision Data

竹藪 雅人 養毛 研 高畑 文雄
Masato TAKEYABU Ken MINOMO Fumio TAKAHATA

早稲田大学 理工学部
Waseda University

あらかし 軟判定データを用いたユニークワード(UW:Unique Word)検出に関して、UW検出特性の理論解析と並行して検討を進めている実験的検討について述べる。本検討は、DSP(Digital Signal Processor)上に、UWの送受信と雑音の発生から構成されるシステムを構築して、実験的にUW検出特性を取得するものであり、理論解析と比較して、UW長の制限を強く受けたくないという特徴を有する。具体的には、疑似的に発生させた白色ガウス雑音をUW中の各ビットに付加させ、DSP上に組み込んだUW検出器によって得られた測定データを統計処理することによって、各種UW検出特性を導出する。UW検出特性に関する定量的評価の結果、本実験によって得られた特性と理論的に得られた特性とは良好な一致を示すことが確認された。

1. まえがき

筆者等は、軟判定データを用いたユニークワード(UW:Unique Word)検出特性を確率計算に基づく理論解析を用いて評価する検討を進めてきた^{(1),(2),(3)}。しかしながら、理論解析では、コンピュータに要求される計算時間及びメモリ容量の観点から、UW長として8ビット程度が限界と考えられる。そこで、この問題点を解決すべく、ハードウェア上に、今まで検討を進めてきたUW検出方式のアルゴリズムを構築して、各種UW検出特性を評価する実験的検討を並行して実施した。

本アプローチは、UW長の制限を強く受けたくないという特徴を有するので、理論解析では、とうてい不可能と考えられる長いUW長に対する特性も取得可能である。また、理論計算による結果をハードウェア上で検証するとともに、実用化への可能性を追求する点からも有用であると考えられる。

上記アプローチに基づく検討を、今後推進していく第一歩として、DSP(Digital Signal Processor)を用いたUW検出方式を実現し、既に明らかとなっているUW検出特性との比較評価に主眼を置いて、UW検出特性の取得を実施した。

以下、第2章において実験系の構成を紹介し、第3章において雑音の発生法とその評価、第4章においてUW検出特性の取得方法と特性の定量的評価について述べる。

2. 実験系の構成

本実験では、UWの送信、受信及び雑音の発生の3機能をTI社のDSP(TMS320C25)上に構築した。特に、UWの受信部において、UW検出のアルゴリズムをハードウェア的に実現して、各種検出特性を取得した。なお、TMS320C25は、64kワードのプログラムメモリ空間とデータメモリ空間を有し、命令実行時間100ns、演算精度16ビットの固定小数点演算型DSPである。

図1は、本実験系における機能のブロック構成を示したものであり、各種検出特性は、DSP中のデータメモリに格納されたデータ値を読み出し、別途計算機で統計処理することによって導出した。

表1は、本実験において想定したパラメータ値及び取得した検出特性の種類を列挙したものである。なお、同表に示すように、変復調方式として絶対符号化同期検波PSK方式を想定しているが、UW検出は、通常ベースバンドのデジタル信号に対して実行されることから、

雑音の発生も含めて、すべてベースバンド信号に対する処理によって、実験系を構成した。なお、絶対符号化同期検波は、位相不確定性による位相誤検出が発生する可能性を指摘している。また、UW検出特性に関する測定値と理論値との一致を、本報告の主眼に置いていることから、UW長として、理論値が明らかになっている4ビットと8ビットを想定した^{(1)・(3)}。

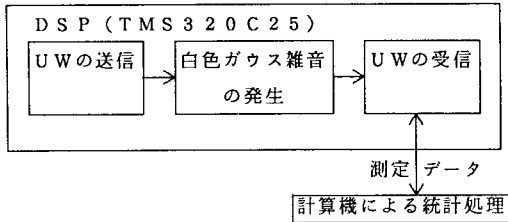


図1 実験系の機能ブロック構成

表1 本実験において想定したパラメータ値

UW長	4ビット	8ビット
UWパターン	0001	00110111
ベースバンド信号の種類	硬判定、量子化なし軟判定、4値量子化、8値量子化軟判定	
変復調方式	絶対符号化同期検波2相PSK	
取得した検出特性	不検出、位相誤検出、ランダムビット中の誤検出	不検出、位相誤検出
E_b/N_0	0, 1, 2, 3, 4 dB	0, 1 dB

3. DSPを用いた白色ガウス雑音の発生

本章では、Box & Muller法に基づきDSP上で白色ガウス雑音を発生させる方法を述べた後、実際に発生させた白色ガウス雑音に対して評価を加える。

3.1 白色ガウス雑音の発生

Box & Muller法は、0から1まで一様に分布する乱数 X_t を次式に代入することによって、分散1、平均0の正規分布に従う乱数 Z_t を得る方法である。ここで、 t は整数値であり、時刻を表す。

$$\begin{cases} Z_{2t} = \sqrt{-2 \log_e X_{2t}} \\ \quad \times \sin(2\pi X_{2t+1}) \\ Z_{2t+1} = \sqrt{-2 \log_e X_{2t}} \\ \quad \times \cos(2\pi X_{2t+1}) \end{cases} \quad (1)$$

さて、白色ガウス雑音は、次式で示される確率密度関数 $p(x)$ に従う正規乱数で与えられる。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left(-\frac{x^2}{2N}\right) \quad (2)$$

但し、 N は雑音電力であり、ベースバンド信号1ビット当たりのエネルギー E_b 、片側雑音電力密度 N_0 、ベースバンド信号の振幅 A を用いて、次式で表される。

$$N = \frac{A^2}{2(E_b/N_0)} \quad (3)$$

従って、目的の白色ガウス雑音は、Box & Muller法に基づき(1)式で与えられる、分散1、平均0の正規乱数に標準偏差 \sqrt{N} を乗ずることによって得ることができる。

3.2 DSPで発生させた白色ガウス雑音の特性

図2は、前節で述べた方法を用いて、 $A=1$ 、 $E_b/N_0=4$ dB、すなわち $\sqrt{N}=0.4461542$ の条件下で、実際にDSP上で発生させた白色ガウス雑音の振幅分布を示したものである。同図において、サンプル数は65,536個であり、雑音分布は振幅を0.05間隔で区切った各範囲内のデータ数の累積により表現している。また、図中に実際で示した理論値は、次式を用いて算出した。

$$\begin{aligned} & 65536 p(x) \\ &= \frac{65536}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left(-\frac{x^2}{2N}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

同図から明らかなように、発生させた白色ガウス雑音は、理論曲線に沿って分布している。従って、UW検出特性の評価に使用する雑音として、充分耐え得るものと判断できる。

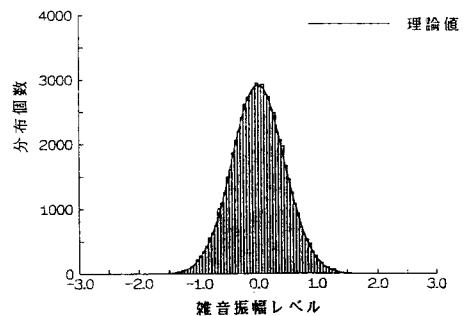


図2 $E_b/N_0 = 4$ [dB]における白色ガウス雑音の振幅分布

4. ユニークワード検出特性の取得と評価

4.1 硬判定データを用いたUW検出

硬判定データを用いたUW検出では、信号振幅 $\sqrt{E_b}$ に雑音振幅 n が付加された、次式で表現される

受信信号振幅 r が、正の場合“1”、負の場合“0”と各ビットを判定する。

$$r = \sqrt{E_b} \cdot x + n \quad (5)$$

ここで、 x はビット“1”に対して1、ビット“0”に対して-1の値を有する送信ビット振幅値である。

(1) 不検出確率と位相誤検出確率の取得方法

全測定回数すなわち UW を繰り返し送信し、受信した総回数を N 、 UW パターンと k ビット異なるパターンが受信された回数を n_k 、 UW 長を M ビットとすると、許容誤りビット数 ε に対する不検出確率 $P_m(\varepsilon)$ は、次式で与えられる。

$$P_m(\varepsilon) = \frac{\sum_{k=\varepsilon+1}^{M-\varepsilon-1} n_k}{N} \quad (6)$$

また、位相誤検出確率 $P_p(\varepsilon)$ は、次式で与えられる。

$$P_p(\varepsilon) = \frac{\sum_{k=M-\varepsilon}^M n_k}{N} \quad (7)$$

以上、不検出確率と位相誤検出確率は、各々(6)式と(7)式に基づき、取得データを処理することによって算出される。

(2) ランダムビット中の誤検出確率の取得方法

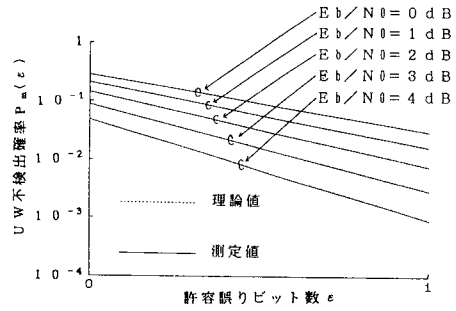
2^M 種類の“0”と“1”から成る各々異なるビットパターンを独立に発生させ、各パターンに含まれる個々のビットに白色ガウス雑音を付加し、受信信号が UW パターンと誤判定される確率を算出する。

個々のパターン i ($i = 1 \sim 2^M$) に対して、測定回数を N_i 、 UW パターンと k ビット異なるパターンが受信された回数を n_{ik} とすると、許容誤りビット数 ε に対するランダムビット中の誤検出確率 $P_f(\varepsilon)$ は、次式で与えられる。

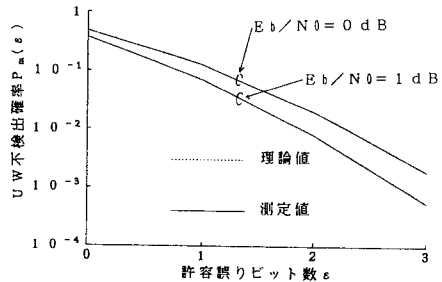
$$P_f(\varepsilon) = \frac{1}{2^M} \sum_{i=1}^{2^M} \frac{\sum_{k=0}^{\varepsilon} n_{ik} + \sum_{k=M-\varepsilon}^M n_{ik}}{N_i} \quad (8)$$

(3) 各種検出特性の評価

図3から図5は、各々許容誤りビット数 ε に対する不検出確率 $P_m(\varepsilon)$ 、位相誤検出確率 $P_p(\varepsilon)$ 、ランダムビット中の誤検出確率 $P_f(\varepsilon)$ の変化を示したものである。これらの図では、測定結果を実線で表現したが、許容誤りビット数 ε は整数値でのみ与えられるため、整数の ε に対する確率値のみが意味を有する。また、理論値を破線で示す。

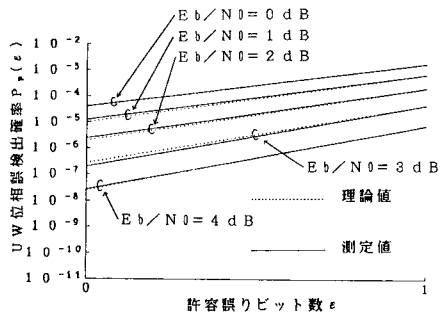


(a) UW長4ビット

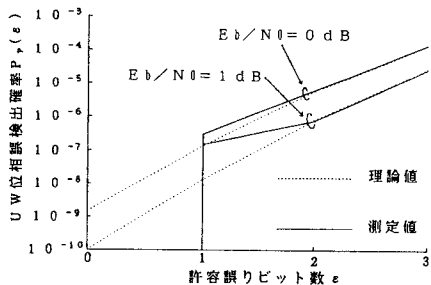


(b) UW長8ビット

図3 許容誤りビット数に対する不検出確率の変化



(a) UW長4ビット



(b) UW長8ビット

図4 許容誤りビット数に対する位相誤検出確率の変化

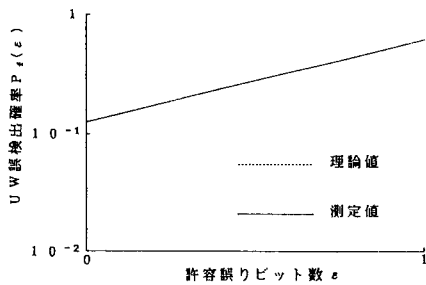


図5 UW長4ビットの場合の許容誤りビット数に対するランダムビット中の誤検出確率の変化

これらの結果より、測定値と理論値との対応に関して、以下のことが考察される。

- ① 不検出確率及びランダムビット中の誤検出確率の測定値は、理論値と一致する。
- ② 位相誤検出確率については、 ε の値が小さい領域において、理論値と測定値との誤差が見られる。これは、例えば、最も誤差が顕著な $\varepsilon = 0$ の場合、位相誤検出確率を算出するために用いるMビット誤りの測定回数 n_M の値が小さく、理論値の導出で仮定している無限の観測期間に一致していないことに起因するものである。Mビット誤りが発生する確率は極めて低く、理論値との一致を見るためには、相当の測定回数が必要となる。

4.2 軟判定データを用いたユニークワード検出

MビットのUW中に含まれる各ビットを独立した次元として有するM次元空間を想定し、受信したUWを同空間内のベクトル点 \mathbf{Y} で表現する。ベクトル点 \mathbf{Y} の座標($y_1 \sim y_M$)は、UW中の各送信ビット振幅値 x_i に白色ガウス雑音 n_i が付加された受信振幅 y_i の組合せで表現される。

$$y_i = x_i \sqrt{E_b} + n_i \quad (i = 1 \sim M) \quad (9)$$

軟判定データを用いたUW検出は、M次元空間内のUWパターンに対応するベクトル点 $\mathbf{P} (x_1 \sim x_M)$ とUW中の全ビットを反転させた \overline{UW} パターンに対応するベクトル点 $\overline{\mathbf{P}} (-x_1 \sim -x_M)$ と受信信号の上記ベクトル点 $\mathbf{Y} (y_1 \sim y_M)$ との間のユークリッド距離を尺度として実行される。

さて、UW検出に適用する軟判定データの形態として、量子化なし、4値量子化、8値量子化の3種類を検討対象とする。量子化なしの軟判定データを用いる場合には、DSP上で(9)式により計算される各ビット毎の受信振幅 y_i を直接使用して、ベクトル点 \mathbf{P} と $\overline{\mathbf{P}}$ との間のユークリッド距離を算出する。

一方、量子化された軟判定データを用いる場合には、(9)式で与えられる受信振幅 y_i が、最適しきい値間隔 T ⁽⁴⁾により区切られた、量子化数 q に対応する q 個の区間のいずれに属するかを判定した後、区間毎の代表値 $a_i (i = 1 \sim q)$ ⁽¹⁾に置換する。表2と表3は、各々4値及び8値量子化された軟判定データに対して使用した E_b/N_0 毎の最適しきい値間隔 T と各区間の代表値 a_i を示したものである。

表2 4値量子化における各 E_b/N_0 に対する最適しきい値間隔 T と各区間の代表値 a_i

E_b/N_0 [dB]	最適しきい値間隔 T	i	代表値 a_i
0	0.72	1	-1.393789
		2	-0.379100
		3	0.379100
		4	1.393789
1	0.64	1	-1.295288
		2	-0.346208
		3	0.346278
		4	1.295288
2	0.58	1	-1.217768
		2	-0.324172
		3	0.324172
		4	1.217768
3	0.52	1	-1.151015
		2	-0.324172
		3	0.324172
		4	1.151015
4	0.48	1	-1.102510
		2	-0.290355
		3	0.290355
		4	1.102510

表3 8値量子化における各 E_b/N_0 に対する最適しきい値間隔 T と各区間の代表値 a_i

E_b/N_0 [dB]	最適しきい値間隔 T	i	代表値 a_i
0	0.41	1	-1.717665
		2	-1.023343
		3	-0.621114
		4	-0.219875
		5	0.219875
		6	0.621114
		7	1.023343
		8	1.717665
1	0.37	1	-1.574608
		2	-0.926552
		3	-0.564172
		4	-0.192826
		5	0.192826
		6	0.564172
		7	0.926552
		8	1.574608

(1) 不検出確率と位相誤検出確率の取得方法

受信信号のベクトル点 $\mathbf{Y} (y_1 \sim y_M)$ とUWパターンに対応するベクトル点 $\mathbf{P} (x_1 \sim x_M)$ 及び \overline{UW} パターンに対応するベクトル点 $\overline{\mathbf{P}} (-x_1 \sim -x_M)$ との間のユークリッド距離を各々 R_0 と R_1 、許容ユークリッド距離を

d とすると、正検出、不検出及び位相誤検出の条件は、各々次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(正検出)} \quad R_0 \leq d \quad \text{かつ} \quad R_0 < R_1 \\ \text{(不検出)} \quad R_0 > d \quad \text{かつ} \quad R_1 > d \quad \text{または} \\ \quad R_0 = R_1 \quad | \quad R_0 \leq d, R_1 \leq d \\ \text{(位相誤検出)} \quad R_1 \leq d \quad \text{かつ} \quad R_1 < R_0 \end{array} \right. \quad (10)$$

具体的測定では、DSPにおける信号処理の容易性を考慮して、上記ユークリッド距離 R_0 と R_1 を計算することではなく、それらの2乗値 R_0^2 と R_1^2 と許容ユークリッド距離 d の2乗値 d^2 との比較による判定を行った。また、不検出確率は、正検出確率と位相誤検出確率の和を1から減ずることにより導出した。

測定データに対する処理方法は、以下の通りである。

- ① ベクトル \mathbf{P} と $\bar{\mathbf{P}}$ とのユークリッド距離 R_0 と R_1 の2乗値である R_0^2 と R_1^2 の大小関係により、正検出と位相誤検出のいずれになりうるかを判定する。
 - ② ①の判定結果、すなわち $R_0^2 < R_1^2$ と $R_0^2 > R_1^2$ に各々対応する2種類の配列（正検出用と位相誤検出用）を用意する。 $R_0^2 < R_1^2$ の場合、正検出用配列中の R_0^2 をアドレスとする格納場所に、その判定が生じた測定回数を累積する。一方、 $R_0^2 > R_1^2$ の場合、位相誤検出用配列中の R_1^2 をアドレスとする格納場所に、その判定が生じた測定回数を累積する。なお、 $R_0^2 = R_1^2$ の場合、不検出と判定されるので、どちらの配列にも測定回数を累積しない。
 - ③ 許容ユークリッド距離 d を設定して、 d^2 のアドレス以内の測定回数を累積することによって、正検出あるいは位相誤検出と判定される合計の測定回数を算出し、それらを全測定回数で除することによって、正検出確率と位相誤検出確率を導出する。
- 全測定回数を N 、正検出用配列と位相誤検出用配列のアドレス i に格納された測定回数を各々 n_i 、 m_i とすると、許容ユークリッド距離 d に対する正検出確率 $P_c(d)$ 、位相誤検出確率 $P_p(d)$ 及び不検出確率 $P_m(d)$ は、各々次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c(d) = \frac{\sum_{i \leq d^2} n_i}{N} \\ P_p(d) = \frac{\sum_{i \leq d^2} m_i}{N} \\ P_m(d) = 1 - [P_c(d) + P_p(d)] \end{array} \right. \quad (11)$$

以上の手順を採用することによって、許容ユークリッド距離 d 毎に測定を別途繰り返す必要はなく、不検出確率、位相誤検出確率及び正検出確率と許容ユークリッド距離との関係を一括して取得することが可能となる。

(2) ランダムビット中の誤検出確率の取得方法

硬判定データを用いる場合と同様に、 2^M 種類のビットパターンを独立に発生させ、個々のパターンに対する受信信号のベクトル点 \mathbf{Y}_i ($i = 1 \sim 2^M$) を測定する。ベクトル点 \mathbf{Y}_i と UW パターンに対応するベクトル点 \mathbf{P} 、及び \bar{UW} パターンに対応するベクトル点 $\bar{\mathbf{P}}$ との間のユークリッド距離を各々 r_0 、 r_1 とすると、誤検出する条件は、次式で与えられる。

$$r_0 \leq d \quad \text{または} \quad r_1 \leq d \quad | \quad r_0 \neq r_1 \quad (12)$$

従って、1個の配列を用意し、 $r_0^2 = r_1^2$ を除き、 r_0^2 または r_1^2 をアドレスとする格納場所に測定回数を累積した後、許容ユークリッド距離 d を設定して、 d^2 のアドレス以内の測定回数の総和をとることによって、誤検出と判定される総測定回数を算出することができる。

個々のパターン i ($i = 1 \sim 2^M$) に対する測定回数を N_i ($i = 1 \sim 2^M$)、配列のアドレス j に格納された測定回数を n_{ij} とすると、許容ユークリッド距離 d に対する、ランダムビット中の誤検出確率 $P_f(d)$ は、次式で与えられる。

$$P_f(d) = \frac{1}{2^M} \sum_{i=1}^{2^M} \frac{\sum_{j \leq d^2} n_{ij}}{N_i} \quad (13)$$

(3) 各種検出特性の評価

まず、前項で導入した許容ユークリッド距離 d に代わって、許容ユークリッド距離比 α を定義する。

不一致ビット数が f の異なる2種類のビットパターン間のユークリッド距離は $2\sqrt{f E_b}$ で与えられる。従って、 UW 長が M ビットの場合、次式で示される許容ユークリッド距離 d_0 は、 UW パターンに対応するベクトル点 \mathbf{P} と \bar{UW} パターンに対応するベクトル点 $\bar{\mathbf{P}}$ との間のユークリッド距離の $1/2$ に等しい。

$$d_0 = \sqrt{M E_b} \quad (14)$$

そこで、許容ユークリッド距離 d を

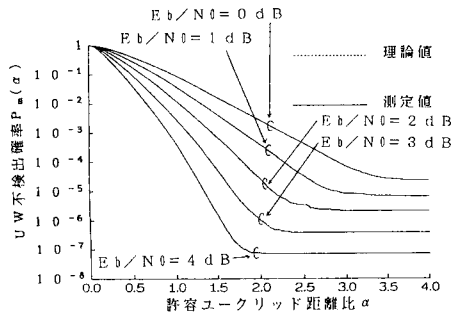
$$d = \sqrt{\alpha} d_0 = \sqrt{\alpha M E_b} \quad (15)$$

とおき、 $\alpha = 1$ のとき、許容ユークリッド距離 d がベクトル点 \mathbf{P} と $\bar{\mathbf{P}}$ の間のユークリッド距離の $1/2$ になるように許容ユークリッド距離比 α を定義する。

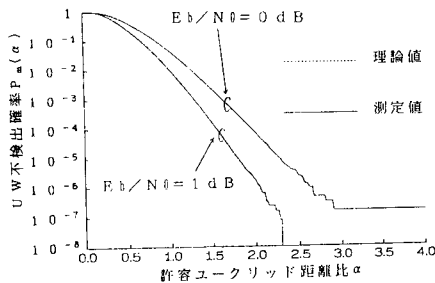
[不検出確率]

図6から図8は、UW長4ビット及び8ビットに対して、 E_b/N_0 をパラメータにとり、各々量子化なし、4値量子化、8値量子化された軟判定データを用いた場合の許容ユークリッド距離比 α に対する不検出確率 $P_m(\alpha)$ の変化を示したものである。

これらの図から、測定値と理論値はよく一致していることがわかる。但し、許容ユークリッド距離比 α の増大につれて、収束する値に差が見られる。また、その差は E_b/N_0 の値に依存して異なる。この差の要因として、収束値が極めて低い値となるため、測定回数が充分でなかったことと、理論値の計算精度(32ビット浮動小数点)と測定値の計算精度(16ビット固定小数点)の違いにより、UW不検出となる条件 $R_0^2 = R_1^2$ において異なる判定結果が生じたことを挙げる事ができる。

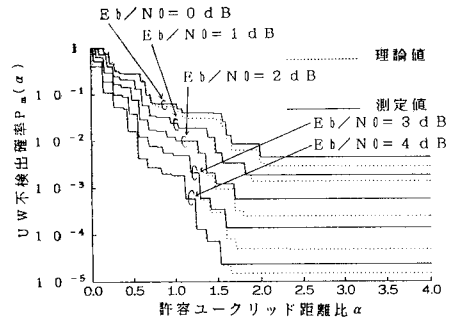


(a) UW長4ビット

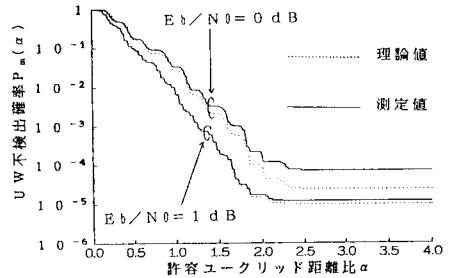


(b) UW長8ビット

図6 量子化なしの軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対する不検出確率の変化

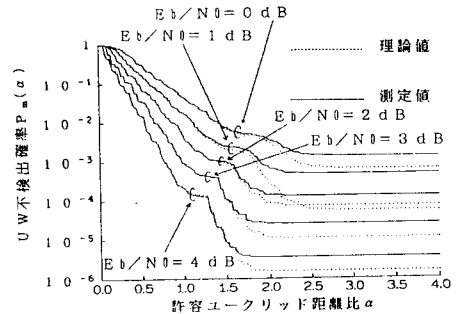


(a) UW長4ビット

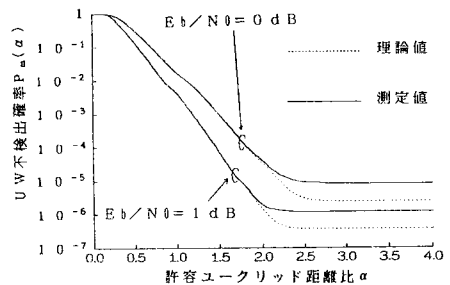


(b) UW長8ビット

図7 4値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対する不検出確率の変化



(a) UW長4ビット



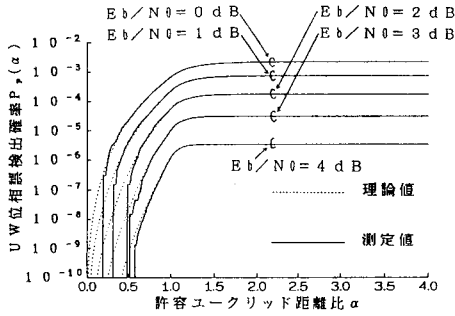
(b) UW長8ビット

図8 8値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対する不検出確率の変化

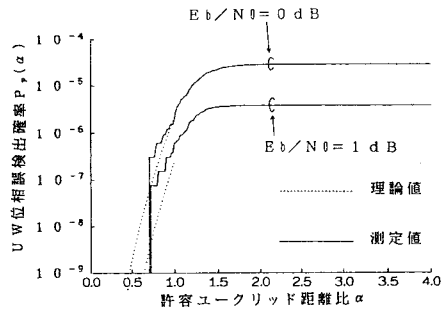
[位相誤検出確率]

図9から図11は、UW長4ビット及び8ビットに対して、 E_b/N_0 をパラメータにとり、各々量子化なし、4値量子化、8値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比 α に対する位相誤検出確率 $P_p(\alpha)$ の変化を示したものである。

これらの図より、理論値と測定値の比較において、許容ユークリッド距離比 α が0に近い範囲、及び α が大きな値をとるにつれて収束する値に若干の違いがあることがわかる。 α が0に近い範囲においては、位相誤検出確率の値は非常に小さく、理論値の導出で仮定している無限の観測期間を達成していないことが起因している。また、 α の増加にともなう位相誤検出確率の収束値の誤差は、理論値と測定値の計算精度の違いによる測定値の不検出確率の増大が、位相誤検出確率の低下に結びついた結果である。

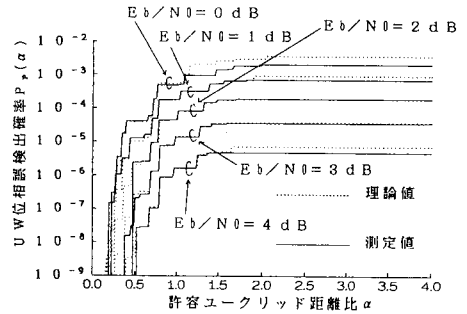


(a) UW長4ビット

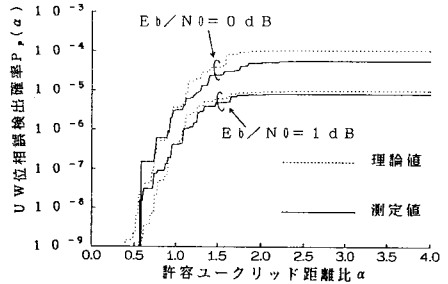


(b) UW長8ビット

図9 量子化なしの軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対する位相誤検出確率の変化

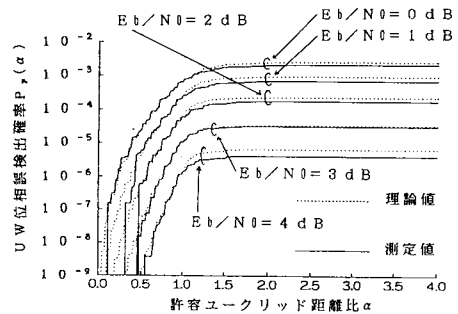


(a) UW長4ビット

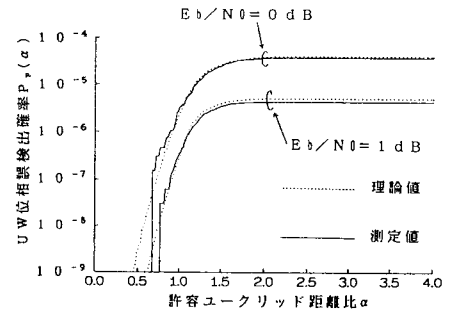


(b) UW長8ビット

図10 4値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対する位相誤検出確率の変化



(a) UW長4ビット



(b) UW長8ビット

図11 8値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対する位相誤検出確率の変化

[ランダムビット中の誤検出確率]

図12から図14は、UW長4ビットに対して、 E_b/N_0 をパラメータにとり、各々量子化なし、4値量子化、8値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比 α に対するランダムビット中の誤検出確率 $P_e(\alpha)$ の変化を示したものである。不検出確率、位相誤検出確率の特性と同様に、若干の差が見られるものの、測定値と理論値との間に良好な一致が得られている。

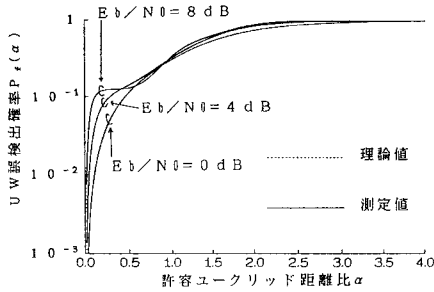


図12 UW長4ビット、量子化なしの軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中における誤検出確率の変化

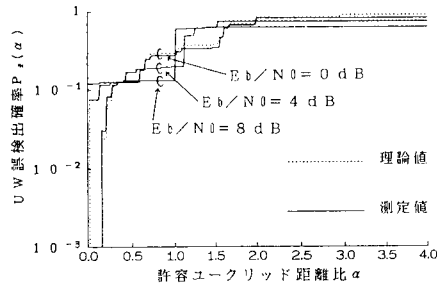


図13 UW長4ビット、4値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中における誤検出確率の変化

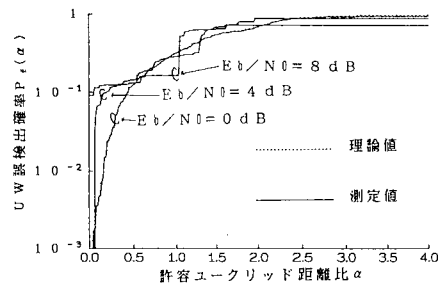


図14 UW長4ビット、8値量子化された軟判定データを用いた場合の、許容ユークリッド距離比に対するランダムビット中における誤検出確率の変化

5. あとがき

軟判定データを用いたUW検出方式が、DSPを用いたハードウェアにより具現化できることが明らかとなった。また、各種UW検出特性に関しては、確率計算に基づく理論値とほぼ等しい測定結果を得ることができ、理論計算ならびにDSP上に構築したUW検出アルゴリズムの正当性を確認することができた。

今後は、更に長いUW長に対する各種検出特性を取得する予定である。

参考文献

- (1) 荻窪、笹井、高畑：“軟判定データを用いたフレーム同期方式に関する理論と特性”，信学技報，SAT90-25（平2-8）。
- (2) 笹井、荻窪、高畑：“量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出方式の特性”，1990信学秋季全大，B-180（平2-10）。
- (3) 笹井、荻窪、高畑：“量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出方式に関する理論的検討”信学技報（衛星通信），（平3-9）。
- (4) 安田、平田、小川：“ウィタビ復号における軟判定しきい値の最適間隔”，信学論（B），J64-B，No.11（昭56-11）。

量子化された軟判定データを用いた 16ビット長のユニークワード検出特性

Performance of 16-bit Unique Word Detection
using Quantized Soft-Decision Data

贅毛 研 竹藪 雅人 高畑 文雄
Ken MINOMO Masato TAKEYABU Fumio TAKAHATA
早稲田大学 理工学部
Wasada University

1 まえがき

軟判定データを用いたユニークワード(UW)検出特性に関して、UW長8ビットまでの理論解析は既に報告済みである⁽¹⁾。UWが更に長くなると、理論解析が困難になることから、UW検出のアルゴリズムをハードウェア上に構築し⁽²⁾、UW長16ビットに対するUW検出特性を实际的に取得したので報告する。

2 実験系の構成

本実験では、UWの送信、受信及び雑音の発生 of 3機能 T1社のDSP(TMS320C25)上に構築して、各種検出特性を取得した。

表1は、本実験において想定したパラメータ値及び取得した検出特性の種類を列挙したものである。

表1 本実験において想定したパラメータ値

UW長	16ビット
UWパターン	0000 1100 1101 0100
ベースバンド信号の種類	硬判定、量子化なし軟判定、4値量子化、8値量子化軟判定
変復調方式	絶対符号化同期検波2相PSK
取得した検出特性	不検出 ランダムビット中の誤検出
E_b/N_0	0, 2 dB

3 特性結果

図1と図2は、各々、許容ユークリッド距離比 α に対するUW不検出確率 $P_m(\alpha)$ 、及びランダム(情報)ビットのUW誤検出確率 $P_r(\alpha)$ を示したものである。図1より、許容ユークリッド距離比 α を大きくする程、不検出確率 $P_m(\alpha)$ は低下することがわかる。また、同等の不検出確率を達成することを条件とした場合、 E_b/N_0 が低い程 α を大きくする必要がある。一方、図2から、 α を大きくする程、ランダムビット中の誤検出確率 $P_r(\alpha)$ は増加することがわかる。また、硬判定データを用いた特性が最もよく、軟判定データを用いた特性は、 E_b/N_0 の違いによる差が小さい。

図3は、 $E_b/N_0 = 0$ dBの条件下における、UW不検出確率 P_m とランダムビット中のUW誤検出確率 P_r との関係を示したものである。同図において、曲線が左下方に存在する程 P_m と P_r の両者が低く、良好なUW検出特性となる。本条件下においては、8値量子化された軟判定データを用いた特性が、一概に良好な特性を示すことがわかる。図4は、 $E_b/N_0 = 2$ dBの条件下における P_m と P_r の関係を示したものであるが、同様の結論が得られることがわかる。

4 あとがき

UW長16ビット、 $E_b/N_0 = 0$ 及び2 dBの条件下では、8値量子化を施した軟判定データを用いた特性が、一概に良好になることが明かとなった。今後は、更に長いUW及び各種 E_b/N_0 に対する特性を取得評価する予定である。

[参考] (1) 笹井、荻窪、高畑; "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する理論的検討", 信学技報, SAT91-75(1991)
(2) 竹藪、贅毛、高畑; "量子化された軟判定データを用いたユニークワード検出特性に関する実験的検討", 信学技報, SAT91-76(1991)

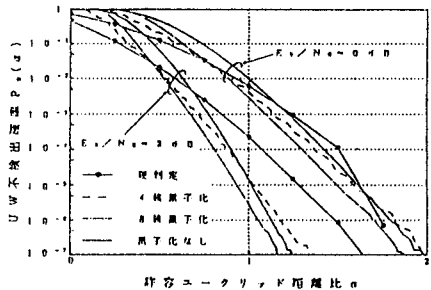


図1 許容ユークリッド距離比 α に対するUW不検出確率 $P_m(\alpha)$ の変化

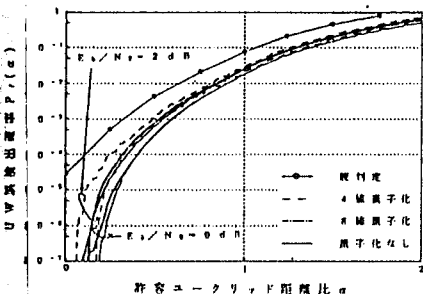


図2 許容ユークリッド距離比 α に対するUW誤検出確率 $P_r(\alpha)$ の変化

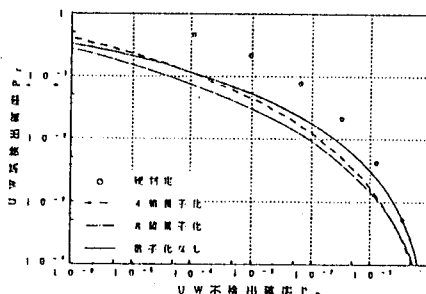


図3 $E_b/N_0 = 0$ dBの条件下におけるUW不検出確率 P_m とUW誤検出確率 P_r との関係

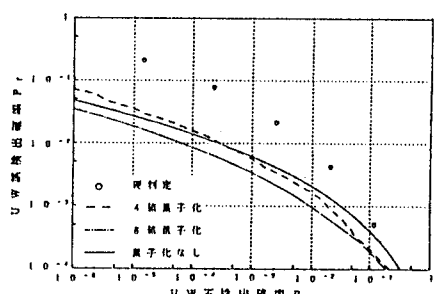


図4 $E_b/N_0 = 2$ dBの条件下におけるUW不検出確率 P_m とUW誤検出確率 P_r との関係