

データ通信回線の品質評価技術に関する研究

バースト雑音環境下における短期間符号誤り率分布特性の推定法

東北学院大学 工学部 電気工学科

大 沼 孝 一

あらまし デジタル通信システムに混入するバースト雑音の時間分布特性を任意に選択できるように、新しく符号誤り発生過程をモデル化し、それに基づいて、これまでよりもより実際的なバースト雑音環境下での短期符号誤り率分布特性を、理論的に推定する方法を誘導し、その正当性を計算機シミュレーションにより確認した。

1. はしがき

デジタル技術の急速な進歩と相まってISDNが構築されつつある現在、音声、データ、画像等の通信情報の主体は、すべてデジタル化されて伝送される傾向にある。それに伴い、デジタル通信回線の性能をモニター・維持・管理する上で、その伝送品質評価技術がより一層重要になってきている。

デジタル通信回線の伝送品質は、一般に符号誤り率(Bit Error Rate; BER)によって評価されてきた。しかし、パケット通信を初めとするデジタル情報サービスの多様化と伝送速度の高速化が進んでいる現在、デジタル回線の伝送品質を評価するには、単に長期にわたる平均的BERのみでは不十分であり、Error Seconds (ES)、Error Free Seconds (EFS)、Severely Error Seconds (SES)の生起頻度特性のような短期間BER特性⁽¹⁾、すなわち一定時間区間ごとのBERの分布特性も、重要な評価対象と考えられてきている。このような短期間BER分布特性は、デジタル回線の伝送品質評価対象となるのみならず、伝送符号に付加する誤り検出・訂正機能を検討する上でも、重要な特性と言える。

デジタル回線の中には、無線通信におけるフェーディング、移動体通信におけるシャドーイング⁽²⁾、衛星通信における降雨減衰効果等、発生は間欠的であるが一度発生するとある期間持続するようなバースト性のSN変動を伴う回線も少なくない。このような回線では、符号誤りもバースト的に発生する。このような回線の伝送品質は、一定電力の信号下にバースト性雑音が印加されたモデルを仮定して解析・推定することができる。

これまでの短期間BER分布特性に関する研究は、主に符号タイムスロットごとに独立生起が仮定できる連続性あるいはインパルス性のランダム雑音を対象になされてきており、バースト性雑音を対象にした研究は数が少ない。バースト性雑音には時間相関が存在するため、符号タイムスロットごとに雑音の独立生起が仮定できない。したがって、バースト性雑音下での伝送品質を推定するには、雑音の振幅分布特性のみならず時間分布特性をも十分考慮して検討する必要がある。これまでに、デジタル回線におけるバースト符号誤りを解析するために提案された符号誤り発生モデル^{(3) - (8)}においては、いずれも雑音の時間分布特性を十分に考慮しているとは言い難い。

本研究では、まずはじめに、デジタル通信システム

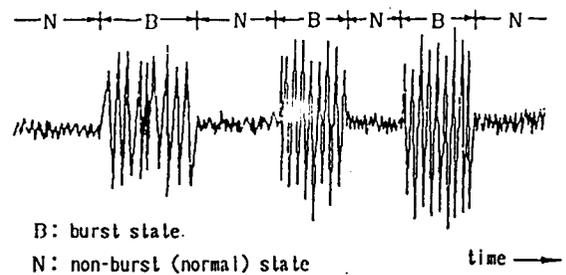


図1 2状態雑音モデル

に混入するバースト雑音の時間分布特性を任意に選択できるようにした、新しいバースト符号誤り発生過程のモデルを提案し、それに基づいて、これまでよりもより現実に即したバースト雑音環境下での短期符号誤り率分布特性を、理論的に推定する方法を誘導し、その正当性を計算機シミュレーションにより確認した。

2. バースト雑音のモデル化

デジタル回線でのバースト符号誤りを解析するために提案されたモデルの一つに、Gilbertモデル⁽³⁾がある。これは、バースト雑音特性に基づいて、BERが低い非バースト状態と高いバースト状態の2状態に符号誤り発生過程を分け、それらを最も簡単な2状態マルコフ過程として表したものである。このモデルでは、状態遷移確率によらず、各状態ごとの持続時間分布は同一形態となる。しかし、現実には各状態の持続時間分布は種々の形態を取り得ると考える方がより一般的である。そこで、ここでは、Gilbertモデルと同様のバースト雑音特性に基づくが、バースト雑音特性の時間相関性をより一層詳細に考慮することができるように、バースト状態、非バースト状態の各状態ごとの持続時間分布特性を任意分布とすることができる新しい符号誤り発生過程のモデルを提案する。

バースト雑音が混入したデジタル通信システムの符号誤り発生過程のモデル化は、以下に示す6つの前提の基で行う。

- (1) 通信システムに混入する雑音は、図1に示すように、時間軸上で振幅変動が大きいバースト部分Bと変動が小さい非バースト部分Nの2状態からなり、バースト部分の持続時間と非バースト部分の持続時間は互いに独立な時間分布特性にしたがって、交互に生起するものとする。
- (2) 各状態での雑音振幅の時間変動は、定常ランダム過程と見なす。
- (3) 混入雑音のバースト部分、非バースト部分それぞれの持続時間分布および振幅分布は、全て既知とする。 $D(\mu, \sigma)$ は、平均値 μ 、偏差 σ の任意分布を表わすものとし、以下では上述の各分布を次のように表す。

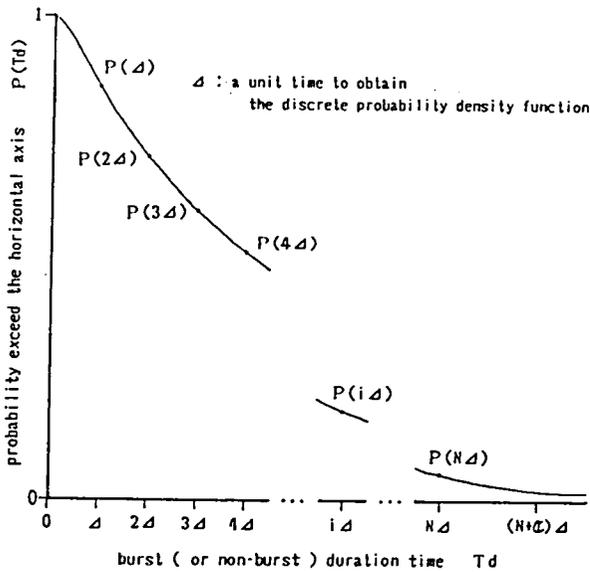


図2 時間分布特性

$D_{TB}(\mu_{TB}, \sigma_{TB})$; バースト部分の持続時間分布
 $D_{TN}(\mu_{TN}, \sigma_{TN})$; 非バースト部分の持続時間分布
 $D_{AB}(\mu_{AB}=0, \sigma_{AB})$; バースト部分の振幅分布
 $D_{AN}(\mu_{AN}=0, \sigma_{AN})$; 非バースト部分の振幅分布

(4) 雑音状態の持続時間分布特性から離散確率密度関数を仮定する際は、一つの定められた単位時間間隔 Δ ごとに状態判別を行う。したがって、バースト部分、非バースト部分の持続時間は、すべてこの単位時間の整数倍となる。

(5) 伝送符号は、符号"0"、"1"に対応して、 $0(V)$ 、 $V(V)$ の振幅に等化されるNRZ符号とする。符号"0"、"1"の生起確率はそれぞれ p_0 、 p_1 、符号の伝送速度は $f_s (= 1/T_s)$ 、符号識別回路のしきい値は $V/2(V)$ とする。

(6) N 単位時間からなる一定期間 T_M を観測時間窓とする。すなわち、 $T_M = N \cdot \Delta$

雑音のバースト、非バースト各状態での符号誤りの発生は、前提(2)より、符号のタイムスロット T_s ごとの独立生起現象として取り扱うことができる。したがって、バースト状態での平均符号誤り率 e_B および非バースト状態での平均符号誤り率 e_N は、前提(3)、(5)より、振幅分布 $D_{AB}(\mu_{AB}=0, \sigma_{AB})$ 、 $D_{AN}(\mu_{AN}=0, \sigma_{AN})$ それぞれの分布関数を $P_{AB}(X)$ 、 $P_{AN}(X)$ とすると、それぞれ次式で与えられる。

$$e_B = p_0 / P_{AB}(V/2) + p_1 / \{1 - P_{AB}(-V/2)\} \quad (1)$$

$$e_N = p_0 / P_{AN}(V/2) + p_1 / \{1 - P_{AN}(-V/2)\} \quad (2)$$

これを基に、符号誤り発生過程は、バースト、非バーストの各状態で、符号誤り発生状態確率がそれぞれ e_B 、 e_N となる別々の2状態マルコフモデルとして表される。

この時、符号誤りはタイムスロットごとに独立生起するという前提より、バースト状態で、正常受信状態から誤り発生状態への遷移確率は e_B 、誤り発生状態から正常受信状態への遷移確率は $1 - e_B$ となる。同様に、非バースト状態で、正常受信状態から誤り発生状態への遷移確率は e_N 、誤り発生状態から正常受信状態への遷移確率は $1 - e_N$ となる。

バースト雑音の各状態の持続時間は、前提(4)にしたがって、単位時間 Δ 間隔で離散的に取り扱われる。ここで、雑音のバースト状態の持続時間分布 $D_{TB}(\mu_{TB}, \sigma_{TB})$ と非バースト状態の持続時間分布 $D_{TN}(\mu_{TN}, \sigma_{TN})$ の分布関数を、それぞれ $P_{TB}(t)$ 、 $P_{TN}(t)$ とする。それらを、前提(6)にしたがって、図2に示すように、間隔 Δ ごとの $(N+1)$ 種の持続時間のみをとるように制限する。これより、2状態雑音モデルの各状態を、さらに持続時間が観測時間窓 $T_M (= N \cdot \Delta)$ 以内となる N 状態と T_M を越える一つの状態の合計 $(N+1)$ の内部状態に分けて考えることができる。

以上のことより、図3に示すような、符号誤り過程をバースト、非バースト雑音状態で異なる2状態モデルとし、各雑音状態での持続時間過程を $(N+1)$ の内部状態とする、一つの新しいバースト雑音による符号誤り発生過程のモデルを導くことができる。このモデルは、 $(2N+2)$ の状態を持ち、その中の $(N+1)$ 連鎖状態は同一の符号誤り発生過程をとる、多重マルコフモデルとも解釈できる。この雑音発生モデルの各状態での持続時間過程において、持続時間が $i \cdot \Delta$ となる i 番内部状態の状態確率は、各分布関数より、離散確率密度関数 p_{TBi} 、 p_{TNi} ($i=1, 2, \dots, N+1$) として簡単に求められる。すなわち、

$$p_{TBi} = p_{TB}(i \cdot \Delta) = P_{TB}((i-1)\Delta) - P_{TB}(i \cdot \Delta) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

$$p_{TNi} = p_{TN}(i \cdot \Delta) = P_{TN}((i-1)\Delta) - P_{TN}(i \cdot \Delta) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

ただし、 $(N+1)$ 番状態の状態確率は、 $N \cdot \Delta$ を越える確率、その持続時間は $N \cdot \Delta$ を越える部分の平均値 $(= \alpha \cdot \Delta, \alpha: \text{整数})$ とする。すなわち、 $(N+1)$ 番状態の状態確率はそれぞれ次式より求められる。

$$p_{TB(N+1)} = p_{TB}(\alpha_B \cdot \Delta) = 1 - P_{TB}(N \cdot \Delta) \quad (i=N+1) \quad (5)$$

$$p_{TN(N+1)} = p_{TN}(\alpha_N \cdot \Delta) = 1 - P_{TN}(N \cdot \Delta) \quad (i=N+1) \quad (6)$$

また、バースト状態が $i \cdot \Delta$ 時間持続した状態である i 番内部状態からさらに Δ 時間持続する状態の $(i+1)$ 番内部状態への遷移確率は、 $P_{TB}(i \cdot \Delta) / P_{TB}((i-1) \cdot \Delta)$ となり、バースト状態が $i \cdot \Delta$ 時間持続した状態で終了して非バースト状態へ遷移する確率は、 $1 - P_{TB}(i \cdot \Delta) / P_{TB}((i-1) \cdot \Delta)$ として表せる。同様に、非バースト状態が $i \cdot \Delta$ 時間持続した状態の i 番内部状態からさらに

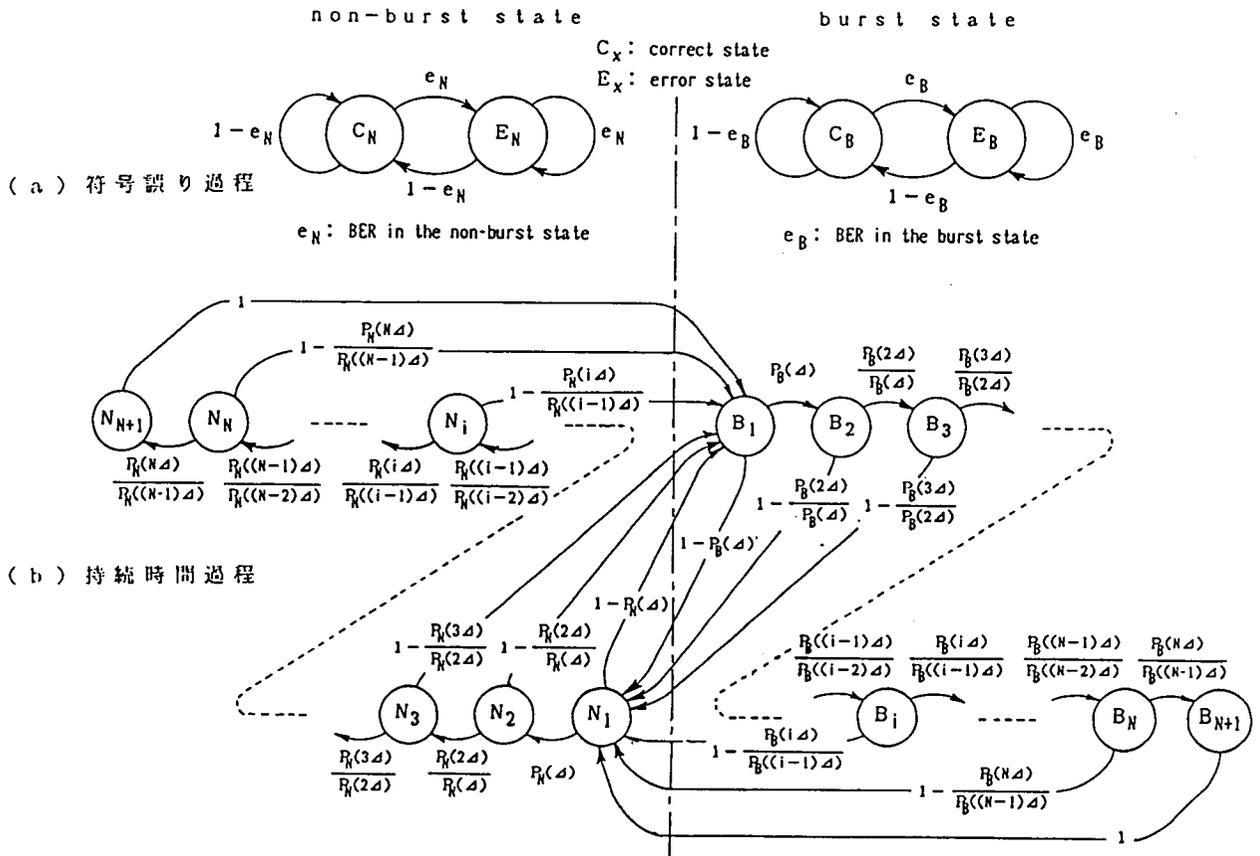


図3 バースト雑音による符号誤り過程のモデル

Δ 時間持続する状態の $(i+1)$ 番内部状態への遷移確率は $P_{TN}(i \cdot \Delta) / P_{TN}((i-1) \cdot \Delta)$ 、非バーストの状態が $i \cdot \Delta$ 時間持続した後にバースト状態へ遷移する確率は、 $1 - P_{TN}(i \cdot \Delta) / P_{TN}((i-1) \cdot \Delta)$ として表せる。

3. バースト雑音による平均BER

短期間BER分布特性を検討する前に、長期にわたっての平均BERについて、簡単に検討する。この場合、時間変数は全く関係なくなる。

バースト雑音を特徴付ける2パラメータとして、バースト状態となる状態確率、すなわちバースト係数； A と、非バースト状態の雑音電力とバースト状態の雑音電力の比； Γ を、前提(3)に基づいて、それぞれ次式で定義することができる。

$$A = \mu_{TB} / (\mu_{TB} + \mu_{TN}) \quad (7)$$

$$\Gamma = (\sigma_{AN} / \sigma_{AB})^2 \quad (8)$$

ここで、バースト状態の平均雑音電力 σ_{AB}^2 は、背景(すなわち非バースト状態)雑音の平均電力 σ_{AN}^2 とバースト源から結合される真のバースト雑音電力との和と考えることができる。したがって、 $\sigma_{AB}^2 \ll \sigma_{AN}^2$ が成り立つ場合には、式(7)、(8)の A と Γ は、Middleton のインパルス性雑音に対するクラスA統計モデル⁽⁹⁾の雑音パラメータ A と Γ に一致する。この時の尖頭信号振幅対実効雑音

振幅に基づくSN比と平均BER； P_e は、式(1)、(2)、(7)、(8)を使用して、それぞれ次式で表される。

$$S/N = \frac{V}{\sqrt{A \cdot \sigma_{AB}^2 + (1-A) \cdot \sigma_{AN}^2}} \quad (9)$$

$$= \frac{V}{\sqrt{\{1-A \cdot (1-1/\Gamma)\} \cdot \sigma_{AN}^2}} \quad (10)$$

$$P_e = A \cdot e_B + (1-A) \cdot e_N \quad (10)$$

式(9)、(10)より、SN比-平均BER特性が得られる。振幅分布 $D_{AB}(\mu_{AB}=0, \sigma_{AB})$ 、 $D_{AN}(\mu_{AN}=0, \sigma_{AN})$ をいず

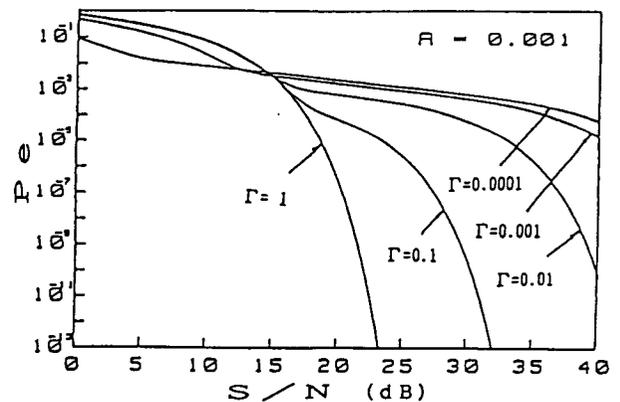


図4 バースト雑音による長期間BER特性例 $D(0, \sigma_{AB})$ と $D(0, \sigma_{AN})$ をいずれもガウス分布、 $p_B = p_I = 1/2$ とする。

れもガウス分布、 $p_0 = p_1 = 0.5$ として計算したSN比-平均BER特性例を図4に示す。これらは、すでに求められているPSK通信方式のインパルス性雑音による平均BER特性¹¹⁾に、傾向が良く一致している。この例からも分かるように、長期にわたっての平均BER特性は振幅分布のみに依存し、雑音状態の持続時間分布特性には全く関係しない点に、注意すべきである。したがって、たとえ雑音の発生形態が連続性、不連続性と異なっても、振幅分布特性が同一であれば平均BER特性は等しくなる。

4. 短期間BER分布特性の推定法

符号誤りを観測する一定時間区間、すなわち観測時間窓 T_M 内の総符号タイムスロット数を m とし、一つの観測時間窓内で観測された誤り符号数が i 個の場合、その期間内の符号誤り率 e_s を、次式で定義する。

$$e_s = i / m, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

この e_s を、「時間窓 T_M での短期間符号誤り率(短期間BER)」と呼ぶ。ここで m および i は有限の整数なので、 e_s は $1/m$ 分解能の離散値を持つ。

観測時間窓 T_M ごとに長期間にわたり短期間BERを観測した場合、各観測時間窓ごとの短期間BER; e_s は時間変動するので、ランダム変数と見なさなければならぬ。すなわち、多くの短期間BERの観測値より、短期間BERの観測値 e_x が e_s となる確率 $p(e_s)$ を求めることができる。短期間BER; e_s と、短期間BERの観測値 e_x が e_s となる確率; $p(e_s)$ の関係を、短期間BER分布特性; $e_s - p(e_s)$ 特性と呼ぶ。

第2節で提案した符号誤り発生モデルの基で、バースト雑音を観測時間窓単位で標本化して観測すると、観測時間窓に対するバースト状態の占有率 R は、 $0 \leq R \leq 1$ の範囲で種々変動する。観測時間窓内の誤り符号数は、この占有率 R によって大きく影響される。したがって、短期間BER分布特性は、観測時間窓に対するバースト状態の占有率分布特性; $R - p(R)$ 特性に大きく依存する。そこで本節では、まずはじめに、観測時間窓に対するバースト状態の占有率分布特性の算出式を誘導し、次に、それを基に、短期間BER分布特性を推定する式を誘導する。

(4-1) 観測時間窓に対するバースト状態の占有率分布特性

観測時間窓 $T_M (= N \cdot \Delta)$ に対するバースト状態の占有率 R が $R_i (= i / N, i = 0, 1, 2, 3, \dots, N)$ となる確率 $P(R_i)$ を、式(3)~(6)で表される各雑音状態の持続時間の離散確率密度関数を使用して求める。

今、時間窓内に n 個のバースト状態が存在するものとし、その i 番バースト状態を B_i 、 i 番非バースト状態を

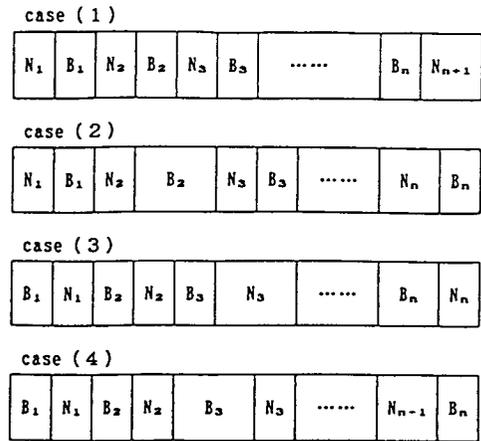


図5 観測時間窓内の雑音構成

N_i で表せば、観測時間窓内の雑音構成は、図5に示すような4種の場合が考えられる。すなわち

case (1). 非バースト状態で始まり、非バースト状態で終わる場合。この時には、 $(n+1)$ 個の非バースト状態が含まれる。

case (2). 非バースト状態で始まり、バースト状態で終わる場合。この時には、 n 個の非バースト状態が含まれる。

case (3). バースト状態で始まり、非バースト状態で終わる場合。この時には、 n 個の非バースト状態が含まれる。

case (4). バースト状態で始まり、バースト状態で終わる場合。この時には、 $(n-1)$ 個の非バースト状態が含まれる。

時間窓の初めで、バースト状態、非バースト状態に出会う確率は、それぞれ、 A および $(1-A)$ である。また任意時刻に、バースト長 $T_B = i \cdot \Delta$ の雑音に出会う確率を p_{B_i} 、時間長 $T_N = j \cdot \Delta$ の非バースト部分に出会う確率を p_{N_j} とすると、それらは次式で表される。

$$p_{B_i} = i \cdot p_{TB}(i \cdot \Delta) / \mu_{TB} \quad (12)$$

$$p_{N_j} = j \cdot p_{TN}(j \cdot \Delta) / \mu_{TN} \quad (13)$$

その時刻までにすでにバースト持続時間が $k \cdot \Delta$ ($0 \leq k < i$)経過した状態に出会う条件付き確率 $p_B(k|i)$ は、バースト内で雑音は独立生起すると仮定すれば、 $1/i$ で表される。同様に、すでに $k \cdot \Delta$ ($0 \leq k < j$)経過した非バースト状態に出会う条件付き確率 $p_N(k|j)$ は $1/j$ となる。ゆえに、時間窓の初めでバースト状態に出会い、それからの持続時間が $i \cdot \Delta$ となる確率 $p_{B_i}(i \cdot \Delta)$ は

$$\begin{aligned} p_{B_i}(i \cdot \Delta) &= A \sum_{m=i}^{N+1} p_{B_m} \cdot p_B(m - i | m) \\ &= A \sum_{m=i}^{N+1} p_{TB}(i \cdot \Delta) / \mu_{TB} \quad (14) \end{aligned}$$

同様に、時間窓の初めで非バースト状態に出会い、それからの持続時間が $j \cdot \Delta$ となる確率 $p_{N_j}(j \cdot \Delta)$ は、次式で表される。

$$p_{N_n}(j \cdot \Delta) = (1-A) \cdot \sum_{m=j}^{N+1} p_{N_m} \cdot p_N(m-j \cdot \Delta)$$

$$= (1-A) \cdot \sum_{m=j}^{N+1} p_{TN}(j \cdot \Delta) / \mu_{TN} \quad (15)$$

次に、時間窓の終端が $i \cdot \Delta$ 時間持続したバースト状態で終了する確率 $p_{B_n}(i \cdot \Delta)$ は、時間変数 $i \cdot \Delta$ を越える確率として定義される時間分布関数 $P_{TB}(i \cdot \Delta)$ より

$$p_{B_n}(i \cdot \Delta) = P_{TB}(i \cdot \Delta) \quad (16)$$

同様に、時間窓の終端が $j \cdot \Delta$ 時間持続した非バースト状態で終了する確率 $p_{N_n}(j \cdot \Delta)$ は、非バースト状態の持続時間分布関数より次式で表される。

$$p_{N_n}(j \cdot \Delta) = P_{TN}(j \cdot \Delta) \quad (17)$$

時間窓の最初と終端部分で占める時間を $W \cdot \Delta$ とすると、上述した4種の時間窓内雑音構成での中間の $(N-W) \cdot \Delta$ では、次のことが言える。

case(1)においては、 $(n-1)$ 個の非バースト状態と n 個のバースト状態が存在する。case(2)、(3)においては、バースト状態、非バースト状態いずれも $(n-1)$ 個存在する。そして、case(4)においては、 $(n-2)$ 個のバースト状態と $(n-1)$ 個の非バースト状態が存在する。

この中間部分では、バースト状態と非バースト状態は必ず交互に生起する。したがって、4種の雑音構成の中間部分が、特定の組合せとなる確率は、バースト状態と非バースト状態の離散時間確率密度関数 p_{TB_i} 、 p_{TN_i} を使用して表すことができる。すなわち、図5における i 番目のバースト状態の持続時間を Δ 単位で T_{B_i} 、 i 番非バースト状態の持続時間を T_{N_i} とすると、それぞれの状態の生起確率は次式で表される。

case(1)の場合

$$p_{M1} = \prod_{i=1}^n p_{TB}(T_{B_i}) \cdot \prod_{i=2}^n p_{TN}(T_{N_i}) \quad (18)$$

case(2)の場合

$$p_{M2} = \prod_{i=1}^{n-1} p_{TB}(T_{B_i}) \cdot \prod_{i=2}^n p_{TN}(T_{N_i}) \quad (19)$$

case(3)の場合

$$p_{M3} = \prod_{i=2}^n p_{TB}(T_{B_i}) \cdot \prod_{i=1}^{n-1} p_{TN}(T_{N_i}) \quad (20)$$

case(4)の場合

$$p_{M4} = \prod_{i=2}^{n-1} p_{TB}(T_{B_i}) \cdot \prod_{i=1}^{n-1} p_{TN}(T_{N_i}) \quad (21)$$

従って、時間窓内の雑音構成が、図5に示す特定の状態となる確率 p_{M_i} は、式(14)あるいは式(15)、式(16)あるいは式(17)、および式(18)~(21)を使用し、それぞれ次式により求められる。

case(1)の場合

$$p_{M1} = p_{N_n}(T_{N1}) \cdot p_{M1} \cdot p_{N_n}(T_{N_{n+1}}) \quad (22)$$

case(2)の場合

$$p_{M2} = p_{N_n}(T_{N1}) \cdot p_{M2} \cdot p_{B_n}(T_{B_n}) \quad (23)$$

case(3)の場合

$$p_{M3} = p_{B_n}(T_{B1}) \cdot p_{M3} \cdot p_{N_n}(T_{N_n}) \quad (24)$$

case(4)の場合

$$p_{M4} = p_{B_n}(T_{B1}) \cdot p_{M4} \cdot p_{B_n}(T_{B_n}) \quad (25)$$

この時の時間窓に対するバースト状態の占有率 R_i は、いずれの状態でも次式で表される。

$$R_i = \sum_{i=1}^n T_{B_i} / (N \cdot \Delta) \quad (26)$$

式(21)~(25)を使用して、バースト状態の占有率 R が $R_i (= i/N, i=0, 1, 2, 3, \dots, N)$ となる全ての特定雑音構成の生起確率を計算し、それらの総和を求めれば、観測時間窓 T_M 内でバースト状態の占有率が R_i となる確率 $p(R_i)$ となる。ただし、 $R_i=0$ と $R_i=1$ の場合には、それぞれ式(15)、(14)を直接使用して、次式より求める。

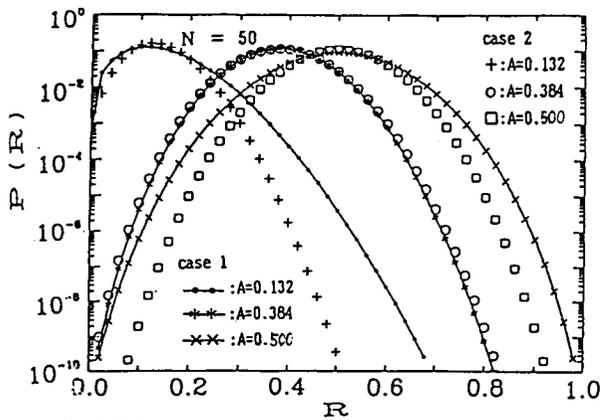
$$p(R_i=0) = (1-A) \cdot p_{TN}(\alpha_N \cdot \Delta) / \mu_{TN} \quad (27)$$

$$p(R_i=1) = A \cdot p_{TB}(\alpha_B \cdot \Delta) / \mu_{TB} \quad (28)$$

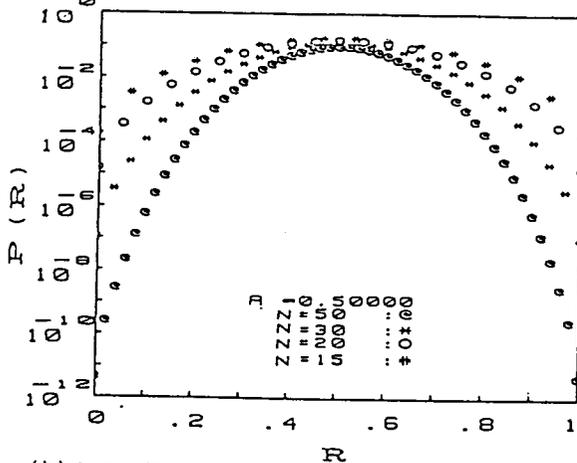
$D_{TB}(\mu_{TB}, \sigma_{TB})$ および $D_{TN}(\mu_{TN}, \sigma_{TN})$ を、いずれも $f(t) = \text{EXP}(-t/2)$ あるいは $f(t) = \text{EXP}(-t/k)$ (k :任意定数) で表される指数分布として、上述した手法により計算した $R-p(R)$ 特性例を図6に示す。同図(a)は、時間窓変数 N 、単位時間 Δ を一定とし、バースト係数 A を変化させた場合である。この場合、 $R=A$ 付近に最大値が現れる。この図より、同じ時間窓であっても、 A の変化、すなわち時間分布特性の変化に伴って、占有率分布特性も変化することが分かる。この図には、バースト状態となる確率をバースト係数 A とし、バースト状態は単位時間 Δ ごとに独立生起するとした時の特性をも合わせ示した。この場合の占有率分布特性は、次のような二項分布にしたがう。

$$p(R=i/N) = \binom{N}{i} A^i \cdot (1-A)^{N-i} \quad (29)$$

バースト生起と独立生起を比較すると、最大値が $R=A$ 付近に現れる点は共通しているが、 $A \approx 0.38$ を境に A が0あるいは1に近づくにしたがって両者の差は大きくなり、分布の広がり方はバースト生起の方が大きくなることが分かる。この差異の原因は、発生過程における時間相関の有無にある。図6(b)は、バースト係数 A および単位時間 Δ を一定にし、時間窓変数 N を種々変化させた場合である。これより、選択される時間窓によって、バースト状態の占有率分布特性も異なってくる事が分かる。また、 N を一定とし Δ を変数として時間窓を変えても、同様の傾向が現れる。この結果より、ここで誘導した方法によって求められるバースト状態の占有率分布特性は、



(a) 時間窓変数 $N=50$ として、バースト係数 A を変化させた場合
case1 バースト生起 case2 独立生起



(b) バースト係数 $A=0.5$ として、時間窓変数 N を変化させた場合

図6 バースト状態の占有率分布特性 [$R-P(R)$]例

$D_{TB}(\mu_{TB}, \sigma_{TB})$, $D_{TN}(\mu_{TN}, \sigma_{TN})$ は、共に指数分布、 $P_{TB}(\tau)$, $P_{TN}(\tau)$ の算出 $\rightarrow 0 < i \leq N$ を N 分割、 $i > N$ を一区分。

混入雑音の時間分布特性および離散密度関数を求める際
に選択される単位時間 Δ 、時間窓変数 N によって変化す
ると言える。短期間 BER 分布特性； $e_s-p(e_s)$ 特性
は、 $R-p(R)$ 特性に依存する。したがって、 $R-p(R)$
特性を求める際に影響する時間窓条件 (Δ および N) の
決定には、十分注意を払う必要がある。

(4-2) 短期間 BER 分布特性の推定

第2節で符号誤り発生過程モデルを提案した時、観測
時間窓が N 単位時間からなるとした。今、さらに各単位
時間内には n 個の符号タイムスロットが存在すると仮定
する。したがって、観測時間窓内に含まれる総符号タイ
ムスロット数 m は、 $n \cdot N$ 個である。よって、式(11)で
定義される短期間 BER； e_s は、次式で表される。

$$\begin{aligned} e_s &= i/m, & (i=0,1,2,\dots,m) \\ &= i/(N \cdot n), & (i=0,1,2,\dots,N \cdot n) \end{aligned} \quad (30)$$

単位時間 Δ 内のタイムスロット数 n を有限とする時の
短期間 BER 分布特性は次のような手順で求められる。

(1). バースト占有率 R で、観測時間窓内の誤り符号

数が i ($=0,1,2,\dots,N \cdot n$) となる確率、すなわちバース
ト占有率が R の時に短期間 BER； $e_s = i/(N \cdot n)$ と
なる確率 $p_R(i)$ を求める。

(2). (1)の結果を基に、バースト状態の占有率 R の生
起確率密度 $p(R)$ を考慮して、短期間 BER； e_s の生起
確率を求める。すなわち、短期間 BER 分布特性； $e_s -$
 $p(e_s)$ を求める。

まず、バースト占有率 R で、観測時間窓内の誤り符号
数が i ($=0,1,2,\dots,N \cdot n$) となる確率 $p_R(i)$ を求める。
バースト占有率が R の時、 T_M 内のバースト部分で占め
られるタイムスロット数 m_b は $R \cdot N \cdot n$ 、非バースト部分
で占められるタイムスロット数 m_N は $(1-R) \cdot N \cdot n$ とな
る。ゆえに、バースト占有率 R のバースト部分で i 個の
符号誤りを起こす確率 $p_{BR}(i)$ は、次式で表わされる。

$$p_{BR}(i) = \binom{m_b}{i} e_B^i (1-e_B)^{m_b-i} \quad (31)$$

同様に、バースト占有率 R の非バースト部分で i 個の符
号誤りを起こす確率 $p_{NR}(i)$ は、次式で与えられる。

$$p_{NR}(i) = \binom{m_N}{i} e_N^i (1-e_N)^{m_N-i} \quad (32)$$

その中の e_B 、 e_N はバースト状態のみによる BER と非
バースト状態のみによる BER で、第3節の長期間平均
BER と同様にして求められる。

バースト占有率が R の時、観測時間窓 T_M 内で i 個の
符号誤りが起こる確率 $p_R(i)$ は、バースト部分と非バ
ースト部分で起こる各々の誤り符号数の和が i 個となる
全ての場合の生起確率となるから、次式で表わされる。

$$p_R(i) = \sum_{j=0}^i p_{BR}(j) \cdot p_{NR}(i-j) \quad (33)$$

ここで、バースト状態の T_M に対する占有率の確率密
度分布特性； $R-p(R)$ 特性を考慮することにより、観
測時間窓 T_M で、短時間符号誤り率 $e_s(i) = i/(N \cdot n)$ 、
($i=0,1,2,3,\dots,N \cdot n$) となる確率 $p_e(i)$ は、次式で求
められる。

$$p_e(i) = \sum_{j=0}^N p(R_j) \cdot p_{R_j}(i) \quad (34)$$

ここで、 R_j は $R = j/N$ のバースト占有率を表す。こ
の $p_e(i)$ と短期間符号誤り率 $e_s(i)$ との関係、すなわ
ち $e_s(i) - p_e(i)$ 特性が、 e_s の生起確率密度特性で
ある短期間 BER 分布特性； $e_s - p(e_s)$ 特性そのもの
である。

特別な場合として、単位時間内のタイムスロット数を
無限とする場合の短期間符号誤り率 $e_s(R)$ は、任意のバ
ースト係数 R で雑音が定常的に発生していると仮定した
時の平均 BER となるので、平均 BER を求める計算法
を直接適用して、次式から得られる。

$$e_s(R) = R \cdot e_B + (1-R) \cdot e_N \quad (35)$$

この $e_s(R)$ と、観測時間窓に対するバースト部分の占有率が R となる確率 $p(R)$ の関係； $e_s(R) - p(R)$ 特性が、単位時間内のタイムスロット数を無限とする場合の短期間 B E R 分布特性； $e_s - p(e_s)$ 特性となる。

バースト雑音がデジタル回線に混入した場合、信号電力が一定であるならば、観測時間窓内の SN 比（ここでは、短期間 SN 比と呼ぶ）もバースト変動する。ここで、観測時間窓に対するバースト状態の占有率が R となる時の短期間 SN 比； $S/N_s(R)$ と、バースト状態の占有率が R となる確率； $p(R)$ の関係を、バースト占有率 R を媒介変数とする短期間 SN 比分布特性； $S/N_s(R) - p(R)$ と呼ぶ。短期間 SN 比； $S/N_s(R)$ は、任意のバースト係数 R で雑音が定常的に発生している時の平均 SN 比となるので、式(9)と同様の次式から求めることができる。

$$\begin{aligned} S/N_s(R) &= \frac{V}{\sqrt{R \cdot \sigma_{\lambda_B}^2 + (1-R) \cdot \sigma_{\lambda_N}^2}} \\ &= \frac{V}{\sqrt{\{1-R \cdot (1-1/\Gamma)\} \cdot \sigma_{\lambda_B}^2}} \end{aligned} \quad (36)$$

この短期間 SN 比； $S/N_s(R)$ と(4-1)節で求めたバースト状態の占有率が R となる確率 $p(R)$ の関係は定義より短期間 SN 比分布特性； $S/N_s(R) - p(R)$ 特性となる。

以上に述べた計算過程より求められた短期間 B E R 分布特性； $e_s - p(e_s)$ の e_s の平均値 $e_{s \dots}$ 、および短期間 SN 比分布特性； $S/N_s(R) - p(R)$ の $S/N_s(R)$ の平均値 $S/N_{s \dots}$ は、時間窓 T_M や単位時間 Δ とは無関係に、それぞれ、常に長期平均 B E R； P 、および平均 SN 比； S/N となる。

$$e_{s \dots} = \sum_{i=0}^N P(R_i) \cdot e_s(R_i) \equiv P \quad (37)$$

$$S/N_{s \dots} = \sum_{i=0}^N P(R_i) \cdot S/N_s(R_i) \equiv S/N \quad (38)$$

ただし $R_i = i/N$

なお、 $S/N_s(R) - e_s(R)$ 特性は、常に第3節で求めた $S/N - P$ 特性に一致する。

(4-3) 分布特性の推定例

雑音のバースト状態の持続時間分布 $D_{TB}(\mu_{TB}, \sigma_{TB})$ と非バースト状態の持続時間分布 $D_{TN}(\mu_{TN}, \sigma_{TN})$ は共に指数分布、それぞれの振幅分布 $D_{\lambda_B}(0, \sigma_{\lambda_B})$ および $D_{\lambda_N}(0, \sigma_{\lambda_N})$ は共にガウス分布とし、符号伝送方式を2値基底帯域伝送、各符号の生起確率を $p_0 = p_1 = 0.5$ とし、上述した手法によって計算したいくつかの分布特性例を示す。

図7は、観測時間窓内のタイムスロット数が有限の時

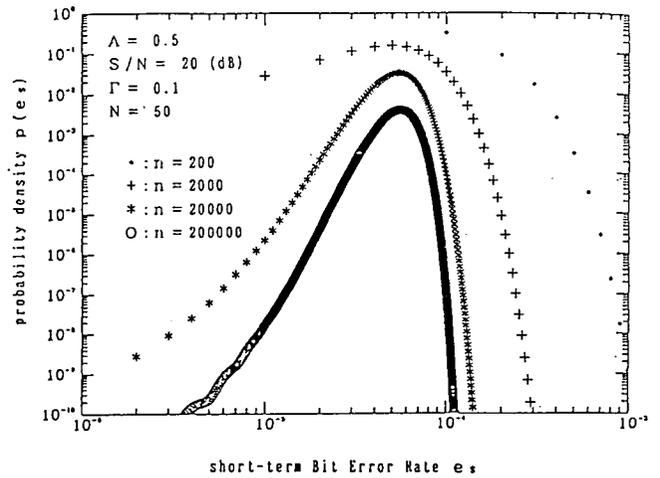
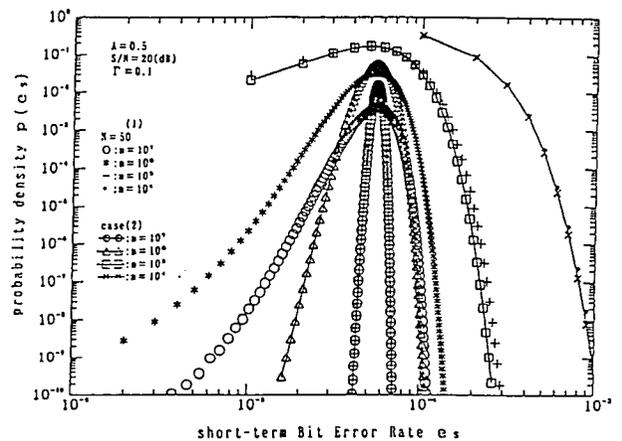


図7 単位時間内のタイムスロット数が有限の時の短期間 B E R 分布特性例

$D_{TB}(\mu_{TB}, \sigma_{TB})$ と $D_{TN}(\mu_{TN}, \sigma_{TN})$ は共に指数分布、 $p_{TB}(\tau)$ 、 $p_{TN}(\tau)$ の算出： $0 < \tau \leq N$ を N 分割、 $\tau > N$ を一区間、 $D_{\lambda_B}(0, \sigma_{\lambda_B})$ と $D_{\lambda_N}(0, \sigma_{\lambda_N})$ をいずれもガウス分布とする。



(1):バースト生起 (2):独立生起

図8 雑音生起条件が異なる短期間 B E R 分布特性比較例

の $e_s - p(e_s)$ 特性例である。バースト係数 A を 0.5、非バースト部分、バースト部分の平均電力比 Γ を 0.1、SN 比を 20dB、そして観測時間窓内の単位時間数 N を 50 として、単位時間内のタイムスロット数 n を種々変化させた場合の短期間 B E R 分布特性の計算例である。雑音条件および観測時間窓をすべて同一にしても、単位時間内のタイムスロット数が小さくなるとともに、分布の広がりが大きくなることが了解できる。これは、符号タイムスロット数が有限の場合、離散型の符号誤り率をとるので、確率分解能の影響が出てくるためである。すなわち、観測時間窓内のタイムスロット数が小さくなるほど窓内の符号誤りの絶対数は少なくなるが、確率分解能が大きいために、符号誤り率の変動幅は広がる。

図8は、雑音の生起条件を単位時間で独立生起とした以外は図7の場合と全く同一条件にして得た $e_s - p(e_s)$

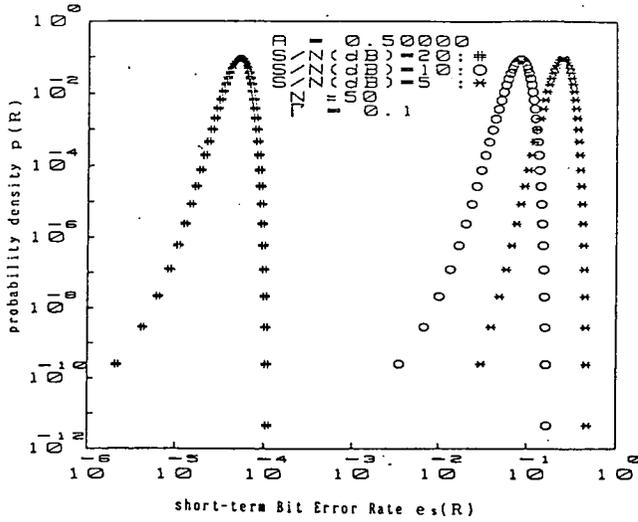


図9 単位時間内のタイムスロット数が無限の時の短期間BER分布特性例

$D_{1n}(\mu_{1n}, \sigma_{1n})$ と $D_{2n}(\mu_{2n}, \sigma_{2n})$ は共に指数分布、 $p_{1n}(\tau)$ 、 $p_{2n}(\tau)$ の導出: $0 < t \leq N$ をN分割、 $t > N$ を一区間。 $D_{an}(0, \sigma_{an})$ と $D_{bn}(0, \sigma_{bn})$ をいずれもガウス分布とする。

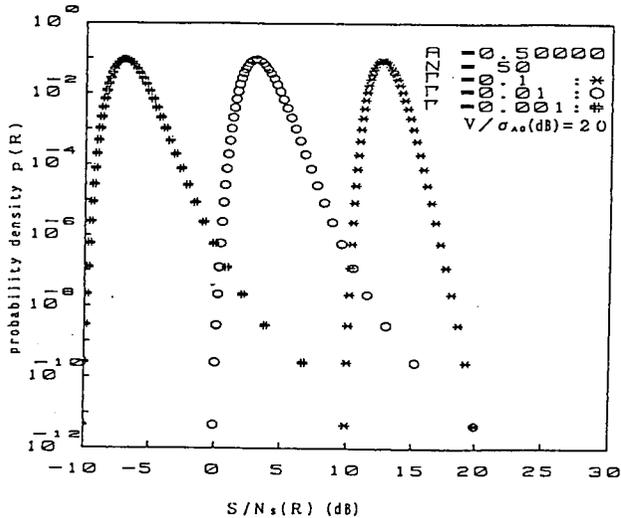


図10 短期間SN比分布特性 $[S/N_s(R) - p(R)]$ 例

$D_{1n}(\mu_{1n}, \sigma_{1n})$ と $D_{2n}(\mu_{2n}, \sigma_{2n})$ は共に指数分布、 $p_{1n}(\tau)$ 、 $p_{2n}(\tau)$ の導出: $0 < t \leq N$ をN分割、 $t > N$ を一区間。

特性を図7と共に併せて示し、バースト生起と独立生起を比較した例である。バースト生起とした短期間BER分布特性の方が独立生起とした分布特性より広がりが大きくなり、観測時間窓内のタイムスロット数が大きくなるにつれて顕著になることがよく分かる。それは、バースト生起の場合、時間相関があるために、符号誤りの集中・分散が激しいためと考える。

図9は、観測時間窓内のタイムスロット数を無限とし、 N 、 A 、 Γ を図7の場合と同じ条件にして、平均SN比を変えて得た $e_s - p(e_s)$ 特性例である。 $S/N = 20$ dBの場合が、図7の条件でタイムスロット数を無限にした時に対応する。一般に、観測時間窓内に含まれるタイムスロット数が、単位時間に含まれるタイムスロット数を無限とした時の短期間BER分布特性においてバースト占有率 $R = 1/N$ の時に得られる e_s の逆数の10倍以上の

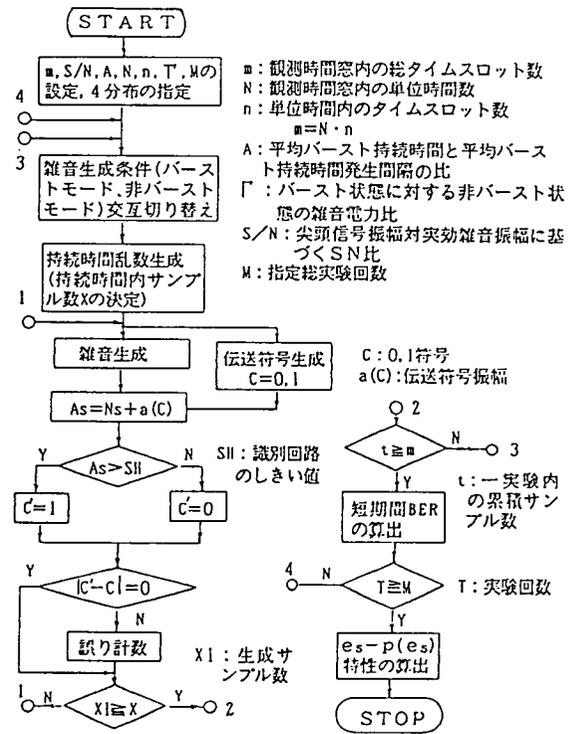


図11 計算機シミュレーションの流れ図

時には、タイムスロット数が無限大の場合の分布特性で十分近似できる。

短期間SN比分布特性例を、図10に示す。この図は、バースト係数 $A = 0.5$ 、観測時間窓内の単位時間数 $N = 50$ の基で、非バースト状態とバースト状態の電力比 Γ を3段階に変化させた時の特性例である。短期間SN比分布特性は、短期間BER分布特性と同様に、 $R - p(R)$ 特性に基づいているので、時間窓条件によっても変動する。

5. 計算機シミュレーション

前節で誘導した短期間BER分布特性の推定法の正当性を確認する目的で、計算機シミュレーションを行った。シミュレーションは、2値基底帯域データ伝送システムに混入する雑音を、バースト状態と非バースト状態の2状態が交互に発生するものとし、各状態のそれぞれの持続時間は互いに独立なランダム生起現象、各状態での雑音振幅の時間変動は定常ランダム過程として行った。

シミュレーションの流れ図を、図11に示す。シミュレーションに用いた乱数は、40次の原始多項式で表されるM系列を使用して、任意分布乱数生成法¹¹⁾に基づいて生成した。また、伝送される2値データとしては、乱数生成用とは別の40次の原始多項式で表されるM系列を使用した。

雑音のバースト、非バースト、各状態の持続時間分布は共に指数分布、振幅分布は共にガウス分布とし、短期

間BER標本数 $M = 10,000$ とした時の短期間BER分布特性の計算機シミュレーション例を、図12(a)~(c)に示す。各図に、比較のために各々の推定特性(理論計算結果)も併せて示す。図12(a)は、単位時間数 $N = 50$ 、雑音電力比 $\Gamma = 0.1$ 、バースト係数 $A = 0.5$ 、 $S/N = 10$ (dB)で、観測時間窓内の総タイムスロット数 $m = 100$ および1000とした時の短期間BER特性例である。同図中の黒丸印はシミュレーション結果、実線は同一条件での理論計算結果を表している。図12(b)は、 $\Gamma = 0.1$ 、 $m = 100$ 、 $N = 50$ 、 $S/N = 10$ (dB)で、バースト係数 A を変化させた場合の短期間BER特性例である。図12(c)は、単位時間数 $N = 50$ 、雑音電力比 $\Gamma = 0.1$ 、バースト係数 $A = 0.5$ 、観測時間窓内の総符号タイムスロット数 $m = 1000$ の基で、 S/N 比を変化させた時の短期間BER分布特性例である。同図中のマークで表すのはシミュレーション結果、実線で表すのは同一条件での理論計算結果である。各図いずれの場合でも、推定特性とシミュレーション結果が非常に良く一致していることが了解できる。

雑音の時間分布形態をも含めて、種々の雑音条件の基で短期間BER分布特性に関するシミュレーションを行ったが、いずれの場合も、推定特性(計算結果)とシミュレーション結果の間の相関係数は0.99以上となった。この結果より、第4節で導いたバースト雑音による短期間BER分布特性の推定法は、正当と判断する。

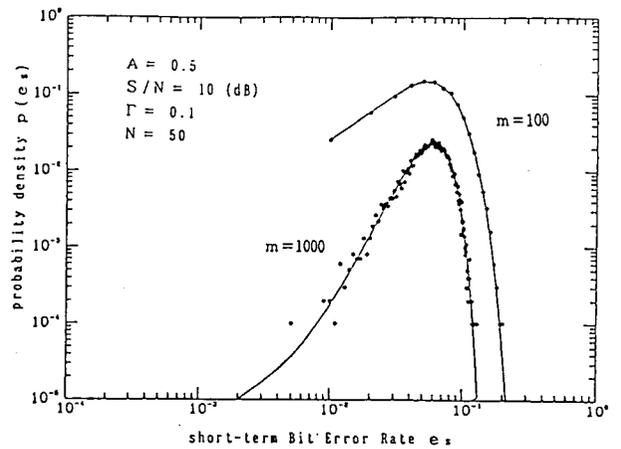
6. むすび

バースト雑音によるデジタル回線の符号誤りに関する解析を、これまでよりもより現実に即したものにするために、任意の時間分布特性を持つバースト雑音に適用可能にした新しいバースト符号誤り発生過程のモデルを提案し、それに基づいて、バースト雑音環境下での短期間BER分布特性を理論的に推定する方法を誘導し、その正当性を計算機シミュレーションにより確認した。

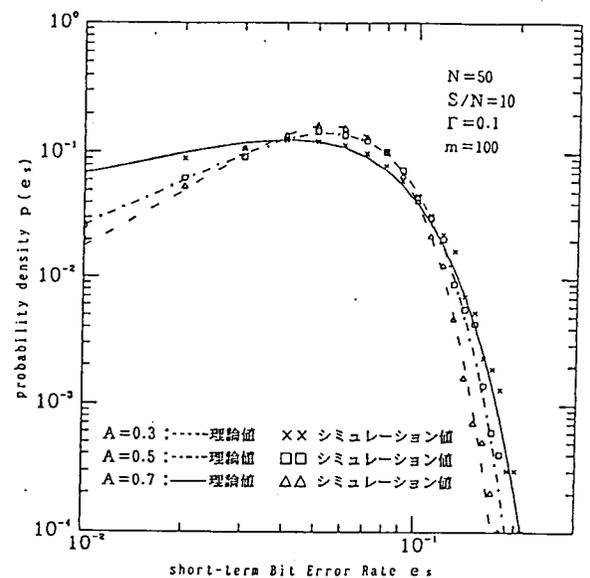
この方法によるいくつかの推定例より、短期間BER分布特性は、伝送符号条件が同一でも、混入雑音の時間分布特性、振幅分布特性、及び観測時間窓条件(離散密度関数を求める際に選択される単位時間、時間窓変数)によって変化することが了解できた。

ここで求めた短期間BER分布特性の推定法は、(1)バースト雑音環境下、あるいは S/N 比がバースト変動する環境下にあるデジタル回線の伝送品質推定、(2)デジタル回線のサービス品質を監視・評価するためのパラメータの検討、(3)伝送符号に付加すべき誤り検出・訂正機能の検討、等を行う上で有効な方法と考える。

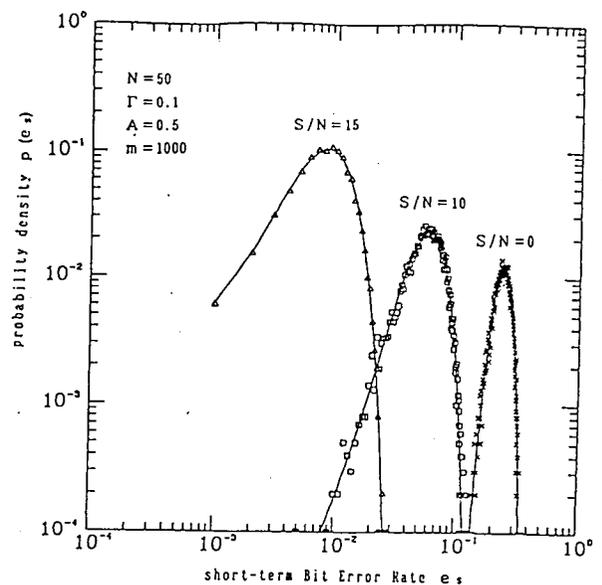
今後、この推定法を利用して、種々の持続時間分布、振幅分布を持つ雑音条件下でのデジタル通信システムの符号誤り特性を解析・推定し、それを基に、デジタル回線の伝送品質を監視・評価するのに最適なパラメータ、時間窓等について検討していく予定である。



(a) 観測時間窓内の総符号タイムスロット数 m を変化させた場合



(b) バースト係数 A を変化させた場合



(c) S/N 比を変化させた場合

図12 短期間BER分布特性の計算機シミュレーション例

文 献

- [1] Y. Yamamoto and T. Wright : "Error Performance in Evolving Digital Networks Including ISDN^s", IEEE Communications Magazine, vol. 27, No. 4, Apr. 1989.
- [2] 坂井、土肥 : "移動体衛星通信回線に置ける符号誤り率特性"、信学論、VOL. J72-B-II, No. 7, ('89-7)
- [3] E. N. Gilbert : "Capacity of a Burst-Noise Channel", Bell Syst. Tech. J., pp.1253-1265, Sept. 1960.
- [4] D. Becam, P. Brigant, R. Cohen, J. Szpirglas : "Testing Neyman's Model for Error Performance of 2 and 40Mb/s Line Sections," Conf. Rec., IEEE Int. Conf. Commun., pp. 1362-1365, 1984.
- [5] B. D. Fritchman: "A binary channel characterization using partitioned Markov chains," IEEE Trans. Inform. Theory., Vol. IT-13, pp. 221-227, Apr. 1967.
- [6] M. D. Knowles and A. I. Drukarev: "Bit Error Rate Estimation for Channels with Memory," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-36, No. 6, pp. 767-769, June 1988.
- [7] S. Dravida, M. J. Master, and C. H. Morton : "A Method to Analyze Performance of Digital Connections," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-36, No. 3, pp. 298-305, Mar. 1988.
- [8] M. E. Meyer and A. R. K. Sastry: "Performance Analysis of Tandem Burst-Error Links with Application to ISDN," IEEE Trans. Commun., Vol. COM-33, No. 7, July 1985.
- [9] D. Middleton: "Statistical-physical models of electromagnetic interference," IEEE Trans. Elec. Comp. vol. EMC-19, pp. 106-127, Aug 1977
- [10] 松下、森永、滑川 : "インパルス性無線雑音に対する P S K 信号の誤り率特性" 信学技報 EMCJ83-82 ('84-1)
- [11] 大沼、佐藤 : "任意分布乱数の新高速生成法", 電子情報通信学会論文誌, vol. J70-A, No. 11, '87/11