

データ通信システムにおけるモデル化と解析

安井 一民, 中川 覃夫, 三道 弘明

1. はじめに

近年、データ通信システムは、社会・経済活動の中心的な役割を担うようになり、そのシステム機能を有効に発揮させ、さらに向上させることが強く求められている。いわば、このような通信システムに障害や誤りが生じた場合の社会的・経済的影響の大きさは、計り知れないものとなってきた。

一方、従来のデータ伝送は、既設の電話網等を有効に活用するために、いわゆるアナログ伝送路を介して行われてきた。この方式は、データ伝送に際して波形伝送（連続的な波形）を必要とするために、伝送路における減衰ひずみ・遅延ひずみなどの要因によって、伝送容量を大きくとることが困難であった [1]。

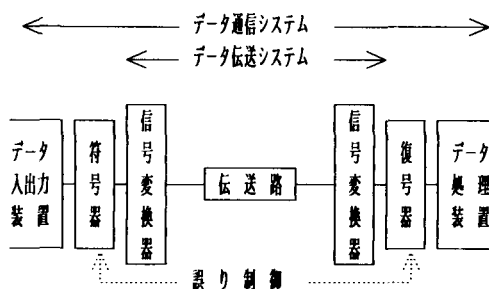


図1 データ通信システムの構成例

やすい かずみ 愛知工業大学経営工学科
なかがわ としお 愛知工業大学経営工学科
〒470-03 豊田市八草町八千草 1247
さんどう ひろあき 流通科学大学情報学部
〒651-21 神戸市西区学園西町 3-1

このような背景から、最近では、データ伝送の大容量化や高品質化をめざして、伝送路のデジタル化が全国規模で推し進められており、いわゆるデータ通信システムに対する高信頼化への社会的要請は、極めて大きなものとなってきている。

ところで、一般にデータ伝送においては、通信回線の瞬断・雑音・ひずみなどの妨害により、データ誤りの発生は避けられない。このため、データの高品質化のための誤り制御が不可欠とされ、高信頼化の観点からいろいろな方法が考案されている。その主な誤り訂正方式を分類すると、(1) FEC (forward error correction) 方式、(2) ARQ (automatic-repeat-request) 方式、(3) Hybrid ARQ 方式の3つに大別される [2]。これらのうち、実際にどのような方式を採用するかは、要求される誤り特性や遅延時間などを考慮して決定される。最近では、スループット向上の観点から、(3) の方式に関して種々の方法が提案されている [3, 4]。また、(2) の ARQ 方式は、誤り制御が比較的簡単であることから、2地点間データ伝送システムに幅広く用いられている [5~8]。

ここでは、(2) の方式におけるいくつかのモデル化を試みる。この ARQ 方式は、伝送データに誤りが生じた場合、データを再送することによって、いつか正しく伝送できることに着目した方式である。しかし、通信回線に障害が発生していて何回も正しく伝送できない場合、再送を早急に打ち切り、適切な措置を講ずる必要がある。通常データ伝送プロトコルには、経験的に再送回数の上限値が設けられているが、その理論的な根拠は希薄である。

以下では、ある伝送システムに間欠的な障害が発生するという状況のもとで、この再送回数の上限値をどのように設定するかを議論する。

2. モデルの設定と解析

ある伝送システムが、単位ブロックの送信を開始してから、当該ブロックが連続 j 回誤る確率を Q_j ($j = 1, 2, \dots$)、 $Q_0 \equiv 1$ とおく。また、1回の単位ブロックの送信に要する時間を平均 α とする。単位ブロックが連続 N 回誤った場合は、送信を中止して伝送回線の状態等をチェックし、適切な措置の後に伝送をやり直すものとする。なお、これに要する時間を平均 ν とおく。

2.1 伝送誤り確率のベイズ論的推定 [10]

まず、単位ブロックが誤る確率を q とおく。この q の値は本来未知であるが、過去の経験などから、どの程度の値をとるか推定する。すなわち、このような事前の知識を利用して、それを確率分布という形で定量的に表すことを考える。

事前分布は、いわば主観確率を表現したものであるから、その分布形は自由に決定することができるが、ここでは共役事前分布 [9] を用いる。誤り確率 q のもとで再送を繰り返す行為は、ベルヌーイ試行を構成する。すなわち、このような場合の q に対する共役事前分布はベータ分布であることが知られており、その密度関数は、 $B(\cdot, \cdot)$ をベータ関数として、次式で与えられる。

$$f(q) = \frac{q^{\alpha-1}(1-q)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad 0 \leq q \leq 1; \alpha, \beta > 0. \quad (1)$$

ここで、ベータ分布のパラメータ α, β を設定することが必要であるが、式 (1) で与えられるベータ分布をもつ確率変数 Q の事前平均と分散は、それぞれ、

$$E(Q) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad (2)$$

$$V(Q) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}, \quad (3)$$

で与えられる。従って、 $E(Q)$ と $V(Q)$ の値を指定し、式 (2), (3) を α, β に関する連立方程式として解くことにより、 α, β の値を設定することができる。

以上の議論から、単位ブロックが連続 j 回誤る確率 Q_j を、式 (1) の事前分布 $f(q)$ を用いて次のように推定することができる。

$$Q_j = \int_0^1 q^j f(q) dq = \frac{\Gamma(\alpha + j)\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha + \beta + j)\Gamma(\alpha)}. \quad (4)$$

ここで、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数を表す。このとき、 $q(j+1) \equiv Q_{j+1}/Q_j$ とおくと、

$$q(j+1) = \frac{\alpha + j}{\alpha + \beta + j},$$

となり、 $q(j)$ は j に関して単調増加関数であり、誤り確率は再送回数とともに増加することがわかる。

2.2 間欠障害を伴う ARQ モデル

実際のデータ伝送における誤り現象が、どのような要因とプロセスによって生じられるかを記述することはむづかしい。ここでは、伝送回線にはその要因となる現象が、ランダムに発生と消滅を繰り返しているものと仮定し、これを間欠障害としてとらえる。いわば、間欠障害の生起に関して、伝送システムは図 2 のような 3 つの状態になり得るものとする。

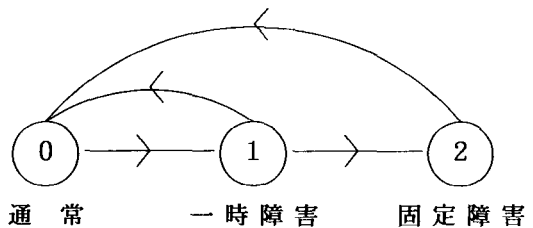


図 2 伝送システムの状態推移

このような伝送システムのもとで、単位ブロックの送信を開始する。そのとき、通常状態では生じない誤り現象が、この間欠障害の発生によって生じたり、または、通常状態の潜在的な誤り現象が、この間欠障害の発生によって助長されるような 3 つの ARQ モデルを設定し、単位ブロックの送信が成功するまでの平均時間を最小にする最適再送回数 N^* を議論する。

2.2.1 一時障害状態をもつ ARQ モデル [11]

最初は、簡単なモデルを設定しよう。図 2 において、状態 1 から状態 2、状態 2 から状態 0 への推移がない場合の伝送システムを考える。すなわち、伝送システムには、データ誤りの要因となる障害が、指数分布 $1 - e^{-\lambda t}$ に従って間欠的に発生し、その障害は指数分布 $1 - e^{-\mu t}$ に従って潜在した後、消滅するものとする。単位ブロックを送信したとき、もし伝送システムに障害が潜在していなければ正しく送信され、障害が潜在していたならば、 j 回目の送信に対して確率 q_j ($j = 1, 2, \dots$) でデータ誤りが発生する。

そのとき、伝送システムが時刻 0 で状態 i にあり、時刻 t で状態 j にある確率 $P_{ij}(t)$ ($i, j = 0, 1$) は、

$$P_{00}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t},$$

$$P_{10}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t},$$

$P_{01}(t) = 1 - P_{00}(t)$, $P_{11}(t) = 1 - P_{10}(t)$ で与えられる.

伝送システムの初期状態を、時刻 0 で状態 0 から出発すると仮定するとき、単位ブロックの送信が成功するまでの平均時間 $H_1(N)$ は、次式で与えられる.

$$H_1(N) = \left\{ a + v + P_{01}(a)a \times \sum_{j=1}^{N-1} Q_j [P_{11}(a)]^{j-1} \right\} / \left\{ 1 - P_{01}(a)Q_N [P_{11}(a)]^{N-1} \right\} - v. \quad (5)$$

ここで、 $Q_j \equiv q_1 q_2 \cdots q_j$ とおく.

N^* を求めるために、 $H_1(N+1) - H_1(N) \geq 0$ とおくと、

$$\frac{1 - Q_{N+1}P_{01}(a)[P_{11}(a)]^N}{1 - q_{N+1}P_{11}(a)} - P_{01}(a) \sum_{j=1}^N Q_j [P_{11}(a)]^{j-1} \geq \frac{a+v}{a}, \quad (6)$$

を得る. 式 (6) の左辺を $L_1(N)$ とおくと、 q_j ($j = 1, 2, \dots$) が j の単調増加関数ならば、 $L_1(N)$ は N の単調増加関数となり、 $\lim_{j \rightarrow \infty} q_j = 1$ ならば、式 (6) を満たす有限で唯一の N^* が存在することが示される.

この場合、ベイズ論によって $E(Q)$ と $V(Q)$ を与え、単位ブロックが j 回誤る確率 Q_j を式 (4) から推定する. とくに、 $1/\lambda = 21600a$, $1/\mu = 300a$, $V(Q) = E(Q) \times 0.45$ のとき、 $H_1(N)$ を最小にする N^* の数値例を表 1 に示す.

表 1: $H_1(N)$ を最小にする最適再送回数 N^*

$E(Q)$	$v = 60a$	$v = 90a$
0.3	30	51
0.4	15	26
0.5	5	8

2.2.2 固定障害状態をもつ ARQ モデル [12]

このモデルは、図 2 において、状態 2 から状態 0 への推移がない場合であり、状態 2 は吸収状態である. すなわち、間欠障害は指数分布 $1 - e^{-\lambda t}$ に従って発

生し、ある期間潜在した後、一時障害として消滅するか、あるいは固定障害状態に進展する.

障害の潜在時間を表す確率変数を X とし、継続時間の上限値を表す確率変数を Y とするとき、事象 $\{X \leq Y\}$ が生じたならば一時障害として消滅し、事象 $\{X > Y\}$ が生じたならば固定障害状態へ進展する. ここで、 $\Pr\{X \leq t\} \equiv 1 - e^{-\mu t}$, $\Pr\{Y \leq t\} \equiv 1 - e^{-\theta t}$ ($t \geq 0$) と仮定する.

そのとき、伝送システムが時刻 0 で状態 i にあり、時刻 t で状態 j にある確率 $P_{ij}(t)$ ($i = 0, 1; j = 0, 1, 2$) は、

$$P_{00}(t) = \frac{1}{r_1 - r_2} \left[(\mu + \theta - r_2)e^{-r_2 t} - (\mu + \theta - r_1)e^{-r_1 t} \right], \quad (7)$$

$$P_{01}(t) = \frac{\lambda}{r_1 - r_2} \left[e^{-r_2 t} - e^{-r_1 t} \right], \quad (8)$$

$$P_{10}(t) = \frac{\mu}{r_1 - r_2} \left[e^{-r_2 t} - e^{-r_1 t} \right], \quad (9)$$

$$P_{11}(t) = \frac{1}{r_1 - r_2} \left[(\lambda - r_2)e^{-r_2 t} - (\lambda - r_1)e^{-r_1 t} \right], \quad (10)$$

$P_{02}(t) = 1 - P_{00}(t) - P_{01}(t)$, $P_{12}(t) = 1 - P_{10}(t) - P_{11}(t)$ で与えられる. ここで、

$$r_1 \equiv \frac{1}{2} \left[\lambda + \mu + \theta + \sqrt{(\lambda + \mu + \theta)^2 - 4\lambda\theta} \right],$$

$$r_2 \equiv \frac{1}{2} \left[\lambda + \mu + \theta - \sqrt{(\lambda + \mu + \theta)^2 - 4\lambda\theta} \right].$$

ここでは、伝送システムが通常状態であっても、ある一定の確率でランダムな誤り状態が存在し、その誤り状態が間欠障害の発生によつて助長される場合を考える. すなわち、伝送システムが、状態 0、状態 1、状態 2 のいずれかの状態にあるとき、データ伝送によつて単位ブロックが誤る確率は、それぞれ q_0, q_1, q_2 であると、 $0 \leq q_0 \leq q_1 \leq q_2$ と仮定する.

さて、伝送システムが時刻 0 で状態 i ($i = 0, 1$) から単位ブロックの送信を開始したとき、当該ブロックの送信が連続 j 回誤る確率を $Q_{i,j}$ ($j = 1, 2, \dots$) とすると、次のような関係式を得る.

$$Q_{0,j} = P_{00}(a)q_0 Q_{0,j-1} + P_{01}(a)q_1 Q_{1,j-1} + P_{02}(a)q_2^j, \quad (11)$$

$$Q_{1,j} = P_{10}(a)q_0Q_{0,j-1} + P_{11}(a)q_1Q_{1,j-1} + P_{12}(a)q_2^j. \quad (12)$$

ここで、 $Q_{i,0} \equiv 1$ とおく。この方程式を解くことによって、 $Q_{0,j}$ を次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} Q_j &\equiv Q_{0,j} \\ &= \left\{ [s_1 - q_1(P_{11}(a) - P_{01}(a))]s_1^j \right. \\ &\quad \left. - [s_2 - q_1(P_{11}(a) - P_{01}(a))]s_2^j \right\} \\ &\quad / (s_1 - s_2) \\ &+ q_2 \left\{ \left[s_1 P_{02}(a) - q_1 [P_{11}(a) P_{02}(a) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - P_{01}(a) P_{12}(a)] \right] \left(\frac{s_1^j - q_2^j}{s_1 - q_2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left[s_2 P_{02}(a) - q_1 [P_{11}(a) P_{02}(a) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - P_{01}(a) P_{12}(a)] \right] \left(\frac{s_2^j - q_2^j}{s_2 - q_2} \right) \right\} \\ &\quad / (s_1 - s_2) \quad (j = 0, 1, 2, \dots). \quad (13) \end{aligned}$$

ここで、

$$s_1 \equiv \frac{1}{2} \left(K_1 + \sqrt{K_2} \right),$$

$$s_2 \equiv \frac{1}{2} \left(K_1 - \sqrt{K_2} \right),$$

$$K_1 \equiv q_0 P_{00}(a) + q_1 P_{11}(a),$$

$$K_2 \equiv [q_0 P_{00}(a) - q_1 P_{11}(a)]^2 + 4q_0 q_1 P_{01}(a) P_{10}(a).$$

よって、単位ブロックの送信が成功するまでの平均時間 $H_2(N)$ は次式で与えられる。

$$H_2(N) = \frac{a \sum_{j=0}^{N-1} Q_j + v}{1 - Q_N} - v. \quad (14)$$

不等式 $H_2(N+1) - H_2(N) \geq 0$ とおくと、

$$\frac{Q_N}{Q_N - Q_{N+1}} (1 - Q_N) - \sum_{j=0}^{N-1} Q_j \geq \frac{v}{a}, \quad (15)$$

を得る。式 (15) の左辺を $L_2(N)$ とおくと、 $q(j+1) \equiv Q_{j+1}/Q_j$ が j の単調増加関数ならば、 $L_2(N)$ も N の単調増加関数となる。このとき、

$$\lim_{j \rightarrow \infty} q(j) \geq 1 - \frac{a}{a+v} (1 - Q_1),$$

ならば、式 (15) を満たす有限で唯一の N^* が存在する。

この場合、過去の経験やデータを用いて、伝送システムが3つの異なる状態で誤る確率 q_0, q_1, q_2 を、それぞれベイズ論などによって推定する。とくに、 $1/\lambda = 21600a$, $1/\mu = 300a$, $q_0 = 0.05$, $q_2 = 0.99$ のとき、 $H_2(N)$ を最小にする N^* の数値例を表2に示す。

表2: $H_2(N)$ を最小にする最適再送回数 N^*

	$v = 60a$			$v = 90a$		
	$1/\theta$			$1/\theta$		
	60a	300a	600a	60a	300a	600a
0.3	8	9	10	9	11	11
0.4	10	12	12	12	14	14
0.5	12	15	16	15	17	18

2.2.3 一般の誤り状態をもつ ARQ モデル

最後に、伝送システムが、図2のような推移をもつ場合のモデルを考察する。このモデルは、前2つのモデルを包含しているという意味で一般的である。すなわち、状態2は吸収状態ではなく、ある経過時間の後に固定障害が消滅する。固定障害状態にとどまる時間は、指数分布 $1 - e^{-\eta t}$ に従うものとし、間欠障害の発生間隔、潜在時間、潜在時間の上限値の各分布は、固定障害状態をもつ ARQ モデルの場合と同様とする。

そのとき、伝送システムが時刻0で状態 i にあり、時刻 t で状態 j にある確率 $P_{ij}(t)$ ($i, j = 0, 1, 2$) は、

$$\begin{aligned} P_{00}(t) &= \frac{\eta(\mu + \theta)}{\gamma_1 \gamma_2} + \frac{\lambda}{\gamma_1 - \gamma_2} \\ &\times \left[\left(1 - \frac{\theta + \eta}{\gamma_1} \right) e^{-\gamma_1 t} \right. \\ &\quad \left. - \left(1 - \frac{\theta + \eta}{\gamma_2} \right) e^{-\gamma_2 t} \right], \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{01}(t) &= \frac{\lambda \eta}{\gamma_1 \gamma_2} - \frac{\lambda}{\gamma_1 - \gamma_2} \\ &\times \left[\left(1 - \frac{\eta}{\gamma_1} \right) e^{-\gamma_1 t} \right. \\ &\quad \left. - \left(1 - \frac{\eta}{\gamma_2} \right) e^{-\gamma_2 t} \right], \quad (17) \end{aligned}$$

$$P_{10}(t) = \frac{\eta(\mu + \theta)}{\gamma_1 \gamma_2} - \frac{1}{\gamma_1 - \gamma_2}$$

$$\times \left[\left(\mu - \frac{\eta(\mu + \theta)}{\gamma_1} \right) e^{-\gamma_1 t} - \left(\mu - \frac{\eta(\mu + \theta)}{\gamma_2} \right) e^{-\gamma_2 t} \right], \quad (18)$$

$$P_{11}(t) = \frac{\lambda\eta}{\gamma_1\gamma_2} - \frac{1}{\gamma_1 - \gamma_2} \times \left[\left(\lambda + \eta - \gamma_1 - \frac{\lambda\eta}{\gamma_1} \right) e^{-\gamma_1 t} - \left(\lambda + \eta - \gamma_2 - \frac{\lambda\eta}{\gamma_2} \right) e^{-\gamma_2 t} \right], \quad (19)$$

$$P_{20}(t) = \frac{\eta(\mu + \theta)}{\gamma_1\gamma_2} - \frac{\eta}{\gamma_1 - \gamma_2} \times \left[\left(1 - \frac{\mu + \theta}{\gamma_1} \right) e^{-\gamma_1 t} - \left(1 - \frac{\mu + \theta}{\gamma_2} \right) e^{-\gamma_2 t} \right], \quad (20)$$

$$P_{21}(t) = \frac{\lambda\eta}{\gamma_1\gamma_2} + \frac{\lambda\eta}{\gamma_1 - \gamma_2} \times \left(\frac{1}{\gamma_1} e^{-\gamma_1 t} - \frac{1}{\gamma_2} e^{-\gamma_2 t} \right), \quad (21)$$

$P_{02}(t) = 1 - P_{00}(t) - P_{01}(t)$, $P_{12}(t) = 1 - P_{10}(t) - P_{11}(t)$, $P_{22}(t) = 1 - P_{20}(t) - P_{21}(t)$ で与えられる。ここで、

$$\gamma_1 \equiv \frac{1}{2} \left[\lambda + \mu + \theta + \eta + \sqrt{(\lambda + \mu + \theta - \eta)^2 - 4\lambda\theta} \right],$$

$$\gamma_2 \equiv \frac{1}{2} \left[\lambda + \mu + \theta + \eta - \sqrt{(\lambda + \mu + \theta - \eta)^2 - 4\lambda\theta} \right].$$

データ伝送による単位ブロックの誤り確率は、前と同様に、伝送システムの各状態 i ($i = 0, 1, 2$) において、それぞれ q_0, q_1, q_2 であると仮定する。

さて、伝送システムが時刻 0 で状態 i ($i = 0, 1, 2$) にあるとき、単位ブロックの送信が連続 j 回誤る確率を $Q_{i,j}$ とすると、次のような関係式を得る。

$$Q_{0,j} = P_{00}(a)q_0Q_{0,j-1} + P_{01}(a)q_1Q_{1,j-1} + P_{02}(a)q_2Q_{2,j-1}, \quad (22)$$

$$Q_{1,j} = P_{10}(a)q_0Q_{0,j-1} + P_{11}(a)q_1Q_{1,j-1} + P_{12}(a)q_2Q_{2,j-1}, \quad (23)$$

$$Q_{2,j} = P_{20}(a)q_0Q_{0,j-1} + P_{21}(a)q_1Q_{1,j-1} + P_{22}(a)q_2Q_{2,j-1}. \quad (24)$$

ここで、 $Q_{i,0} \equiv 1$ とおく。

この方程式を解くために、ここでは、実三次方程式の三角関数による解法 [13] を用いる。その結果、 $Q_j \equiv Q_{0,j}$ を次のように求めることができる。

$$Q_j = \frac{S_1(S_1 + B) + C}{(S_1 - S_2)(S_1 - S_3)} S_1^j + \frac{S_2(S_2 + B) + C}{(S_1 - S_2)(S_3 - S_2)} S_2^j + \frac{S_3(S_3 + B) + C}{(S_1 - S_3)(S_2 - S_3)} S_3^j \quad (j = 0, 1, 2, \dots). \quad (25)$$

ここで、

$$B \equiv [P_{01}(a) - P_{11}(a)]q_1 + [P_{02}(a) - P_{22}(a)]q_2, \quad (26)$$

$$C \equiv \{P_{01}(a)[P_{12}(a) - P_{22}(a)] + P_{02}(a)[P_{21}(a) - P_{11}(a)] + P_{11}(a)P_{22}(a) - P_{12}(a)P_{21}(a)\}q_1q_2, \quad (27)$$

であり、 S_1, S_2, S_3 は、

$$A_1 \equiv P_{00}(a)q_0 + P_{11}(a)q_1 + P_{22}(a)q_2,$$

$$A_2 \equiv [P_{00}(a)P_{11}(a) - P_{01}(a)P_{10}(a)]q_0q_1 + [P_{00}(a)P_{22}(a) - P_{02}(a)P_{20}(a)]q_0q_2 + [P_{11}(a)P_{22}(a) - P_{12}(a)P_{21}(a)]q_1q_2, \quad (28)$$

$$A_3 \equiv \{P_{00}(a)[P_{12}(a)P_{21}(a) - P_{11}(a)P_{22}(a)] + P_{01}(a)[P_{10}(a)P_{22}(a) - P_{12}(a)P_{20}(a)] + P_{02}(a)[P_{20}(a)P_{11}(a) - P_{21}(a)P_{10}(a)]\} \times q_0q_1q_2, \quad (29)$$

とおいたとき、 S に関する実三次方程式、

$$S^3 - A_1S^2 + A_2S + A_3 = 0,$$

が、3つの異なる実根をもつ場合の解として与えられる。

よって、単位ブロックの送信が成功するまでの平均時間 $H_3(N)$ は、式 (25) の Q_j を式 (14) へ代入して求められ、前と同様の議論をすることができる。従って、 N^* は、この Q_j を用いて、式 (15) を満たす最小の整数として求めることができる。

とくに, $1/\lambda = 21600a$, $1/\mu = 300a$, $v = 60a$, $q_0 = 0.05$, $q_2 = 0.99$ のとき, $H_3(N)$ を最小にする N^* の数値例を表 3 に示す.

表 3: $H_3(N)$ を最小にする最適再送回数 N^*

q_1	$1/\eta = 300a$			$1/\eta = 600a$		
	$1/\theta$			$1/\theta$		
	$60a$	$300a$	$600a$	$60a$	$300a$	$600a$
0.3	9	10	11	8	10	11
0.4	11	12	13	10	12	13
0.5	13	16	16	12	15	16

3. おわりに

ここでは, データ伝送における ARQ 方式に関して, 高信頼化の視点から, いくつかのモデル化を試み, 単位ブロックの送信が成功するまでの平均時間を導出し, それを最小にする再送回数を議論した.

ARQ 方式には, よく知られているものとして (1) *stop-and-wait* 方式 [5,6], (2) *go-back-N* 方式 [7], (3) *selective-repeat* 方式 [8] がある. (2) の方式の典型例として HDLC (high-level data link control) があり, スループット向上の観点からは (3) の方式が優れているが, 反面, 誤りブロックの再送等によって受信ブロックの順序が乱されるため, 受信側において再整列の機能が必要となる. ここでは, 取扱いが簡便な (1) の方式を対象にモデル化を行った.

実際の面から, 伝送システムにおけるデータ誤り現象を, どのような要因によって記述し, いわゆる信頼性評価の尺度として, どのような指標を設定すべきかは重要かつ興味ある問題である. 例えば, FEC 方式における誤り見逃し率の低減方策や, Hybrid ARQ 方式におけるスループット向上方策, さらに ATM (asynchronous transfer mode) における高信頼化方策など, より実用的なモデル化への取り組みとともに, この方面に対する今後の研究が期待される.

参考文献

[1] 副島俊雄編: “新・データ伝送システム”, p.310, 産業図書(1984).
 [2] 電子情報通信学会編: “電子情報通信ハンドブック”, p.3052, オーム社(1988).

[3] S. Kallel and D. Haccoun: “Generalized type II hybrid ARQ scheme using punctured convolutional coding”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-38, 11, pp.1938-1946(1990).
 [4] H. Krishna and S. D. Morgera: “A new error control scheme for hybrid ARQ systems”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-35, 10, pp.981-990(1987).
 [5] M. Moeneclaey, H. Bruneel, I. Bruyland and D. - Y. Chung: “Throughput optimization for a generalized stop-and-wait ARQ scheme”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-34, 2, pp.205-207(1986).
 [6] A. R. K. Sastry: “Improving automatic repeat-request (ARQ) performance on satellite channels under high error rate conditions”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-23, pp.436-439(1975).
 [7] J. M. Morris: “On another go-back-N ARQ technique for high error rate conditions”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-26, pp.187-189(1978).
 [8] P. S. Yu and S. Lin: “An efficient selective-repeat ARQ scheme for satellite channels and its throughput analysis”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-29, 3, pp.480-486(1982).
 [9] H. F. Marz and R. A. Waller: “Bayesian Reliability Analysis”, Wiley, New York(1982).
 [10] 三浦弘明, 中川翠夫, 小池慎一: “データ伝送における最適再送要求回数に関するベイズ論的アプローチ”, 信学論(A), J75-A, 7, pp.1189-1192(1992).
 [11] 安井一民, 中川翠夫, 本告光男: “間欠障害を伴うデータ伝送システムの2段階誤り制御方策”, 信学論(A), J75-A, 5, pp.944-948(1992).
 [12] 中川翠夫, 安井一民, 三浦弘明: “間欠障害を伴うデータ伝送システムの最適 ARQ 方策”, 信学論(A), J76-A, 8, pp.1201-1206(1993).
 [13] 高木貞治: “代数学講義”, p.381, 共立出版(1969).