

Title	Stop and Wait ARQを用いた移動通信制御手順の特性
Author(s)	広池, 彰; 松本, 正
Citation	電子情報通信学会論文誌 B, J72-B(6): 223-230
Issue Date	1989-06-20
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/4705
Rights	Copyright (C)1989 IEICE. 広池 彰、松本 正, 電子情報通信学会論文誌 B, J72-B(6), 1989, 223-230. http://www.ieice.org/jpn/trans_online/
Description	

Stop and Wait ARQ を用いた移動通信制御手順の特性

正員 広池 彰[†] 正員 松本 正^{††}

Performance Evaluation of Radio Link Control Protocol Using Stop and Wait ARQ in Mobile Radio Systems

Akira HIROIKE[†] and Tadashi MATSUMOTO^{††}, Members

あらまし 陸上移動通信データ伝送では、伝送信頼度向上のため、FECとARQによる誤り制御が一般的に用いられる。移動通信システムの無線回線制御のための制御信号伝送では、主としてFECで誤り検出を行い、ARQにより信頼度を高めることが多い。40~50 km/h程度の移動速度と許容される数秒の伝送遅延の条件下において、ARQの伝送特性は、一般にフェージングによる瞬時受信レベル変動に対するパケット信号伝送特性と共に、再送信間隔の受信レベル短区間中央値変動に大きく依存する。しかし、この中央値変動を考慮したARQの伝送特性の評価例はこれまでにない。本論文では、再送を有限回に限定したStop-and-Wait ARQ(SAW-ARQ)の、再送信間隔の短区間中央値変動の相関を考慮した伝送特性の評価法について述べ、数値例を示す。また、共通制御チャンネルでの伝送手順にSAW-ARQを用いた場合の呼損率を考察し、数値例を示す。

1. まえがき

陸上移動通信における無線区間データ伝送では厳しいマルチパス伝搬による伝送誤り対策が不可欠であり、誤り訂正符号化(FEC)、および自動再送要求(ARQ)が多く用いられている⁽¹⁾。

移動通信では、過酷な伝送路状態に対して信頼度設計する必要があり、FECだけでゾーン全体に対してエラーフリー伝送を確保するのは非現実的と言える。これに対してARQは、伝送路状態に応じて伝送効率を切り換える機能があり、伝送遅延がある程度許容される場合にはFECと比べて合理的な誤り制御を実現できる。

無線回路制御のためのデータ信号伝送では、比較的小容量のデータをエラーフリーに近い信頼度で相手局へ送る必要がある。ARQは、このような場合に容易に所要の信頼度を満たすことが可能であるが、他方、ゾーン周辺部では再送により伝送効率(スループット)が劣化する欠点がある。従って、実際の無線システムではARQとFECとを組み合わせたHybrid ARQ⁽¹⁾

を用いた例が多い。この場合、いわゆる不感地域と呼ばれる低電界地域での多数回再送を避けるため、一定遅延時間の範囲内で再送を打ち切るのが一般的である。

40~50 km/h程度の移動速度と許容される数秒の伝送遅延の条件を考えると、ARQの伝送特性は、マルチパスフェージングによる瞬時受信レベル変動に対するパケット信号伝送特性と共に、再送信間隔の受信レベル短区間中央値変動に大きく依存する。しかし、従来、ARQ方式の伝送不完了率、伝送遅延、伝送効率等を受信レベル短区間中央値変動を考慮して評価した例はない。

本論文では、基地局と移動局の間の制御信号伝送手順にSAW-ARQを適用する場合について、再送回数を限定し、一定の伝送不完了率と、信号再送間隔、制御処理のための伝送遅延を許容するときの制御手順について考察する。2.において、有限の再送回数、再送間隔を有するSAW-ARQの、受信レベル短区間中央値の場所的変動を考慮した平均伝送不完了率、平均伝送確率、平均伝送回数の数値計算法を示し、数値例を示す。3.では、制御チャンネルにSAW-ARQを適用する場合の呼損率の一評価法を考察し、数値例を示す。

[†] NTT 高度通信サービス事業本部移動体通信事業部, 横須賀市
NTT Advanced Telecommunications Services Sector,
Yokosuka-shi, 238-03 Japan

^{††} NTT 無線システム研究所, 横須賀市
NTT Radio Communication Systems Laboratories, Yokosuka-shi, 238-03 Japan

2. 短区間中央値変動下でのSAW-ARQ伝送特性

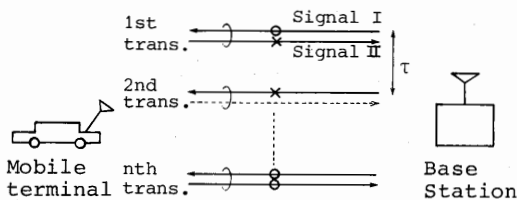
2.1 SAW-ARQモデル

図1に二つの信号I, IIで構成される最も簡単なSAW(Stop and Wait)-ARQモデルを示す。送信側では、誤り検出符号化されたパケット信号を送信し、受信側では受信パケットでの誤りを検出すればそのパケットを棄却する。基地局から移動局へ信号Iを送信後、移動局からの応答信号IIを受信し、棄却しなかったときにARQは完了する。このとき、信号IIが受信できないとき、または受信はしたが棄却したときには、あらかじめ定めた間隔 τ が経過したあとに信号Iを再送し、再び信号IIの待ち受けに入る。伝送が完了するまでこの手順を最大 N 回まで繰り返す。

陸上移動通信における受信レベルの変動特性は、瞬時変動、短区間中央値変動(場地的変動)、および長区間中央値変動に区別するモデルが一般的に用いられている⁽²⁾。本論文では、短区間中央値と長区間中央値変動を検討の対象とする。レベル変動に対しては、一般的に用いられる以下の条件で評価する。

- (1) 1パケット内で受信レベル短区間中央値の変動はない。
- (2) 上下回線の短区間中央値変動の相関係数は1。
- (3) 再送パケット間で瞬時変動の時間相関は無視できる。
- (4) 短区間中央値変動は対数正規分布に従う。

ここで、仮定(3)はパケット長が瞬時変動の時間相関が0になる時間より大きい場合は再送間隔に依らず無条件に成立し、またパケット長が瞬時変動の時間相関が0になる時間よりも小さい場合は、瞬時変動の時



- : Successful transmission
- × : Failed transmission
- τ : Re-transmission interval

図1 SAW-ARQモデル
Fig. 1 Basic model of SAW-ARQ.

間相関を0にする時間以上の再送間隔の場合に成立する。例えば800 MHz帯域において最大ドップラー一周波数40 Hzの瞬時変動は、約12 msで無相関となる。

2.2 伝送特性

2.2.1 平均伝送不完了率

受信レベルが短区間中央値変動を伴う場合の平均伝送不完了率は以下のように求められる。

ARQによる信号受信を N 回行ったときの受信CNR短区間平均値 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$ は、仮定により長区間平均CNR値 $\bar{\gamma}$ の回りに対数正規分布する。このとき、図1のSAW-ARQについて最大送信回数が1のときの平均伝送不完了率 P_F は、次のように表せる。

$$P_F(\bar{\gamma}) = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - \{1 - P_{e1}(\bar{\gamma})\} \cdot \{1 - P_{e2}(\bar{\gamma})\}] \cdot P_C(\bar{\gamma}) d\gamma_1 \quad (1)$$

ここで、 $P_{e1}(\gamma), P_{e2}(\gamma)$ はパケット信号I, IIの瞬時変動下での平均非受信率、 γ はデシベル表現の短区間平均CNR値、 $P_C(\gamma_1)$ は1変数ガウス確率密度関数である。また、最大送信回数が2、再送間隔が τ のときの P_F は2変数結合ガウス確率密度関数を $P_C(\gamma_1, \gamma_2)$ として、

$$P_F(\bar{\gamma}, \tau) = \iint_{-\infty}^{\infty} [1 - \{1 - P_{e1}(\gamma_1)\} \cdot \{1 - P_{e2}(\gamma_1)\}] \cdot [1 - \{1 - P_{e1}(\gamma_2)\} \cdot \{1 - P_{e2}(\gamma_2)\}] \cdot P_C(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (2)$$

と表せる。一般に最大送信回数が N 、再送間隔が τ のときの平均伝送不完了率 $P_F(\bar{\gamma}, \tau; N)$ は、次式となる。

$$P_F(\bar{\gamma}, \tau; N) = \iiint \dots \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^N P_F(\gamma_i) P_C(\gamma_1, \dots, \gamma_N) d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_N \quad (3)$$

ここで、 $P_C(\gamma_1, \dots, \gamma_N)$ は N 変数結合ガウス確率密度関数、 $P_F(\gamma_i)$ は基地局、移動局間での信号伝送手順により定まる1回当たりの信号伝送不完了率を与える関数であり、図1のSAW-ARQでは、

$$P_F(\gamma_i) = [1 - \{1 - P_{e1}(\gamma_i)\} \cdot \{1 - P_{e2}(\gamma_i)\}] \quad (4)$$

である。

式(3)は N 重積分であるが、 $P_C(\cdot)$ がエルミート多項式を用いた相関関数の級数に展開(メラー型展開)できる^{(3),(4)}ことを利用すると、式(3)の多重積分は1重積分の積として表現できる。すなわち、ガウス分布の標準偏差を σ 、平均値を0、ガウス変数 A, B の間の相関係数を ρ_{AB} とした場合、3変数 X, Y, Z のガウ

ス確率密度関数は次式のように展開できる。

$$P_c(X, Y, Z) = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{a=0}^{\infty} \sum_{b=0}^{\infty} \sum_{c=0}^{\infty} \left\{ F^{(a+c+1)}(X/\sigma) \cdot F^{(a+b+1)}(Y/\sigma) \cdot F^{(b+c+1)}(Z/\sigma) \cdot \frac{\rho_{XY}^a \rho_{YZ}^b \rho_{XZ}^c}{a! b! c!} \right\} \quad (5)$$

ここで、

$$F^{(n+1)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{d^n}{dZ^n} \exp(-x^2/2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot (-1)^n \cdot \exp(-x^2/2) \cdot H_n(x) \quad (6)$$

であり、 $H_n(x)$ は n 次のエルミート多項式で、

$$H_n(x) = \sum_{r=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} (-1)^r (2r-1)!! \cdot {}_n C_{2r} x^{(n-2r)} \quad (7)$$

で与えられる。

但し [] : ガウスの記号

$$(2r-1)!! = (2r-1)(2r-3) \cdots 3 \cdot 1$$

$$(-1)!! = 1$$

である。

この展開は、結合確率密度関数を変数間の相関係数を用いて各変数の関数の積の級数で表現するもので、 N 次まで拡張できる (付録参照)。

以上の展開式において平均値を長区間平均 CNR 値 $\bar{\gamma}$ で置き換えると、例えば $N=3$ のときの式(3)は、 γ_1 と $\gamma_2 (1 \leq I, J \leq N)$ の間の相関係数を ρ_{IJ} として、次式のように変形できる。

$$P_F(\bar{\gamma}, \tau, 3) = \frac{1}{(\pi)^{3/2}} \sum_{a=0}^{\infty} \sum_{b=0}^{\infty} \sum_{c=0}^{\infty} \frac{\rho_{12}^a \rho_{23}^b \rho_{13}^c}{a! b! c!} \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} H_{a+c}(\sqrt{2}x) P_f(\bar{\gamma} + \sqrt{2}\sigma x) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} H_{a+b}(\sqrt{2}x) P_f(\bar{\gamma} + \sqrt{2}\sigma x) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} H_{b+c}(\sqrt{2}x) P_f(\bar{\gamma} + \sqrt{2}\sigma x) dx \right\} \quad (8)$$

以上より、SAW-ARQ の平均伝送不完了率は短区間平均 CNR 値に対するパケット信号非受信率 $P_{e1}(\gamma), P_{e2}(\gamma)$ 、および相関係数 ρ_{IJ} が求まれば計算できる。

2.2.2 平均伝送確率、および平均伝送回数

有限回再送を前提とした SAW-ARQ では伝送不完了率を零にすることはできない。この SAW-ARQ において、伝送不完了な場合も含めた、伝送プロトコル

が終了するまでの平均伝送回数を求める。

m 回目に伝送プロトコルが完了する平均伝送確率 $P_{en}(\bar{\gamma}, \tau; m)$ は、最大送信回数が $m-1$ のときの伝送不完了率と m のときの伝送不完了率の差で与えられ、($N=m-1$ のときの伝送不完了率) - ($N=m$ のときの伝送不完了率) で求まる。一般には $m=1, m>1$ の場合で各々次式となる。

$$P_{en}(\bar{\gamma}, \tau; m) = \begin{cases} 1 - \int_{-\infty}^{\infty} P_f(\gamma_1) P_c(\gamma_1) d\gamma_1 & (m=1) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^{m-1} P_f(\gamma_i) P_c(\gamma_1, \dots, \gamma_{m-1}) d\gamma_1 \cdots d\gamma_{m-1} - \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^m P_f(\gamma_i) P_c(\gamma_1, \dots, \gamma_m) d\gamma_1 \cdots d\gamma_m & (m>1) \end{cases} \quad (9)$$

従って、平均伝送回数 $E_n(\bar{\gamma}, \tau; N)$ は

$$E_n(\bar{\gamma}, \tau; N) = \sum_{i=1}^{N-1} i \cdot P_{en}(i) + N \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^{N-1} P_f(\gamma_i) \cdot P_c(\gamma_1, \dots, \gamma_{N-1}) d\gamma_1 \cdots d\gamma_{N-1} = 1 + \sum_{m=1}^{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^m P_f(\gamma_i) P_c(\gamma_1, \dots, \gamma_m) d\gamma_1 \cdots d\gamma_m \quad (10)$$

となる。

2.3 数値例

800 MHz 帯移動通信システムにおいて、移動局が 50 km/h の速度で走行しているときの SAW-ARQ の伝送特性を求める。

受信レベル短区間中央値の正規化自己相関関数 $\rho(\tau)$ と時間 τ の関係は、短区間中央値変動の電力スペクトル密度分布を方形で近似すれば⁽⁵⁾ 次式で与えられる。

$$\rho(\tau) = \frac{1}{2f_g} \int_{-f_g}^{f_g} \exp(j2\pi f\tau) df = \frac{\sin(2\pi f_g \tau)}{2\pi f_g \tau} \quad (11)$$

但し、 f_g は中央値変動の最高周波数であり、一般的には瞬時変動の周波数の数百分の一であることが知られている⁽⁶⁾。このとき、 ρ_{IJ} は式(11)を用いて次のようになる。

$$\rho_{IJ} = \rho(|I-J| \cdot \tau) \quad (12)$$

本論文ではこの ρ_{IJ} を数値例に用いる。また式(8)内

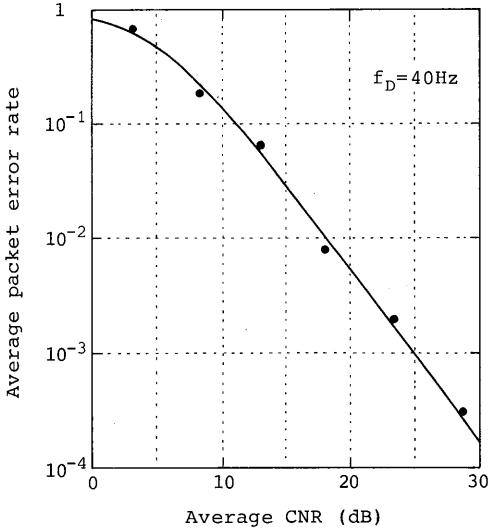


図2 平均パケット非受信率
Fig. 2 Average packet error rate.

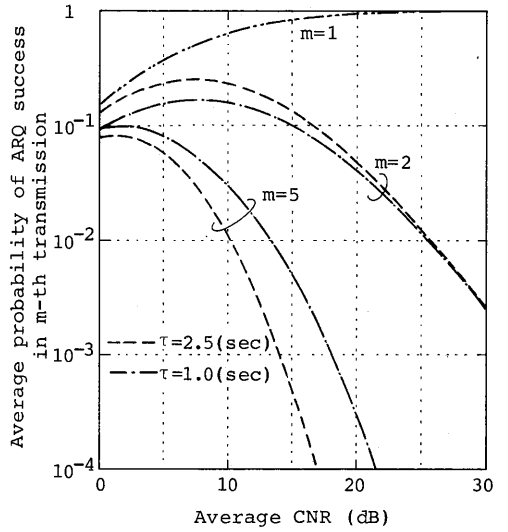


図4 平均伝送確率
Fig. 4 Average probability of ARQ success in m -th transmission.

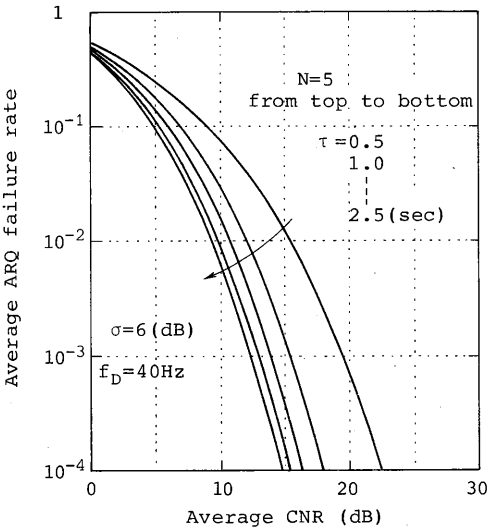


図3 平均伝送不完了率
Fig. 3 Average ARQ failure rate.

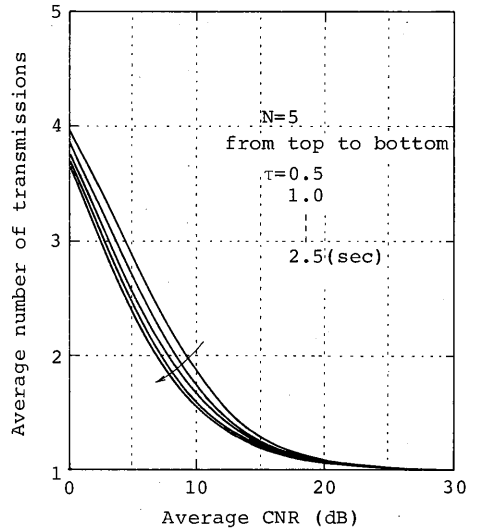


図5 平均伝送回数
Fig. 5 Average number of transmissions.

の無限区間積分計算については、エルミートガウスの積分公式を用いることで、有限個数の P_r の値を与えれば計算可能であり、本論文での数値例では本公式を用いる。

BCH (63, 51) 符号を短縮した BCH (40, 28) 符号を 1 ビット誤り訂正、3 ビット誤り検出符号として用いた ARQ を考え、信号伝送速度 2,400 bit/s、最大ドップラ一周波数 $f_b = 40$ Hz のレイリーフェージング下での

平均パケット非受信率の室内シミュレーション実験結果を図 2 に示す。ここでバースト伝送のための冗長ビットを含めた 1 パケット長は約 45 ms とした。

一般に、ARQ における信号再送間隔が小さく、短区間中央値間の相関が大きき場合は、最大送信回数を多くとっても伝送不完了率の大幅な改善は期待できない。一方、最大送信回数が小さくても信号再送間隔を短区間中央値の相関が零になるような時間に設定すれ

ば、大きな改善が期待できる。

図3は、最大送信回数を $N=5$ としたときの τ をパラメータとした伝送不完了率特性である。ここで、短区間中央値変動の最高周波数を 0.2 Hz 、標準偏差 σ を 6 dB 、式(4)の計算を行う際の信号 I, II のパケット非受信率は簡単のため $P_{e1}(\gamma) = P_{e2}(\gamma)$ とし、図2の非受信率曲線を簡単な実験式[†]で置き換えたもので与えた。最大送信回数 N が一定という条件で、再送間隔 τ が大きくなるに従い伝送不完了率は低下し、例えば長区間平均 $\text{CNR}=15 \text{ dB}$ 点では $\tau=0.5$ 秒から $\tau=1.0$ 秒にすることにより約 $1/10$ になることがわかる。

図4は τ をパラメータとした平均伝送確率 $P_{en}(\bar{\gamma}, \tau; m)$ である。 $\tau=2.5$ 秒の再送を行う場合、例えば長区間平均 $\text{CNR}=10 \text{ dB}$ 点で1回目の再送(伝送遅延 $\tau=2.5$ 秒)で伝送が完了する確率は約 20% 、最大回数の再送(最大伝送遅延 $4\tau=10$ 秒)にまで至り伝送が完了する確率は 1% であることがわかる。

図5は τ をパラメータとした $E_n(\bar{\gamma}, \tau; 5)$ である。この図より、例えば長区間平均 $\text{CNR}=10 \text{ dB}$ 点では $\tau=0.5$ 秒から 2.5 秒にすることにより平均伝送回数は約 $1/1.2$ となり、伝送効率は約 20% 向上することがわかる。

3. SAW-ARQ を用いた制御チャンネルにおける呼損率

本章では、共通制御チャンネルでの信号伝送手順に SAW-ARQ を用いた場合の呼損率を考察する。

[†] 実験式として、

$$\text{非受信率} = \frac{1}{(1 + \alpha \gamma^{-m})^n}$$

を用いた。ここで、 γ は短区間平均 CNR であり、 α, m, n として以下の数値を用いた。

$$\alpha = 0.207, m = 1.49, n = 1$$

複数移動局が共通に用いる制御チャンネルでは、1制御チャンネル当りの処理能力の範囲で、制御を要求する各移動局に多重の ARQ を並行して管理しながら時分割的に処理を実行する。図6に制御チャンネルでの複数 ARQ 動作の一例を示す。ここで制御チャンネルにおいては移動局ごとの ARQ のための信号伝送回数、再送間隔の管理テーブルが必要となる。本論文ではこれを ARQ テーブルと呼ぶ。ここで、あらかじめ用意している制御チャンネル側の ARQ テーブルに空きがないときに生じた呼は、呼損となる。従って、SAW-ARQ を用いた制御チャンネルにおける呼損率は、前章で述べた ARQ の伝送不完了率と ARQ テーブル損率の和で与えられる[†]。本章では、呼の生起時に空き ARQ テーブルがなければその呼を呼損とする即時式トラヒックモデルにより呼損率を求める。

3.1 制御ゾーン周辺における評価

制御チャンネルでの呼はポアソン生起、ARQ テーブルの保留時間分布は一般分布を仮定し、ARQ テーブル数を出線数 S とした即時式 $M/G/S$ モデルとして解析を行う。

今、図6のように SAW-ARQ の信号再送間隔を τ (秒)、1回の信号伝送に伴い制御チャンネルの上下回線を専有する信号 I, 信号 II の信号長、および伝搬遅延の和を T_s (秒) とすると、一つの ARQ についての ARQ テーブルの平均保留時間 μ^{-1} は次式で与えられる。

$$\mu^{-1}(\bar{\gamma}, \tau; N) = \tau \cdot [E_n(\bar{\gamma}, \tau; N) - 1] + T_s \quad (13)$$

今、1制御ゾーン内での呼の生起率を λ (call/秒) とする。このときの1生起呼当りの ARQ 伝送不完了率

[†] 発信制御チャンネルにおいてはランダムアクセス手順での発信信号の衝突に起因する呼損率も定義されるが、本論文における呼損率にはこれを含めていない。

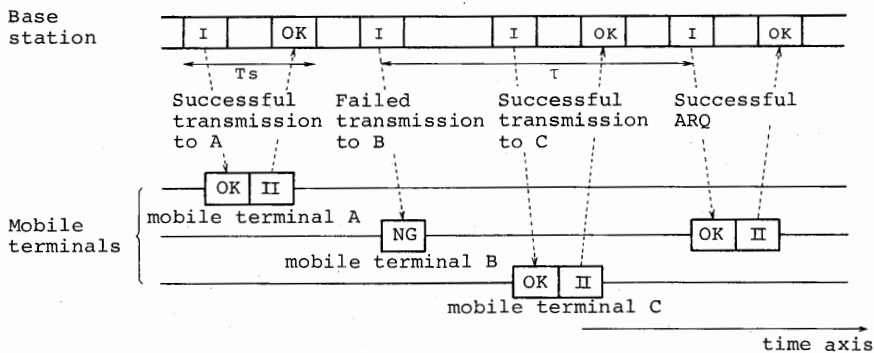


図6 制御チャンネルにおける ARQ 動作
Fig. 6 Model of SAW-ARQs in control channel.

および ARQ テーブルの平均保留時間は長区間平均 CNR 値の関数であるため、ARQ テーブルでの平均呼量 $A(\text{erl})$ 、ゾーン全体における平均 ARQ 伝送不完了率 P_{Fm} はゾーン内の移動局の分布状態に依存する。ここで制御ゾーン端での長区間平均 CNR 値を $\bar{\Gamma}$ とすると、 P_{Fm} 、 A には式 (3) の P_F を用いて次の関係が成り立つ。

$$P_{Fm} \leq P_F(\bar{\Gamma}, \tau; N) \quad (14)$$

$$A \leq \lambda \cdot \mu^{-1}(\bar{\Gamma}, \tau; N) \quad (15)$$

ここでゾーン内の全移動局がゾーン周辺に分布しているとした最悪ケースの ARQ 伝送不完了率は式 (14) の右辺で与えられ、またテーブル数 S のときの ARQ テーブル損率 $B(S)$ は、式 (15) の右辺の呼量にアラン損失式を適用することにより求まる。

3.2 制御ゾーン全体における評価

制御ゾーン内の移動局の分布を一様分布と仮定し、制御チャンネルにおける呼損率を制御ゾーン全体で評価する。

制御ゾーンの半径を $R(\text{km})$ とすると、基地局から距離 $r(\text{km})$ の点での長区間平均 CNR 値 $\bar{\gamma}(\text{dB})$ は、伝搬距離特性を用いると近似的に次式で表される。

$$\bar{\gamma} = \bar{\Gamma} + 10 \cdot \alpha \cdot \log(R/r) \quad (\text{dB}) \quad (16)$$

ここで $\alpha=3\sim 4$ であり、 $\bar{\Gamma}$ は制御ゾーン端での長区間平均 CNR である。このときゾーン全体で平均化した ARQ 平均伝送不完了率 P_{Fm} 、ARQ テーブル平均呼量 A はそれぞれ次式で与えられる。

$$P_{Fm}(\bar{\Gamma}) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R P_F[\bar{\Gamma} + 10\alpha \log(R/r)] 2\pi r dr \quad (17)$$

$$A(\bar{\Gamma}) = \frac{\lambda}{\pi R^2} \int_0^R \mu^{-1}[\bar{\Gamma} + 10\alpha \log(R/r)] 2\pi r dr \quad (18)$$

よって、ARQ テーブル損による呼損率 $B(S)$ は、呼量 A をアラン損失式に適用することにより求まる。

3.3 数値例

制御チャンネルにおける呼損率の数値例を制御ゾーン周辺と制御ゾーン全体で評価した場合について示す。

なお、移動局から基地局への信号には信号衝突に起因する伝送誤りはないものとし、2. と同じ条件下で ARQ の伝送特性を評価する。

3.3.1 制御ゾーン周辺における評価

$N=5$ 、 $T_s=0.09$ (秒)、 $\lambda=1$ (call/秒)、 $S=6$ とした場合の ARQ テーブル損率 $B(6)$ 、および ARQ 伝送不完了率 P_{Fm} を再送間隔 τ をパラメータとして図 7 に示す。図中、 $B(6)$ を実線で、 P_{Fm} を破線で表している。

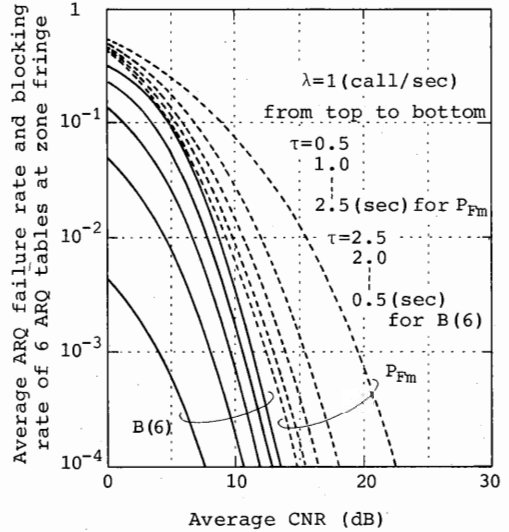


図 7 制御チャンネルにおける呼損率(ゾーン周辺)
Fig. 7 Average ARQ failure rate and blocking rate of 6 ARQ tables at zone fringe.

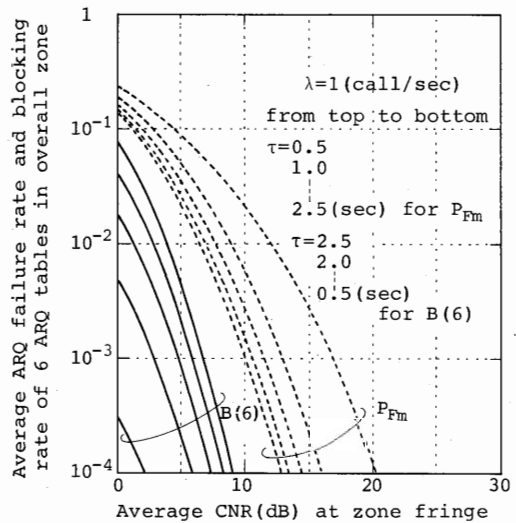


図 8 制御チャンネルにおける呼損率(ゾーン全体)
Fig. 8 Average ARQ failure rate and blocking rate of 6 ARQ tables in overall zone.

本結果より、例えばゾーン周辺区間平均 CNR を 10 dB、呼生起率を 1 (call/秒) と仮定した制御ゾーンの場合には、 $N=5$ 、 $\tau=2.0$ 秒、 $S=6$ で呼損率 1 パーセント以下が達成できることになる。

3.3.2 制御ゾーン全体における評価

式 (17)、(18) において $R=1(\text{km})$ 、 $\alpha=3.5$ としたときの、ゾーン全体における評価結果を図 8 に示す。こ

表 A・1 エルミートガウスの積分公式で用いた x_i と W_i の値

x_i	W_i
0.0000000	0.31573389
±0.31578690	0.28591145
±0.6318927	0.21222172
±0.948640510	0.12896560
±1.26636203	0.06403250
±1.58540215	0.02590029
±1.90612610	0.00850195
±2.22890760	0.00225369
±2.55424039	0.00047945
±2.88239980	0.00008131
±3.21445270	0.00001082
±3.55100605	0.00000115
±3.88977869	0.00000009
±4.23978937	0.00000001

の結果より、伝送不完了率、ARQ テーブル損率とも制御ゾーン周辺における評価値よりも約 5~100 倍良い値となることがわかる。

4. む す び

陸上移動通信システムにおける受信レベル短区間中央値変動下での SAW-ARQ の伝送特性の評価方法を示し、数値例を与えた。有限回再送のもとでの SAW-ARQ の平均伝送不完了率を与える式を導出し、それをもとに平均伝送確率、平均伝送回数を求めた。また、制御チャンネルにおける信号伝送手順を SAW-ARQ で構成した場合の呼損率の評価法を明らかにした。更に数値例を示した。

本論文で示した伝送特性評価法は、移動局が 40~50 km/h 程度の速度で移動し、再送パケット間での瞬時変動相関が無視できる場合に適用できる。移動速度が低い携帯移動局に対しては、レイリーフェージングと短区間中央値変動が加わったレベル変動下での伝送効率を評価する必要があり今後の課題である。また、実システムにおいては制御チャンネルに使用する周波数の利用率を高めることが重要となる。従って、干渉雑音を考慮にいたった呼損率評価法についても今後検討する必要がある。

謝辞 日ごろ御指導頂く NTT 移動体通信事業部會本システム開発部長、渡辺 圭 席技師、堀川 主 幹技師に深謝致します。

文 献

(1) R. A. Comroe D. J. Costello Jr.: "ARQ schemes for data transmission in mobile radio systems" IEEE

Trans. Veh. Technol., VT-33, 3, pp. 88-97 (Aug. 1984).
 (2) 奥村善久, 大森英二: "陸上移動無線の電界強度とその変動特性", 信学誌, 50, 11, pp. 2108-2115 (昭 42-11).
 (3) R. L. Stratonovich: "Topics in the theory of random noise" 1, New York: Gordon and Breach, pp. 39-44 (1963).
 (4) J. F. Barrett and D. G. Lampard: "An expansion for some second-order probability distributions and its application to noise problems", IRE Trans. Inform. Theory, IT-1, PP. 10-15 (March 1955).
 (5) 村田嘉利, 安達文幸, 岡坂定篤: "移動通信における短時間受信レベルの変動速度", 昭 56 信学総全大, 2156.
 (6) 奥村善久, 進士昌明: "移動通信の基礎", pp. 218-221, 電子通信学会 (昭 61).

付 録

1. 式 (8) の導出

$$\begin{aligned}
 P_F(\bar{\gamma}, \tau; 3) &= \iiint_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^3 P_F(\gamma_i) \cdot P_C(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) d\gamma_1 d\gamma_2 d\gamma_3 \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3} \sum_{a=0}^{\infty} \sum_{b=0}^{\infty} \sum_{c=0}^{\infty} \frac{\rho^a_{12} \rho^b_{23} \rho^c_{13}}{a! b! c!} \\
 &\quad \cdot \left\{ \iiint_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{ \frac{-1}{2} \left(\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2}{\sigma^2} \right) \right\} \right. \\
 &\quad \cdot (-1)^{2(a+b+c)} \cdot \prod_{i=1}^3 P_F(\bar{\gamma} + \gamma_i) \\
 &\quad \cdot H_{a+c}(\gamma_1/\sigma) \cdot H_{a+b}(\gamma_2/\sigma) \cdot H_{b+c}(\gamma_3/\sigma) \\
 &\quad \left. d\gamma_1 d\gamma_2 d\gamma_3 \right\} \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3} \sum_{a=0}^{\infty} \sum_{b=0}^{\infty} \sum_{c=0}^{\infty} \frac{\rho^a_{12} \rho^b_{23} \rho^c_{13}}{a! b! c!} \cdot \\
 &\quad \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-\gamma_1^2}{2\sigma^2} \right) P_F(\bar{\gamma} + \gamma_1) \cdot H_{a+c}(\gamma_1/\sigma) d\gamma_1 \right. \\
 &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-\gamma_2^2}{2\sigma^2} \right) P_F(\bar{\gamma} + \gamma_2) \cdot H_{a+b}(\gamma_2/\sigma) d\gamma_2 \\
 &\quad \left. \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-\gamma_3^2}{2\sigma^2} \right) P_F(\bar{\gamma} + \gamma_3) \cdot H_{b+c}(\gamma_3/\sigma) d\gamma_3 \right\}
 \end{aligned}$$

ここで

$$\frac{\gamma_n}{\sqrt{2}\sigma} = X$$

とおくと式 (8) を得る。

2. P_F の一般式

$$\begin{aligned}
 P_F(\bar{\gamma}, \tau; N) &= \frac{1}{(\pi)^{N/2}} \cdot \sum_{a(1,2)=0}^{\infty} \sum_{a(1,3)=0}^{\infty} \cdots \sum_{a(1,N)=0}^{\infty} \\
 &\quad \cdots \sum_{a(N-2,N-1)=0}^{\infty} \sum_{a(N-2,N)=0}^{\infty} \sum_{a(N-1,N)=0}^{\infty}
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \frac{\prod_{n=1}^{N-1} \left[\prod_{m=n+1}^N \rho_{n,m}^{a(n,m)}(\tau) \right]}{\prod_{n=1}^{N-1} \left[\prod_{m=n+1}^N a(n,m)! \right]} \cdot \prod_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} H_{b(i)}(\sqrt{2}X) P_f(\bar{\gamma} + \sqrt{2}\sigma X) dX \right\}$$

ここで

$$1 \leq n \leq N-1, 2 \leq m \leq N, n < m$$

$$b(i) = \begin{cases} \sum_{l=2}^N a(1, l) & (i=1) \\ \sum_{l=1}^{i-1} a(l, i) + \sum_{l=i+1}^N (a(i, l)) & (2 \leq i \leq N-1) \\ \sum_{l=1}^{N-1} a(l, N) & (i=N) \end{cases}$$

である。

3. エルミートガウスの積分公式

エルミートガウスの積分公式は次式で与えられる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} f(x) dx = \sum_{i=0}^n W_i f(x_i)$$

ここで、 x_i は $n+1$ 次エルミート多項式の根である。この公式は無限区間の積分値を有限個数の $f(x)$ の値と重み W_i の積の和で近似する。従って、実験値として $f(x_i)$ を与えれば、積分値が求まる。

本検討では、 $n=48$ とし、27 点で計算を実行した。表 A・1 に $n=48$ のときの x_i, W_i を示す。

(昭和 63 年 11 月 8 日受付, 平成元年 1 月 26 日再受付)



広池 彰

昭 57 九大・工・電子卒。昭 59 同修士課程了。同年日本電信電話公社(現日本電信電話株式会社)横須賀電気通信研究所入所。以来、移動通信方式の研究、実用化に従事。現在、同社移動体通信事業部技師。



松本 正

昭 53 慶大・理工・電気卒。昭 55 同修士課程了。同年日本電信電話株式会社無線システム研究所入所(当時、電電公社横須賀電気通信研究所)。以来、自動車電話方式、デジタル移動通信、移動通信用誤り制御方式の研究・実用化に従事。現在、NTT 無線システム研究所主任研究員。