

スペクトル拡散アロハ方式によるマルチメディア無線通信システムにおける パケット再送制御方式と安定性に関する研究

榊原 勝己 岡山県立大学 情報工学部助教授

1 まえがき

次世代移動通信システムを特徴付ける要素技術の中で、中心に位置しているのが、符号分割多元接続(Code-Division Multiple-Access ; CDMA)方式である。CDMA方式のひとつとして、周波数ホッピング方式が知られている[1][2][5]。周波数ホッピング方式では、割当周波数帯域がいくつかの分割した周波数ビンに分割されている。送信ユーザーは、割り当てられた符号系列に従って、搬送周波数を周波数ビンに対応するように高速に変化(ホッピング)させて情報を伝送する。送信ユーザー数が多ければ、同一周波数ビンに同時にホップすることがあり、衝突が発生する可能性が高くなる。この衝突によって、シンボル誤りが起こり、これを訂正するため、周波数ホッピング方式では、通常、誤り訂正符号技術が用いられている。しかしながら、誤り訂正能力の高い符号を用いると、多くの冗長シンボルが付加されてしまい、結果的に情報の伝送効率を劣化させてしまう恐れがある。また、パケット当たりの衝突するシンボル数が多いと、誤り訂正符号技術を用いても誤り訂正に失敗し、パケット全体を再送しなければならない。パケット全体を再送すると、他のユーザーとの衝突を促し、パケット誤り率を増加させてしまう。

一方、Raychaudhuriによって、可変長パケットをいくつかの固定長サブパケットに分割し、アロハ方式で送信するSREJ(selective reject)方式が提案されている[3]。SREJ方式では、衝突したサブパケットのみをランダム遅延時間を施した後に再送することで高いスループットを得ている。

本研究では、SREJ方式を周波数ホッピング方式に適用したパケット分割再送を提案する。提案方式では、SREJ方式と同様に、パケットをいくつかのサブパケットに分割し、誤り訂正符号により符号化した後に、周波数ホッピング方式により送信する。受信側で通信路誤りを検出した場合、パケット全体を再送するのではなく、誤りが検出されたサブパケットのみを再送することにより、衝突するユーザー数を部分的に軽減し、性能の改善を試みている。また、提案方式のスループットを、近似解析と計算機シミュレーションにより評価する。

2 周波数ホッピング方式

全通信帯域が均等に q 個の周波数ビンに分割されているものとする。各周波数ビンは、情報信号の帯域と等しい帯域幅をもっている。各ユーザーは、ホップ毎に q 個の周波数ビンの中からランダムに1個の周波数ビンを選択し、その選択された周波数ビン内で1個の信号を伝送する。同一時間に同一の周波数ビンを複数のユーザーが、選択して信号を伝送すると、通信路上において信号が衝突する。この衝突をヒットと呼ぶ。送信信号にヒットが生じた場合、受信局では送信シンボルの決定が一般に困難となる。このため、ヒットは通信路誤りの原因となる。したがって、周波数ホッピング方式では、誤り訂正符号[4]を併用するのが通例である[2]。通信路上で生じた誤り(ヒットによる誤り、干渉による誤り、熱雑音による誤り等)の数が、誤り訂正能力範囲内であれば、誤った信号は元の信号に復元可能なため、送信の成功を送信局に知らせるACK(acknowledgment)が返送される。一方、誤り訂正能力を越える誤りが通信路上で生起すれば、送信の失敗を送信局に知らせるNAK(negative ACK)が返送される。

全送信ユーザーの周波数をホップさせる時間が同期している同期ホッピングの場合、他のユーザとヒットする確率は

$$\rho = \frac{1}{q} \quad (1)$$

である。一方、全送信ユーザーが任意の時間に周波数をホッピングさせる非同期ホッピングの場合、

$$\rho = \frac{2(q-1)+1}{q^2} = \frac{2}{q} - \frac{1}{q^2} \quad (2)$$

で与えられる[2]。ここで、 m 個の packets が同時に送信されている場合、他の packets とヒットする確率 $\varepsilon(m)$ とすると、

$$\varepsilon(m) = 1 - (1 - \rho)^{m-1} \quad (3)$$

が成り立つ。

ここでは、ヒットへの対策として、情報を固定長の packets に分割し、符号長 n 、情報記号数 k のリード・ソロモン符号[4]を用いて符号化する。サイドインフォメーションを利用できる場合、ヒットによる誤りは、全て消失として復号することができる。よって、 $n-k$ 個以下のヒットが生じても訂正可能である。したがって、 m 個の packets が衝突した時に、ある packets が正しく復号されない packets 誤り率 $P_E(m)$ は、

$$P_E(m) = \sum_{i=n-k+1}^n \binom{n}{i} \{\varepsilon(m)\}^i \{1 - \varepsilon(m)\}^{n-i} \quad (4)$$

で与えられる。ただし、 $[x]$ は x 以下の最大整数を表し、 $\varepsilon(m)$ は式(3)で与えられる他ユーザーとのヒット確率である。一方、サイドインフォメーションを利用できない場合、ヒットによるシンボル誤りは全て誤りとして復号しなければならない。よって、高々 $[(n-k)/2]$ 個以下の誤り訂正が可能である。式(4)と同様に、packets 誤り率 $P_E(m)$ は、

$$P_E(m) = \sum_{i=\lfloor \frac{n-k}{2} \rfloor + 1}^n \binom{n}{i} \{\varepsilon(m)\}^i \{1 - \varepsilon(m)\}^{n-i} \quad (5)$$

で与えられる。

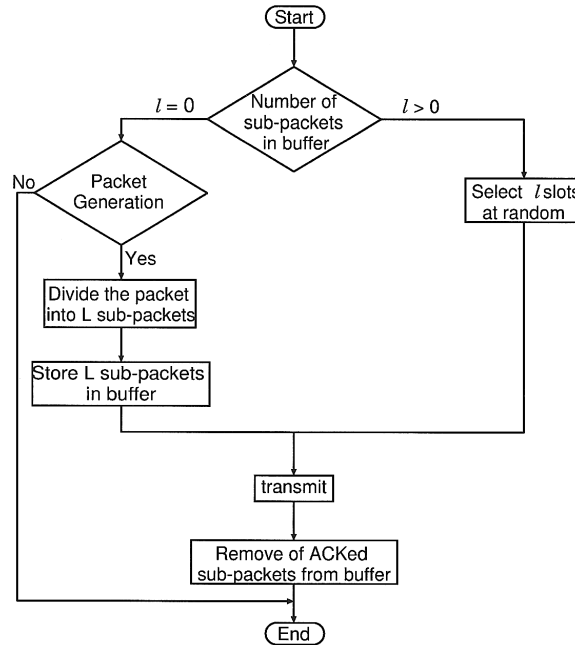


図1 パケット分割による再送制御方式のフロー

3 パケット分割によるパケット再送方式

3.1 アルゴリズム

M 個の単一バッファユーザーが、長さ nL の固定長 packets を周波数ホッピング方式で送信するシステムを考える。ここで、サブ packets 長を n 、packets 分割数を L とする。時間軸は、固定長 packets と同じ長さのフレームおよびサブ packets と同じ長さのスロットに分割されており、各サブ packets は $[n, k]$ RS 符号で符号化されているものとする。

packets 分割再送のフレーム内における各ユーザーの動作を図1に示す。フレーム開始時において、バッファが空の状態のユーザーは、新規 packets をフレーム開始時にある確率で発生し、 L 個のサブ packets に分割した後にフレームに同期して送信する。受信局は、サブ packets 毎に $[n, k]$ RS 符号に対する復号を行い、復号の成否を ACK および NAK により送信局に知らせる。 L 個の全てのサブ packets が、ACK となったユーザーはバッファを空にする。一方、 ℓ 個 ($1 \leq \ell \leq L$) のサブ packets の伝送に失敗すると、NAK となった ℓ 個のサブ packets のみ

を、次フレーム内の L 個のスロットの中から、 ℓ 個をランダムに選択して再送する。衝突したサブパケットは、送信に成功するまで何度でも再送を繰り返す。ここで、 $L=1$ の場合、すなわち、パケットをサブパケットに分割することなく送信する方式を従来方式と呼ぶことにする。

図2にパケット分割再送の動作例を示す。パケット分割数 $L=3$ とし、各サブパケットは $[n, k]$ RS符号で符号化されている。また、図3にパケット分割をしない従来方式($L=1$)による動作例を示す。

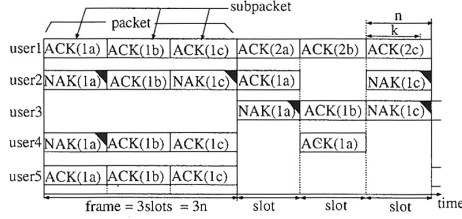


図2 提案方式の動作例

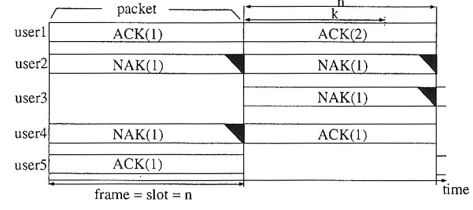


図3 従来方式による動作例

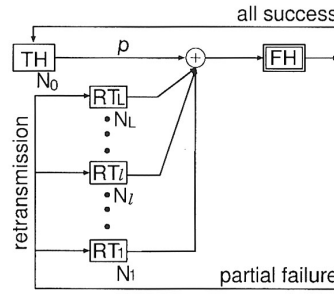


図4 システムモデル

3.2 システムモデル

提案方式であるパケット分割再送に対するシステムモデルを図4に示す。バッファが空の状態(THモード)のユーザーは、新規パケットをフレーム開始時に確率 p で発生し、 L 個のサブパケットに分割した後、フレームに同期して送信する。 L 個全てのサブパケットが、送信に成功したユーザーはTHモードに復帰する。 ℓ 個 ($1 \leq \ell \leq L$)のサブパケットの伝送に失敗したユーザーは、 RT_ℓ モードに移行する。 RT_ℓ モードのユーザーは、次フレーム内の L 個のスロットの中から ℓ 個のスロットをランダムに選択し、サブパケットを再送する。 ℓ 個のサブパケットの伝送に成功すると、そのユーザーはTHモードに復帰する。 RT_ℓ モードのユーザーが、 j 個($1 \leq j \leq \ell$)のサブパケットの伝送に失敗すると、再送モードである RT_j モードに移行する。ここで、全ユーザー数を N 、フレーム開始時のTHモードのユーザー数を N_0 、 RT_ℓ モードのユーザー数を N_ℓ とすると、

$$N_0 = N - \sum_{i=1}^L N_i \quad (6)$$

なる関係が成り立つ。

4 平衡点における特性

図4に示したシステムモデルは、 L 個の RT_ℓ モード($\ell = 1, 2, \dots, L$)に属するユーザー数 N_ℓ を成分とする L 次元ベクトル $[N_1, N_2, \dots, N_L]$ を状態空間とするマルコフ連鎖として記述することができる。しかしながら、提案方式に対する L 次元マルコフ連鎖の状態遷移確率を求めることは非常に困難であるため、マルコフ連鎖の定常状態確率分布を計算しなければならない厳密解析[7]を行うことは不可能である。このため、以下では、マルコフ連鎖に対する近似解析手法として、システムが平衡状態で動作しているとの仮定に基づく平衡点解析[6]の概念を導入する。平衡状態では、 L 個の各 RT_ℓ モードに流入してくるユーザー数と各モードから流出するユーザー数が等しいと考えることができる。はじめに、近似解析を進めるに際しての条件を示す。

- 送信局がパケットの送信を開始してから、受信局がそのパケットを受信するまでの伝搬遅延時間は無視できる。
- 背景雑音は無視でき、シンボル誤りはヒットによってのみ生起する。
- ACK、NAKは、受信局から送信局への帰還通信路においてエラーフリーである。

THモードのユーザーから確率 p で発生した新規パケットは、 L 個のサブパケットに分割されるため、1フレーム当たりにTHモードから送信されるサブパケット数は、 pLN_0 となる。また、 RT_ℓ モードからは、 ℓN_ℓ 個のサブパケットを再送することから、1スロット当たりに送信されるサブパケット数 m は、

$$m = \frac{1}{L} \left(pLN_0 + \sum_{i=1}^L iN_i \right) \quad (7)$$

となる。

次に、各モードのユーザー数の入出力関係を考える。 RT_L モードの場合、出力ユーザー数は N_L である。入力ユーザー数は、

1. THモードから新規にパケットを送信し、全サブパケットが誤るユーザー数
2. RT_L モードから L 個のサブパケットを再送し、全サブパケットが誤るユーザー数

の和である。ここで、 RT_ℓ モード ($1 \leq \ell \leq L$) から RT_j モード ($1 \leq j \leq \ell$) への遷移ユーザー数は、二項分布に従うため、

$$N_\ell \binom{\ell}{j} \{P_E(m)\}^j \{1 - P_E(m)\}^{\ell-j} \quad (8)$$

で与えられる。ただし、スロット当たり平均 m 個が衝突するものとし、このときのサブパケット誤り率を $P_E(m)$ とする。 $P_E(m)$ は、式(3), (4), (5)で示したように、スロットでの送信サブパケット数 m の関数であることに注意したい。したがって、 RT_L モードに関して、平衡状態では、

$$N_L = (pN_0 + N_L) \{P_E(m)\}^L \quad (9)$$

が成り立つ。一般に、 RT_ℓ モードの場合、出力ユーザー数は N_ℓ である。

入力ユーザー数は、前フレームにてTHモードからパケットを送信し、 ℓ 個のサブパケットが誤るユーザー数と RT_j モード ($\ell \leq j \leq L$) から j 個のサブパケットが再送され、 ℓ 個のサブパケットが誤るユーザー数の和である。したがって、 RT_ℓ モードに関して、

$$N_\ell = \binom{L}{\ell} pN_0 \{P_E(m)\}^\ell \{1 - P_E(m)\}^{L-\ell} + \sum_{j=\ell}^L \binom{j}{\ell} N_j \{P_E(m)\}^\ell \{1 - P_E(m)\}^{j-\ell} \quad (10)$$

$$= pB_{L,\ell}N_0 + \sum_{j=\ell}^L B_{j,\ell}N_j \quad (\ell = 1, 2, \dots, L) \quad (11)$$

が成り立つ。ただし、

$$B_{j,\ell} = \binom{j}{\ell} \{P_E(m)\}^\ell \{1 - P_E(m)\}^{j-\ell} \quad (12)$$

とする。

さらに、全ユーザー数の和が、全ユーザー数 N に等しいことから

$$\begin{bmatrix} pB_{L,L} & B_{L,L} - 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ pB_{L,L-1} & B_{L,L-1} & B_{L-1,L-1} - 1 & \cdots & 0 & 0 \\ pB_{L,L-2} & B_{L,L-2} & B_{L-1,L-2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ pB_{L,2} & B_{L,2} & B_{L-1,2} & \cdots & B_{2,2} - 1 & 0 \\ pB_{L,1} & B_{L,1} & B_{L-1,1} & \cdots & B_{2,1} & B_{1,1} - 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_0 \\ N_L \\ N_{L-1} \\ \vdots \\ N_3 \\ N_2 \\ N_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ N \end{bmatrix} \quad (13)$$

なる関係式を得ることができる。未知数 N_ℓ は以下のように漸化的に求められる[7]。すなわち、THモードのユーザー数 N_0 を既知の値 N_0^* と仮定すると、 N_L に関して、

$$N_L = \frac{pB_{L,L}}{1 - B_{L,L}} N_0^* = \frac{p\{P_E(m)\}^L}{1 - \{P_E(m)\}^L} N_0^* = N_L^* \quad (14)$$

と解くことができる。一般に、 $N_0 = N_0^*$, $N_j = N_j^*$ が与えられれば ($1 \leq j \leq L$)、RT モードのユーザー数 N は、

$$N_\ell = \frac{1}{1 - B_{\ell,\ell}} \left(p B_{\ell,\ell} N_0^* + \sum_{i=\ell+1}^L B_{i,\ell} N_i^* \right) = N_\ell^* \quad (\ell = 1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

と表すことができる。ここで、式(15)を $N_0 + N_1 + \dots + N_L = N$ に代入すると、RT モードのユーザー数 N は、

$$N_\ell = \frac{N}{\sum_{i=0}^L N_i^*} N_\ell^* \quad (16)$$

により求めることができる。

以上の議論は、式(13)の係数行列の要素 B_{ij} を求めるために必要なサブパケット誤り率 $P_E(m)$ が既知であるという仮定に基づいている。しかしながら、式(3)~(5)より、サブパケット誤り率 $P_E(m)$ は、同時に送信されるサブパケット数 m の関数である。一方、各モード数 N と、同時に送信されるサブパケット数の平均値 m の間には、式(7)が成り立つ。すなわち、平衡状態において、同時に送信されるサブパケット数は非線形方程式(7)の解として与えられる。ここで、関数 $F(m)$ を

$$F(m) = \frac{1}{L} \left(p L N_0 + \sum_{i=1}^L i N_i \right) - m \quad (17)$$

と定義する。 $m=0$ の場合、すなわち、サブパケットが全く送信されなかった場合は、全ユーザー数がTHモードに属し、かつ、新規パケットが全く発生しなかったと考えることができる。よって、 $m=0$ ならば、 $N_0 = N$, $N_1 = N_2 = \dots = N_L = 0$ となる。これより、

$$F(0) = \frac{1}{L} p L N = p N > 0 \quad (18)$$

である。一方、 $m=N$ の場合、すなわち、フレーム内の全スロットで全ユーザーがサブパケットを送信している場合は、全ユーザーが RT_L モードあるいはTHモードのいずれかに属し、かつ、THモードの全ユーザーが新規パケットを発生したと考えることができる。よって、 $m=N$ ならば $N_0 + N_L = N$, $N_1 = N_2 = \dots = N_{L-1} = 0$ となる。これより、

$$F(m) = \frac{1}{L} (p L N_0 + L N_L) - N \leq N_0 + N_L - N = 0 \quad (19)$$

が成り立つ。式(18)~(19)より方程式 $F(m)=0$ は、 $0 < m \leq N$ を満たす解 m_0 を少なくとも1個以上持つことがわかる。平衡状態での平均送信サブパケット数 m_0 が、新規パケット発生確率 p に対して1点存在している場合、その1点の値を平衡状態での平均送信サブパケット数 m_0 と決定する。しかしながら、新規パケット発生確率 p に対して2点以上存在している場合、最大の m_0 を平均送信サブパケット数とする。

平衡状態での平均送信サブパケット数 m_0 が与えられると、1スロット当たりの平均伝送成功サブパケット数は $m_0 \{1 - P_E(m)\}$ となる。よって、周波数帯域および符号化率により正規化された正規化スループット W は、

$$W = \frac{k}{qn} m_0 \{1 - P_E(m)\} \quad (20)$$

で与えられる。

5 数値結果

パケット長 $nL=128$ に対するスループット W を図5に示す。ただし、周波数ビン数 $q=100$, ユーザー数 $N=50$ とし、符号化率 $k/n=0.75$ でサブパケットを符号化するものとする。サイドインフォメーションは利用不可とする。すなわち、 $[n, k]$ RS 符号は、 $\lfloor (n-k)/2 \rfloor$ 個以上の誤り訂正が可能である。図において近似解析結果を実線で、シミュレーション結果をポイントで示す。初期状態では全ユーザーをTHモードとして10万フレームにわたって計算機シミュレーションを行った。図よりパケット分割数 L を多くするに従って、正規化スループットが増加していることがわかる。また、シミュレーション結果と近似解析結果とは、ほぼ等しい値を示している。

次にサブパケットに対する誤り訂正符号を $[64, 48]$ RS 符号に固定し、パケット分割数を $L=2, 4, 8, 16$ とした時の結果を図6に示す。図より、パケット分割数 L を多くするに従って、シミュレーション結果と近似解析結果が、新規パケット発生確率 $p=0.4$ 付近を中心に異なった値を示している。

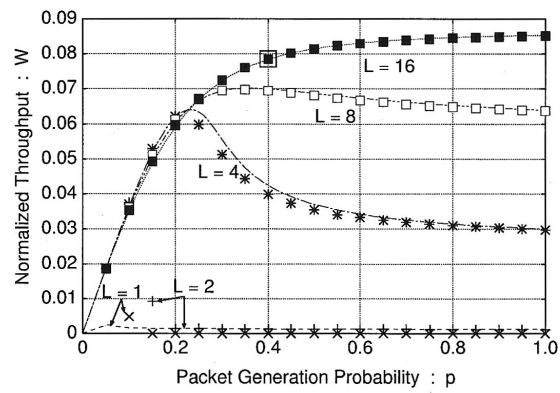


図5 パケット長 $nL=128$ に対する正規化スループット W ($k/n=0.75, q=100, N=50$)

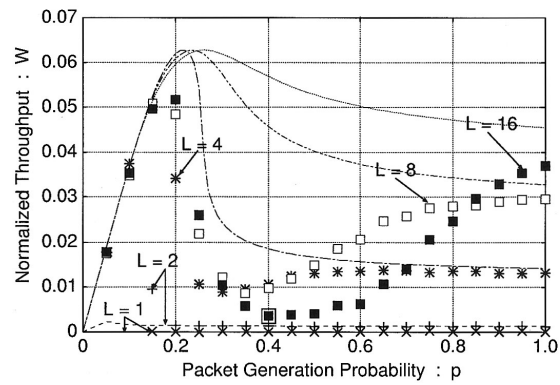


図6 パケット長 $n=64$ に対する正規化スループット W ($k/n=0.75, q=100, N=50$)

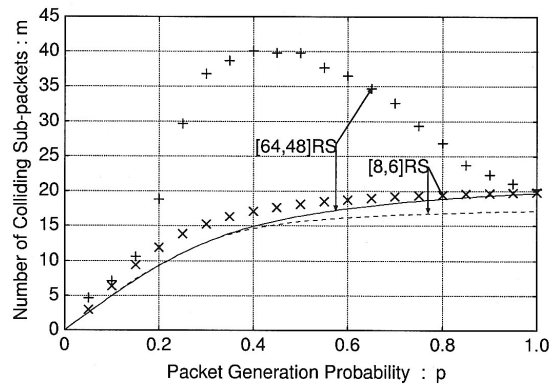


図7 同時に送信されるサブパケット数 m ($L=16, q=100, N=50$)

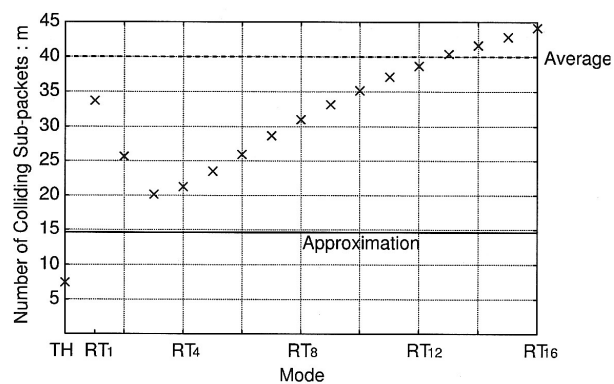


図8 各モードから送信されるサブパケットが衝突する同時送信ユーザ数 m ($q=0.4, q=100, N=50, [8, 6]RS$ 符号, $L=16$)

シミュレーション結果と近似解析により得られた結果が、ほぼ等しい値を示している場合と異なった値を示している場合について詳しく比較を行う。シミュレーション結果と近似解析により得られた結果とがほぼ等しい値を示している例として[8, 6]RS符号、パケット分割数 $L=16$ の場合、異なった値を顕著に示している例として[64, 48]RS符号、パケット分割数 $L=16$ の場合に着目する。2つの場合に対して、新規パケット発生確率 p に対する方程式 $F(m)=0$ の解を図7に示す。また、新規パケット発生確率 $p=0.4$ に対し各モードから送信されるサブパケットが衝突する同時送信ユーザー数を図8に示す。近似解析では、スロット当たりの同時送信ユーザー数は、ユーザーのモード(THまたはRT)に依存せず、方程式 $F(m)=0$ の解として与えられる。[64, 48]RS符号の場合、近似解析による値は、単調増加傾向である。しかしながらシミュレーション結果は、新規パケット発生確率 $p=0.4$ 付近まで単調に増加し、さらに、新規パケット発生確率 p が増加すると、減少している。また、図8より、各モードから送信されるサブパケットが衝突する同時送信ユーザー数は、ユーザーのモードに依存して大きく変化していることがわかる。これは近似解析の結果に反している。

6 まとめ

本研究では、周波数ホッピング方式において、パケットをいくつかのサブパケットに分割して送信し、訂正不可能な誤りを含むサブパケットのみを再送することにより、再送パケットの衝突を部分的に軽減しているパケット分割再送を提案し、計算機によるシミュレーション結果と平衡状態での近似解析を行い、スループット性能評価を行った。その結果、パケット長 nL が小さい場合には、パケット分割数 L を増加させることで、正規化スループットを飛躍的に改善できることを示した。しかしながら、パケット長 nL が大きい場合、パケット分割数 L を増加させても、必ずしも正規化スループットを改善できるわけではないパラメーターが存在することが明らかになった。

システムが平衡状態にあるという仮定の下で近似解析を行った。パケット長 nL が、小さい場合の数値結果は、計算機シミュレーション結果と一致した。しかしながら、パケット長 nL が大きい場合の数値結果は、計算機シミュレーションとは異なるものとなった。シミュレーション結果を詳細に検討したところ、パケット長 nL が大きい場合では、システムは必ずしも平衡状態で動作しているわけではないことが明らかになった。これより、近似解析での仮定が必ずしも適切ではなかったために、計算機シミュレーション結果との差が生じたものと考えられる。

参考文献

- [1] J. E. Wieselthier and A. Ephremides, "Discrimination against partially overlapping interference — Its effects on throughput in frequency-hopped multiple access channels, " *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-34, no.2, pp. 136-142, Feb. 1986.
- [2] S. W. Kim and W. Stark, "Optimum rate Reed-Solomon codes for frequency-hopped spread-spectrum multiple-access communication systems, " *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37, no.2, pp. 138-144, Feb. 1989.
- [3] D. Raychaudhuri, "ALOHA with multipacket messages and ARQ-type retransmission protocols — Throughput analysis, " *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-32, no.2, pp. 148-154, Feb. 1984.
- [4] 今井秀樹, 符号理論, 電子情報通信学会, pp.151-156, 1990.
- [5] S. W. Kim, "Frequency-hopped spread-spectrum random access with retransmission cutoff and code rate adjustment, " *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 10, no.2, pp. 344-349, Feb. 1992.
- [6] 福田 明, "アロハ形システムの平衡点による特性解析," 電子情報通信学会論文誌B分冊, vol. J61-B, no.11, pp.959-966, Nov. 1978.
- [7] C. Namislo, "Analysis of mobile radio slotted ALOHA network, " *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. SAC-2, no.4, pp.583-588, Jul. 1984.

< 発表資料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
パケット分割再送による周波数ホッピング方式の性能評価	平成11年度電気・情報通信関連学会 中国支部第50回連合大会	1999年10月
The effect of limiting the number of retransmission trials on the stability of slotted ALOHA systems	IEEE Transactions on Vehicular Technology	掲載予定