

# 無線アドホック通信における並行性向上手法

中川 雄太<sup>1,a)</sup> 桧垣 博章<sup>1,b)</sup>

**概要:** 一般に低信頼とされている無線通信環境における高信頼通信手法には、誤り検出符号と再送信による BEC (Backward Error Correction) と誤り訂正符号による FEC (Forward Error Correction) とがある。BEC では隣接無線ノード間でデータメッセージと受信確認メッセージの双方向配送を要するのに対し、FEC では送信無線ノードから受信無線ノードへの一方向配送となる。ブロードキャストを基礎とする無線通信環境では、隣接無線ノードの通信を互いに妨げないようにすることでシステムとしてのスループットを向上することが期待される。そこで、本論文では、無線アドホック通信において要求される信頼性を保証しつつ、隣接無線ノード間の送受信の妨げを小さくするために、BEC と FEC とを使い分ける手法を提案する。これによって、各無線ノードの通信の並列性が向上し、システム全体としてのスループットの改善が見込まれる。また、複数の FEC 通信と近接無線ノードが並行実施することを可能とするための RTS/CTS 制御の拡張手法を示す。

**キーワード:** アドホック通信, 高信頼通信, 衝突回避, 並行性, 通信プロトコル

## Higher Concurrent Transmissions in Wireless Ad-Hoc Communication with Combination of BEC and FEC for Reliability

YUTA NAKAGAWA<sup>1,a)</sup> HIROAKI HIGAKI<sup>1,b)</sup>

**Abstract:** In an unreliable wireless networks, there are two reliable communication methods BEC (Backward Error Correction) with an error detection code and retransmissions and FEC (Forward Error Correction) with an error correction code. In BEC, bidirectional transmissions are required, i.e., data message transmissions from a sender node to a receiver node and acknowledgement message transmissions from a receiver node to a sender node. On the other hand in FEC, only one-way transmissions, i.e. data message transmissions from a sender node to a receiver node, are required. In a wireless network where message transmissions are intrinsically based on broadcast communications, reduction of interferences among neighbor nodes results in higher throughput of data messages. Thus, this paper proposes a novel reliable wireless communication method in which BEC or FEC is selected for provision of required reliability and achieving lower interferences among neighbor nodes. By the proposed method, highly concurrent wireless ad-hoc communications are realized with high reliability and high throughput. In addition, we describe our extension of the RTS/CTS collision avoidance method for concurrent FEC transmissions of data messages.

**Keywords:** Wireless Ad-Hoc Communication, Reliable Communication, Collision Avoidance, concurrency, communication Protocol

### 1. はじめに

IEEE 802.11 [1] や Bluetooth [2] などの無線 LAN プロトコルによって、互いに無線信号到達範囲に含まれている隣接無線ノード間でデータメッセージ交換を行なう無線アドホック通信を用いた無線ネットワークの構築が進められ

<sup>1</sup> 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス専攻  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University  
<sup>a)</sup> nakagawa@higlab.net  
<sup>b)</sup> hig@higlab.net

ている。一般に、無線通信は有線通信と比較して環境の影響を受け易く、ビット誤り率の高い低信頼な通信であると言われている。そのため、誤り検出や誤り訂正を可能とする符号化手法を用いるなどして要求する信頼性を実現する。一方、無線アドホック通信においては、晒し端末となる隣接無線ノードや隠れ端末となる2ホップ隣接無線ノードとの衝突による性能低下が問題であり、CSMA/CAとRTS/CTSのふたつの通信制御手法によってその発生を低減している。しかし、これらによって競合する無線ノードは送受信を待機することとなり、無線ノード分布密度と通信要求発生頻度が高い環境ではスループットの低下が問題となる。本論文では、高信頼通信手法であるBEC(Backward Error Correction)とFEC(Forward Error Correction)とを選択的に用いることで、要求する信頼性を保証しつつ、データ配送スループットを改善する手法を提案する。

## 2. 関連研究

高信頼通信の実現には、誤り検出や誤り訂正を行なうための冗長な情報をデータに付加する符号化手法を用いるものがあり、大きくBEC手法とFEC手法に分類される[5](図1)。BEC手法では、誤り検出符号を付加することでデータメッセージの受信ノードが正しくデータを受信したか否かを検証し、その検証結果を送信ノードに応答メッセージとして返送する。送信ノードは、応答メッセージの受信によって受信ノードが正しくデータを受信できていないことを検出した場合には、データメッセージを再送信することで要求される信頼性を提供する。一方、FEC手法では、誤り訂正符号を付加することでデータメッセージの受信ノードがデータに含まれる誤りの一部を訂正し、また、一部の誤りを訂正できないものの検出することができる。ここでは、応答メッセージによるデータメッセージの再送信を用いず、あらかじめ必要回数の複製送信を行なうことで要求される信頼性を提供する。現在広く適用されている無線LANプロトコルでは、BECによる高信頼化が用いられている。

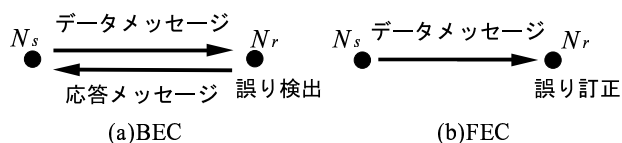


図1 FECとBEC

互いに隣接する送信無線ノード  $N_s$  から受信無線ノード  $N_r$  へのデータメッセージ配送を行なうとき、CSMA/CA制御では互いに晒し端末となる  $N_s$  とその隣接無線ノード  $N_s^n$  との同時送信を抑制する。これによって、図2(a)に示す  $N_r$  におけるデータメッセージ同士の衝突を回避することができる。一方、RTS/CTS制御では、互いに隠れ端末となる  $N_r$  の隣接無線ノード  $N_r^n$  と  $N_s$  との同時送信を抑

制し、図2(b)に示す  $N_r$  におけるデータメッセージ同士の衝突を回避する。ただし、RTS/CTS制御では、 $N_s$  と  $N_r$  のすべての隣接無線ノード  $N_s^n$  と  $N_r^n$  の送受信を待機させるため、無線ネットワーク全体としては、隣接無線ノード間のアドホック通信の並列性が低下し、データ配送スループットの低下が懸念される。

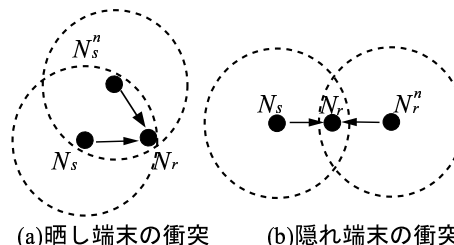


図2 無線信号の衝突

そこで、互いに隠れ端末となる無線ノード間の衝突発生確率を考慮し、RTS/CTS制御を適応的に用いる手法が考案されている。IEEE 802.11では、データサイズが閾値以上の場合にのみRTS/CTS制御を用いることとしている。データメッセージの配送時間が短い場合には  $N_s$  からのデータメッセージと  $N_r^n$  からのメッセージとが  $N_r$  で衝突する可能性が低く、データメッセージの配送時間が長い場合にはその可能性が高いことに注目した手法である。また、論文[3]では、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送を行なう場合の  $N_s$  に対して隠れ端末となる無線ノード数が閾値以上の場合にのみRTS/CTS制御を用いる手法を提案している。 $N_r$  における衝突発生確率は、この無線ノード数と正の相関関係があることに基づく手法である。いずれの手法もRTS/CTS制御を条件付きで適用することで、隣接無線ノードの送受信抑制機会を削減し、無線ネットワーク全体としてのデータ配送スループットの向上に資することができる。ただし、データ配送の信頼性については、無線LANプロトコルで採用されているBECに単純に従うものとなっている。

## 3. 提案手法

本論文では、要求する信頼性を保証し、送受信無線ノードの隣接無線ノードにおける送受信待機を抑制することによって無線アドホック通信の並行性を向上することで、無線ネットワークのスループットを向上する手法を提案する。なお、ここでは無線ノードと無線基地局間の通信のみならず、隣接無線ノード間の通信を含む無線アドホック通信環境を対象ネットワークとして想定する(図3)。無線マルチホップ通信ネットワークも対象として含むが、これを限定するものではない。

隣接無線ノードである送信無線ノード  $N_s$  から受信無線ノード  $N_d$  へのデータメッセージ配送において、RTS/CTS制御を適用した場合、 $N_s$  と  $N_r$  のすべての隣接無線ノード

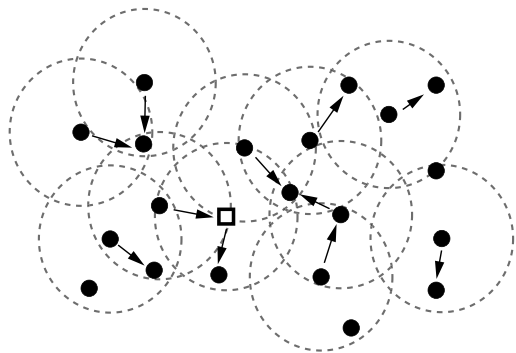


図 3 無線アドホック通信環境

$N_s^n$  および  $N_r^n$  の送受信を待機させる。これは、無線 LAN プロトコルにおいて BEC 手法を適用することで、 $N_s$  から送信されたデータメッセージと  $N_r^n$  から送信されたメッセージとの  $N_r$  における衝突、 $N_s$  から送信されたデータメッセージと  $N_s^n$  が受信するメッセージとの  $N_s^n$  における衝突、 $N_r$  から送信された応答メッセージと  $N_s^n$  から送信されたメッセージとの  $N_s$  における衝突、 $N_r$  から送信された応答メッセージと  $N_r^n$  が受信するメッセージとの  $N_r^n$  の衝突のすべてを回避するためである (図 4)。ここで、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送に FEC 手法を適用するならば、FEC においては  $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送のみが行なわれ、逆方向に配送させる応答メッセージが用いられないことから、応答メッセージによる衝突発生を回避することは不要となる。すなわち、図 5 に示すように、 $N_s^n$  はメッセージの受信を待機しなければならないが送信は可能であり、 $N_r^n$  はメッセージの送信を待機しなければならないが受信は可能となる。このように、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送との間で衝突が発生することのない通信を同時に行なうことによって、無線アドホック通信の並行性向上とそれとともなうネットワーク全体としてスループットの向上が期待できる。ただし、それぞれの手法の適用においては、メッセージ配送時間と隣接無線ノード分布を考慮する必要がある。

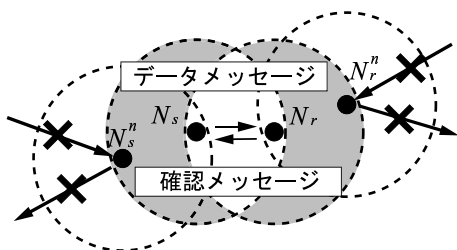


図 4 BEC による送受信待機

### 3.1 高信頼通信手法

前章で述べた BEC と FEC の 2 つの高信頼通信手法を信頼性とそれを実現するために要する通信オーバーヘッド

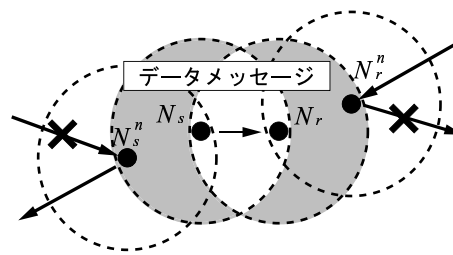


図 5 FEC による送受信待機

の観点から評価する。

BEC 手法では、データ長  $d$  に対する  $t$  ビット誤り検出符号長が  $d_B$ 、データメッセージのプロトコルオーバーヘッドを  $po$ 、RTS/CTS 制御メッセージのプロトコルオーバーヘッドを  $rco$ 、応答メッセージのプロトコルオーバーヘッドを  $ao$  とすると、1 回のデータメッセージ配送に要する時間オーバーヘッドは、 $T_B = rco + po + \alpha(d_B) + ao$  ( $\alpha$  は定数) となる。

ここで、ビット誤り率を  $be$  とするとき、誤りなくデータメッセージ配送が終了する確率は  $ps_B = (1 - be)^{d_B}$  である。また、誤りが検出できるのは、そのビット数が 1 以上  $t$  以下である場合であることから、その確率は  $pf_B = \sum_{k=1}^t C_k be^k (1 - be)^{d_B - k}$  である。さらに、誤りビット数が  $t$  を越える場合にはこれを検出することができない。この確率は  $pf_B = \sum_{k=t+1}^{d_B} C_k be^k (1 - be)^{d_B - k}$  となる。すなわち、1 回のデータメッセージ配送に対して、確率  $ps_B$  で配送に成功して終了し、確率  $pf_B$  で配送失敗を検出して再送信が必要となり、確率  $pf_B$  で配送が失敗しているにも関わらず誤りを検出できずに配送を終了する。以上により、最大  $n$  回のデータメッセージ配送 (すなわち最大  $n-1$  のデータメッセージ再送信) によってデータメッセージが正しく配送される確率は以下で与えられる。

$$\sum_{i=0}^{n-1} ps_B pf_B^i = ps_B (1 - pf_B^n) / (1 - pf_B) \quad (1)$$

したがって、要求する信頼性、すなわち要求するデータメッセージ配送成功率を  $rr$  とすると、これを実現する最大データメッセージ配送回数は次式で与えられる。

$$n_B = \lceil \log(1 - rr(1 - pf_B) / ps_B) / \log pf_B \rceil \quad (2)$$

BEC 手法では、誤りのないデータを受信した時点でデータメッセージの送信を停止することから、データメッセージ送信回数の期待値は以下のように与えられる。

$$N_B = ps_B ((1 - pf_B^{n_B}) / (1 - pf_B) - n pf_B^{n_B}) / (1 - pf_B) \quad (3)$$

したがって、隣接無線ノードの送受信を待機させる時間  $WT_B$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} WT_B &= N_B T_B \\ &= ps_B ((1 - pf_B^{n_B}) / (1 - pf_B) - n pf_B^{n_B}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$(rco + po + \alpha(d_B) + ao)/(1 - pf_B)$$

一方, FEC 手法では, データ長  $d$  に対する  $s$  ビット誤り訂正  $t$  ビット誤り検出符号長を  $d_F$  とすると,  $k$  回データメッセージを繰り返し配送するのに要する時間オーバーヘッドは,  $T_F = rco + k(po + \alpha d_F)$  ( $\alpha$  は定数) となる. これは, FEC では応答メッセージを用いた再送信要求機能が提供されないことから, データメッセージ送信回数が要求される信頼性によってあらかじめ固定されるため, 送信無線ノードの隣接無線ノードにおける受信待機と受信無線ノードの隣接無線ノードにおける送信待機とを求める制御メッセージ交換は 1 度だけ行なえばよいためである.

ここで, ビット誤り率を  $be$  とするとき, 誤りのあるビット数が  $s$  以下であるならばその誤りを訂正してデータメッセージ配送に成功する. その確率は  $ps_F = \sum_{k=0}^s C_k be^k (1-be)^{d_F-k}$  である. また 誤りのあるビット数が  $s$  を越えて  $t$  以下であるならば, 誤りを検出することが可能である. この確率は  $pf_F = \sum_{k=s+1}^t C_k be^k (1-be)^{d_F-k}$  である. さらに, 誤りビット数が  $t$  を越える場合にはこれを検出することができない. この確率は  $pff_F = \sum_{k=t+1}^{d_F} C_k be^k (1-be)^{d_F-k}$  となる. すなわち, 1 回のデータメッセージ配送に対して, 確率  $ps_F$  で正しく配送され, 確率  $pf_F$  で誤りを検出するが, 確率  $pff_F$  で誤りを含む配送がなされているにも関わらず, これを検出することができない. 要求する信頼性, すなわち要求するデータメッセージ配送成功率を  $rr$  とするとき,  $rr < ps_F$  であるならば 1 回の配送で要求を満足することになるが,  $rr < ps_F$  である場合には, データメッセージを繰り返し送信する必要がある. ただし, 誤りを検出せずに受信した複数のデータメッセージには, 誤りを含まないあるいは正しく訂正されたものと, 誤りを含んでいるにも関わらずこれを検出できないものがあり, 受信無線ノードでは区別することはできない. そのため, 受信無線ノードでは, これらのなかからランダムに選択したデータメッセージを受信するものとする. 繰り返し送信回数を  $n$  とするときの配送成功確率は, 以下の式で与えられる.

$$\sum_{i=0}^n n C_i pf_F^i (1 - pf_F)^{n-i} \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^{n-i} n-i C_j \left(\frac{ps_F}{1 - pf_F}\right)^j \left(\frac{pff_F}{1 - pf_F}\right)^{n-i-j} \frac{j}{n-i}$$

$$= \sum_{i=0}^n n C_i pf_F^i \sum_{j=0}^{n-i} n-i C_j ps_F^j pff_F^{n-i-j} \frac{j}{n-i}$$

これが  $rr$  よりも大きくなる最小の  $n$  を  $N_F$  とすると, 送信無線ノードの隣接無線ノードにおける受信および受信無線ノードの隣接無線ノードにおける送信を待機させる時間は  $WT_F = rco + N_F(po + \alpha d_F)$  となる.

### 3.2 BEC/FEC 選択手法

前節では, BEC と FEC のそれぞれについて要求される信頼性を提供する無線アドホック通信を実現するための時間を評価した. それぞれの高信頼化手法では, 応答メッセージの有無が異なるために衝突が発生し得るメッセージの送受信無線ノードと送受信方法が異なる. この影響評価においては, 隣接無線ノードの送受信頻度を考慮する必要がある.

無線アドホック通信を行なう互いに隣接する送信無線ノード  $N_s$  と  $N_r$  において,  $N_s$  に隣接するが  $N_r$  には隣接しない, すなわち,  $N_r$  の隠れ端末となる  $N_s$  の隣接無線ノードの集合を  $G(N_s^n)$ ,  $N_r$  に隣接するが  $N_s$  には隣接しない, すなわち,  $N_s$  の隠れ端末となる  $N_r$  の隣接無線ノードの集合を  $G(N_r^n)$  とする. BEC を適用した場合, データメッセージが  $N_s$  から  $N_r$  へ配送され, 応答メッセージが  $N_r$  から  $N_s$  へと配送されることから,  $G(N_s^n)$  と  $G(N_r^n)$  に含まれるすべての無線ノードで送受信がともに待機となる\*1 (図 6). 無線ノード  $N$  の送信頻度を  $sf(N)$ , 受信頻度を  $rf(N)$  とすると, BEC による送受信待機オーバーヘッドは以下の式で評価することができる.

$$WO_B = \sum_{N \in G(N_s^n) \cup G(N_r^n)} (sf(N) + rf(N)) WT_B \quad (6)$$

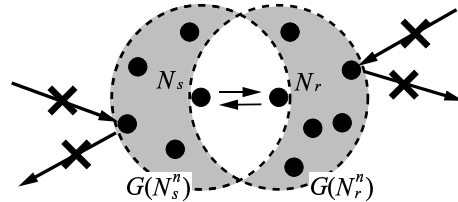


図 6 BEC による送受信待機オーバーヘッド

一方, FEC を適用した場合, データメッセージが  $N_s$  から  $N_r$  へ配送されるのみで, 応答メッセージが用いられないことから,  $G(N_s^n)$  では受信,  $G(N_r^n)$  では送信が待機させられる (図 7). したがって, FEC による送受信待機オーバーヘッドは以下の式で評価することができる.

$$WO_F = \left( \sum_{N \in G(N_s^n)} rf(N) + \sum_{N \in G(N_r^n)} sf(N) \right) WT_F \quad (7)$$

$$(8)$$

無線ネットワーク全体として無線アドホック通信のス

\*1  $N_s$  と  $N_r$  の両方に隣接する無線ノードは, BEC と FEC のいずれにおいても送受信を待機しなければならない.

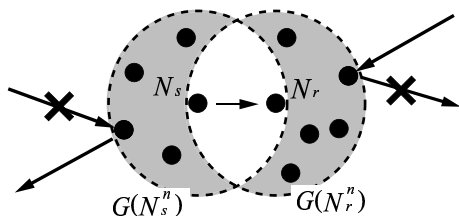


図 7 FEC による送受信待機オーバーヘッド

ループットを向上するためには、その並行性を高める、すなわち、より近隣無線ノードの通信を妨げない高信頼通信手法を個々の隣接無線ノード対が選択することが求められる。そのため、以下の選択基準を適用する。

[BEC/FEC 選択手法]

- $WO_B < WO_F$  であるならば、BEC を用いる。
- $WO_B > WO_F$  であるならば、FEC を用いる。□

#### 4. 並行通信プロトコル

前章で述べた FEC/BEC 選択手法により、要求する信頼性を保ちつつ、隣接無線ノードの通信をより妨げない、すなわち、より高い並行性によって無線ネットワーク全体のスループットを向上させることが期待される。ここで、BEC を用いる場合には、送信無線ノード  $N_s$  と受信無線ノード  $N_r$  のすべての隣接無線ノードの送受信を一時停止させることが必要となる。一方、FEC を用いる場合には、図 8 に示すように、 $N_s$  の隣接無線ノード  $N_s^n(N_s)$  から  $N_r^n(N_s)$

( $N_r^n(N_s)$  は  $N_s$  の無線信号到達範囲外にある) への FEC を用いた通信、 $N_r$  の隣接無線ノード  $N_r^n(N_r)$  への  $N_s^n(N_r)$ ( $N_s^n(N_r)$  は  $N_r$  の無線信号到達範囲外にある) からの FEC を用いた通信を並行に行なうことが可能である。本章では、これを実現するプロトコルを構成する。

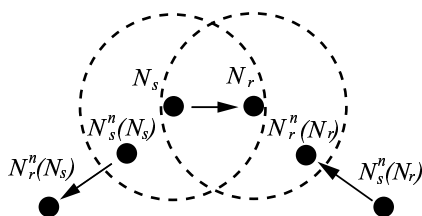


図 8 FEC 通信の並行実施

##### 4.1 BEC 通信

$N_s$  から  $N_r$  への BEC 通信を行なう場合には、 $N_s$  と  $N_r$  のすべての隣接無線ノードの送受信を  $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送、 $N_r$  から  $N_s$  への ACK メッセージ配送が終了するまでの期間中、抑制しなければならない。 $N_s$  と  $N_r$  がデータメッセージ、ACK メッセージをそれぞれ送信することから、これらの隣接無線ノードが受信しよ

うとするメッセージはこれらのメッセージと衝突する可能性がある。したがって、これらの隣接無線ノードがメッセージを受信するプロトコルを構成することはできない。一方、 $N_s$  と  $N_r$  が ACK メッセージ、データメッセージをそれぞれ受信することから、これらの隣接無線ノードが送信するメッセージはこれらのメッセージと衝突する可能性がある。したがって、これらの隣接無線ノードによるメッセージ送信を抑制するプロトコルを構成することが必要である。これは、いわゆる RTS/CTS の導入によって実現することができる [1]。図 9 に示すように、データメッセージの送信に先立ち、 $N_s$  は  $N_r$  が宛先であることを示す RTS メッセージをブロードキャスト送信する。この RTS メッセージを受信した  $N_s$  の隣接無線ノードは、ACK メッセージの受信が終了するまでの時間、メッセージの送受信を抑制する NAV を設定する。また、RTS メッセージを受信した  $N_r$  は、 $N_s$  が宛先であることを示す CTS メッセージをブロードキャスト送信する。この CTS メッセージを受信した  $N_r$  の隣接無線ノードも、ACK メッセージの受信が終了するまでの時間、メッセージの送受信を抑制する NAV を設定する。 $N_r$  からの RTS メッセージを受信した  $N_s$  は、データメッセージを  $N_r$  へと送信し、これを受信した  $N_r$  は  $N_s$  へ ACK メッセージを返送する。RTS メッセージを受信することなくタイムアウトした  $N_s$  は、データメッセージを送信せず、必要に応じて RTS メッセージの送信からやり直す。なお、各メッセージの送信前には、直前にやりとりされるメッセージの受信から SIFS 時間だけの待ち時間を挿入する。

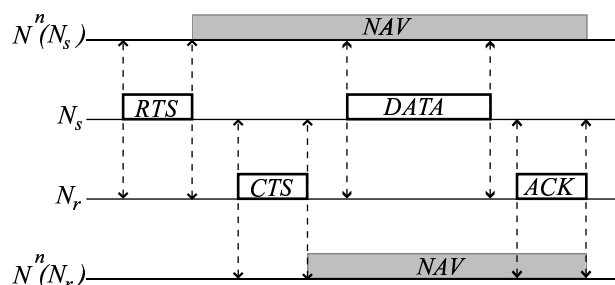


図 9 RTS/CTS による BEC での衝突回避

##### 4.2 FEC 通信

$N_s$  から  $N_r$  への FEC 通信を行なう場合には、 $N_s$  のすべての隣接無線ノードの受信と  $N_r$  のすべての隣接無線ノードの送信とを  $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送が終了するまでの期間中、抑制しなければならない。

BEC 通信とは異なり、 $N_s$  が  $N_r$  へのデータメッセージ

を送信するのみであることから、 $N_s$  の隣接無線ノードが受信しようとするメッセージは、データメッセージとこれらの隣接無線ノードで衝突する可能性がある。したがって、 $N_s$  の隣接無線ノードがメッセージを受信するプロトコルを構成することはできない。一方、 $N_r$  が  $N_s$  からのデータメッセージを受信するのみであることから、 $N_r$  の隣接無線ノードが送信するメッセージは、データメッセージと  $N_r$  で衝突する可能性がある。したがって、 $N_r$  の隣接無線ノードによるメッセージ送信を抑制するプロトコルを構成することが必要である。ただし、 $N_r$  の隣接無線ノードによるメッセージ受信、 $N_s$  の隣接無線ノードによるメッセージ送信は、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送と衝突することはない、並行に行なうことができるため、これらを抑制することは不要である。ただし、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送を開始する以前に、 $N_s$  の隣接無線ノードへメッセージの送信を抑制することを要求するメッセージと、 $N_r$  の隣接無線ノードへメッセージの受信を要するプロトコルの実施を抑制することを要求するメッセージとをブロードキャスト送信することは必要である。

まず、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送と  $N_s^n(N_r)$  から  $N_r^n(N_r)$  へのデータメッセージ配送とを並行実施する手法を検討する。ここでは、BEC 通信における RTS メッセージと CTS メッセージに相当する制御メッセージとして PRTS (Parallel RTS) メッセージと PCTS (Parallel CTS) メッセージを導入する。 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送開始後には、 $N_r$  における衝突を回避する必要があることから  $N_r^n(N_r)$  が  $N_s^n(N_r)$  へ PCTS メッセージを送信することはできない。また、 $N_r^n(N_r)$  が  $N_s^n(N_r)$  へ PCTS メッセージを返送できるのは、 $N_r$  が  $N_s$  への PCTS メッセージ返送を終えた時刻以降である。これは、 $N_r$  が  $N_s$  へ返送するメッセージが CTS メッセージである場合には、 $N_s$  から  $N_r$  への BEC 通信が実施されることから、 $N_s^n(N_r)$  から  $N_r^n(N_r)$  への FEC 通信を並行に行なうことができないためであり、その可否を  $N_r^n(N_r)$  が判断するためには、 $N_r$  からブロードキャスト送信される CTS メッセージもしくは PCTS メッセージを受信することが必要であるからである。なお、PRTS 受信後 PCTS 送信までの期間中に隣接無線ノードがブロードキャスト送信する CTS メッセージおよび PCTS メッセージを受信しない場合には、並行実施される FEC 通信が存在しないこととなり、PCTS メッセージを返送することが可能である。なお、 $N_s$  からの PRTS メッセージ送信と  $N_s^n(N_r)$  からの PRTS メッセージは、互いに独立に実施され、互いにこれらのメッセージ送信を検出することはできない。RCTS メッセージのブロードキャスト送信によって、 $N_r^n(N_r)$  が並行実施可能な FEC 通信の存在を検出することとなる。このとき、 $N_r^n(N_r)$  への FEC 通信の存在を  $N_r$  および  $N_s$  は検出できないことから、 $N_r^n(N_r)$  からの PCTS メッセージと

$N_s$  からのデータメッセージとの  $N_r$  における衝突を回避するために、 $N_s$  はデータメッセージ送信の開始を、その存在の有無に関わらず、 $N_r^n(N_r)$  からの PCTS メッセージの送信に要する時間だけ遅延させる必要がある (図 10)。

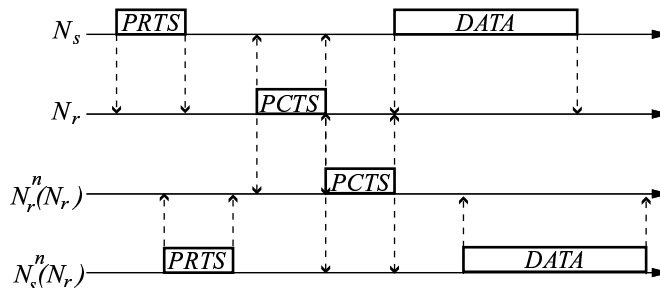


図 10 受信待機ノードの隣接する FEC 通信の並列実施

次に、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送と  $N_s^n(N_s)$  から  $N_r^n(N_s)$  へのデータメッセージ配送とを並行実施する手法を検討する。 $N_s^n(N_r)$  から  $N_r^n(N_r)$  へのデータメッセージ配送との並行実施の場合と同様に、 $N_s$  から  $N_r$  へのデータメッセージ配送開始後には、 $N_s^n(N_s)$  における衝突を回避する必要があることから  $N_r^n(N_s)$  から  $N_s^n(N_s)$  へ PCTS メッセージを送信することはできない。また、 $N_s^n(N_s)$  が  $N_r^n(N_s)$  へ PRTS メッセージを送信できるのは、 $N_s$  から  $N_r$  への PRTS メッセージ送信の終了時刻以降、 $N_r$  から  $N_s$  への PCTS メッセージ受信の開始時刻以前である。これは、 $N_s$  が  $N_r$  へ送信するメッセージが RTS メッセージである場合には、 $N_s$  から  $N_r$  への BEC 通信が実施されることから、 $N_s^n(N_s)$  から  $N_r^n(N_s)$  への FEC 通信を並行に実施することができないためであり、その可否を  $N_s^n(N_s)$  が判断するためには、 $N_s$  からブロードキャスト送信される RTS メッセージもしくは PRTS メッセージを受信することが必要であるからである。また、 $N_s^n(N_s)$  の送信する PRTS メッセージと  $N_r$  の送信する PCTS メッセージとが  $N_s$  で衝突することを回避するためには、PRTS メッセージの送信を PCTS の受信開始までに終了することが必要である。なお、PRTS 受信後 PCTS 送信までの期間中に隣接無線ノードがブロードキャスト送信する CTS メッセージおよび PCTS メッセージを受信しない場合には、並行実施される FEC 通信が存在しないこととなり、PCTS メッセージを返送することが可能である。また、 $N_s$  と  $N_s^n(N_s)$  とは互いに晒し端末の関係にあることから、双方が送信する PRTS メッセージは、互いに受信可能であり、並行に送信することは不可能である。したがって、隣接無線ノードが送信する PRTS メッセージを PRTS メッセージ送信開始時に検出した場合には、その送信を待機す

ることが必要であり、それは実現可能である (図 11).

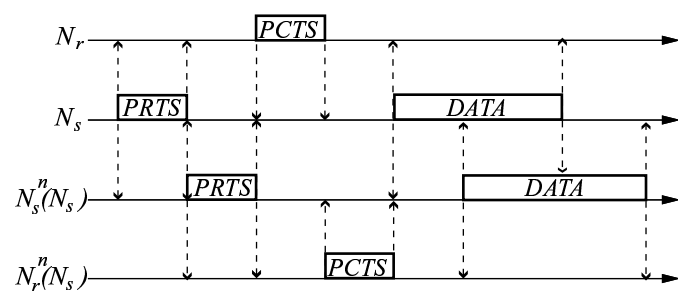


図 11 送信待機ノードの隣接する FEC 通信の並列実施

以上の考察から、FEC 通信の並行実施を実現するためには、 $N_r$  における  $PRTS$  メッセージの受信終了から  $PCTS$  メッセージの送信開始までの期間中に  $PRTS$  メッセージの配送が可能であること、 $N_s$  における  $PCTS$  メッセージの受信終了からデータメッセージの送信開始までの期間中に  $PCTS$  メッセージの配送が可能であることが必要である。そこで、 $PRTS$  メッセージ、 $PCTS$  メッセージ、データメッセージは、それぞれ  $PRTS$  メッセージ、および  $PCTS$  メッセージが配送可能な時間間隔を置いて送信されるものとする。なお、図 10 に示すように、 $N_r^n(N_r)$  においては、 $N_r$  がブロードキャスト送信する  $PCTS$  メッセージの受信終了まで  $PCTS$  メッセージの送信を待機することがある。一方、図 11 の  $N_r^n(N_s)$  から  $N_s^n(N_s)$  へと返信される  $PCTS$  メッセージは、 $N_s^n(N_s)$  におけるデータメッセージとの衝突を回避するためには、 $N_r$  から  $N_s$  への  $PCTS$  メッセージ配送時間の待機後、ただちに送信されることが必要である。そこで、 $N_s$  がブロードキャスト送信する  $PCTS$  メッセージを受信済みの  $N_s^n(N_s)$  と  $N_r^n(N_s)$  との間で交換される制御メッセージを  $NWPRTS$  (No-Wait  $PRTS$ ) メッセージ、 $NWPCTS$  (No-Wait  $PCTS$ ) メッセージとして区別する。

並行実施を可能とする  $N_s$  から  $N_r$  への FEC 通信プロトコルを以下に示す。なお、 $PRTS$  メッセージ受信終了と  $PCTS$  メッセージ送信開始との最小間隔、 $PCTS$  メッセージ受信終了とデータメッセージ送信開始の間隔、 $NWPRTS$  メッセージ受信終了と  $NWPCTS$  メッセージ送信開始との間隔、 $NWPCTS$  メッセージ受信終了とデータメッセージ送信開始の間隔は、すべて  $RTS$  メッセージ、 $CTS$  メッセージ、 $PRTS$  メッセージ、 $PCTS$  メッセージ、 $NWPRTS$  メッセージ、 $NWPCTS$  メッセージの配送時間と同一とし、 $PLIFS$  (Parallel IFS) と呼ぶ。  $SIFS$  (802.11g では  $10 \mu s$ )  $< PLIFS$  (同  $29 \mu s$ )  $< DIFS$  (同  $34 \mu s$ ) である [4].

[無線ノード  $N$ ]

- ・ 隣接無線ノードがブロードキャスト送信する  $RTS$  メッセージを受信したならば、自身の送信 NAV と受信 NAV を設定する。
- ・ 隣接無線ノードがブロードキャスト送信する  $PRTS$  メッセージもしくは  $NWPRTS$  メッセージを受信したならば、受信 NAV を設定する。
- ・ 隣接無線ノードがブロードキャスト送信する  $PCTS$  メッセージもしくは  $NWPCTS$  メッセージを受信したならば、送信 NAV を設定する。

[送信無線ノード  $N_s$ ]

- 1) バックオフタイマが切れた  $N_s$  は、以下を行なう。
  - 1-1) 自身に送信 NAV が設定されているならば、バックオフタイマの再設定を行なって本手続きを終了し、再度タイマ切れを待つ。
  - 1-2) 自身に受信 NAV が設定されていないならば、 $PRTS(N_r)$  メッセージをブロードキャスト送信する。
  - 1-3) 自身に受信 NAV が設定されているならば、 $NWPRTS(N_r)$  メッセージをブロードキャスト送信する。
- 2)  $PRTS$  メッセージ送信後、 $2 \times PLIFS$  経過しても  $N_r$  からの  $PCTS$  メッセージの受信を開始することができない、もしくは、 $NWPRTS$  メッセージ送信後  $PLIFS$  経過時に  $N_r$  からの  $NWPCTS$  メッセージの受信を開始することができない場合には、バックオフタイマの再設定を行なって本手続きを終了し、再度タイマ切れを待つ。
- 3)  $PCTS(N_s)$  メッセージもしくは  $NWPCTS(N_s)$  メッセージを  $N_r$  から受信した  $N_s$  は、 $PLIFS$  経過後に  $N_c$  へデータメッセージを送信する。

[受信無線ノード  $N_r$ ]

- ・  $N_s$  がブロードキャスト送信した  $PRTS(N_r)$  メッセージを受信した  $N_r$  は、以下を行なう。
  - 1) バックオフタイマが切れた  $N_s$  は、以下を行なう。
  - 2)  $PLIFS$  待機した後、 $PCTS(N_s)$  メッセージをブロードキャスト送信する。なお、隣接無線ノードとの競合を回避する場合は、 $2 \times PLIFS$  まで送信を待機することができる。これまでに、 $PCTS$  メッセージを送信することができない場合には、受信した  $PRTS$  メッセージを破棄して終了する。
- ・  $N_s$  がブロードキャスト送信した  $NWPRTS(N_r)$  メッセージを受信した  $N_r$  は、以下を行なう。
  - 1) 自身に受信 NAV が設定されているならば、受信した  $NWPRTS$  メッセージを破棄して終了する。
  - 2)  $PLIFS$  待機した後、 $NWPCTS(N_s)$  メッセージをブロードキャスト送信する。なお、隣接無線ノードとの競合を回避のために直ちに  $NWPCTS$  メッ

セージを送信することができない場合には、受信した *NWPRTS* メッセージを破棄して終了する。

## 5. まとめ

本論文では、無線アドホック通信において要求する信頼性を保証し、無線ネットワークのスループットを向上させる手法として、BEC 手法と FEC 手法を動的に選択することによる無線アドホック通信の並列性向上手法を提案した。ここでは、通信時間と隣接無線ノード分布から送受信待機による効果を評価することで、手法の選択を行なう。特に、FEC 手法では応答メッセージの返送を行なわないことから、衝突回避のための隣接無線ノードの送受信待機を抑制することができ、プロトコルオーバーヘッドが比較的小さな条件では BEC 手法に対する優位性を持つ。今後は、具体的な符号化手法を対象とした検討を行なう。

## 参考文献

- [1] “Local and Metropolitan Area Network Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” Standard IEEE 802.11 (1997).
- [2] “Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs(tm)),” Standard IEEE 802.15.1 (2002).
- [3] Akimoto, M., Shigeyasu, T. and Morinaga, N., “A New Method for Mitigating Transmission Overhead by Adaptive RTS/CTS on the Basis of Existence of Hidden Terminal” Proceedings of the 18th IPSJ DPS Workshop, pp. 137–142 (2010)
- [4] 後藤, 渡邊, “アドホックネットワークのスループットを向上するストロングビジートーンの提案,” 情処研報, Vol .2011, No. 29, pp. 77–82 (2011).
- [5] 宮川, 岩垂, 今井, “符号理論,” 電子情報通信学会 (2001).