

無線アドホック通信の並行性を向上する 片方向FEC通信手法

中川 雄太^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要：互いに隠れ端末の位置にある無線ノードの並行送信の回避が必要となる無線アドホックネットワークでは、信頼性の向上と配送遅延の縮小の両立が求められる。我々は BEC (Backward Error Correction) 通信と FEC (Forward Error Correction) 通信とをビット誤り率と隣接無線ノード数およびそのデータメッセージ送信頻度に応じて使い分ける手法を提案した。FEC 通信では、隣接無線ノードが限定的に FEC 通信を並行実施することが可能であるが、従来の RTS/CTS プロトコルでは実現することができない。本論文では、並行 FEC 通信を実現するための拡張 RTS/CTS プロトコルを提案する。ここでは、従来の RTS メッセージ、CTS メッセージに対応する PRTS メッセージ、PCTS メッセージ、およびデータメッセージの配送間に待機時間を設けることで並行 FEC 通信を実現している。このプロトコルは、従来の RTS/CTS プロトコルと混在して適用することが可能であることから、BEC 通信と FEC 通信の混在する無線アドホックネットワークの実現に供することができる。

キーワード：無線アドホックネットワーク、高信頼通信、衝突回避、RTS/CTS 制御、並行性

Uni-Directional FEC Transmission for Highly Concurrent Wireless Ad-Hoc Transmissions

YUTA NAKAGAWA^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract:

In wireless ad-hoc networks where concurrent transmissions of data messages by hidden wireless nodes should be avoided, better tradeoff between reliability and transmission delay is required. The authors have proposed the method to adaptively apply either BEC (Backward Error Correction) or FEC (Forward Error Correction) based on bit error ratio and transmission request frequency. In FEC communication, it is possible for neighbor wireless nodes to transmit data messages concurrently under some restriction; however, the original RTS/CTS protocol does not support such concurrent transmissions. This paper proposes an extended RTS/CTS protocol which support concurrent FEC transmissions by introduction of intervals between PRTS and PCTS and between PCTS and a data message. Since both the extended and the original protocols can be applied in a wireless ad-hoc network, it contributes to the mixture of BEC and FEC communications.

Keywords: Wireless Ad-Hoc Networks, Reliable Transmissions, Collision Avoidance, RTS/CTS Control, Concurrent Transmissions.

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必ずしも基地局を介することなく直接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、隠れ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

¹ 東京電機大学大学院ロボット・メカトロニクス専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

a) nakagawa@higlab.net

b) hig@higlab.net

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。論文 [3] 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している。FEC 通信では、隣接無線ノードが限定的に FEC 通信を並行実施することが可能であるが、従来の RTS/CTS プロトコルでは実現することができない。そこで、本論文では、並行 FEC 通信を実現するための拡張 RTS/CTS プロトコルを提案する。

2. 関連研究

2.1 RTS/CTS 制御

無線アドホック通信において、隠れ端末の位置に存在する無線ノードによって送信されるデータメッセージ間の衝突を回避するためには、RTS/CTS 制御が用いられている。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においては、データメッセージ配送に先立って、 N_s と N_r がそれぞれ RTS メッセージと CTS メッセージを自身の無線信号到達範囲内に位置するすべての無線ノードへブロードキャスト送信し、これを受信した無線ノードがデータメッセージ配送が終了するまでの時間、メッセージの送信を抑制することによってデータメッセージ配送を無衝突で実現する。このようにして、 N_r の無線信号到達範囲には含まれるが N_s の無線信号到達範囲には含まれない N_s の隠れ端末 N_r^n によるデータメッセージ送信は抑制され、 N_r における衝突発生を回避している。

RTS/CTS 制御を実現するプロトコルは図 1 に示す通りである。送信無線ノード N_s がブロードキャスト送信する RTS メッセージを受信した N_s の隣接無線ノード N_s^n は、NAV を設定してメッセージの送信をデータメッセージ配送終了まで一時停止する。一方、受信無線ノード N_r がブロードキャスト送信する CTS メッセージを受信した N_r の隣接無線ノード N_r^n は、NAV を設定してメッセージの送信をデータメッセージ配送終了まで一時停止する。 N_r^n がメッセージ送信を一時停止することによって、 N_r におけるデータメッセージ受信との衝突を回避することができる。また、 N_s^n がメッセージ送信を一時停止することによって、 N_s における受信確認制御メッセージとの衝突を回避することができる。すなわち、従来の RTS/CTS プロトコルは BEC の適用を前提として設計されていると考えられる。

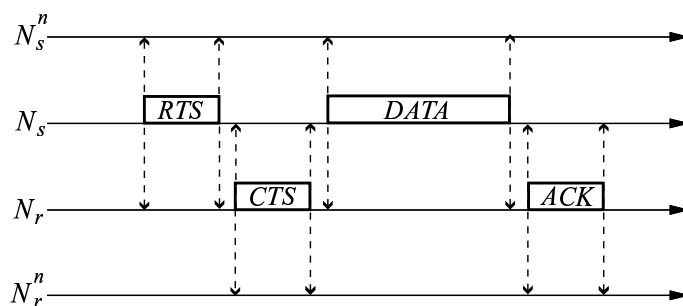


図 1 RTS/CTS プロトコル

RTS/CTS 制御は、データメッセージの衝突回避に有効な

手法であるが、データメッセージの配送に先立って送受信無線ノード間で一往復の制御メッセージ交換を要することが時間オーバーヘッドを拡大させている。そこで、RTS/CTS 制御を適応的に適用する手法が提案されている。IEEE 802.11 では、データサイズが閾値以上の場合にのみ、RTS/CTS 制御を適用することとしている。これは、データメッセージの配送時間が短い場合には、衝突発生確率が低下することに注目した手法である。一方、論文 [5] では、受信無線ノードに対して送信無線ノードと隠れ端末の関係にある受信無線ノードの隣接無線ノード数が閾値以上の場合にのみ、RTS/CTS 制御を適用する手法を提案している。このような無線端末が少ない場合には、データメッセージの衝突が発生しにくいことに注目した手法となっている。

2.2 双方向 BEC 通信と片方向 FEC 通信

BEC 通信とそれを実現する従来の RTS/CTS プロトコルの適用においては、送信無線ノードと受信無線ノードのすべての隣接無線ノードの通信を一時停止する。これによるオーバーヘッドは大きく、論文 [4] は、無線アドホックネットワーク、特に無線マルチホップネットワークにおいて、無線ノードの通信待機時間が配送遅延の延長に多大な影響を与えていることを実験結果として示している。

そこで、論文 [3] では、要求する信頼性、すなわち、要求するデータメッセージ到達率の充足を前提として、送受信無線ノードの隣接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し、配送遅延の短縮とデータメッセージのスループットを向上する手法を考案している。図 5 に示す無線アドホック通信環境において、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_r へのデータメッセージ配送に 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 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 における衝突のすべてを回避するためである (図 2)。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 3 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並行に行なうことによって、無線アドホックネットワーク全体としてのスループット向上が期待できる。

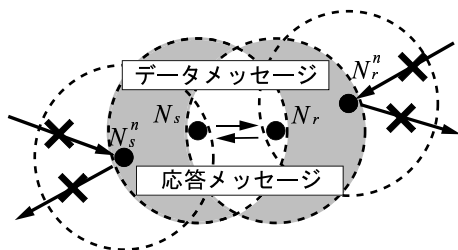


図 2 BEC 通信における送受信待機

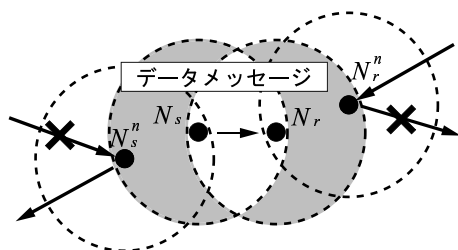


図 3 FEC 通信における送受信待機

3. 提案手法

3.1 並行性向上手法

論文 [3] で提案した FEC/BEC 選択手法を適用することによって、アプリケーションが要求する信頼性を保ちながら、隣接無線ノードによるアドホック通信をより妨げない、すなわち、より並行性の高い無線アドホックネットワークを実現することができる。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によるすべてのメッセージの送受信を一時停止させることによって、データメッセージとの衝突を回避する。これは、RTS/CTS 制御によって実現される。一方、FEC を用いる場合には、(図 4) に示すように、 N_s の隣接無線ノード N_{ss} から N_s の無線信号到達範囲外にある無線ノード N_{sr} への FEC 通信と N_r の無線信号到達範囲外にある無線ノード N_{rs} から N_r の隣接無線ノード N_{rr} への FEC 通信は、 N_s から N_r への FEC 通信と並行に実施することができる。これは、これらの FEC 通信によるデータメッセージが受信無線ノード N_r , N_{sr} , N_{rr} において互いに衝突しないことによるものである。この FEC 通信の並行実施を実現するためには、受信確認制御メッセージの衝突回避をも目的としている BEC 通信のための RTS/CTS プロトコルを拡張することが必要である。

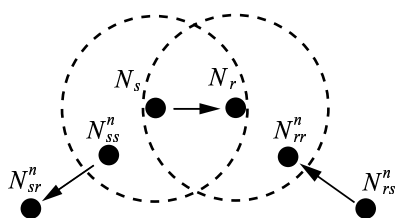


図 4 隣接無線ノードによる FEC 通信の並行実施

このように、 N_s から N_r への FEC 通信においては、 N_s の隣接無線ノードにはデータメッセージの受信を抑制するが送信は可能とし、 N_r の隣接無線ノードにはデータメッセージの送信を抑制するが受信は可能とする RTS/CTS 拡張プロトコルが求められる。すなわち、拡張 RTS/CTS プロトコルでは、 N_r から N_s への受信確認制御メッセージが用いられないことから、 N_s から N_r への FEC 通信によるデータメッセージとの衝突によって受信失敗する N_s の隣接無線ノードへのメッセージ送信と、衝突によってデータメッセージ受信を失敗させる N_r の隣接無線ノードからのメッセージ送信のみを回避すればよい。ただし、FEC 通信の並行実施によって、 N_s から N_r への FEC 通信によるデータメッセージ配送が妨げられることはあってはならない。このため、並行実施される FEC 通信のための RTS/CTS 制御を実現する拡張プロトコルは、 N_s から N_r へのデータメッセージ配送開始以前に終了する必要がある。なお、拡張プロトコル設計においては、以下の点を考慮する。

- RTS/CTS プロトコルにおいて起こり得る制御メッセージの衝突は許容する。
- FEC 通信の並行実施実現に必要な制御メッセージ交換のための遅延の延長は、これを最小限に抑えることを前提として許容する。□

3.2 拡張 RTS/CTS プロトコル

FEC 通信のための RTS/CTS プロトコルでは、制御メッセージを受信した無線ノードが FEC 通信する隣接無線ノード対の隣接無線ノードであることを検出し、並行実施可能な FEC 通信が存在するならばそのための RTS/CTS 制御を行ない、データメッセージ配送と衝突するメッセージの送受信を抑制する。ここでは、BEC 通信のための従来の RTS/CTS 制御で交換される RTS, CTS 制御メッセージと区別するために、*PRTS* (Parallel RTS), *PCTS* (Parallel CTS) 制御メッセージを導入する。データメッセージの送受信無線ノード対 N_s, N_r では、従来の RTS/CTS プロトコルと同様、 N_s から N_r へ *PRTS* メッセージを送信し、これを受信した N_r から N_s へ *PCTS* メッセージを返送する。この間に *PRTS* メッセージ、*PCTS* メッセージを受信した N_s, N_r の隣接無線ノードは、 N_s から N_r への FEC 通信によるデータメッセージ配送と並行実施する FEC 通信およびそれに必要な制御メッセージを除くすべてのメッセージの送受信を抑制するために NAV を設定する。この NAV 設定によって、 N_s から N_r への衝突のないデータメッセージ配送が実現される。以下では、 N_r, N_s の隣接無線ノードに関わる FEC 通信によるデータメッセージ配送の並行実施について順に考察する。

まず、受信無線ノードが互いに隣接無線ノードである場合、すなわち、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r への FEC 通信と N_r の無線信号到達範囲外にある無線ノード N_{rs} から N_r の隣接無線ノード N_{rr} への FEC 通信を並行実施する場合について考える。ここでは、以下のように従来の RTS/CTS プロトコルを拡張することが求められる。

- N_{rr} が N_r の送信する *PCTS* メッセージ受信後に *PCTS* メッセージを送信可能とする。□

図5に示すように、 N_s から N_r への FEC 通信と N_{rs} から N_{rr} への FEC 通信が並行実施可能となるのは、並行配送されるデータメッセージがそれぞれの受信無線ノードで互いに衝突しない場合であることから、 N_{rs} と N_{rr} とがそれぞれ N_r と N_s との無線信号到達範囲外にある場合である^{*1}。この場合、 N_s と N_{rs} から送信される PRTS メッセージは、それぞれ N_{rr} と N_r には互いに受信されないことから、PRTS メッセージ配送を終えた時点では、受信無線ノードが隣接する FEC 通信のための RTS/CTS 制御が開始されていることをこれらの無線ノードが検知することはできない。ここで、 N_r が N_s へ PCTS メッセージを送信すると、これを受信した N_r の隣接無線ノードは NAV を設定してデータメッセージ配送終了までのメッセージ送信を抑制するが、このとき、 N_{rr} がこの PCTS メッセージを受信することによって、受信無線ノードが隣接する FEC 通信が並行実施されることを検知することができる。そこで、PCTS メッセージの送信を開始する以前に N_r が送信する PCTS メッセージの受信を開始した N_{rr} は、この PCTS メッセージの受信を終了して NAV を設定するまで自身による N_{rs} への PCTS メッセージ返送を保留する。そして、 N_r が送信する PCTS メッセージの受信を終えた N_{rr} は、 N_{rs} へ PCTS メッセージを返送するが、 N_r が N_{rr} の隣接無線ノードであることから、この PCTS メッセージと N_s から送信されるデータメッセージとの N_r における衝突を回避しなければならない。そこで、 N_s は N_r からの PCTS メッセージ受信後、 N_r が N_{rr} からの PCTS メッセージを受信するのに十分な時間だけデータメッセージの送信を延期する。なお、受信無線ノードが隣接する FEC 通信が並行実施されることを N_r が検知するのは N_{rr} が送信する PCTS メッセージを受信した時点であり、 N_s はこれを知ることができないことから、並行 FEC 通信の有無に関わらず N_s はデータメッセージ送信を延期する必要がある。

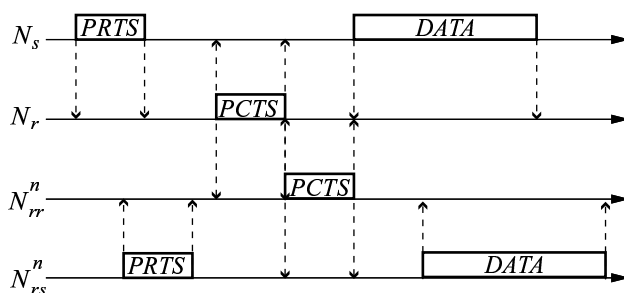


図5 受信無線ノードが隣接する並行 FEC 通信時の RTS/CTS プロトコル

次に、送信無線ノードが互いに隣接無線ノードである場合、すなわち、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r への FEC 通信と N_s の隣接無線ノード N_{ss} から N_s の無

*1 正確には、 N_r が N_{rs} の無線信号到達範囲外にある場合であるが、ここではすべての無線ノードの無線信号到達範囲が同一の無線信号到達距離を半径とする円領域であると仮定することによって等価であるとする。

線信号到達範囲外にある無線ノード N_{sr} への FEC 通信を並行実施する場合について考える。ここでは、以下のように従来の RTS/CTS プロトコルを拡張することが求められる。

- N_{ss} が N_s の送信する PRTS メッセージ受信後に PRTS メッセージを送信可能とする。□

図6に示すように、 N_s から N_r への FEC 通信と N_{ss} から N_{sr} への FEC 通信が並行実施可能となるのは、並行配送されるデータメッセージがそれぞれの受信無線ノードで互いに衝突しない場合であることから、 N_{ss} と N_{sr} とがそれぞれ N_r と N_s の無線信号到達範囲外にある場合である^{*2}。この場合、 N_s が送信する PRTS メッセージを N_{ss} が受信することによって隣接無線ノードが送信する FEC 通信が開始されることを検知することができる。従来の RTS/CTS プロトコルでは、送信無線ノードの隣接無線ノードが RTS メッセージ受信後に NAV を設定してすべてのメッセージ送信をデータメッセージ配送終了まで一時停止することによって、衝突のないデータメッセージ配送を実現している。ここで、 N_{ss} から N_{sr} への FEC 通信を N_s から N_r への FEC 通信と並行実施することを可能とするためには、 N_{ss} から N_{sr} への PRTS メッセージ送信を可能とすることが必要である。このとき、 N_s は N_{ss} の無線信号到達範囲内にあることから、 N_{ss} が送信する PRTS メッセージと N_r が送信する PCTS メッセージが N_s で衝突することを回避しなければならない。そこで、並行 FEC 通信によってデータメッセージを送信する N_{ss} は、 N_s からの PRTS メッセージ受信を受信して NAV を設定したならば、自身のバックオフタイマとは無関係に^{*3} PRTS メッセージを N_{sr} へ送信するが、この送信を行なうために必要な時間だけ N_r は PCTS メッセージの N_s への返送を保留する。ここで、 N_{ss} から N_{sr} への並行 FEC 通信が存在することは N_{ss} から送信される PRTS メッセージを N_s が受信する時点で検知することができるが、 N_r は検知することができない。このため、 N_r における PCTS メッセージの返送保留は、並行 FEC 通信の有無に関わらず行なう必要がある。

N_{ss} から PRTS メッセージを受信した N_{rs} は、並行 FEC 通信による PRTS メッセージ送信に要する時間だけ待機した後 PRTS メッセージを N_{ss} へ返送する。ここで、 N_{ss} は N_s の無線信号到達範囲内にあることから、 N_s が N_r へ送信するデータメッセージを受信する。 N_{sr} が N_{ss} からの PRTS メッセージを受信した後、ただちに PCTS を返送するならば、PCTS はデータメッセージと衝突することなく N_{ss} に受信される。これは、 N_s が PCTS 受信後に並行 FEC 通信のための PCTS メッセージ配送による衝突を回避するためにデータメッセージ配送開始を遅延させることによるものである。ただし、 N_{sr} からの PCTS メッセージ返送が遅延する場合には、 N_{ss} において PCTS メッセージと N_s が送信するデータメッセージが衝突し、PCTS

*2 正確には、 N_r が N_{ss} の無線信号到達範囲外にある場合であるが、ここではすべての無線ノードの無線信号到達範囲が同一の無線信号到達距離を半径とする円領域であると仮定することによって等価であるとする。

*3 N_s の複数の隣接無線ノードが送信する PCTS の衝突による影響は 4 章で考察する。

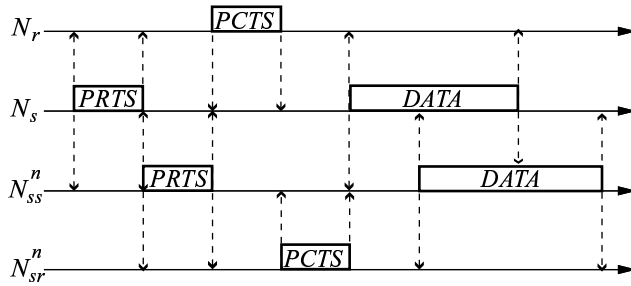


図 6 送信無線ノードが隣接する並行 FEC 通信時の RTS/CTS プロトコル

メッセージの受信に失敗することがある。この場合は、 N_{ss} から N_{sr} へのデータメッセージ配送は行なわれない。すなわち、 N_s から N_r への FEC 通信によるデータメッセージ配送は行なわれるが、 N_{ss} から N_{sr} への並行 FEC 通信によるデータメッセージ配送は行なわれない。

なお、並行 FEC 通信は以下の場合にも行なわれないことがある。まず、 N_s の複数の隣接無線ノードが N_s からの $PRTS$ メッセージ受信後に $PRTS$ メッセージを同時に送信することによって、それらの送信先無線ノードでの衝突が発生し、 $PRTS$ メッセージの受信に失敗することが考えられる (図 7)。また、 N_{sr} が N_s の無線信号到達範囲外にあるか否かは N_{ss} が検知することができないことから、 N_{sr} が N_s の無線信号到達範囲内にある場合には、 N_{ss} から送信された $PRTS$ メッセージを受信した N_{sr} がすでに NAV を設定済みであるために $PCTS$ メッセージを返送しない場合が考えられる (図 8)。ただし、従来の RTS/CTS プロトコルにおいても送信無線ノードからの RTS メッセージに対して受信無線ノードからの CTS メッセージが返送されないことによってデータメッセージ配送が行なわれないことは考えられ、この状態の検出は CTS メッセージ受信待ちにおけるタイマによって実現されている。並行 FEC 通信のための拡張 RTS/CTS プロトコルにおいても N_{ss} が N_{sr} からの $PCTS$ メッセージの受信待ちにおいてタイマを導入し、タイムアウトによって並行 FEC 通信実施の中止を決定する。

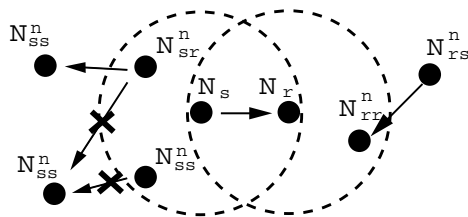


図 7 $PRTS$ メッセージの衝突

以上の考察に基づいて設計された並行 FEC 通信実現のための拡張 RTS/CTS プロトコルを以下に示す。なお、 $PRTS$ メッセージ受信後の $PCTS$ メッセージ送信までの待機時間と $PCTS$ メッセージ受信後のデータメッセージ送信までの待機時間を $PLIFS$ (Parallel IFS) とする。 $PLIFS$ は

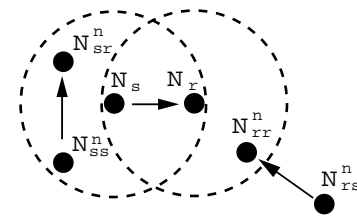


図 8 $PCTS$ メッセージ受信のタイムアウト

$SIFS$ と $PRTS$ メッセージ、 $PCTS$ メッセージの配送時間の和とし、以下のプロトコルの説明では、各制御メッセージとデータメッセージの送信に先行する $SIFS$ は省略して記述することとする。

[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自身を送信先としない RTS メッセージ、 CTS メッセージ、 $PRTS$ メッセージ、 $PCTS$ メッセージのいずれかを受信したならば NAV を設定する。

[FEC 送信ノード N_s]

- アプリケーションから送信要求されたデータメッセージを持つ送信無線ノード N_s は、自身のバックオフタイマが切れた場合、もしくは、隣接無線ノードから自身を送信先としない $PRTS$ メッセージを受信した場合には、 N_r を送信先としたデータメッセージ配送のための $PRTS$ メッセージを自身の無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードへブロードキャスト送信する。このとき、 $2 \times PLIFS$ のタイマを設定する。
- タイマ切れ以前に N_r がブロードキャスト送信した $PCTS$ メッセージを受信したならば、 N_s は $PLIFS$ 経過後にデータメッセージを N_r へ送信する。
- N_r から $PCTS$ を受信しないままタイマが切れた場合、もしくは、 $PCTS$ メッセージとデータメッセージとの衝突によって $PCTS$ メッセージの受信に失敗した場合には、バックオフタイマを再設定して本手続きを終了し、再度タイマ切れを待つ。□

[FEC 受信ノード N_r]

- N_s がブロードキャスト送信した自身を送信先とするデータメッセージ配送のための $PRTS$ メッセージを受信した N_r は、 $PLIFS$ 経過後に $PCTS$ メッセージを自身の無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードへブロードキャスト送信する。なお、 $PLIFS$ 経過時に隣接無線ノードが送信する制御メッセージを受信している場合には、最長 $2 \times PLIFS$ まで送信を待機する。この間に $PCTS$ メッセージを送信することができない場合には、本手続きを終了する。□

4. 評価

前章で提案した並行 FEC 通信のための拡張 RTS/CTS プロトコルによって、従来の BEC 通信を前提として設計された RTS/CTS プロトコルでは許されていない受信無線ノードにおける衝突の発生しないデータメッセージ配送の

並行実施が実現できる。ただし、拡張 RTS/CTS プロトコルでは *PRTS* メッセージ、*PCTS* メッセージ、データメッセージの送信間に *PLIFS* の待機時間を設けているため、送信無線ノードのバックオフタイマ切れ時刻からデータメッセージ送信終了時刻までの時間は従来の RTS/CTS プロトコルよりも延長している。一方、並行 FEC 通信の実現によって、アプリケーションからのデータメッセージ配送要求発生時から配送完了までの時間は、並行性の向上によって短縮されることが期待できる。

従来の RTS/CTS プロトコルにおけるバックオフタイマ切れからデータメッセージ送信完了までの時間は、*RTS* メッセージ、*CTS* メッセージの配送時間を $T(*TS)$ 、データメッセージ 1 ビットの配送時間を $T(bit)$ 、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r へ配送されるデータメッセージ長を n ビットとすると次式となる。

$$2 \times T(*TS) + 2 \times SIFS + n \times T(bit)$$

この間に配送されるデータメッセージは n ビットである。

一方、並行 FEC 通信を実現する拡張 RTS/CTS プロトコルにおけるバックオフタイマ切れからデータメッセージ送信完了までの時間は、*PRTS* メッセージ、*PCTS* メッセージの配送時間が *RTS* メッセージ、*CTS* メッセージの配送時間と等しい $T(*TS)$ 、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r へ FEC 通信によって配送されるデータメッセージ長を n_0 ビット、送信無線ノード N_{s_i} から受信無線ノード N_{r_i} へ並行 FEC 通信によって配送されるデータメッセージ長を n_i ($i = 1 \dots n$) とすると次式となる。

$$4 \times T(*TS) + 4 \times SIFS + \max_{0 \leq i \leq n} n_i \times T(bit)$$

この間に配送されるデータメッセージは $\sum_{0 \leq i \leq n} n_i$ である。

したがって、FEC 通信の並行性が高い環境ではデータメッセージのスループットを向上させることが期待できる。ここで、受信無線ノード N_r の隣接無線ノード N_{rr} を受信無線ノードとする FEC 通信の並行実施は、図 8 に示す領域に送信無線ノード、受信無線ノードが存在し、 N_s による *PRTS* メッセージ送信開始から N_r による *PCTS* メッセージの送信開始までの間に N_{rs} から N_{rr} への *PRTS* メッセージの配送を終えることができる場合、すなわち、 N_s による *PRTS* メッセージ送信開始後から $T(*TS) + SIFS$ の間に N_{ss} が *PRTS* メッセージの送信を開始した場合のみ並行 FEC 通信が実現される。一方、送信無線ノード N_s の隣接無線ノード N_{ss} を送信無線ノードとする FEC 通信の並行実施は、図*に示す領域に送信無線ノード、受信無線ノードが存在する場合であるが、並行 FEC 通信が互いに衝突しないことが必要である。すなわち、 N_{ss} から N_{sr} へのデータメッセージ配送と N'_{ss} から N'_{sr} へのデータメッセージ配送とが並行実施されるためには、 N_{sr} が N'_{ss} の無線信号到達範囲外にあり、 N'_{sr} が N_{ss} の無線信号到達範囲外にあることが必要である。この衝突回避は、受信無線ノードからの *PCTS* の返送の有無によって実現しているが、データメッセージのスループットを向上させる並行 FEC 通信の選択手法の導入が重要であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、BEC 通信と FEC 通信とを適応的に適用する高信頼アドホックネットワークを実現する際に、FEC 通信の並行実施を可能とする拡張 RTS/CTS プロトコルを提案した。提案プロトコルは、メッセージ配送間に待機時間を設けることで並行通信を可能としており、通信要求頻度の比較的高い環境でのデータメッセージスループット向上が期待できる。ただし、送信無線ノードの隣接無線ノードとの並行 FEC 通信実施においては、制御メッセージの衝突が発生し得ることから、選択的に通信を開始する手法の導入が必要となる。また、BEC 通信と FEC 通信の混在する環境において、提案プロトコルがスループットの向上と配送遅延の短縮にどのように寄与するかは実験により評価する必要があり、今後の課題である。

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] Kosugi, M. and Higaki, H., “High Throughput Reliable Wireless Multihop Transmissions in MANET,” Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications, pp.230–235 (2009).
- [4] Yao, X., Liang, Z. and Wakahara, Y., “Synchronized Multi-Hop Protocol with Fast Transmission Failure Recovery for IEEE 802.11 Multi-Hop Wireless Network under Large Interference Range,” 信学技報, Vol. 112, No. 350, pp. 19–24 (2012).
- [5] 秋元, 重安, 森永, “隠れ端末の存在を考慮した適応的な RTS/CTS 制御の導入,” 第 18 回情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 137–142 (2010).