

片方向リンクを含む無線ネットワークへの ネットワークコーディングに関する検討

完山 和希[†] 大竹 健司[‡] 白石 陽[†] 高橋 修[†] 川嶋 稔夫[†]

公立ほこだて未来大学システム情報科学部[†]

公立ほこだて未来大学大学院システム情報科学研究科[‡]

1. はじめに

ネットワークコーディング (Network Coding, 以下 NC) は周波数利用効率の向上の手段として注目されている。NC は、複数の配送パケット同士を配送経路上の中継ノードで符号化演算を行い、パケットを符号化することで通信が集中する中継ノードのボトルネック解消を行う技術である [1, 2]。また、PDA や携帯電話などの無線通信機器同士が自律分散的にネットワークを形成する無線アドホックネットワークがある。アドホックネットワークでは端末数や個々の無線機器の通信強度の違いから片方向リンクが発生する。

片方向リンクとは 2 つのノード間において、一方からはデータを送信できるが、他方からはデータを送信することが出来ないリンクのことをいう。これに対して、両方のノード間でデータを送受信できるリンクを双方向リンクという [3]。片方向リンクを利用したネットワークトポロジを構築すると経路の探索のために制御パケットの増大が考えられるが、一方で片方向リンクをパケット配送経路に含めることで接続性の向上が期待でき、柔軟な配送経路を構築することが可能になる。

既存の NC の研究ではノード間のリンクが双方向リンクのみで接続されたトポロジが想定されており、片方向リンクを含む無線ネットワークに NC を適用しようとした場合に関する検討がなされていない。

そこで本稿では、双方向リンクのみのトポロジと片方向リンクを含むトポロジについてノード数やコーディングを行うノード数を変化させる。そして、それぞれのトポロジで NC を適用する場合と NC を適用しない場合で全体の送信回数がどのように変化するか検討し、有用性を明らかにする。

2. ネットワークコーディング

無線ネットワークでは無線通信の同報性から 1 つのパケットを電波の送信範囲に存在する他ノードが同時に受信することが可能となる。

図 1 ではノード A とノード B がノード R を経由してそれぞれパケット X とパケット Y を互いに通信すると想定する。ノード間は双方向リンクで結ばれているとする。

NC を適用しない場合、すべての配送を終えるまでに 4 回の通信を必要とする。ノード R は送信を 2 回行わなければならない、その分 CSMA/CA による待ち時間が発生する。

ここで NC を適用する場合、すべてのノードは自らが受信または送信したパケットをキャッシングしておく。ノード R はパケット X とパケット Y を受信したとき 2 つのパケットの XOR 演算をし、符号化する。ただし、符号化には 2 つパケットが揃ったタイミングでしか行うことができない。ここでは符号化したパケットを `code` と呼ぶ。

ノード R は符号化した `code` パケットを 1 回送信することで、通信範囲内にあるノード A とノード B が一度に `code` パケットを受信することが可能になる。各受信ノードは自らが送信したパケットを保持しておき、`code` パケットと XOR 演算をすることで目的のパケットを復元することができる。NC を適用した結果、すべての配送を終えるまでに 3 回の通信で済み、送信回数削減されたことにより、周波数利用効率の向上を得ることができる。

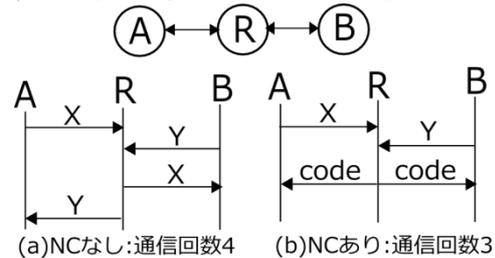


図 1 NC を用いた場合の通信

3. 研究方針

双方向リンクのみのトポロジの場合は中継するノードすべてが符号化と復元を行うことができる。配送されるパケットが交差するとき、必ずコーディングを行うことができ、コーディングの機会が最大となるようにパケットが配送されるような最適なタイミングでのコーディングが可能とする。この場合、1 パケット同士が交差するようなパケット配送では全体の送信回数を削減できることをホップ数とパケット数で示す。同様に片方向リンクを含むトポロジの場合も全体の送信回数をホップ数とパケット数で示すが、片方向リンクを含める場合はパケット配送路が送信と受信で重なり合うとは限らず、その経路長も異なる場合がある。コーディング可能なノードは送信経路と受信経路で共通するノードのみとなる。つまり片方向リンクを含むトポロジでの NC とは、コーディング可能なノードが限られた状況で NC を適用する場合のことである。本研究ではこのような状況での NC の有用性を検討する。また、コーディング可能なノードが限られたトポロジはいくつか考えられるのでそれぞれの場合を示して検討する。

4. トポロジと NC の有効性

本研究では取り扱うトポロジとして 2 章でも取り上げた基本的な直線型のトポロジを拡張していく。双方向リンクのみで形成される直線型のトポロジと直線型のトポ

Network coding for wireless network with unidirectional links

[†]Kazuki Kanyama [‡]Kenji Otake [†]Yoh Shiraishi

[†]Osamu Takahashi [†]Toshio Kawashima

[†]School of Systems Information Science, Future University Hakodate

[‡]Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

ロジで経路の途中で片方向リンクを含み、迂回してパケット配送が可能なトポロジに分ける。

双方向リンクのみのトポロジの場合はネットワーク内のノードのすべてがコーディングを行うことができる。そのため、全体の送信回数の減少を見込むことが出来る。

片方向リンクを含むトポロジでは、コーディングを行うノード数が異なるトポロジが考えられる。そのため、コーディングできるノード数が違うそれぞれの場合のトポロジを想定し、NCの有用性を示す。

トポロジの両端のエンドノード同士が互いに通信を行う状況を想定する。また、エンドノード同士は同数のパケットを通信するものとする。エンドノード同士のパケット配送ではパケットロスが生じないと仮定し、常に最適なコーディングが可能とする。

4.1 双方向リンクのみのトポロジ

基本的なトポロジとして双方向リンクのみの直線型のトポロジでパケット送信回数とホップ数およびパケット数の関係を数式に表わす。なお、各数式の導入については省略する。

図2は直線型のトポロジである。エンドノード同士が同数のパケットを交換する。パケットを中継するノードは1つ以上とする。

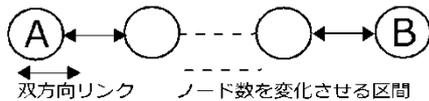


図2 双方向リンクのみのトポロジ

図2のような直線型トポロジにおいて、ホップ数を H 、各エンドノードが送信するパケット数を N とすると全体の送信回数はNCを行わない場合とNCを行う場合でそれぞれ式(1)、(2)のように表せる。 a はホップ数4以上の時、すべてのNCを行った後にコーディングが行えない状況下で配送しなければならないパケットの送信回数である。

$$\text{NCを行わない場合} : (2H + 2)N \quad (1)$$

$$\text{NCを行う場合} : (H + 2)N + H - 1 + a \quad (2)$$

4.2 片方向リンクを含むトポロジ

基本的な直線型のトポロジを拡張し、片方向リンクを含み迂回する経路を構築できるトポロジの場合を考える。

図3のトポロジはエンドノードが双方向リンク接続されているが、中継する途中のノード間に片方向リンクが含まれている場合である。図3では中継ノードの中でノードCとノードDがコーディングを行えるノードとなる。このときホップ数を変化させるのは図3中の破線部分である。ホップ数を増やすことでパケットを迂回するような経路が長くなった結果、NCを行うためにパケットを留めることが遅延時間の増加に繋がる可能性がある。

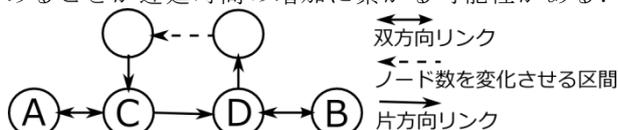


図3 片方向リンクを含むトポロジ

図3のトポロジの場合、送信経路のホップ数を H_s 、受

信経路のホップ数を H_r とすると全体の送信回数は、NCを行わない場合とNCを行う場合でそれぞれ式(3)、(4)のように表せる。

$$\text{NCを行わない場合} : (H_s + H_r + 2)N \quad (3)$$

$$\text{NCを行う場合} : (H_s + H_r)N + 1 \quad (4)$$

図4のトポロジはエンドノードの一方が片方向リンクのみで繋がる場合である。図4ではノードBが片方向のみで繋がり、コーディングを行える中継ノードはノードCだけである。このようなトポロジではコーディングを行えるノード数が少ないため図3の場合よりもさらにホップ数を増やした時、NCを行うことによる遅延時間が増加する可能性がある。

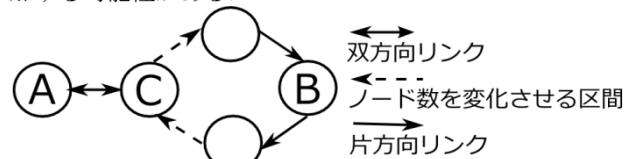


図4 ノードBが片方向リンクのみで繋がるトポロジ

図4のトポロジの場合、全体の送信回数は、NCを行わない場合とNCを行う場合でそれぞれ式(5)、(6)のように表せる。

$$\text{NCを行わない場合} : (H_s + H_r + 2)N \quad (5)$$

$$\text{NCを行う場合} : (H_s + H_r + 1)N \quad (6)$$

5. まとめ

本研究ではNCを適用する場合とNCを適用しない場合のそれぞれで、双方向リンクのみで繋がるトポロジの場合だけでなく、片方向リンクを含んだトポロジの場合でもパケット配送に必要な全体の送信回数をパケット数とホップ数から求めた。

これにより、各配送パケットがコーディングを最適なタイミングで行えた時、片方向リンクを含むトポロジにおいてもNCを適用すると効果が得られると推察できる。

今後の課題としてそれぞれのトポロジにおいて作成した式の妥当性を実験評価する。また、パケット到達遅延がどの程度起きるのかについてもNCを行った場合とNCを行わない場合で比較検証する。

参考文献

- [1] トレイシー・ホー, デモンズ・S・ラン, 河東晴子, 松田哲史, 矢野雅嗣, スビトラーナ・ビエトレンコ, “ネットワークコーディング”, 東京電機大学出版局, 2010.
- [2] Sachin Katti, Hariharan Rahul, Wenjun Hu, Dina Katabi, Muriel Medard, Jon Crowcroft, “XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding”, ACM SIGCOMM2006, 2006.
- [3] 鈴木和久, 桧垣博章, “片方向リンクを含むMANETにおけるマルチキャスト配送経路検出手法”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2009-DPS-140, No. 7, 2009.