

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760281

研究課題名(和文)

マルチホップ無線ネットワークにおけるネットワーク符号のロバスト化

研究課題名(英文)

Robust Network Coding for Multihop Wireless Networks

研究代表者：

岡田 啓 (OKADA HIRAKU)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：50324463

研究成果の概要(和文)：本研究では無線伝搬による誤りに対してロバストなネットワーク符号を実現するため、再送方式および誤り訂正方式を検討する。ネットワーク符号では、符号化パケットの受信に成功したとしても、自身が保持していないパケットがある場合にそのパケットの復号に失敗する。そこでNACK(non-acknowledge)を用いた新たな再送方式を提案する。また、ネットワーク符号に経路次元符号化を用いることで冗長性を持たせ、経路ダイバシティ効果を得ることができるような誤り訂正方式も提案する。

研究成果の概要(英文)：In this study, ARQ (automatic repeat request) and error correcting schemes for robust network coding in multihop wireless networks are discussed. In network coding, an encoded packet cannot be sometimes decoded because of lack of holding native packets even if it is demodulated without any errors. We propose a novel ARQ scheme using NACK (non-acknowledge). In addition, we propose an error correcting scheme, which can derive route-diversity effect by introducing multiple route coding scheme.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：無線通信工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：マルチホップ無線ネットワーク、ネットワーク符号化、ARQ、誤り訂正符号

## 1. 研究開始当初の背景

マルチホップ無線ネットワークでは電波伝搬環境、地理的な要因などによりある特定のノードに構築される経路が集中することがしばしば発生する。これは輻輳を生じ、そのノードがボトルネックとなりネットワーク全体の性能を支配してしまう。本研究はマルチホップ無線ネットワークにおいて経路集中などによりボトルネックとなってしまうノードにおいて、その過負荷状態を改善するためにネットワーク符号を適用する。ネットワーク符号はもともと有線ネットワーク

においてマルチキャストフローの最適化問題において検討されてきた。これをマルチホップ無線ネットワークに適用することで、高能率化を図る。

有線ネットワークでの検討同様、マルチホップ無線ネットワークでのマルチキャスト/ブロードキャストの効率化を図る手法が検討されている。これに対し、マルチホップ無線ネットワークでユニキャストの効率化を図るためにネットワーク符号化を利用することも検討されている。ネットワーク符号が適用できる条件は、(1)復号化を行うノード

は復号時に所望パケット以外の符号化されたパケットをすべて保持しており、(2)符号化を行うノードは復号化を行うノードがどのパケットを保持していることを認識していなければならない、である。有線ネットワークのように伝送誤りが問題にならない環境では、上記の手法でネットワーク符号の適用条件を比較的容易に満たすことが可能である。しかし、無線環境では伝送誤りが発生し、これにより適用条件を満たすことができず、復号に失敗することが発生する。

## 2. 研究の目的

本研究ではこの問題を解決すべく、無線伝搬による誤りに対してロバストな方式を提案するため、ネットワーク符号のための再送方式および誤り訂正方式を検討する。ネットワーク符号では、符号化パケットの受信に成功したとしても、自身が保持していないパケットがある場合にそのパケットの復号に失敗する。このことを考慮に入れた新たな再送方式を提案する。また、通常のネットワーク符号は冗長性が無いと誤り訂正には使えないが、これに冗長性を持たせることで誤り訂正が可能となる。冗長性を持たせるための符号化の方式として経路次元符号化を用いることで、経路ダイバシティ効果を得ることができるような誤り訂正方式も提案する。

## 3. 研究の方法

まず、ネットワーク符号化の動作原理を図1に示すような十字に配置されたネットワークを用いて説明する。この図においてパケットAはノード2からノード1を経由してノード3へ、パケットBはノード5からノード1を経由してノード4へ伝送される。各ノードはプロミスキャスモードに設定されており、破線で示したリンクにより自身が受信ノードでないパケットも傍受できる。まず、フェーズ1において、ノード2からノード1へパケットAが送信される。このとき、ノード4もプロミスキャスモードでパケットAを傍受する。フェーズ2でも同様に、ノード5からノード1へパケットBを送信するとともに、ノード3はこのパケットを傍受する。フェーズ3において、ノード1は受信したパケットAとBの排他的論理和Cをノード3, 4に同報送信する。ノード3, 4はそれぞれプロミスキャスモードで受信したパケットB, Aと受信した符号化パケットCの排他的論理和をとることで、パケットA, Bを得ることができる。本来ならパケットA, Bを別々にノード3, 4に送信しなければならないところをパケットCを一回送信すればよくなるため、送信効率を高めることが可能である。この例では2つのパケットに対してネットワーク符号を適用しているが、3つ以上のパ

ケットに対しても適用することが可能である。例にあげた十字のネットワークでは、上記と逆向きに流れるパケットも含め、最大4つのパケットに対してネットワーク符号化することができる。

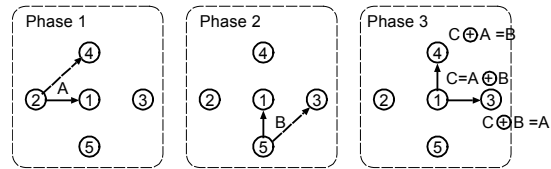


図1 ユニキャスト・ネットワーク符号化

このようなネットワーク符号が適用できる条件は、(1)復号化を行うノード3, 4は復号時にそれぞれパケットB, Aを保持しており、(2)符号化を行うノード1はノード3, 4がパケットB, Aを保持していることを認識していなければならない、である。条件(1)は上記のようにプロミスキャスモードで自身が受信ノードでないパケットも傍受することで解決している。有線と異なり無線では基本的には同報性があるため、このようなことが可能である。条件(2)については、符号化を行うノードが2ホップ隣接ノード情報を収集することで、隣接ノード間のリンクの存在を認識したり、各ノードが保持しているパケットの情報を通知する手法が考えられる。

有線ネットワークのように伝送誤りが問題にならない環境では、上記の手法でネットワーク符号の適用条件を満たすことが可能である。しかし、無線環境では伝送誤りが発生し、これにより適用条件を満たすことができず、復号に失敗することが発生する。例えば、図1のフェーズ1においてノード4がパケットAをプロミスキャスモードで受信できなかった場合、フェーズ3で復号する際、ノードAを保持していないため、符号化パケットCと排他的論理和を取ることができず、パケットBを得ることができない。

このように、ネットワーク符号化ではプロミスキャスモードで自身宛でないパケットも受信する必要がある。しかし、このとき自身宛でないために伝送に誤りが生じた場合にパケットの再送が行われない。さらに、符号化されたパケットを複数のノードに対して同報通信するため、一般的な方法だとブロードキャストを用いることになり、これもパケットの再送が行われない。無線伝搬路では誤りがしばしば発生し、この影響を和らげる対策が必要不可欠である。

そこで本研究では、ネットワーク符号化のための再送方式として、復号不可時に保持しているパケットリストを返信したり、プロミスキャスモードでの受信時でも受信成功応答を送信することを検討する。まずは簡単なモデルを用いていくつかの手法について性

能比較を行うことで、種々の再送方式を比較、検討する。そして、より現実的な状況を想定し、どのようにパケットの再送を行うのかといったプロトコルを定め、性能評価を行う。これを効率的に進めるために、マルチホップ無線ネットワークの研究で広く用いられている、シミュレーションソフトウェア QualNet を用いる。

通常のネットワーク符号化は冗長が無いため誤り訂正には使えないが、通信路符号化と組み合わせることで誤り訂正が可能となる。冗長性を持たせるための符号化の方式として経路次元符号化を用いることで、経路ダイバシティの効果を活用した誤り訂正方式を考案する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 再送方式の検討

所望のネイティブパケットを正しく復号できない場合には、送信ノードに対して復号ができないことを伝えなければならない。そこで本研究では受信ノードにおけるパケットの受信応答として従来の ACK (Acknowledge) に加え、NACK (Non-ACK) を定義することでこれを解決する。

受信ノードは復号化パケットを受信すると保持するパケットとの論理演算を行なうことで復号する。自身を次ホップとするネイティブパケットを復号できた場合、送信ノードに対して ACK を返信する。これに対して、自身を次ホップとするネイティブパケットを復号できない場合は送信ノードに NACK を返信する。ここで NACK には、受信パケットの符号化に用いられたネイティブパケットのうち、自身がパケットプールに保持していないパケット情報を付加する。送信ノードは NACK を受信すると、その情報を基に送信するパケットを決定する。なお、受信ノードは符号化パケットの受信に失敗した場合は、何も返信しない。

図 2 に NACK を用いたパケット再送方式の動作例を示す。この図において、ノード 4 は復号に成功しているものの、ノード 3 では図 1 のフェーズ 2 においてパケット B の受信に失敗しているため、符号化に失敗している。この図のように、復号に成功したノード 4 はノード 1 に ACK を返信するのに対し、復号に失敗したノード 3 はノード 1 に NACK を送信する(フェーズ 4)。このとき送信する NACK にはパケット A, B が不保持であるという情報が付加されている。符号化パケットを送信したノード 1 はこの NACK を受信するとノード 3 に対してパケット A の再送を行う(フェーズ 5)。このように、NACK を用いることにより復号不可能である場合に対応する。

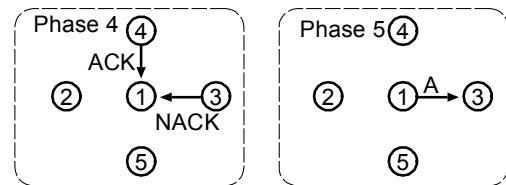


図 2 NACK を用いたパケット再送方式

隣接ノードがどのパケットを保持しているのかを把握するために、各ノードは隣接ノード  $i$  ごとに  $D_i$ ,  $U_i$ ,  $F_i$  の 3 つの集合を持ち ACK, NACK を受信するとこれらの集合を更新している。ACK, NACK を受信するとこれらの集合を更新している。ここで、集合  $D_i$  は対応する隣接ノードが保持するパケットを示し、集合  $U_i$  は保持していないパケットを示している。また、集合  $F_i$  は対応する隣接ノードが保持していると推測されるパケットの集合を示している。各集合は以下のように更新される。隣接ノード  $i$  からネイティブパケットを受信した場合(フェーズ 1, 2), このネイティブパケットをノード  $i$  は確実に保持しているため、これを  $D_i$  に追加する。加えて、自身とノード  $i$  に共通の隣接ノード  $j$  が存在するならばこれらのノードはプロミスキャスモードで受信しているのでこのネイティブパケットを  $F_j$  に追加する。ノードは送信権を得るとこれら 3 つの集合を基に選択されたパケットを符号化し送信する(フェーズ 3)。このパケットの送信に対して受信ノード  $i$  から ACK, NACK を受信した場合(フェーズ 4), 以下のように集合を更新する。まず、符号化に用いたネイティブパケットすべてを  $F_i$  から除外する。ACK を受信すると、符号化に用いたネイティブパケットをすべてノード  $i$  は保持していることになるので、これらを  $D_i$  に追加し、 $U_i$  に同一のパケットが含まれているならば  $U_i$  から除外する。また、送信キューからノード  $i$  に送信したパケットを削除する。NACK を受信した場合、NACK に付加されたパケットはノード  $i$  は保持していないので  $U_i$  に追加する。さらに、符号化に用いたネイティブパケットのうち NACK に付加されていないパケットはノード  $i$  は保持している所以他们を  $D_i$  に追加し  $U_i$  に含まれていなければ除外する。

動作例を図 3 に示す。ノード 1 はノード 2 からパケット A を受信すると、集合  $D_2$  にパケット A を追加する。また、ノード 1, 2 に共通の隣接ノードとしてノード 4, 5 が存在するため、集合  $F_4$ ,  $F_5$  にパケット A を追加する(フェーズ 1)。同様に、ノード 1 はノード 5 からパケット B を受信すると、集合  $D_5$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  にパケット B を追加する(フェーズ 2)。ここで、実際にはノード 3 はパケット B の受信に失敗したものとする。ノード 1 は送信権を得るとこれら 3 つの集合を基にパケット A,

B を符号化し、パケット C としてノード 3, 4 に一括伝送する(フェーズ 3). ノード 4 はパケット C の復号が可能であるためノード 1 に ACK を返信する. ノード 1 はノード 4 から ACK を受信すると、 $F_4$  からパケット A を除外し、 $D_4$  にパケット A, B を追加する. また、ノード 3 は復号が不可能なため NACK を返信し、パケット A, B を保持していないことを報告する. ノード 1 がノード 3 から NACK を受信すると、 $F_3$  からパケット B を除外し、 $U_3$  にパケット A, B を追加する.

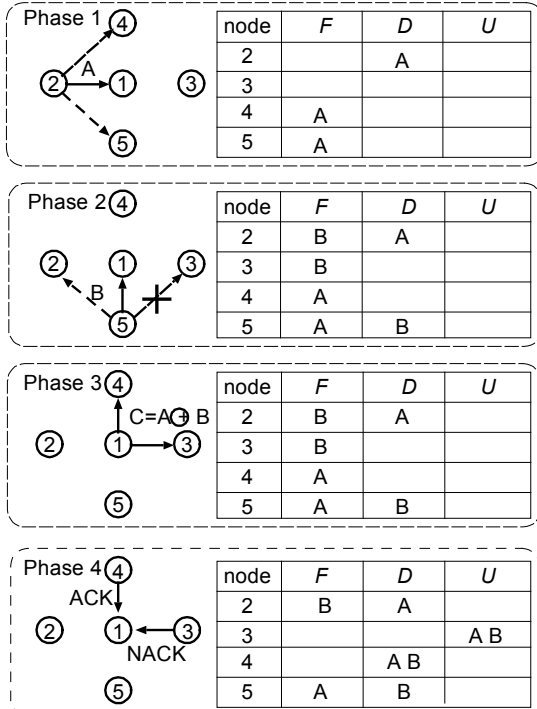


図3 パケット保持情報の動作例

符号化を行うノードは  $D$ ,  $U$ ,  $F$  の 3 つの集合を基に送信キュー内のすべてのパケットを参照し、符号化するパケットを選択する. ここで、参照中のネイティブパケット  $p$  の次ホップをノード  $M(p)$  と表し、既に符号化されたネイティブパケットの集合を  $E$  とする. 符号化パケットに多重化されるネイティブパケットの数を増やすことで、1 回の送信での伝送効率を高める. ノード  $i$  は集合  $U_i$  内のパケットが符号化パケットとして選択されたパケットを復号することはできないが、少なくとも集合  $U_i$  内のパケットが含まれていなければ復号が可能がある. そのため、集合  $U$  を除く 2 つの集合  $F$ ,  $D$  を基に符号化するパケットを選択する. 既に  $(n-1)$  個のネイティブパケットを符号化し、さらに  $n$  番目のネイティブパケット  $p_n$  を符号化する場合を考える.  $(D_{N(p_n)} \cup F_{N(p_n)}) \supset E$  かつ  $\forall i \in E, n \in (D_{N(i)} \cup F_{N(i)})$  を満たすならばパケット  $p_n$  を符号化パケットに加える. この動作を新たに符号化パケットに追加されな

くなるまで繰り返す.

シミュレーションソフトウェア QualNet を用いて提案方式の性能を評価する. 伝送方式として IEEE 802.11b を想定し、伝送レートは 2Mbps, 通信路モデルは 2 波モデルを用いる. 9 ノードを 3 行 3 列の格子状に配置し CBR フローを 4 フロー、50 秒間送信した. パケットサイズを 512byte とし、ノード間距離を 100m とする. このとき、送信半径を 80-170m に変更し、スループットを評価した.

図 4 に結果を示す. 横軸に送信半径をとり、縦軸にスループットをとる. 結果より、送信半径が 130m 以上の範囲では提案方式を使用することでスループットが向上することが分かる.

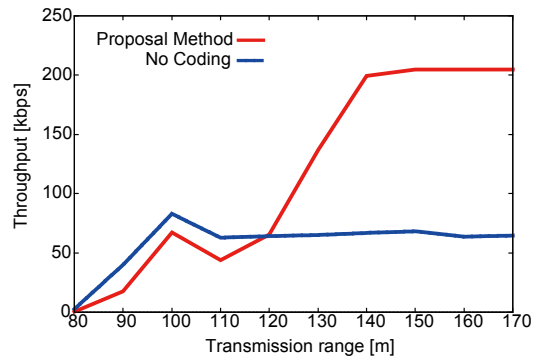


図4 提案再送方式を用いたときのスループット特性

## (2) 誤り訂正の検討

本研究では冗長性を持たせるための符号化方式として経路次元符号化を用いる. これは、始点ノードから終点ノードまで複数の経路を構築し、これら複数の経路に対して符号化を行う手法である.

伝送モデルを図 5 に示す. ノード A からパケット a を、ノード D からパケット b を、ゲートウェイ GW に伝送することを考える. 通常の経路次元符号化ではノード A から送信されるパケット a をノード B, C の両方を経由して伝送される. 同様に、パケット b はノード D からノード C, E を経由して伝送される. このとき、ノード C-GW 間では他のリンクと比べ 2 倍の量を送信することになり、スループット劣化の要因となる.

提案システムではノード C からゲートウェイ GW の伝送でネットワーク符号化を用いてパケット c を生成する. 他のリンクと同量のパケットを送信すればよくなり、スループットの劣化を防ぐことができる. ネットワーク符号化で得られたパケット c を、ノード A からノード B を経由してきたパケット a と排他的論理和を取ることでパケット b が得られ、同様にノード D からノード E を経由してきたパケット b と排他的論理和を取ることでパケット a が得られる. このように、

経路次元符号化により終点ノードでパケットはそれぞれ 2 つ得られる。簡単化のため、本研究では選択合成により最終的な受信パケットを得る。

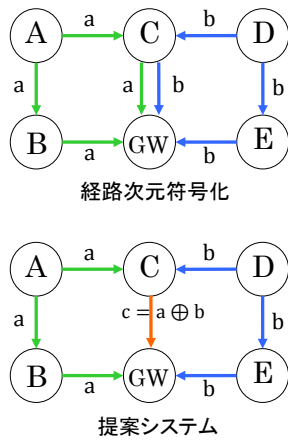


図 5 経路次元符号化を適用したネットワーク符号化

シミュレーションにて、経路次元符号化を用いない 1 経路で伝送したもの、経路次元符号化を用いたもの、および提案システムの三つの場合の packet 誤り率およびスループットを比較する。パケット長は 1,000 ビット、ターボ符号の符号化率は 1/3、スローレイリーフェージングを仮定し、サンプル数は 40,000 とする。

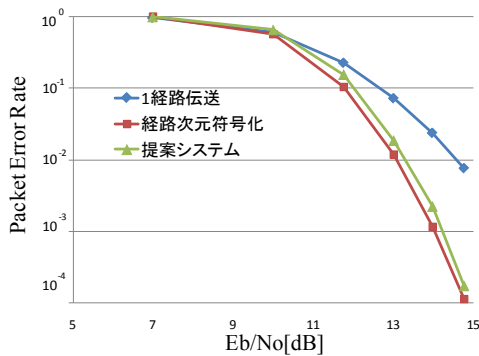


図 6 経路次元符号化を適用したネットワーク符号化の packet 誤り率特性

packet 誤り率特性を図 6 に示す。経路次元符号化と提案システムは、1 経路伝送よりも packet 誤り率が改善されている。提案システムは経路次元符号化よりも劣る結果となったが、ほぼ同じ値が得られている。スループット特性を図 7 に示す。Eb/No が 7dB 以上で、提案システムは経路次元符号化よりもスループットが高くなった。

以上のように、本研究では packet 集中によるスループット劣化を防ぐため、経路次元符号化にネットワーク符号化を用いること

を提案し、その有効性を示した。

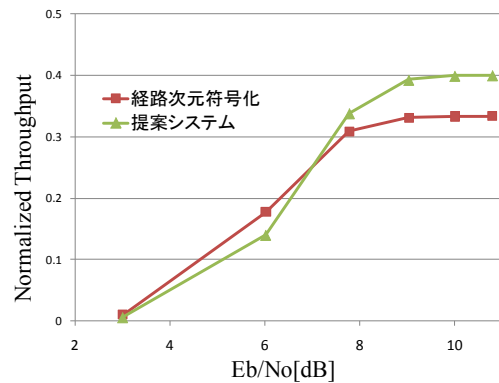


図 7 経路次元符号化を適用したネットワーク符号化のスループット特性

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 平向浩也, 岡田啓, 間瀬憲一, マルチホップ無線ネットワークにおける NACK を用いたネットワークコーディングの性能評価, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, -, 2010, 13-18
- ② H. Okada, H. Hiramuki, K. Mase, An ARQ Scheme Using NACK for Network Coding in Wireless Multihop Networks, Proc. of Ad Hoc, Sensor and P2P workshop, 査読有, -, 2011, -

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 羽生稔, 岡田啓, マルチホップ無線ネットワークにおけるネットワーク符号化を用いた経路次元符号化の一検討, 電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会, 2010 年 9 月 15 日, 大阪府堺市
- ② 岡田啓, 原点回帰: 無線分散ネットワークのトラヒック理論的アプローチ, 無線分散ネットワークに関するワークショップ, 2010 年 12 月 3 日, 高知市
- ③ 岡田啓, アドホック/メッシュネットワークの要素技術と具体例: ルーティング技術とその応用, 電子情報通信学会 総合大会, 2011 年 2 月 28 日, 要旨集

〔図書〕(計 1 件)

- ① 三瓶政一, 阪口啓[監修] 岡田啓, 他著, コロナ社, 無線分散ネットワーク, 2011, 215

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 啓 (OKADA HIRAKU)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教

授

研究者番号：50324463

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし