

送信周期の調整による無線マルチホップネットワーク上での TCP の輻輳の緩和

中原 史博^{†1,a)} 北須賀 輝明^{†1,b)} 有次 正義^{†1,c)}

概要：無線マルチホップネットワークにおいて、TCP プロトコルによる双方向通信では、ホップ数の増加に伴いスループットが低下する。本研究では、各ノードのデータリンク層で次のノードへのパケット伝送を遅らせることで、スループット低下の原因であるフロー内での干渉を減らし輻輳を緩和することを目的とする。シミュレーションにより提案手法はほとんどの場合で輻輳状態を緩和することが示された。

キーワード：TCP プロトコル, 無線マルチホップネットワーク, 無線 LAN, データリンク層

Alleviating Congestion of TCP Stream on Wireless Multi Hop Networks by Adjusting the Transmission Interval

FUMIHIRO NAKAHARA^{†1,a)} TERUAKI KITASUKA^{†1,b)} MASAYOSHI ARITSUGI^{†1,c)}

Abstract: In wireless multi hop networks, two-way communication of the TCP protocol decreases throughput with increase of the number of hops. In this study, we propose a method to alleviate the congestion that causes the decrease of the throughput. The propose method delays the packet transmission to the next node when ACK is recieved at data link layer. Simulation result shows that the method alleviates congestion in most cases.

Keywords: TCP protocol, Wireless multi hop network, Wireless LAN, Data link layer

1. はじめに

無線マルチホップネットワークとは、送信ノードと受信ノードが通信する際に他の端末を経由して通信する無線ネットワークである。このようなネットワークでは、中継ノードを経由してパケットを伝送するため、広範囲の通信が可能となるだけでなく、基地局を必要としないため低コストでネットワークを構築することができる。また、災害等で中継ノードに故障が生じた場合、別の中継ノードを用いることでネットワークの再構築が容易であるという利点がある。

一般に無線マルチホップネットワークでは、ホップ数が増えるにつれスループットが低下する。スループット低下の原因として、二つのノードを結ぶ中継経路上での電波干渉（フロー内干渉）や、異なる経路間での電波干渉（フロー間干渉）による輻輳が生じることが考えられる。また、図 1 のような TCP プロトコルを用いた通信では送信ノードから受信ノードに向けたパケット伝送と、受信ノードから送信ノードにむけた肯定応答からなる双方向通信のため、フロー内干渉による衝突が頻繁におきる。

このような輻輳に対して、文献 [1], [2], [3] では送信ノードがバッファに蓄えたパケットを間を空けて周期的に送信することによって、各中継ノード間のフロー内干渉量を制御する周期的間欠送信法 (Intermittent Periodic Transmit) が提案されている。また文献 [4] では、メッシュ状に形成された無線マルチホップメッシュネットワークにおいて、近

^{†1} 熊本大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

a) nakahara@dbms.cs.kumamoto-u.ac.jp

b) kitasuka@cs.kumamoto-u.ac.jp

c) aritsugi@cs.kumamoto-u.ac.jp

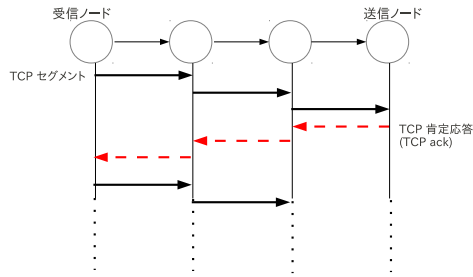


図 1 TCP プロトコル

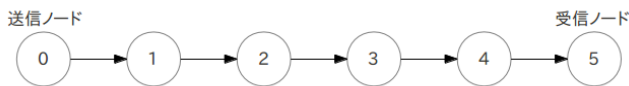


図 2 線トポロジ (ノード数 6)

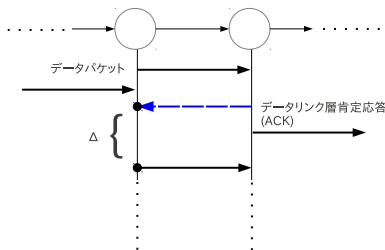


図 3 提案手法によるパケット送信の調節方法：各ノードのデータリンク層に ACK を受信する毎に次のパケット送信を Δ 遅らせる

傍の輻輳を感知し、輻輳情報を共有する伝送レート制御プロトコル Wireless Control Protocol (WCP) と、トポロジの形状から近傍の利用可能な通信容量を推定し、伝送レートを公平に配分する Wireless Control Protocol with Capacity estimation (WCPCap) により輻輳を緩和する手法が提案されている。

本研究では、フロー内干渉を減らし、輻輳を緩和することを目的とする。輻輳を緩和する方法として、データリンク層で送信間隔を空ける手法を提案する。提案手法では、伝送先のノードから伝送元のノードへの肯定的応答を意味する ACK を受信してから次のパケット伝送までの時間を、一定時間遅らせる。シミュレーションにより輻輳が緩和されたかを計測し、スループットとの関係についても調査する。なお、シミュレーションでは 1 次元線トポロジのシングルストリーム上での TCP プロトコル通信を評価する。

2. 提案手法

この章では、無線マルチホップ上での TCP プロトコルの通信によって生じる輻輳を緩和させる手法を提案する。

2.1 パケット送信時間の調整

TCP プロトコルにおいてデータの受信が正しく行われた際、宛先のノードから送信元のノードに向けて肯定応答 (TCP ack) を送信する。本研究では、図 2 のような線トポロジの場合において、ノード 2 からノード 3 のように隣のノードに向けてのパケット伝送に対してのデータリンク層肯定応答を ACK と表し、宛先ノードであるノード 5 から送信元ノードであるノード 0 への TCP プロトコルの肯定応答を TCP ack と表記する。

提案手法では、図 3 のように各ノードのデータリンク層で ACK を受信してから、次のパケット伝送までの時間を、 Δ 秒の間待つ。これによりデータリンク層で送信間隔が空き、フロー内干渉を抑制することができると考えられる。以上より TCP プロトコルにおける輻輳を緩和させる。 Δ 秒の決定方法を次節で述べる。

2.2 送信時間の設定

提案手法において、待ち時間 Δ の設定が重要になる。本研究では通常の TCP ストリームの i 番目のセグメントが送信ノードのデータリンク層から伝送される時刻を t_{s_i} 、そのパケットが受信ノードのデータリンク層に到達する時刻を t_{r_i} とすると、ひとつのセグメントが送信ノードのデータリンク層から受信ノードのデータリンク層に届くまでの時間の平均 t_{ave} (セグメント 0 番目から p 番目まで) は

$$t_{ave} = \frac{\sum_{i=0}^{p-1} (t_{r_i} - t_{s_i})}{\sum_{i=0}^{p-1} i} \quad (1)$$

と表される。また、経路上に隣接する 2 つのノード間においてデータリンク層で送信されたデータパケットを受信するまでにかかる伝送時間 t_w と、経路上のノードの総数を n とし、 n を用いて、 t_{ave} から、近傍ノード間での無線伝送にかかる時間を除いた時間の平均値 t_{mac} は式 (2) で表される。つまり t_{mac} とは、あるノードのデータリンク層でパケットが届いてから次のノードに向け送信するまでの時間の平均を表す。

$$t_{mac} = \frac{t_{ave} - (t_w * (n - 1))}{n - 1} \quad (2)$$

図 4 にノード数 6 の場合のあるセグメントのパケットが送信して受信するまでのデータリンク層での流れを示す。図のようにデータリンク層でのパケット送信と受信の時刻から t_{mac} は算出される。

最後に、各ノードでの待ち時間 Δ_n を算出する。ここでホップ数が多いと全体のパケット伝送回数が増え、輻輳が起こりやすくなることを考慮し、

$$\Delta_n = t_{mac} * \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{n-1}}\right)^2}{2} \quad (3)$$

時刻	ノード番号	動作
t_s	2.649298000	0
t_w	2.656001600	0
	2.657477700	1
t_w	2.659973500	1
	2.661449600	2
t_w	2.749808200	2
	2.751284300	3
t_w	2.753748900	3
	2.755303900	3
t_w	2.756780000	4
	2.766776600	4
t_w	2.768252700	5
t_r		

図 4 ノード数 6 の場合の i 番目のセグメントが送信され受信するまでのデータリンク層での流れ

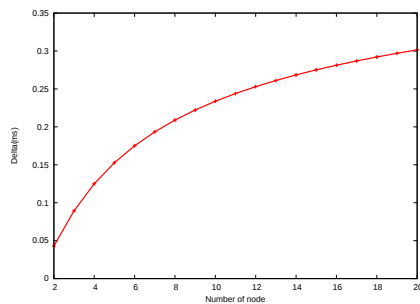


図 5 ノード数 n に対する Δ ($t_{mac} = 1$ ms の場合)

Δ_n を式 (3) のように定める. 図 5 のようにノード数が少なければ, 待ち時間は少なくなり, 多いほど待ち時間が多くなるようにした.

3. シミュレーション

本章では提案手法を用いて, 提案手法による輻輳の緩和とスループットとの関係をシミュレーションにより示す.

3.1 シミュレーション環境

シミュレーションには, ネットワークシミュレータ ns-2 (ver. 2.34) を用いて通信規格 IEEE 802.11 を対象にシミュレーションする [5]. まず, 図 2 で示すような線トポロジ上で近傍ノード間の距離を 30 m 間隔で配置し, 提案手法を加えた場合と, 加えない場合をシミュレーションする. 提案手法により輻輳が緩和されたかを評価するために, ウィンドウサイズと各ノードにおけるパケットの送信数を従来手法と比較する. 最後に提案手法が与えるスループットの影響を調べる.

さらに送信ノードからの受信ノードの通信距離を 180 m とし, ノード数を 4(60 m 間隔), 7(30 m 間隔), 10(20 m 間隔), 19(10 m 間隔) と変化させながら, 図 6 のようにノードを配置し, ウィンドウサイズ, パケット伝送数, スループットを比較する.

シミュレーションに用いたパラメータを表 1 に示す. 静的ルーティングを用いて, 隣接するノードに向けてパケットを送信することで, 経路制御パケットがない状況で輻輳

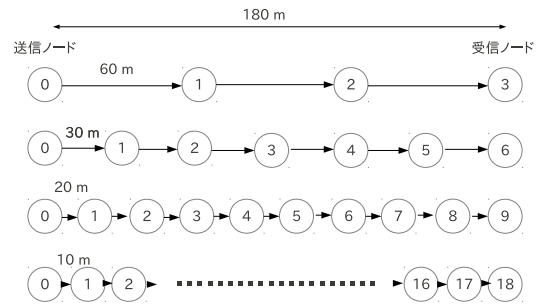


図 6 両端ノード間距離を固定しホップ数を変化させた場合の線トポロジ

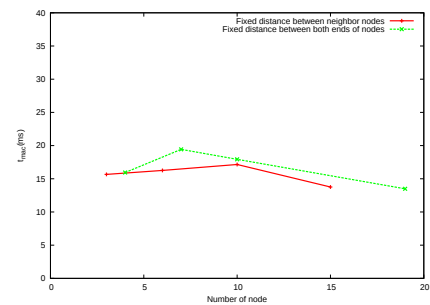


図 7 各ノード配置における t_{mac} の値

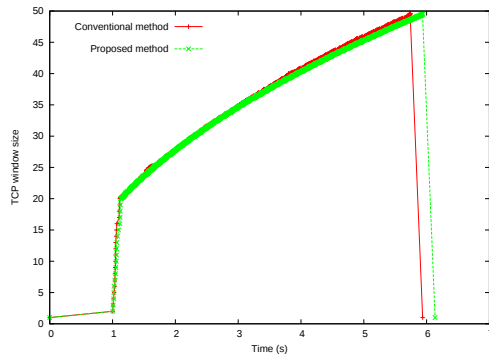
表 1 シミュレーションで用いたパラメータ値

パラメータ	数値	
	ノード間距離固定	両端ノード間距離固定
通信規格	IEEE 802.11	
ルーティング	静的ルーティング (NOAH)	
TCP 輻輳制御	TCP Tahoe	
データサイズ	1 M バイト	
ノード数	3, 6, 10, 15	4, 7, 10, 19
ノード間距離	30 m	10, 20, 30, 60 m
通信距離	60, 150, 270, 420 m	180 m
Δ_n (ms)	Δ_3 : 0.7, Δ_6 : 2.5, Δ_{10} : 3.8, Δ_{15} : 3.7	Δ_4 : 1.4, Δ_7 : 3.4, Δ_{10} : 3.9, Δ_{19} : 3.9

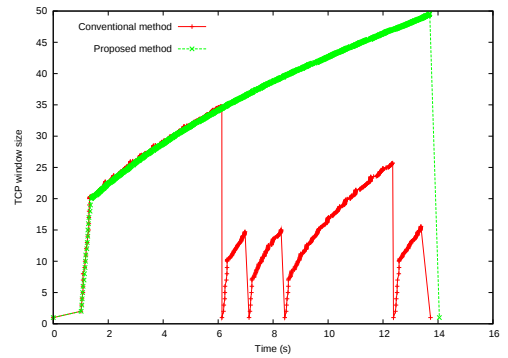
が緩和されているかを評価する. Δ_n は提案手法を用いない場合でのシミュレーション結果から, 2.2 節の計算式に必要なパラメータを求め算出した. 近傍ノード間の距離を固定した場合の Δ_{10} が Δ_{15} より大きい, これは図 7 のように式 (2) で導出した t_{mac} がノード数 10 の場合の方が約 3 ms 長かったためである.

3.2 近傍ノード間距離固定時のシミュレーション結果

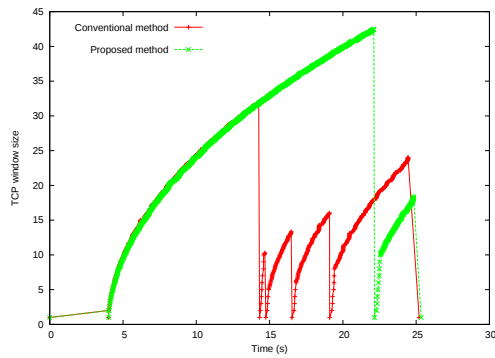
近傍ノード間の距離を固定した場合のウィンドウサイズの通信時間による変化を図 8 に, 図 9 に各ノードにおける再送を含むデータリンク層でのパケットの送信総数を示す. ノード数が 3 の場合, ウィンドウサイズが一度も減少しなかったことから, TCP が輻輳回避モードに入ることなくスムーズに通信できていることが読み取れる. しかし, 図 9



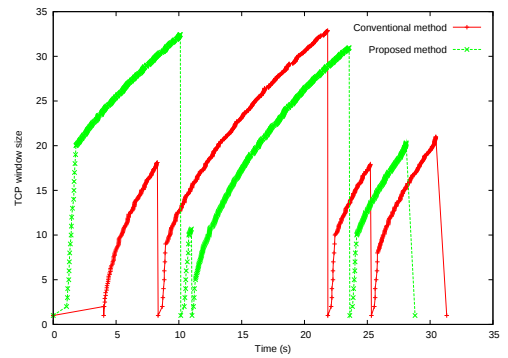
(a) ノード数 3



(b) ノード数 6

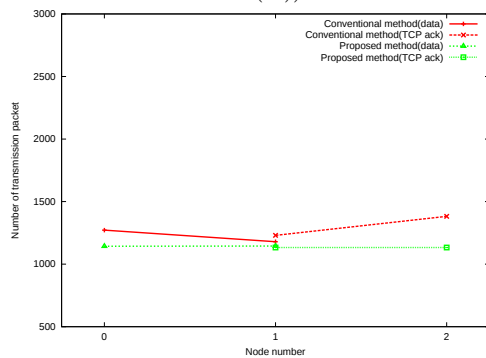


(c) ノード数 10

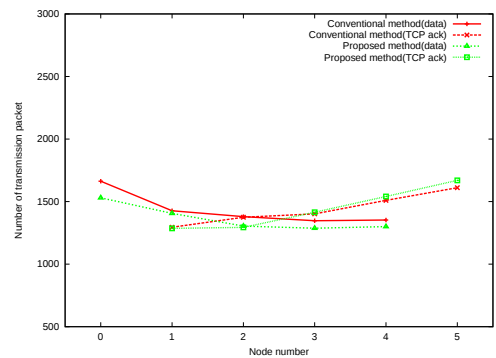


(d) ノード数 15

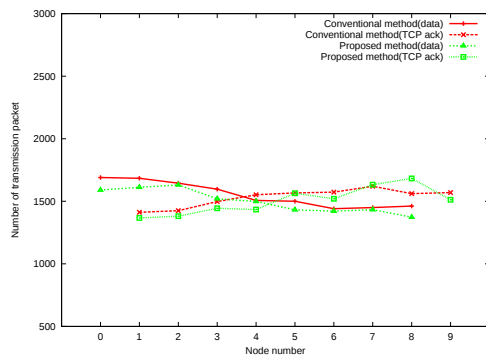
図 8 近傍ノード間距離を固定した場合の各ノード数のウィンドウサイズ (従来手法 (赤), 提案手法 (緑))



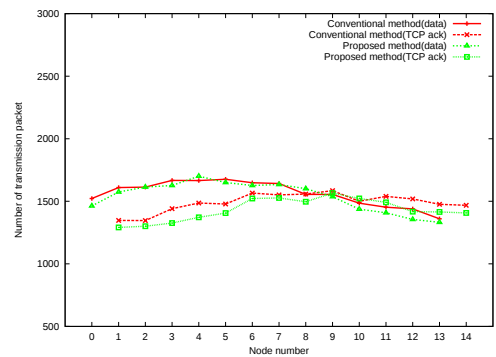
(a) ノード数 3



(b) ノード数 6



(c) ノード数 10



(d) ノード数 15

図 9 近傍ノード間距離を固定した場合の各ノードによるパケット伝送回数 (従来手法 (赤), 提案手法 (緑))

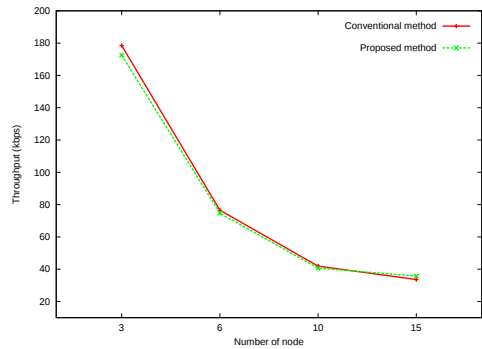


図 10 近傍ノード間距離を固定した場合のホップ数とスループットの関係 (従来手法 (赤), 提案手法 (緑))

を見ると、提案手法では、既存の場合に比べ、パケット伝送数は減少していることが確認できる。このことから、パケット伝送時のフロー内干渉が抑制されていることが理解できる。また、ノード数 6、10、15 の場合、提案手法が、既存の IEEE802.11 を用いる場合に比べ、ウィンドウサイズと、パケット送信総数を改善していることが示されることから輻輳が緩和されたことが分かる。以上より、提案手法が、TCP プロトコル通信における輻輳を緩和しているといえる。

次に、図 10 に、ノード数 3、6、10、15 の場合の、提案手法と既存の TCP プロトコルのスループットの比較結果を示す。提案手法が否かに関わらず輻輳が起こらなかったノード数が 3 の場合は、提案手法のスループットは既存の IEEE802.11 と比べて約 90 % に落ちた。ノード数 6、10 においても、輻輳が緩和されたのにも関わらず、スループットの向上にはつながらなかった。一方で、ノード数が 15 のときはスループットが、約 108 % に向上した。

3.3 両端ノード間距離固定時のシミュレーション結果

両端ノード間距離を固定した場合におけるウィンドウサイズの通信時間による変化と各ノードにおけるパケットの伝送回数、スループットの関係を図 11 から図 13 に示す。ノード数 4 の場合において全体のパケット伝送回数が増加し、ノード数 19 の場合は、TCP が輻輳回避モードに入る回数や、ノード 3、4 におけるパケット伝送回数が増加したのが読み取れ、輻輳を上手く緩和することができなかった。また、ノード数が増えるにつれ、スループットが低下しているのが分かり、近傍ノード間の距離を固定した場合と同様、既存の通信の場合と比べ、少しだけ下回る結果となった。

3.4 考察

シミュレーションの結果を元に、近傍ノード間距離を固定した場合の平均ウィンドウサイズと各ノードにおけるパケット伝送総数、スループットの改善率を表 2 にまとめた。ここでパケット伝送総数は、各ノードにおける送信ノードから受信ノードにむけたデータパケットと、受信ノードから送信ノードへの TCP ack パケットの伝送回数の総和で、

表 2 近傍ノード間距離を固定した場合の提案手法による改善率

ノード数 (n)	3	6	10	15
パケット伝送総数	90.6 %	96.3 %	97.4 %	98.5 %
平均ウィンドウサイズ	100 %	179 %	149 %	116 %
スループット	96.7 %	97.6 %	98.4 %	108 %

表 3 近傍ノード間距離を固定した場合の TCP Tahoe が輻輳回避モードに入った回数

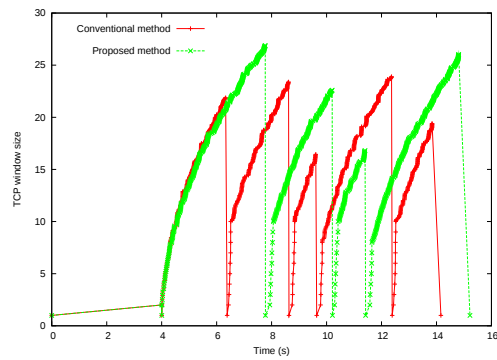
ノード数 (n)	3	6	10	15
既存の通信の場合	0 回	4 回	5 回	4 回
提案手法を用いた場合	0 回	0 回	2 回	3 回

値が 100 % より小さければ、提案手法がパケット伝送の数を減らしているといえる。また、図 8 より TCP Tahoe が輻輳回避モードに入った回数を表 3 にまとめた。

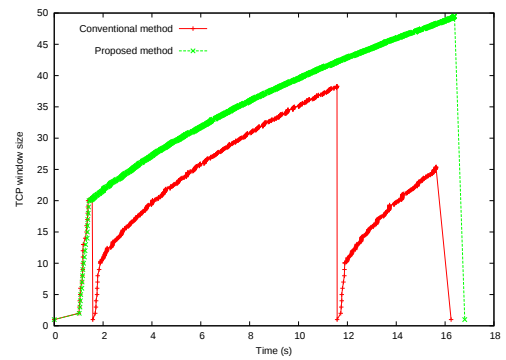
ノード数と輻輳緩和の関係について考察する。シミュレーション結果では、提案手法を用いた場合ではノード伝送における電波干渉が抑制され、輻輳が緩和されていることが示された。また、TCP が輻輳回避モードに入ることなく通信したノード数 3 のときを除き、今回のシミュレーションで用いたすべてのノード数の場合に対して、ノード内干渉の抑制による輻輳の緩和が有効であったことが表 3 より読み取れる。

輻輳緩和のスループットへの影響について考察する。スループットの向上について、今回シミュレーションを行った条件の中でスループットを向上させたのは、ノード数が 15 の場合のみであった。この原因として、ノード数 3 のような輻輳が起こらない環境では、輻輳を緩和するという本手法の利点が得られず、待ち時間により遅延が増加するからだと推測される。実際にノード数 3 の場合のスループットは約 90 % と大幅に減少している。また、ノード数 6、10 においては、パケット伝送数が減少し、輻輳が緩和されているにも関わらず、スループットは改善されていない。これも、同様に待ち時間による遅延が原因であると考えられる。

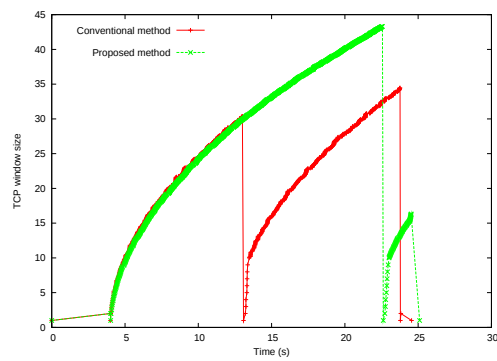
表 4 に両端ノード間距離を固定した場合の平均ウィンドウサイズと、各ノードにおけるパケット伝送総数、スループットの改善率を示し、TCP Tahoe が輻輳回避モードに入った回数を表 5 にまとめる。ノード数が 4 の場合において、提案手法でのパケット伝送回数が増えたが、これはパケットが伝送できない理由が、輻輳によるものでなく、近傍ノード間の距離の増加によってリンクの品質が落ちて伝送先のノードで受信できなかったためだと推測される。またノード数 19 のようなホップ数が多い場合、提案手法では TCP Tahoe が輻輳回避モードに入った回数が増えており、全体の伝送数は減ったにも関わらず、図 12 (d) から特定のノードの伝送数が増えていることが分かる。このことから、伝送に時間を置くことにより一部の伝送で強い輻輳を生み出していることが示唆された。これに関しては、ノード数がかかり多い場合にも対応できるような Δ を設定するこ



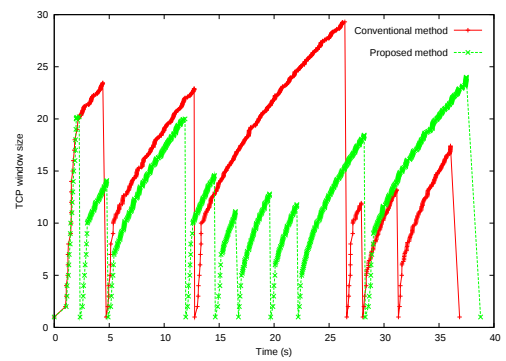
(a) ノード数 4



(b) ノード数 7

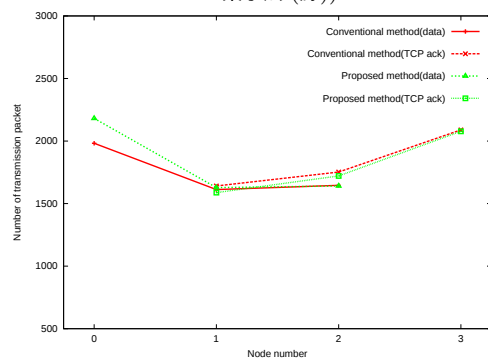


(c) ノード数 10

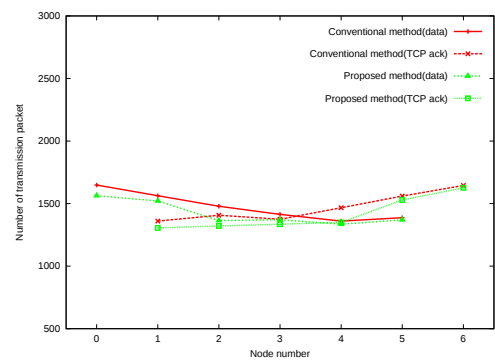


(d) ノード数 19

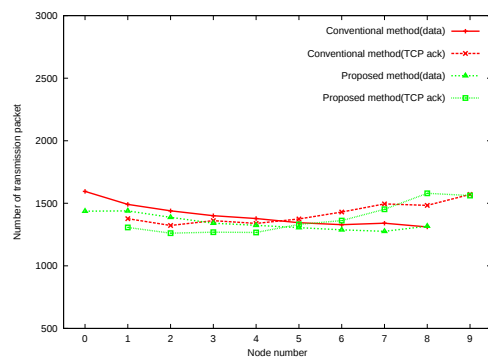
図 11 両端ノード間距離を固定した場合の各ノード数のウィンドウサイズ (従来手法 (赤), 提案手法 (緑))



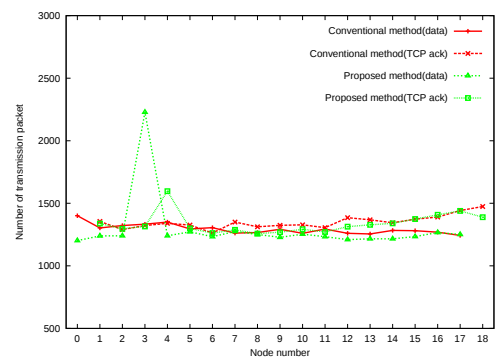
(a) ノード数 4



(b) ノード数 7



(c) ノード数 10



(d) ノード数 19

図 12 両端ノード間距離を固定した場合の各ノードによるパケット伝送回数 (従来手法 (赤), 提案手法 (緑))

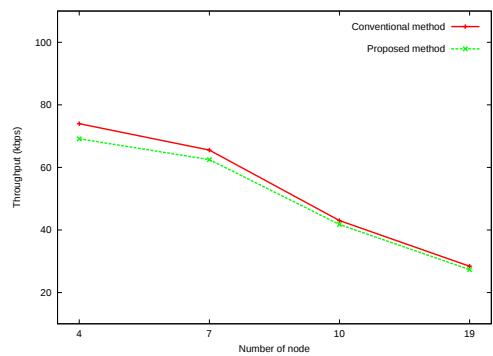


図 13 両端ノード間距離を固定した場合のホップ数とスループットの関係 (従来手法 (赤), 提案手法 (緑))

表 4 両端ノード間距離を固定した場合の提案手法による改善率

ノード数 (n)	4	7	10	19
パケット伝送総数	101 %	96.2 %	97.1 %	99.6 %
平均ウィンドウサイズ	110 %	149 %	123 %	77.4 %
スループット	93.5 %	95.4 %	96.5 %	96.6 %

表 5 両端ノード間距離を固定した場合の TCP Tahoe が輻輳回避モードに入った回数

ノード数 (n)	4	7	10	19
既存の通信の場合	6 回	2 回	3 回	5 回
提案手法を用いた場合	4 回	0 回	2 回	8 回

とが今後の課題として挙げられる。

提案手法の有効性については、ほとんどの場合で輻輳を緩和することができたため Δ の設定方法については課題が残るが、データリンク層で伝送周期を空けるという考え方は有効であると考えられる。また、輻輳の緩和とスループット向上の両方を実現するためには、通信の状況に応じて待ち時間 Δ を動的に変化させる必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、無線マルチホップネットワーク上での TCP の輻輳を緩和することを目的とした。その手法として各ノードにおいてデータリンク層の ACK を受信してから次のパケットを伝送するまでに、データリンク層での送信時刻と受信時刻、伝送時間と、ノード数を考慮した待ち時間を置いて伝送する手法を提案した。

シミュレーションを通して、提案手法が、電波干渉を抑制し、無線通信の輻輳を緩和させることを示した。

今後の課題として、手動で設定した待ち時間 Δ_n を、自動で設定し、強い輻輳にも対応させることが挙げられる。また、輻輳緩和とスループット向上を両立するために、ウィンドウサイズなど通信の状況に応じて、待ち時間を変化させることが有効と思われる。さらに、より複雑な通信環境下におけるこの手法の有効性を調査することも課題である。

参考文献

- [1] 古川 浩, 「無線マルチホップネットワークにおけるパケット送信間隔制御法の提案」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.103, pp.97-102, 2003.
- [2] 古川 浩, 「無線マルチホップネットワークにおける周期的間欠送信法の適応を前提とする渦巻きルーティングの提案」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.103, pp.33-38, 2004.
- [3] 丸田 一輝, 東坂 悠司, 比嘉 征規, 古川 浩, 「TCP トラフィックを想定した経路予約型周期的間欠送信」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, pp.111-116, 2007.
- [4] Sumit Rangwala, Apoorva Jindal, Ki-Young Jang, Konstantinos Psounis, and Ramesh Govindan, “Understanding Congestion Control in Multi-hop Wireless Mesh Networks”, Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking, pp.291-302, 2008.
- [5] Qi Chen, Felix Schmidt-Eisenlohr, Daniel Jiang, Marc Torrent-Moreno, Luca Delgrossi, and Hannes Hartenstein, “Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2”, Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '07), pp.159-168, 2007.