

# 無線アドホックネットワークにおける 公平性及び総スループット向上に関する研究

チュオンヴァン ニャットミン<sup>†</sup> 中川 健治<sup>†</sup> 渡部 康平<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 長岡技術科学大学 大学院工学研究科 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡 1603-1

あらまし 近年、無線アドホックネットワークのアプリケーションの応用が広くなり、アドホックネットワークに関する研究が多く注目されている。無線アドホックネットワークでは、地理的な位置に関係なく、すべてのユーザーを公平に扱う必要がある。しかし、IEEE 802.11 標準に基づく構成では、各ユーザー間での帯域幅共有に深刻な不公平問題が発生する。本研究では、公平性を向上させるため、Loan Counter Round robin Queue (LCRQ) を提案する。LCRQ では、リンク層においてフローごとに個別のキューを使用し、ラウンドロビン (RR) 方式でキューのパケットの入出力を制御する。シミュレーション結果より、提案法は従来法より公平性と総スループットの両方の特性の向上を達成した。  
キーワード アドホック、公平性、総スループット、PCRQ、Round Robin、リンク層、LCRQ

## Improvement of Fairness and Throughput in Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks

Truong VAN NHAT MINH<sup>†</sup>, Nakagawa KENJI<sup>†</sup>, and Watabe KOHEI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka City, Niigata Prefecture, 940-2188 Japan

**Abstract** There has been a lot of researches study about Wireless Ad hoc networks in recent years since they promise a wide range of applications. In wireless ad hoc networks, all users need to be treated fairly regardless of their geographical positions. However, their structures, which are based on the IEEE 802.11 standard, cause a severe unfairness problem in bandwidth sharing among different users. In this Paper, we propose Loan Counter Round robin Queue (LCRQ) scheduling to improve the fairness, in which individual queue for each of the direct and forwarding flows are used, then serve queues in Round Robin (RR) fashion. In link layer, 2 algorithms are introduced to control the number of input packets to a queue, and the number of output packets from a queue. Simulation results show that the proposed method achieves a better fairness with a good total throughput compared to conventional methods.

**Key words** Ad-hoc, Fairness, Total Throughput, PCRQ, Round Robin, Link Layer, LCRQ

### 1. ま え が き

無線 LAN の通信方式には、インフラストラクチャモードとアドホックモードの二種類が存在する。インフラストラクチャモードはアクセスポイントを介して、通信を行う方式である。しかし、インフラストラクチャネットワークは通信インフラを使用するネットワークであるため、通信範囲の拡大には多くのコストを要する点や災害時のネットワーク構築が困難な点がデメリットとして挙げられる。

一方、アドホックモードは、アクセスポイントを介さず、直接端末同士で無線通信を行う方式である。アドホックネットワークを構築する無線端末群は自律分散的にネットワークを構築するため、インフラストラクチャネットワークよりも高速か

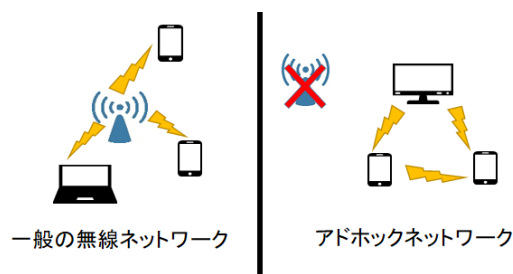


図 1 一般の無線ネットワークとアドホックネットワーク

Fig. 1 Normal Wireless Network vs Adhoc Network

つ安価にネットワークを構築することが可能であり、インフラストラクチャネットワークの構築が困難な状況においてもネッ

トワークを構築できる

このアドホックモードによって、端末が相互に繋がって構成されるネットワークをアドホックネットワークと呼ぶ。アドホックネットワークは、マルチホップの技術を用いている。マルチホップとは、端末が他の端末との送受信を行うだけでなく、中継器の役割も担う通信方式である。よってアドホックネットワークでは、端末自身が生成するパケットを送信する直接フローと近くの他の端末からの通信を中継し、転送する転送フローの二つが存在する。それぞれの端末は、直接フローと転送フローの二種類のパケット（データ）を送信する必要がある。しかし、直接フローのパケットは生成されてからすぐキューに入れるが、転送フローのパケットがソースからキューに到着するまでに時間がかかる。そのため、直接フローのパケットがほとんどのバッファ領域を占有し、転送フローのパケットはバッファオーバーフローでドロップされる。それぞれの端末間でのスループット（単位時間あたりのデータ通信量）に偏りが生じる。この偏った状態を不公平であるという。また、公平性と総スループットはトレード・オフがあって、公平性を優先すると全体のスループットが低くなることもある。これらの公平性とスループットのトレード・オフの問題を引き起こすことがアドホックネットワークの問題点として挙げられている。

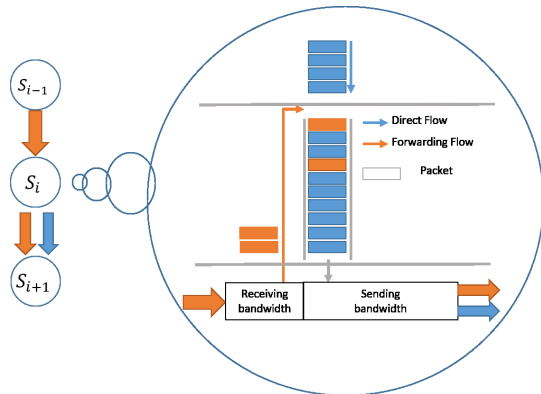


図2 リンク層の問題

本稿では、公平性と総スループットの最適化及び処理時間の短縮を行う手法を提案する。

## 2. 先行研究

Giang ら [1] は、Probabilistic Control on Round Robin Queue (PCRQ) を提案した。PCRQ では、RR キューを制御のため、3つのアルゴリズムを組み合わせで適用している。3つのアルゴリズムを以下に示す。

アルゴリズム 1 では、キュー長の長いフローのパケット挿入を制御し、キュー  $i$  に到着パケットが以下の確率でキューに挿入される。

$$P_i^{input} = \begin{cases} 1 & qlen_i \leq ave \\ 1 - \alpha \frac{qlen_i - ave}{(\#flow - 1)ave} & qlen_i \geq ave \end{cases} \quad (1)$$

$\alpha$  は定数、 $\#flow$  はフロー数、 $qlen_i$  はフロー  $i$  のキュー長、 $ave$

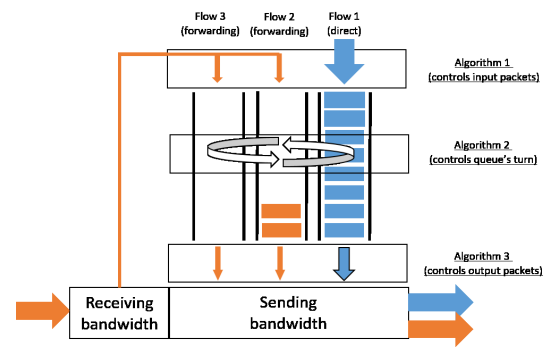


図3 PCRQ [1] スケジューリング

は平均キュー長を表す。アルゴリズム 1 により、直接フローのパケットをドロップさせ、フロー全体のキュー長をより公平にする。

アルゴリズム 2 では、パケットの読み出し前に確率的に待機を行い、読み出しポインターがキュー  $i$  で以下の確率で待つ。

$$P_i^{turn} = \begin{cases} \beta \frac{\#flow \cdot ave}{q_{max}} & qlen_i = 0 \\ 0 & qlen_i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$\beta$  は定数、 $q_{max}$  はキュー長の最大値を表す。アルゴリズム 2 により、空のキューに遅延を与え、新しいパケットの到着を待ち、転送フローのキューが読み出される機会を増やす。

アルゴリズム 3 では、パケットの送出時に確率的に遅延を与え、帯域を空け、他フローのパケット送信を可能にする。キュー  $i$  にパケットが以下の確率より送出される。

$$P_i^{output} = \begin{cases} 1 & qlen_i \leq ave \\ 1 - \gamma \frac{qlen_i - ave}{(\#flow - 1)ave} & qlen_i \geq ave \end{cases} \quad (3)$$

$\gamma$  は定数を表す。アルゴリズム 3 より、転送フローに対して多くの帯域幅が与えられる。したがって、転送フローのスループットが向上する。

先行研究 [1] の目的は、公平性の改善である。高い公平性を達成するため、有利なフローのパケットに遅延を与えている。先行研究の問題点として、公平性は改善されているが、端末が多いほど、総スループットが低下するなどの問題が生じる。また、先行研究は各端末のパケット送出をキュー長で制御するので、キュー長が短ければ制御が困難になる。

## 3. 提案法

本研究では、アドホックネットワークに公平性と総スループットを達成のため高速な制御アルゴリズムを提案する。提案法では、以下の2つのアルゴリズムを用いる。

アルゴリズム 1 では、到着率が高いフローのパケットをドロップさせ、全体フローのキュー長をより公平にするため、PCRQ [1] のアルゴリズム 1 をそのまま利用する。

アルゴリズム 2 では、Loan Counter (LC) を使ってリアルタイムでパケットの送出を制御する。

### 3.1 Algorithm 1

式 (1) の確率により、キューに到着パケットをドロップさせ

るかをコントロールする。

---

**Algorithm 1** Controlling the number of input packets to queues

---

when a packet is sent to the MAC Layer

calculate  $P_i^{input}$  by (1)

**if** the new Packet is the first packet of the flow **then**

    create a new queue

    enqueue the packet by following the probability which calculated at (1);

**else**

    enqueue the packet by following the probability which calculated at (1);

**end**

---

### 3.2 Algorithm 2

提案法は 1 ラウンドでの送出可能量を事前に決めておく必要がある。各フローの 1 ラウンド当たりの送信量は Loan Counter(LC) で制御する。各ラウンドに、読み出されるキュー

---

**Algorithm 2** Controlling the number of output packets from queues

---

Each time the reading pointer points to queue  $i$

$LC_i$  is the Loan Counter of Queue  $i$

$\#Flow$  is the number of flows which exist in the current node

**if**  $qlen_i == 0$  or  $LC_i < 0$  **then**

$LC_i ++$

**end**

**if**  $qlen_i > 0$  **then**

**if**  $LC_i > 0$  **then**

        do

            while( $LC_i > 0$  and  $qlen_i > 0$ )

                dequeue a packet from queue  $i$

$LC_i --$

**end**

**if**  $LC_i == 0$  **then**

        dequeue a packet from queue  $i$

**if** the pointing queue is the longest queue in the current node **then**

$LC_i = LC_i - (\#Flow - 1)$

**end**

**end**

**end**

**end**

turn the reading pointer to the next queue

---

でパケットがないまたはパケットが送出できなければ、LC に 1 を加える。パケットがあれば、LC 個のパケットを送出し、送出した分を LC から減らす。LC が負にならない限り送出を続ける。また、有利なフローすなわち最もキュー長が長いフローについて、1 つのパケットを送出したら、次の  $n$  ラウンドのパケット送出を停止する。ただし、 $n$  は [フロー数 - 1] である。

アルゴリズム 2 では、転送フローのスループットを向上させながら、直接フローにもペナルティーを与える。また、提案法はペナルティを与える時、直接フローだけが影響を受け、他のフローには影響しないようにしている。

## 4. 特性評価

本稿では、提案法のパフォーマンスを評価するため、IEEE802.11 標準の FIFO スケジューリング, PCRQ[1] スケ

表 1 シミュレーション条件

Channel bandwidth	2 Mbps
Antenna type	Omni direction
Radio Propagation	Two-ray ground
Transmission range	250 m
Carrier sensing range	550 m
MAC protocol	IEEE 802.11b
Routing protocol	DSDV
Connection type	UDP/CBR
Queue type	FIFO, PCRQ, Proposed
Maximum Queue length	100 packets
Packet 's size	1024 Bytes
Slot time	20 $\mu$ s
Simulation time	300 s

ジューリングと比較した。シミュレーションのパラメータを表 1 に示す。各フローに、毎秒のパケット数を 1 から 250 に徐々に増やす。つまり、各ノードのオフアードロードが 8[Kbps] から 2[Mbps] に徐々に増加させる。また、オフアードロードが十分大きい時、チャンネルが飽和状態になって 1 つのフローがチャンネルを占有する可能性が高い。

3 つの手法のパフォーマンスの評価メトリックは airness Index (FI; 公平性) と Total Throughput (総スループット) である。Fairness Index は以下の式 (4) で定義される [8]。

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^N Th_i)^2}{n * \sum_{i=1}^N (Th_i)^2} \quad (4)$$

式 (4) には、 $N$  はフロー数、 $Th_i$  は  $i$  フローのスループットを表す。Fairness Index(FI) の範囲は  $[1/n, 1]$  であり、1 に近ければ公平性が高い。Total Throughput  $\sum_{i=1}^N Th_i$  も評価する。

本稿では、3 つのトポロジでシミュレーションを行なった。トポロジ 1 は、ネットワークの基本であるチェントポロジを設定した。トポロジ 2 はトポロジ 1 よりノード数が多いチェントポロジを設定した。トポロジ 3 は、トポロジ 1 より MAC 層の処理が複雑なトポロジを設定した。

### 4.1 トポロジ 1

トポロジ 1 は、図 4 に示す 3 ノードチェントポロジである。ノード 1 とノード 2 は UDP パケットを生成してノード R に送信する。3 ノードチェントポロジには、ノード 1 が自身のデータとノード 2 からの転送データとも両方を送信する。そのため、ノード 1 においてフロー 2 とフロー 1 がチャンネルを競合する。

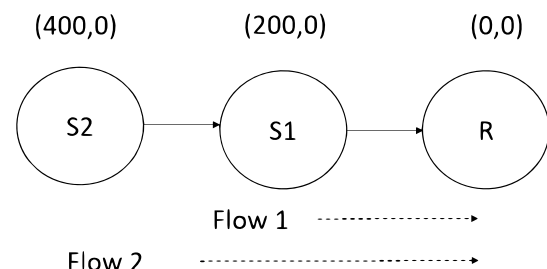


図 4 3 ノードチェントポロジ

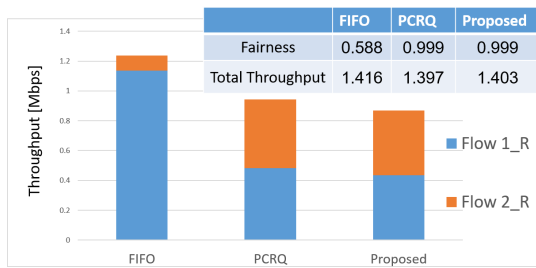


図5 ノード R を通過する各フローのスループット

図5より、FIFO スケジューリングはノード1からノード R へのフローがほとんどバッファ帯域を占有することが確認できる。そのため、ノード2がほとんど送信できないと考えられる。図6より、FIFO スケジューリングの公平性が最も低いと確認

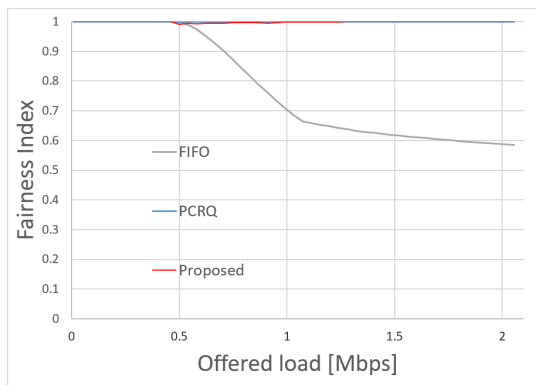


図6 3 ノードチェーントポロジの公平性

できる。また、PCRQ [1] スケジューリングと提案法は両方とも高い公平性を達成できている。図7より、総スループットは3つの手法はほぼ同じ値が達成できると確認できた。

#### 4.2 トポロジ2

トポロジ2は、図8に示す7ノードのチェーントポロジである。ノードS1からノードS6は、ノードRへのUDPパケットを生成する。このトポロジは、MAC層とリンク層の両方で不公平問題が起きる。したがって、ノードRから遠いノードほどスループットは小さい。

図9より、提案法は最も高い公平性を達成できるスケジューリングと確認できた。ノードS1のFIFOキューでは、直接フ

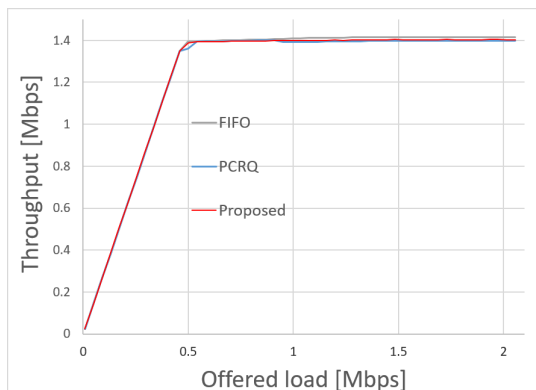


図7 3 ノードチェーントポロジの総スループット

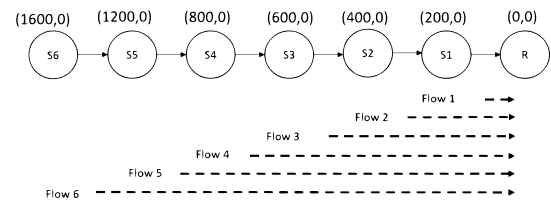


図8 7 ノードチェーントポロジ

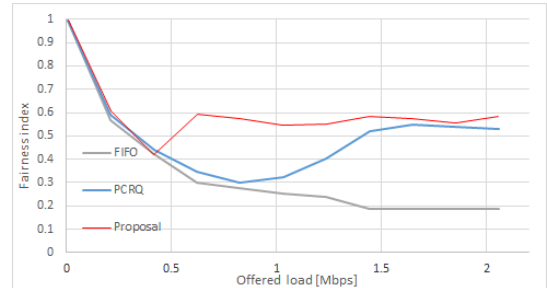


図9 7 ノードチェーントポロジの公平性

ローのパケットがほとんどのバッファスペースを占有している。したがって、キューの中にはほとんどが直接フローのパケットで、他フローのパケットをキューに挿入できなくなっている。また、PCRQ [1] スケジューリングでは、キュー長によってパケット送信を制御するため、FIFO より公平性を達成できるが、オフロードが1[Mbps]以下の時、全てのフローのキュー長が短く、各フローのキュー長差は大きくないため、PCRQ [1] の公平性改善が高くないと考えられる。輻輳がキュー長に反映するまでに時間がかかるので、リアルタイムでキュー長によって制御することが困難になっている。提案法は、LCを利用してパケット単位で制御するため、パケットが存在すれば、すぐに早速制御ができる。図10より、提案法の総スループットはFIFO

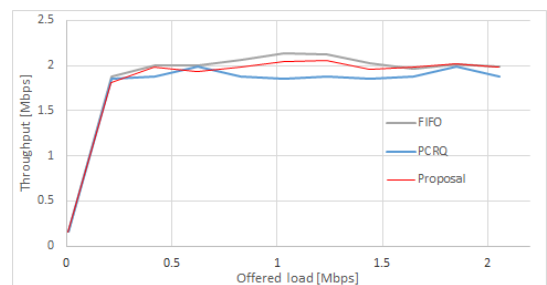


図10 7 ノードチェーントポロジの総スループット

の総スループットより少し下がるが、PCRQ [1] の総スループットより高いことが確認できる。その理由としては提案法のアルゴリズム2ではペナルティとして、遅延を与えるため、FIFO より総スループットが下がると考えられる。また、PCRQ [1] は遅延を与えると、すべてのフローが影響を受けて総スループットが低下する。

#### 4.3 トポロジ3

トポロジ3は、フロー4、フロー3とフロー2がチャンネルの帯域を競合する。ノード3はノード2とノード4の影響を受けるため、ノード3の通信が困難になる。

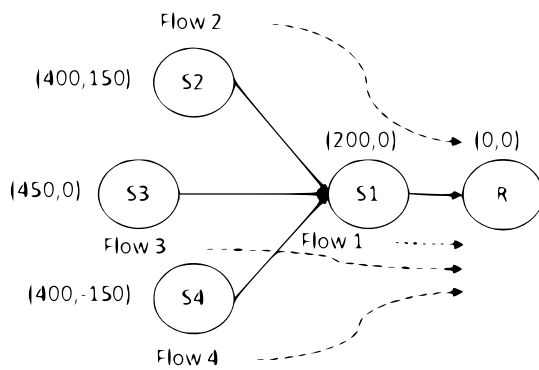


図 11 3 チェーン 5 ノードトポロジ

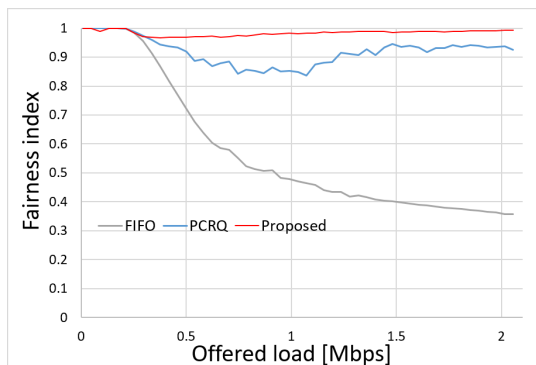


図 12 7 ノードチェーントポロジの公平性

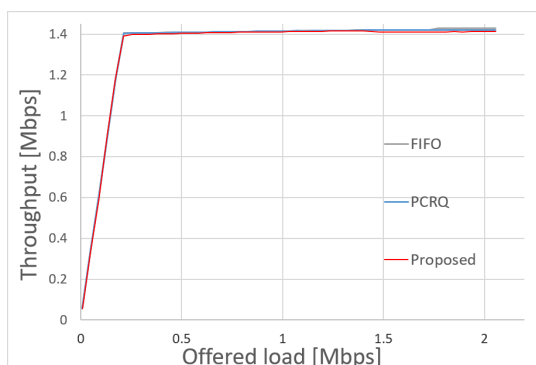


図 13 7 ノードチェーントポロジの総スループット

図 12 より、オフロードロードが 0.38Mbps から、提案法は最も公平性が高いことが確認できる。オフロードロードが 0.38[Mbps] から、提案法は公平性の改善が始まったが、PCRQ [1] スケジューリングは 1.15[Mbps] から公平性の改善が始まる。つまり、提案法は PCRQ [1] より公平性の制御が速いことを確認できる。図 13 より、総スループットについては、3 つの手法がほぼ同じことが確認できる。

## 5. ま と め

本稿では、アドホックネットワークにおける公平性と高い総スループットを達成するための高速な制御アルゴリズムを提案した。提案法では、2 つのアルゴリズムを使用した。アルゴリズム 1 は、PCRQ [1] のアルゴリズム 1 を利用して、全体フローのキュー長をより公平にした。アルゴリズム 2 は、Loan Counter(LC) を各ノードのローカル情報によって制御するため、

リアルタイムでパケット送出制御することができた。3 種類のシミュレーションを実行し、その結果から、提案法は従来法と総スループットを同等以上に保ちつつ、公平性の高速な改善を行っている。

## 6. 今後の方針

本稿では、アドホックネットワークの公平性を改善したが、主にリンク層に注目している。しかし、他の層においても不公平な問題が起きている [9] [10]。そのため、最適な提案法を提案するため、他の層の問題についての研究が必要になる。

## 文 献

- [1] Pham Thanh GIANG, Kohei WATABE and Kenji NAKAGAWA, "Fairness and throughput improvement for multi-hop wireless adhoc networks", IEICE Trans. on Commu., vol.E92-B, no.8, pp.2628-2637, August, 2009.
- [2] Tuan Minh NGUYEN, Kohei WATABE, Pham Thanh GIANG and Kenji NAKAGAWA, "Improving Fairness in Wireless Ad Hoc Networks by Channel Access Sensing at Link Layer and Packet Rate Control", EICE Transactions on Communications, Vol E100.B, No.10, pp.1818 - 1826, April 2017.
- [3] Keerthi Suresh, "Improving Fairness in Wireless Ad Hoc Networks by Queueing Control", 2018 Winter Internship Report
- [4] Shreedhar, M.Varghese, "Multi-Queue Fair Queueing", Efficient fair queueing using deficit round robin". IEEE/ACM transaction on networking, vol.4, no.3, pp.375-385, June 1996
- [5] Hedayati, Mohammad and Shen, Kai and Scott, Michael L and Marty, Mike, "Multi-Queue Fair Queueing", Annual Technical Conference, vol.19 pp.301-314, October 2018.
- [6] Lamar Jabeen, Fazlullah Khan, Shahzad Khan and Mian Ahmad Jan, "Performance Improvement in Multihop Wireless Mobile Adhoc Networks", Computer Science Department, Abdul Wali Khan University, Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, vol.6, no.4S, pp.82-92, 2016.
- [7] Sharma, Naveen Kr and Liu, Ming and Atreya, Kishore and Krishnamurthy, Arvind, "Approximating fair queueing on reconfigurable switches", Symposium on Networked Systems Design and Implementation, pp.01-16, 2018.
- [8] R.Jain, D.-M. Chiu, and W. Hawe, A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems, vol.38. Hudson, MA: Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.
- [9] Xylomenos, George, *et al.*, "TCP issues over wireless links", IEEE Communication Magazine, vol.39, no.4, pp.52-58, Apr.2001.
- [10] Al-Jubari, Ammar Mohammed, *et al.*, "TCP performance in multi-hop wireless ad hoc networks: challenges and solution", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2011, no.1, pp.1-25, Dec. 2011.