

無線ネットワークにおける受信確率を考慮した リンクスケジューリングアルゴリズム

田島 滋人[†] 船曳 信生^{††} 東野 輝夫[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科

^{††} 岡山大学工学部通信ネットワーク工学科

E-mail: [†]{tajima,higashino}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}funabiki@cne.okayama-u.ac.jp

あらまし 無線LANやアドホックネットワークなどの無線パケットネットワークにおいて、動画や音声などのマルチメディアストリーミングを行うには、ホスト間の電波干渉を回避するリンク動作スケジューリングによる周期的動作が有効である。その際、無線通信では、ホスト同士が互いの電波受信範囲内に位置する場合にも、伝送路の状態によっては、パケットが受信ホストに正しく到達するとは限らないため、受信成功確率を考慮することが必要となる。本論文では、リンクの受信確率が与えられた場合のリンク動作周期のスケジューリングアルゴリズムを提案する。本アルゴリズムでは、一定レベル以上の受信確率を確保できるリンク動作回数を予め計算しておき、1周期内にその回数を割り当てるスケジューリングを探査する。ランダムに生成した例題に対するシミュレーションを通じて、提案アルゴリズムによるリンク動作スケジューリングが、従来の再送を考慮しない場合よりも、全パケットの送信時間を短縮することを示す。キーワード リンク動作スケジューリング、NP困難、ヒューリスティック解法、無線パケットネットワーク、受信確率

A Link Activation Scheduling Algorithm Considering Transmission Success Rates in Packet Radio Networks

Shigeto TAJIMA[†], Nobuo FUNABIKI^{††}, and Teruo HIGASHINO[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology

^{††} Department of Communication Network Engineering

E-mail: [†]{tajima,higashino}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}funabiki@cne.okayama-u.ac.jp

Abstract In packet radio networks such as wireless local areas networks and ad-hoc mobile networks, periodic activations of the communication links between adjacent hosts by following the conflict-free link activation schedule is effective to realize the multi media streaming of motion pictures and voices. For better schedules, success rates of link activations should be considered, because packets may be lost before reaching receiving hosts when transmission path conditions are not good, even though these communication hosts are located within the range of radio transmissions. In this paper, we present a link scheduling algorithm for periodic link activations in packet radio networks when the transmission success rate is given for every link. In this algorithm, the number of activation times in one cycle is calculated for each link beforehand that satisfies the minimum success rate, and the schedule of activating the link by this number without conflict is found. Through simulations in randomly generated instances, we show that the schedule by our algorithm can reduce the total transmission time required to complete packet transmissions.

Key words link activation schedule, NP-hard, heuristic algorithm, packet radio network, transmission success rate

1. はじめに

無線LANやアドホックネットワークなどの無線パケットネッ

トワークでは、一般にその通信に、同一周波数帯の無線チャネルを利用するため、隣接ホスト間で同時に無線リンクを動作させた場合に、それらの中で電波干渉が生じる。この電波干渉が

発生した場合、パケット損失となり、再送すなわちリンクの再動作が必要となる。そのため、無線パケットネットワークの伝送効率向上には、電波干渉の発生を抑えることが非常に重要である。また、無線ネットワークを構成するホストは、通常、移動可能なバッテリー駆動の小型端末であることから、その消費電力を抑えるためにも、電波干渉の低減が不可欠となる [9]。これより、電波干渉の回避を考慮したリンク動作タイミングの決定は、無線ネットワークの効率的な利用のために、非常に重要な課題と言える。

本論文で対象とする無線ネットワークでは、文献 [5], [6], [9] と同様の仮定をおいている。すなわち、半二重通信、チャネル数 1、パケット長一定であり、各ホストはタイムスロットと呼ばれる単位時間ごとに動作している (TDMA 方式)。また、静止ホストのみが通信に関与し、それらのホスト位置が既知であるものとしている。タイムスロットは、単一クロックにより、ネットワーク全体で同期されている。1 タイムスロットでは、パケットの送信とその受信成功もしくは失敗の返答 (ACK) が行なわれるものとする。

本論文では、以上の無線ネットワーク上で、音声、動画などのマルチメディアストリーミングを行うことを想定している。マルチメディアストリーミングでは、遅延時間の上限内に、一定帯域のデータを定期的、継続的に通信する必要があることから、ホスト間の電波干渉を回避する周期的なリンク動作が有効な手段であると考えられる。そのため、我々の研究グループでは、マルチメディアストリーミングを行う全リンクの周期的動作時のスケジューリング探索を、組合せ最適化問題として定式化し、そのヒューリスティックアルゴリズムに関する研究を進めてきた [10], [11]。全リンクの動作時間が均一である場合、本問題は NP 困難のグラフ彩色問題に帰着できることが知られており [2], [3]。これまでにグラフ彩色アルゴリズム [8] を応用した、電波干渉 0 となるリンク動作スケジューリングアルゴリズムを提案している [10]。

本論文では、その発展として、リンク受信成功確率を考慮した場合のリンク動作スケジューリングアルゴリズムを提案する。無線ネットワークでは、ホスト同士が互いの電波受信可能範囲内に位置する場合にも、電波干渉や電波雑音などのために、受信ホストにパケットが正しく伝送されない場合が生じる。パケット伝送に失敗した場合には、通常、その再送を行う。あるリンクに対するパケット受信成功確率は、ホスト性能 (出力電波の強度、処理能力) やホスト間の伝送路状態 (ホスト間距離、障害物の有無、電波干渉) などの影響を受ける。そのため、パケット受信成功確率 (受信確率) を予め見積もることができる場合には、それを考慮したリンク動作スケジュールを生成することで、それを考慮しない場合に比べて、より短い時間で多数のパケットを送信できると考えられる。

本論文のアルゴリズムでは、リンクの受信確率が、ある閾値よりも大きくなる動作回数を予め計算し、1 周期内にその動作回数分のリンク動作を含むスケジュールを求めることとしている。リンク動作の失敗時には、それを考慮せずに生成したスケジュールでは、再送が次の周期での動作タイミングまで待たさ

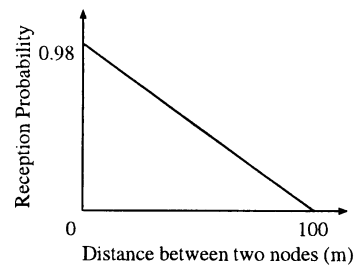


図 1 ホスト間距離と受信確率

れることになり、その後のパケット転送に大きな影響を与えることが予想される。そこで、本論文では、再送動作を考慮したスケジュールを生成し、再送タイミングを早めることで、ネットワーク全体でのパケット転送効率を向上させることを狙いとする。求められたリンクの再送回数は、無線ネットワークのトポロジを表すグラフにおける辺の整数値重みとして与えられる。

文献 [6] に示されるように、リンクスケジューリング問題には、通信路上のリンク動作順序を保持する SAS 問題と、それを保持しない NAS 問題とがある。文献 [10] に示したように、パケットを長時間に渡って通信するマルチメディアストリーミングでは、後者の NAS 問題が優れているため、本論文では、NAS 問題を対象とする。

以下に、本論文の構成を示す。まず、2. において、本論文で対象とする無線ネットワークを説明する。3. において、リンクスケジューリング問題の定式化を行う。4. において、提案する受信確率を考慮したリンク動作スケジューリングアルゴリズムについて述べる。5. において、ランダムに生成した例題に対するシミュレーション結果を記述する。最後に、6. において本論文のまとめを行う。

2. 対象とする無線ネットワーク

2.1 ホスト間リンクの動作

本論文で対象とする無線ネットワークは、半二重通信、チャネル数 1、パケット長一定であり、各ホストはタイムスロットごとに動作しているものとしている。各ホストの最大電波到達半径は、簡単のために、100m としている。すなわち、各ホストは、自ホスト位置から半径 100m の範囲にあるホストとの通信が可能となる。このとき、ホスト間距離が大きくなるにつれて、受信ホストで受信可能となる電波強度が小さくなり、SN 比が悪化する。そのため、各ホスト間リンクでは、その距離に応じて、通信時のパケット損失確率が高くなると考えられる。本論文では、簡単化のために、各リンクでの受信確率は、ホスト間距離に線形に依存するものとしている。図 1 に、ホスト間距離と受信確率の関係を示す。なお、受信確率を、より現実に近いモデルに置き換えることも容易に可能である。

各リンクでは、その受信確率に従ってランダムに、パケット受信の成功/失敗 (パケット損失) が発生するものとする。パケット損失が発生した場合には、受信ホストがそのことを送信ホストに伝えることで、送信ホストが再送を行うこととする。

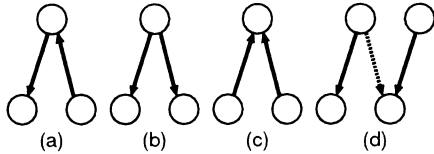


図2 一次干渉と二次干渉

2.2 ネットワークのトポロジ

本論文では、静止中のホストのみが通信に関与し、その位置が GPS (Global Positioning System) などにより、すべて既知であるとしている。そのため、ネットワークのトポロジは、ホストを頂点に、ホスト間リンクを辺に対応させることで、重み付きグラフ $G = (V, E)$ (以下、接続グラフ) で表すことができる。グラフの辺は、その両端に対応するホスト間の距離が、100m 以下の場合に設定されるものとし、前述の受信確率がその重みとして与えられる。ここで本論文では、接続グラフが変化しない期間を対象としている。

2.3 リンク動作の電波干渉

本ネットワークでは、全ホストが同一チャネルを用いて動作を行うため、互いに電波の届く範囲にある複数のホストが同時 (同一タイムスロット) に送信、または、受信の動作を行う場合、その間で電波干渉が発生し、パケットが正しく受信できなくなる。図2に、本ネットワークで発生し得る干渉を示す。図2の (a) では送信、受信を同時に行うホストでの干渉、(b) では2ホストへの異なる通信を同時に行うホストでの干渉、(c) では2ホストからの通信を同時に受信するホストでの干渉、(d) では受信ホストが他ホスト向けの通信を受信する場合の干渉を、それぞれ示している。本論文では、2.2の接続グラフの辺が、電波干渉を引き起こす2ホスト間の関係も表すこととしているが、必ずしも一致させる必要はない。通常、電波干渉を引き起こす可能性のある2ホスト間の距離は、通信可能な距離よりも大きいと考えられる。

2.4 ネットワークの通信要求

本ネットワークでの通信要求は、送信ホストと受信ホストのペア (SD ペア) で与えられる。ネットワークで通信要求が発生した際には、まず、その間の通信経路を見つける必要があるが、これについては、文献 [7] の方法などで探索されるものとしている。また、本論文では、音声、動画などのマルチメディアストリーミングを対象としているため、各通信要求は、長時間に渡って、継続されるものとしている。

2.5 ネットワークの通信動作

本ネットワークでは、マルチメディアストリーミングを実現するために、周期的に、通信要求の充足に必要な全リンクの動作を行うこととしており、その周期を TDMA サイクルと呼んでいる。TDMA サイクルの中で、全 SD ペア経路上の全リンクが1回動作すれば、通信が正しく行われるが、この動作回数をリンクの受信確率に応じて変化させることで、ネットワークの通信効率を改善することが可能になると考えられる。

本論文では、予め適切なリンク受信確率の閾値を求めておき、

再送を考慮した場合の受信確率がその閾値以上となるリンク動作回数を求める。そして、その回数分のリンク動作を、TDMA サイクル中にスケジュールすることで、通信効率の改善を図ることとする。受信確率 r のリンクにおいて、閾値 S を満たすリンク動作回数は、以下の式を充足する最小の k で与えられる。

$$1 - (1 - r)^k \geq S \quad (1)$$

3. リンクスケジューリング問題の定式化

本章では、本論文で対象とする受信確率を考慮したリンクのスケジューリング問題を、組合せ最適化問題として、定式化を行う。まず、本問題の入力には、ネットワークのトポロジを表す接続グラフ $G = (V, E)$ 、リンク受信確率の閾値 S 、ネットワークの負荷を表す通信要求である SD ペアとその経路の集合 R が与えられる。出力は、全 SD ペア上の各通信リンクの周期的動作における、1周期でのスケジュール (TDMA サイクル) である。制約条件は、TDMA サイクル中に各リンクは受信確率の閾値を充足する回数の動作をスケジュールすること、および、電波干渉の発生を0とすることである。最後に、目的条件は、問題の出力である TDMA サイクルの長さ (タイムスロット数) の最小化である。

以下に、本リンクスケジューリング問題の定義を記述する。

- 入力: 接続グラフ $G = (V, E)$ 、リンク受信確率閾値 S 、SD ペアとその経路の集合 R
- 出力: 制約条件を満たす TDMA サイクル
- 制約条件: 各リンクの受信確率閾値を充足する動作回数分のタイムスロットの割り当て、電波干渉の発生が0
- 目的条件: TDMA サイクル長 (タイムスロット数) の最小化

本問題の例として、図3にホスト数6、リンク数8の接続グラフ、表1にSD ペア (SD ペア数3) とその経路を示す。図3のグラフでは、既に、各辺に TDMA サイクル中のリンク動作回数が重みとして記述されている。本例題の解の1つを、表2に示す。本例題では、 $1 \rightarrow 2$ (1回)、 $2 \rightarrow 6$ (2回)、 $4 \rightarrow 2$ (1回)、 $2 \rightarrow 3$ (2回)、 $3 \rightarrow 6$ (3回)のリンクは、同時に動作させた場合に干渉が発生するため、同一タイムスロットにスケジュールすることはできない。これらのリンクは、全て異なるタイムスロットにスケジュールする必要がある。よって、干渉無くスケジュールするには、少なくとも、干渉を起こすこれらのリンクの動作回数の和である9タイムスロット必要となる。また、 $4 \rightarrow 5$ のリンクは、 $1 \rightarrow 2$ 、 $4 \rightarrow 2$ のリンクとの間で干渉が発生するが、これら以外のリンクとの間には干渉が発生しない。したがって、本例題の TDMA サイクルの長さは、9タイムスロットとなる。

4. 提案アルゴリズム

本章では、前章で定義したリンクスケジューリング問題に対して、提案する4段階のヒューリスティックアルゴリズムについて述べる。

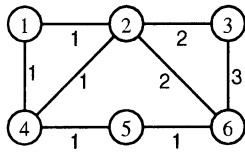


図3 6ホスト接続グラフ

表1 転送要求 (SD ペア) とその経路

| Pair# | S-D | Path |
|-------|-----|---------|
| 1 | 1,6 | 1,2,6 |
| 2 | 4,6 | 4,2,3,6 |
| 3 | 4,5 | 4,5 |

表2 解の例

| Time slot | Link | Time slot | Link |
|-----------|----------|-----------|------|
| 1 | 1→2 | 6 | 2→3 |
| 2 | 4→2 | 7 | 2→3 |
| 3 | 3→6, 4→5 | 8 | 2→6 |
| 4 | 3→6 | 9 | 2→6 |
| 5 | 3→6 | | |

4.1 第1段階：リンク干渉グラフの生成

本アルゴリズムの第1段階では、動作リンクの TDMA サイクル作成に関する制約を表すリンク干渉グラフ $C = (V_C, E_C)$ を生成する。リンク干渉グラフ C では、リンクを頂点とし、そのリンクの動作回数を頂点の重みとする。そして、2つのリンクを同時に動作させると干渉が発生する場合にその対応する頂点間に辺を設ける。このリンク干渉グラフを生成するために、まず各リンクに一意にリンク番号を与える。リンク番号は SD ペア 1 の最初のリンクを $L1$ 、次のリンクを $L2$ と経由するリンクに対して順に与える。同一リンクを複数の SD ペアで利用する場合には、リンク番号はそれぞれ異なる番号を与えることとする。ここで、SD ペア数を m 、SD ペア i ($i = 1, \dots, m$) の経路を構成するリンク数を d_i とする。このとき、総リンク数 (= C の頂点数) n は、式 (2) で与えられる。

$$n = \sum_{i=1}^m d_i \quad (2)$$

図3、表1の例題において与えたリンク番号を図4に、生成したリンク干渉グラフを図5に示す。図5において、細線は一次干渉を、太線は二次干渉を表す。リンク干渉グラフがリンク間の干渉を表現しているため、その隣接頂点間では、異なるタイムスロットに割り当てることが必要となる。したがって、リンクスケジューリング問題はリンク干渉グラフを対象とする彩色問題となる。

4.2 第2段階：総タイムスロット数下限の算出

第2段階では、リンク干渉グラフを用いてタイムスロット数の下限 (LB) を算出する。ここで求めた LB は、解を探索する第3段階、第4段階で用いる。

リンクスケジューリング問題は、リンク干渉グラフの彩色問題となるため、リンク干渉グラフの最大クリークを構成する頂点の重みの和がタイムスロット数の自明な下限となる。

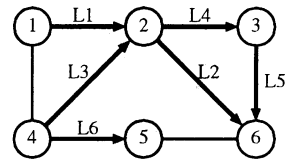


図4 リンク番号

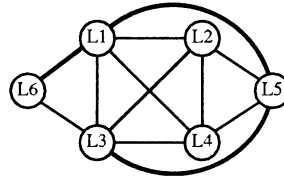


図5 リンク干渉グラフ

本論文では、2つの方法を用いてリンク干渉グラフの最大クリークを近似的に求めている。1つ目の方法は、以下に示す貪欲法 [1] である。

<貪欲法>

- (1) リンク干渉グラフの頂点を次数の降順でソートする。
 - (2) 先頭から l 番目の頂点をクリークを構成する頂点集合の初期値とする。
 - (3) 現時点でのクリークを構成するすべての頂点との間に辺を持つ頂点を、リンク干渉グラフの頂点の次数の降順に順次探索し、見つければクリークを構成する頂点集合に追加する。
- 2つ目の方法は、接続グラフ上の同一ホストを共有するリンクが、リンク干渉グラフ上でクリークを構成することに着目し、その最大次数を探索する最大次数法である。

<最大次数法>

- (1) 接続グラフの同一ホストを共有する動作リンク集合をそのリンク数の降順にソートする。
- (2) 先頭から l 番目のリンク集合をクリークを構成する頂点集合の初期値とする。
- (3) 現時点でのクリークを構成するすべての頂点との間に辺を持つ頂点を、リンク干渉グラフの頂点の次数の降順に順次探索し、見つければクリークを構成する頂点集合に追加する。

上記の2方法で、それぞれ $l = 1, 2, \dots, 15$ としてクリークの探索を行い、頂点数最大のクリークを選択する。ただし、SD ペア数 (m) が 15 以下の場合には、 $l = 1, 2, \dots, m$ とした。

4.3 第3段階：貪欲法による初期状態の構築

第3段階では、彩色問題に対する貪欲法 [1] を用いて、解探索のための初期状態を生成する。総タイムスロット数 (TS) を、第2段階で求めた下限 LB とし、割り当て可能なタイムスロットを探索する。本問題では、リンク干渉グラフ C における次数の高いリンクが、干渉が多く、割り当てが困難と考え、これらのリンクから優先的にタイムスロットへの割り当てを行う。このとき、干渉が発生するために割り当てが不可能なリンクは、未割当リンクリスト L に格納する。したがって、 L の要素数

が 0 のときの TDMA サイクルが求める解となる。

4.4 第 4 段階：極小状態探索法

4.4.1 極小状態の生成

第 3 段階で解が得られない場合には、第 3 段階の最終状態を初期状態とし、式 (3) のコスト関数 E を最小にする状態生成 (最適割当) を繰り返し行うことで探索状態を改善する極小状態探索法を用いて解を探索する。

$$E = A(\text{number of unassigned links}) + B(\text{sum of degrees of unassigned links in } C) \quad (3)$$

ここで A, B ($A \gg B$) は係数である。本段階では、まず、 L から未割り当てのリンクを 1 つランダムに選択する。そして、 E の増加が最小となるタイムスロットへの割り当てを行う。 A を B よりも大きくすることで、干渉を起こすリンク数が最小となるタイムスロットへ割り当てるようにしている。割り当て可能なタイムスロットが複数存在する場合はランダムに選択する。このとき、必ず割り当て済リンクとの間で干渉が発生する。その結果、 E は増加することになる。

タイムスロットへの割り当てを行う際、サイクリックな状態遷移を回避するためにタブーリストを用いる。タブーリストは、リンクとその割り当てたタイムスロットの組で表現され、一定の繰り返し計算の間、その組を保持する。タブーリストに選択したリンクとタイムスロットの組が存在する場合、その組への割り当てを禁止する。

状態遷移を一定回数繰り返し行っても、 E が改善されない場合、ヒルクライムの効果を得るため、 E の増加量に関係なくランダムに選択したタイムスロットへの割り当てを行う (ランダム割当)。

これらの割り当てを行うことで干渉を起こすリンクに対して別のタイムスロットへの割り当てを試みる。もし、割り当て可能なタイムスロットがない場合、そのリンクを L に追加する。そのうえで、 L にあるリンクに対して割り当て可能なタイムスロットの探索を行う。

4.4.2 状態リセットと段階的タイムスロット拡張

ランダム割当を一定回数適用しても E が改善されない場合、それまでの探索で得られた最良の状態に戻り、再度探索を開始する (状態リセット)。さらに、この状態リセットを一定回数試行しても E が改善されない場合、最後の手段として TS を 1 増加させる (段階的タイムスロット拡張)。そして、 L のリンクのうち、この増加したタイムスロットに割り当て可能なリンクの探索を行う。

5. シミュレーションによる評価

本章では、提案アルゴリズムの評価のために、C 言語を用いて実装し、Pentium4 (2.0GHz) 上で実行した結果を示す。

5.1 例題の生成

シミュレーションに用いた例題の生成手順について述べる。まず、ホスト数を $N = 100$ として、各ホストの x 座標、 y 座標は、 $[0, \sqrt{N} \times 100/2]$ の一様乱数とした。SD ペアは、ペア数 $m = N/4$ 、 $N/10$ の 2 種類に対してホストの重複を避けてラ

ンダムに決定し、各ペアの経路は文献 [7] の方法により求めた。乱数の影響を考慮し、各サイズで 5 通りの例題を生成し、また各例題に対してアルゴリズムを 10 回適用した。その上で評価には、10 回の中で最良のものを採用した。

5.2 TDMA サイクル長の評価

まず、表 3-4 に、受信確率の閾値 S を 0.1 から 0.9 まで増加させた場合の提案アルゴリズムによる TDMA サイクル長 TS の変化を示す。“比較”は、受信確率を考慮しない場合 (リンク再送なし) の TDMA サイクル長である。ここで、 $S = 0.1, 0.2$ では、各 SD ペアに対して、リンク動作回数 $k = 1$ のリンクのみの経路が選択されるため、比較と同じ結果となっている。

これより、提案アルゴリズムでは、閾値 S を大きくすることによって、TDMA サイクル長が大きくなっていることがわかる。すなわち、少数パケットの通信には、従来の方法が短い TDMA サイクルで通信可能であるため、効率的であると思われる。しかし、本論文で対象とするマルチメディアストリーミングでは、同じ SD ペア間を長時間に渡ってパケット通信を行う必要があり、その場合に、本アルゴリズムの、予め冗長なリンク動作タイミングを TDMA サイクルに組み込むメリットが得られるものと予想される。

5.3 複数パケット転送性能の評価

次に、図 6-7 に、提案アルゴリズムにより求められた TDMA サイクルを用いて、実際に、 P 個のパケット転送を行った場合の必要となった総タイムスロット数を示す。本シミュレーションでは、問題の入力として与えられるリンクの受信確率で、そのリンク動作の成功/失敗をランダムに判定し、失敗の場合には、そのリンクを次の割り当てタイムスロットで、再度、動作させることとした。この結果より、提案アルゴリズムの方法では、閾値が $S = 0.5$ 付近で最良となり、しかも、従来の受信確率を考慮しない場合 ($S = 0.1, 0.2$ の場合) よりも、少ないタイムスロット数で送信を完了することができていることがわかる。

すなわち、提案アルゴリズムの方法では、リンクの受信確率を考慮することで、パケット損失時の再送回数も含めてのホップ数 (転送数) の少ない経路を選択するとともに、TDMA サイクル中に予めその再送動作を組み込んでおくことで、より効率的な通信を実現している。今後、この両者のどちらがより通信性能の改善に寄与しているかを詳細に調べ、更に優れた TDMA サイクルの構成法を検討していく予定である。

6. おわりに

本論文では、ホスト間リンクでのパケット受信確率を考慮した場合における、全リンクの周期的動作スケジュールを求める問題の定式化と、そのヒューリスティックアルゴリズムの提案を行った。ランダムに生成した例題を通じて、リンク再送を組み込んだスケジュールが、通信性能の改善に寄与することを示した。今後の課題は、5. で述べたものに加え、受信確率のより実際に近いモデルを導入し、提案アルゴリズムの方法の有効性を検証することである。

表3 TDMA サイクル長 ($N = 100, m = 25$)

| | 提案 | | | | | | | | | 比較 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| | s | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | |
| TS | 22.2 | 22.2 | 31.1 | 38.9 | 49.5 | 61.7 | 78.5 | 102.2 | 140.1 | 22.2 |

表4 TDMA サイクル長 ($N = 100, m = 10$)

| | 提案 | | | | | | | | | 比較 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | s | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | |
| TS | 11.3 | 11.3 | 15.5 | 19.3 | 24.1 | 30.5 | 38.6 | 49.8 | 68.3 | 11.3 |

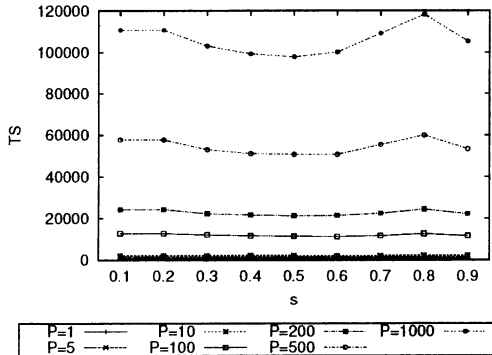


図6 パケット転送時の総タイムスロット数 ($N = 100, m = 25$)

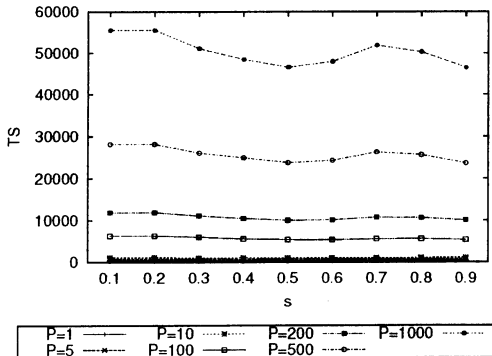


図7 パケット転送時の総タイムスロット数 ($N = 100, m = 10$)

文 献

[1] D. S. Johnson, "Approximation algorithms for combinatorial problems," J. Comput. Syst. Sci., Vol.9, pp.256-278, 1974.
 [2] B. Hajek and G. Sasaki, "Link scheduling in polynomial time," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.34, no.5, pp.910-917, Sep. 1988.
 [3] U. Mukherji, "A periodic scheduling problem in flow control

for data communication networks," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.35, no.2, pp.436-443, Mar. 1989.

[4] J. E. Wieselthier, C. M. Barnhart, and A. Ephremides, "A neural network approach to routing without interference in multihop radio networks," IEEE Trans. Commun., vol.42, no.1, pp.166-177, Jan. 1994.
 [5] R. G. Ogier and D. A. Beyer, "Neural network solution to the link scheduling problem using convex relaxation", Proc. IEEE GLOBECOM '90, 1371-1376, Dec, 1990.
 [6] C. M. Barnhart, J. E. Wieselthier, and A. Ephremides, "A neural network approach to solving the link activation problem in multihop radio networks", IEEE Trans. Commun., vol.43, no.2, pp.1277-1283, Feb. 1995.
 [7] 馬場, 船曳, 西川, "無線通信網の通信経路割当問題を対象としたグリーディ・ニューラルネットワーク解法の提案", 信学誌 D-I, vol.J81-D-I, no.6, pp.700-707, Jun. 1998.
 [8] N. Funabiki and T. Higashino, "A minimal-state processing search algorithm for graph coloring problems", IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E83-A, no.7, pp.1420-1430, Jun. 2000.
 [9] T. ElBatt and A. Ephremides, "Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks", IEEE Trans. Wireless Commun., vol.3, no.1, pp.74-85, Jan. 2004.
 [10] 田島, 船曳, 東野, "無線ネットワークのリンクスケジューリング問題に対するヒューリスティック解法の提案", 情処学論, Vol.45, No. 2, pp.449-458, Feb. 2004.
 [11] 田島, 船曳, 東野, "アドホックネットワークでの干渉を回避するリンク動作スケジューリングアルゴリズム", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2004) シンポジウム論文集, pp.309-312, Jul. 2004.