

アドホックネットワークにおける端末数の変化に応じた TDMA スロット割当て手法

神崎 映光[†] 上 向 俊 晃^{††}
原 隆 浩[†] 西尾 章 治 郎[†]

TDMA (Time Division Multiple Access) 方式は、ネットワークのトラヒックにかかわらず衝突の発生しない転送を実現できるため、アドホックネットワークに有効である。しかし、これまでに提案されている手法では、フレーム長が一定であるために、ネットワーク中の端末数に応じた動的なスロット割当てが行えず、帯域の利用効率が低下してしまう。そこで本論文では、帯域の利用効率を向上させる TDMA スロット割当て手法を提案する。提案手法では、各端末ごとに動的にフレーム長を与えることによって、余分な空きスロットの発生を抑制する。また、フレーム長を 2 の累乗スロットで与えることによって、フレーム長の異なる端末間でも、競合の発生しないパケット転送を実現する。さらに本論文では、提案手法の性能をシミュレーション実験によって評価し、提案手法によって帯域の利用効率が大幅に改善することを確認する。

TDMA Slot Assignment Protocols Considering the Number of Nodes in Ad Hoc Networks

AKIMITSU KANZAKI,[†] TOSHIAKI UEMUKAI,^{††} TAKAHIRO HARA[†]
and SHOJIRO NISHIO[†]

Due to the ability to provide the collision-free packet transmission regardless of the traffic load, TDMA (Time Division Multiple Access) has been applied effectively in ad hoc networks. However, since the frame length in conventional TDMA protocols is fixed, it is impossible to assign slots dynamically according to the number of nodes in the network. This may bring to the deterioration in channel utilization in the wireless network. In this paper, we propose TDMA slot assignment protocols to improve the channel utilization, which avoids the excessive increase of unassigned slots by changing the frame length dynamically. Moreover, by setting the frame length as a power of 2 slots, our proposed protocols provide the collision-free packet transmission among nodes with different frame length. Furthermore, we verify the effectiveness of our proposed protocols by simulation experiments. The results show that our proposed protocols improve the channel utilization dramatically as compared with the conventional protocols.

1. はじめに

近年のハードウェア技術および無線通信技術の進歩により、無線端末のみで暫定的にネットワークを構築できるアドホックネットワークが注目を集めている^{1),5)}。一方、無線ネットワークにおける通信方式の 1 つである TDMA (Time Division Multiple Access) 方式は、

ネットワークのトラヒック量が増大してもパケット衝突が発生しないという特徴がある。そのため、TDMA 方式をアドホックネットワークに応用する研究がさかんに行われている。しかし、これまでに提案されている手法の多くは、端末の自律的な動作について考慮していない^{8),10)}。また、端末の自律的な動作を考慮してタイムスロットの割当てを行う手法でも、利用されないスロットが多数存在するため、帯域の利用効率が低下してしまう可能性がある^{9),12),13)}。

そこで本論文では、端末の自律的な動作を考慮して、帯域をより有効に利用するタイムスロット割当て手法として ASAP (Adaptive Slot Assignment Protocol) を提案する。ASAP では、新規端末が、影響圏の端末

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻
Department of Multimedia Engineering, Graduate
School of Information Science and Technology, Osaka
University

^{††} 大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻
Department of Information Systems Engineering,
Graduate School of Engineering, Osaka University

におけるスロット割当てに応じてフレーム長を動的に変化させることによって、余分な空きスロットの発生を抑制する。ここで、新規端末とは、新たにネットワークに参加する端末を指す。また、影響圏の端末とは、ある端末がパケットを送信するときに衝突を起こす可能性のある端末のことであり、具体的には隣接端末と隠れ端末を指す。

さらに本論文では、ASAP の拡張手法として E-ASAP (Extended ASAP) を提案する。E-ASAP では、ASAP で交換する制御メッセージ内に、より詳細な情報を付加することによって、各端末が自身のフレーム長を最小限に設定できるようにし、帯域の利用効率をさらに向上させる。

アドホックネットワークを対象とする研究には、端末が移動する環境を想定するものと、街中や建物内などに設置したセンサ間で通信を行うセンサネットワークのように、端末が移動しない環境を想定するものがある。本論文では、アドホックネットワークにおける TDMA 方式に関する研究の第 1 段階として、端末が移動しない後者の環境を想定する。このような環境において、センサネットワークにおけるセンサの追加や除去、センサのバッテリー切れや復帰など、端末の参加や退出によるネットワークポロジの変化を考慮する。また、端末間の時刻同期はあらかじめとれているものと想定する。

以下では、2 章でこれまでに提案されているアドホックネットワークにおける TDMA 方式について述べる。3 章では、本論文で提案する ASAP について述べ、4 章では、その拡張手法である E-ASAP について述べる。5 章では、提案した 2 つの手法について考察を行い、6 章では、その性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。最後に 7 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 従来手法

本章では、アドホックネットワークに特化した TDMA 方式である、USAP (Unifying Slot Assignment Protocol)²⁾ および USAP-MA (USAP-Multiple Access)³⁾ の概要と問題点について述べる。これらの手法では、各端末がスロットの割当てを自律的に行うことにより、ネットワークポロジの動的な変化に対応している。

2.1 USAP

図 1 に、USAP における TDMA フォーマットを示す。USAP では、各フレームを固定長である M スロットに分割する。各フレームの先頭のスロットは、ス

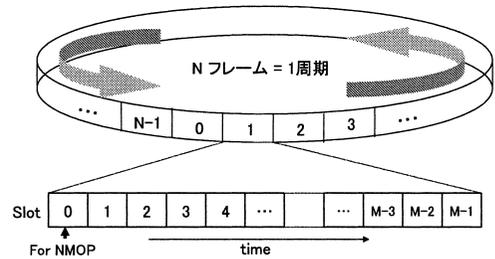


図 1 USAP における TDMA フォーマット

Fig. 1 TDMA format in USAP.

ロット割当てを制御するためのパケットである NMOP (Net Manager Operational Packet) の転送に用いる。また、その先頭スロットは特定の一端末にのみ割り当てられる。つまり、ネットワーク内の端末数が N のとき、各端末は N フレームごとに NMOP を送信する機会を得る。USAP では、この期間を 1 周期としている。

NMOP は、以下の情報を含む。ここで、 i は NMOP を送信する端末、 s ($0 < s < M$) は 1 フレーム中の各スロットを示す。

- $ST_i(s)$
端末 i がスロット s でパケットを送信している場合は 1。それ以外の場合は 0。
- $SR_i(s)$
端末 i がスロット s でパケットを受信している場合は 1。それ以外の場合は 0。
- $NT_i(s)$
端末 i の隣接端末の中にスロット s でパケットを送信している端末が存在する場合は 1。それ以外の場合は 0。

これらを例を用いて説明する。図 2 は、端末 a から端末 g までの 7 つの端末で構成されるアドホックネットワークを示し、各端末は 8 スロットのフレーム長において、吹き出しによって示されるスロットが割り当てられている。このとき、図 2 の端末 c が送信する NMOP における $ST_c(s)$, $SR_c(s)$, $NT_c(s)$ は図 3 のようになる。

各端末は、これらの情報を交換することによって、自身の影響圏内におけるフレーム中の空きスロットを認識し、衝突の発生しないスロットを自身に割り当てることができる。また、各端末は NMOP を 1 周期ごとに送信し、そのたびに隣接端末がスロット割当て情報を更新するため、USAP は端末の移動などによるネットワークポロジの変化にも対応できる。

USAP では、ネットワークに参加した時点での新規端末は、自身に対する割当てスロットも周囲の端末

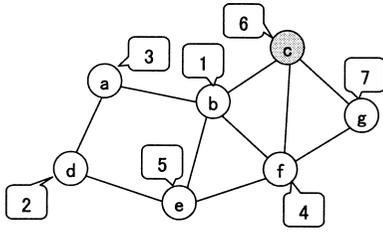


図 2 スロット割当ての例
Fig. 2 Example of slot assignment.

Slot	1	2	3	4	5	6	7
$ST_c(s)$	0	0	0	0	0	1	0
$SR_c(s)$	1	0	0	1	0	0	1
$NT_c(s)$	1	0	0	1	0	0	1

図 3 端末 c の送信する NMOP
Fig. 3 NMOP information of node c.

に関する情報も保持していない。そこで新規端末は、まず 1 周期の間だけ帯域を監視し、隣接端末からの NMOP を受信することによって影響圏内のスロット割当て状況を把握する。すべての隣接端末から NMOP を受信した新規端末は、1 フレーム中で影響圏内の端末に割り当てられていないスロットを選択し、自身に割り当てる。

このように USAP では、各端末は、フレーム中の空きスロットを選択し、周囲の端末に通知することによって、自身へのスロットの割当てを自律的に行う。しかし、あらゆる新規端末を考慮して、つねに十分なフレーム長を用意する必要があるため、空きスロットが多く存在し、帯域が有効に利用されない可能性がある。

2.2 USAP-MA

USAP の問題点を解決するため、その拡張手法である USAP-MA では、フレーム長をネットワークポロジに応じて与える方法として ABC (Adaptive Broadcast Cycle) が提案されている。ABC では、端末数やネットワークポロジに応じてフレーム長やフレーム周期を動的に与えることができる。これは、部分ネットワークに対しても可能である。したがって USAP-MA では、新規端末のために十分な空きスロットを用意する必要がなくなり、帯域をより有効に利用することができる。また、ABC では、各端末のフレーム長を 2 の累乗で与えることにより、フレーム長が異なるサブネットワーク間でも衝突のないパケット転送が可能である。

図 4 に、ABC におけるスロット割当ての例を示す。8 スロットと 4 スロットの異なるフレーム長を持つ 2 つのサブネットワークに属している端末 h は、フレ

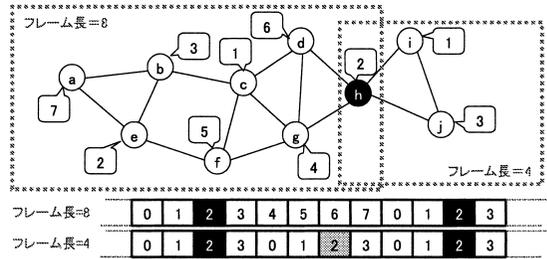


図 4 ABC (Adaptive Broadcast Cycle)
Fig. 4 ABC (Adaptive Broadcast Cycle).

ム長の大きい 8 スロットを周期として、黒色のスロットでパケットを送信することにより、4 スロットのフレーム長のネットワークにおいても衝突なくパケットを送信できる。ただし、フレーム長の小さい 4 スロットを周期とするサブネットワークにおいては、端末 h が 2 周期ごとにしかパケットを送信しないため、図 4 の影付きのスロットが無駄になってしまう。

このように USAP-MA では、端末の自律的動作を考慮しつつ、空きスロット数を減少することにより、帯域の利用効率を向上させている。しかし、周期を変更するときの手続きや、新規端末に割り当てるスロットの選択方法については、具体的な手順は定義されていない。さらに、周期を 2 倍にしたとき、フレームの後半部に空きスロットができてしまうため、依然として帯域が有効に利用されない可能性がある。

3. ASAP (Adaptive Slot Assignment Protocol)

本章では、筆者らの提案するスロット割当て手法である ASAP について述べる。ASAP では、新規端末に対して、その端末の影響圏内におけるスロット割当てに応じたフレーム長を与え、余分な空きスロットの発生を最小限に抑えることで帯域を効率的に利用する。

3.1 フレーム構成

図 5 に、ASAP における TDMA フォーマットを示す。ASAP では、2.2 節で述べた ABC と同様に、各端末のフレーム長を 2 の累乗で与える。また各フレームの先頭スロット(図 5 の影付き部分)は、新規端末がスロット割当て情報を要求する際にパケットを送信するために利用され、通常のパケットの転送には割り当てない。

3.2 パケットフォーマット

各端末は、転送モードと制御モードの 2 つの状態を持ち、状態によって異なるパケットを送信する。それぞれのモードで送信されるパケットを以下に示す。

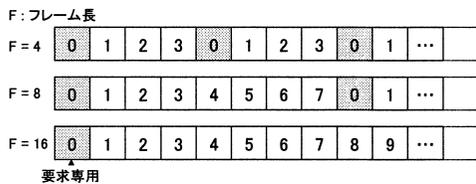


図 5 ASAP における TDMA フォーマット
Fig. 5 TDMA format in ASAP.

3.2.1 転送モード

データパケット

データパケットは、通常のデータを含む。さらに、付加情報として、送信端末におけるフレーム長と割当てスロット、および、送信端末とその隣接端末におけるフレーム長の最大値に関する情報を含む。

3.2.2 制御モード

要求パケット

要求パケットは、新規端末が全隣接端末に送信する。これにより、新規端末は、影響圏内の全端末におけるフレーム長と割当てスロットに関する情報を要求する。

情報パケット

情報パケットは、送信端末におけるフレーム長と、送信端末およびその隣接端末における割当てスロットに関する情報を含み、新規端末の隣接端末が送信する。

提案パケット

提案パケットは、新規端末およびその影響圏内にある全端末におけるスロット割当て情報を含み、新規端末が全隣接端末に送信する。これにより、新規端末は、自身が設定したフレーム長と自身の割当てスロットを通知する。

応答パケット

応答パケットは、受信した提案パケットに対する承認として、新規端末の隣接端末が新規端末に送信する。

3.3 スロットの割当て

新規端末は、ネットワークに参加するとき、以下に示す 4 つの動作によって、自身へのスロット割当てを行う。図 6 に、新規端末がネットワークに参加する際に、影響圏内の各端末がとる動作の手順を示す。

3.3.1 スロットの割当て状況の把握

新規端末は、ネットワークに参加するとき、影響圏内におけるネットワークポロジや割当てスロットに関する情報を保持していない。そこで新規端末は、まず、USAP と同様に、周囲の帯域を一定時間監視して、

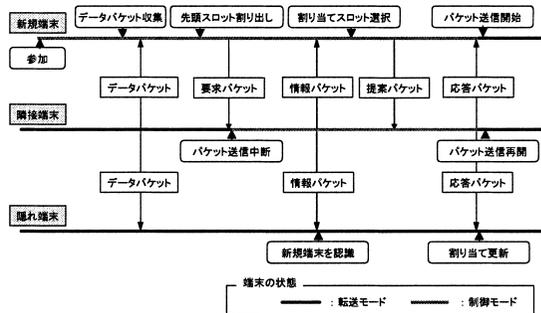


図 6 新規端末参加時の各端末の動作
Fig. 6 Behavior of nodes when a new node joins the network.

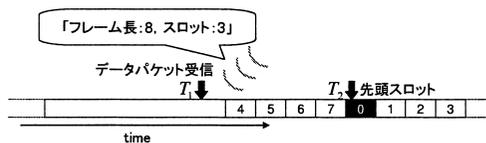


図 7 先頭スロットの割出し
Fig. 7 Detecting the first slot.

隣接端末が送信するデータパケットを収集する。受信したデータパケットには、各端末のフレーム長とそのときの割当てスロットに関する情報が含まれているため、新規端末は、それらの情報から先頭のスロットを割り出すことができる。たとえば図 7 のように、新規端末が時刻 T_1 でデータパケットを受信した場合、8 スロットのフレーム長では、スロット 3 から 5 スロット経過した時刻 T_2 が次フレームの先頭スロットであることを割り出すことができる。新規端末は、その先頭スロットを用いて、要求パケットを隣接端末に送信する。このとき新規端末は、要求を全隣接端末に認識させるために、影響圏内の端末の中で最大のフレーム長における先頭スロットを用いて要求パケットを送信する。以降、新規端末は、自身へのスロット割当てが完了するまで、この先頭スロットを暫定的に自身に割り当て、このスロットを用いてすべてのパケットを送信する。

新規端末から要求パケットを受信した隣接端末は、受信した時点で制御モードに移行し、自身に割り当てられているスロットを用いて、自身の隣接端末に情報パケットを送信する。情報パケットを受信した新規端末は、情報パケットを送信した隣接端末の周辺におけるスロット割当て情報を獲得する。また、新規端末に対する隠れ端末は、情報パケットを受信することにより、新規端末の出現および情報パケットを送信した端末の制御モードへの移行を認識する。すべての隣接端末が情報パケットを送信した時点で、新規端末の影響

圏内にある全端末は新規端末の出現を認識する .

3.3.2 フレーム長の設定と割当て情報の取得

新規端末は、すべての隣接端末から情報パケットを受信した後、自身のフレーム長を設定する . すべての隣接端末のフレーム長が等しい場合は、そのフレーム長に設定するが、フレーム長の異なる端末が混在する場合は、その中で最大のフレーム長に設定する .

次に、新規端末は、自身に設定したフレームに、影響圏内の端末における割当てスロットをコピーする . 全隣接端末のフレーム長が等しい場合は、受信した全情報パケットに従って、隣接端末の割当てスロットを、自身の設定したフレームにコピーするが、フレーム長の異なる端末が混在した場合は、次の手順によって、自身の設定したフレーム長の情報に変換してからコピーする . まず、新規端末が自身に設定したフレーム長を M_0 とし、フレーム内のすべてのスロットは空きスロットとする . 隣接端末のフレーム長を M_i とすると、 M_i が M_0 と等しい場合は、その隣接端末から受信した情報パケットに従って、隣接端末の割当てスロットを自身のフレームにコピーする . M_i が M_0 と等しくないとき、すなわち $M_0 = \alpha M_i$ である場合は、隣接端末の割当てスロットを、 M_0/α スロットごとに、自身のフレームに繰り返しコピーする . ここで、 α は 2 の累乗となる整数値である .

この動作の例を図 8 に示す . 図 8(a) のように、新規端末の影響圏内の端末がスロットを割り当てられていた場合、新規端末は、情報パケットを端末 b および c から受信する . まず新規端末は、自身のフレーム長を、これらの端末の中で最大の 8 スロットに設定する . 次に、フレーム長が等しい端末 b からの情報は、そのまま自身の情報としてコピーする . 一方、フレーム長が $4(\alpha = 2)$ である端末 c からの情報は、図 8(b) のように、 $4(= 8/2)$ スロットごとに繰り返しコピーし、自身の割当て情報とする . ここで、図 8(b) において、黒色のスロットは要求用スロット、白色のスロットは空きスロットを表している . また、影付きのスロットは他端末に割り当てられているスロット、括弧内の数字はスロット番号、アルファベットはそのスロットが割り当てられている端末を表している .

3.3.3 割当てスロットの選択

新規端末は、隣接端末から取得したスロット割当て情報をもとに設定した自身のフレームから、次の 3 つの手順に従って、自身に割り当てるスロットを選択する . 図 9、図 10、図 11 に、それぞれの手順の概要を示す .

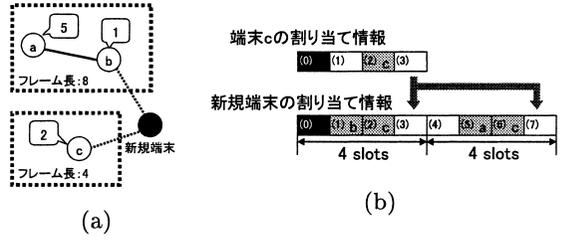


図 8 割当て情報の取得
Fig. 8 Process of grasping slot assignment.

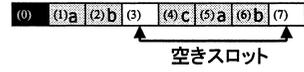


図 9 空きスロット獲得
Fig. 9 Getting an unassigned slot.

端末	スロット	
a	1, 5	複数 割り当て
b	2, 6	
c	4	
d	3	
e	7	

図 10 複数割当ての解放
Fig. 10 Releasing multiple assigned slots.

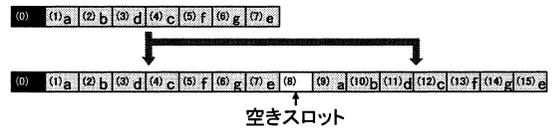


図 11 倍周期割当て
Fig. 11 Doubling the frame.

- i) 空きスロット獲得
影響圏内の他端末に割り当てられていないスロットが存在した場合、新規端末はそのスロットを自身に割り当てる . たとえば図 9 のように、スロット 3, 7 が空きスロットである場合、新規端末はそのいずれかを選択して割り当てる .
- ii) 複数割当ての解放
すべてのスロットが他端末に割り当てられている場合、新規端末は複数のスロットが割り当てられている端末が存在するかどうかを調べる . 該当する端末が存在した場合、新規端末はその割当ての一部を解放し、自身に割り当てる . このとき、該当する端末が複数存在した場合、割り当てられているスロット数の多い端末から優先的に解放を行う . たとえば図 10 のように、フレーム中の全スロットが他端末に割り当てられており、端末 a と b に複数のスロットが割り当

てられていた場合、新規端末はそれらのスロット 1, 2, 5, 6 のいずれかを選択して自身に割り当てる。

iii) 倍周期割当て

すべてのスロットが他端末に割り当てられており、かつ、解放できるスロットも存在しない場合、新規端末はフレーム長を 2 倍にし、前半部の割当てを後半部にコピーする。このとき、倍化前の割当てにおけるフレームの先頭スロットは要求用スロットであるため、倍化後のフレームの後半部の先頭スロットは必ず空きスロットになる。そこで新規端末は、その後半部の先頭スロットを自身に割り当てる。たとえば図 11 のように、8 スロットのフレーム内のすべてのスロットが他端末に割り当てられていた場合、新規端末はフレーム長を 16 スロットに倍化し、後半部の先頭スロットであるスロット 8 を自身に割り当てる。

3.3.4 割当ての通知

自身に割り当てるスロットを選択した新規端末は、提案パケットを用いて、決定したスロット割当て情報を隣接端末に通知する。提案パケットを受信した隣接端末は、提案パケットに含まれるフレーム長の情報が自身のものと異なる場合、新規端末のフレームの設定と同様の方法で割当て情報を変換し、自身の割当て情報を更新する。

提案パケットにより割当て情報を更新した隣接端末は、応答パケットをその隣接端末に送信する。これにより、新規端末に対しては割当ての承認を、新規端末に対する隠れ端末には情報の更新通知および制御モードの終了通知を行う。応答パケットを送信した隣接端末は、制御モードを終了し、更新した割当て情報に基づいて次のフレームからデータの転送を再開する。また、応答パケットを受信した新規端末の隠れ端末は、自身の割当て情報を更新し、更新した割当て情報に基づいて次のフレームからデータの転送を行う。さらに新規端末は、すべての隣接端末から応答パケットを受信した時点で割当てを完了し、転送モードに移行する。

ここで、新規端末が複数割当ての解放によって自身へのスロット割当てを行ったとき、影響圏内の端末の中にはスロット割当て情報が変更されている端末が存在する。しかし、提案パケットは新規端末の影響圏内の端末までにはしか伝播しないため、割当てが変更された端末の影響圏内の端末の中には、その変更を検出できずに誤った情報を持つ端末が現れる場合がある。たとえば図 12 のように、新規端末 *d* によって端末 *b* の

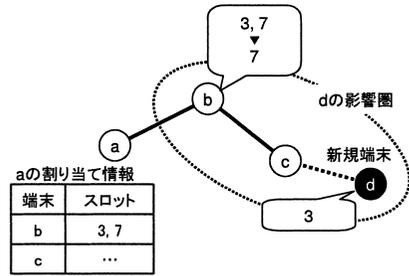


図 12 割当て情報の不整合

Fig. 12 Inconsistency of slot assignment information.

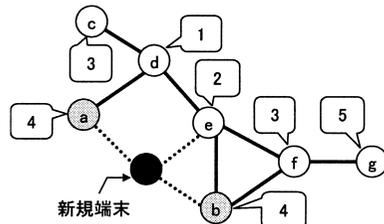


図 13 スロット割当ての競合例

Fig. 13 Example of conflicting an assigned slot.

割当てスロット 3 が解放された場合、*d* からの提案パケットは *c* および *b* までしか伝播しないため、*d* の影響圏外にある端末 *a* は、*b* に関する割当て情報を更新することができない。

このような割当て情報の不整合が起ってしまう場合でも、ASAP では、他端末に割り当てられているスロットを空きスロットであると誤認識することはないため、パケット衝突のない転送を維持することは可能である。しかし、実際には空きスロットになっているスロットを割当てに用いることができなくなり、帯域の利用効率が低下する可能性がある。

3.4 競合の検出と解決

ASAP では、新規端末が同じスロットを割り当てられている複数の端末と接続した場合、スロット割当ての競合が発生する。たとえば図 13 において、端末 *a* と *b* の間に接続した新規端末は、スロット 4 で競合が発生することを検出する。競合を検出した新規端末は、まず競合を起こしている端末の割当て情報を、それらの中で最大のフレーム長のものに変換し、以下の 3 つの手順に従って、競合を起こしている端末が保持するスロットの再割当てを行う。

i) 競合スロット削除

競合を起こしている端末において、競合しているスロットの他に競合していないスロットが割り当てられている場合、競合しているスロットの割当てを解放する。ただし、競合していない

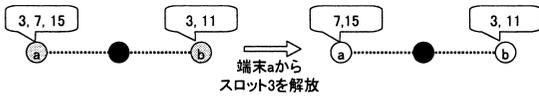


図 14 競合スロット削除
Fig. 14 Deleting a conflicting slot.



図 15 割り当ての分配
Fig. 15 Dividing the assignment.

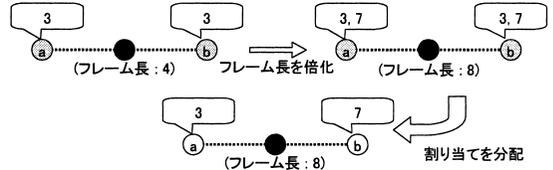


図 16 倍周期分配
Fig. 16 Doubling the frame and dividing the assignment.

スロットが複数割り当てられている場合は、割り当てスロット数の多い端末から優先して割り当てを解放する。たとえば図 14 のように、競合を起こしている端末 *a* と *b* において、競合していないスロット 7, 11, 15 が割り当てられている場合、割り当てられたスロット数の多い端末 *a* が競合しているスロット 3 を解放する。

ii) 割り当ての分配

競合を起こしている端末において、複数のスロットが競合している場合、それらのスロットを競合している各端末に分配する。たとえば図 15 のように、競合を起こしている端末 *a* と *b* において、複数のスロット 3, 11 で競合が発生している場合、競合しているスロットをそれぞれの端末に分配する。

iii) 倍周期分配

競合を起こしている端末において、割り当てられた単一のスロットが競合している場合、そのフレーム長では競合が解決できない。したがって、フレーム長を 2 倍にして競合スロット数を増加させ、それらのスロットを競合を起こしている端末に分配する。このとき、フレーム長を 2 倍にしても解決しない場合は、さらにフレーム長を 2 倍にし、端末に分配する操作を繰り返す。たとえば図 16 のように、4 スロットのフレームにおいて単一のスロット 3 が競合している場合、フレーム長を 8 スロットに倍化し、スロット 3 に対応するスロット 7 の割り当てを両端末に追加した後に、割り当てを分配する。

これらの処理は、3.3.2 項において、新規端末が影響圏内の端末におけるスロット割り当て情報を自身のフレームにコピーする段階で行う。これにより、新規端末は、競合を解決した後のスロット割り当て情報をもとに、3.3.3 項の手順によって、自身に割り当てるスロットを選択し、3.3.4 項の手順によって、隣接端末に提案パケットを送信する。このとき、競合を起こし

ていた隣接端末は、受信した提案パケットにより、自身のスロット割り当て情報を更新し、競合を解決する。ただし、競合が発生するような状況では、情報パケットの衝突が発生し、新規端末が正確な情報を取得できない可能性がある。そこで新規端末は、提案パケットを送信するためのスロットを用いて、衝突を検出したスロットの情報を隣接端末に送信することで、情報パケットの再送を要求する。このパケットを受信した隣接端末のうち、新規端末が衝突を検出したスロットで情報パケットを送信していた端末は、ランダムに設定したフレーム長だけ待機した後、情報パケットを再送する。この動作は、新規端末がすべての隣接端末に対する正確なスロット割り当て情報を獲得するまで繰り返される。

3.5 割り当ての解放

ネットワークから退出する端末は、自身に割り当てられたスロットをすべて解放し、転送モードで送信していたデータパケットの送信を停止する。各端末は、割り当てられたスロットにおいて、フレーム長の情報を付加したデータパケットを送信するため、退出した端末の隣接端末は、その端末のフレーム長に等しい期間が経過しても次のデータパケットを受信しなかった場合、その端末が退出したものと判断できる。そこで、自身の割り当て情報から退出した端末に割り当てられていたスロットを解放する。また、その退出によって、退出した端末の複数の隣接端末が、互いの影響圏から外れてしまう場合がある。そのような端末は、影響圏外となる端末に割り当てられていたスロットも解放する。これらの動作によって割り当て情報を更新した後、退出した端末の隣接端末は、更新した割り当て情報を自身の隣接端末に送信する。更新した割り当て情報を受信した全端末は、退出した端末に割り当てられていたスロットを解放する。以上の動作により、退出する端末に対する割り当ての解放処理が完了する。

ここで、退出した端末の割り当てを解放する隣接端末は、自身の割り当て情報が次の条件のうちいずれかを満たしている場合、自身のフレーム長を 2 分の 1 にし、割り当て情報を更新した後、その情報を送信する。

- (1) 全隣接端末のフレーム長が自身より小さい。
- (2) フレームの後半部の先頭スロットが空きスロットであり、かつ、以下の条件のいずれかを満たす。
 - フレームの前半部と後半部の割当てがまったく同じ。
 - フレームの前半部および後半部の各スロットにおいて、ある端末に割り当てられているスロットの他方もそのスロットに割り当てられているか、もしくは空きスロットである。

4. E-ASAP (Extended ASAP)

ASAP では、影響圏の端末数に応じて、新規端末に対するスロット割当てを行うため、従来手法と比較すると帯域の利用効率が向上するものと考えられる。しかし、新規端末のフレーム長が影響圏内の全端末におけるフレーム長の中で最大のものに設定されるため、ネットワーク全体のフレーム長が増大しやすく、また端末が退出する際にフレーム長を縮小させる機会が少ないという問題がある。そこで本章では、ASAP を拡張し、周囲のフレーム長の影響を受けにくいスロット割当て手法である E-ASAP (Extended ASAP) を提案する。E-ASAP では、影響圏の端末におけるフレーム長にかかわらず、パケット衝突を起こさない最小のフレーム長でのスロット割当てを行うことにより、帯域の利用効率をより向上させる。

4.1 フレーム構成とパケットフォーマット

E-ASAP では、ASAP と同様に、フレーム長を 2 の累乗で与え、各フレームの先頭スロットを新規端末の要求用スロットとする。

各端末のとりうる状態、転送モードで送信されるパケット、および、制御モードで送信される要求パケットと応答パケットは ASAP と同じである。しかし、情報パケットおよび提案パケットに含まれる情報が ASAP と異なる。また、制御モードにおいては、新たに更新パケットも送信する。

情報パケット

情報パケットは、送信端末およびその隣接端末における、フレーム長と割当てスロットに関する情報を含み、新規端末の隣接端末が全隣接端末に送信する。

提案パケット

提案パケットは、新規端末およびその影響圏内の全端末における、フレーム長とスロット割当て情報を含み、新規端末が全隣接端末に送信する。

更新パケット

更新パケットは、情報パケットと同様に、送信端末およびその隣接端末における、フレーム長と割当てスロットに関する情報を含み、新規端末の影響圏内にある端末が、自身の影響圏に存在する端末に送信する。

4.2 スロットの割当て

ネットワークに参加する新規端末は、以下の動作によって、自身へのスロット割当てを行う。

4.2.1 スロット割当て状況の把握

新規端末が出現してから、要求パケットを送信するまでの動作は、ASAP と同様である。

4.2.2 フレーム長の設定

新規端末は、最小フレーム長である 4 スロットを最小値として、スロットが割当て可能となる最小のフレーム長を調べ、自身のフレーム長をその値に設定する。

4.2.3 割当てスロットの選択

新規端末は、設定したフレーム長において、次の 2 つの手順に従って、自身に割り当てるスロットを選択する。

i) 空きスロット獲得

先頭スロットが影響圏内のどの端末にも割り当てられておらず、かつ、影響圏内の他端末に割り当てられていないスロットが存在する場合、新規端末は、先頭スロット以外の空きスロットを自身に割り当てる。

ii) 複数割当ての解放

先頭スロット以外の全スロットが他端末に割り当てられていた場合、新規端末は、複数のスロットが割り当てられた端末が存在するかどうかを調べる。該当する端末が存在する場合、ASAP と同様に、新規端末はその割当ての一部を解放し、自身に割り当てる。

この手順の例を図 17 に示す。図 17 において、各端末の吹き出しは、右側の値がその端末のフレーム長、左側の値がそのフレーム長における割当てスロットを示す。まず新規端末は、最小のフレーム長である 4 スロットのフレーム長での割当てを試みるが、先頭スロットが影響圏の他端末に割り当てられているため、自身への割当てが不可能である。そこで、フレーム長を 2 倍にし、8 スロットでの割当てを試みる。8 スロットのフレーム長では、先頭スロットが空きスロットになっており、さらにスロット 1 が影響圏の他端末に割り当てられていないため、空きスロット獲得により、そのスロットを自身に割り当てる。

表 1 ASAP, E-ASAP において各端末が管理する情報
Table 1 Information managed in ASAP and E-ASAP.

	ASAP	E-ASAP
自身に関する情報	フレーム長, 割当てスロット	フレーム長, 割当てスロット
他端末に関する情報	端末の識別子, 距離, 割当てスロット (自身のフレーム長基準)	端末の識別子, 距離, フレーム長, 割当てスロット (相手端末のフレーム長基準)
その他の情報	隣接端末の中の最大フレーム長	隣接端末の中の最大フレーム長

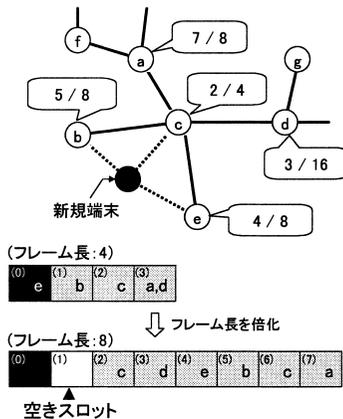


図 17 E-ASAP による割当てスロットの選択
Fig. 17 Selecting an assigned slot in E-ASAP.

4.2.4 割当ての通知

割り当てるスロットを選択した新規端末は、提案パケットを用いて、影響圏内の全端末に割当て情報の更新を促す。さらに、E-ASAP では、複数割当ての解放によって割当てを更新した端末が、更新パケットを送信することによって、自身の影響圏全体に割当て情報の更新を促す。これにより、ASAP において生じていた、空きスロットを認識できない可能性があるという問題を解決している。

4.3 競合の検出と解決

ASAP と同様に、新規端末が競合しているスロットを発見した場合、「競合スロット削除」「割当ての分配」「倍周期分配」の 3 つの手順に従って、割当ての競合を解消する。

4.4 割当ての解放

ネットワークから退出する端末は、自身に割り当てられたスロットをすべて解放する。また、退出した端末の隣接端末は、退出した端末に割り当てられていたスロットを解放した後、4.2.3 項で述べた空きスロット獲得と同様の方法を用いて自身に割当て可能なスロットを再検索する。その結果、現在より小さいフレーム長におけるスロット割当てが可能である場合は、自身の割当てを更新し、更新パケットを影響圏内の全端末に送信する。

5. 考 察

本章では、本論文で提案した ASAP と E-ASAP の特徴について比較を行う。

提案手法はともに、ネットワーク内の各端末のフレーム長を、その端末の影響圏におけるスロット割当てに応じて動的に変更する。その結果、従来手法と比べ、帯域の利用効率が向上する。2 つの提案手法では、各端末が管理および交換している情報と、その情報の伝播範囲が異なる。

5.1 管理情報

両手法において各端末が管理している情報を表 1 に示す。表において、他端末に関する情報に含まれる距離は、自身からのホップ数を表す。ASAP では、他端末の割当てスロットに関する情報を、すべて自身のフレーム長に変換して保持している。そのため、新規端末がネットワークに参加する際に、影響圏内の全端末の割当て情報を保持できるように、自身のフレーム長を影響圏で最大のものに設定する必要がある。その結果、ネットワーク全体でフレーム長が増大しやすい傾向にある。

一方、E-ASAP では、他端末のフレーム長に関する情報も保持しているため、他端末の割当てスロットに関する情報を、自身のフレーム長に変換することなく、その端末のフレーム長を基準として保持する。そのため、新規端末は、影響圏の他端末のフレーム長にかかわらず、自身にスロットを割当て可能な最小のフレーム長を、自身に設定できる。その結果、ASAP で問題となるフレーム長の増大を抑制できるものと考えられる。

5.2 情報の伝播範囲

ASAP では、新規端末が自身に割り当てるスロットを選択した際、更新したスロット割当て情報は、自身の影響圏内だけに伝播する。そのため、新規端末の影響圏外に存在する端末が誤った情報を保持してしまい、帯域の利用効率が低下する可能性がある。

一方、E-ASAP では、複数割当ての解放によって割当てを変更された端末が、自身の影響圏に更新パケットを送信することにより、すべての端末が正確な割当て情報を保持できる。しかし、この動作によって、

ASAP では最大 2 ホップであった制御パケットの伝播範囲が、最大 4 ホップまで拡大されるため、制御トラヒックが増大するものと考えられる。

6. 性能評価

本章では、提案手法の有効性を検証するために行ったシミュレーション実験の結果を示す。シミュレーション実験では、ASAP と E-ASAP および比較対象として USAP と USAP-MA の性能を調べた。

6.1 評価環境

シミュレーション実験において、新規端末は、ネットワーク内のいずれかの端末と接続できるランダムな位置に出現するものとした。さらに、端末が参加または退出した後、スロット割当ての更新が完了し、すべての端末が転送モードに戻るまで、他端末の参加や退出はないものとした。実験では、端末数の初期状態を 2 とし、端末数が 50 になるまでネットワークに参加させた後、再び端末数が 2 になるまで端末を退出させた。このとき、端末の退出順序によっては、ネットワークが分断される可能性がある。ネットワークが分断されると、相互接続している端末数が大きく減少するため、端末数に対する正当な評価値を得ることができなくなる。そこで、ネットワークの分断を避けるために、ネットワークから退出させる端末は、参加した順とは逆順に選択した。なお、1 章において述べたように、端末は移動しないものとした。

USAP では、すべての端末が必ずスロットを獲得できるように、フレーム長を 50 スロットとした。また、各端末が衝突なく NMOP を送信できるように、50 フレームを 1 周期とし、それぞれのフレームにおいて各端末が NMOP を送信するものとした。新規端末は、獲得した NMOP からフレーム中の空きスロットを割り出し、その中からスロット番号が最小のものを自身に割り当てるものとした。

また、USAP-MA では、新規端末は、獲得した NMOP をもとに、自身のフレーム長を隣接端末の中で最大のものに設定した後、フレーム内の空きスロットの中からスロット番号が最小のものを割り当てるものとした。ただし、フレーム内に空きスロットが存在しない場合、新規端末は、自身のフレーム長を 2 倍にし、フレームの後半部に生成した空きスロットの中から、スロット番号が最小のものを自身に割り当てるものとした。一方、端末が退出したとき、その隣接端末は退出した端末の割当てを解放した後、自身の割当て情報を参照し、フレームの後半部の全スロットが影響圏内のどの端末にも割り当てられていない場合、自身

のフレーム長を 1/2 にするものとした。さらに、各端末のフレーム周期を、その端末のフレームに含まれるスロットの数だけフレームを並べた長さ分とするようにし、その中で自身の割当てスロットに対応したフレームの先頭スロットを用いて NMOP を送信するものとした。

6.2 評価基準

シミュレーション実験では、次の 3 つの値を評価した。

(1) 平均送信機会

ネットワーク内の各端末に設定されたフレーム長に対する、その端末に割り当てられたスロット数の割合を、送信機会と定義する。また、全端末の送信機会の平均値を平均送信機会と定義する。端末の送信機会が大きいほど、その端末がパケットを送信する機会が増えるため、帯域の利用効率が向上するものと考えられる。

(2) 制御トラヒック

提案手法において、各パケットには、端末の ID、フレーム長、およびスロット番号が情報として付与される。簡単化のため、それらのデータサイズをすべて 1 バイトとし、端末の参加や退出によって送信された、データパケット以外のデータ量の総計を制御トラヒックと定義する。

(3) 設定遅延

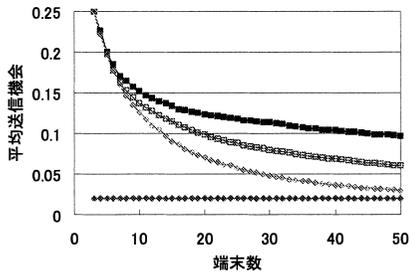
端末の参加や退出が発生してから、全端末が再び転送モードに戻るまでの時間(スロット数)を設定遅延と定義する。

6.3 評価結果

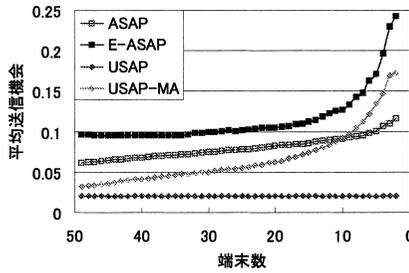
シミュレーション結果を図 18、図 20、図 21 に示す。各グラフの横軸はネットワーク中の端末数を表し、縦軸はそれぞれ、平均送信機会、制御トラヒック、設定遅延を表す。また、(a) のグラフが端末数増加時、(b) のグラフが減少時の結果を示している。

6.3.1 平均送信機会

まず、フレーム長を固定で与えている USAP では、端末数のスロット分だけパケット送信間隔が空いてしまうため、送信機会が非常に小さくなることが分かる。一方、フレーム長を動的に与える USAP-MA および 2 つの提案手法では、USAP よりつねに高い送信機会が得られており、より効率的なスロット割当てが行われていることが分かる。また、USAP-MA と比較して、2 つの提案手法は、空きスロットの発生を抑制することにより、より高い送信機会を確保できることが分かる。特に、E-ASAP の方が ASAP より高い送信機会を確保しており、端末減少時の送信機会の増加率も大



(a) 端末数増加時



(b) 端末数減少時

図 18 平均送信機会

Fig. 18 Average channel utilization.

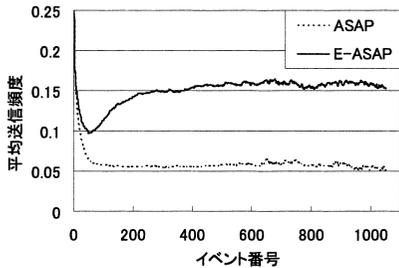
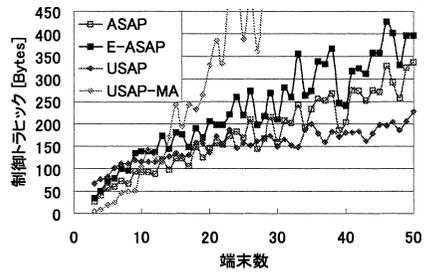


図 19 端末数の増減による平均送信機会の推移

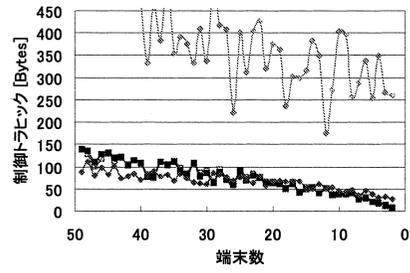
Fig. 19 Average channel utilization when the number of nodes increases and decreases.

きいことから、帯域の利用効率がより向上していることが分かる。ここで、端末減少時には、USAP-MAの方が、ASAPよりも送信機会の増加率が高くなっている。これは、USAP-MAにおいて、各端末がフレーム長を2倍にしたとき、フレームの後半部に空きスロットを残すため、端末が退出した際、その影響圏内にある端末が、自身のフレーム長を縮小する機会を得やすいからであると考えられる。

ASAPでは、端末数が小さいとき、端末減少時の送信機会の増加率が小さくなるが、端末数がある程度大きいときは、増加時と減少時の平均送信機会の変化率がほぼ等しい。そのため、端末数がある程度大きな値で増減を繰り返すような環境においては、安定した送信機会が得られるものと考えられる。これを確認する

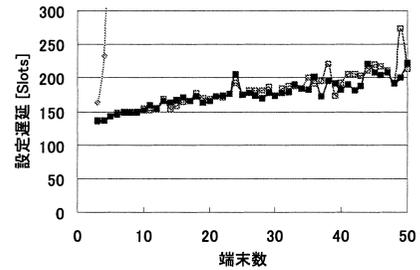


(a) 端末数増加時

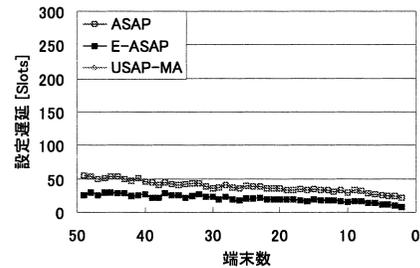


(b) 端末数減少時

図 20 制御トラフィック
Fig. 20 Control traffic.



(a) 端末数増加時



(b) 端末数減少時

図 21 設定遅延
Fig. 21 Setting delay.

ために、端末数が増減する環境における ASAP および E-ASAP の平均送信機会の推移を、別のシミュレーション実験によって調べた。このシミュレーション実験では、端末数の初期状態を2とし、端末数が50に

なるまでネットワークに参加させた後、端末の参加および退出をそれぞれ 1/2 の確率で 1,000 回発生させた。シミュレーション結果を図 19 に示す。グラフの横軸は端末数変化のイベント番号を表し、縦軸は平均送信機会を表す。イベントとは、端末の参加または退出を表し、1 から 48 までのイベントで端末数が 50 に達し、以降 1,000 回増減を繰り返している。グラフより、ASAP では、E-ASAP と比較して 1/3 程度の平均送信機会しか確保できないものの、端末数の増減する環境において安定した平均送信機会を得ることが分かる。一方、E-ASAP では、端末数が増減する環境において、ASAP よりも高い平均送信機会が安定している。さらに、E-ASAP では、端末数を 50 まで増加させた後、端末数が増減を繰り返はじめたところで、平均送信機会が増加している。これは、端末が退出した際に、その影響圏の各端末が、自身にスロットを割り当てることができる最小のフレーム長を検索しなおすため、フレーム長が大幅に減少するからであると考えられる。

6.3.2 制御トラヒック

端末増加時、減少時ともに、端末数が多いときに、USAP と比較して提案手法の制御トラヒックが大きくなっている。これは、USAP で送信される NMOP のサイズが固定長であるのに対し、提案手法におけるパケットのサイズが、フレーム長の増大にともなって大きくなるためであると考えられる。また、提案手法において、E-ASAP の制御トラヒックが、ASAP よりも 10% 程度大きくなっている。これは、各端末が送信するパケットに含まれる情報量や更新パケットの有無によるものであり、平均送信機会と制御トラヒックがトレードオフの関係になっていることが分かる。ここで、提案手法において、両手法の差は最大で 100 バイト程度であり、実環境におけるデータ量や帯域幅を考慮すると、この値は無視できるほど小さい差であると考えられる。しかし、端末が密集するような環境においては、フレーム長が大幅に増大し、それにともなって各端末が送信する情報も増大するため、両手法の差はさらに大きくなり、設定遅延や電力消費に大きく影響するものと考えられる。なお、USAP-MA の制御トラヒックは、他の 3 手法と比較して極端に大きくなっており、端末数が多いときには 1,000 バイト程度まで増加している。これは、USAP-MA において、各端末は、割当ての有無にかかわらず、自身のフレーム長に応じた長さの情報を交換するため、フレーム長の増大にともなって、NMOP のサイズが極端に大きくなるためであると考えられる。ただし、文献 13) では、

USAP-MA におけるスロット割当ての手順が規定されていないため、本論文のシミュレーション実験では、この手順として筆者ら自身が単純なものを定義した。スロット割当ての手順が制御トラヒックに大きく影響するため、このシミュレーション結果が、提案手法と USAP-MA の性能差を必ずしも正当に表しているとは限らない。

6.3.3 設定遅延

端末増加時においては、値に若干のぶれがあるものの、2 つの提案手法間に差は見受けられないが、端末減少時において、E-ASAP の設定遅延が ASAP の半分程度に抑えられている。これは、E-ASAP の平均送信機会が大きく、各端末が更新パケットを送信する機会を多く得ているためである。両手法間の差は 20 スロット程度であるが、制御トラヒックの場合と同様に、端末が密集するような環境においては、フレーム長の大幅な増大により、両手法間の差が無視できないほど大きくなる可能性がある。なお、USAP および USAP-MA の設定遅延は、提案手法と比較して大幅に大きくなっており、USAP では 5000 スロット程度、USAP-MA では 10^7 オーダにまで達している。これは、6.1 節で述べた NMOP の送信方法によって、各端末が NMOP を送信する機会が極端に少なくなっているためであると考えられる。ただし、設定遅延についても、制御トラヒックと同様の理由により、シミュレーション結果が提案手法と USAP-MA の性能差を必ずしも正当に表しているとは限らない。

7. おわりに

本論文では、アドホックネットワークにおいて帯域をより効率的に利用する TDMA スロット割当て手法として、ASAP および E-ASAP を提案した。ASAP では、ネットワークに参加する端末が、自身の影響圏内に存在する端末数に応じたフレーム長を選択することで、余分な空きスロットの発生を抑えることができる。また、端末のフレーム長を 2 の累乗スロットに設定することで、フレーム長の異なる端末間でも整合性を保ち、衝突の発生しないパケット転送を実現できる。ネットワークから退出する端末は、退出前に特別な手続きを必要としない。一方、ASAP の拡張手法である E-ASAP では、ASAP と比較して、より詳細な情報を制御パケットに付与し、その伝播範囲を拡大することによって、空きスロットをより抑制できる。

さらに本論文では、シミュレーション実験により提案手法の性能評価を行い、従来方式と比較して大幅に帯域の利用効率が向上することを確認した。また、評

価結果より, ASAP と E-ASAP では, 平均送信機会および設定遅延と制御トラヒックの間にトレードオフの関係があることを確認した.

提案手法では, 端末の増減時にのみスロットの割当てを行うことを考慮しており, 端末の移動にもなるネットワークポロジの変化に対応していない. そこで, 今後の課題として, 端末の移動にも対応できるフレーム構成について検討する必要がある.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学技術振興調整費「モバイル環境向 P2P 型情報共有基盤の確立」, 文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」, および日本学術振興会若手研究 (B) (13780330) の研究助成によるものである. ここに記して謝意を表す.

参 考 文 献

- 1) Arikan, E.: Some complexity results about packet radio network, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.IT-30, pp.681-685 (July 1984).
- 2) Bao, L. and Garcia-Luna-Aceves, J.J.: Channel access scheduling in ad hoc networks with unidirectional links, *Proc. International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, pp.9-18 (July 2001).
- 3) Bittel, R., Caples, E., Young, C.D. and Loso, F.: Soldier phone: an innovative approach to wireless multimedia communications, *Proc. IEEE MILCOM '98* (Nov. 1998).
- 4) Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.-C. and Jetcheva, J.: A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocol, *Proc. MOBICOM '98*, pp.85-97 (Oct. 1998).
- 5) Cidon, I. and Sidi, M.: Distributed assignment algorithms for multihop packet radio networks, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.38, No.10 (Oct. 1989).
- 6) Ephremides, A. and Truong, T.V.: Scheduling broadcasts in multihop radio networks, *IEEE Trans. Comm.*, Vol.38, No.4, pp.456-460 (Apr. 1990).
- 7) Ian, F.A., McNair, J., Carrasco, L. and Puigjaner, R.: Medium access control protocols for multimedia traffic in wireless networks, *IEEE Network Magazine*, Vol.13, No.4, pp.39-47 (July/Aug. 1999).
- 8) Lee, H., Yeo, J., Kim, S. and Lee, S.: Time slot assignment to minimize delay in ad-hoc networks, *Proc. IST Mobile Communications Summit 2001* (Sept. 2001).
- 9) 真野 浩: Dynamic TDMA アルゴリズムの研究. <http://www.root-hq.com/~hmano/p98doc.pdf>
- 10) Pond, L.C. and Li, V.O.K.: A distributed time-slot assignment protocol for mobile multi-hop broadcast packet radio networks, *Proc. IEEE MILCOM '89*, Vol.1, pp.70-74 (Nov. 1989).
- 11) Wang, G. and Ansari, N.: Optimal broadcast scheduling in packet radio networks using mean field annealing, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.15, No.2, pp.250-260 (Feb. 1997).
- 12) Young, C.D.: USAP: a unifying dynamic distributed multichannel TDMA slot assignment protocol, *Proc. IEEE MILCOM '96*, Vol.1 (Oct. 1996).
- 13) Young, C.D.: USAP multiple access: dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking, *Proc. IEEE MILCOM '99* (Nov. 1999).

(平成 15 年 2 月 17 日受付)

(平成 15 年 12 月 2 日採録)



神崎 映光

2002 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業. 現在, 同大学院情報科学研究科博士前期課程在学中. 移動体ネットワーク, 通信プロトコルに興味を持つ.



上向 俊晃

2000 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業. 2001 年同大学院工学研究科博士前期課程修了. 現在, 同大学院工学研究科博士後期課程在学中. モバイルコンピューティング, ユビキタスコンピューティングに興味を持つ.



原 隆浩(正会員)

1995年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997年同大学院工学研究科博士前期課程修了。同年，同大学院工学研究科博士後期課程中退後，同大学院工学研究科情報システム

工学専攻助手，2002年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手となり，現在に至る。工学博士。1996年本学会山下記念研究賞受賞。2000年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。データベースシステム，分散処理に興味を持つ。IEEE，電子情報通信学会，日本データベース学会の各会員。



西尾章治郎(フェロー)

1975年京都大学工学部数理工学科卒業。1980年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手，大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助

教授，大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て，2002年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり，現在に至る。2000年より大阪大学サイバーメディアセンター長，2003年より大阪大学大学院情報科学研究科長を併任。この間，カナダ・ウォータールー大学，ビクトリア大学客員。データベース，マルチメディアシステムの研究に従事。現在，ACM Trans. on Internet Technology, Data & Knowledge Engineering, Data Mining and Knowledge Discovery 等の論文誌編集委員。情報処理学会フェロー含め，ACM，IEEE等9学会の会員。