

アドホックネットワークにおけるネットワークトポロジの変化に応じた TDMA スロット割り当て手法について

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フィック量に関わらずパケット衝突の発生しない転送が実現できるため、アドホックネットワークに有効である。本稿では、端末の自律的な動作によって、帯域を効率的に利用するタイムスロット割り当て手法を提案する。提案手法では、各端末が設定するフレーム長を最小限に抑え、空きスロットの発生を抑制する。また、端末の移動によるネットワークトポロジの変化にも対応する。さらに本稿では、提案手法の有効性をシミュレーション実験によって評価し、従来手法と比較して、帯域を有効に利用していることを確認する。

On TDMA Slot Assignment Protocol Considering the Change of Network Topology in Ad Hoc Networks

Akimitsu KANZAKI[†] Toshiaki UEMUKAI[‡] Takahiro HARA[†] 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 to ad hoc networks. In this paper, we propose a TDMA slot assignment protocol to improve the channel utilization while considering autonomous behaviors of nodes. Our proposed protocol controls the excessive increase of unassigned slots by minimizing the frame length of nodes and adapts to the change of network topology caused by movement of nodes. We evaluate our protocol by a simulation experiment and confirm that our proposed protocol improves the channel utilization as compared with conventional protocols.

1 はじめに

近年のハードウェア技術や無線通信技術の進歩に伴い、無線携帯端末のみで暫定的に構築できるアドホックネットワークへの注目が高まっている。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) 方式には、ネットワークのトラフィック量に関わらず、パケット衝突の発生しない転送が可能であるという特徴がある。そのため、アドホックネットワークに TDMA 方式を適用する研究が盛んに行われている [3, 4]。これまでに筆者らは、アドホックネットワークにおいて、端末の自律的な動作を考慮した TDMA スロット割り当て手法として ASAP (Adaptive Slot Assignment Protocol) を提案している [1, 2]。ASAP では、各端末のフレーム長を、その影響圏の端末におけるスロット割り当て状況に応じて動的に設定することにより、余分な空きスロットの発生を抑制する。ここで影響圏とは、ある端末がパケットを送信する際にパケット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。また、

各端末のフレーム長を 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、衝突のないパケット転送を実現する。しかし、ASAP は、端末の参加や退出によるネットワークトポロジの変化のみを考慮しているため、端末が移動する環境には適用できない。

そこで本稿では、ASAP を拡張した ASAP/LD (ASAP with Link Detection) を提案する。ASAP/LD では、ASAP を基礎とし、端末の移動によるネットワークトポロジの変化にも対応したスロット割り当てを行う。

以下では、2 章で関連研究について述べる。3 章では、本稿で提案する ASAP/LD について述べ、4 章では、提案手法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、5 章で本稿のまとめを述べる。

2 関連研究

アドホックネットワークにおいて、端末の自律的な動作により、ネットワークトポロジの動的な変化に対応した TDMA 方式として、USAP (Unifying Slot Assignment Protocol) [5] および USAP-MA (USAP Multiple Access) [6] が提案されている。本

[†]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
[‡]大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻

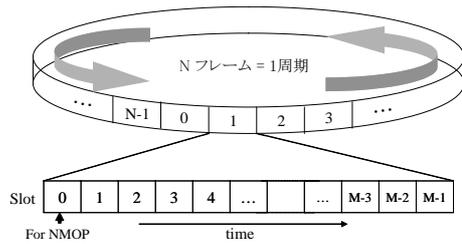


図 1: USAP における TDMA フォーマット

章では、これらの手法の概要と問題点について述べる。

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。各フレームの先頭スロットは、割り当て情報を交換するためのパケットである NMOP (Net Manager Operational Packet) の送信に用いる。また、その先頭スロットは特定の 1 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 には、送信端末またはその隣接端末がパケットを送信しているかどうか、フレーム内の各スロットごとの情報として含まれる。そのため各端末は、全隣接端末から NMOP を収集することによって、影響圏内の空きスロットを割り出し、自身に割り当てるスロットを選択できる。

このように USAP では、各端末が、収集した情報をもとに、自身へのスロット割り当てを自律的に行う。しかし、新規端末が新たにネットワークに参加することを考慮して、常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、端末数に応じてフレーム長を動的に与える方法として 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ため、新規端末の出現を考慮して予め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、端末のフレーム長を 2 の累乗で与えることにより、フレーム長の異なる端末間でも衝突のないパケット転送を実現で

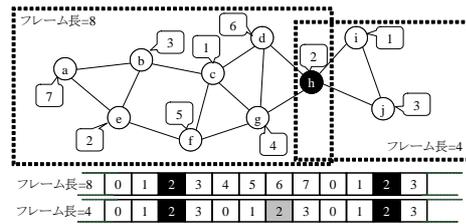


図 2: ABC(Adaptive Broadcast Cycle)

きる。

図 2 に、ABC におけるスロット割り当ての例を示す。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、フレーム長の大きい 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を持つネットワークでも衝突なくパケットを送信できる。

このように USAP-MA では、フレーム長を動的に与えることにより、空きスロットの発生を抑制し、帯域の利用効率を向上させている。しかし、フレーム長を変更する手続きや、新規端末に割り当てるスロットの選択方法については、具体的な手順が定義されていない。また、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発生するため、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/LD

本章では、筆者らの提案するスロット割り当て手法である ASAP/LD について述べる。ASAP/LD では、筆者らがこれまでに提案した ASAP を基礎とし、各端末が、影響圏の端末におけるスロット割り当て状況に応じて、自身のフレーム長を動的に設定することによって、帯域の利用効率を向上させる。さらに ASAP/LD では、端末の移動によって起こるネットワークポロジの変化にも対応する。

3.1 フレーム構成とパケットフォーマット

ASAP/LD 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 の累乗スロットで与える。また、各フレームの先頭スロットは、新規端末がスロット割り当て情報を要求するパケットを送信するために利用され、通常データ転送には用いない。

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。転送モードでは、通常データとともに、送信端末のフレーム長と送信時点でのスロット番号、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を付与したデータパケットを送信する。ま

た制御モードでは、送信端末とその隣接端末のそれぞれにおけるフレーム長と割り当てスロットを付与した情報パケットを送信する。

3.2 スロットの割り当て

新たにネットワークに参加する新規端末は、まず一定期間帯域を監視し、隣接端末からのデータパケットを収集する。データパケットには、送信端末のフレーム長とそのときの割り当てスロットが付与されているため、新規端末は、これらの情報からフレームの先頭スロットを割り出し、割り当て情報を要求するパケットを送信する。

新規端末からの要求を受信した隣接端末は、制御モードに移行し、自身の割り当てスロットを用いて情報パケットを送信する。新規端末は、全隣接端末からの情報パケットを収集した後、自身のフレーム長を最小フレーム長である4スロットに設定し、次の2つの手順に従って、自身に設定するフレーム長および割り当てスロットを選択する。

(1) 割り当て情報の生成

新規端末は、設定したフレーム長における各スロットに、そのスロットでパケットを送信する端末を関連付け、自身の割り当て情報とする。このとき、自身より大きいフレーム長を持つ端末の情報も、すべて自身のフレーム長における情報に変換して格納する。

(2) 割り当てスロットの選択

割り当て情報を生成した新規端末は、次の2つの手順に従って、自身に割り当てスロットを選択する。

1. 空きスロット獲得

設定したフレーム長の先頭スロットが空きスロットであり、かつ、先頭スロット以外にも空き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。

2. 複数割り当ての解放

設定したフレーム長において、先頭スロット以外に空きスロットが存在しない場合、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調べる。該当する端末が存在する場合、新規端末は、その割り当ての一部を解放し、自身に割り当てる。

以上の方法によって、自身に設定したフレーム長におけるスロット割り当てが不可能であった場合、新規端末は、自身のフレーム長を2倍にし、上記の

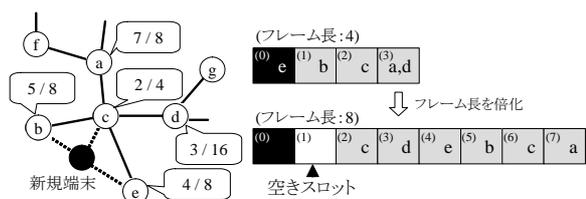


図 3: ASAP/LD における割り当てスロットの選択

動作を再び実行する。これは、割り当てスロットが選択できるまで繰り返される。

この手順の例を図3に示す。図3において、各端末の吹き出しは、右側の値がフレーム長を、左側の値がそのフレーム長における割り当てスロットを表す。また、フレーム中の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、影つきのスロットは他端末に割り当てられているスロットを表す。各スロットにおいて、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における割り当てを試みるが、先頭スロットが端末eに割り当てられているため、自身への割り当てが不可能であると判断する。そこで新規端末は、フレーム長を2倍にし、8スロットでの割り当てを試みる。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であり、さらにスロット1も空きスロットになっているので、新規端末は、空きスロット獲得により、スロット1を自身に割り当てる。

自身の割り当てを選択した新規端末は、決定した割り当て情報を全隣接端末に送信する。この情報を受信した隣接端末は、自身の割り当て情報を更新し、更新した情報を全隣接端末に送信した後、転送モードに復帰する。また、新規端末の隠れ端末は、隣接端末が送信した更新情報をもとに自身の割り当て情報を更新する。

3.3 競合の検出と解決

一般にTDMA方式では、新規端末が、同じスロットが割り当てられた複数の端末と接続する位置に出現した場合、スロット割り当ての競合が発生する。ASAP/LDでは、競合を検出した新規端末が、次の3つの手順に従って、競合を起こしている端末の割り当てスロットを更新する。

1. 競合スロット削除

競合を起こしている端末において、競合していない他のスロットが割り当てられていた場合、その端末から競合しているスロットの割り当てを解放する。競合していないスロットが割り当てられた端末が複数存在した場合は、割り当て

スロット数の多い端末から優先的に割り当てを解放する。

2. 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た場合、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。

3. 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た場合、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している端末に分配する。フレーム長を2倍にしても競合が解決できない場合は、さらにフレーム長を2倍にし、端末にスロットを分配する操作を繰り返す。

3.4 割り当ての解放

ネットワークから退出する端末は、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、データパケットに自身のフレーム長を付与して送信するため、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、その端末の退出を検出できる。退出を検出した隣接端末は、3.5.1節で述べるリンク切断時の処理を行い、自身の割り当て情報を更新する。このとき、退出を検出した隣接端末は、自身の割り当て情報を更新した後、3.2節(2)で述べた空きスロット獲得と同様の方法を用いて、自身に割り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り当てが可能である場合、自身の割り当てを再更新し、更新した情報を影響圏内の全端末に送信する。

3.5 端末移動時の割り当て更新

ネットワーク内の端末が移動した場合、既存のリンクが切断されたり、新たなリンクが生成される。このとき各端末は、以下の処理によって割り当て情報の更新を行う。ここで、1スロットあたりの時間は非常に短く、割り当て情報の更新はネットワークポロジの変化に対して十分に早く完了すると考えられるため、本稿では、複数のリンクが同時に生成、切断することはないと仮定する。

3.5.1 リンク切断時

各端末は、自身の隣接端末および隠れ端末それぞれに対して、パケット転送を中継する端末の情報を中継端末情報として保持するものとする。例えば図4の端末 a は、隣接端末 b, c, e に対する中継端末と

してそれぞれ $\{c, e\}, b, b$ を、隠れ端末 d に対する中継端末として b を保持する。切断したリンクの一端にある端末は、もう一端にある相手端末のフレーム長に等しい期間が経過してもデータパケットを受信しなかった時点で、リンクの切断を検出する。その後、両端末は、次の動作によって自身の割り当て情報を更新し、切断検出通知パケットとして、相手端末の識別子を全隣接端末に送信する。

1. 自身と相手端末の間に、中継端末が存在する場合、相手端末の情報を隠れ端末として保持する。例えば、図4の端末 a と c のリンクが切断した場合、端末 a は c の情報を隠れ端末として保持する。
2. 中継端末が存在しない場合、相手端末の情報を削除する。例えば、図4の端末 b と d のリンクが切断した場合、端末 b は d の情報を削除する。

切断検出通知パケットを受信した隣接端末は、次の動作によって自身の割り当て情報を更新する。

1. 相手端末を隣接端末として保持している場合、切断検出通知パケットの送信元端末を中継端末情報から削除する。例えば、図4の端末 a と c のリンク切断によって、 a からの切断検出通知パケットを受信した端末 b は、 c に対する中継端末情報から a を削除する。
2. 相手端末を隠れ端末として保持しており、かつ、中継端末が切断検出通知パケットの送信元端末のみである場合、相手端末の情報を削除する。例えば、図4の端末 b と c のリンク切断によって、 b からの切断検出通知パケットを受信した端末 d は、自身の割り当て情報から c を削除する。
3. 相手端末を隠れ端末として保持しており、かつ、切断検出通知パケットの送信元端末以外にも中継端末情報が存在する場合、中継端末情報から検出通知の送信元端末を削除する。例えば、図4の端末 a と c のリンク切断によって、 a からの切断検出通知パケットを受信した端末 e は、 c に対する中継端末情報から a を削除する。

3.5.2 リンク生成時

図5のように、端末 a と端末 b の間に新たにリンクが生成され、端末 a が、未知の端末 b からデータパケットを受信した場合を考える。

【隣接端末】	
端末	中継端末
b	c, e
c	b
e	b
【隠れ端末】	
d	b

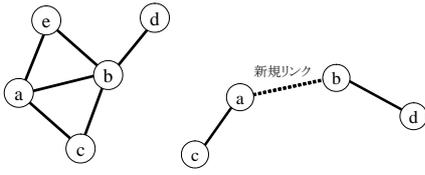


図 4: 中継端末情報

図 5: 新規リンク生成

まず端末 a は、端末 b からのデータパケットを受信した時点で制御モードに移行し、自身の割り当て情報を含む接続検出通知パケットを全隣接端末に送信する。これにより、端末 c は、 a が未知の端末と接続したことを認識する。一方、端末 b は、未知の端末 a とのリンク生成を検出する。

端末 a からの接続検出通知パケットを受信した端末 b は、制御モードに移行し、自身の割り当て情報を更新する。その後、端末 a と同様に、自身の割り当て情報を含む接続検出通知パケットを全隣接端末に送信する。これにより、端末 d は、 a と b の接続を認識し、自身の割り当て情報を更新する。

一方、 b からの接続検出通知パケットを受信した端末 a は、自身の割り当て情報を更新し、更新情報を全隣接端末に送信する。更新情報を受信した端末 c は、この時点で端末 a と接続した端末が b であることを認識し、自身の割り当て情報を更新する。

3.5.3 リンク生成による衝突の検出と解決

新たにリンクが生成された場合、図 5 の各端末において、次の 3 種のパケット衝突が発生する可能性がある。それぞれの場合における、各端末の動作について説明する。

(1) 端末 a と b の衝突

端末 a および b に隣接している端末 c および d は、データパケットを正確に受信できないため、異常が発生したことを検出する。そこで、端末 c および d は、異常検出通知パケットとして、異常を検出した時刻を端末 a および b に送信する。異常検出通知パケットを受信した端末 a および b は、パケットに含まれている時刻情報から、自身がパケット衝突の要因となっていることを認識し、制御モードに移行する。その後、端末 a および b は、ランダムな待ち時間を取り、自身の割り当て情報を全隣接端末に送信する。どちらかの割り当て情報を先に受信した端末 a または b は、3.3 節の方法によって競合を解決する。これにより、各端末は、3.5.2 節で述べた方法によって、自身の割り当て情報を更新する。

(2) 端末 a と d 、または、端末 b と d の衝突

衝突を起こした端末の間にある端末 a または b が

異常を検出し、異常検出通知パケットを送信する。衝突の要因となった端末は、ランダムな待ち時間を取り、自身の割り当て情報を送信する。これにより、異常検出通知パケットを送信した端末 a または b は、相手端末の割り当て情報を受信し、3.3 節の方法によって競合を解決する。

(3) 端末 a と d 、および、端末 b と d の同時衝突

(2) と同様に、衝突を起こした端末の間にある端末 a および b が異常を検出し、異常検出通知パケットを送信する。これにより、各端末はランダムな待ち時間を取り、自身の割り当て情報を送信する。先に割り当て情報を受信した端末 a または b は、3.3 節の方法によって競合を解決する。

4 性能評価

本章では、提案手法の性能を評価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/LD と USAP、および、USAP-MA の性能を比較した。

4.1 評価環境

シミュレーション実験では、 100×100 の 2 次元平面の領域上で、端末数が 2 の状態から、端末数が n になるまで 1 端末ずつネットワークに参加させ、初期状態を生成した。このとき新規端末は、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。その後、各端末は、2 次元平面内からランダムに目的地を決定し、単位時間あたり 0 から 1 の範囲でランダムに決定した速度で移動するものとした。端末が目的地に到達すると、0 から 10 単位時間の範囲でランダムに決定した期間だけ一時停止した後、再び次の目的地を決定し、移動するものとした。また、各端末の無線通信範囲は 10 とし、シミュレーション時間は 10,000 単位時間とした。

USAP では、すべての端末が確実にスロットを獲得できるように、フレーム長を端末数 n と等しいスロット数に設定した。また、各端末が衝突なく NMOP を送信できるように、 n 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。

また、USAP-MA において、新規端末は、自身のフレーム長を隣接端末の中で最大のものに設定するものとした。設定した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の 1 つを自身に割り当てるものとした。一方、リンクの切断が発生したとき、その両端に存

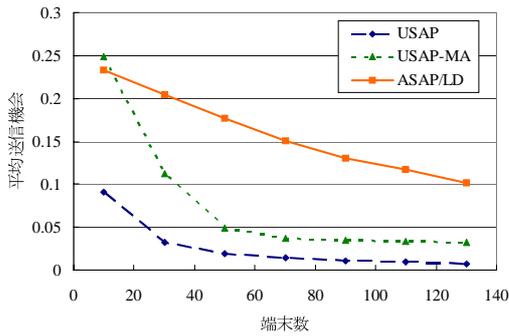


図 6: 平均送信機会

在する端末は、相手端末の割り当て情報を削除した後、フレームの後半部の全スロットが空きスロットとなった場合、自身のフレーム長を $1/2$ にするものとした。

各手法において、各端末は、自身に割り当てるスロットを選択する際に、割り当て可能なスロットの中でスロット番号が最小のものを選択するものとした。

4.2 評価基準

シミュレーション実験では、各手法の平均送信機会を比較した。ここで、ネットワーク内の各端末が持つフレーム長に対して、その端末に割り当てられているスロット数の割合を、その端末の送信機会と定義し、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。

4.3 評価結果

シミュレーション結果を図 6 に示す。グラフの縦軸は平均送信機会を表し、横軸はネットワーク内の端末数 n を表す。グラフより、フレーム長を固定で与えている USAP では、端末数分のスロットだけパケットの送信間隔が空いてしまうため、送信機会が常に小さいことが分かる。一方、フレーム長を動的に与える USAP-MA および ASAP/LD では、端末数の増加に伴う送信機会の減少は見られるものの、USAP と比較して高い送信機会が得られており、より効率的なスロット割り当てが行われていることが分かる。また、ASAP/LD は、USAP-MA と比較して、空きスロットの発生をさらに抑制することにより、より高い送信機会を確保できていることが分かる。

5 まとめ

本稿では、アドホックネットワークにおいて、帯域を効率的に利用する TDMA スロット割り当て手法として ASAP/LD を提案した。ASAP/LD では、各端末が、自身の影響圏内に存在する端末の割り当て状況に応じて、フレーム長を動的に設定することによって、空きスロットの発生を最小限にとどめる。また、各端末が、ネットワークトポロジの変化を自律的に検出し、スロット割り当てを更新する。さらに本稿では、シミュレーション実験により ASAP/LD の性能評価を行い、従来手法と比較して帯域の利用効率が向上することを確認した。

今後は、各端末の通信範囲が異なる環境において、端末へのスロット割り当てを効果的に行う手法について検討する予定である。さらに、トラフィック量など、ネットワーク環境の変化に応じて、割り当てを適応的に変更する手法についても検討する予定である。

謝辞 本研究は、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、文部科学省科学技術振興調整費研究課題「モバイル環境向 P2P 型情報共有基盤の確立」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] 神崎 映光, 上向 俊晃, 原 隆浩, 西尾 章治郎: “アドホックネットワークにおけるフレーム長最小化のための TDMA スロット割り当て手法,” 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2003) 論文集, vol. 2003, no. 9, pp. 693-696 (June 2003).
- [2] A. Kanzaki, T. Uemukai, T. Hara, S. Nishio: “Dynamic TDMA slot assignment for ad hoc networks,” in *Proc. International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2003)*, pp. 330-339 (Mar. 2003).
- [3] H. Lee, J. Yeo, S. Kim, and S. Lee: “Time slot assignment to minimize delay in ad-hoc networks,” *IST Mobile Communications Summit 2001* (Sept. 2001).
- [4] L. C. Pong and V. O. K. Li: “A distributed time-slot assignment protocol for mobile multihop broadcast packet radio networks,” in *Proc. IEEE MILCOM '89*, vol. 1, pp. 70-74 (Nov. 1989).
- [5] C. D. Young: “USAP: a unifying dynamic distributed multichannel TDMA slot assignment protocol,” in *Proc. IEEE MILCOM '96*, vol. 1 (Oct. 1996).
- [6] C. D. Young: “USAP multiple access: dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking,” in *Proc. IEEE MILCOM '99* (Nov. 1999).