

アドホック・センサネットワークにおけるタイミング同期の安定化、セキュリティ向上に関する研究

田 中 久 陽 電気通信大学電気通信学部准教授

本研究調査は実環境におけるアドホック・センサネットワークでの運用を想定した実用に耐えるタイミング同期手法の構築を目指すものである。そのために最終的にネットワークの実装実験が必要となり、本年度はその準備を行ってきた。

本研究の成果は相互に関連する三つの項目からなっており、以下でそれぞれについて説明する。

(i) 現在のアドホック・センサネットワークにおけるタイミング同期方式における障害・問題点の解明と解消方法の検討：従来のフィールド実験から、現在のアドホックネットワークにおけるタイミング同期方式には幾つかの障害が生じていることが判明している。この問題は特に、MAC層の問題に起因することが大きい。すなわち、ネットワークが大規模かつマルチホップであるために、当初シングルホップのネットワークを想定して提案されたMAC層のタイミング同期方式に障害が生じているのである。本研究ではこれらの障害を検出し、その原因究明と原理的な解決方法を検討した。具体的な成果として、(a)複数のIBSSからなるアドホックネットワークにおいて、当初独立していたIBSS同士が融合することによるタイミング同期の障害の解明、(b)その結果を利用し、この同期障害を回避するアルゴリズムの構築、及びその特許出願（この特許出願はPCT出願され、現在米国特許を出願準備中である。）、(c)さらに、ネットワーク内にデータ通信が行われている現実的な状態での上記(a)の同期障害の解析が行われており、いずれも研究会等で発表されている。

(ii) 動的なネットワーク変化に追従可能なセンサネットワーク向けタイミング同期方式の実装検討：以上のアドホックネットワークにおけるタイミング同期方式の問題点を解決することにより、センサネットワークにおいてもネットワークの動的変化に素早く追従可能なタイミング同期方式を構築することが可能になることが期待できる。具体的には、FTSP(Flooding Timing Synchronization Protocol)として知られている同期方式において、動的なネットワーク変化に対する耐性を実現する新しいアルゴリズムを提案し、MicaZに実装することにより、その動作検証ならびに性能評価を行った。

以上の項目(i)、(ii)は平成18年度の当研究調査によりある程度の成果が得られており、その成果を基に以下の項目(iii)を継続して重点的に研究を進める予定である。

(iii) GPS等の信頼できる時刻情報を利用するセキュアなタイミング同期方式の検討：最近米国ではセンサネットワークにおける内部の故障や意図的な攻撃に対するセキュリティーを保証する同期手法の検討が進められているが、このセキュリティー保証同期方式は、セキュリティーを保証する認証のためのオーバーヘッドが大きく、センサネットワークとしては負荷が多大であると考えられる。これに対し、本研究は、この複雑なセキュリティー保証方式とは異なる簡単かつ有効な同期手法を検討した。これを実現するために、ネットワークの内部のローカルな「時刻(タイミング)」をグローバルな時刻に同調させ意図的な攻撃等を検出するメカニズムを提案し、その動作検証を行なうことを計画し、その研究が進行中である。この項目は、車車間通信のようにモバイル環境で有効な収束の早いタイミング同期手法の構築を念頭に研究を進めており、現時点では、特に車車間通信で有効な新規な同期アルゴリズムの構築を行い、その特許出願を行った。

〈上記項目(i) タイミング同期方式における障害・問題点の解明と解消方法の検討に関する結果の詳細〉
以上の通り、上記 3 項目について研究成果を得ているが、ここでは紙面の制限により、項目(i)についてその結果の詳細を記載する。

1. タイミング同期の機構と問題設定

802.11のタイミング同期のプロセスはTSFにより直接に規定される部分と、電源管理や端末の配置等により間接的に影響を受ける部分からなる。以下では、まずTSFの機構について述べ、さらにここでの問題設定として、端末の電源管理と空間配置について説明する。

1.1 802.11 アドホックモードにおけるタイミング同期の機構

各端末のTSFは64bitのカウンタ(ひとつのカウンタは1 [μ s])を管理しており、この値が各端末の維持管理するローカル時刻(すなわち、TSFタイマ)に相当する。基地局モードの場合、基地局から周期的に送信されるビーコンに含まれる時刻情報に従い、各端末はローカル時刻を更新する。これに対し、アドホックモードにおいては基地局が存在せず、端末同士でビーコンを送受信してそれぞれのローカル時刻を更新していく必要が生じる。その際、ビーコンをむやみに送信するオーバーヘッドを避ける工夫も必要となる。このために、802.11アドホックモードのTSFは端末同士で競合を行なうことにより、ビーコンを送信する端末を随時選出する方式を採用している。以上の機構は具体的には次の(1)-(5)のように規定されている。

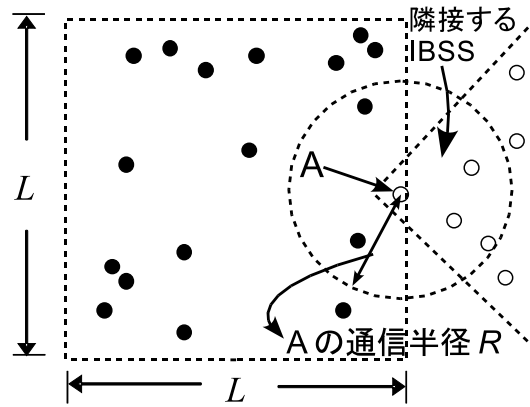
(1) 各端末は、ある時刻(Target Beacon Transmission Time; TBTT)でアウェイク状態となり、次のビーコンを送信するまでの待機時間(すなわち、バックオフタイマ)を設定する。このバックオフタイマの初期値は0からコンテンションウィンドウ値(CW)の2倍の値までの $2 \cdot CW + 1$ 個の整数からランダムに選出される。

(2) 各端末は上記のカウンタにより、自身のバックオフタイマの値をカウントダウンしていき、これが0になった時点で、送信範囲内にある全ての端末に向けビーコンを送信する。

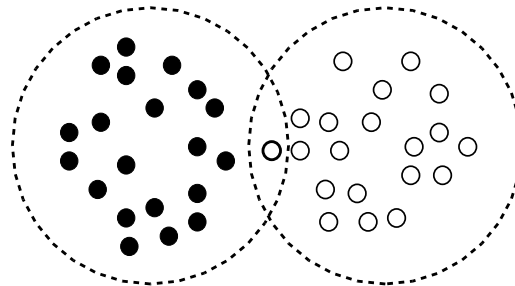
(3) バックオフタイマ値が0になる前に他の端末からビーコンを受信すると、その端末は、この時点以降に予定していたビーコン送信をキャンセルする。

(4) ビーコンを受信されると、端末は自身のTSF タイマと受信したビーコン内の時刻情報(タイムスタンプ)を比較し、受信したタイムスタンプのほうが進んでいるときには自身のタイマを受信したビーコンのタイムスタンプの値に更新する。

(5) ビーコン送信を行った端末は、その後(次のアウェイク状態まで)1ビーコン周期にわたりアウェイク状態を継続し、スリープ状態とならない。ビーコンを送信しなかった端末は、その後スリープ状態となり、1ビーコン周期の後再びアウェイク状態となる。ここで、1ビーコン周期とはアウェイク状態とスリープ状態の1つのサイクルに相当し、以下では例えば100[ms]の長さをもつとする。



(a) 想定するネットワークと初期状態
(マルチホップネットワークの場合)



(b) 2つのシングルホップネットワークが隣接する場合

図1 ネットワーク構成

1. 2 問題設定

最も簡単な構成例として、まず図1(a)のように縦横 L [m] \times L [m] の正方形領域内に多数の端末がランダムに配置されているケースを考える。ここでは充分広い空間を想定し、壁、天井等での電波の反射はないものとする。いま初期状態として各端末(図1(a)の●で示された端末)は相互にTSF タイマを同期し全体のタイミング同期が安定して得られているとする。ここで領域外部の他の隣接するIBSS(図1(a)の○の端末)から一つの端末(図1(a)の端末A)が速やかに領域内のある位置に参入したとする^(注1)。この参入のしかたとして、実際に端末が移動してくる場合、あるいは参入する端末のビーコン送信可能範囲が時間的に変動したために端末の位置は不変でありながら想定する領域内に影響が及んでくる場合^(注2)の両者が考えられる。ここでは、問題の本質を損なわないことを考慮して両者を同一視して扱う。

また図1(a)の例において、通信可能範囲が十分に広く、正方形領域が一つのシングルホップのネットワークになっている場合は2つのシングルホップネットワークが融合するケース(図1(b))に帰着する。このケースはすでに検討されており、例えば隣り合う2つの小部屋に端末が多数配置され、その小部屋の間(あるいはドア)があり、その廊下(あるいはドアの近く)に一台の端末が存在する状況に対応する。

ここでまず、ある一つのIBSS(図1(a)の正方形領域)に注目する。このIBSSに参入する他のIBSS(図1(a)の隣接するIBSS)の端末のもつローカル時刻(TSFタイマ)は、このIBSS内の端末の同期しているローカル時刻と比べ進んでいるか遅れているかのいずれかである。そのうちの遅れている場合、次の通り状況は簡単である。この場合には参入した端末は最終的に周りの端末からビーコンを受信し、そのTSFタイマの値に同期してタイミング同期が完了する(2.1の(4)項に対応)。一方、参入した端末のもつローカル時刻が他の端末のそれより進んでいる場合には状況は複雑

(注1):このとき、図1(a)の●で示された端末群と○で囲まれた端末群はいずれも各々のIBSSに属したままであるので、孤立した端末は生じないものと考えられる。したがってアクティブスキャンを行なう端末はないものと仮定する。仮に孤立した端末が生じ、アクティブスキャンを行なったとしても、その端末は移動先のIBSSに即時に融合するだけのことであり自明である。

(注2):このようなことは、例えば隣接するIBSSを当初遮蔽していたドア等がなくなることにより生じ得る。

になる。この場合、再同期の過程は参入した端末のもつローカル時刻、ならびにアウェイク/スリープ状態のタイミングに依存する。もし参入した端末のアウェイク/スリープ状態のタイミングが領域内の端末のそれに充分近ければ、参入した端末のアウェイク/スリープ状態は領域内の端末のそれに近くなり、同時にアウェイク状態となる時間が存在する。このような場合には、参入した端末の近傍で複数の端末に一度に同期が進行し、短時間で全体の再同期が完了することが期待される。ところが、参入した端末のアウェイク/スリープ状態のタイミングが領域内の端末のそれと大幅に異なり、お互いにアウェイク状態となる時間を持たない場合には、再同期の過程は徐々に進行し、短時間では終了しないことが生じ得る^(注3)。

一方、この再同期に必要な時間は通常、上位のレイヤから通常高々数秒に収まることが要求される。そのために上記の生じ得る最悪のケースを検討することは、802.11をベースとしたマルチホップアドホックネットワークを構築する際の現実的な制約条件を明らかにする意味をもつ。この目的から、以下では参入してくる端末のアウェイク/スリープサイクルの位相は、他の端末のそれに対し、逆位相(180度の位相差)と設定する。そのもとで領域内の端末数と各端末のビーコン送信可能半径(R)を変化させ、それぞれの場合においてどのような過程で同期に至り、またこれにどれほど時間を要するかをシミュレーションにより系統的に解析する。

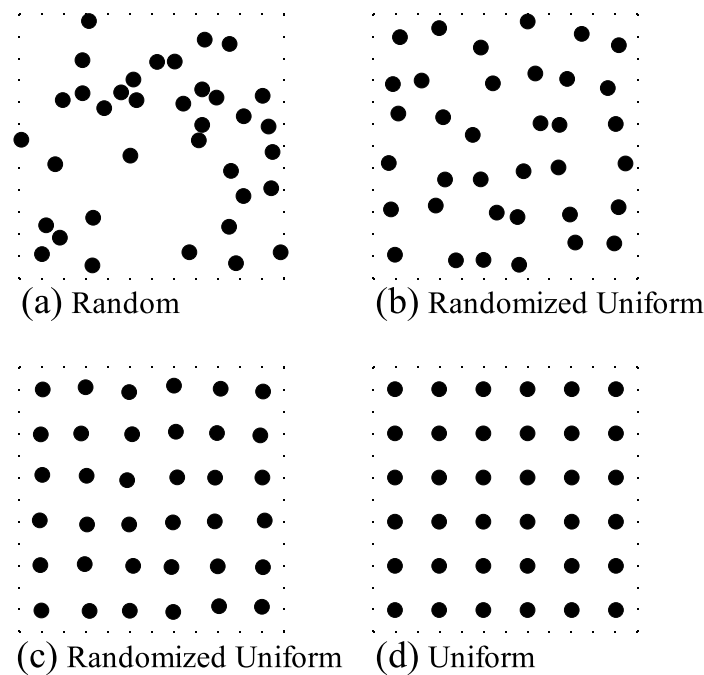


図2 ノード配置例

2. タイミング同期過程のシミュレーションとその結果

ここでは端末配置例として、図2(a), (b), (c), (d)の4通りの場合を対象とする。図2(a)は図1(a)と同じく縦横 L [m] \times L [m]の正方形領域内に一様乱数にしたがってランダムに端末を配置した場合である。図2(b), (c)は端末の存在密度がほぼ均一の一様分布に近い場合であり、それぞれ端末間距離を(エリア面積/端末数) $1/2 \times 0.2$, (エリア面積/端末数) $1/2 \times 0.8$ 以上とする条件下でランダムに配置している。図2(d)は図2(b), (c)の場合の理想化であり、一様分布のアレー状配置であり、(エリア面積/端末数) $1/2 \times 1.0$ の等間隔で配置している。ここでエリア面積はいずれの場合も L^2 であり、これに対し端末数 N を一定と設定する。これにより以上のいずれの場合も空間平均した端末存在密度は等しくなる。以下のシミュレーションでは $L = 100, 160, 220$ [m]の場合につき、それぞれ $N = 62, 92, 122$ と設定する。すなわち、密度をほぼ一定 (~ 0.025 [1/m²]) としてシステムサイズを増加している。

シミュレーションの目的は、これらの場合の結果を比較することにより、システムサイズ(すなわちネットワークのマルチホップ性)あるいは端末配置が、同期過程の詳細および同期に要する時間にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。そのためにシミュレーションの初期条件として、上記のいずれの場合も、参入する1つの端末を除く全

(注3): この場合には、まず新規参入した端末がその周辺で2.1の(5)項により、アウェイク状態を延長している端末を追従同期させ、これを周囲に繰り返すことにより同期が進行する。その詳細は[17]に明記されており、また本論文の目的から幾分はずれるものであるのでここでは紙面の制約上割愛する。

ての端末はタイミング同期していて、したがってアウェイク/スリープサイクルの位相も同期しているとする。これに対し新たに参入する端末のみ、他の端末より進んだローカル時刻をもち、これに対応するアウェイク/スリープサイクルの位相は他の端末のそれに対し180度逆位相と設定する。また参入した端末の位置は、図2(a), (b), (c)の場合、領域内の端末の一つをランダムに選び、その端末が参入した端末に相当するものとする。図2(d)のアレー状の場合は、以下で行なう解析のために、その位置を領域の右端の特定の位置にあらかじめ固定した。

シミュレーションの終了条件は、各試行毎に初期の2つのIBSSが一つに融合し、全ての端末のローカル時刻が1つに同期する時点とした。以下ではこの全ての端末のタイミング同期が完了した状態を完全同期とよび、完全同期を達成するまでに要した時間を再同期時間(Resynchronization Time)とよぶことにする。またこのシミュレーションでは全ての端末は移動しないと設定した。この設定は車々間通信等の高速移動端末の場合には制約となるが、高々数秒オーダーのタイミング同期のタイムスケールに比べ、充分ゆっくりとした移動について第一近似として妥当であると考えられる。すなわち、まず端末の移動を無視できる単純な場合を想定し、そこでのタイミング同期過程の本質的な要素を明確にすることを当初の目標としている。同様に、次の三つの簡略化を行なっている。すなわち、

(1) 端末の通信可能範囲は全ての端末で同様であり、IBSS 内で時間変化しないとする。したがってリンク特性は対称かつ定常的である。

(2) ビーコンの送受信における遅延は1ビーコンスロット長(今の場合50 [μ s])に比べ充分小さく、0と近似できる。

(3) 端末のTSF タイマーは時間的に一定の周期をもち、全ての端末で同一の周期をもつとする。

以上のシミュレーションをC言語によるプログラムを自作し行なった。シミュレーションに用いたパラメーターは表1の通りである。このプログラムの信頼性は理論値とシミュレーション結果の比較を行なうことにより確認されており、この範囲で問題は認められない。

2.1 同期障害の発生

以上に述べた設定のもとで領域の大きさ L を固定し、端末の通信可能範囲 R を狭い場合から広い場合まで変化させ、それぞれの場合に対し10000回の試行を行なった。このシミュレーションの結果、再同期までに要した時間の平均値(平均再同期時間)を図3に示す。なお、シミュレーションは上記の3通りの L の値以外に対しても行なわれているが、紙面の制約のため、ここでは $L = 100, 220[m]$ の場合のみを示す。また図3のデータにおいてarray は図2(d)のノード配置の場合に、random 1, 2, 3 はそれぞれ図2(a)の異なる3パターン、uniform 1, 2 はそれぞれ図2(b), (c)の端末配置の場合に対応している。

以上のシミュレーションの結果から、共通して次の三つの特徴が認められる。

(1) いずれの端末の配置においても $R/L = 0.5 \sim 1.0$ の範囲内において平均再同期時間が最大となる。これより大きい R ($\sim \sqrt{2}L$)においては、ネットワークはシングルホップとなり、平均再同期時間は R に依存せず一定値をとる^(注4)。

(2) ランダムに端末を配置した場合と、それ以外のほぼ空間一様な分布の場合を比較すると、前者の方が最大値をとる R の値が幾分小さくはなるが、大きな差は生じない。

(3) シミュレーションにおいて、新たに参入する端末の位置を右端に固定した場合(図3(a), (b)の×に対応)と、ランダムに毎回更新する場合(上記以外の場合)の比較を行なったところ、いずれの場合においても後者のランダム更新の場合にわずかに平均再同期時間が長くなるのみであり、有意な差は生じない。

(注4):なぜシングルホップの場合がマルチホップの場合より同期に要する時間が短くなる場合があるか、という点については、3.2で述べるように、ビーコン同士のコリジョンによる影響として説明される。

Parameter	Value
Channel Rate	1Mbit/s
Data	550bit
CW	15
Slot Time	50 μ s
Beacon Period	100ms
Transmission Delay	0 μ s
Clock Accuracy	$\pm 0\%$

表1 シミュレーションパラメータの設定

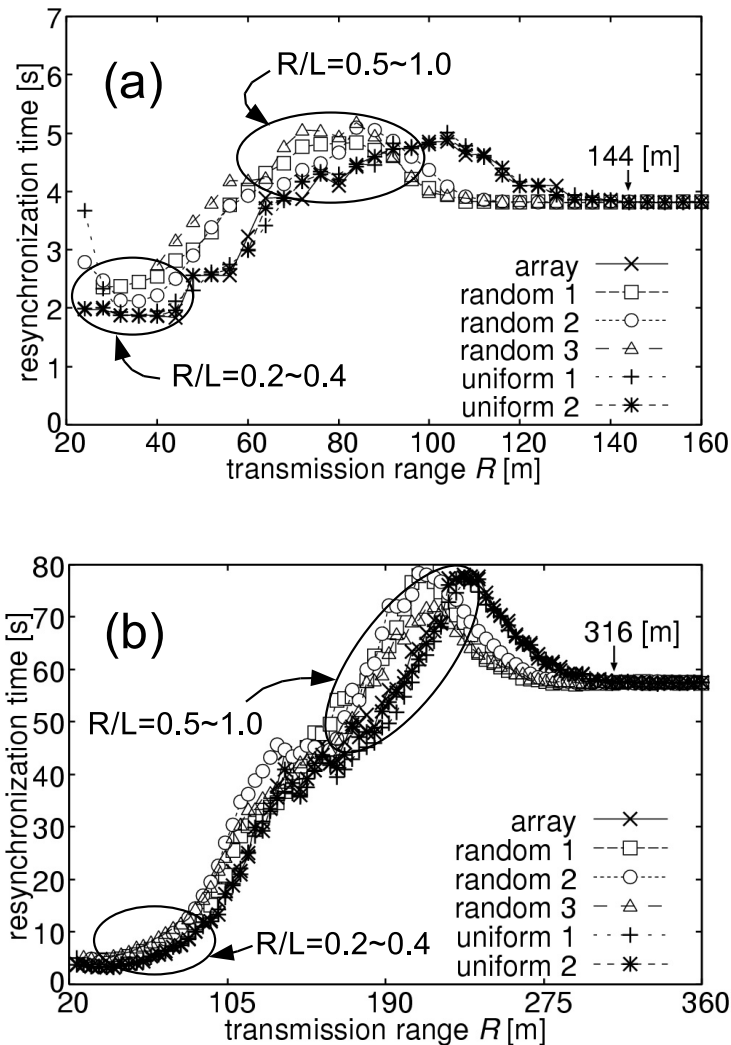


図3 平均再同期時間の通信可能範囲依存性
(a) $L=100[m]$, (b) $L=220[m]$.

2.2 ビーコン伝播パターンの生成

以上のシミュレーション結果から、平均再同期時間を決定するおもな要因は、通信可能半径 R の大きさであり、端末配置の相違や参入する端末の位置は平均再同期時間にあまり影響を与えないことが判明した。そこで以下では、平均再同期時間についての R 依存性を明らかにしたい。この R 依存性を考える際に注意すべき点は、想定するネットワークの空間スケール L の影響である。すなわち、ある R の値が与えられた場合、異なる L に対して平均再同期時間は大きくもなり、小さくもなる。そのため、ここでは通信可能半径 R をシステムサイズ L でスケーリングした正規化された通信半径

R/L を尺度(横軸)として平均再同期時間の比較を行なう。縦軸は、各データ毎に右端での一定値^(注5)を1となるように正規化した時間を用いている。比較対象データ例として、ここでは3.1で述べたuniform 1の場合を考える。その結果、図4に示す通り、明確なパターンが得られ、その特徴は以下のように要約される。

(A) 通信可能半径 R が小さい場合 ($0.2 < R/L < 0.4$) には、ネットワークのマルチホップ性が高いにも関わらず、平均再同期時間は最小となる。

(B) 一方、通信可能半径が大きい場合 ($\sqrt{2} < R/L$) には、平均再同期時間は R に依存せず一定値をとる。これはネットワーク全体が全ての端末が互いに直接通信可能なシングルホップとなっているために R 依存性がなくなるためである。

(C) 以上の2つの場合の中間領域 ($0.5 < R/L < 1.0$) において、ネットワークはマルチホップであり通信可能半径もある程度大きくなるが、このとき平均再同期時間は最大となり、この例では最大値が約 5 [s] となる。以上の (A), (C) の結果はいずれも新しいタイミング情報の更新がネットワーク内でいかに伝播していくかという問題に帰着する。そこでこれを詳しく調べた結果(図5)、上記のシミュレーションにおいてある特徴的なビーコン伝播の空間パターンが生じていることが判明した^(注6)。これらを模式的に表したものが、それぞれ図5 (a), (b) である。この図において矢印(\Leftarrow)はローカル時刻の更新同期が徐々に伝播していく方向を示している。以上の伝播パターンは、図5(c)に示す異なる端末配置例における平均再同期時間のいずれにおいても同様に得られるものである。

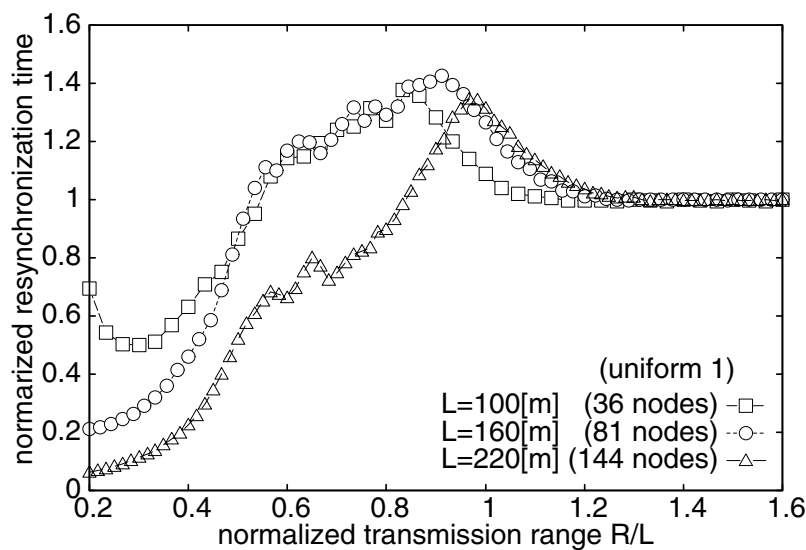


図4 平均再同期時間と正規化された通信可能範囲の関係

このような空間パターンが生成する理由、すなわち端末の通信可能範囲 R に依存して2つの異なるタイミング情報伝播パターンが生じる理由は、以下の2点に整理される。

(i) 各端末の通信可能範囲内に存在する他の端末の数(すなわち、局所的な端末の存在密度)は、領域内の端と中央部では異なっており、その空間的不均一性が最も強く表れるのは上記のケース(C)に対応する通信可能範囲の場合である。一方、その局所的な端末の存在密度は、上記のケース(A)における狭い通信可能範囲の場合には領域内の端で幾分低くなるに過ぎず、全体としてその不均一性は最も小さくなっている。

(ii)したがって、ケース(C)において、領域の中央部と端での端末のビーコン送信の機会是最もその差が大きくなる。すなわち中央部では、競合の結果ビーコンを送信しアウェイク状態を維持する端末の割合は低く、逆に端ではその割合は相対的に高くなる。以上は802.11 のビーコン送信競合のメカニズム(2.1 の(1) - (5)項)の直接の帰結である。

ここで本質的となるのは、タイミング同期はアウェイク状態にある端末のみを経て伝播するという点であり、以上の理由(i), (ii)から、ケース(C)においては領域の端で巻き込むようにタイミング同期が伝播するパターンが生じることが説明される。一方、狭い通信可能範囲のケース(A)では、アウェイク状態を維持する端末の割合は領域内でほぼ均一であり、このために参入した端末の周りから放射状に同期が伝播するのである。

(注5):それぞれ, $L = 100, 160, 220$ [m] に対し, 3.8 [s], 12.6 [s], 57.5 [s] である。

(注6):特に、図2 (d) の配置において、このパターンは明確に現れる。

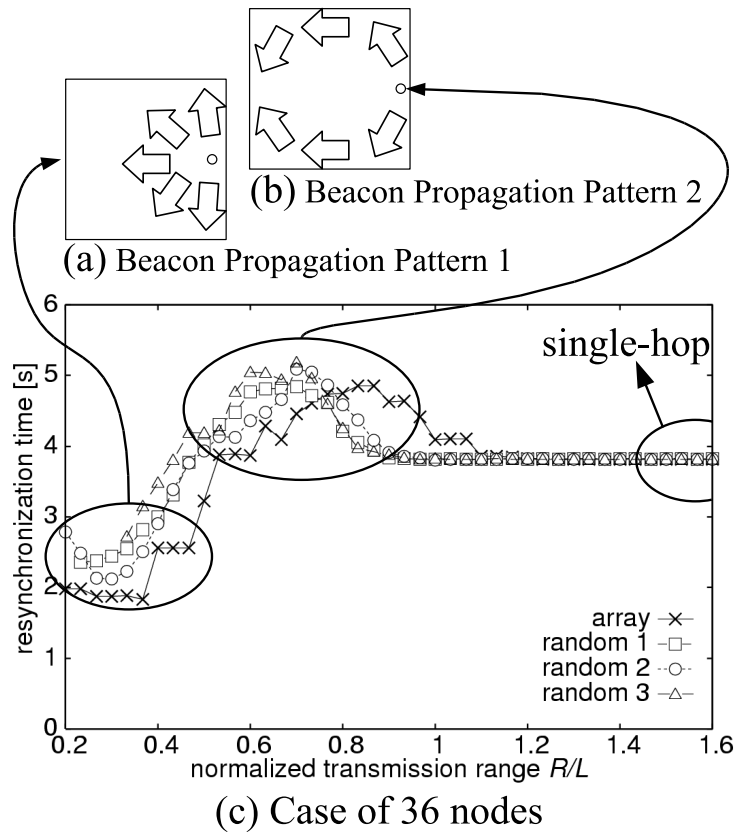


図5 平均再同期時間と典型的なビーコン伝播パターン
 (a) ビーコン伝播パターン1
 (b) ビーコン伝播パターン2
 (c) 平均再同期時間(端末数36台の場合)

また、ケース(C)の場合、同期過程の終盤においてビーコンのコリジョンが頻繁に生じることが認められる。図6はこの状況を模式的に示している。ここで見られるように、端部の端末で既に同期が完了した後に、領域の四隅の端末を中心としてビーコンの送信が頻繁におこなわれる。これらの端末は互いにその通信可能範囲の外にあり、独立してビーコン送信を行なう。そのためビーコンのコリジョンが生じ易くなっている。ビーコンのコリジョンが生じると、その時点で同期は進行しないので、同期が完了するまでに平均して長時間が必要となる。このコリジョンのパターンは初期に参入したノードの位置と無関係に生じることが認められ、したがって3. 1の特徴(3)が成立する根拠を与えている。

3. 新しい同期手法の提案と性能解析

マルチホップネットワークではビーコン送信競合の度合いが局所的な端末密度に依存し、ビーコン伝播に固有の空間パターンが生じ、結果として空間的同期障害を生じるメカニズムが以上のシミュレーションより明らかになった。したがって、この同期障害を回避して平均再同期時間を短縮する一案として、以上のビーコン送信競合の不公平性を抑える方法が検討に値する。このため、以下では従来の802.11のTSFの枠組みをベースとして、これに若干の変更のみで実現可能な改善手法を検討し、その性能評価および動作機構の解析を行なう。

3.1 新しい同期手法の提案

以上のシミュレーションにおいて、ビーコン送信をおこなった端末の送信時点でのバックオフタイマー値を調べると、同期障害が生じる場合はネットワークの端部の端末でその値が比較的大きくなり、逆に中央部では小さな値に限られることが判明した。これは上記のビーコン送信競合の度合いが局所的な端末密度に逆比例し、その様子がバックオフタイマー値により把握されることを示している。各端末は自らのバックオフタイマー値を参照できることを考慮し、以下では、この値を基準としてビーコン送信競合の不公平性を抑える手法(提案手法1)を提案する。また、この提案手法1との比較のため、バックオフタイマー値は一切参照せず、そのかわりに各端末がある一定頻度で強制的に1サイクル間アウェイク状態を維持する手法(提案手法2)を考え、両手法の性能の比較を行なう。

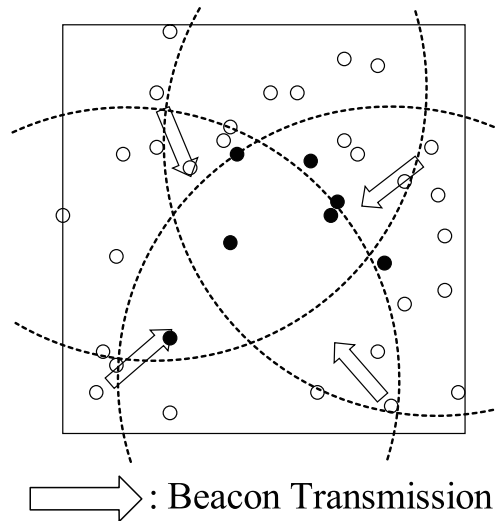


図6 同期過程の終盤におけるビーコンコリジョンの様子

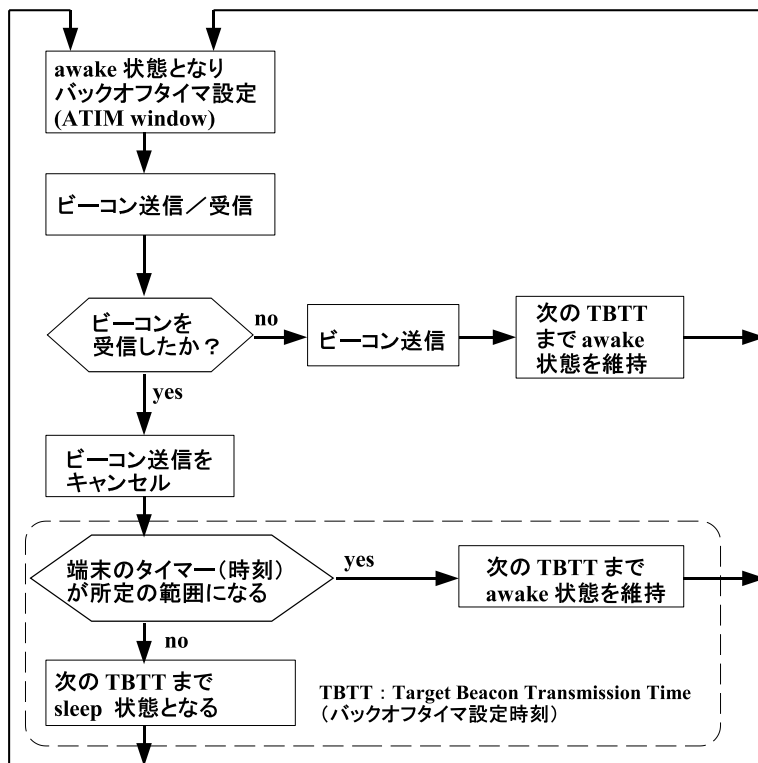


図7 提案手法2のアルゴリズムの概要

3. 1. 1 提案手法1

提案手法1は各端末がそのバックオフタイマ値を参照し、かつ802.11のTSFに付加する変更を極力少なくすることを重視した手法である。その詳細は以下に示す通りである。

(i) ビーコン送信競合により選出された端末は、その時点で、もしそのバックオフタイマ値がある与えられた閾値より大きければビーコン送信を中止する。逆にその閾値以下であれば予定通りビーコン送信を行なう。

(ii) 以上のいずれの場合も、この端末はその後、次のビーコン送信時まで1ビーコン周期アウェイク状態を維持するものとする。

3.2 提案手法1の性能評価

上記変更点(3.1.1)を802.11のTSFに付加した結果、得られた同期性能のデータを図8に示す。ここで×でプロットされたデータは元の802.11のTSFにより得られたもので、他の+、*、□のデータは上記の提案手法1において閾値をそれぞれ、1、2、さらに3に設定した場合に対応している。また、図8のデータはいずれも10,000回の試行の平均を示している。図8(a)、(b)、(c)は一例として端末数を144台としたアレー状配置(図2(d))の場合に対し、それぞれ平均再同期時間、同期過程におけるアウェイク状態の端末数変化、同期完了後の定常状態時におけるアウェイク状態の平均端末数を示す^(注7)。ただし、図8(b)は通信可能半径 R を240[m]とした場合の結果を示している。 $(R > 100$ [m]での他の R に対してもほぼ同様の傾向が認められる。)図8(d)は図1(b)に示したシングルホップのIBSSの場合に提案手法1を用いた結果を示している。この場合、1つのIBSS内の端末数(N)を2から150まで連続的に設定し、これに対応する平均再同期時間をプロットしている。以上のデータから提案手法1は次のような性能(a)、(b)、(c)をもつことが認められる。

(a) 図8(a)に示す平均再同期時間の比較から、提案手法の3通りのデータ(+、*、□)はいずれも802.11のそれ(×)と比べほぼ同等もしくは数分の1まで、再同期時間の短縮がなされることを示している。ただし $R < 60$ [m]の狭い通信可能範囲の場合は逆の効果が生じ、かえって再同期時間が長くなることわかる。特に再同期時間の短縮の効果が著しいのは、提案手法でビーコン送信中止の閾値を最も小さく設定した場合(+)である。この場合、 $R = 240$ [m]の辺りでほぼ8分の1の時間短縮がおこなわれている(図8(a)内「同期完了」のデータを参照)。

(b) 図8(b)は図8(a)と同じ条件下で、再同期が完了するまでの過程において、各ビーコン周期でアウェイク状態を維持したトータルの端末数の時間変化を表示している。ここでは $R = 240$ [m]と設定し、10,000回の試行の平均を求めた。ここで、図中の「同期完了」は平均してこの時点で再同期が完了することを示している^(注8)。(再同期完了後のデータは図8(c)参照)その結果、元の802.11の場合ほぼ一定の数(～5)のアウェイク状態の端末が長時間持続するのに対し、提案手法の場合は一度アウェイク状態の端末数が増加するものの、比較的短時間の間に再同期が完了し、定常値に戻ることが認められる。この傾向は、特に閾値を最小に設定した場合(+)に顕著である。以上のデータから、再同期完了までにアウェイク状態となった端末数の総和(図8(b)のデータの積分値)は、802.11より提案手法の方が幾分多くなるものの、提案手法はこれに見合う同期の高速化を達成することが分かる。

(c) 図8(c)は、図8(a)と同じ条件下で再同期が完了した定常状態において、時間平均したアウェイク状態の端末数の R 依存性を示している。その結果から、提案手法は、802.11の場合より常に多くのアウェイク状態の端末が存在することがわかる。ところが、その値は $R > 180$ [m]の範囲では殆んど差がなく、また $R > 100$ [m]でみても(144端末中)数端末の差が生じているにすぎない。特に図8(a)、(b)に対応する $R = 240$ [m]の場合には、定常状態でのアウェイク状態端末数は平均して6台を下回ることが図8(c)より判明する。このことから、図8(b)での「同期完了」以後のアウェイク状態端末数は、802.11の場合とほぼ同等であることが認められる。

また、この提案手法は802.11の場合と比べ、ビーコンの送信制限を行なっているため、送信するビーコンの数は常に少なく^(注9)、このことはエネルギー消費効率の点から有利であることがいえる。以上から、本提案手法においては802.11に見られる同期障害が回避され、さらにエネルギー効率は802.11の場合とほぼ同等もしくはそれより良くなることが期待される。

以上の結果はマルチホップネットワークに対するものであるが、図8(d)に示すようにシングルホップネットワークの融合時にも平均再同期時間が大幅に短縮されることが判明した。この効果は端末数が増加するにつれ顕著となることが認められる。したがって、この場合も、ビーコンの送信制限による手法1が有効であることが分かる。

3.3 提案手法1における同期能力の機構

以下では、提案手法1が802.11の同期障害を解消し、かつそのエネルギー効率が良好であることの理由を説明する。そのために、まず802.11と提案手法1における同期の進行過程の動的な特徴に注目する。図9は未同期端末(図1における)の数の時間変化を示すものである。これらの4つのデータはいずれも無作為に選ばれたものであり、かつ典型的パターンを示している。初期条件において、いずれも未同期端末数は143(=144-1)であり、その数は同期が進行するにつれ単調に減少する。802.11の場合(×)においては、同期完了までに長時間のボトルネックが生じている。一方、提案手法(□、*、+)においては一度に数十端末の規模で同期が進行し、その結果、いずれもボトルネックが解消されている。この急速な同期過程が提案手法1の性能の特徴であるが、そのメカニズムは4.1で述べた提案の(i)、(ii)の(直接の帰結というより)間接的な効果から得られることがわかる。その理由は、以下の2点から理解される。

(a) 同期が進行するにつれ、未同期端末の密度は、領域内で徐々に低下する。(802.11の場合ほど顕著ではない

(注7):3.でのシミュレーションと同様、他の端末数の場合も同様の結果が得られる。ここでは紙面の制約上、一例を示すにとどめる。

が、領域端部の端末が先に同期していく傾向はある。）

(b) これに伴い、各端末のビーコン送信競合の度合は徐々に緩やかになっていく。その結果、提案の(i)項から競合の度合の低い端末群(すなわち、閾値より大きいバックオフタイム値を持つにも関わらずビーコン送信を行おうとする端末群)は、(ii)項からビーコン送信を制限されるが、そのかわりアウェイク状態を維持することになる。そのような端末が連鎖的に生じ、その数が間欠的に数十台のオーダーで生じる。このとき、もう一つのIBSSに属する端末(図1の○)がビーコン送信をおこなうと、これは一度にその数十台のアウェイク状態の端末に受信され、1ビーコンサイクル内で一気にその同期が進行する。

すなわち、以上のメカニズムの本質は、未同期端末の密度が低下するにつれ、各端末群のアウェイク状態となる頻度が自律的に高まり、かつビーコン送信が制限されるため、ビーコン同士のコリジョンを生じずにこの未同期端末がビーコンを受信し同期する確率が高くなることにある。

また以上の考察はシングルホップの場合にも成り立つので、図1(b)のシングルホップの場合にも手法1が有効であることが理解されよう。このように、手法1による再同期の高速化は適応的な自律分散性を巧妙に利用したものであることが理解される。

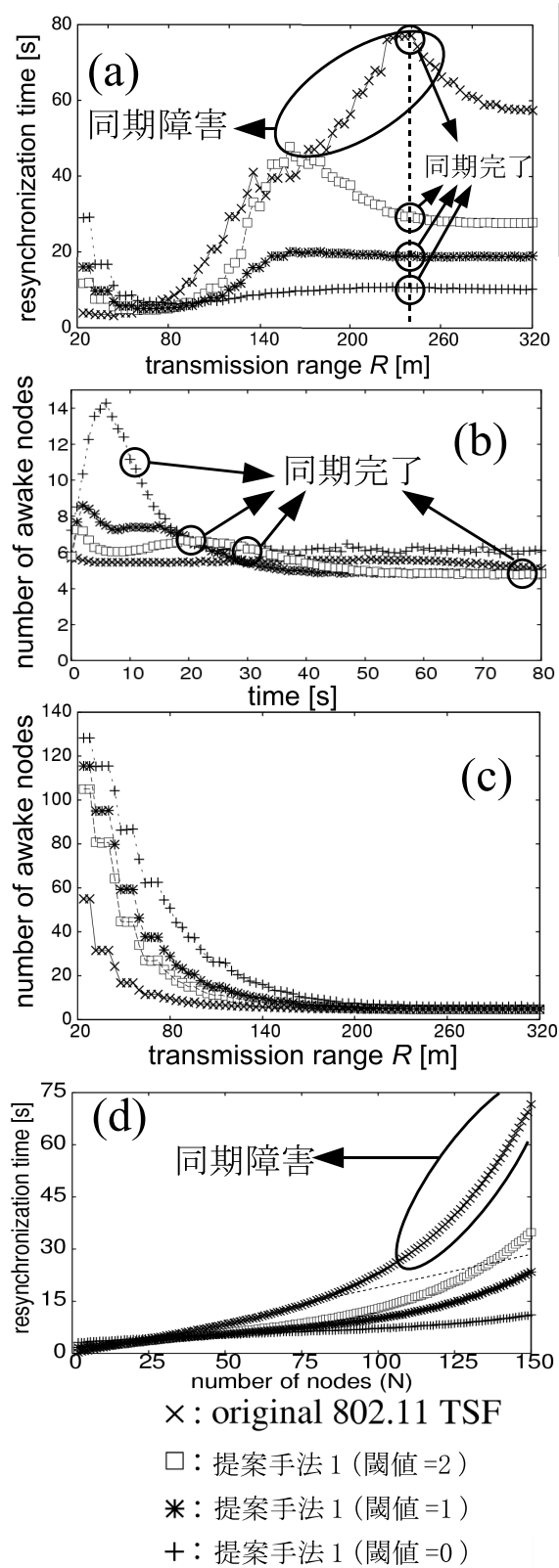
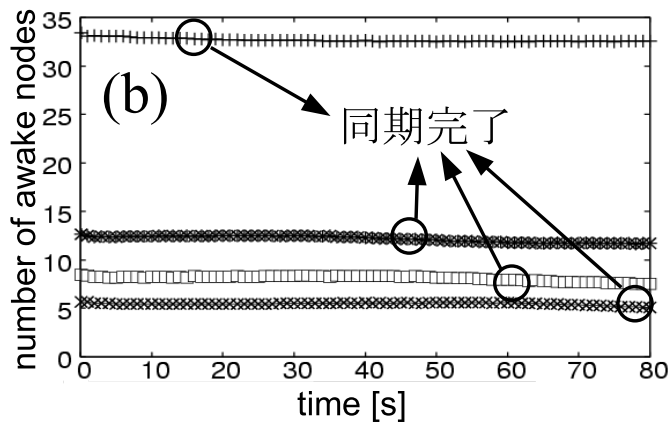
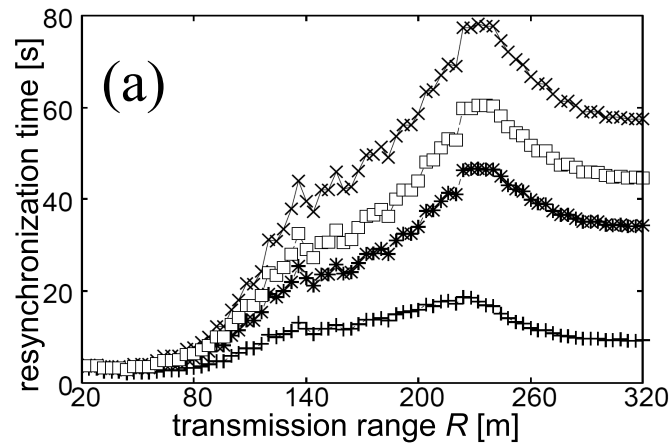


図8 提案手法1 のシミュレーション結果
 (a) 通信範囲に対する平均再同期時間(Fig. 1(a)の場合)
 (b) 同期過程におけるアウェイク端末数変化
 (c) 定常状態時におけるアウェイク端末数変化
 (d) 端末数に対する平均再同期時間(Fig. 1(c)の場合)



- × : original 802.11 TSF
- : 提案手法 2 (1/50 アウエイク)
- * : 提案手法 2 (1/20 アウエイク)
- + : 提案手法 2 (1/5 アウエイク)

図9 提案手法1の同期過程の典型例

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
アドホックネットワークから見た生物のプリミティブな環境適応能力 ~最近の研究動向~	電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会(AN)	2008年5月
省電力センサネットワークにおけるコリジョン回避型ブロードキャスト手法の提案	電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会(AN)	2008年5月
Improvement and Experimental Verification for Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP)	電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会(AN)	2008年5月
アドホックネットワークのタイミング同期過程における通信トラフィックの影響の解析	電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会(AN)	2008年3月
タイミング同期の自律分散制御における「モードロック状態」の解消方法	電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会(AN)	2007年12月

〈特許出願〉

・通信装置、移動体通信システム及び通信方法 (特願 2008-149626)

出願日:2008/06/06

・時刻同期方法, 及び時刻同期制御装置(特願 2005-320573)

PCT出願済 2008年米国特許出願予定