

セルラ移動通信システムにおける 分散型スロット同期技術

セルラネットワークにおける分散型基地局間同期に関して、多数の「ホタル」が同時に「発光」する生物学的メカニズムに着目し、ヨーロッパの研究プロジェクトであるWINNERシステムへの適用を検討した。提案する分散型スロット同期アルゴリズムをセルラ移動通信システムに適用することにより、自己組織化した基地局間同期を可能とした。

DOCOMO Communications
Laboratories Europe GmbH

Alexander Tyrrell
Gunther Auer

1. まえがき

IMT-Advanced^{*1}を目標とした新しい無線インタフェースの研究開発を目的に、WINNER (Wireless world INitiative NEw Radio) プロジェクトが発足した。WINNERは、41もの参画団体(企業、大学)で構成されるヨーロッパの研究プロジェクトである。WINNERシステムコンセプト[1]の特長の1つは、自己組織化した手法により、セル間のスロット同期を確立する機能である。セル間スロット同期とは、ネットワークにおけるすべてのノード(基地局(BS: Base Station)とユーザ端末(UT: User Terminal))の送信タイミング基準を一致させること、つまり、共通の送信スロット開始時間を合わせることである。セル間スロット同期は、セル間の相互干渉を緩和し、セル間調整用の要素技術を実現する。さらに、マルチキャストおよび

び放送サービスをサポートする単一周波数ネットワーク(SFN: Single Frequency Networks)も確立することができる。GPS(Global Positioning System)のような衛星ナビゲーションシステムは、ユニバーサルなタイミング基準を提供できるが、GPS信号は、屋内環境では常に受信できるとは限らない。また、WINNERシステムコンセプトでは、無線ネットワーク制御を形成する中央制御装置の利用は必須ではなくオプションとされていることから、中央制御装置に依存したセル間スロット同期アルゴリズムを用いることはできない。そこで、自己組織化アプローチの検討を行った。

自然界では、自己組織化同期の興味深い例が東南アジアの河川で見られる。それは、夜明けに木に集まった多数の「ホタル」が同期して「発光」している現象であり、木全体が完全な同調性をもって点滅している

ように見える。この現象を基にMiroloとStrogatzは、自己組織化同期に関する理論的フレームワークを導き出した[2]。

この理論的フレームワークの無線ネットワークへの適用は、特にマスタノードが提供されないアドホックネットワーク^{*2}に関して、これまで検討されてきた。たとえば、UWB(Ultra Wide Band)^{*3}の特性パルスが、「ホタル」のパルスを模倣するために使われたり[3]、特性パルスの代わりに、ロング同期ワードの適用が検討されている[4]。この同期ワードは、複数の直交周波数分割多重(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)^{*4}シンボルに渡っており、単一パルスと比較して無線システムでの実現性が高い。また、同期プロセスで誘発される遅延を考慮して、理論的フレームワークを改善している。

本稿では、第2章でWINNERシス

*1 IMT-Advanced: 第4世代移動通信。第3世代移動通信(IMT-2000)の後継システムとしてITU-Rで検討されている。

*2 アドホックネットワーク: 基地局やアクセスポイントを必要としない、複数の移動端末どうしで相互に接続する構成のネ

ットワーク。

*3 UWB: 広帯域において非常に低パワーで信号を送信し、位置測定、レーダー、高速無線通信の3つの機能を持つことを特徴とする無線通信方式。特に、近距離で毎秒数百メガビット~数ギガビット程

度の高速無線通信が可能になる。

テムの概要について説明し、第3章で「ホタル」同期の原理およびアルゴリズムについて説明する。第4章では、「ホタル」同期コンセプト[4]に基づき、かつWINNERシステムコンセプト [1]に完全に一致した分散型セル間スロット同期アルゴリズムを提案する。

2. WINNER システムの概要

WINNERは、3G (3rd Generation) 以降の移動通信システムに対する主要技術の開発と評価を目的としている。このプロジェクトは2004年1月に開始され、4年後の2007年12月に終了している。WINNERモバイルアクセスネットワークの目標は、高度に柔軟性かつ効率性があり、各種異種環境における多種多様なユーザに対して、広範囲のサービスを提供できるシステムコンセプトの確立である。本章では、WINNERシステムコンセプトの概要と、その主要要素技術について説明する [1]。

2.1 多重接続および媒体アクセス制御

WINNERシステムは、無線インタフェースでの低遅延を達成するように設計されている。低遅延はいくつかの理由で重要である。まず、高速チャンネル変動に対する適応を可能にし、そして、H-ARQ (Hybrid-Automatic Repeat reQuest)^{*5}での高速再送信を可能にする。これにより、リアルタイムサービスに対しても信頼性のある無線リンクを提供すること

ができる。OFDM ベースのリソース割当てスキームは非常に柔軟性があり、多種多様なシステムに割り当てられた帯域や伝搬シナリオで適用できる。周波数適応送信では、それぞれの時間-周波数リソースユニット (チャックと呼ばれる) に対して個別の変調方式が割り当てられ、それと同時に、同一の符合化率が、同じユーザのすべてのチャックに適用される。

2.2 高度マルチアンテナシステム

マルチアンテナ送受信スキームは、各種のダイバーシチ、空間多重およびマルチユーザMIMO (Multiple Input and Multiple Output)^{*6}伝送モードに設定することができる。これらの送信モードは、各モバイル端末の異なるパケットフローの要求に合わせて個々に調節できる。

2.3 中継コンセプト

IMT-Advancedシステムで期待される高速データレートの必要条件を考えると、現在のセルラネットワークポロジ^{*7}は、ネットワークインフラおよびメンテナンスに対して、低コストでユニバーサルなカバレッジを提供することは困難であろう。IMT-Advancedにおける必要帯域幅を考慮すると、高いキャリア周波数を用いざるを得なくなると予想され、結果的にセルサイズは大幅に縮小されると予想される。このことから、中継ノードを用いたセルを形成するマルチホップネットワークポ

ロジが、WINNERシステムコンセプトに必要な不可欠となる。これらのセルは、高度な再生中継型中継ノード^{*8}を使う。それにより、中継ノードの配備コストを削減し、送信範囲を拡大して電波が届かないエリアにも対応し、セル群の中央とセル境界線の間でキャパシティを再分配することができる。

2.4 動的周波数の使用

現在、多くの無線システムが提供され、多くのユーザに利用されていることを考慮すると、新しい無線システムに対する専用周波数を確保することがますます困難となっている。したがって、柔軟性のある周波数利用と周波数の共有が、将来の無線ネットワークに対する実用的な技術となるであろう。

現在の主流であるマルチホップネットワークポロジや、各種の移動通信事業者が電波利用免許不要帯域で周波数を共有する状況では、分散制御機能が必要となるであろう。そのような環境では、同期し、ネットワークを維持することが、大きな課題となる。そこで、この課題を解決するために、分散型同期技術の検討を行った。

3. 「ホタル」の同期

「ホタル」を発振器としてモデル化し解説する。「ホタル (発振器)」は周期的に「発光 (発振)」し、パルスを通じてネットワーク上の他のノードと相互に作用する。このようにパルス-カップル発振器で構成さ

*4 直交周波数分割多重 (OFDM) : 情報信号を直交サブキャリアで変調するマルチキャリア変調形式。デジタル変調方式の1つで、情報を複数の直交する搬送波に分割して並列伝送する方式。高い周波数利用効率での伝送が可能。

*5 H-ARQ : 自動再送要求 (ARQ) と誤り訂正符号を組み合わせるにより、再送時に誤り訂正能力を向上させ再送回数を低減させる技術。

*6 MIMO : 複数の送受信アンテナを用いて伝送容量を拡大する無線通信技術。

*7 セルラネットワークポロジ : 高速バックボーンネットワークに接続された基地局とユーザ端末で構成されるネットワークポロジ。

れるシステムは、完全同調やパターン形成といった興味深い現象を示す [5].

本章では、パルスカップル発振器の間でどのように時間同期が行われるか、つまり、すべての発振器がどのようにして同時にパルスを発振するのかを説明する。

3.1 数学的モデル

単純な数学的表現として、パルスカップル発振器はその位相関数 $\phi(t)$ によって表現される (図1)。この関数は、しきい値に達するまで、時間経過とともに一次関数的に増加する。位相がしきい値に達すると、発振器が発振する。つまり、図1のA時点で発振器がパルスを送信し、その位相をリセットする。このように各発振器は、他の発振器にカップリングされない場合、周期 T でしきい値に達して発振する。

この位相関数は、パルスが発せられる時間を決定する内部カウンタとして考えることができる。同期アルゴリズムの目的は、内部カウンタを

同調させ、すべてのノードを共通の発振時間に合わせることである。そのためには、位相関数の調節が必要となる。

3.2 カップリングされた発振器の同期

次に、すべてのノードが同じ周期 T (クロックジッタとドリフトは考慮しない) をもっていると仮定する。発振器が他の発振器とカップリングされる場合、発振器 i は、その隣接発振器のパルスを受信する。あるノードが時間 τ_i でパルスを受信すると、そのノードは即座にその位相を、その時点の位相値にのみ依存する $\Delta(\phi(\tau_i)) > 0$ という値で以下のように増加する (図1のB時点)。

$$\phi_i(\tau_i) \rightarrow \phi_i(\tau_i) + \Delta(\phi(\tau_i)) \quad (1)$$

つまり、受信したパルスは位相を増加させ、発振器を早期に発振させることになる (図1のC時点)。 $\Delta(\phi(\tau_i))$ を正しく選択することにより、同一発振器をもつネットワーク

は、数周期内にそれらの発振時点を同期させることができる [2]。パルスカップリングされた発振器の同期の例を図2に示す。この図では、すべてのノードは最初の時点ではランダムな位相で発振している。すべての位相はある1つの位相がしきい値に達するまで一次関数的に増加する。あるノードで位相がしきい値に達すると、そのノードはパルスを発振し、それを受信するすべてのノードは自分の位相を増加させる。時間が経過すると、すべてのノードがランダムに発振するといった無秩序な状況から秩序が形成されていき、図2の第6周期後では、すべてのノードが同時に発振するようになる。この同期特性は顕著に現れてくる。なぜなら各ノードは、送信側を区別する必要がなく、パルスを受信した時に位相を増加することにより各々の内部時間を単純に調節し、発振時にパルスを送信するだけだからである。ある程度時間が経過すれば、最初は同期されていなかった状態から同期された状態となり、パルスが同調して送信される。したがって、中央制御機能に依存することなく分散型同期が達成されることになる。

3.3 不応期間

伝搬遅延などの遅延を考慮する場合、パルスカップリングされた発振器のシステムは不安定になり、そのシステムは同期できなくなる [6]。この場合、安定性を回復するために不応期間 $T_{\text{refr}} < T$ がパルス送信後に導入される。この状態では、位相の

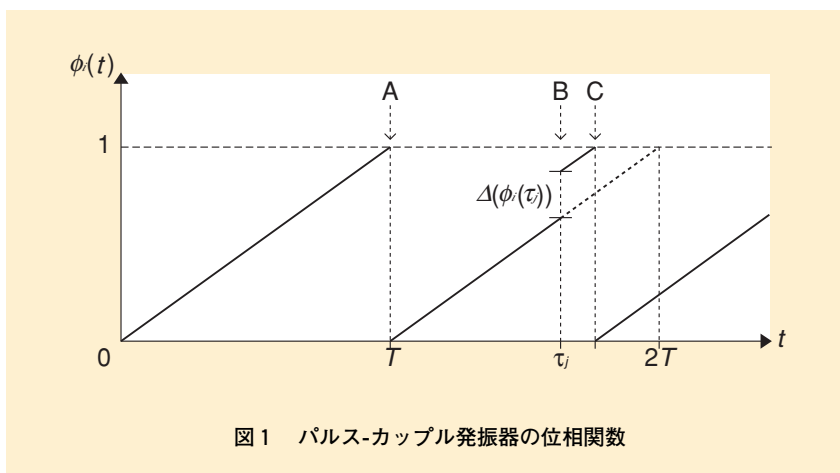


図1 パルスカップル発振器の位相関数

*8 再生中継型中継ノード：単純に信号を受けて転送するのではなく、受けた信号を復号して、再生して転送する中継ノード。

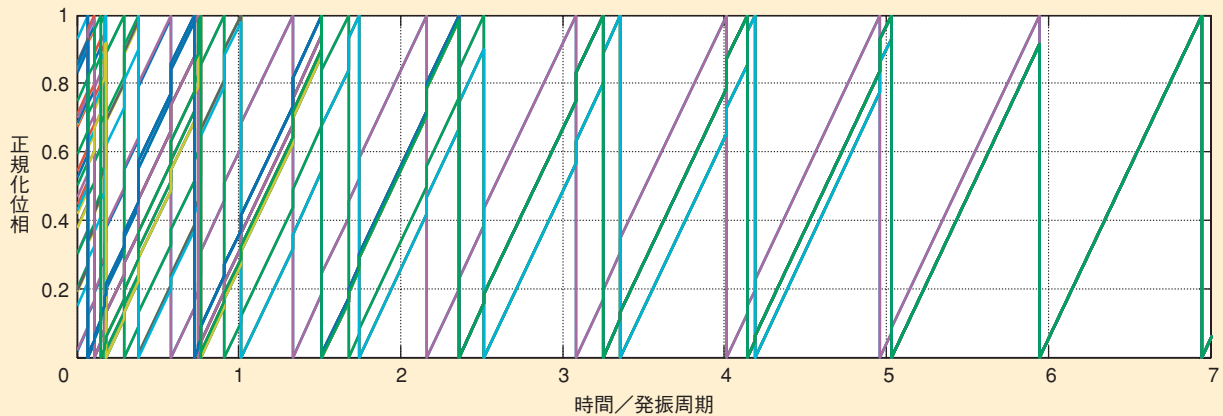


図2 パルス結合発振器の同期例

増加は不可能である [3]. つまり、この期間で各ノードは同期メッセージ信号を受信することはできるが、位相関数は0のまま保持される。

4. WINNERにおけるスロット同期

3章で述べた「ホタル同期」のWINNERスーパーフレーム構造^{*9}への適用について説明する。まず、パルスの代わりに、2種類の同期ワードを導入する。1つは、基地局が用いる同期ワード、もう1つはユーザ端末が用いる同期ワードである。

4.1 理論

最初にユーザ端末がネットワークに接続する際、基地局の基準に従ってその基地局と同期する必要がある。そうすることで、進行中の通信を妨害しない。そのためには、基地局は周期的にダウンリンク同期ワード (DL Sync)^{*10}を報知しなければならない (図3 (a)). このような同期における「マスタ・スレーブ」と

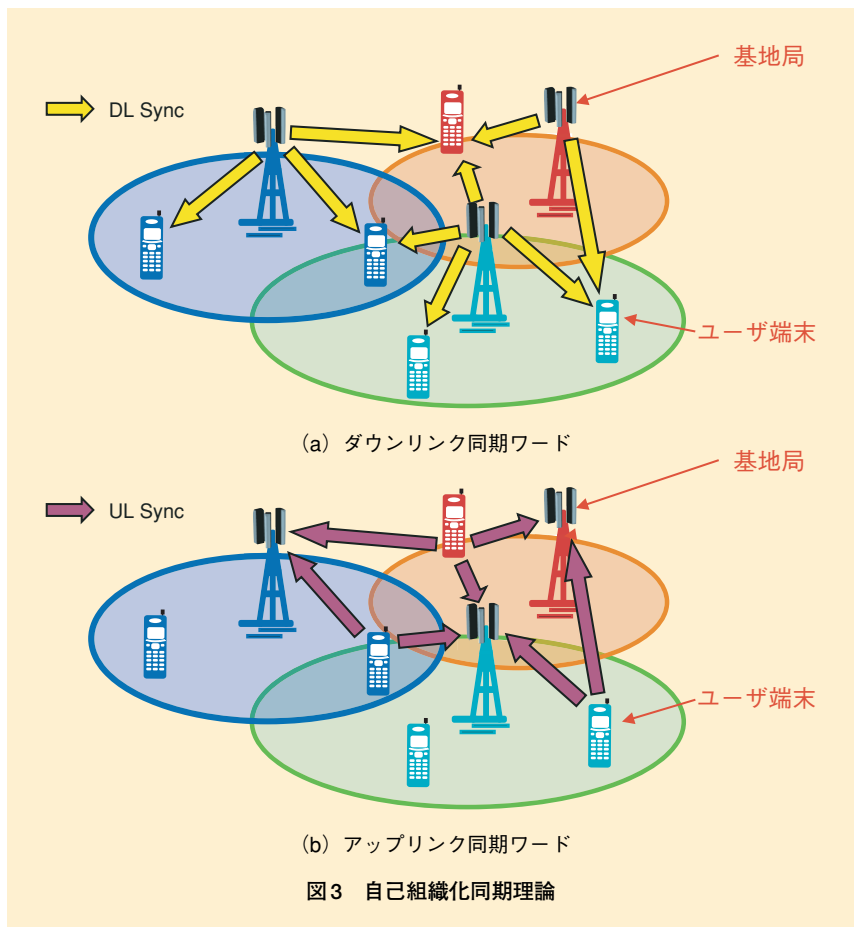


図3 自己組織化同期理論

いう形態は、セル内同期では一般的なもので、現在のセルラネットワークでも用いられている。一方、ユーザ端末は、ユーザ端末

*9 WINNERスーパーフレーム構造：WINNERプロジェクトで考案されたスーパーフレーム構造 (*12参照)。

*10 ダウンリンク同期ワード (DL Sync)：ユーザ端末の内部クロックの調整のため、基地局から送信される同期信号。

自身の更新タイミングに基づいて、基地局が基地局自身のタイミングを更新するのに用いるアップリンク同期ワード (UL Sync)^{*11}を送信するかどうかを決定できる。すべてのユーザ端末が、この同期ワードを送信する必要はない。セル端に近いユーザ端末は、複数の基地局によって「聞かれる」可能性が高いため、セル間同期取得により効果的に利用することができる。例えば、図3 (b)では、5つのユーザ端末のうち3つのユーザ端末だけがアップリンク同期ワードを送信する。これは、他の2つのユーザ端末は、もっとも近い1つの基地局としか通信できないためである。

4.2 同期ルール

第3章で説明されている同期手法は、どのようなランダムな初期状態からも同期が可能であり、最初の発振時点の分散に関する必要条件がな

いという利点を示している。したがって、自己組織化同期は、ネットワークトポロジの変化にも柔軟に対応できる。ワイヤレス通信では、ネットワーク上のすべてのノードが常に接続されているとは限らないため、ネットワークトポロジの変化が顕著である。よって、自己組織化同期は、モバイルシステムに適していると考えられる。

WINNERのスーパーフレーム構造^{*12}と、この構造に対する、基地局とユーザ端末用の2種類の状態マシンを図4に示す。この場合、すべてのノード (基地局とユーザ端末)は、完全に同期している。

スーパーフレームは、プリアンブル部分と、ダウンリンクおよびアップリンク用のデータ部分から構成される。プリアンブル部分は、一連のミニスロットに分割され、ランダムアクセスチャネル (RACH : Random Access Channel)^{*13}、共通ア

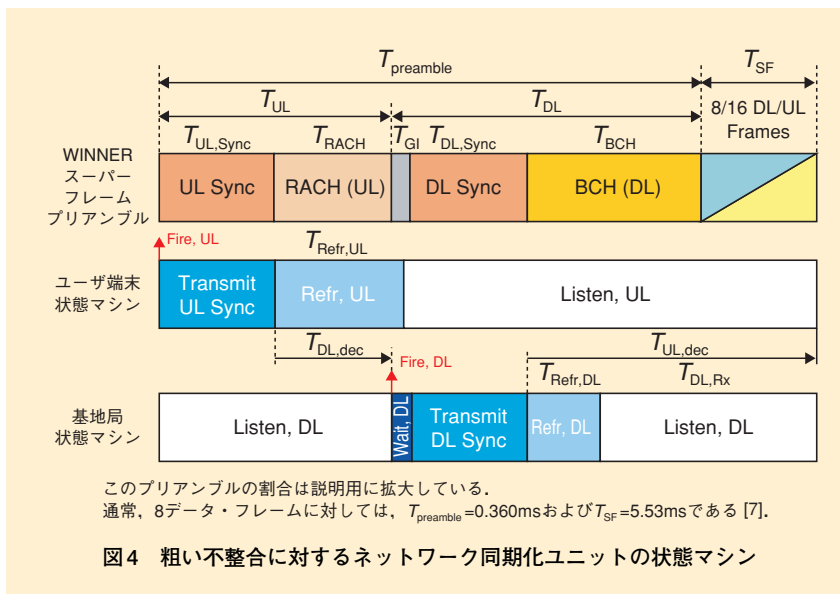
プリリンク同期ワード、ガードインターバル (GI : Guard Interval)、共通ダウンリンク同期ワード、そして報知チャネル (BCH : Broadcast Channel)で構成される。

第3章で示した「ホタル同期」ルールに基づくと、ノード間のスロット同期には、すべてのノードが、位相関数を調整する必要がある。基地局とユーザ端末の2つのグループを構成するために、基地局の位相関数は、ユーザ端末からの送信を感知すると調整され、ユーザ端末の位相関数は、基地局からの送信を感知すると調整される。そのため、2種類の異なる同期シーケンスであるアップリンク同期ワードとダウンリンク同期ワードが用いられる。図4の2種類の状態マシンから、2つのグループの間でインタラクションが発生する。つまり、一方のグループのノードが送信を行い、他方のグループのノードがその送信を感知すると、それら2つのグループ間でインタラクションが発生する。これらの2種類の同期ワードの感知は、物理レイヤリンク同期ユニットにより行われる。これにより、同期ワードが確実に感知され、受信機での雑多な処理を回避することができる。

スーパーフレーム構造に基づいて、ユーザ端末と基地局の「聞く」時間はそれぞれ式(2)のように計算される。

$$T_{UL,Rx} = (T_{preamble} + T_{SF}) - (T_{UL,Sync} + T_{refr,UL}) \quad (2)$$

$$T_{DL,Rx} = (T_{preamble} + T_{SF}) - (T_{DL,Sync} + T_{refr,DL})$$



*11 アップリンク同期ワード (UL Sync) : 基地局の内部クロックの調整のため、ユーザ端末から送信される同期信号。

*12 スーパーフレーム構造 : 一般的には、プリアンブル部とアップリンクダウンリンク用のデータ部からなる時間・周波数領域のフレーム構造。

*13 ランダムアクセスチャネル (RACH) : 上り方向の共通チャネルで、制御情報お

よびユーザデータの送信に使用するチャネル。各ユーザが独立して信号をランダムに送信することにより、1つのチャネルを複数ユーザで共通に使用する。

すべてのユーザ端末が位相関数を保持し、その関数は、「聞く」時間、時間経過とともに式(3)のように一次関数的に増加する。

$$\frac{d\phi_i(t)}{dt} = \frac{1}{T_{UL,Rx}} \quad (3)$$

この場合 $T_{UL,Rx}$ はユーザ端末が「聞く」時間である。

同じようにすべての基地局は、それらの「聞く」時間、時間が経過するとともに一次関数的に増加する位相関数を維持する。ノードを2種類の事前定義したグループに分離するには、以下の2つの部分で行う。

・基地局でのカップリング

時刻 τ_j の時点で、基地局のノード i は「Listen (聞く)」状態にあり、この場合、その位相関数は、時間経過とともに一次関数的に増加する。そして、基地局のノード i と通信できるユーザ端末ノード j は、 $T_{UL,Synch} + T_{DL,dec}$ 前に送信を開始している。そして、同期ワードを受信した基地局ノード i は位相を以下のように増加する。

$$\phi_i(\tau_j) \rightarrow \phi_i(\tau_j) + \Delta_{BS}(\phi_i(\tau_j)) \quad (4)$$

・ユーザ端末でのカップリング

ユーザ端末がDL同期ワードを受信すると、その位相関数を「Listen (聞く)」状態で以下のように正しく調整する。

$$\phi_j(\tau_j) \rightarrow \phi_j(\tau_j) + \Delta_{UT}(\phi_j(\tau_j)) \quad (5)$$

このストラテジーにより、2つの

グループの形成が制御される。つまり、すべてのノードがランダムに発振するランダム初期状態から始まり、単純なカップリングルールに従った後、ユーザ端末と基地局は時間とともに2つのグループに分離され、すべての基地局は、ユーザ端末の T_{UL} 後に発振し、すべてのユーザ端末は、基地局の T_{DL} 後に発振することになる。これが同期した状態である。ネットワークサイズが大きくなり、ノード間の通信により多くのホップが必要となる場合、同期に要する時間が増加する。このようなアルゴリズムのスケラビリティに関する問題は、「ホタル同期」用のグローバル基準を導入することで解決される [8]。この詳細については、提案型セル間スロット同期アルゴリズムのより広範囲な特性評価結果および中継ノードとの同期化への拡張とともに記述されている [9]。

4.3 同調するまでの時間

提案型同期アルゴリズムを検証するため、Monte-Carloシミュレーション^{*14}を行った。一連のシミュレーションにより、アルゴリズムの収束特性、つまり、「スロット同期を確立するためにネットワークが要する時間」をより正確に評価した。2つの廊下とその両側に10個の事務所がある屋内オフィスを想定した。この廊下内に4つの基地局を配置した。同期プロセスに参与する15基のユーザ端末に対するネットワークトポロジを図5に示す。選択されているユーザ端末は、すべての基地局と直接通信ができる。ネットワーク同期プロセスに参与しないユーザ端末はアップリンク同期ワードを送信しないが、受信したダウンリンク同期ワードに基づいて発振器を調整する。

まず、ネットワーク全体を同期するのに必要な時間を評価した。同調に必要な時間 T_{sync} は、スーパーフレ

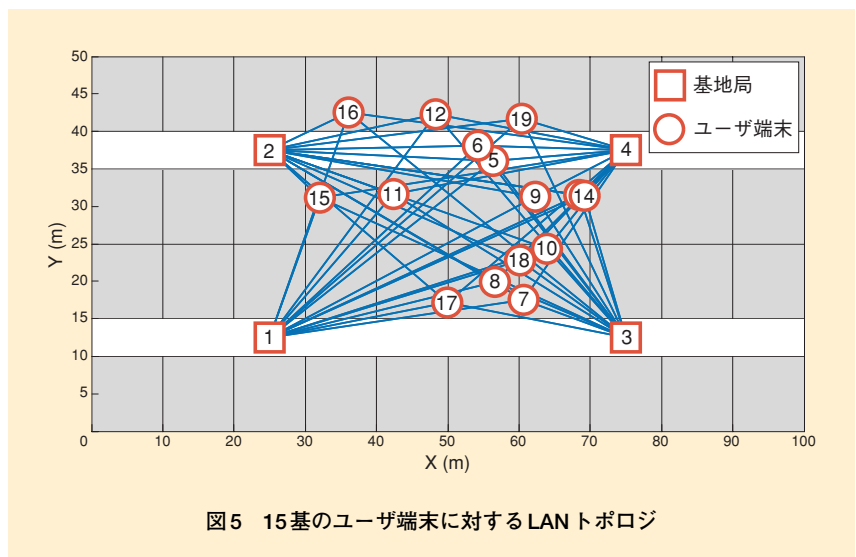


図5 15基のユーザ端末に対するLANトポロジ

*14 Monte-Carloシミュレーション：ランダム初期状態を繰り返すシミュレーション法。

ームの継続時間 T_{SF} を用いて正規化し、異なる初期状態5,000セットに対して評価した。初期状態では、すべてのノードは均一に分散されたランダムなクロック値で動作し始める。位相増加値を決定するユーザ端末のカプリング係数 α_{UT} を可変とした。同期プロセスに参与する15基のユーザ端末に対して、同調までの正規化時間の累積分布関数を図6に示す。図6から、提案アルゴリズムの特性は、カップリング係数 α_{UT} により制御可能であることが分かる。高いカップリング値 $\alpha_{UT}=1.3$ に対しては、常に10周期内で同期が実現され、初期状態の90%は、5周期以内に同調する。ノードがランダムなタイミングから機能し始め、基地局間の直接コミュニケーションは不可能であることを考慮すると、比較的短時間で同期を確立できると考えることができる。

4.4 精度

WINNERで定義されているWide Areaシナリオは、典型的な屋外セラ環境を想定している。このシナリオで想定される大きな伝搬遅延を考慮すると、セル間スロット同期において最大の問題となるのが精度である。より正確には、近隣の基地局の間での同期時間の不整合性は、OFDMシンボルのガードインターバル時間 (Wide Areaシナリオでは $3.2\mu s$) より大きくなってはならない。

同期精度は以下のように定義される。 $\tau_{UT,i}$ と $\tau_{BS,j}$ は、それぞれ i 番目のユーザ端末と j 番目の基地局の発振時点を示すとする。これらは、図4でそれぞれの状態マシンにおける「聞く」時間の最後に示されている赤矢印に対応する。図4から、ノードが同期された場合、ユーザ端末と基地局の間では一定の不整合性があり、それはRACHとアップリンク同期ワードの継続時間と同じであることが分かる。したがって、 i 番目の

ユーザ端末と j 番目の基地局間の同期精度は式(6)のように定義される。

$$\text{accuracy} = \left| \tau_{UT,i} - (\tau_{BS,j} - (T_{UL,Sync} + T_{RACH})) \right| \quad (6)$$

この定義より、ノードが完全に整合されている場合、同期精度は0となる。しかし、2つのノード間の伝搬遅延を考えると、そのような状態はめったに発生しない。

伝搬遅延を補償する一般的な手順としては、各ノードが、遅延時間の分だけ、送信を早めることが考えられる。この場合、ユーザ端末の発振時点 $\tau_{UT,i}$ は、それ自身の基地局との伝搬遅延 $\theta_{UT,i,BS(j)}$ 分早められることになる。よって、アップリンクの送信は、以下で示す新しいタイミング基準時点に応じて行われる。

$$\tau_{UT,i} \rightarrow \tau_{UT,i} - \theta_{UT,i,BS(j)} \quad (7)$$

自己組織化同期アルゴリズムの精度を、150のセル端ユーザ端末が存在する7つのセルで構成されるネットワークを評価することにより検証した。これらのセル端ユーザ端末はネットワーク上に分散しており、アップリンク同期ワードを同報通信することにより、同期プロセスに参加している。同期プロセスに用いるユーザ端末として、接続している基地局からの距離が $d_{\text{selection}}$ 以上のユーザ端末を選択した。そのトポロジを図7に示す。セル半径を1,000m、選択範囲 $d_{\text{selection}}=950\text{m}$ とした。ユーザ端末のタイミング基準を、ユーザ端末と基地局間の伝搬遅延の関数として

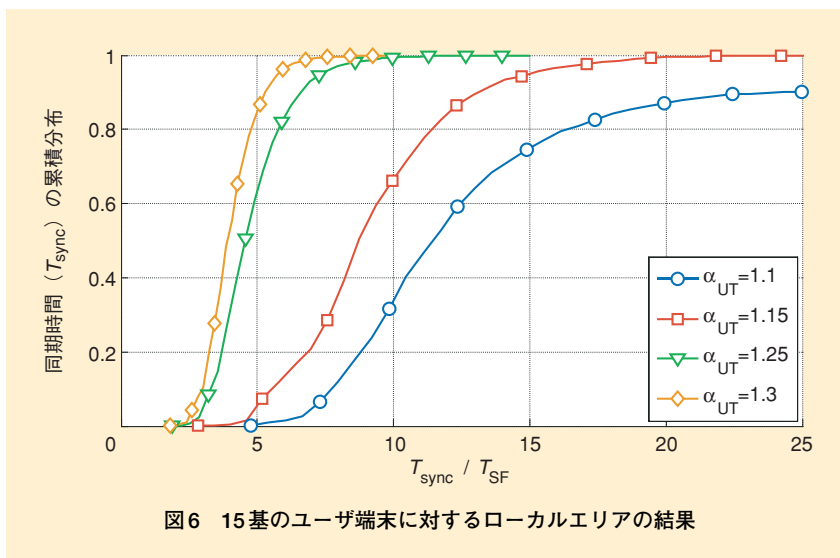


図6 15基のユーザ端末に対するローカルエリアの結果

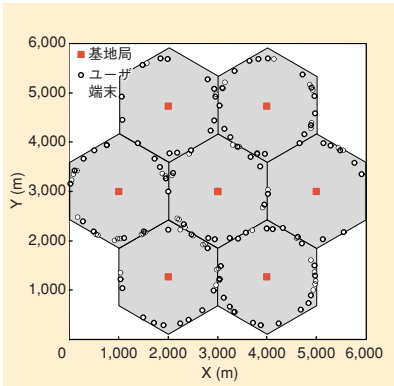


図7 7基のBSと150基のUTに対するWAN (Wide Area Network) の例

早めた場合の同期精度をプロットした例を図8に示す。送信タイミングを早めることでネットワークは、最大で $1\mu\text{s}$ の不整合時間で同期されることが分かる。この数値は、基地局間伝搬遅延 $6.66\mu\text{s}$ (2kmの基地局間距離) より短く、さらに、OFDMガードインターバル長より小さいという必要条件も満足している。

5. あとがき

「ホタルの同期発光」からヒントを得た自己組織化セル間スロット同期アルゴリズムのWINNERシステムへの適用について検討した。従来の「ホタル同期」アルゴリズムをWINNERシステムに適応するように改良した。提案アルゴリズムにより、基地局およびユーザ端末は正しく分割され、基地局は1つのグループに、そして、ユーザ端末はもう1つのグループに形成される。提案アルゴリズムの同期化ルールにより、全く同期していない複数の基地局と移動端末で構成されるシステムは、

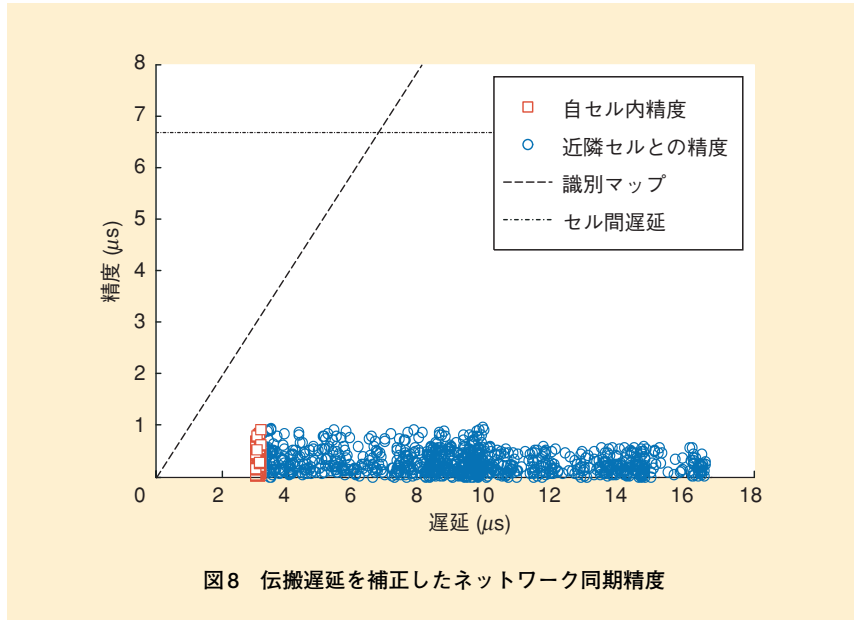


図8 伝搬遅延を補正したネットワーク同期精度

共通のタイミング基準に常に整合できる。また、計算機シミュレーションにより、本アルゴリズムは、典型的な屋内環境において、常に10周期内でネットワーク同期を確立することができ、1kmまでのセルサイズに対して、 $1\mu\text{s}$ 以内の同期精度を達成できることを示した。

文献

- [1] IST-4-027756 WINNER II : “D6.13.14 WINNER II System Concept Description,” Dec. 2007.
- [2] R.E. Mirollo and S.H. Strogatz : “Synchronization of Pulse-coupled Biological Oscillators,” SIAM J. APPL. MATH, Vol. 50, No. 6, pp.1645–1662, Dec. 1990.
- [3] Y.-W. Hong and A. Scaglione : “Time Synchronization and Reach-back Communications with Pulse-coupled Oscillators for UWB Wireless Ad hoc networks,” Proc. IEEE Conf. on UWB Systems and Tech. 2003, pp.190–194, Nov. 2003.
- [4] A. Tyrrell, G. Auer and C. Bettstetter : “Advances in Biologically Inspired Information Systems : Models, Methods, and Tools,” pp.47–62, 2007, Springer.
- [5] X. Guardiola, A. Diaz-Guilera, M. Llas and C.J. Perez : “Synchronization, Diversity, and Topology of Networks of Integrate and Fire Oscillators,” Phys. Rev. E, Vol. 62, No. 4, pp.5565–5570, Apr. 2000.
- [6] U. Ernst, K. Pawelzik and T. Geisel : “Synchronization induced by temporal delays in pulse-coupled oscillators,” Phys. Rev. Letters, Vol.74, No. 9, pp.1570–1573, Feb. 1995.
- [7] IST-4-027756 WINNER II : “D6. 13. 7 Test scenarios and calibration cases issue 2,” Dec. 2006.
- [8] A. Tyrrell and G. Auer : “Imposing a Reference Timing onto Firefly Synchronization in Wireless Networks,” Proc. IEEE VTC Spring 2007, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [9] IST-4-027756 WINNER II : “D2.3.3 Link Level Procedures for the WINNER System,” Nov. 2007.