

推薦論文

通信指向性の同期切替えを行う 階層型省電力無線センサネットワーク

石原 進^{1,a)} 大沢 昂史^{2,†1} 稲垣 徳也^{2,†2}

受付日 2011年3月31日, 採録日 2011年10月3日

概要: 本論文では, 中継ノードの通信指向性を同期して変更することで, より少数の中継ノードで領域をカバー可能とする階層型センサネットワークのアーキテクチャ, Power Saving by Synchronized Cooperation of Smart Antennas (PSmart) を提案する. 本手法は中継ノードの送受信のビーム方向を向かい合わせるように動作スケジュールを行う. これにより, 中継ノード間の距離を長くできるため, 中継ノードの数を減らすことができ, 中継ノード稼働のための電力消費, ならびに中継ノードの設置コストを低減させることができる. 本論文では, PSmart における通信方法, ならびにビーム方向同期のための手法, およびその省電力効果について議論する. PSmart で用いられるビーム方向同期の手法では, 中継ノードの設置前にそれぞれに指向性の動作スケジュール, ならびに同期を開始するシンクノードの位置に関する情報を与えておく必要はない. 中継ノードの配置位置, 方角のずれがビーム方向同期の正否に及ぼす影響をシミュレーションによって検証し, 理想的なビームフォームを用いた場合, 中継ノード間の最長通信距離の 5~10%の設置位置のずれ, ビーム角以下の設置方角のずれが許容できることを確認した.

キーワード: 階層型無線センサネットワーク, スマートアンテナ, 指向性ビーム, 省電力制御, 指向性同期

Power Efficient Hierarchical Sensor Network Architecture with Synchronized Directivity Switching

SUSUMU ISHIHARA^{1,a)} TAKASHI OSAWA^{2,†1} TOKUYA INAGAKI^{2,†2}

Received: March 31, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: This paper proposes architecture of hierarchical sensor networks that can cover a monitoring region with small number of relay nodes by synchronously switching the directivity of antennas of the relay nodes. The proposed architecture, Power Saving by Synchronized Cooperation of Smart Antennas (PSmart), makes the directional beam of antennas for sending and receiving on neighboring relay nodes face each other. Thus the distance between relay nodes can be longer than conventional architecture that uses Directional-Omni beam communication. This reduces the number of relay nodes and saves power consumption of them and the network deployment cost. This paper discusses the communication scheme in PSmart and the way for synchronizing the schedule of beam direction change and its effect on power consumption. The scheme for synchronizing the beam direction switching schedule does not require any information about the schedule and the initiator of the synchronization on each node. Simulation results show that the position error less than 5~10% of the maximum communication distance between relay nodes and the direction error less than the aperture angle of the directional beam are tolerable when using ideal beam form.

Keywords: hierarchical wireless sensor network, smart antenna, directional beam, power saving, synchronization of beam direction

¹ 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

² 静岡大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan

^{†1} 現在, 東海旅客鉄道株式会社
Presently with Central Japan Railway Company

^{†2} 現在, 株式会社デンソー
Presently with Denso Corporation

^{a)} ishihara@sys.eng.shizuoka.ac.jp

1. はじめに

無線センサネットワーク（以下 WSN）においては、多くの場合センサノードの電力消費は通信処理によるものが支配的である。このため、各ノードの機能、およびネットワークのデータ転送処理を長時間維持するためには、通信処理の効率化が必要である。通信処理の効率化に関しては、物理層、MAC、ネットワーク各層で対策を施すことが可能だが、本論文では、指向性通信と通信動作のスケジューリングによって、通信処理の効率化を行う方法について取り扱う。

WSN を構成する方法として、WSN をすべて同一の通信機能を持つノードで構成するもの、異なる通信機能を持つノードを用いて機能分担をさせる方法の両者が考えられる。後者の例として、短距離通信とセンシングを行うセンサノードと、周辺のセンシングノードから収集したデータを長距離通信によって中継する中継ノードから構成される階層型のネットワーク構成がある。この構成では、多数あるセンシングノードは中継ノードへの通信のみを行えばよいことから、これらの機能を単純化することでノード単体での消費電力を削減できる。本論文では、このような階層型の WSN を扱う。

無線通信においては、通信相手の位置が分かっている場合には、無指向性のアンテナではなく、指向性のアンテナを用いることにより、同一の電力で、より遠距離にある相手との通信が可能である。階層型の WSN を考えた場合、中継ノードは計画的に配置され、位置は変更されないことが多いと考えられる。したがって、中継局間の通信に指向性通信を使うことで必要な中継ノード数を少なくし、省電力化を行うことができる。坂本らは、指向性を動的に変更可能なスマートアンテナを持つ中継ノードと無指向性通信を行うセンシングノードによる階層型の WSN アーキテクチャを提案し、スマートアンテナに ESPAR アンテナ [1] を使って実装している [2]。

ESPAR 等のスマートアンテナでは、指向性通信、無指向性通信の切替えが可能である。また、主ビーム幅を絞るアンテナ利得を上げた高利得指向性ビームにより、同一機器での無指向性通信に対して通信距離の拡大が可能である。このようなスマートアンテナの利用を前提とした MAC プロトコルとしては、GPS によるノード位置の取得ができることを前提とした DMAC [3]、MMAC [4]、GPS を用いない SWAMP [5] や文献 [6]、[7] の方法があるが、いずれも受信側では任意のタイミングで送信される相手からの送信を待ち受ける必要があるために、送信要求を受信するまでは

無指向性のアンテナビームを使用する必要がある。この結果、端末間の距離は、指向性ビームと無指向性ビームで通信できる範囲に限られる。一方、指向性ビームを送受信側双方で対向させれば、より長い距離での通信が可能となる。

本論文では、スマートアンテナを持つ中継ノードが、その指向性ビームを隣接中継ノードと対向させるようにビーム方向の切替えタイミングをスケジューリングし、両者が指向性通信をすることで、中継ノードの配置間隔を大きくできる階層型 WSN アーキテクチャ PSmart (Power Saving by Synchronized Cooperation of Smart Antennas) を提案する。PSmart では、中継ノード間の距離増大による中継ノード数の減少によって階層化 WSN におけるシステム全体の省電力化を目指している。以下、2 章で、従来型の階層型の WSN の方式ならびに指向性通信を利用したセンサネットワーク構成手法について概説する。3 章で PSmart のアーキテクチャの詳細について述べる。特にビーム方向の切替え手順と、切替えスケジュールの同期方法について詳しく説明する。このスケジュール同期方法は、個別に中継ノードに事前設定情報を与える必要がないことに特徴がある。4 章で PSmart による省電力効果とセル設計の方法、各層のプロトコルとの関係について検討したのち、5 章では、中継ノードの設置位置・方角のずれがビーム方向切替えスケジュールの同期の正否に及ぼす影響についてシミュレーションに基づいて検証する。最後に 6 章で本論文をまとめる。

2. スマートアンテナを用いた階層型センサネットワーク

坂本らは文献 [2] で、スマートアンテナを用いたセンサネットワークについて、階層構造の有無、スマートアンテナの利用方法（無指向性のみ、スマートアンテナのみ、両者の併用）によって 6 種類に分類している。このうち、スマートアンテナを持つ中継ノードと、無指向性アンテナのみを持つセンシングノードを組み合わせた階層型の構造が、コスト面、省電力性能に優れるとしている。すべて安価な低出力の無指向性アンテナを用いたセンシングノードのみによる構成はコスト面では優れるが、ホップ数が多くなりパケットロス発生リスク、遅延が増大するという問題がある。また、この方式ではセンシングデータが集められるノード（以下、シンクノード）周辺のノードに負荷が集中し、電力枯渇を招き、ネットワーク寿命を長くすることが困難である。一方、高出力の中継ノードを使い WSN を階層構造とすると、センシングノードからのシンクノードへの総ホップ数を小さくすることができるが、中継ノードの設置コストが問題となる。中継ノードでスマートアンテナを用いた指向性通信を用いることで、同一出力電力で通信可能な中継ノード間の距離を伸ばすことが可能である。このため、中継ノードの総数を減らすことが可能できるので、

本論文の内容は 2010 年 3 月の組込み技術とネットワークに関するワークショップ 2010 にて報告され、モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査・幹事全員により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

高価なスマートアンテナの導入によるコストを低減させることができる．図 1 (a) にスマートアンテナを用いた階層型の WSN の構成例を示す．

坂本らはスマートアンテナに ESPAR アンテナを用いてスマートアンテナを用いた階層構造の WSN の実装を行っているが，中継ノード間の通信は送信側に指向性ビーム，受信側には無指向性ビームを用いている．ここでは指向性 (Directional, D) のビームと無指向性 (Omni directional, O) のビームを組み合わせさせて使っているため，この方式を DO 型と呼ぶことにする．DO 型の階層型 WSN では，指向性ビームを送受信側双方で対向させて通信できる最大のノード間距離よりも短い間隔で中継ノードを配置する必要がある．また，坂本らの手法では，中継ノードとセンシングノード間の通信は，中継ノードとセンシングノードで同機能の無指向性アンテナを用いた通信を行っているため，センシングノードから中継ノードへの通信はマルチホップ通信を行うものとしている．しかしながら，中継ノードの用いる指向性アンテナビームとセンシングノードの低出力の無指向性アンテナビームを用いて通信をすることができれば，センシングノードから中継ノードへ 1 ホップで通信できる範囲を広くすることができる．

モバイル無線アドホックネットワーク，メッシュネットワーク，無線センサネットワークの分野で，無線 MAC，経路制御等で多くの指向性通信を用いた試みがあるが，本論文で提案するような送受信ともに指向性通信を用いて通信距離を拡大するための具体的な処理方法については明らかにされていない．Shankar らは無指向性ビームと指向性ビームを併用した階層化をとるような無線センサネットワークでの隣接ノード探索方法を提案し，指向性ビームを使用

することで k-connectivity と複数の disjoint な経路の利用性が向上することを確かめている [8], [9]．しかしながら，前提としている通信は DO 型である．Kandasamy らは無線メッシュネットワークにおいて，計画的にメッシュ状に配置されたノード間で指向性通信を用いることでスループット，遅延，公平性が向上することをシミュレーションによって評価している [10] が，MAC の操作，経路制御は無指向性ビームどうしでの通信ができることを前提とした条件でのものととどまっている．指向性通信を用いることによるメッシュネットワークの性能向上については文献 [11], [12], [13] 等で解析的な評価がなされているが，送受信に指向性通信を行うノードの動作スケジューリング方法については議論がなされていない．Saha らは MANET のルーティングプロトコル DSR を指向性アンテナを用いる場合に拡張する試みを行っているが [14]，DO 型の通信であり，送受信に指向性通信を用いて通信距離を拡大するには至っていない．

3. PSmart

PSmart は，階層構造を持つ WSN において，(i) 中継ノード間での指向性ビームによる対向通信 (DD 型通信) と (ii) 中継ノードとセンシングノード間での指向性ビーム・無指向性ビームによる通信を行うことによって，WSN 全体の電力消費を削減することを目指したアーキテクチャである．図 2 に PSmart によるネットワーク構成例を示す．すべての中継ノードが指向性ビームの方向を同期して切り替えることにより，中継ノード間の距離を指向性ビームを用いることで拡大しながらも，シンクノードから全中継ノードおよび中継ノードへの接続性を確保できる．さらに，PSmart では，中継ノードを正しい位置，向きに配置しておけば，全中継ノードのビーム方向切替えスケジュールの同期がとれた状態を，事前に個々の中継ノードにネットワークの構成情報を与えることなく実現可能である．

以下，本章では，まず本アーキテクチャで前提とする中継ノード，センシングノード，ならびにアンテナ特性に関する前提を述べ，次に PSmart による WSN におけるデータ収集手順の詳細を述べる．最後に，中継ノードのビーム方向を同期させるためのアルゴリズムについて説明する．

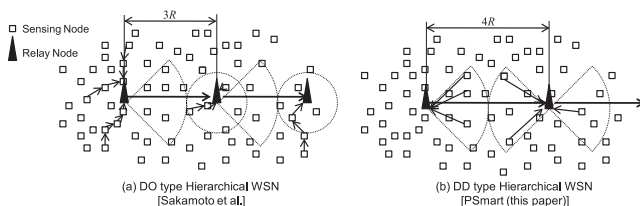


図 1 スマートアンテナを用いた階層型 WSN

Fig. 1 Hierarchical wireless sensor network with smart antennas.

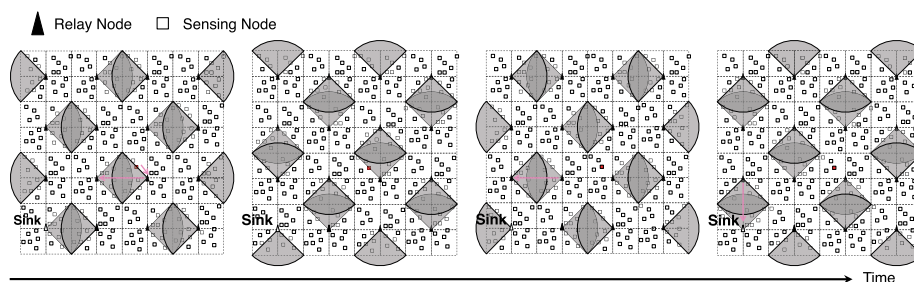


図 2 PSmart

Fig. 2 PSmart.

3.1 前提条件

本論文では、中継ノードとセンシングノードの2種類のノードを考える。中継ノードは、センシングノードが収集したデータを他の中継ノードを介してシンクノードへ転送する役割を持つ。中継ノードはスマートアンテナを搭載し、後述するモデルに従って指向性ビームの方向を切り替えながら、隣接する中継ノードおよびセンシングノードと通信する。また、中継ノードは、通常ノードに比べて十分に大きなバッテリーを搭載しているか、電源インフラに接続されているものとする。さらに、その配置は計画的に行われ、各中継ノードはGPS等により自身の位置をあらかじめ知っているものとする。センシングノードに比べて数が少ない中継ノードは、このような計画的な配置と、使用電力・機能に関する高い要件は許容可能と考えられる。一方、センシングノードはバッテリーで駆動し、センシング処理を行い、観測したデータを中継ノードを介してシンクノードへ送信するだけの機能を持つ安価なノードであるとする。センシングノードの配置はランダムに行われるものとする。センシングノードは無指向性アンテナのみを持ち、センシング処理およびデータ送信の必要があるときのみ起動する。このようなセンシングノードの動作は、バッテリー駆動で長時間稼働を期待されているセンサネットワークにおいては、一般的なものである。

本論文では理想的なアンテナビームと電波伝搬を想定する。スマートアンテナのビーム形成技術がMACの性能に与える影響に関する研究は行われているが[15], [16]、本論文では、指向性ビームの利用を前提としたネットワークの形成と、動作スケジュール同期のためのアルゴリズムに注目し、ビームの形成技術については問わないものとする。このような前提は、指向性ビームを用いたMACプロトコルの提案[5]でも用いられている。図3(a)~(d)に本論文で想定する4つのアンテナビームフォームの組合せのモデルを示す。ただし提案するPSmartで使用するのはこのうちの(c), (d)のみである。

- (a) 無指向性+無指向性 (OO型) 全方位に対し利得 G_0 、同アンテナに対向により距離 $2R$ で通信可能。
- (b) 指向性+無指向性 (DO型) ビーム角度 α 、利得 G_L ($> G_0$) の指向性ビームと、利得 G_0 の無指向性ビームの対向により、距離 $(\beta+1)R$ ($\beta > 1$) で通信可能。
- (c) 指向性+指向性 (DD型) ビーム角度 α 、利得 G_L の

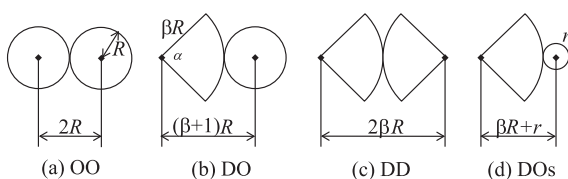


図3 ビームフォームのモデル

Fig. 3 Models of beamform.

指向性ビームどうしの対向により、距離 $2\beta R$ で通信可能。

- (d) 指向性+無指向性短距離 (DOs型) ビーム角度 α 、利得 G_L の指向性ビームと、利得 G_s ($\ll G_0$) の無指向性ビームの対向により、距離 $\beta R + r$ で通信可能。

図3において、送受信2つのビームは理想的な指向性ビームおよび無指向性のビームを想定し、主ビームの角度内で通信が行われるとしている。また互いのビームが接することで受信信号の復調に必要な受信電力が得られることを意味する。サイドローブやバックローブは無視できるとする。中継ノードが使用するスマートアンテナでは、メインローブの中心角が $\alpha = \pi/2$ ないしは $\alpha = \pi/3$ のビームを形成することができ、メインローブが互いにオーバーラップしないようにそれぞれ、4方向、6方向に向けることができるものとする。これらのビーム形成にともなう時間は十分に短いものとする。(d)に示す低利得の無指向性ビームを用いる場合を除き、指向性ビームと無指向性ビームの使用にともなう消費電力は同じであると仮定する。

なお、 α , β の具体的な値は、アンテナの実現方式、伝播環境、変調方式等に依存する。文献[5]では、理想的モデルの一例として $\alpha = \pi/4$, $\beta = 2$ とした評価が行われている。また、文献[17]では、7素子のESPARアンテナを用いた場合のビームパターンの利得の計算例が紹介されている。この例によれば、一方向利得を最大限としたときには、その方向に約10 dBiの利得が得られることが示されている。ただし、約-5 dBiのサイドローブ、バックローブが発生し、理想的な扇形のパターンにはならない。

3.2 4方向の指向性を用いる場合

まず、中継ノードの持つスマートアンテナがビーム角度 $\alpha = \pi/2$ の4方向の指向性通信が可能な場合のPSmartでの通信処理について議論する。 $\alpha = \pi/3$ の場合でも類似の処理が可能だが、一部に工夫が必要である。その詳細については、次節で述べる。

観測領域は仮想的な正方格子を用いてセルに分割される(図4)。各セルは対角線によって4つの直角二等辺三角形のサブセルに分割される。中継ノードは各セルの中央に、それぞれ向きを合わせて配置される。中継ノードは指向性ビームを一定周期ごとに切り替えることでセンシングノードと通信し、センシングノードが生成したデータを収集す

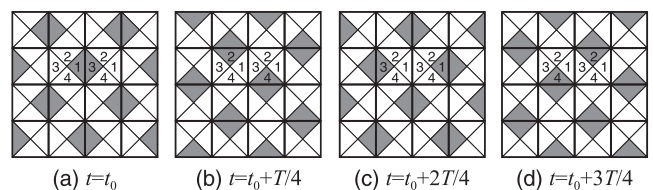


図4 ビーム方向の切替え (4方向の場合)

Fig. 4 Rotation of beam direction (4 direction case).

る。中継ノードのビーム方向は、中継ノードどうしが互いに通信できるようにスケジューリングされる。センシングノードは、観測領域内の任意の位置に配置されるものとする。

3.2.1 中継ノード–中継ノード間通信

各セルの中継ノードは、4方向で隣接する4つのセルの中継ノードとはつねにビームの方向を π ずらしておき、同時に同じ回転方向にビーム方向を切り替えていく。図4(a)~(d)にビーム方向の切替え手順を示す。左から2番目、上から2番目のセルに注目すると、最初、中継ノードのビームは右方向を向いている。このとき、右側に隣接しているセルの中継ノードのビームは左側を向いている。このためこれら2つの中継ノードどうしが通信可能となる。これは、図3における(c) DD型の通信に相当する。時間 $T/4$ が経過すると、全中継ノードは反時計回りにビーム方向を切り替え、注目セルは、上側の中継ノードと通信可能となる。ここで T はビームを一周させる周期(ビーム切替え周期)である。同様の手順を繰り返すことで、各セルの中継ノードは、 T の間にすべての隣接セルの中継ノードとの通信ができる。

3.2.2 中継ノード–センシングノード間通信

各サブセル内のセンシングノードは中継ノードのアンテナビームが自身のサブセルに向けられたときにだけデータを無指向性アンテナで送信する。これは、図3における(d) DOs型の通信に相当する。中継ノードのアンテナが自分自身の方向を向いていなければ、センシングノードは通信機能の電源をオフにする。このために、センシングノードは中継ノードのアンテナの到来タイミングを記憶し、そのタイミングに従って起動スケジュールを定める。

3.3 6方向の指向性を用いる場合

指向性ビームのビーム角度が $\alpha = \pi/3$ であり、中継ノードが指向性を6方向に切り替えることができる場合を考える。この場合、セルの形状は正六角形である。サブセルはセルの中心から頂点に伸びる線分によってセルを分割してできる6個の正三角形である。中継ノードとセンシングノードの間の通信、中継ノード間の通信の方法は4方向の場合と同様である。ただし、ビームの切替え順序が異なる。図5に6方向のビームを用いる場合のビーム方向の切替え手順を示す。

以下、説明を簡単にするため、同図に示されたようにセルが整列され、縦方向に行番号が与えられているものとする。まず、上から1行目、左から2つ目のセルに注目する。このセルの中継ノードは番号付けされた順に $T/6$ ごとに反時計回りにビームの方向を切り替えていく。同一行にある隣接セルではビーム方向を π だけずらした状態で同様に反時計回りにビーム方向を切り替えていく。したがって、同一行では2列おきに同じビーム切替えパターンを持つセル

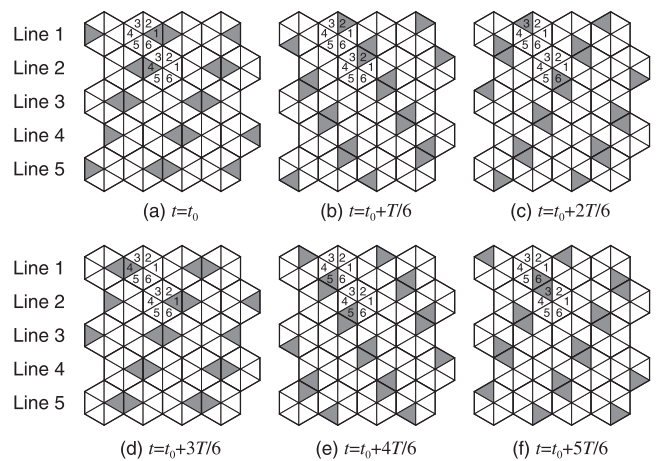


図5 ビーム方向の切替え (6方向の場合)

Fig. 5 Rotation of beam direction (6 direction case).

が出現する。また、2行下の同一列にあるセルでは、ビーム方向を注目セルとは π ずれた状態で反時計回りで切り替えていく。したがって、同一列では、4行ごとに同じビーム切替えパターンを持つセルが出現する。なお、この4行内には、中心座標を同じくするセルは2つしか存在しないことに注意されたい。このように、奇数行のセルではすべてのセルで反時計回りでビーム方向が切り替えられる。

一方、偶数行のセルの中継ノードでは、単純にビーム方向を回転させることはできない。2行目の左から2つ目のセル(先ほどの1行目の注目セルの右下)に注目する。このセルの中継ノードではビーム方向を、図中セル内に記したサブセルの番号で4, 2, 6, 1, 5, 3, 4, 2, 6, ...という順序で切り替えていく。つまり、基本的には反時計回りでビーム方向を切り替えるが、3回に1回はビーム方向を π 反転させている。偶数行においても同一行にある隣接セルの中継ノードでは、ビーム方向が π ずれている。したがって、同一行では2列おきに同じビーム切替えパターンを持つセルが出現する。また、同一列の2行下のセルでもビーム方向は π ずれており、同一列では4行ごとに同じビーム切替えパターンを持つセルが出現する。

以上のような手順により、各セルの中継ノードは、ビーム切替え周期 T 以内にすべての隣接セルの中継ノードと通信可能である。

3.4 ビーム方向の同期

PSmartでは、全中継ノードが互いに通信できるようにビーム方向の切替えスケジュールを同期させておく必要がある。また、センシングノードは、自身がいるサブセルに中継ノードのビームが向くスケジュールを知っている必要がある。しかしながら、中継ノードに対する設定や設置作業の容易さを考慮すると、中継ノードに対して個別の設定情報を与えなくてもビーム方向の同期が行えることが望ましい。ここでは、すべての中継ノード、センシングノード

がスケジュールに関する知識を何も持っていない状態から、同期を完了させるための手順について述べる。

ここでの議論では、すべての中継ノードは設置時に方角を揃えて正しい位置に配置されているものとする。つまり、ノードの設置者がGPSを用いて個々の中継ノードの設置場所を確認し、かつアンテナ形状等の目印を頼りに、すべてのアンテナ装置の物理的設置方向が同じになるように向きを確認してノードを設置すると仮定する。シンクノードは中継ノードと同様の通信機能を持つものとする。各中継ノードは同期がとれているか否かを表す状態変数を持ち、その値はノード起動時には未同期を表すものとする。中継ノードは自身の位置座標は知っているが、スケジュールに関する知識を持っていないものとする。具体的には、同期後のビーム方向切替えタイミング、その周期、隣接ノードのID・位置、中継ノードの設置間隔、初期ビーム方向、自身が存在する行（後述）が中継ノードには与えられていない。ただし、シンクノードの位置に関しては、その大まかな位置が分かっている場合と、分かっている場合の両方の場合について議論する。中継ノードの電源の投入間隔は任意のタイミングでよいとする。シンクノードは、少なくとも自身の位置、自身がシンクノードであること、ビーム切替え周期 T 、自身が存在する行（後述）を知っているものとする。

以下、中継ノードがシンクノードの位置を知っている場合と知らない場合それぞれの場合について、切替えスケジュールの伝達手法について説明する。

3.4.1 中継ノードがシンクノードの位置を大まかに知っている場合

動作スケジュールの同期がシンクノードから順に行われるとするならば、中継ノードがシンクノードの位置を大まかに知っている場合、中継ノードは自身とシンクノードの位置関係から、切替えスケジュールが到来する方向をおおよそ予測できる。未同期状態の中継ノードは、予測した方向に最も近くなるようにビーム方向をセットしたまま待機し、シンクノードからの信号を待ち受ける。シンクノードは自身が持つビーム切替えスケジュールに従ってビーム方向を切り替えながら、隣接する中継ノードすべてからの同期完了信号を受信するまで、あるいは決められた時間が経過するまで、切替えスケジュールを表したデータ（以下、切替えスケジュールデータ）を間欠的に繰り返し送信する。切替えスケジュールデータは、ビーム方向が固定される時間 $T/4$ あるいは $T/6$ に対して十分に短い期間で送信できるものとする。

未同期の中継ノードは、シンクノードを含む同期済みの隣接中継ノードからの信号を受信し、切替えスケジュールデータを獲得すると、同期済みの中継ノードに同期完了通知を送信する。この通知には自身の識別子と同期済み中継ノードとの通信に使うビーム方向を含める。この処理に

よって、この中継ノードは同期済み状態となり、受け取ったスケジュールデータに従って、ビームの切替えを開始する。さらに、この中継ノードは、シンクノードと同様に隣接する中継ノードすべてからの同期完了信号を受信するまで、あるいは決められた時間が経過するまで、切替えスケジュールデータを間欠的に繰り返し送信する。センシングノードは、起動後、同期済みの中継ノードから切替えスケジュールデータを受信するまで受信可能状態で待機し、切替えスケジュールデータを受信すると、自身のセンシングデータ送信タイミングをそのスケジュールにあわせて行うようにする。以後、同様の手順を続けることで全中継ノード、センシングノードが切替えスケジュールに従って動作するようになる。

同期済みの中継ノードがセル内のすべての中継ノードに切替えスケジュールを配布するのに要する時間は、最長でビーム切替え周期 T となる。したがって、領域全体の同期に要する最長時間は、シンクノードから観測領域内の最も離れた中継ノードまでのホップ数を h とすると、 Th となる。

なお、切替えスケジュールを送信する同期済み中継ノードおよびシンクノードが近隣に複数存在した場合、これら複数のノードが送る切替えスケジュールを運ぶ信号どうしが干渉する可能性がある。しかしながら、ビーム方向の固定時間 $T/4$ 、および $T/6$ が十分長ければ、このような干渉が起こりうる条件であっても、シンクノードおよび同期済み中継ノードがそれぞれ間欠的に繰り返し切替えスケジュールの送信を行うことで、ビーム方向固定時間内でスケジュールデータの配信を成功させることができると見込まれる。動作スケジュール同期処理は、システム稼働時に1度だけ行うことなので、 T を十分長くすることは許容可能である。したがって、本論文では、切替えスケジュールの受信処理の失敗はないものとして議論を進める。

3.4.2 中継ノードがシンクノードの位置を知らない場合

中継ノードがシンクノードの位置を知らない場合、起動後にビームを1方向に固定したままにしておくと、シンクノードから伝播してくる切替えスケジュールデータを送る信号を受信できない場合がある。たとえば、シンクノードに隣接した中継ノードが、シンクノードと逆向きにビームを固定しておくと、シンクノードからのデータを受信できない。そこで、中継ノードがシンクノードの位置を知らない場合、未同期の中継ノードは、シンクノードのビーム切替え周期 T よりも十分に短い周期でビーム方向を切り替えながら、切替えスケジュールデータの到着を待つ。具体的には、4方向のビームが利用できる場合、 $T/4$ 以下、6方向の場合は $T/6$ 以下の周期でビーム切替えを行う。シンクノード、同期済みの中継ノードは、中継ノードがシンクノードの位置を知っている場合と同じ動作をする。したがって、未同期の中継ノードが同期に成功すると、それま

での短い周期のビーム切替えをやめ、受信した本来の周期 T の切替えスケジュールに従って動作を始める。

切替えスケジュールデータの送信に要する時間が、 $(T/4)/4$ ないしは、 $(T/6)/6$ より短ければ、同期済みの中継ノードは時間 T 以内ですべての隣接した中継ノードに切替えスケジュールを通知することができる。したがって、観測領域内のすべての中継ノードで切替えスケジュールを同期させるまでに要する時間は、中継ノードがシンクノードの位置を知っている場合と同じく、最長 Th である。

以上で述べた方法に従えば、通信エラーが生じない限り、配置されたノードが設置方角、位置ともに計画どおりであるならば、最終的にビーム方向の同期は可能である。しかしながら、現実的には設置されたノードの位置ずれ、方角のずれが起こりうる。そこで 5 章で、このようなずれが生じた場合の同期可能性について評価する。

3.4.3 切替えスケジュールデータ

切替えスケジュールデータに含まれるべきデータとして、以下の項目が考えられる。

- (1) スケジュール送信者（同期済みノード）の識別子
- (2) 時刻同期信号。シンクノードの時計に合わせられた同期済みノードの持つ現在時刻。
- (3) 次のビーム方向切替え時刻および切替え周期
- (4) スケジュール送信者（同期済みノード）のビーム中心の方角（アンテナハードウェアに与えられた 4 ないし 6 方角に対応する番号）
- (5) スケジュール送信者（同期済みノード）の位置が奇数行か偶数行か（図 5 参照、詳細は後述）
- (6) GPS より得られたスケジュール送信者（同期済みノード）の位置座標
- (7) 全ノードの ID と各時刻におけるビーム方向（シンクノードに与えられた、システムの完全な動作スケジュール）

4 方向の場合、(1)、(2) と (3) は必須である。つまり、いったん未同期の中継ノードが同期済みの中継ノードとの通信が成功すれば、あとは (2) と (3) に従って、ビームを決められた方向に回転を始めるようにすれば、全中継ノードがシンクノードとの接続性を持つようにビーム方向を制御可能となる。しかしながら、中継ノード間の距離が短い場合、あるいは配置位置・方角にずれがある場合には、実際には直接通信可能な位置関係にあるにもかかわらず、ビーム方向に対して正しい向きの隣接中継ノード以外とも通信可能な場合がある。この場合、中継ノードはシンクノードとの接続性は得られるものの、ビームの方向切替えスケジュールが理想的なものとは異なるものとなり、一部の隣接ノードと 1 ホップで接続できない場合がある。切替えスケジュールデータに (4) が含まれていれば、このような状態に陥る確率は軽減できる。(6) が含まれており、かつ隣接ノードの位置が事前に中継ノードに与えられていれば、

未同期のノードはこの情報と自身の位置座標を用いて、スケジュール送信者との位置関係を正しく判定できるので、このような問題は起きなくなる。

一方、6 方向の場合、図 5 に示した位置関係によって、ビームの切替え順序を変更する必要がある。(1) から (5) までの情報が必要である。未同期の中継ノードは、同期済みの中継ノードとの通信ができると、(4) と (5) および自身のビーム方向に基づいて、その後のビーム方向の変更順序を知ることができる。ただし、中継ノードの配置位置ずれ、方角のずれが大きい場合には、前述したように、シンクノードとの接続性は得られるものの、理想とは異なるスケジュールで動作することにより、一部の隣接ノードと 1 ホップで通信できない場合がある。(6) が含まれており、かつ隣接ノードの位置が事前に中継ノードに与えられていれば、未同期のノードはこの情報と自身の位置座標を用いて、スケジュール送信者との位置関係を正しく判定できるので、このような問題は起きなくなる。

(5) に関しては、シンクノードが偶数行、奇数行のどちらに属するかをあらかじめ決めておき、さらに行に相当する方角を決めておけば、シンクノードおよび前の同期済みノードの行との位置関係によって、個々のノード自身が判定可能である。すなわち、ビームを東西方向に向けたうえで、同期済みの偶数行のノードと同期したならば、自身は偶数行にいることとなる。一方、東西方向以外にビームを向けて偶数行のノードと同期したならば、自身は奇数行にいることになる。このような判定を行うためには、全ノードは事前にネットワークの基準となる方角がどこかを与えられている必要がある。ただし、これはすべてのノードで共通の設定であり、個別の設定の必要はない。また、ネットワークで独自の変更をしないのであれば、ハードウェアレベルで固定値としておくことも可能である。

4. 検討

4.1 電力の削減効果

PSmart による電力削減効果について考察する。中継ノードどうしを最大限離して通信する場合の距離を L とする。図 3 に従えば、DO 型の場合 $L = (\beta + 1)R$ 、DD 型 (PSmart) の場合 $L = 2\beta R$ となる。したがって、直線状に中継ノードを配置した場合、DD 型の中継ノード数は DO 型の $(\beta + 1)/(2\beta)$ とすることができる。面状に中継ノードを配置する場合、DD 型では DO 型の $(\beta + 1)^2/(2\beta)^2$ の中継ノード数で済む。したがって、PSmart を用いることによって、高価なスマートアンテナの台数を減らすことができるので、機器コストを低減させることができる。また、DD 型、DO 型での通信における消費電力が同じであると仮定すると、中継ノード間通信による距離あたりの通信電力コストが $(\beta + 1)/(2\beta)$ となる。面状の配置では通信電力コストが $(\beta + 1)^2/(2\beta)^2$ となる。ただし、この議論では、

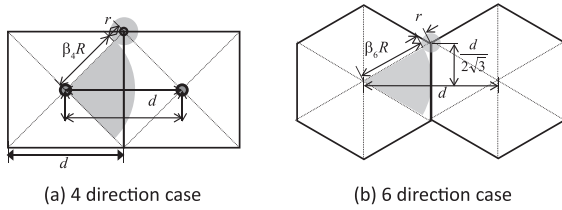


図 6 セルサイズ的设计

Fig. 6 Determining cell size.

中継ノードとセンシングノードの間の指向性通信を考慮していない。

4.2 セルサイズ的设计

中継ノードとセンシングノード間の通信が図 3(d) の DOs 型で行われることを考慮して、セルサイズ的设计方法について考察する。PSmart では、指向性ビームを対向させることで中継ノード間の距離をできるだけ長くすることを目指している。そこで、センシングノードのビーム半径 r と中継ノードの指向性ビーム半径 $\beta_4 R$ (4 方向の場合)、 $\beta_6 R$ (6 方向の場合) に関して、中継ノード間距離を最大限大きくするための制約条件について考える。

まず、PSmart で 4 方向の指向性通信ができる場合について考える。セルの 1 辺の長さ、つまり中継ノード間の距離を d とすると、各中継ノードは、セルの中央に配置するため、隣接する中継ノード間の距離はセルの 1 辺の長さ d と等しくなる。同一セル内の中継ノードとセンシングノードとの間の DOs 型の通信を保証するためには、両者間の距離を $\beta_4 R + r$ 以下とする必要がある (図 6(a))。したがって、三平方の定理より

$$d \leq \sqrt{2}(\beta_4 R + r) \quad (1)$$

となる。また、中継ノード間の距離 d は対向した指向性ビームでの最大通信可能距離 $2\beta_4 R$ より小さくなる必要があるので、

$$d \leq 2\beta_4 R \quad (2)$$

が満たされる必要がある。式 (1), (2) の右辺を比較すると、

$$\sqrt{2}(\beta_4 R + r) \geq 2\beta_4 R \quad (3)$$

すなわち、

$$r \geq \beta_4(\sqrt{2} - 1)R \quad (4)$$

が満たされるならば、中継ノードの指向性ビーム対向時の最大通信距離に従って、最大限大きなセルを設計できることが分かる。一方、式 (4) が満たされない場合、式 (1) を満たすように、中継ノードの指向性ビーム対向時の最大通信距離よりも短い間隔で中継ノードを配置する必要がある。

次に 6 方向の指向性通信ができる場合について考える。4 方向の場合と同様の計算により、中継ノード間の距離 d

に対する制約は、

$$d \leq \sqrt{3}(\beta_6 R + r) \quad (5)$$

および、

$$d \leq 2\beta_6 R \quad (6)$$

となる。式 (5), 式 (6) より、

$$\sqrt{3}(\beta_6 R + r) \geq 2\beta_6 R \quad (7)$$

すなわち、

$$r \geq \beta_6(2\sqrt{3} - 3)/3R \quad (8)$$

が満たされるならば、中継ノードの指向性ビーム対向時の最大通信距離に従って、最大限大きなセルを設計できる。一方、式 (8) が満たされない場合、式 (5) を満たすように、中継ノードの指向性ビーム対向時の最大通信距離よりも短い間隔で中継ノードを配置する必要がある。

4.3 MAC プロトコルおよび経路制御

IEEE802.11DCF を応用したスマートアンテナを用いる MAC プロトコルの多くは、受信側は無指向性ビームの利用を想定している。これは任意のタイミングでのフレーム受信に対応するためであるが、PSmart では、シンクノードから配信されるビーム方向切替えスケジュールによって、ビーム方向、ならびに送信元が決まるので、受信側で指向性ビームを使うことができる。また、ネットワーク全体でビーム方向が整列しているために干渉の影響を受けにくいので、MAC プロトコルは単純化できる。

中継ノード間の経路は、シンクノードを根としたツリーベースの経路をつくればよいので、特殊なプロトコルは必要ないが、中継時に目的とする経路に向かう隣接ノードとの接続が可能なタイミングまで待ち合わせるための処理が必要である。エンド・トゥ・エンド遅延を最適化する場合、工夫を要する。

5. ビーム方向同期の确实性の評価

本章では、中継ノードの設置位置、設置方向にずれがある場合における 3.4 節で提案したビーム方向同期手法による同期の可能性について、シミュレーションに基づいて評価する。以下で述べるシミュレーションでは理想的なビームフォームを仮定するが、現実にはビームフォームは理想とは異なる。本章で評価する中継ノードの設置位置と設置方向のずれに対する同期手法の許容性は、現実のビームを用いた場合の本手法の実現性について裏付けを与えるものと考ええる。

3.4.1 節で述べたシンクノードの位置を確認したうえで中継ノードを配置する場合には、中継ノードの方向・位置に関するずれは最小限に抑えられると考えられる。した

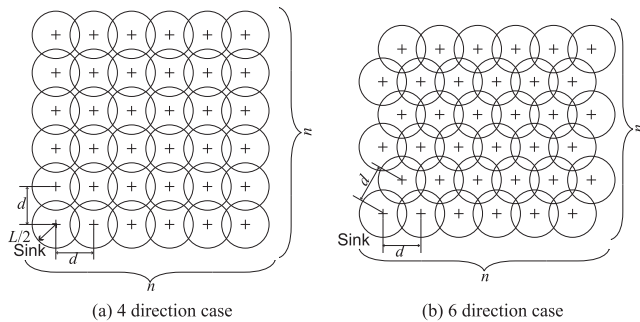


図 7 シミュレーションでのノード配置

Fig. 7 Node arrangement in the simulation.

がって、本章の議論では、3.4.2 節で述べた中継ノード（あるいは、中継ノードの設置者）がシンクノードの位置を知らない場合を想定する。なお、以下の議論では中継ノードとシンクノードに絞って議論するので、中継ノードを単純にノードと表記する。

5.1 シミュレーションモデル

図 7 にシミュレーションにおけるノード配置図を示す。シンクノードは図 7 の左下に配置される。シンク以外のノードは理想的な位置，方向に対して，次に述べるエラーモデルに従って配置されるものとする。スマートアンテナのビームフォームは図 3 に示すような理想的な扇形であるとし，その半径を $L/2$ ，中心角を $\pi/2$ （4 方向の場合）および $\pi/3$ （6 方向の場合）とする。ビーム切替え周期 T 以外の時間的要因は無視する。つまり，シミュレーション上でノードの発するビームの重なり合いが生じている時間があつた場合，時間 0 で同期に必要な通信が完了するものとする。また，簡単のため，未同期のノードは 4 方向，6 方向の場合でそれぞれ $(T/4)/4$ ， $(T/6)/6$ の周期ですべて同じタイミングでビーム方向を回転させるものとした。各ノードのビーム初期方向はランダムに与えるものとした。

ノードの配置のずれを扱うために図 8 に示す位置ずれと方角ずれのモデルを考える。このモデルでは，理想位置を中心とした半径 R_E の円内にノードの中心をランダムに配置することで位置ずれを表現し，理想のノード設置方向とのずれを $(-\theta_E/2, \theta_E/2)$ の範囲で一様乱数で与えることで方角ずれを表現している。

なお，2 台のノードのビームの重なりがあつたとしても，それらのビーム方向が正しく向き合っていない場合がある。たとえば，図 9 に示すように，4 方向のビームを使う場合に，南側にあるノード N_S のビームが北方向に向いているとする。このとき， N_S はその北側にあるノード N_N のビームが南側に向いているときに通信するのが理想的である。しかし，ノードの設置間隔が短い場合や，設置位置・方角がずれている場合， N_S が北側にビームを向けていても N_N 以外のノードのビームと重なることがある。たとえば， N_S の北東にある N_{NE} のビームが南側（同図 (a)），あ

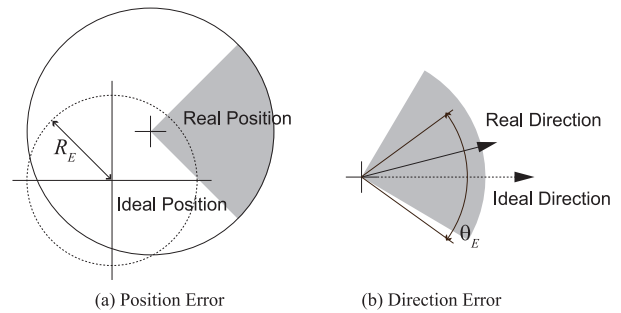


図 8 ノード配置のエラーモデル

Fig. 8 Error model for node placement.

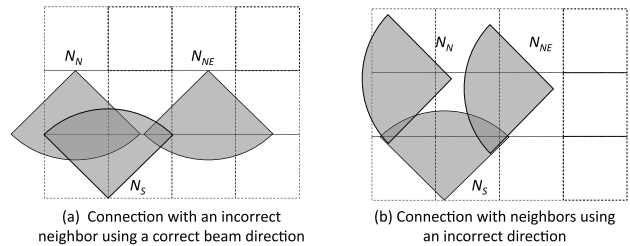


図 9 同期処理の成否の判定

Fig. 9 Decision of the success of synchronization.

るいは西側（同図 (b)）に向いているときに， N_S の北向きのビームと重なり，両者が通信可能となりうる。

このような場合を考慮すると，同期処理の正否の判断基準として，i) 2 つのノードが互いに通信可能になったときにはいつでも成功と見なす，ii) 正しい相手と正しい向きで通信している場合のみ成功と見なす，iii) 正しい相手かどうかにかかわらず互いに正対させる方向でビームを向けようとしている場合に成功と見なす，の 3 つが考えられる。

このうち i) は，図 9 (b) のように，正しくないビーム方向の組合せを許してしまうので，採用を避けるべきである。このような状態で接続しているか否かについては，未同期ノードが向けているビーム方向と，同期済みノードのビーム方向に基づいて判定できる。同期済みノードのビーム方向は，切替えスケジュールデータに含めて送ることができるため，この判定は容易に実行可能である。したがって，i) の基準を選ぶ理由はないといえる。

次に ii) の条件では，図 9 のように，未同期ノードが，正しい向きにビームを向けている複数の通信可能な同期済みノードのうち，どれが本来同期すべき相手であるかを判定できる必要がある。このためには，同期済みノードのビーム方向に加えて，それらの位置座標あるいは識別子をもとに判断をする必要がある。ただし，位置座標をもとにした判定のためには，個々のノードが自身および隣接ノードの置かれるべき正しい座標を知っているか，自身と複数の隣接ノードの位置関係を調べられるよう待ち合わせて，最適なものを選ぶプロセスを設ける必要がある。前者の方法を適用するには，ノードの稼働前に個々の中継ノードに隣接ノードの位置に関する情報をあらかじめ与えておく必要

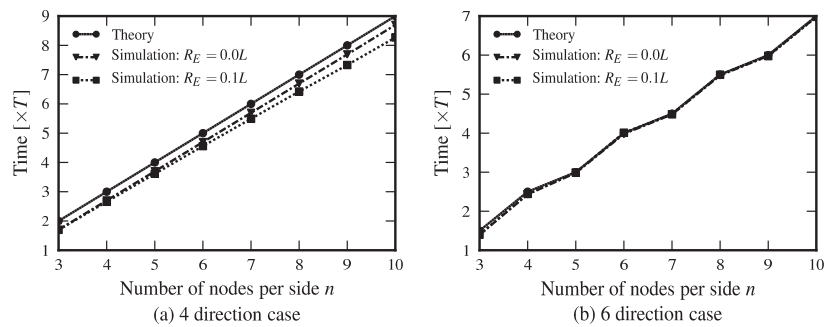


図 10 同期完了に要する時間

Fig. 10 Time needed for synchronization.

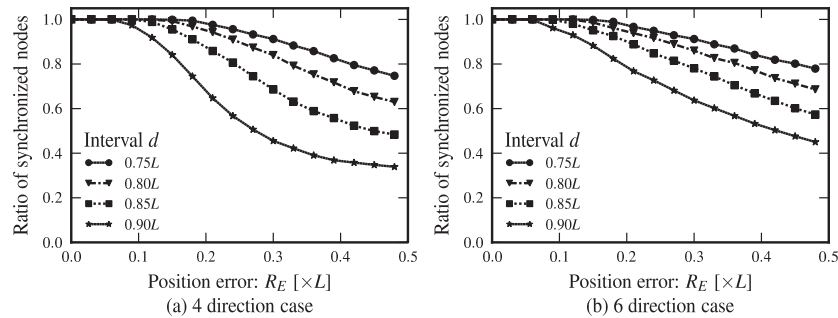


図 11 位置ずれの同期率への影響

Fig. 11 Effect of positioning error to the synchronization ratio.

がある。後者の方法を適用するには、同期処理に複数候補を受け入れるための待ち合わせ時間が必要となる。また、ノードの識別子を判定基準とする場合にも、事前に個々のノードに隣接ノードに関する情報を設定しておく必要が生じる。

一方, iii) の基準は, ii) の基準から正しい相手か否かを判定する基準を不要としたものであり, 前述したようなノードに対する事前設定や, 待ち合わせ処理を必要としない。そこで, 本章での評価では, iii) の基準を用いることとした。このために, 切替えスケジュールデータには, 3.4.3 節における (2) から (5) までを含めている。

iii) の基準を用いた場合, 図 9 (a) における N_S が N_{NE} を同期相手として選んでしまうように, 誤った相手と同期する可能性がある。この場合, 理想的な場合とは異なるビーム方向が切り替えられるので, 本来指向性ビームを向き合わせて通信できるはずの隣接ノードどうしが通信できなくなる可能性がある。したがって, ノードが通信可能な隣接ノード数 (= 度数) が理想的な場合に比べて小さくなることになる。

5.2 シミュレーション結果

以下に示すシミュレーション結果は, 同期処理の開始から全ノードの同期完了まで, あるいは同期ができないことが確定する時間までの処理を 1 試行として, 各条件で 1,500 回の試行を行った結果の平均である。

図 10 に $d = 0.85L$ として観測領域 1 辺あたりのノード

数 n を変化させたときの, 位置ずれ, 方角ずれがない場合, および位置ずれ $R_E = 0.1L$, 方角ずれ $\theta_E = 0$ における同期処理開始から全ノードの同期完了までの時間を示す。この時間の図 7 の配置における理論値は, 4 方向, 6 方向の場合でそれぞれ $(n-1)$, $\lceil 3(n-1)/2 \rceil / 2$, である。図に示すとおり, シミュレーション結果と理論値はほぼ一致するが, 4 方向の場合, 特に $\theta_E = 0.1L$ のときに理論値よりも同期完了までの時間が短くなっている。これは, 5.1 節に述べた同期処理の正否の判断基準 iii) を用いたことに起因するものである。すなわち, 上下, 左右に隣り合っていないノードどうしであっても, 正しい向きにビームを向けたときに通信可能であれば同期ができたと見なすために, 本来上下, 左右方向で進むべき同期処理が, 斜め方向に向かって進むことがあるため, このような同期時間の短縮が生じる。このような場合, すべてのノードはシンクノードとの接続性を持つが, 各ノードが把握するスケジュールが必ずしも理想的なものにはならないため, すべての上下左右の隣接ノードとの 1 ホップでの接続性が得られないことがある。

次に, 図 11 にノードの設置位置にずれがある場合における同期が完了したノードの割合 (同期率), 図 12 にノードにおける平均度数を示す。ここで度数とは, ノードが最終的に決まったスケジュールで通信可能となった隣接ノードの数であり, その理想値はビームの方向の数に等しい。なお, ここの度数の計算には周辺部に配置されるノードを含めていない。

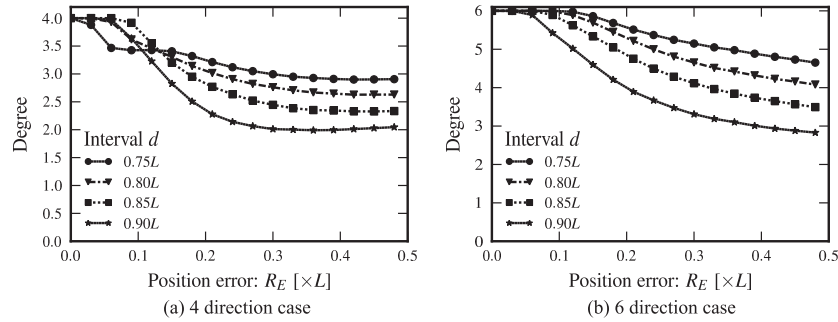


図 12 位置ずれの度数への影響

Fig. 12 Effect of positioning error to the degree of nodes.

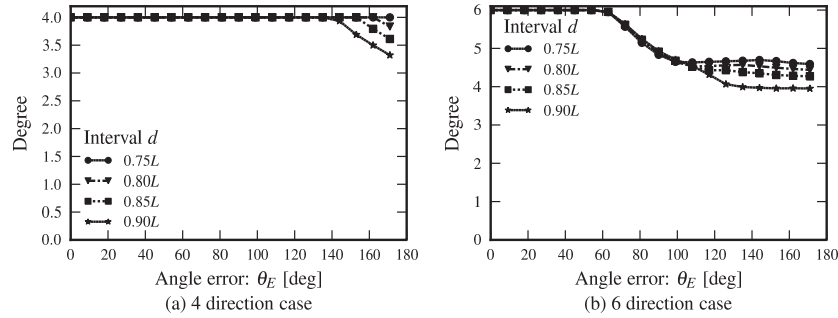


図 13 方向ずれの度数への影響

Fig. 13 Effect of direction error to the degree of nodes.

図 11 から明らかなように、4 方向、6 方向いずれの場合でも、位置ずれ最大半径 R_E が大きくなると、同期率が 1.0 を下回るようになる。また、ノードの間隔 d が大きいほど同期率が低下しやすくなる。これは、配置位置のずれによって隣接ノードとの 1 ホップ接続性が失われてしまうためである。図 12 を見ると、度数の変化にも同期率と同様の傾向が見られるが、4 方向の場合には R_E が非常に小さい場合においても度数が 4 を下回っているという違いがある。これは、5.1 節で述べた同期処理の判定基準の iii) を用いていることに起因するものである。この問題は、切替えスケジュールデータに (6) を用い、同期処理の判定基準 ii) を適用することで解消できる。

図 13 に $R_E = 0$ のときノードの配置方向のずれ θ_E を変化させたときの度数の変化を示す。4 方向の場合には、 $\theta_E < 130[\text{deg}]$ の範囲で度数が 4 を下回ることはない。一方、6 方向の場合には、 θ_E がビームの中心角 $\pi/3$ を上回ると急激に度数が低下する。なお、グラフは割愛するが、 $\theta_E < 2\pi/3$ であれば、同期率は 1.0 が維持される。

6. まとめ

スマートアンテナによるビーム方向の切替えを複数の中継ノードで同期させることで、中継ノードでの消費電力を削減する階層化センサネットワークアーキテクチャ PSmart を提案し中継ノードのビーム方向を 4 方向、6 方向に変更可能な場合におけるビーム切替えスケジュール方法と、ビーム切替えスケジュールの同期方法について説明し

た。本手法は中継ノードのビーム方向を送受信双方で向かい合わせるようにすることで、中継ノード間距離を長くすることができるため、中継ノードの数を減らすことができ、中継ノード稼働のための電力消費、ならびに中継ノードの設置コストを低減させることができる。提案したビーム切替えスケジュールの同期方法を用いれば、中継ノードに事前に個別の動作スケジュールとシンクノードに関する情報を与える必要がない。実用的見地からは、ビーム切替えスケジュールの同期機構が、中継ノードの設置位置・方向のずれ、ならびに電波伝搬条件の理想値との違いを許容できる必要があるが、本論文では、シミュレーションによって理想的なビームフォームを用いた場合には、中継ノード間の最大通信距離の 5~10% の設置位置のずれ、ビーム中心角以下の設置方向のずれを許容できることを明らかにした。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 A「アンテナの指向性を利用するユビキタスインフラストラクチャに関する実証的発展研究（課題番号 20240005）」の助成によるものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- [1] Kawakami, H. and Ohira, T.: Electrically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antennas, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.47, No.2, pp.43–50 (2005).
- [2] 坂本 浩, 萬代雅希, 渡辺 尚: スマートアンテナを利用する階層型センサネットワークの実装と評価, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, pp.366–373 (2008).

- [3] Ko, Y.-B., Shankarkumar, V. and Vaidya, N.H.: Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks, *Proc. IEEE Infocom 2000*, pp.13-21 (2000).
- [4] Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks, *Proc. ACM Mobicom 2002*, pp.59-70 (2002).
- [5] 長島勝成, 高田昌忠, 渡辺 尚: スマートアンテナを用いた2種アクセス併用指向性メディアアクセス制御プロトコル, 信学論, Vol.J87-B, No.12, pp.2006-2019 (2004).
- [6] 橋口正也, 平田明史, タムフェールエディ, 大平 孝: アダプティブエスパアンテナを用いた無線アドホックネットワークのMACに関する基礎検討, 信学技報, RCS2002-180 (2002).
- [7] Ramanathan, R.: On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas, *Proc. ACM MobiHoc 2001*, pp.95-105 (2001).
- [8] Shankar, S. and Kundur, D.: Towards improved connectivity with hybrid uni/omni-directional antennas in wireless sensor networks, *Proc. IEEE Infocom 2008 workshops*, pp.1-4 (2008).
- [9] Shankar, S., Kundur, D. and Sprintson, A.: Enhanced availability in randomly deployed wireless sensor networks via hybrid uni/omni-directional antennas, *Proc. IEEE Milcom 2008*, pp.1-7 (2008).
- [10] Kandasamy, S., Campos, R., Morla, R. and Ricardo, M.: Using directional antennas on stub wireless mesh networks: Impact on throughput, delay, and fairness, *Proc. 19th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN2010)*, pp.1-6 (2010).
- [11] Yi, S., Pei, Y. and Kalyanaraman, S.: On the capacity improvement of ad hoc wireless networks using directional antennas, *Proc. ACM MobiHoc 2003*, pp.108-116 (2003).
- [12] Muthaiah, S., Iyer, A., Karnik, A. and Rosenberg, C.: Design of high throughput scheduled mesh networks: A case for directional antennas, *Proc. IEEE Globecom 2007*, pp.5080-5085 (2007).
- [13] Zhang, G., Xu, Y., Wang, X. and Guizani, M.: Capacity of hybrid wireless networks with directional antenna and delay constraint, *IEEE Trans. Communications*, Vol.58, No.7, pp.2097-2106 (2010).
- [14] Saha, A. and Johnson, D.: Routing improvement using directional antennas in mobile ad hoc networks, *Proc. IEEE Globecom 2004* (2004).
- [15] Ramanathan, R.: On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, pp.95-105 (2001).
- [16] Radhakrishnan, R., Lal, R., Caffery, J. and Agrawal, D.P.: Performance comparison of smart antenna techniques for spatial multiplexing in wireless ad hoc networks, *Proc. IEEE Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp.168-171 (2002).
- [17] 木村真樹, 萬代雅希, 渡辺 尚: 干渉を考慮したビームパターンを用いるMACプロトコルについて, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2010) シンポジウム, pp.1547-1552 (2010).

の消費電力を削減する階層化センサネットワークアーキテクチャを提案している。本手法は中継ノードのビーム方向をつねに向かい合わせにすることで、中継ノード間距離を長くすることができるため、つねに稼働する中継ノードの数を減らすことができ、中継ノード稼働のための電力消費、ならびに中継ノードの設置コストを低減させることができ、有効である。送信側と受信側のアンテナのビーム方向を同期させるというコンセプトもおもしろく、今後、評価を充実させれば十分論文誌論文として通用するものと考ええる。よって、ここに研究会推薦論文として推薦する。

(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会
主査 竹下 敦)



石原 進 (正会員)

平成6年名古屋大学工学部電気工学科卒業。平成11年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。平成10年日本学術振興会特別研究員。平成11年静岡大学情報学部助手。平成13年同大学工学部助教授。現在、静岡大学創造科学技術大学院准教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング、モバイルアドホックネットワーク、センサネットワークに関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。



大沢 昂史

平成20年静岡大学工学部システム工学科卒業。平成22年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年東海旅客鉄道株式会社入社。鉄道信号システムに興味を持つ。



稲垣 徳也

平成19年静岡大学工学部システム工学科卒業。平成21年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)デンソー入社。平成21年度山下記念研究賞。スマートグリッドに興味を持つ。

推薦文

本論文では、スマートアンテナによるビーム方向の切替えを複数の中継ノードで同期させることで、中継ノードで