

通信指向性の同期切り替えを行う 階層型省電力無線センサネットワーク

石原 進^{†1} 大沢 昂史^{†2} 稲垣 徳也^{†2,*1}

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ビーム方向を常に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、常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、並びに中継ノードの設置コストを低減できる。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順、およびその省電力効果について議論する。

Power saving hierarchical sensor network architecture with synchronized directivity switching

SUSUMU ISHIHARA,^{†1} TAKASHI OSAWA^{†2}
and TOKUYA INAGAKI^{†2,*1}

This paper proposes architecture of hierarchical sensor networks which can cover a monitoring region with small number of relay nodes by synchronously switching the directivity of antennas of relay nodes. The proposed architecture, Power Saving by Synchronized Cooperation of Smart Antennas (PSmart), makes the directional beam of antennas on neighboring relay nodes face each other. Thus the distance between relay nodes can be longer than conventional architecture which 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.

1. はじめに

無線センサネットワーク（以下 WSN）において、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もつノードで構成するもの、異なる通信機能をも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し、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で、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、中継ノードの計画的に配置され、位置は変更されないことが多いと考えられる。従って、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、無指向性通信が切り替えが可能である。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 よるノード位置の取得が出来ることを前提とした DMAC³⁾、MMAC⁴⁾、GPS を用いない SWAMP⁵⁾

^{†1} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

^{†2} 静岡大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Shizuoka University

*1 現在、株式会社デンソー

Presently with Denso Corporation

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もつ中継端末が, その指向性ビームを隣接中継端末と対向させるようにスケジューリングし, 両者が指向性通信をすることで, 中継端末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, 中継端末間の距離増大による中継端末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, 第 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手法について概説する. 第 3 章で PSmart のアーキテクチャの詳細について述べ, 第 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する. 最後に 5 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もつ中継ノードと, 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のリスク, 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への総ホップ数を小さくすることが出来るが, 中継ノードの設置コストが問題となる. 中継端末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. 従って, 中継ノードの総数を減らすことが可能であるため, 高価なスマートアンテナの導入によるコストを低減できる. 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

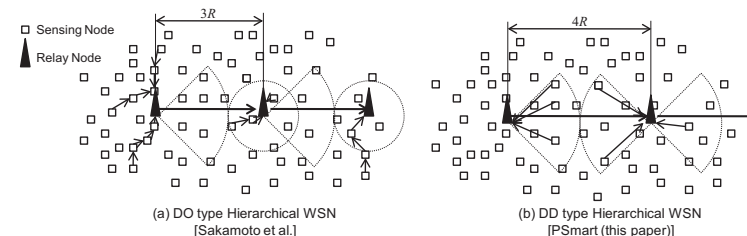


図 1 スマートアンテナを用いた階層型 WSN

Fig.1 Hierarchical wireless sensor network with smart antennas

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ので, 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出来れば, 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.

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 1(b) に PSmart によるネットワーク構成例を示す. 本章では, まず本アーキテクチャで前提とするアンテナの特性と WSN におけるデータ収集手順を述べる. 次に, 通常時の PSmart におけるデータ収集処理方法ならびにビーム方向を同期するための WSN 起動手順について説明する.

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二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へ転送する役割を持

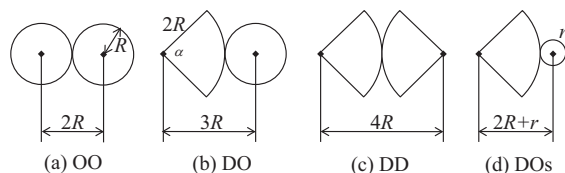


図 2 ビームフォームのモデル
Fig. 2 Models of Beamform

つ、中継ノードはスマートアンテナを持ち、通信方向、通信距離を制御可能であるとする。また、通常ノードに較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おり、かつ中継ノード同士の時刻同期がとられているものとする。

一方、センシングノードは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。

本論文では理想的なアンテナビームと電波伝播を想定する。図 2(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み合わせのモデルを示す。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。図 2 において、送受信二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。また、スマートアンテナでは、メインローブが 4 あるいは 6 方向に向くようにビームを形成出来るものとする。(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送りに要する電力は同じであると仮定する。

- (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 $3R$ で通信可能。
- (c) 指向性+無指向性 (DD 型) ビーム角度 α 、利得 G_L の指向性ビーム同士の対向により、距離 $4R$ で通信可能。

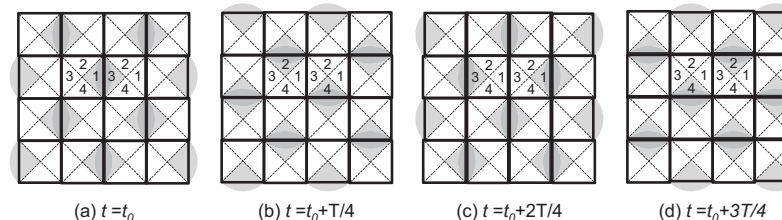


図 3 ビーム方向の切替 (4 方向の場合)
Fig. 3 Rotation of beam direction (4 direction case)

- (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 $2R+r$ で通信可能。

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。ビーム角度が $\pi/3$ 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形格子を用いてセルに分割される (図 3)。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毎に切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る。中継ノードのビーム方向は、中継ノード同士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常にビームの方向を 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 3(a)~(d) にビーム方向の切り替え手順を示す。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。この時、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。このためこれら二つの中継ノード同士が通信可能となる。これは、図 2 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 (ビーム切り替え周期) 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時にだけデータを無指向性アンテナで送信する．これは，図 2 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なければならない．

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，ビームの切り替え順序が異なる．図 4 に 6 方向のビームを用いる場合のビーム方向の切り替え手順を示す．

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でビーム方向を切り替えていく．従って，同一行では 2 列おきに同じビーム切り替えパターンを持つセルが出現する．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．従って，同一列では，4 行ごとに同じビーム切り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 つめのセル（先ほどの 1 行目の注目のセルの右下）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 回に一回はビーム方向を π 反転させている．先に示した順序の例を見ると，2 と 5 を入れ替えると 4, 5, 6, 1, 2, 3, 4, 5, 6 という順序になる．偶数行において

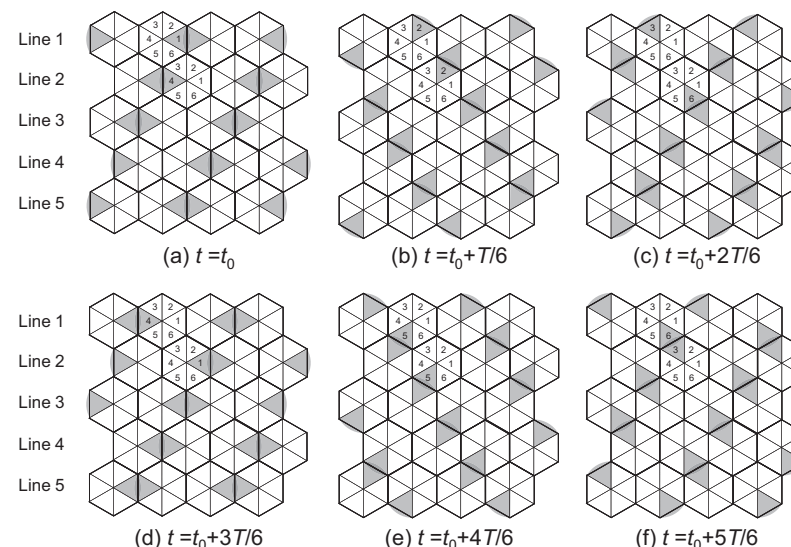


図 4 ビーム方向の切替 (6 方向の場合)

Fig. 4 Rotation of beam direction (6 direction case)

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．従って同一行では 2 列おきに同じビーム切り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り替えパターンをもつセルが出現する．

以上のような手順により，各セルの中継ノードは，ビーム切り替え周期 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り替えスケジュールを同期しておく必要がある．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．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ビームの指向性にあわせてアンテナの向きをそろえた状態で正しい位置に配置されているものと仮定する．またシンクノードも中

継ノードと同様の通信機を持つものとし、すべてのノードは最終的にシンクノードのスケジュールにあわせて同期をとるようにする。各ノードは同期が取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。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、切り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。未同期状態の中継のノードは、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を持つビーム切り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、切り替えスケジュールを表したデータ（以下、切り替えスケジュールデータ）を送信し続ける。切り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、切り替えスケジュールデータを獲得すると、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、ビームの切り替えを開始する。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切り替えスケジュールデータを送信し続ける。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り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、切り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り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り替えスケジュールを配布するのに要するのに必要な時間は、最長でビーム切り替え周期 T となる。従って、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。

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、起動後にビームを一方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り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。例えば、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、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り替え周期 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、切り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り替えを行う。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。従って、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り替えをやめ、受信した本来の周期 T の切り替えスケジュールに従って動作を始める。

切り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、 T 以内に同期済みの中継ノードはすべての隣接した中継ノードに切り替えスケジュールを通知することができる。従って、観測領域内のすべての中継ノードで切り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。

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。中継ノード同士を最大限離して通信する場合の距離を L とする。図2に従えば、DO型の場合 $L = 3R$ 、DD型（PSmart）の場合 $L = 4R$ となる。従って、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 $3/4$ 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 $9/16$ の中継ノードで済む。従って、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、機器コストを低減できる。また、DD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 $3/4$ となる。面状の配置では通信電力コストが $9/16$ となる。ただし、この議論では、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。

次に、中継ノードとセンシングノード間の通信が図2(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。

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。セルの一辺の長さを 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一辺の長さ 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

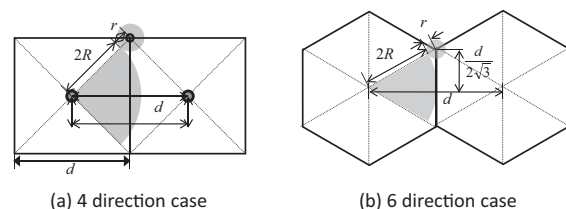


図 5 セルサイズ的设计
Fig. 5 Determining cell size

型の通信を保証するためには、両者間の距離を $2R + r$ 以下とする必要がある (図 5(a))。従って、三平方の定理より $d \leq \sqrt{2}(2R + r)$ となる。 $\sqrt{2}(2R + r) \geq 3R = L$ が満たされれば、中継ノード・センシングノード間の通信によるセルサイズ設計の制限はなくなり、中継ノード間での通信距離によってセルサイズが決まる。なお、坂本らの手法²⁾では、中継ノードとセンシングノード間の通信はセンシングノード同士の通信と同等であるとしているので、上記のような議論の必要はない。

次に 6 方向の指向性通信ができる場合について考える。中継ノード間の距離を d とすると、4 方向の場合と同様の計算により、 d に対する制約は、 $d \leq \sqrt{3}(2R + r)$ となる。ところが、 $\sqrt{3}(2R + r) \geq 3R = L$ は常に満たされるので、6 方向の場合にはセンシングノードのアンテナゲインに関係なく中継ノード間での最大通信距離のみによってセルサイズが決まる。

4.2 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、受信側に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り替えスケジュールによって、ビーム方向、並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、シンクを根としたツリーベースの経路をつくれればよいので、特殊なプロトコルものは必要ないが、中継時に目的とする経路に向かう隣接ノードとの接続可能タイミングまで待ち合わせるための処理が必要である。ただし、エンド・トゥ・エンド遅延を最適化する場合、工夫の余地がある。

5. ま と め

スマートアンテナによるビーム方向の切り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 を提案した。本手法は中継ノードのビーム方向を常に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、常に稼動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、並びに中継ノードの設置コストを低減できる。今後、PSmart とともに使用する MAC プロトコル、経路制御プロトコルを設計するほか、そのノード設置時の位置、方向誤差の影響について詳細を検討する予定である。

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 (ES-PAR) 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 Vidya, 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. The 8th annual international conference on Mobile Computing and Networking (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, タユフェール エディ, 大平考: 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. The 2001 ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2001), pp.95–105 (2001).