

空間多重効果を利用した 階層型センサネットワークの考察と実環境での評価

坂本 浩[†] 萬代 雅希^{††} 渡辺 尚^{†††}

本稿では、スマートアンテナと無指向性アンテナを併用した大規模センサネットワーク向けの階層型センサネットワークを提案する。提案する階層型センサネットワークは中継層とセンシング層との2つの層に分かれる。中継層はスマートアンテナを持つノードで構成し、クラスタヘッドとしての役割を持つ。スマートアンテナによる通信距離の拡張効果によってネットワークスケーラビリティを向上させる。センシング層は無指向性アンテナを持つノードで構成し、観測したデータを最寄りのクラスタヘッドまで送信する。1ホップ内にクラスタヘッドが存在しない場合は、センサノード間でマルチホップ通信をすることでクラスタヘッドまで送信する。クラスタヘッドを利用した階層化によって中継負荷を削減し、センサノードの省電力化を図る。本研究では、提案する階層型センサネットワークについて実装を行い評価する。実装において、スマートアンテナノードには UNAGI(Ubiquitous Network testbed with an Adaptively Gain-controlled antenna for Improvement of spatial and temporal efficiency)、無指向性ノードには Mica Mote を利用する。また、提案する階層型センサネットワークの有効性についてシミュレーション評価も行う。

The consideration and real environment evaluation of the hierarchical sensor networks using space multiplex effect

HIROSHI SAKAMOTO[†] MASAKI BANDAI^{††}
TAKASHI WATANABE^{†††}

In this paper, we investigate the use of smart antennas in WSNs. In addition, we propose the hierarchical sensor network (HSN) which uses smart antennas together with omni-directional antennas for large-scale sensor networks. The proposed HSN consists of two layers: relay layer and sensing layer. A node in relay layer equips a smart antenna and operates as a cluster head (CH). The smart antenna of CHs extends the transmission range to improve network scalability. Sensor nodes in sensing layer transmits its sensed data to the nearest CH, therefore it does not need to relay data from other SNs to reduce power consumption at SNs. We implement the proposed HSN with UNAGI (Ubiquitous Network testbed with an Adaptively Gain-controlled antenna for Improvement of spatial and temporal efficiency) and MICA Mote. We show the effectiveness of the proposed HSN via the experiment of using the implemented HSN and computer simulation.

1. はじめに

近年、無線センサネットワークが注目されている。無線センサネットワークは、センサノードを観測エリアに散布し、温度や湿度など様々な観測データをセンサノード間のマルチホップ通信を利用して基地局まで届けるネットワークである。一般的にセンサネットワークは広大なエリアに大量のセンサノードを散布するため、バッテリー枯渇したノードの交換を容易に行うことができない。そのため、センサノードの消費電力を抑え、ネットワークライフタイムを延長させることが重要な課題となる。また、センサネットワークでは非常に多くのノードを利用することから安価で大量生

産が可能な同一機能のノードの使用が一般的である。そのため安価で小型化が可能な無指向性アンテナの利用が前提となる。しかし、大規模ネットワークを構築する場合や遠隔地でデータの収集、複数地域のデータを一括して収集する場合には、観測地とデータ収集地点との距離が大きくなり、データを中継する場合に多くのノードが必要となる。中継ノード数が増加するとそれぞれのノードによる中継処理が必要となり、その分の電力や時間が必要となり、スループットの低下やネットワークライフタイムを短縮するといった問題を起こす。そのような問題を解決する方法として LEACH[8]などが提案されている。

一方、無線アドホックネットワークにおいてスマートアンテナの利用について研究が進められている。スマートアンテナはアンテナの指向性を電子的に制御することができるもので、指向性アンテナ同意である。そのためスマートアンテナを利用すると、通信距離拡張と空間利用効率の向上の2つの利点がある。通信距

[†] 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University
^{††} 静岡大学情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University
^{†††} 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

離拡張効果によって中継ホップ数を削減できることから中継負荷を削減でき、ネットワークライフタイムを向上できる。しかし、スマートアンテナは高価でありサイズが大きいことから無線センサネットワークのセンサノードとしては不向きである。しかし、比較的安価なスマートアンテナである ESPAR アンテナ[3]を利用して我々が開発した UNAGI(Ubiquitous Network testbed with an Adaptively Gain-controlled antenna for Improvement of spatial and temporal efficiency) [1]を利用することで、コスト的に軽減させることができる。大規模なセンサネットワークにおいて全てのセンサノードに利用するのはコストやサイズの問題から困難であると考えられるが、部分的に利用する場合に効果的であると考えられる。このようなスマートアンテナを利用した無線センサネットワークについては、[13]の論文で実環境でのスループット評価をしているが、まだ十分に議論されていない。

本稿では、大規模センサネットワークのための、無指向性アンテナとスマートアンテナを併用した階層型センサネットワークを提案する。提案する階層型センサネットワークはセンシング層と中継層の2つの層に分かれており、中継層はスマートアンテナを持つノード、センシング層は無指向性アンテナを持つノードで構成される。スマートアンテナを持つノードはクラスタヘッドとしての役割を持ち、スマートアンテナによる通信距離拡張効果によってネットワークスケールビリティを向上させる。センシング層のセンサノードは、観測したデータを最寄りのクラスタヘッドまで送信する。1ホップ内にクラスタヘッドが存在しない場合は、センサノード間でマルチホップ通信を行うことでクラスタヘッドまで送信する。この様にクラスタヘッドを利用した階層化によって、センサノード間の中継負荷を削減でき、センサノードを省電力化しネットワークライフタイムを延長することができる。本研究では、提案する階層型センサネットワークについて実装を行い評価する。実装において、スマートアンテナノードには UNAGI[1]、無指向性ノードには Mica Mote[2]を利用する。また、提案する階層型センサネットワークの有効性についてシミュレーション評価も行う。

2. スマートアンテナを利用したセンサネットワーク構成の分類と考察

この章では、スマートアンテナを利用したセンサネットワークの構成を6つに分類し、それぞれのメリットやデメリットについて考察する。そして6つの分類において、提案する階層型センサネットワークが消費電力において効果的であることを示す。

2.1 ネットワーク分類

無指向性アンテナとスマートアンテナを利用したネットワーク形態について考える。図1に示すように6つのネットワーク形態が挙げられる。フラット型とは全てのセンサノードが同じ働きをするものであり、階層型とはセンサノードをセンシング用ノードとデータ中継用ノード(クラスタヘッド)に分けて利用するものである。

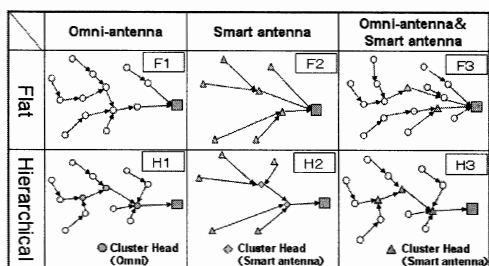


図1: ネットワーク区分

F1: 無指向性アンテナのみ[フラット型]

基本的なネットワーク形態であり、1種類のノードを用意するだけで形成できる。このネットワークでは安価で小型のセンサノードを利用できるというメリットがある。デメリットとして考えられるのが、無指向性アンテナを利用する点から通信距離が短くなり、データ中継のホップ数が増加する点である。また、基地局付近のセンサノードに中継が集中し早期枯渇を起こすボトルネック問題もある。代表的な MAC プロトコルには S-MAC[4]や T-MAC[5]、Directed Diffusion[6]などがある。

F2: スマートアンテナのみ[フラット型]

F1のネットワークにおいてアンテナをスマートアンテナに変更したネットワークである。このネットワークにはスマートアンテナが高価であることと、センサノードのサイズが大きくなるデメリットがある。メリットとしてはスマートアンテナの利用によってデータ中継のホップ数を削減する事ができ、ネットワーク全体の省電力化することができる。しかし、スマートアンテナを利用するだけでは F1 同様、基地局付近のセンサノードが早期枯渇するボトルネック問題がある。その問題点を改善する方法としてバッテリー残量によってルートを変更し負荷分散を行う Detour ルーティングも提案されている[7]。

F3：無指向性アンテナとスマートアンテナの併用 [フラット型]

無指向性アンテナとスマートアンテナを併用し、混在させたネットワークである。スマートアンテナは高価でサイズが大きいデメリットの点から多数利用が困難なため無指向性アンテナと比べ使用できる数が少なくなる。しかし、F1 に比べ指向性ノードが中継の際に利用されるルートではホップ数を削減することができるので、ネットワーク全体を省電力化できる。しかし、指向性ノードが中継に利用されないルートでは F1 と同様にホップ数が増加してしまう。

H1：無指向性アンテナのみ[階層型]

無指向性アンテナのみを利用してクラスタを形成するネットワークである。クラスタは近隣ノードでグループを作成し、その中の1つをクラスタヘッドと決定し、クラスタヘッドはグループ内のデータの集計と中継を行う。これによりクラスタヘッド以外のセンサノードを sleep にしておくことができ、省電力化できるメリットがある。しかし、クラスタヘッドの消費電力が大きくなる問題が生じる。そのため、クラスタヘッドを定期的に変更する LEACH[8]などが考案されている。デメリットとしては LEACH では適切なクラスタの割合を知っていることが前提となることが挙げられる。

H2：スマートアンテナのみ[階層型]

スマートアンテナのみでクラスタを形成するネットワークである。このネットワークでは F2 と同様に、通信距離の拡張のメリットが挙げられるが、アンテナが大きくなることと高価であることがデメリットとして挙げられる。

H3：無指向性アンテナとスマートアンテナの併用 [階層型]

クラスタヘッドにスマートアンテナを利用し、その他のノードに無指向性アンテナを利用したネットワークである。スマートアンテナのノードをクラスタヘッドとして利用することで、通信距離の拡張のメリットがある。そして、クラスタヘッドは近隣グループに1つあればよいので、少数でもその効果を得ることができる。この点で多数使用が困難なスマートアンテナの欠点を軽減できる。しかし、クラスタヘッドの消費電力が大きくなってしまふデメリットは存在する。しかし、スマートアンテナを利用することで特定方向へのみ中継するので、中継における消費電力を軽減できる。

2.2 ネットワーク構成の考察

F1 や H1 のような無指向性ノードのみを利用したネットワークの場合、安価で小型なセンサノードを使える利点があるが、通信距離が短く中継ホップ数が増加してしまう。また、F2 や H2 のようなスマートアンテナのノードのみを利用したネットワークの場合、通信距離を拡張する事が可能となるが、アンテナが高価でありセンサネットワークのような大量に利用することに向かない。そして、F3 のネットワークではスマートアンテナのノードを中継に利用するルートではホップ数の削減が可能だが、そうでないルートではホップ数が削減されないという問題がある。そのため、トポロジによってスマートアンテナの利点を生かすことが出来ない場合が存在してしまう。そこで本研究では、H3 の階層型ネットワークを提案する。このネットワークでは無指向性アンテナを持つノードの通信距離が短いデメリットを、スマートアンテナを持つノードによる指向性通信によって通信距離を拡張することで補うことができ、スマートアンテナが高価であるデメリットを、クラスタヘッドとして少数利用することで補える。つまり、無指向性アンテナとスマートアンテナそれぞれのデメリットを補い、メリットを活かすことが可能なネットワーク構成である。

3. 提案する階層型センサネットワーク

提案する階層型センサネットワークでは、センシング層と中継層に分けて階層化を行う。無指向性アンテナを持つノードがセンシング層に属し、スマートアンテナを持つノードが中継層に属する。図 2 にネットワーク構成を示す。

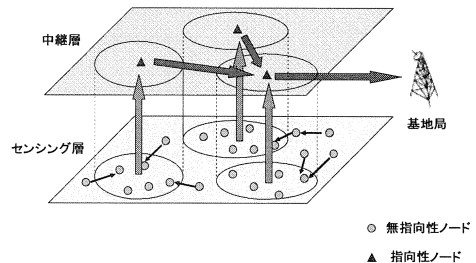


図 2：階層型センサネットワーク

3.1 センシング層

この層の役割は次に示すように2つある。

1. 環境情報のセンシング
 2. 最寄り中継層ノードへデータを送信
- 定期的に、(1)の環境情報のセンシングを行い、(2)

の最寄りの中継層ノードへのデータ送信を行う。アンテナが無指向性なため送受信ともに無指向性で行う。1ホップ内に中継層のノードがない場合は、センシング層のノード間で無指向性のマルチホップ通信を利用して近隣の中継層ノードまでデータの中継する。

3.2 中継層

この層の役割はデータ中継である。センシング層からのデータを受け取り、基地局まで中継層のノードを経由して中継する。中継の際には指向性を利用したマルチホップ通信を利用する。スマートアンテナではビームの形態を変形できるので、無指向性でデータの受信を行い、指向性を利用してデータの送信(中継)を行う。また、この層のノードは環境情報のセンシングは行わない。

4. 実装

本稿では、提案する階層型センサネットワークを実装するために、スマートアンテナを持つノードに UNAGI, 無指向性アンテナを持ちセンシングを行うノードに Mica mote を利用する。

4.1 Mica mote

本研究で無指向性ノードとして使用するテストベッド, Mica mote について示す。本研究では Mica mote の中でも ZigBee の相互通信が可能な MICAz を利用する。物理層と MAC 層に IEEE802.15.4 を利用している。無線送受信モジュールには ZigBee チップを利用し、2.4GHz 帯を利用した通信を行う。

4.2 UNAGI

本研究で指向性ノードとして使用するテストベッド, UNAGI について示す。物理層に IEEE802.15.4, アンテナに ESPAR アンテナを使用している。ESPAR アンテナとは、電子的に送受信ビームの指向性や電力を制御することが出来るアンテナである。アンテナの概観を図 3, ビームパターンを図 4 に示す。

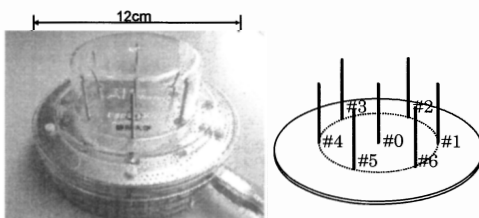


図 3: ESPAR アンテナ

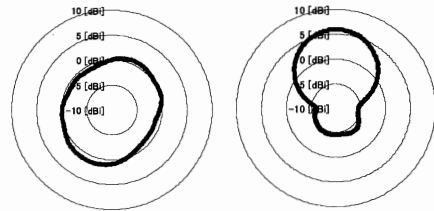


図 4: UNAGI のビームパターン
(左: 無指向性, 右: 指向性)

ESPAR アンテナは 1 本の通信アンテナ (図 3 の#0) と 6 本の制御アンテナ (図 3 の#1-6) から構成される。制御アンテナにかける電圧を操作する事により送受信ビームの指向性の制御を可能にする。無指向性は図 4 (左) で示すように 360° 全方向同じ利得となるが、図 4 (右) で示すように指向性ビームは目的の方向に丸くビームが延長される形となる。そして実際にはビームは特定方向だけでなく、微弱ではあるがその他の方向にも出力されている。これは実際の ESPAR アンテナを利用しているために起こるものである。UNAGI は、CPU に ATMefai28L, 無線モジュールには MICAz と同様の RF モジュールとして ZigBee チップを利用している。また、装置を拡張することによって GPS や GYRO による位置情報の取得も可能である。UNAGI の概観を図 5 に示す。

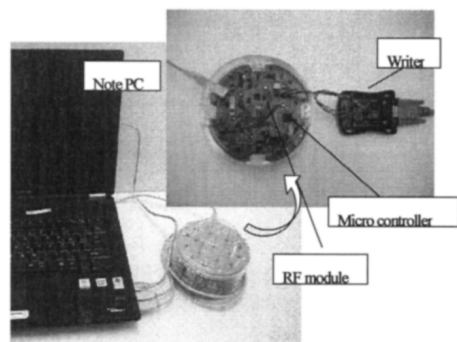


図 5: UNAGI の概観

図 5 内右上にあるライターを利用して ESPAR アンテナのマイコンにプログラムを書き込む。そしてマイコンによってパケットの発生等の制御を行う。また、PC と USB で接続することで、各種パラメータの設定や実験開始の指示、通信結果の取得を行う。

UNAGI を使用した関連研究として、[9]や[10]がある。[9]では、UNAGI を使用して指向性 MAC プロトコルである SWAMP についての実装評価を行っている。[10]では、指向性 MAC プロトコルの課題である

Deafness と指向性隠れ端末について考察し、UNAGI を利用して実環境での評価を行っている。

4.3 階層型センサネットワークの実装

本稿では Mica mote と UNAGI 間の通信を実装し、無指向性アンテナとスマートアンテナを併用した階層型センサネットワークを実装する。実装には階層型を簡略化した図 6 のトポロジを用いる。

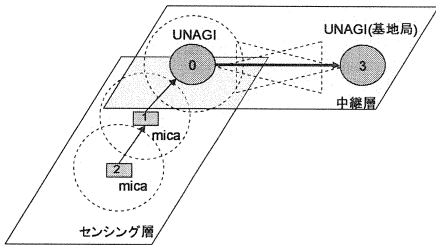


図 6：実装トポロジ

ノード内の数字がノード ID を示す。ノード 2 の Mica mote がセンシングを行い、図 6 に示すようにデータを基地局（ノード ID 3 の UNAGI）まで届ける。ノード間の通信にはそれぞれ DATA-ACK の 2way で行う。また、Mica mote は送受信ともに無指向性で行い、UNAGI は受信は無指向性、送信を指向性で行う。

実装の確認や、次章の性能評価にはパケットスニファ [11] を利用する。これは電波を観測することが可能な機器であり、この機器で実験のログ情報を取得する。

5. 性能評価

提案方式によるスループットと消費電力についての評価を行う。まず、スマートアンテナ利用によるホップ数削減の効果からなるスループット向上を示す。次に、階層化することによるセンシング層のノードの中継負荷削減効果による消費電力の削減について示す。

5.1 実装評価：スループット

ホップ数削減によるスループット向上について評価する。また、無指向性アンテナとスマートアンテナによる中継距離の違いについて評価を行うために、フラット型と階層型で距離を指標に含めたスループットの評価についても行う。本研究ではスループットを式 (1) と定義する。

$$\text{スループット} = \frac{\text{基地局で受信した総データ量}}{\text{総遅延時間}} \quad (1)$$

総遅延時間は、データ発生から基地局が受信して ACK を返信するまでの時間とする。

本稿では図 7 に示すトポロジにおいて階層型とフラット型の比較評価を行う。全てのノードを直線状に置き、隣り合うノード同士で通信を行う。また、基地局には UNAGI を利用する。ノード間の距離は十分に通信が可能な距離とし、Mica mote の送信距離を 5m、UNAGI の送信距離を 20m とする。また、実験の概観を図 8、図 9 に示す。撮影のため机の上に配置されているが、実際の実験は各ノードが見通し可能なグラウンドで行った。

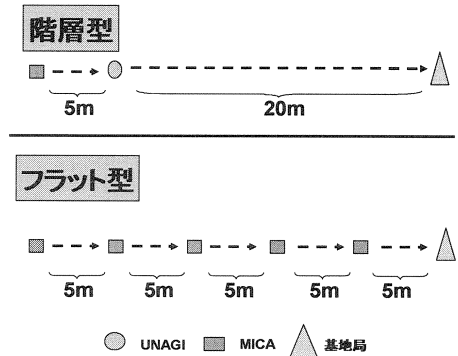


図 7：実機による評価に用いたトポロジ

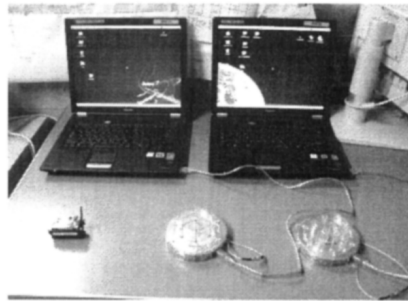


図 8：階層型トポロジ



図 9：フラット型トポロジ

階層型では、MICA mote がセンシングしたデータを UNAGI で中継する。中継する UNAGI は基地局の方向をあらかじめ知っているものとしてデータを指向性で送信する。また、ルーティングは固定とする。どちらの型も比較のため、基地局から一番遠い Mica mote だけがセンシングとデータ発生を行う。他のノードは待機状態とし、データを受信した場合に基地局の方向へ中継を行う。フラット型についてもルーティングは固定で行う。実験のパラメータを表 1 に示す。

表 1：実験パラメータ

	MICA mote	UNAGI
DATA size(MAC)	48 byte	—
伝送速度	250 kbps	
データ発生間隔	3 秒	
送信電力	-25 dbm	
物理層	IEEE 802.15.4 ZigBee	

100 パケット送信にかかる総データ量と総遅延時間を評価する。このため、総データ量は 4.8kbyte(48byte × 100 パケット)となる。

図 10 にスループット性能のグラフを示す。H3 では図 7 のトポロジにおいてデータが発生するノードは基地局から 25m の距離にあるノードとなる。そのため図 10 では H3 は 25m からプロットする。それに加え、距離を考慮した指標として[12]の論文において(2)の式で示す指標が考案されている。

$$\text{ネットワーク容量} = \text{スループット}(kbps) \times \text{距離}(m) \quad (2)$$

ネットワーク容量についての評価を図 11 に示す。

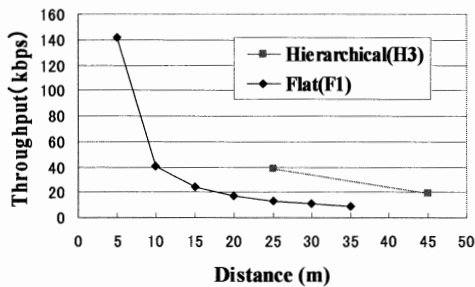


図 10：スループット

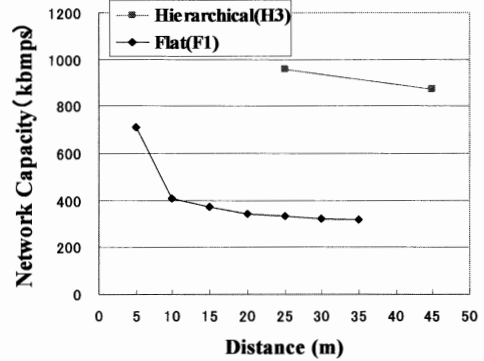


図 11：ネットワーク容量

階層型とフラット型において、同じ距離 (25m) でのスループットを比較した場合、フラット型に比べて階層型が約 3 倍のスループットを示している。ネットワーク容量で比較した場合にも同様に約 3 倍の性能向上が示される。これはフラット型では距離が延びるとホップ数が増加し、より多くの処理が必要となるのに対して、階層型では指向性通信によってホップ数が削減されることが要因だと考えられる。

この結果から、大規模ネットワークを構築する場合や遠隔地でデータの収集、複数地域のデータを一括して収集する場合には、スマートアンテナを利用したスループットを向上が示せる。

5.2 実装評価：消費電力

スマートアンテナの利用による中継負荷の削減からなる省電力化について評価する。センシング層のノードの消費電力評価の結果を表 2 に示す。消費電力の単位は mV で示す。

表 2：センシング層全体の消費電力

	Distance(m)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
F1	0.69	5.95	6.5	8.15	16.6	23.9	5.08	—	—
H3	—	—	—	—	5.95	—	—	—	6.5

実験トポロジはスループット評価と同じ図 7 のトポロジを利用し、データ発生条件も同様とする。データ消費電力は全てのセンシング層ノードの消費電力を測定し、合計する。F1 と H3 においてデータの発生が同じ距離となる 25m の場合で比較評価を行う。ここで UNAGI のアンテナ部 (PC を除いた部分) の消費電力

は、使用機器がほぼ同じ事から Mica mote 1 台分と同等と考えられる。つまり、H3 における中継層とセンシング層を合わせた 25m での消費電力は F1 における 10m と同じ値だと考えられる。そこで 25m における F1 と H3 の消費電力を比較すると H3 は F1 に比べ約 3 分の 1 の消費電力となっていることがわかる。また、H3 においてクラスタヘッドが電力供給できるものと考え、25m における消費電力は F1 の 5m と等しくなり、消費電力は 1/23 となる。

5.3 シミュレーション評価：枯渇率

F1, F3, H3 ネットワークのスケラビリティについてシミュレーション評価を行う。シミュレーショントポロジを図 12 に示す。

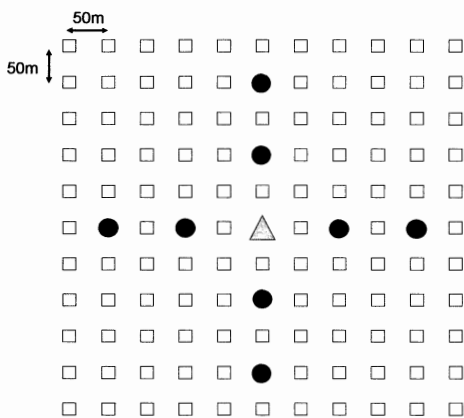


図 12：シミュレーショントポロジ

それぞれのノード間距離は 50m とし、無指向性アンテナの通信距離を 50m、スマートアンテナの通信距離を 100m とする。ノードは、送受信パケット量が予め設定した閾値を超えた場合に枯渇するものとし、枯渇したノードは通信を行わないものとする。図 12 において F1 の場合は全て無指向性ノードとし、F3 や H3 の場合、四角で示すノードは無指向性ノード、黒丸で示すノードはスマートアンテナノードとする。CBR トラフィックを仮定し、データ量は 1024Byte である。データ発生は、実際のセンサネットワークを想定し、それぞれのノードで 30 分に 1 回の間隔で発生する。この発生率では、120 ノード存在するためネットワーク全体で平均 15 秒に 1 回データ発生する。評価には 10 回の平均の値を利用する。ネットワーク内の全ノード中の枯渇したノードの割合をノード枯渇率と定義し、結果を図 13 に示す。

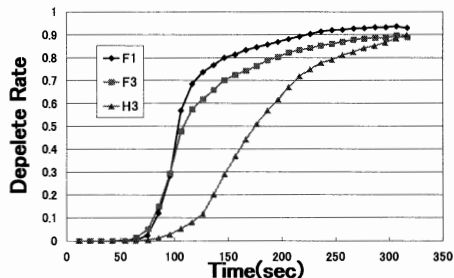


図 13：枯渇率

F3 や H3 は F1 に比べ枯渇率が低いことが分かる。これは、スマートアンテナを利用することで中継ホップ数が減少し、中継の負荷が削減されたことが要因と考えられる。この結果からスマートアンテナの有効性を示す事ができる。また、F3 に比べ H3 の方が枯渇率が低いことから、H3 の方がスマートアンテナノードを有効に利用しており、より多くのルートでクラスタヘッドのスマートアンテナによる指向性通信を利用できていることがわかる。

以上の結果から、スマートアンテナによるセンサネットワークのスケラビリティ向上を示す事ができた。また、スマートアンテナを利用するセンサネットワークを考えた場合、F1 から H3 の中では H3 の階層型センサネットワークが大規模センサネットワークに最も効果的だと言える。

6. まとめと今後の課題

本稿では、スマートアンテナを利用したネットワークについて考察し、スマートアンテナを利用した階層型センサネットワークを実装した。無指向性アンテナやスマートアンテナにはそれぞれの利点・欠点があり、それらを生かし補うことのできるネットワークがスマートアンテナをクラスタヘッドに利用する階層型センサネットワークであることを考察した。そこで、提案ネットワークを実際に Mica mote と UNAGI を使って実装し、スループットと消費電力について評価した。スマートアンテナの通信距離拡張の効果から、距離を考慮して評価を行うことで、フラット型ネットワークに比べ階層型はスループットが約 3 倍向上し、消費電力を 3 分の 1 に削減できることを示した。また、シミュレーションによって F1, F3, H3 のネットワークのノード枯渇率を評価することで、無指向性アンテナとスマートアンテナを併用した階層型センサネットワークである H3 が最も大規模センサネットワークに有効であることを示した。

本稿ではセンシングを行うセンサノードが1つとして評価を行っているので、複数のセンサノードが動作した場合の評価を行う必要がある。また、中継のUNAGIにもセンシング層からのデータが届く場合や、直線だけでなくより複雑なトポロジでの評価も行っていく必要がある。

謝辞

本研究は科研費基盤研究 A(17200003)の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] N. Kohmura, H. Mitsuhashi, M. Watanabe, M. Bandai, S. Obana, and T. Watanabe, "UNAGI: A Protocol Testbed with Practical Smart Antennas for Ad Hoc Networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 12, Issue 1, pp. 59-61, Jan. 2008.
- [2] Crossbow : <http://www.xbow.jp/motemica.html>
- [3] J. Cheng, Y. Kamiya and T. Ohira, "Adaptive beamforming of ESPAR antenna based on steepest gradient algorithm," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E84-B, No.7, pp.1790-1800, July 2001.
- [4] W.Ye, et al., "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE INFOCOM 2002*.
- [5] T. van Dam, K. Langendoen, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Nov. 2003.
- [6] C. Intanagonwivat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", *ACM Mobicom'00*, 2000.
- [7] 崎山 朝彦 萬代 雅希, 渡辺 尚, "指向性アンテナの通信距離延長効果を用いた省電力センサネットワーク", 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 (DICO2006) 論文集 DICO2006 論文集(II) pp.805-808
- [8] W.Heinzelma, A.Chandrakasan, and H.Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," *Proceedings of Hawaiian International Conference on Systems Science(HISS'00)*, 2000
- [9] 渡辺 正浩, 河村 直哉, 萬代 雅希, 小花 貞夫, 渡辺 尚, "スマートアンテナを用いた指向性MACの空間利用効率に関する実証的考察", 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2007) シンポジウム, pp. 639-648, 2007.07
- [10] 河村直哉, 高田昌忠, 萬代雅希, 渡辺尚, "実環境における指向性 MAC プロトコルの Deafness と隠れ端末問題について" 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2007) シンポジウム, pp. 649-656, 2007.7
- [11] Chipcon Application Note AN033 http://www.comptek.de/uploads/media/AN_033_C2420_MSP430_1_1.pdf
- [12] P. Gupta and P.R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE. Trans. Inform. Theory*, vol. 46, pp. 388-404, Mar. 2000.
- [13] 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" 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2008) シンポジウム, pp. 366-373, 2008.7