

## A-016

## 指向性アンテナを用いた無線ネットワークにおける効率的なブロードキャストに関する研究

高村 裕紀, 山田 敏規

埼玉大学大学院 理工学研究科 数理電子情報系部門

## 1 導入

ブロードキャストは無線ネットワークにおいて頻繁に用いられるオペレーションであり, 多くのアプリケーションにおいてデータを広める手段として利用されている. ブロードキャストでは, 情報の送信元であるソースノードから転送ノードと呼ばれる中間ノードを介して, 最終的にネットワークの全てのノードに情報が行き渡る.

無線ネットワークはしばしば Unit Disk Graph(UDG) でモデル化される. UDG とは, 2次元平面上に点を配置し, 距離が1以内である2点を辺で結ぶグラフである. ブロードキャストにおいて, ネットワークが満たすべき条件は (1) 全てのノードは転送ノードまたは転送ノードの隣接点である. (2) 転送ノード同士は連結である. という2点であり, 転送ノードの集合は連結支配集合(CDS)に一致する. CDSとは, グラフ  $G$  が与えられたときに, 任意の点  $v \in G$  は  $v \in S$  であるか, 少なくとも1つの  $v_s \in S$  に隣接しており,  $S$  によって誘導される部分グラフ中の任意の2点間には必ずパスが存在するような  $S \subseteq V(G)$  のことを指す. グラフ  $G$  が与えられたときに, 要素数が最小となる CDS  $S \subseteq V(G)$  を求めることを MCDS 問題と呼ぶ. MCDS 問題は, 入力を UDG に限定したときにも NP-困難となる [2]. 転送ノード集合の最小化を図ることはエネルギー効率の観点から効果的であるが, これは MCDS 問題に一致する.

Yang らは, 指向性アンテナを用いてノードが通信を行う方向をセクタと呼ばれる一定の範囲に制限することに焦点を当てた [3]. これにより, 全方位アンテナの利用による転送に比べてエネルギーの消費量は少なくなる. よって, ネットワーク上全体での転送ノードにおける転送に利用するセクタの総数を減らすことがエネルギーの消費が軽減に繋がると考えられる. そこで本研究では, 無線ネットワークにおける指向性アンテナを用いたブロードキャストについての問題を考え, 問題に対する近似アルゴリズム及び整数計画問題 (IP) としての定式化を提案する. 更に, 近似アルゴリズムが IP による最適解に近い解を求めることを計算機実験により実証する.

## 2 全方位アンテナと指向性アンテナ

全方位アンテナは文字通り自身を中心とし, ある一定距離の全方向に対して通信を行う. ここで互いに通信可能な距離にあるノード同士が直接通信可能となる.

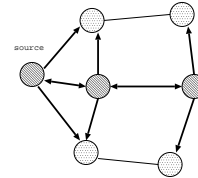


図 1: 全方位アンテナを用いた通信例

図 1 は全方位アンテナを用いたブロードキャストの例であり, ここで有向辺は転送経路を示す. 左端のソースノードから, 濃く塗られた転送ノードを介して全てのノードへと情報が転送される.

それに対し指向性アンテナは, 図 2 のように転送範囲を制限して転送を行うことができ, 一度の転送に使うエネルギーを全方位アンテナよりも抑えることができる. また, 既に転送済みのノード等といった転送を行う必要の無い方向への無駄な転送を省き, 図 3 のようにブロードキャストを実行できる.

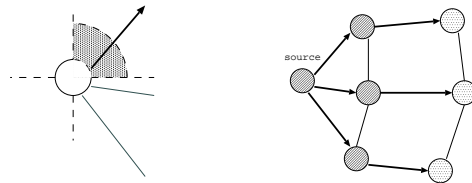


図 2: 指向性アンテナ 図 3: 指向性アンテナを用いた転送範囲の制限された通信例

## 3 問題の定式化

無線ネットワークにおける指向性アンテナを用いたブロードキャストについて, 問題を次のように定式化した.

ブロードキャスト問題

入力: 平面上のノードの集合  $V$ 送信元  $s \in V$ 各ノード間が通信可能となる距離  $d$ 一つのノードにおけるセクタ数  $K$ 質問:  $s$  から他のノード全てに通信が可能と

なるような送信回数が最小の通信を求めよ.

## 4 提案アルゴリズム

Rai らによる UDG 上での MCDS 問題に対する近似アルゴリズム [1] を用い、ブロードキャスト問題に対する近似アルゴリズムを次のように提案する。

1. 与えられたネットワークグラフに対し、近似アルゴリズムを用いて CDS を構築する。
2.  $s$  を始点にして幅優先探索を実行。構成された CDS に含まれる点にのみ展開を進めていき、CDS に含まれていない点については有向辺で結ぶだけで展開を進めない。既に有向辺で結ばれていた場合は有向辺の作成は行わない。以上のようにして  $s$  を根とした有向全域木を構築する。
3. 出次数 1 以上の各ノード (転送ノード) において、転送に利用するセクタの決定。各ノードにおいて採用されたセクタの総和が  $s$  からのブロードキャストに用いる通信経路となる。

## 5 整数計画による定式化

提案アルゴリズムと最適解の比較を行なうため、送信元ノード  $s$  から  $w \in V - \{s\}$  への流量 1 の  $s-w$  フローを与えることで本問題を整数計画問題 (IP) に定式化した。目的関数の変数  $x_{v,i}$  はノード  $v$  の  $i$  番目のセクタが通信に使用されるときに  $x_{v,i} = 1$  となるセクタ変数であり、辺  $e(u,v)$  の容量  $c(u,v)$  は辺  $e(u,v)$  が含まれるセクタ変数  $x_{u,i}$  に一致する。

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} && \sum_{v \in V} \sum_{i=1}^K x_{v,i} \\
 & \text{subject to} && \sum_{e \in E_{(v)}^+} f^{(w)}(e) - \sum_{e \in E_{(v)}^-} f^{(w)}(e) = 0 \quad (v \in V - \{s, w\}) \\
 & && \sum_{e \in E_{(s)}^+} f^{(w)}(s) - \sum_{e \in E_{(s)}^-} f^{(w)}(e) = 1 \\
 & && f^{(w)}(u,v) \leq c(u,v) \quad (u,v \in V) \\
 & && x_{v,i} \in \{0, 1\} \quad (v \in V, i = 1 \dots K)
 \end{aligned}$$

## 6 計算機実験

実験環境、実験条件、実験結果は以下の通りである。

実験環境

- OS:ubuntu 10.04
- CPU: Intel(R) Core(TM) i3 540 3.07GHz
- メモリ: 2.0GB
- ソルバ: GLPK 4.38

実験条件

- $100 \times 100$  の平面上に  $N$  個のノードを配置
- ソースノード  $s$  は一番最初に配置されたノード
- 通信可能距離  $d: 15$
- セクタ数  $K = 4(90^\circ)$
- 試行回数: 100 回

表 1: 実験結果: 最適解に対する利用セクタ数 (倍)

| $N$ | 最大値   | 最小値   | 平均値   |
|-----|-------|-------|-------|
| 25  | 1.235 | 1.000 | 1.044 |
| 35  | 1.174 | 1.000 | 1.051 |
| 45  | 1.214 | 1.000 | 1.059 |
| 55  | 1.294 | 1.000 | 1.095 |
| 65  | 1.286 | 1.000 | 1.117 |

表 1 から、近似アルゴリズムによる通信に用いるセクタ数は高々約 1.3 倍程度で、平均でも 1.1 倍程度である。よって、アルゴリズムの解と IP の解との間には大きな差は無い事を確認できた。また、IP は膨大な実行時間を要し、65 よりも大きい  $N$  を入力とした際の解を実験で求めることは出来なかった。それに対し近似アルゴリズムの解は入力  $N$  の値を大きくした際でも高速で出力することが出来た。今後の課題として、提案アルゴリズムの解析を行い理論的な評価をすることがあげられる。

## 参考文献

- [1] M Rai, S Verma, and S Tapaswi: A Power Aware Minimum Connected Dominating Set for Wireless Sensor Networks, Journal of Networks, Vol. 4, No. 6, pp. 511-519, August 2009.
- [2] Clark BN, Colobourn CJ, and Johnson DS: Unit disk graphs. Discrete Math 86, pp. 165-177, 1990.
- [3] S Yang, J Wu, and F Dai: Efficient Backbone Construction Methods in Manets Using Directional Antennas. Proc. IEEE Int'l Conf. Distributed Computing Systems (ICDCS), 2007.