

シャドウイング環境下アドホックルーティングに伴う エネルギー効率の特性評価

山崎悟史[†] 桑原悠太[†] 水野秀樹^{††} 大内浩司^{†††}

[†](独)沼津高専 制御情報工学科 〒410-8501 沼津市大岡 3600

^{††}東海大学工学部 医用生体工学科 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

^{†††}静岡大学工学部 電気電子工学科 〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: [†]s-yamazaki@numazu-ct.ac.jp

あらまし IoT(Internet of Things)やセンサーネットワークなどの分野で無線アドホック機能を持つデバイスが急速に普及している。時々刻々とトポロジーが変化するアドホックネットワークでは、エネルギー効率(bits/J)に優れたルーティング法が重要となる。これまでの研究で、パケロスに加えシャドウイングを考慮した現実的なチャンネル環境を想定し、代表的な2種のルーティング(AODVとOLSR)を取り上げ、エネルギー効率(bits/J)に関して、ルーティング性能を定量的に比較し、両者の優劣を示す境界領域が存在することを指摘した。本論文ではシャドウイング偏差、ノードの移動速度、パケット送信間隔、送信電力、ノード密度などの因子が、境界領域すなわちエネルギー効率に与える影響について明らかにする。

キーワード AODV, OLSR, シャドウイング環境, エネルギー効率, 影響因子

Performance Evaluation of Energy Efficiency with Ad-Hoc Routing under Shadowing Environment

Satoshi YAMAZAKI[†] Yuta KUWAHARA[†] Hideki MIZUNO^{††} Kouji OHUCHI^{†††}

[†]Dept. of Control and Computer Engineering, National Institute of Technology, Numazu College 3600 Ooka, Numazu, Shizuoka, Japan

^{††}Faculty of Engineering, Tokai University 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

^{†††}Faculty of Engineering, Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8011, Japan

E-mail: [†]s-yamazaki@numazu-ct.ac.jp

Abstract Recently, much attention has been paid to concept of IoT (Internet of Things) systems, which things can be connected to internet. In such a world, as network topology is changed timely, it is very important to select the path from a source node to a destination node, in a word, ad-hoc routing. In this paper, we evaluate impact of the transmitted power, area to move, movement velocity of a relay node and shadowing deviation to power consumption and throughput in a whole system for main two protocols, AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) and OLSR (Optimized Link State Routing) considering actual mobility environment using computer simulations. Moreover, we evaluate potential of these routing protocols numerically and can find area to apply by using energy efficiency defined newly. In this report, we evaluate an impact of shadowing deviation, velocity of nodes, packet transmission interval, transmission power and node density for energy efficiency.

Keywords AODV, OLSR, Shadowing Environment, Energy Efficiency, Impact Element

1. まえがき

IoT(Internet of Things)の進展に伴い、無線アドホック機能を持つデバイスが普及し始めている。特に、端末同士で自立分散的に中継ノードを介したマルチホップ通信による経路構築を行うモバイルアドホックネットワーク(Mobile Ad Hoc Network: MANET)では、端末の移動によりネットワークトポロジーが時々刻々と変化するため、環境や目的に応じた経路選択法(ルーティング)が重要となる。一般に、あらゆる環境で最適なルーティングは存在せず、利用環境に応じて選択する

ことが重要である[1]。文献[1]では2種の代表的なルーティングに関する特徴は示されているものの、具体的な指標に基づいた、定量的な性能評価は示されていない。さらに、従来研究の多くはパケロス変動のみでの環境における伝送特性(スループットやパケット損失率)などであり、極多数の端末からなるIoT社会で重要となる電力消費特性は明らかにされていない。文献[2]において、パケロスに加えシャドウイングを考慮したチャンネル環境において、代表的な2種のルーティングを対象に、エネルギー効率(bits/J)[3]に関するルーティ

ング性能を定量的に比較した。結果、両者の優劣を示す境界の存在を指摘し、その境界は各種パラメータに依存することが示唆された。ところで、次世代移動通信において高周波数帯・ミリ波の利用が検討されているが、ミリ波の伝搬特性としてシャドウイングの影響を受けやすいことから、まず現周波数帯でのシャドウイング環境下におけるアドホックネットワークのエネルギー効率に関する基礎的な知見を得ることは有意義であると思われる。

以降、本論文の構成は以下の通りである。2. にて従来の諸研究と課題を述べ、3. にて計算機シミュレーションによる評価方法を述べる。4. にてその結果と考察を示す。最後に、結論と今後の課題を述べる。

2. 従来の諸研究と本研究

アドホックルーティングは、通信要求が発生してからルート構築し通信を開始するリアクティブ(On demand)型と、定期的な制御メッセージ(経路情報)授受により通信開始前に予め経路表を作成しておくプロアクティブ(Table driven)型に大別される。前者はAODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)、後者はOLSR(Optimized Link State Routing)が代表的なルーティングとして挙げられる。リアクティブ型では非通信時に制御メッセージが流れない利点を有する一方、通信を行う際に遅延が生じる欠点を有す。一方、プロアクティブ型では通信を行う際に遅延が発生しない利点を有する一方、非通信時に制御メッセージが通信される欠点を有す。図1に示すように、一般的な適用領域として、通信頻度が高い時にプロアクティブ型が、端末移動速度が大きい時にリアクティブ型が有効とされている[1]。これまで主にアドホックネットワークに関してスループットやパケット損失率[4]、トラフィック特性[5],[6]などについて、パソロス環境における特性が明らかにされている。また、屋外にて大規模アドホックネットワークテストベッドを構築し、OLSRの通信性能と課題が示されている[7]。

一方、筆者らは、バッテリーで駆動する極多数のノードからなるIoT(Internet of things)社会の実現にはそれらの電力消費量が深刻になることに着目し、シャドウイング環境下でのルーティングに伴う電力消費とスループット、およびそれらを合わせたエネルギー効率(bits/J)に関して定量的な評価を進めてきた[2]。AODVとOLSRを例に、エネルギー効率(bits/J)に関する特性を図2に示す。これより、エネルギー効率に関して、両者の優劣を示す境界が存在することを指摘し、その境界線、すなわち各ルーティングがエネルギー効率の面で他方と比べて優位となる領域が各種パラメータ値に依存することが示唆された。

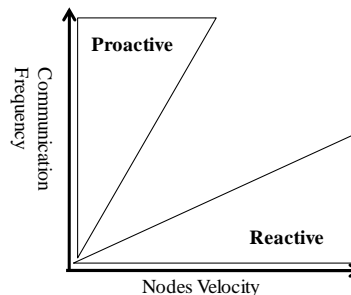


Figure 1 Performance Comparison of Ad-hoc Routings in [1].

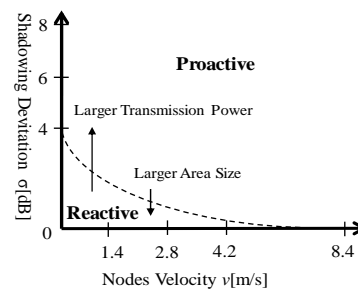


Figure 2 Performance Comparison of Ad-hoc Routings for Energy Efficiency in [2].

そこで本報告では、シャドウイング偏差、ノードの移動速度、パケット送信間隔、送信電力、ノード密度などの因子をとり、それらがエネルギー効率に与える影響について計算機シミュレーションにより明らかにする。

3. 計算機シミュレーション

3.1. 評価指標

AODVとOLSRを対象とし、電力消費、スループット、エネルギー効率について計算機シミュレーションにより評価する。本評価では、電力消費を全シミュレーション時間において全ノードが消費した電力量の合計[J]、スループットを、全シミュレーション時間に対して、単位時間あたり始点ノードSから終点ノードDへ到達したデータ量[bps]と定義する。さらに、式(1)に示すエネルギー効率 $EF[\text{Bits}/\text{J}]$ を導入し、両ルーティングの性能を定量的に評価する。

$$EF = \frac{B_{SD}[\text{Kbits}]}{P_{sum}[\text{J}]} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B_{SD} :シミュレーション時間に対して単位時間あたりノードSからノードDへ到達したデータ量[kbps]であり、 P_{sum} :シミュレーション時間において全ノードが消費した電力量の合計[J]である。表1にシミュレーション諸元を示す。また、ネットワークシミュレータとしてns3を用いた。

以下、シミュレーションを行う際の各種モデルについて述べる。

3.2. チャネルモデル

無線チャネル特性は、パスロス、シャドウイングとフェージングの変動の重量となる。任意の地点 (x, y) における受信電力 $P_r(x, y)$ は、送信電力 P_t を用いて式(2)で表される(複素振幅次元での表現)。

$$P_r(x, y) = \left(P_t \times A \times d(x, y)^{-\alpha} \times 10^{-\frac{\delta(x, y)}{10}} \right) \times |h(x, y)|^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P_t は送信電力、 A はアンテナ利得に依存する係数、 α はパスロス係数、 $\delta(x, y)$ はある地点 (x, y) における短区間平均受信電力の対数值、 $h(x, y)$ はチャネル利得である。本評価はシステムレベルでの性能評価を目的とし、パスロスとシャドウイング変動のみを考慮する[8]。すなわち、式(1)において $|h(x, y)|^2=1$ である。シャドウイングは移動局周囲の遮蔽の強さにより発生する強度変動である。そのメカニズムは、図3に示すように、伝送路の途中でランダムな回数 of 障害(減衰)が発生し、その都度ランダムに強度を弱めながら受信点に到達することにより発生する。そのような場合の受信信号強度は、各障害物を通過する際の減衰係数 A_i の積となる。これをdB表示すると、 $\log A_i$ の和となる。 A_i が相互に独立で通過する障害物の数がある程度大きい場合、その和は正規分布となる。このdB上での正規分布の標準偏差をシャドウイング偏差といい、移動通信環境では6~8[dB]程度であることが知られている[8]。

3.3. シミュレーションのモデルと方法

図4にシミュレーションモデルを示す。ユースケースとして製造現場におけるアドホックネットワークを考えており[9]、中規模工場を想定しシミュレーションエリアを縦100[m]、横150[m]とした。

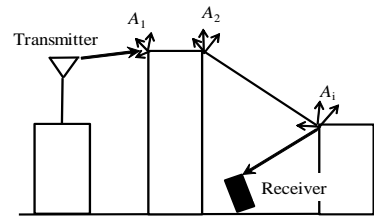


Figure 3 Shadowing Mechanism[8].

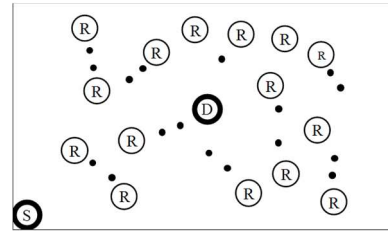


Figure 4 Simulation Model.

送信ノードSから送信されたパケットはルーティング規範に従い、中継ノードRを経由して、受信ノードDへ到達する。Sはエリア隅、Dはエリア中央、Rはエリア内にランダムに初期配置される。以下の2つのモデルで評価する。

- ・モデル1：全ノード静止 (S：エリア隅、D：エリア中央、R：ランダム配置)
- ・モデル2：D、Rのみ静止 (D：エリア中央、R：ランダム配置)、Sはランダムに移動

1回のシミュレーションにて、総送信パケット数 L_t が処理されたら終了とする。シミュレーション回数を100回とし、その平均を結果とした。また、モデル1におけるランダム配置は、シミュレーション回数毎に初期化される。さらに本報告では、ノードDにおける総受信パケット数が一定という規範の元、各モデルを評価する。よって、シミュレーション時間 T_{sim} は式(3)で決定される。

$$T_{sim} = \frac{L_s}{L_u} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 L_s :総受信パケット数、 L_u :単位時間あたりの送信パケット数でありパケット送信間隔 Δt を用いて $L_u=1/\Delta t$ と表せる。

3.4. エネルギー消費モデル

ノードの消費エネルギーは本来、非線形的に消費されるが、式(4)のように線形近似する。

$$E(t_{k+1}) = E(t_k) + V \times (t_{k+1} - t_k) \times I_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、時刻 t_{k+1} における消費エネルギー $E(t_{k+1})$ は、時刻 t_k での消費エネルギー $E(t_k)$ に供給電圧 V 、表1に示すイベント $i(i=1\sim5)$ ごとに定義された消費電流 I_i 、経過時間 $(t_{k+1}-t_k)$ を乗じた項を加えたものである。よって、 E_0 をバッテリーの初期エネルギー量[J]とすると、各ノードのエネルギー残量 E'

Table 1. Basic Simulation Parameters.

| | |
|---------------------------------------|---|
| Communication Standards | IEEE 802.11b |
| Simulation Time | 520[s] |
| Side length of the target area L | 1000[m] |
| Number of Trials | 10 |
| Number of nodes n_r | 16, 25, 49 |
| Velocity of relay node | 0[m/s](Model-1) 1.4, 4.2[m/s](Model-2) |
| Pass loss exponent | 3.5 |
| Shadowing Deviation σ | 0, 4, 6, 8[dB] |
| Bit Rate | 1.0[Mbps] |
| Application Protocol | UDP |
| Traffic Type | CBR |
| Generate Traffic | 160[Kbps] |
| Packet size | 1024[Bytes] |
| Number of Packet | 100000[_packets] |
| Routing protocol | AODV, OLSR |
| HelloMessage Interval(AODV) | 0[s](None) |
| Period of ActiveRoute(AODV) | 3[s] |
| HelloMessage Interval(OLSR) | 2[s] |
| TCMessage Interval(OLSR) | 5[s] |
| Willingness(OLSR) | 3(Fixed) |
| Initialization Energy of a node E_0 | 3600[J] |
| Transmission power | 5[w] |
| Receive Threshold | -93[dBm] |
| Supply Voltage V | 3.7[V] |
| Idle current I_1 | 0.426[mA] |
| CCA Busy State current I_2 | 0.426[mA] |
| Channel Switch current I_3 | 0.426[mA] |
| Tx current I_4 | 17.4[mA] |
| Rx current I_5 | 19.7[mA] |

(t_{k+1}) は、式(5)となる.

$$E'(t_{k+1}) = E_0 - \sum_{l=1}^k E(t_l) \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 I_i , V , E_0 の値は表1に示している.

4. 結果と考察

4.1. モデル 1

シャドウィング偏差 σ および送信電力に対するエネルギー効率の結果を図 5, 10 に示す. シミュレーション時間に対するスループット特性を図 6, 8 に、シミュレーション時間に対する電力消費特性を図 7, 9 に示す. また、 Δt が 0.05 と 2.0 の特性を示している.

(1) シャドウィング偏差 σ による影響

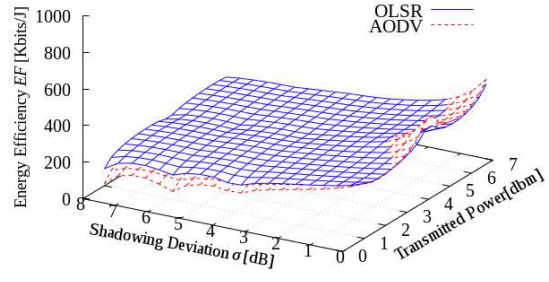
図 5(a)について考察する. σ の値に関わらず、AODV より OLSR の方がエネルギー効率の面で優位といえる. それは、スループットと電力消費の大小関係に依る. これは、以降においてもいえる. 図 6(a)(b)より、スループットにおいて OLSR は、 σ が 4 以上において同程度のスループットを確保しているのに対し、AODV では σ が 6 以上の環境ではほとんどスループットが得られていない. 一方、図 7(a)(b)より、電力消費の変化割合について、OLSR は σ に関わらず一定なのに対して、AODV は σ が大きい程小さい. これらは OLSR が定期的に制御パケットを交換するのに対して、AODV は通信要求発生時にフラッディングによる経路確立されるルーティング動作によるものである. よって、シャドウィング環境ではスループットでは OLSR が優位だが電力消費に関しては AODV が優位となり、エネルギー効率としては OLSR が優位となった. しかし、 σ が大きくなるにつれエネルギー効率としては低下している.

(2) 送信電力 P_t による影響

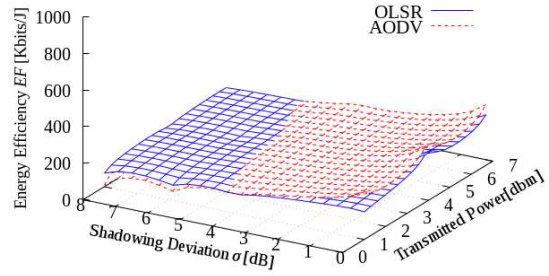
図 5(a)について考察する. P_t がおよそ 3dB 以上においては AODV が優位だが、それ以外においては OLSR が優位といえる. これは、 P_t が大きい場合は制御パケット送受信に要する電力が大きくなり、結果的に OLSR の消費電力が AODV のそれを上回る. 一方、 P_t が小さい場合は制御パケット送受信に要する電力も小さくなり、経路構築のためのオーバーヘッドの発生がない OLSR のスループットが AODV に比べて大きくなることで、結果的にエネルギー効率の面で OLSR が優位になったと考えられる.

(3) パケット送信間隔 Δt による影響

図 5(a)(b)より、パケット送信間隔を大きくすると σ が約 4 以下の領域において AODV が優位となる. この点について考察する. まず、図 6,8 より、 σ が約 4 以下では両ルーティングにおけるスループットに大きな差はうまれていない. また式(3)より、 Δt が大きくなると、 T_{sim} が長くなる. その場合、OLSR において送受信される制御パケット量が増大する. 実際、図 7 と 9

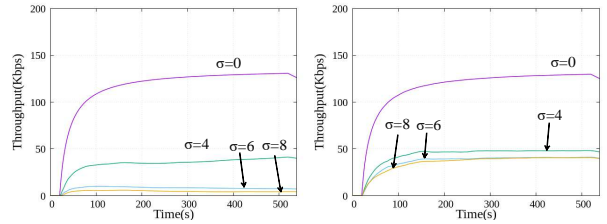


(a) $\Delta t = 0.05$ [s]



(b) $\Delta t = 0.2$ [s]

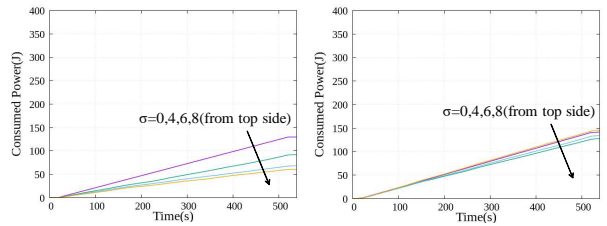
Figure 5 Energy Efficiency(Model-1,25nodes, $P_t=4$ [dbm])



(a) AODV

(b) OLSR

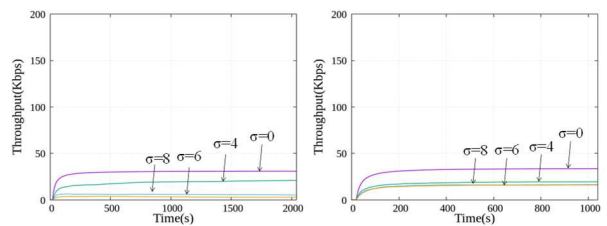
Figure 6 Throughput(Model-1,25nodes, $P_t=4$ [dbm], $\Delta t=0.05$ [s])



(a) AODV

(b) OLSR

Figure 7 Power Consumption (Model-1,25nodes, $P_t=4$ [dbm], $\Delta t=0.05$ [s])



(a) AODV

(b) OLSR

Figure 8 Throughput(Model-1,25nodes, $P_t=4$ [dbm], $\Delta t=0.2$ [s])

より、 σ が約 6 以下では Δt が 4 倍になると電力消費が約 2 倍になっている。一方、AODV においては Δt の変化による電力消費の大きな変化はみられない。よって、図 5(a) と比べて (b) において、AODV がエネルギー効率の面で優位になる領域が拡大したと考えられる。

(4) ノード密度による影響

図 5(a) と図 10 より、ノード密度が高くなると AODV が優位となる領域が拡大している。これについて考察する。まず、ノード数増加により中継ノード間の距離が短くなり、シャドウイング環境下において AODV でも十分なスループットが得られるようになったことが考えられる。これは P_t が小さければ σ が約 1 以下で、 P_t が大きければ σ が約 4 以上でいえる。次に、OLSR においてやりとりされる制御パケットの量がノード数上昇に伴い大きく増加したことが考えられる。

4.2. モデル 2

エネルギー効率を図 11, 12 に示す。誌面の都合上、電力消費およびスループットの結果について省略している。

(1) 送信電力 P_t による影響

図 11(a),(b) より、 P_t を大きくすると、AODV が優位となる領域が拡大している。それは、Model-1 では σ が小さい領域であったのに対し、送信ノードの移動を考えた Model-2 では σ が大きな領域となった。これは、 P_t を大きくしても OLSR のスループットはほとんど変化しなかったが AODV のそれは向上している点と、電力消費は両者ともほとんど変わらなかったことに起因する。

(2) 送信ノードの移動速度 v_s による影響

図 11(a), (b) より、 P_t , v_s の大きさに関わらず OLSR の方が優位といえる。これは、 v_s が変化してもある程度スループットを達成できる OLSR の動作が大きく効いている。

(2) パケット送信間隔 Δt による影響

図 11(a), 図 12 より、 Δt を大きくすると AODV が優位となる領域が拡大している。これはおおむね、モデル 1 での考察と同様である。

5. むすび

シャドウイング環境下において AODV と OLSR を取り上げ、各種因子がエネルギー効率に与える影響を、計算機シミュレーションにより評価した。得られた主な結論は以下に通りである。

1. エネルギー効率はスループットと電力消費の大小関係で決まる。
2. パケット送信間隔が大きくなると AODV が優位となる領域は拡大する。

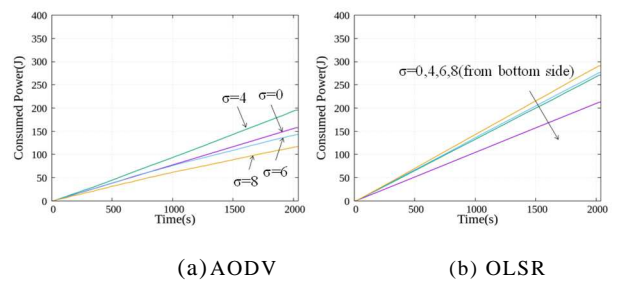


Figure 9 Power Consumption
(Model-1, 25nodes, $P_t=4$ [dbm], $\Delta t=0.2$ [s])

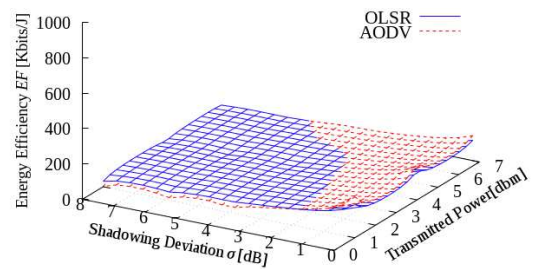
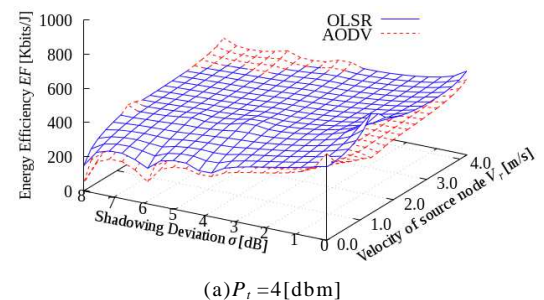
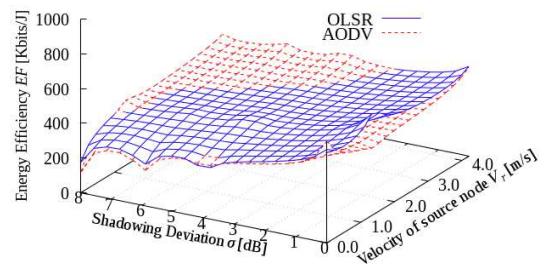


Figure 10 Energy Efficiency
(Model-1, 75nodes, $P_t=4$ [dbm], $\Delta t=0.05$ [s])



(a) $P_t=4$ [dbm]



(b) $P_t=7$ [dbm]

Figure 11 Energy Efficiency (Model-2, 25nodes, $\Delta t=0.05$ [s])

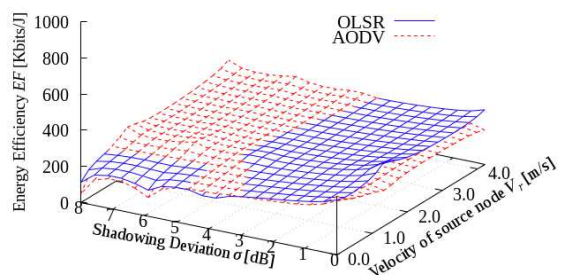


Figure 12 Energy Efficiency
(Model-2, 25nodes, $P_t=4$ [dbm], $\Delta t=0.2$ [s])

3. ノード移動速度を増加させるとシャドウイングが小さい領域では OLSR 優位（シャドウイング偏差が大きい領域では AODV 優位）であり，その領域は送信電力を増減させることで変化する．これは文献[1]の事実が，シャドウイング環境下においては必ずしもそうではないことを示唆している．

4. ノード密度を上昇させると AODV が優位となる領域が拡大する．

今後の課題は，中継ノードが移動するモデルを評価することや，ルーティングパラメータを変化させエネルギー効率の最適化などの検討が挙げられる．

文 献

- [1] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一, “アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク,” 信学論 B, Vol. J89-B, No6, pp811-823, 2006.
- [2] 相原直紀, 山崎悟史, 水野秀樹, 大内浩司, “AODV と OLSR のエネルギー効率に関する特性比較,” 信学技報, MoNA, pp.1-6, , Aug. 2016.
- [3] 安達文幸, “無線通信技術のたゆまぬ進展,” 信学技報, RCS2015-373, pp.231-236, Mar. 2016.
- [4] Md. Shohidul Islam, Md. Naim Hider, Md. Touhidul Haque, Leton miah, “An Extensive Comparison among DSDV, DSR and AODV Protocols in MANET”, International Journal of Computer Applications, Vol. 15, No. 2, February 2011.
- [5] Asma Tuteja , Rajneesh Gujral , Sunil Thalia , “Comparative Performance Analysis of DSDV, AODV and DSR Routing Protocols in MANET using NS2”, 2010 International Conference on Advances in Computer Engineering, pp. 331-333, 2010.
- [6] Mina Vajed Khiavi, Shahram Jamali, Sajjad Jahanbakhsh Gudakahriz, “Performance Comparison of AODV, DSDV, DSR and TORA Routing Protocols in MANETs”, International Research Journal of Applied and Basic Sciences. Vol. 3 (7), pp. 1429-1436, 2012.
- [7] 高橋義彦, 大和田泰伯, 須田利章, 間瀬憲一, “大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発”, 信学論 B Vol. J89-B No. 6 pp. 811-823.
- [8] 岩井誠人, 移動通信における電波伝搬—無線通信シミュレーションのための基礎知識, コロナ社, 2012.
- [9] S.Murata, S.Arita, K.Shimoyama, I.Houda, “Low-latency retransmission control in a wireless communication system for plant instrumentation and control Authors,” IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol.9, no 2, March 2014.