

特別研究報告

題目

無線センサネットワークにおける実測に基づいた
電力消費モデルの確立

指導教官

宮原 秀夫 教授

報告者

上田 健介

平成 16 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

無線センサネットワークにおける実測に基づいた電力消費モデルの確立

上田 健介

内容梗概

センサネットワークは、温度や光といった種々のセンサを備えた小型かつ省電力の無線端末により実現される無線アドホックネットワークである。各無線端末は小容量のバッテリーにより駆動されるため、消費電力を抑えてネットワークの稼働時間を延ばすことが重要であり、さまざまなレイヤにおいて省電力化に関する研究が行なわれている。従来の研究では、送信時の消費電力は通信距離 r の n 乗 ($n \in [2, 4]$) に比例するという単純なモデルに基づいて、解析的な性能評価が行なわれてきた。しかし、実際の消費電力は、ハードウェアの構成やデータリンク層プロトコルに依存し、従来の単純なモデルには一致しない。さらに、通信距離に関しても、無線伝播の不安定性によりきわめて複雑な挙動を示すことが明らかになっている。したがって、センサネットワークを設計するには、より実際のシステムに即した電力消費モデルを用いて、ノードの配置やパケットサイズに応じた送信電力を決定する必要がある。

そこで、本報告では、Crossbow Technology 社のセンサネットワーク評価キットである MOTE を用いてさまざまな環境での通信実験を行い、送信電力やパケットサイズを変化させた場合のパケット損失率を測定することで通信距離に関する特性を調べた。その結果、同じ送信電力でも通信距離は必ずしも一定にはならず、周囲の環境の影響を大きく受けることが分かった。また、本報告では、送受信の際の消費電力の変化を実測することで、MOTE における送信電力や通信距離に関して消費電力を定式化した電力消費モデルを導出した。さらに、その電力消費モデルと、実測した通信距離特性に基づいて、消費電力の少ないネットワーク構成や送信電力制御について検討を行った。その結果、MOTE では送信電力の設定値が小さい場合には送信時の消費電力がアイドル時の消費電力より少なくなるという特色が

あるため，送信電力はできる限り小さくした方がネットワーク全体の消費電力を抑えることができることが明らかとなった．

主な用語

センサネットワーク，TinyOS，MOTE，パケット損失率，電力消費モデル

目次

| | | |
|-------|-------------------------------|----|
| 1 | はじめに | 7 |
| 2 | 無線センサ端末 MOTE | 9 |
| 3 | MOTE を用いた無線センサノード/ネットワーク特性の評価 | 10 |
| 3.1 | パケット損失率の特性 | 10 |
| 3.1.1 | パケット損失率の測定方法 | 10 |
| 3.1.2 | 距離に対するパケット損失率の変動 | 11 |
| 3.1.3 | 時間に対するパケット損失率の変動 | 13 |
| 3.2 | 通信距離の特性 | 15 |
| 3.2.1 | 環境による通信距離の違い | 15 |
| 3.2.2 | パケットサイズによる通信距離の違い | 20 |
| 4 | MOTE における電力消費モデルの提案 | 21 |
| 4.1 | 消費電力の測定方法 | 21 |
| 4.2 | 電力消費モデルの作成 | 22 |
| 5 | 消費電力からみたネットワークの最適構成 | 30 |
| 6 | おわりに | 35 |
| | 謝辞 | 37 |
| | 参考文献 | 38 |

目 次

| | | |
|----|---|----|
| 1 | MOTE の無線基板 | 10 |
| 2 | 距離に対するパケット損失率の変動 (屋外での測定) | 12 |
| 3 | 距離に対するパケット損失率の変動 (屋内での測定) | 13 |
| 4 | 時間に対するパケット損失率の変動 (屋外での測定) | 14 |
| 5 | 時間に対するパケット損失率の変動 (屋内での測定) | 14 |
| 6 | 測定場所 A の写真と図面 | 15 |
| 7 | 測定場所 B の写真と図面 | 16 |
| 8 | 測定場所 C の写真と図面 | 16 |
| 9 | 測定場所 D の写真と図面 | 16 |
| 10 | 測定場所 E の写真と図面 | 16 |
| 11 | 測定場所 F の写真と図面 | 17 |
| 12 | 測定場所 G の写真と図面 | 17 |
| 13 | 場所による双方向通信可能な距離の違い | 19 |
| 14 | パケットサイズによる通信距離の違い | 20 |
| 15 | MOTE と抵抗にかかる電流と電圧 | 21 |
| 16 | 送信時の波形 (RF Power = 0 dBm, packet size = 127 byte) | 23 |
| 17 | 受信時の波形 (packet size = 127 byte) | 23 |
| 18 | overhear 時の波形 (packet size = 127 byte) | 24 |
| 19 | 送信時の波形 (RF Power = 0 dBm, packet size = 67 byte) | 25 |
| 20 | 送信時の波形 (RF Power = 10 dBm, packet size = 127 byte) | 25 |
| 21 | 送信時の波形 (RF Power = -20 dBm, packet size = 127 byte) | 26 |
| 22 | パケットサイズに対する通信時間 | 26 |
| 23 | 送信にかかる消費電力と通信距離との関係 | 28 |
| 24 | ネットワークの密度が 0.1 の場合の消費電力 | 30 |
| 25 | ネットワークの密度が 0.001 の場合の消費電力 | 31 |
| 26 | 端末を格子状に配列したトポロジ | 32 |

| | | |
|----|---|----|
| 27 | 端末間の距離を変えたときの消費電力の変化 ($size = 34$) | 33 |
| 28 | 端末間の距離を変えたときの消費電力の変化 ($size = 200$) | 33 |
| 29 | 通信による消費電力の差 | 35 |

表 目 次

| | | |
|---|-----------------------------------|----|
| 1 | MOTE の主な仕様 | 9 |
| 2 | 送信電力に対する通信距離のカタログ値 | 12 |
| 3 | 場所による通信距離の違い | 18 |
| 4 | 場所による通信距離の違い (逆方向通信の場合) | 18 |

1 はじめに

センサネットワークとは、温度や光といった周囲の情報を感知するセンサを備えた小型かつ省電力の無線端末を多数配置し、無線回線を通じてセンサが取得したデータの収集を行うシステムである。それぞれのセンサ端末は、他の端末のデータを中継する機能を有し、センシングされたデータはマルチホップで宛先ノードに送信される。センサネットワークでは、端末同士が協調動作し、自律的にネットワークを構成することが可能であるため、端末を分散配置するだけでネットワークを構成することが可能である。したがって、広範囲にわたる情報収集が容易に行なえるため、環境のモニタリングや災害地調査などといった様々な分野への応用が考えられている。

センサネットワークでは、各端末は小容量のバッテリーにより駆動される。そのため、消費電力を抑えてネットワークの稼働時間を延ばすことが重要であり、さまざまなレイヤにおいて省電力化に関する研究が行われている。従来の研究では、通信距離を r とした場合、送信時の消費電力は r^n ($n \in [2, 4]$) に比例するという単純なモデルに基づいて、解析的な性能評価が行なわれてきた。しかし、実際の消費電力は、ハードウェアの構成やデータリンク層プロトコルに依存し、従来の単純なモデルには一致しないことが明らかにされている。例えば、[1] では、センサネットワークにおける通信時の消費電力の測定がシミュレーションにより行われている。また、[2] では、アドホックネットワークにおいて、送信時のみだけではなく、受信時や宛先が自分でない電波を受信した時も含めた、通信の際の消費電力の測定が実機を用いて行われている。また、その測定した値をもとにして、通信時の消費電力と通信距離との関係の定式化などもすでに行われている [3]。しかし、この定式化においても、送信時に消費する電力はやはり従来どおり r^n に比例するとの考えを用いている。したがって、より実際のシステムに即したセンサネットワークのための電力消費モデルを作成する必要がある。

また、通信距離に関しても、実機を用いてのセンサネットワークでの挙動観測 [4] では、ある送信電力で期待される通信距離以上の距離にもパケットが届くことがあり、それによりネットワークの不均一性が生じることが示されている。このような不均一性が生じた場合には、ネットワーク中のある領域で集中して通信が行われるために消費電力にも偏りが生じ、

その領域の端末は他の部分に比べて早くバッテリーがなくなってしまうおそれがある。

そこで、本報告では、Crossbow Technology 社のセンサネットワーク評価キットである MOTE を用いてさまざまな環境での通信実験を行い、送信電力やパケットサイズを変化させた場合のパケット損失率を測定することで、送信電力やパケットサイズと通信距離の関係や、時間に対する通信特性の変化を明らかにする。また、本報告では、送受信の際の消費電力の変化を実測し、実測値から MOTE で通信を行った際の電力消費モデルを決定する。さらに、その電力消費モデルと、実測した通信距離特性に基づいて、消費電力の少ないネットワーク構成や送信電力制御について議論を行う。

本報告の構成は以下のとおりである。まず、第 2 章において、本報告で扱っている無線センサ端末 MOTE のシステムの構成と仕様について説明する。次に、第 3 章では、距離や時間に対するパケット損失率の変動や、環境を変えた際の MOTE の通信距離など、MOTE の通信性能について検証する。さらに、第 4 章では、通信を行う際に消費する電力を測定し、測定した実測値を用いて、MOTE で通信を行った際の電力消費モデルを作成し、第 5 章では、そのモデルと実測した通信距離特性から、消費電力の少ないネットワーク構成や電力制御について議論を行う。最後に、第 6 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 無線センサ端末 MOTE

MOTE は U. C. Berkeley 校で開発され，米国 Crossbow Technology Inc. で製品化された，各種センサを搭載できる無線センサネットワーク評価キットである．プロセッサと無線通信機能を搭載した無線基板，温度・光などのセンサを備えたセンササブ基板，無線基板と合体してパソコン基地局となる PC インターフェース基板から成る．無線基板とセンササブ基板を組み合わせて端末として使うことにより，センサから得た情報を無線により他の端末へ送信することができる．また，PC インターフェース基板は，無線基盤にプログラムをダウンロードするためのパラレルポートと，端末と PC 間の情報通信のためのシリアルポートを備えている．MOTE の主な仕様を表 1 に示し，無線基板を図 1 に示す．

また，MOTE は，U. C. Berkeley 校が開発したセンサネットワーク向けの OS である TinyOS [5] 上で動作する．TinyOS は C 言語に類似したオブジェクト指向言語 NesC で記述されており，イベントベースのタスクスケジュールにより，資源の乏しいセンサ端末上でのハードウェア制御を実現している．

表 1: MOTE の主な仕様

| | |
|-----------------|------------------------------|
| CPU Speed (MHz) | 7.4 MHz Atmel microprocessor |
| プログラムメモリ | 128 KB |
| データメモリ | 512 KB |
| AD Converter | 10 bit |
| 無線周波数 | 315 MHz |
| 外形寸法 | 55 × 32 × 25 (mm) |

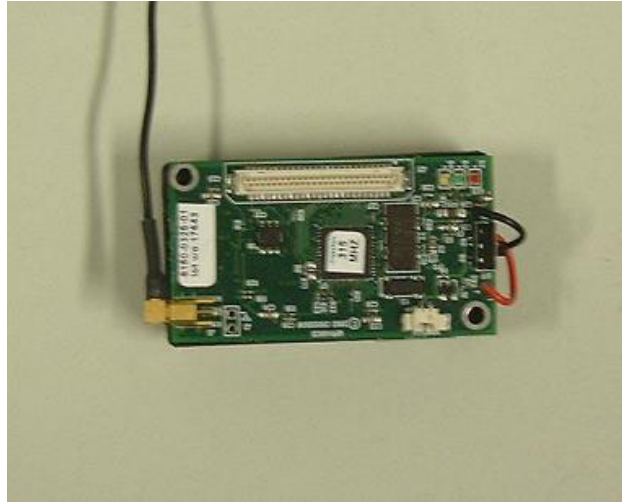


図 1: MOTE の無線基板

3 MOTE を用いた無線センサノード/ネットワーク特性の評価

センサネットワークでは、消費電力を抑えることが重要であるため、送信電力を必要以上に大きくすることは好ましくない。送信電力に対する通信距離は、カタログ [6] では表 2 のように示されているが、電波の届きやすさには方向性があり、同じ環境でも送信を行う方向によって距離に対するパケット損失率に違いが現れることが明らかになっている [4]。そこで、さまざまな環境において、通信特性がどのように変化するかを、実機を用いてパケット損失率を測定することで評価を行なう。

3.1 パケット損失率の特性

3.1.1 パケット損失率の測定方法

まず、端末間の距離を変化させた場合にパケット損失率がどのように影響を受けるかを測定し、それに基づいて通信距離を定義する。本報告では、パケット損失率測定のために基地局と送信端末を用いた。送信端末には 34 バイト長のパケットを一定間隔で送信するプログラムをインストールした。また、基地局として、無線端末とシリアル接続した計算機を用いた。基地局と接続した無線端末には受信したパケットをシリアルインターフェースを通じて

計算機に送るプログラムをインストールしており、計算機のモニタ上で今までに送られたパケットの総数を確認することができる。

パケット損失率は、1000 個のパケットの送信を送信端末から基地局へ行った際に基地局で受信したパケット数から計算した。測定方法としては、まず基地局と送信端末を高さ約 70 cm の机に置き、それらの間を 1 m とした状態で、パケット損失率を測定する。そこから、基地局と送信端末との距離を 1 m ずつ伸ばしていき、それぞれの距離におけるパケット損失率を測定した。これを、送信電力を -20 dBm、-17 dBm、-14 dBm、-11 dBm、-8 dBm の 5 段階それぞれに設定した場合について繰り返し行った。

3.1.2 距離に対するパケット損失率の変動

3.1.1 節の測定方法を用いて、距離に対するパケット損失率の変動を調べた。壁などの障害物に対する電波の反射による影響を考慮して、測定は屋内と屋外の 2 箇所で行った。屋外での測定結果を図 2 に、屋内での測定結果を図 3 に示す。屋外と屋内での結果を比較すると、屋外の方が屋内よりもパケット損失率の変動が少なくなっている。特に、屋内では、基地局と送信端末間の距離を短くしたにも関わらず、パケット損失率が高くなる、といった現象が頻繁にみられる。これは、屋内では周りを壁に囲まれているために、電波が反射して定在波が生じやすいためと考えられる。定在波とは、もともとの電波と壁などからの反射波が互いに干渉しあい、本来進行波である電波がそこに定在して振幅しているように観測できる現象のことである。定在波の影響が少ない屋内での測定結果から、パケット損失率はある距離までは 0.05 以下と少ない値を保っているが、ある距離から急激に増加することが分かった。よって、本報告では、パケット損失率が 0.05 以下であるような距離を通信距離と定義する。また、ほとんどの場合において、屋内での測定の方がパケット損失率が低くなっているが、場所による通信距離の違いについては、3.2.1 節で述べる。

表 2: 送信電力に対する通信距離のカタログ値

| Pout (dBm) | RANGE (m) |
|------------|-----------|
| -20 | 4.57 |
| -14 | 9.14 |
| -8 | 18.29 |
| -2 | 38.1 |
| 4 | 76.2 |
| 10 | 152.4 |

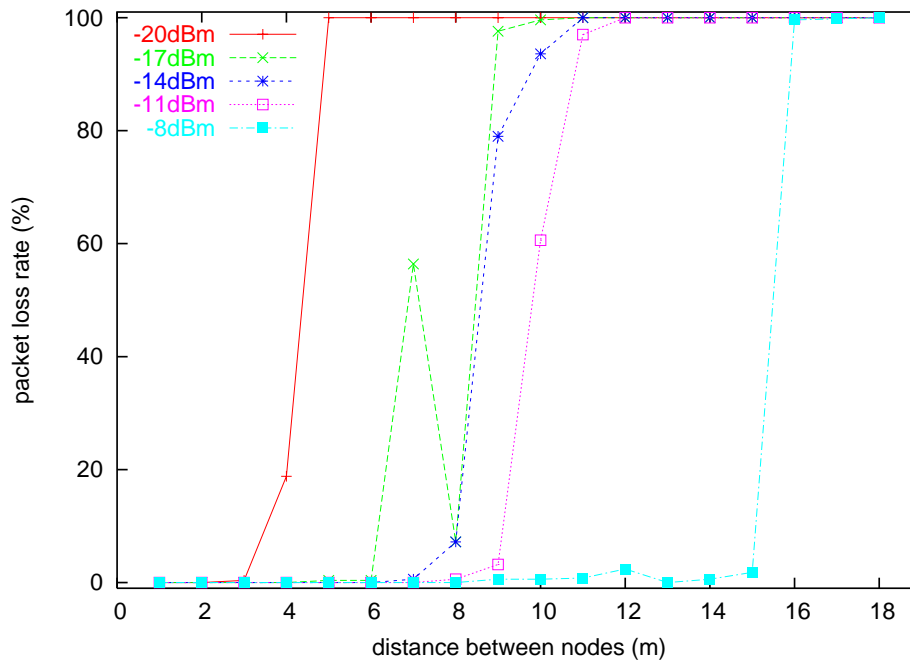


図 2: 距離に対するパケット損失率の変動 (屋外での測定)

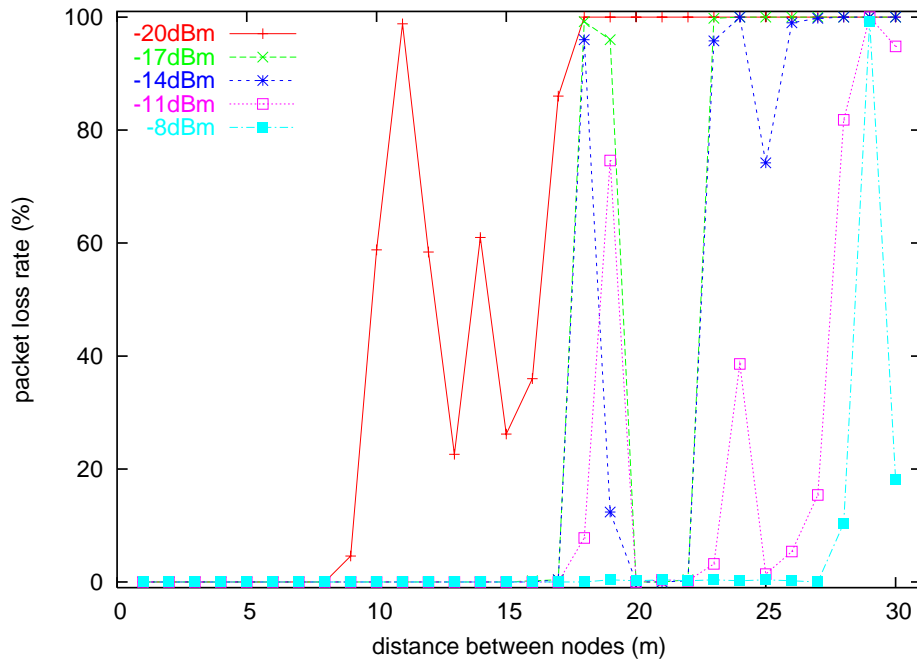


図 3: 距離に対するパケット損失率の変動 (屋内での測定)

3.1.3 時間に対するパケット損失率の変動

ある時間帯においてはパケット損失率が低くても、ある程度時間が経ったときに損失率が高くなっているようでは、安定して通信が可能な状態であるとはいえない。そこで、時間の経過に伴い、どの程度パケット損失率が変動するかについても測定を行った。測定方法は、3.1.1 節での測定と同じく、距離を変えながら送信端末から基地局へとパケットを送信し、パケット損失率の変化を調べた。ただし、送信端末には 20 秒間に 100 個のパケットを送信するようなプログラムをインストールし、基地局の計算機では、受信したパケット数を 20 秒ごとに受信したパケット数を自動的に記録するようにしている。測定場所は先ほどの測定と同じ場所で行い、送信端末や基地局の周囲に人などの動く障害物のない状況で 200 秒間行った。20 秒を一区切りとして計算したパケット損失率が 200 秒間の測定でどれだけ変動したかについて、屋外、屋内それぞれについてまとめたものが図 4、5 である。グラフの誤差棒は、時間の経過により観測されたパケット損失率の変動の幅を表している。

グラフから分かるように、通信距離を越えた場合にはパケット損失率の時間に対する変動

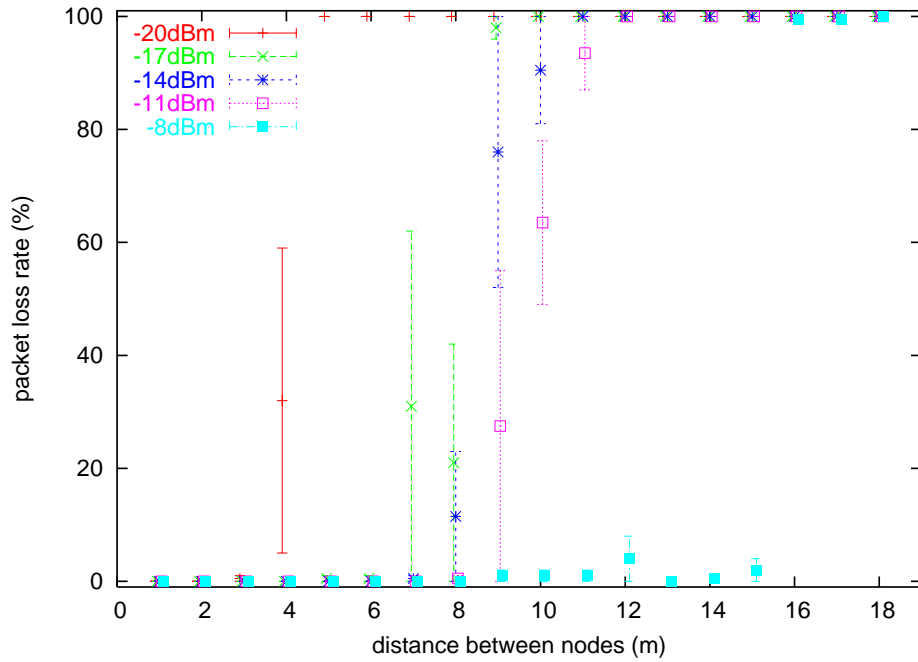


図 4: 時間に対するパケット損失率の変動 (屋外での測定)

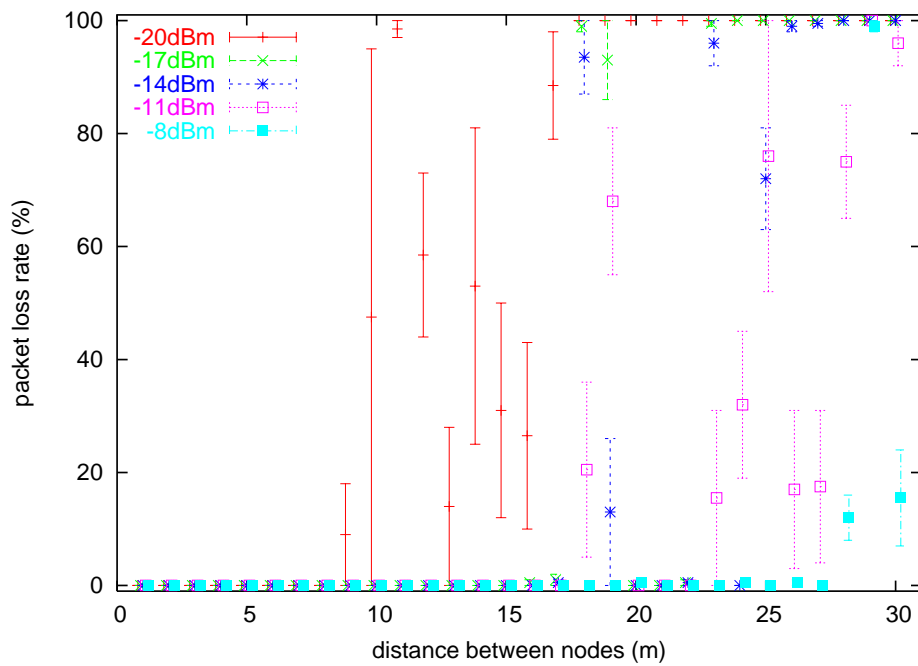


図 5: 時間に対するパケット損失率の変動 (屋内での測定)

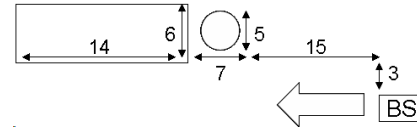


図 6: 測定場所 A の写真と図面

の幅が非常に広がっている。送信端末と基地局の位置を変えず、またそれぞれの端末の周りに動く物体なども無いにも関わらず、時刻によってパケット損失率が0%から50%以上まで変動する現象が観測された。周囲に人などの動く物体がある場合には、これらの変動はより大きくなると考えられ、そういう状況下にセンサを配置する場合には、このような時間に対する変動も考慮に入れてネットワークを構成することが重要であると考えられる。

3.2 通信距離の特性

3.2.1 環境による通信距離の違い

3.2.1 節の測定では、異なる2ヶ所で測定したパケット損失率が大きく異なった。そこで、複数の場所で通信距離の測定を行うことにより、環境の違いが通信距離に与える影響について調べた。また、非対称な通信路の存在を調べるために、通信の方向を変えた場合の測定を行なった。

測定は建物屋上で2箇所(場所 A, B)、建物内廊下で2箇所(場所 C, D)、屋外で3箇所(場所 E, F, G)の計7箇所で行った。図6~12にそれぞれの場所の写真と、壁などの障害物との位置関係を示した図面をのせている。図6~12中の図面中のBSと書いている位置に基地局を固定し、矢印の方向へ送信端末を遠ざけながら測定を行った。図面中の数字の単位はmである。

測定方法としては、3.1.1 節と同様の方法で、基地局と送信端末との間の距離を1mずつ伸ばしながらパケット損失率の測定を行い、その値から5段階の送信電力に対する通信距離

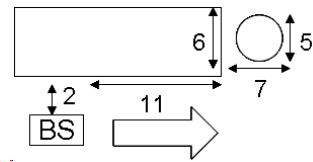


図 7: 測定場所 B の写真と図面

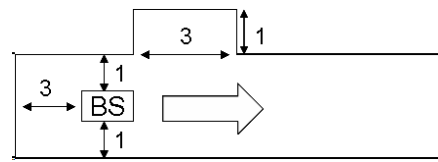


図 8: 測定場所 C の写真と図面

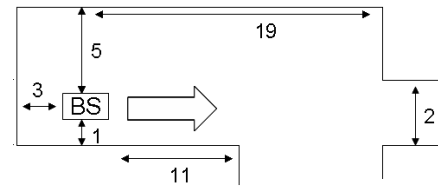


図 9: 測定場所 D の写真と図面

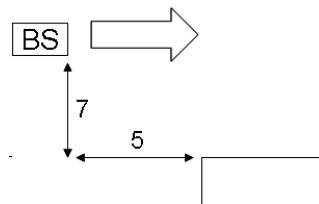


図 10: 測定場所 E の写真と図面

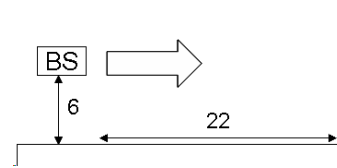


図 11: 測定場所 F の写真と図面

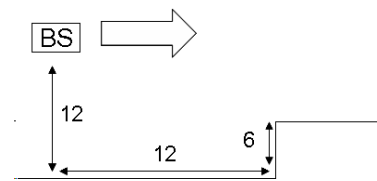


図 12: 測定場所 G の写真と図面

をそれぞれの場所ごとに求めた。また、基地局と送信端末の位置を逆にして、逆方向の通信を行った際の通信距離についても調べた。それぞれの場所での通信距離を表 3、逆方向に送信を行った場合の通信距離を表 4 に示す。表 3 と表 4 を見比べると、全ての場所において、逆方向の通信を行った際に通信距離が異なる場合があるという現象がみられた。この現象は、屋内と屋外で通信距離が違うように、送信端末と基地局の周囲の環境により電波の反射状況が異なるために、パケット損失率はその影響を受けているものと考えられる。今回は送信端末と基地局との周囲の環境はそれほど変わらない状況で測定したにも関わらず、このような通信距離の違いがあらわれた。そして、このような違いが生じるということは、MOTE を使ってネットワークを構成したときに、送信側と受信側の端末の周りの環境がほぼ変わらないとしても、一方からの通信は可能でも逆方向からの通信が不可能な非対称なリンクが存在する可能性があることを意味する。

非対称なリンクを生じないような距離をその場所における通信距離と考えると、それぞれの場所における通信距離は、ある方向からの通信距離と、逆方向からの通信距離で、値の小

表 3: 場所による通信距離の違い

| | A | B | C | D | E | F | G |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| -20dBm | 4 | 5 | 5 | 10 | 3 | 3 | 3 |
| -17dBm | 6 | 10 | 12 | 16 | 5 | 9 | 8 |
| -14dBm | 8 | 11 | 16 | 16 | 7 | 11 | 8 |
| -11dBm | 9 | 11 | 17 | 22 | 10 | 11 | 14 |
| -8dBm | 14 | 15 | 19 | 23 | 12 | 15 | 14 |

表 4: 場所による通信距離の違い (逆方向通信の場合)

| | A | B | C | D | E | F | G |
|--------|---|----|----|----|----|----|----|
| -20dBm | 3 | 5 | 8 | 14 | 3 | 3 | 3 |
| -17dBm | 4 | 9 | 16 | 15 | 5 | 10 | 8 |
| -14dBm | 6 | 11 | 18 | 16 | 6 | 13 | 11 |
| -11dBm | 7 | 12 | 20 | 21 | 10 | 17 | 11 |
| -8dBm | 9 | 13 | 20 | 22 | 12 | 18 | 13 |

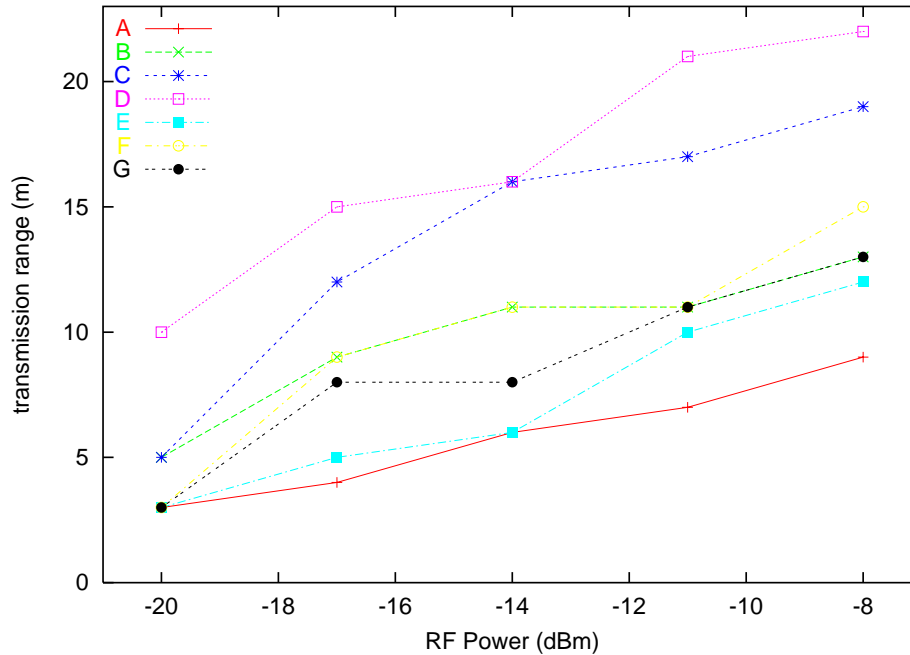


図 13: 場所による双方向通信可能な距離の違い

さい方となる。この考えに基づき、それぞれの場所での送信電力に対する通信距離をグラフにまとめたものが図 13 である。

このグラフから、同じ送信電力でも場所により通信距離が大きく変わることが分かった。特に屋内(場所 C, D)は屋外に比べて通信距離が非常に大きい。さらに、屋外でも場所 B や F のように建物が近いような場所では、やはり他の場所に比べて通信距離が長くなっている。以上の結果から、壁などの電波が反射するような障害物が近くにあると、端末間の距離が遠くても損失率が高くなりにくい傾向があるといえる。非対称なリンクは、送信側と受信側の端末の周囲の環境がほぼ同じ場合でもそれほど変わらないことは前述したが、もし、どちらかの端末の近くに壁のように障害物がある場合には、環境による通信距離の違いにより、非対称なリンクが生じる可能性はさらに高くなると考えられる。

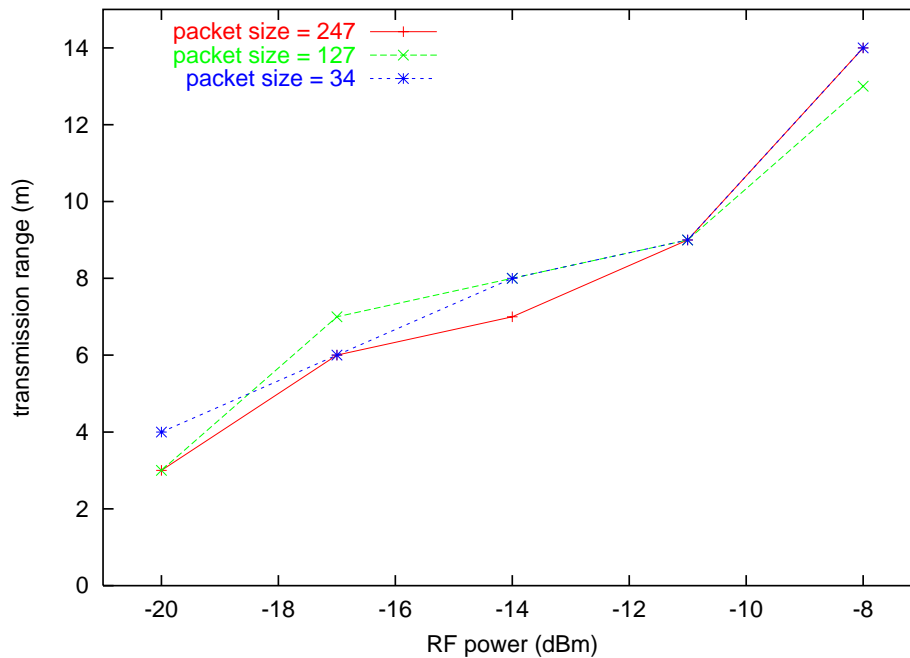


図 14: パケットサイズによる通信距離の違い

3.2.2 パケットサイズによる通信距離の違い

送信するパケットの長さの違いによって、通信距離が変化するかについても測定を行った。本報告で使用しているパケットは、パケットの先頭に宛先アドレス (2 バイト)、メッセージの種類を表す ID、グループを表す ID、メッセージ長 (いずれも 1 バイト) と、パケットの末尾に CRC (2 バイト) の、計 7 バイトが自動的に付加されるが、その間にいれるデータの長さは自由に決めることが出来る。そこで、そのデータの長さを変えて、パケットサイズを 34 バイトにした場合、127 バイトにした場合、247 バイトにした場合について、先ほどと同じ測定方法を用いて、通信距離を場所 A で測定した。測定した送信電力に対する通信距離をグラフにまとめたものを図 14 に示す。

MOTE では、パケットロスなどが生じた場合には、誤り訂正などは行わずパケットを棄却する。そのため、パケットサイズが長くなった場合には、パケットロスが生じやすくなるために、通信距離が短くなると思われた。しかし、結果は図 14 のように、パケットサイズによる通信距離の違いはほとんどみられなかった。

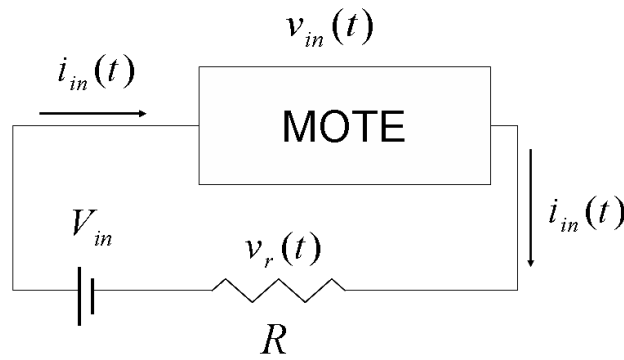


図 15: MOTE と抵抗にかかる電流と電圧

4 MOTE における電力消費モデルの提案

4.1 消費電力の測定方法

通信においては、送信時はもちろん、受信時や、宛先が自分でない電波を感知 (オーバーヒア) するときにも電力を消費する。また、パケットサイズを変更した場合にも、通信の時間が長くなり消費電力が大きくなると考えられる。そこで本報告では、これらの消費電力を実機を用いて測定し、その実測値を用いて、MOTE で通信を行った際の電力消費モデルを決定する。

本報告での電力の測定方法は、[2] での測定方法に準拠している。回路の消費電力は、回路への入力電圧と回路に流れる電流から求めることが出来る。そこで、小さな抵抗を MOTE のバッテリーに直列につなぎ、そこにかかる電圧を求めることにより、回路に流れる電流の大きさを求める。回路につなぐ抵抗は抵抗値が 4.4Ω のものを用いた。これは、電圧の変化を読み取ることができる抵抗値のうちで最も小さいものである。電圧の変化を読み取るための装置として、FLUKE 社の周波数帯域 100 MHz のデジタルオシロスコープを用いた。

消費電力を計算するための方法を以下に説明する。回路への入力電流 $i_{in}(t)$ は、バッテリーに直列につないだ抵抗 (抵抗値 R とする) にかかる電圧 $v_r(t)$ を測ることにより決定することが出来る。回路への入力電圧 $v_{in}(t)$ は $v_r(t)$ の大きさによりいくらか変動するが、抵抗値が小さいので $v_r(t)$ は $v_{in}(t)$ に比べて非常に小さく、結果 $v_{in}(t)$ は、ほぼ定数 (V_{in}) とする

ことができる．回路に流れる電流と入力電圧の積により瞬間の消費電力は求められるので，瞬間の消費電力 $P(t)$ は次のように表される．

$$P(t) = V_{in} \frac{v_r(t)}{R} \quad (1)$$

ここで，通信により電力が消費されていた時間を t_0 から t_1 までとし，その間の $v_r(t)$ の平均値を \bar{v}_r とする．MOTE では，通信の際に，宛先の端末に通信を行おうとしていることを伝える RTS や，送信端末に受信したことを伝える ACK などが送られないので，通信の際の総消費電力は単純に瞬間の消費電力の平均値と通信時間の積で求められる．よって，通信時に消費される電力 $E_{t_0 \dots t_1}$ は次の式で表される．

$$E_{t_0 \dots t_1} = \frac{V_{in}}{R} \bar{v}_r (t_1 - t_0) \quad (2)$$

同様に，アイドル時の瞬間の消費電力 P_{idle} も，アイドル時に抵抗にかかる電圧の平均値 v_{idle} を用いて表せる．

$$P_{idle} = V_{in} \frac{v_{idle}(t)}{R} \quad (3)$$

通信により消費する電力 E は，通信時に消費する電力 $E_{t_0 \dots t_1}$ から，通信を行わずにアイドル状態のままであったなら消費したであろう電力 $P_{idle}(t_1 - t_0)$ を引くことにより求められるので，次のように表せる．

$$E = \left(\frac{V_{in}}{R} \bar{v}_r - P_{idle} \right) (t_1 - t_0) \quad (4)$$

4.2 電力消費モデルの作成

デジタルオシロスコープを用いて測定した，送信時，受信時，オーバーヒア時の，バッテリーに直列につないだ抵抗にかかる電圧の波形を，図 16，17，18 に示す．それぞれの波形は，送信電力の設定値が 10 dBm，パケットサイズが 127 バイトのときに通信を行った際の波形を測定したものである．いずれの波形も，横軸は 50 ms/div，縦軸は 20 mV/div である．それぞれ電圧が大きくなっているところで，通信により電力が消費されていると考えられる．送信電力の設定値や通信に用いるパケットの長さを変更すると，図 19 や，図 20 のように，送信の際の電圧や，通信にかかる時間も変化する．ただし，送信電力の設定値を変更して

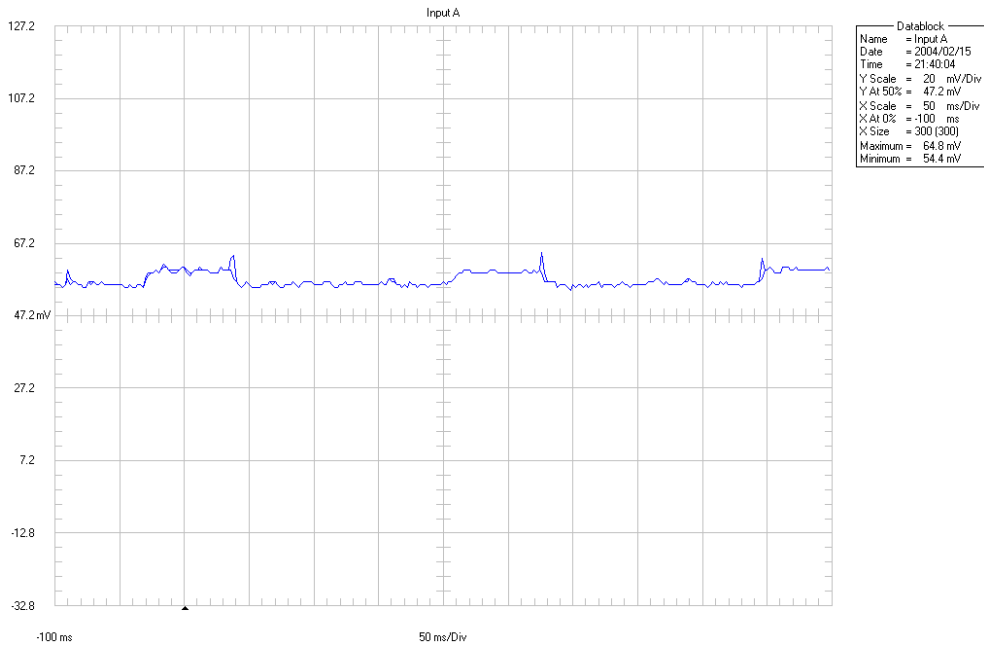


図 16: 送信時の波形 (RF Power = 0 dBm, packet size = 127 byte)

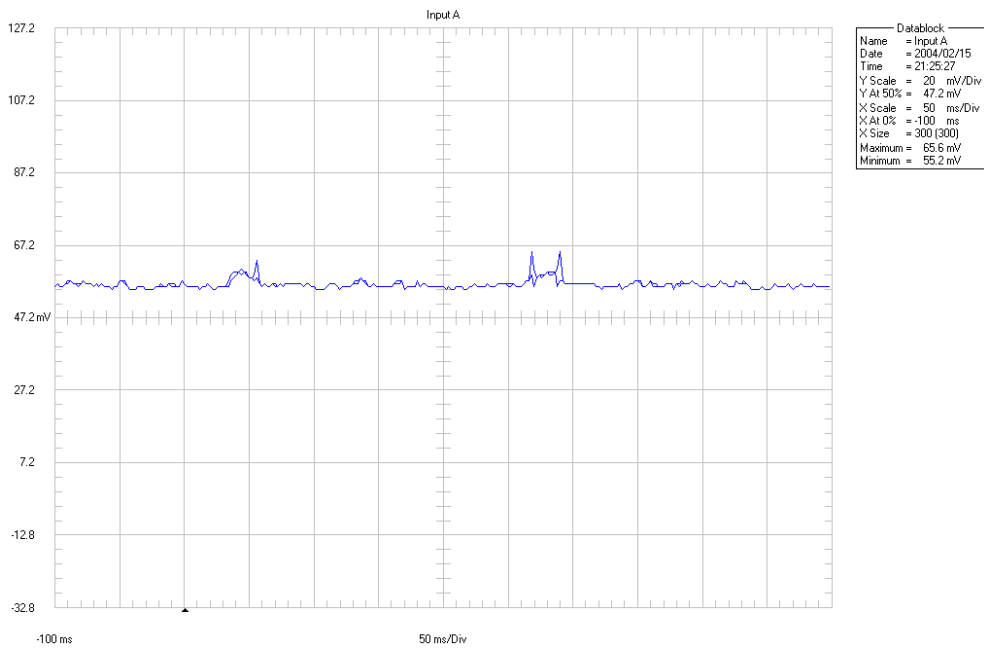


図 17: 受信時の波形 (packet size = 127 byte)

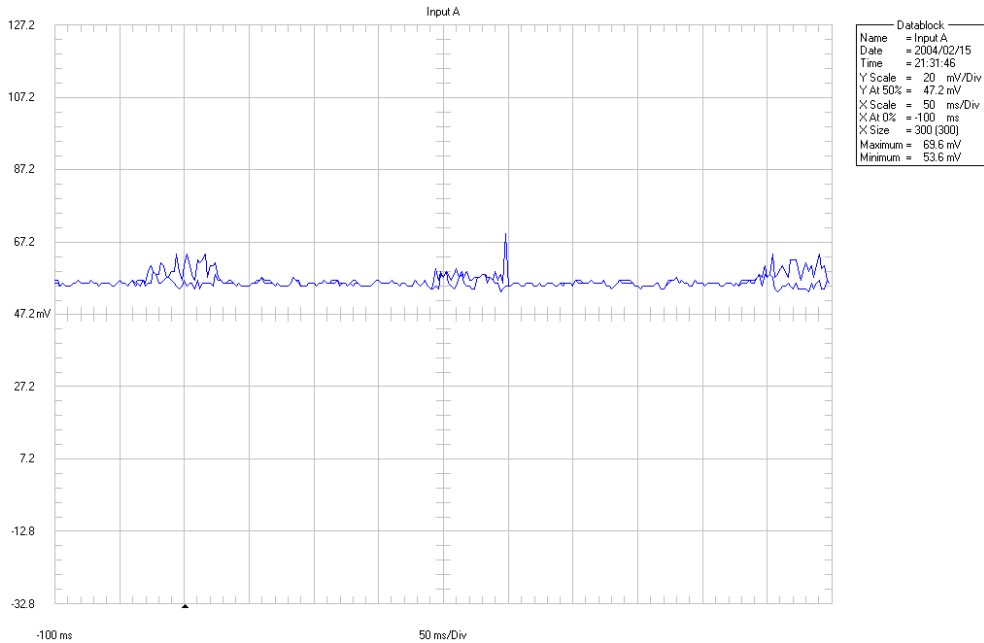


図 18: overhear 時の波形 (packet size = 127 byte)

も、受信時、overhear 時の消費電力は変わらなかった。また、送信電力の設定値を小さくした場合には、図 20 のように、アイドル時の電圧より送信時の電圧の方が低くなる場合がみられた。送信時に流れる電流が、単純にアイドル時に流れる電流と送信により新たに流れることになった電流との和であるならば、このような現象は起こらない。よって、MOTE では、通信時にプロセッサにより流れる電流が、アイドル時に流れるものよりも少ないのではないかと考えられる。

式 (4) から、通信の際の消費電力を求めるためには通信時間を求める必要がある。通信時間はパケットサイズにより変動するので、パケットサイズを 67 バイトから 247 バイトまで 30 バイトずつ変化させたときの、それぞれの通信時間を測定した。それをグラフにまとめたものを図 22 に示す。

図 22 から、送信、受信、オーバーヒアにかかる時間 t_s , t_r , t_o (単位は ms) と、パケットサイズ $size$ (単位はバイト) との関係は、次の式のように表せる。

$$t_s = 0.42 \cdot size + 13.7 \quad (5)$$

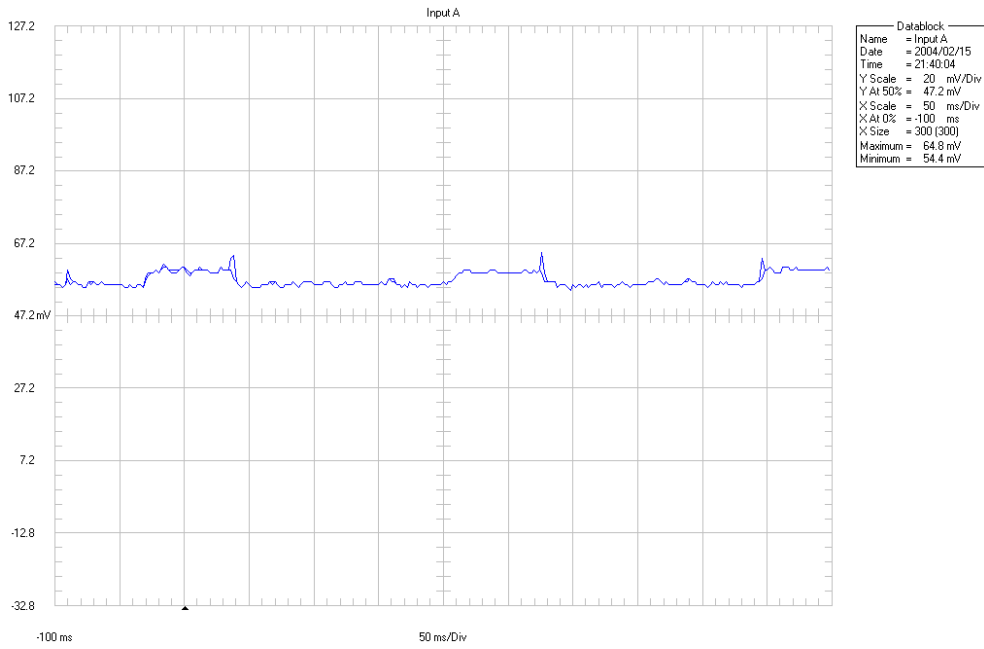


図 19: 送信時の波形 (RF Power = 0 dBm, packet size = 67 byte)

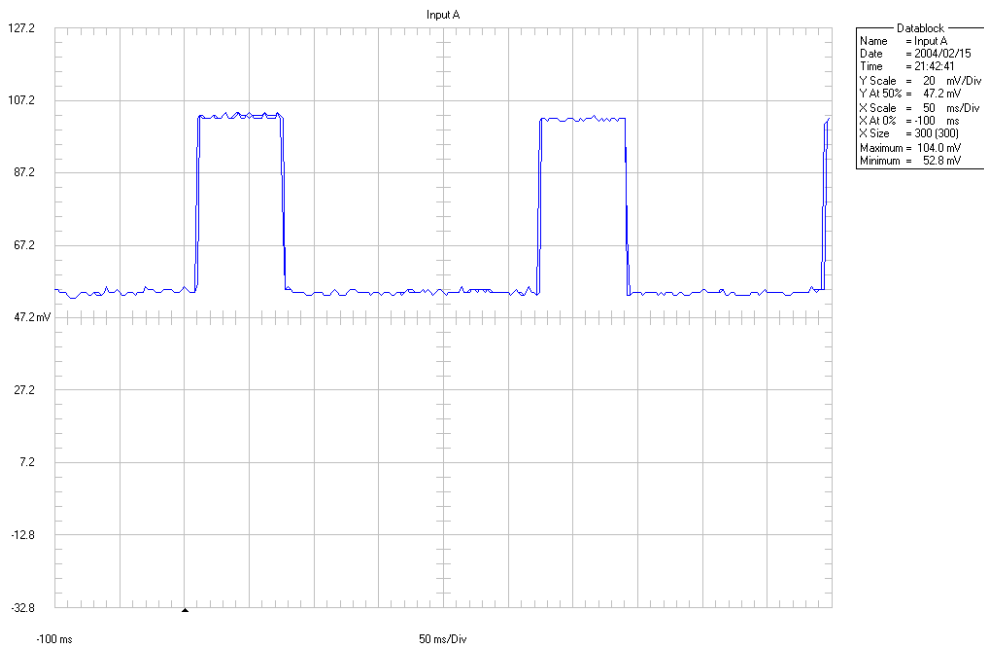


図 20: 送信時の波形 (RF Power = 10 dBm, packet size = 127 byte)

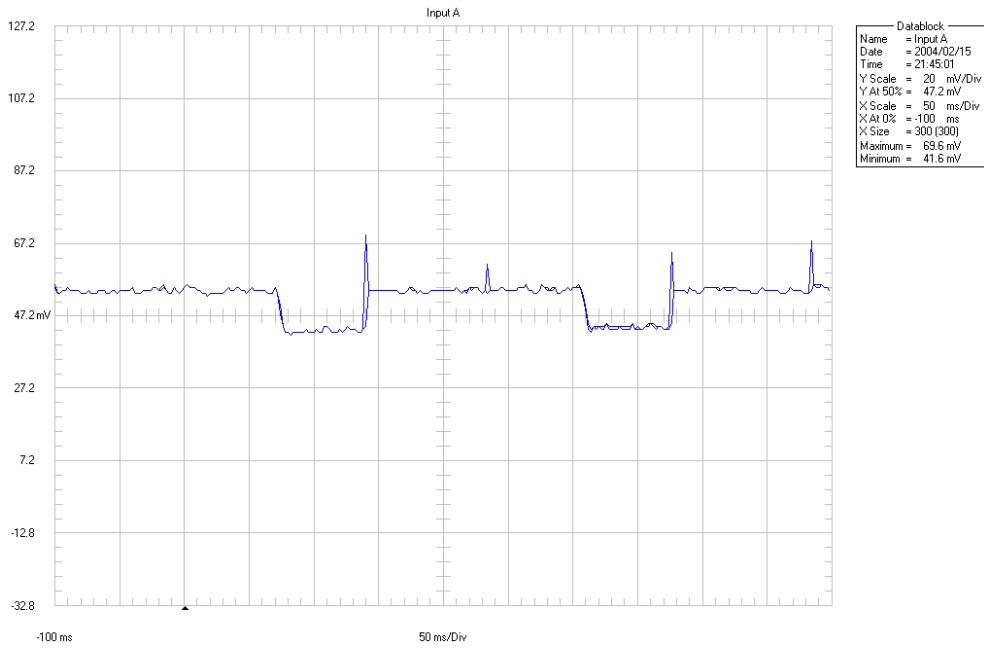


図 21: 送信時の波形 (RF Power = -20 dBm, packet size = 127 byte)

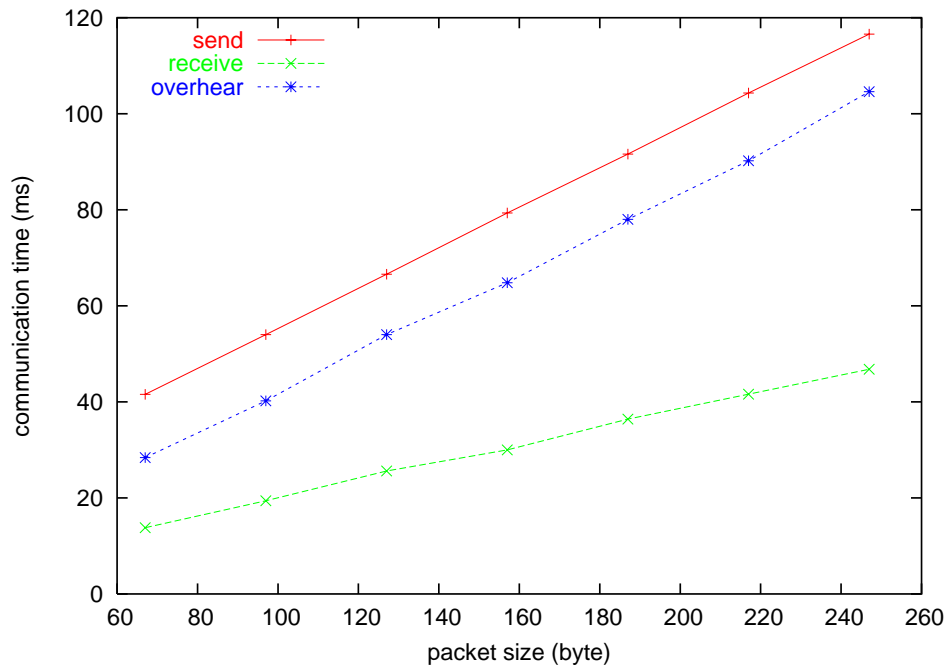


図 22: パケットサイズに対する通信時間

$$t_r = 0.18 \cdot size + 2.67 \quad (6)$$

$$t_o = 0.42 \cdot size \quad (7)$$

図 17, 18 から, 受信時, overhear 時の瞬間の消費電力と, アイドル時の瞬間の消費電力との差 m_r, m_o (mW) は, $m_r = 2.22, m_o = 1.17$ となる. よって, 式 4 より, 1 回の通信で受信, overhear により消費する総電力 E_r, E_o (μ W · sec) は, 次の式で表せる.

$$\begin{aligned} E_r &= 2.22 \cdot (0.18 \cdot size + 2.61) \\ &= 0.4 \cdot size + 5.79 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E_o &= 1.17 \cdot (0.42 \cdot size) \\ &= 0.49 \cdot size \end{aligned} \quad (9)$$

送信時における瞬間の消費電力と, アイドル時の瞬間の消費電力との差 m_s (mW) は, 送信電力の設定値により変化する. 設定値は -20 dBm から 10 dBm まで設定することができ, この値を変えることにより, 通信距離が変化する. しかし, 3.2.1 節の測定結果からも分かるように, 通信距離は環境によって大きく異なる. また, 測定は 5 段階の送信電力でしか行っておらず, それ以上送信電力を大きくした場合にどのように通信距離が変化するかについても測定結果からは分からない. そこで, 通信距離と送信電力との関係を明らかにするために, まず, 送信にかかる電力の測定値と, 通信距離とのカタログ値とを比較することにより, 送信電力と通信距離との関係を明らかにする.

-20 dBm から 10 dBm まで送信電力の設定値を変え, 送信による消費電力を測定した値と, その送信電力に設定した場合の通信距離のカタログ値との関係を表したものが図 23 である. このグラフより, 送信電力と通信距離との関係は一次式で表せるといえる. 3.2.1 節の測定結果から, 各送信電力において通信距離が最小のものをその送信電力における通信距離と考え, 近似直線をとると, 送信によりかかる電力 m_s と通信距離 r との関係式は, $m_s = 0.64 \cdot r - 9.37$ と表せる. よって, 1 回の通信で送信時に消費する総電力 E_s (μ W · sec) は, 次の式で表せる.

$$\begin{aligned} E_s &= (0.64 \cdot r - 9.37) \cdot (0.42 \cdot size + 13.7) \\ &= (0.27 \cdot size + 8.77) \cdot r - 3.94 \cdot size - 128.37 \end{aligned} \quad (10)$$

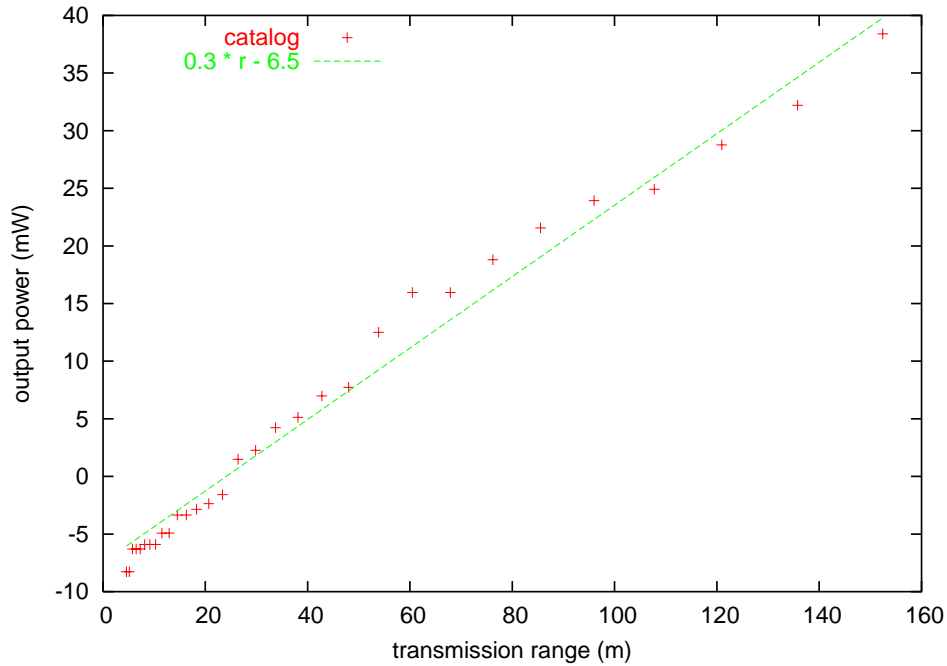


図 23: 送信にかかる消費電力と通信距離との関係

通信距離 r で 1 ホップの通信を行う場合，ネットワークの密度を ρ (ノード数 / m^2) とすると， $\rho\pi r^2$ 個の端末に電波が届くことになる．そこで，ブロードキャストの通信を 1 ホップ行うことにより消費する電力 E_b と，ユニキャストの通信を 1 ホップ行うことにより消費する電力 E_u (ともに単位は $\mu W \cdot sec$) は，次の式のように表せる．

$$\begin{aligned}
 E_b &= E_s + E_r \cdot \rho\pi r^2 \\
 &= ((0.27 \cdot size + 8.77) \cdot r - 3.94 \cdot size - 128.37) + (0.4 \cdot size + 5.79) \cdot \rho\pi r^2 \\
 &= \rho(1.26 \cdot size + 18.18) \cdot r^2 + (0.27 \cdot size + 8.77) \cdot r + (-3.94 \cdot size - 128.37) \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_u &= E_s + E_r + E_o \cdot \rho\pi r^2 \\
 &= ((0.27 \cdot size + 8.77) \cdot r - 3.94 \cdot size - 128.37) + (0.4 \cdot size + 5.79) + (0.49 \cdot size) \cdot \rho\pi r^2 \\
 &= \rho(1.54 \cdot size) \cdot r^2 + (0.27 \cdot size + 8.77) \cdot r + (-3.54 \cdot size - 122.58) \quad (12)
 \end{aligned}$$

この式は，通信を行うことにより，アイドル状態に比べてどれだけの電力を消費したかを表

すものなので、実際に通信時に消費する電力を求める場合には、各端末のアイドル時の消費電力 ($40.98 \text{ mW} \times \text{時間}$) を足す必要がある。

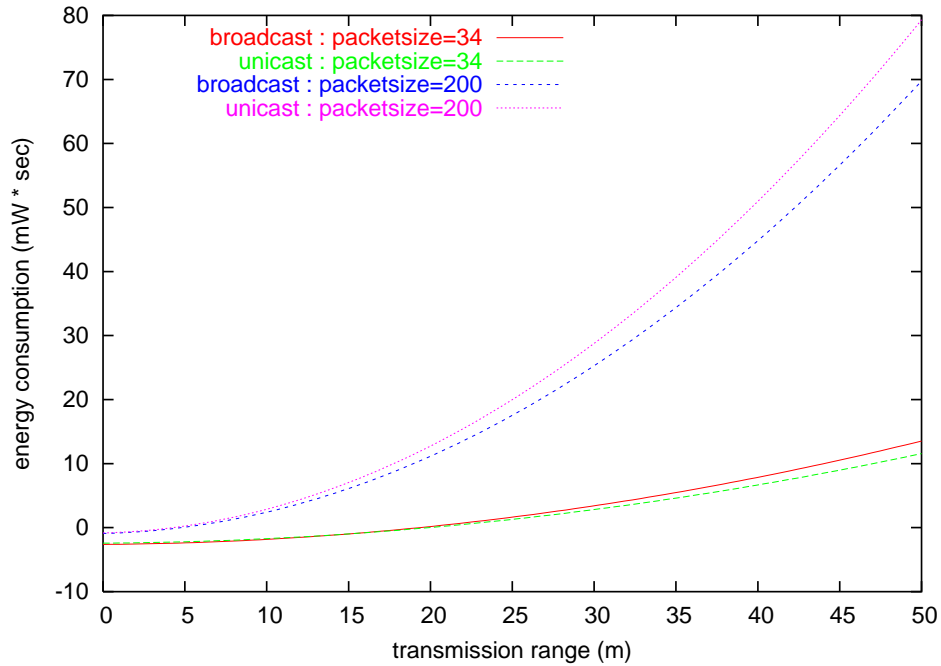


図 24: ネットワークの密度が 0.1 の場合の消費電力

5 消費電力からみたネットワークの最適構成

作成した電力消費モデルを用いて，消費電力の少ないネットワーク構成について考察を行う．以下の考察においては，全ての端末はスリープせずに，通信を行っているとき以外はアイドル状態であると仮定する．通信を行った際にアイドル状態に比べてどれだけ電力を消費するかについて，式 (11)，(12) を用いて計算する．

最初に，ブロードキャストによる通信と，ユニキャストによる通信での消費電力の違いについて調べる．端末の密度を変えた場合の，異なるパケットサイズに対してのそれぞれの通信方式の通信距離と消費電力との関係について，グラフで表したものを，図 24，25 に示す．パケットサイズが 34 バイトであるときと，200 バイトであるときの消費電力を，図 24 はネットワークの密度が 0.1 の場合について，図 25 は 0.001 (ともに単位はノード数 $/m^2$) の場合について，計算したものである．

グラフより，ネットワーク中の端末の密度の大小に関わらず，パケットサイズが大きい場合にはユニキャストの通信の方が電力消費が大きいことが分かる．これは，図 22 に見られ

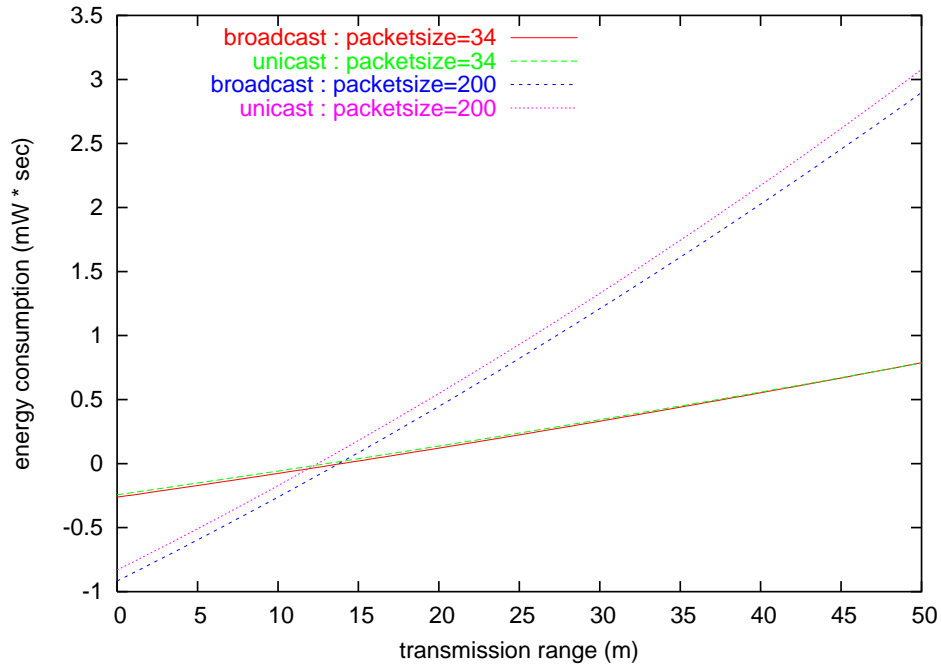


図 25: ネットワークの密度が 0.001 の場合の消費電力

るように，パケットサイズが大きくなっていくにつれてのオーバーヒア時の通信時間の増加の割合が，受信時の通信時間のそれと比べて大きいからである．ただし，通信方式による消費電力の差は小さく，通信距離に対する変化の割合もほぼ同じであるので，以下ではブロードキャストで通信する場合に限定して，消費電力の少ないネットワーク構成について考察を行う．

図 26 のように，各端末が距離 l (m) ずつ離れて格子状に配置されている状態を考える．この状態で最短ルートで k ホップ離れた端末と直接通信する場合には，通信距離を少なくとも $\frac{\sqrt{3}}{2}k \cdot l$ 以上にすることが必要である．そこで，通信距離を $\frac{\sqrt{3}}{2}k \cdot l$ として直接通信を行う場合と，通信距離を l として $k - 1$ 個の端末により中継を行って通信を行う場合とで，どちらの方が消費電力が少ないかについて計算を行う．図 26 のように端末が規則正しく並んでいる場合には，密度は端末間の距離 l によって決まり，このトポロジにおいては密度 ρ は $2\sqrt{3}/3l^2$ となる．これを式 (11) に代入すると，直接通信を行う場合の消費電力 E_{direct} と， k ホップの通信を行う場合の消費電力 E_{hop} は，次のように l の一次式となる．

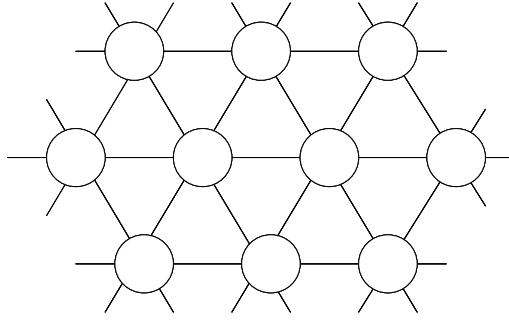


図 26: 端末を格子状に配列したトポロジ

$$\begin{aligned}
 E_{direct} &= \frac{2\sqrt{3}}{3l^2}(1.26 \cdot size + 18.18) \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}k \cdot l\right)^2 \\
 &\quad + (0.27 \cdot size + 8.77) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}k \cdot l + (-3.94 \cdot size - 128.37) \\
 &= (0.23 \cdot size + 7.5)k \cdot l \\
 &\quad + ((1.09 \cdot size + 15.73) \cdot k^2 - 3.94 \cdot size - 128.37) \tag{13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{hop} &= k \cdot \left(\frac{2\sqrt{3}}{3l^2}(1.26 \cdot size + 18.18) \cdot l^2 + (0.27 \cdot size + 8.77) \cdot l + (-3.94 \cdot size - 128.37)\right) \\
 &= k \cdot ((0.27 \cdot size + 8.77) \cdot l + (-2.49 \cdot size - 107.4)) \tag{14}
 \end{aligned}$$

この式を使って求めた、 $k = 2$ の場合と、 $k = 10$ の場合について、直接通信を行う場合と、中継して通信を行う場合との、端末間の距離と電力消費との関係を図 27, 28 に示す。それぞれパケットサイズは 34 バイト, 200 バイトとしている。グラフより、送信電力を大きくして遠くの端末と直接通信するよりも、中継端末による転送を行った方が、消費電力を抑えることができるといえる。また、端末間の距離を小さくするとネットワークの密度が大きくなるが、いずれの場合においても端末間の距離を小さくした方が消費電力が小さくなるとの結果となった。よって、たとえネットワークの密度が大きくなったとしても、通信距離を小さくした方が通信によって消費する電力を抑えることができるといえる。これは、MOTE では図 21 のように送信電力の設定値が小さい場合には、アイドル時より消費する電力が小さくなるために、送信を行うほどネットワークの消費電力が小さくなるためだと考えられる。また、消費電力がアイドル状態より低い状態が長く続けば、それだけアイドル状態であるよ

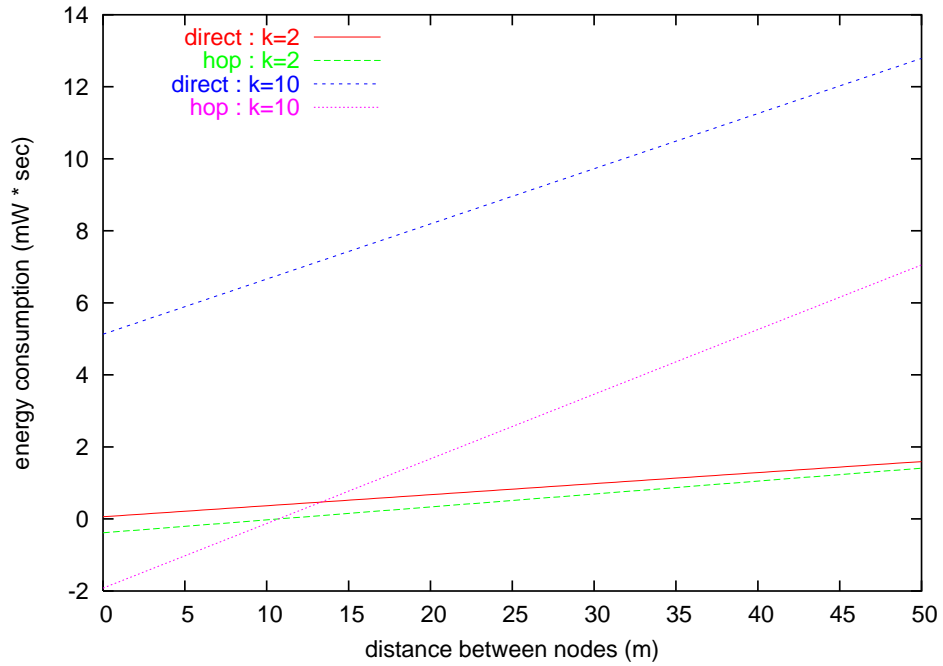


図 27: 端末間の距離を変えたときの消費電力の変化 ($size = 34$)

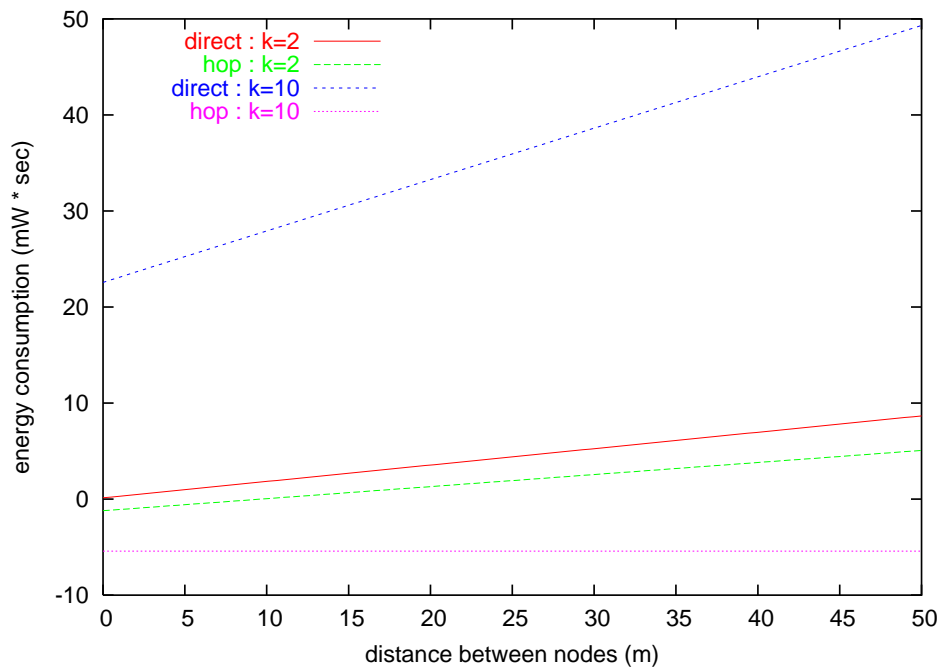


図 28: 端末間の距離を変えたときの消費電力の変化 ($size = 200$)

りも消費する電力が少なくなるので、通信距離が小さい場合にはパケットサイズを大きくするほど消費電力が小さくなっている。しかし、実際のセンサネットワークでは、端末は通信を行っているとき以外はスリープ状態となって消費電力を抑えることが考えられている。パケットサイズを大きくすると、それだけスリープ状態でない時間が長くなるので、パケットサイズを大きくすることにより必ずしもネットワークの消費電力を抑えることができるわけではない。

以上の結果より、全ての端末がスリープしていない状態では、端末間の距離は設定できる最小の送信電力における通信距離まで小さくし、中継を行いながら通信を行う方法が、消費電力を小さくする通信方法であるといえる。また、3.2.1 節の内容より、最小の送信電力 (-20 dBm) に設定した場合の通信距離は少なくとも 3 m 以上であるので、端末間の距離を 3 m にして端末を配置すれば、非対称なリンクを生じることもなく、確実に通信を行うことが可能だと考えられる。しかし、送信電力を -20 dBm に設定したとしても、環境によっては送信電力 -20dBm での通信距離が 14 m となる場合も観測されている。図 29 は端末間距離を 3m とした場合の、通信距離の影響を示したものである。すなわち、通信距離が均一に 3m であれば、図中の低い方の値となるが、仮に 14 m まで通信距離が伸びてしまうと、図中の高い方の値のように、消費する電力が大きくなってしまうことがわかる。このように、同じ送信電力に設定した場合でも、周囲の環境によってはネットワーク全体の消費電力が非常に大きくなってしまう可能性がある。そして、ネットワークの密度が大きくなると、それだけ通信距離の変化に対する消費電力の変化も大きくなることも、考慮に入れておかなければならない。

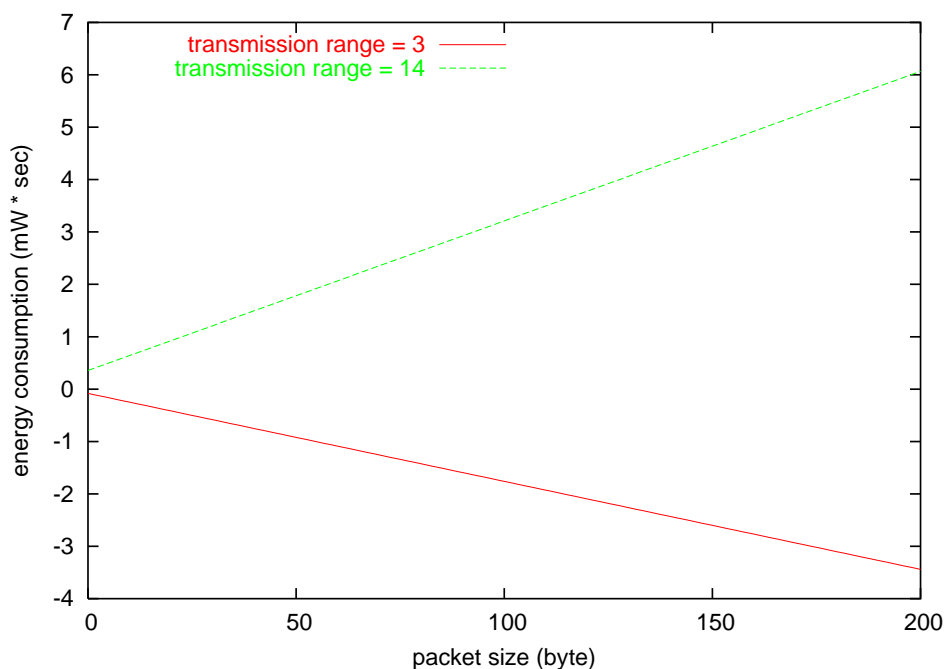


図 29: 通信による消費電力の差

6 おわりに

本報告では、センサネットワーク評価キットである MOTE を用いて、さまざまな環境での通信実験を行い、通信距離に関する特性を明らかにした。その結果、同じ環境でも逆方向の通信を行った際には通信距離が異なる場合があるために、センサを配置したときに非対称なリンクが生じる可能性があることが分かった。環境により通信距離が大きく異なることも明らかになっており、環境の大きく異なる端末間で通信を行う際には、非対称なリンクが生じる可能性はさらに高まる。さらに、通信距離を超えると、パケット損失率の距離に対する変動は激しくなり、同じ場所においてさえ時間によりパケット損失率は変動する。よって、センサネットワークを構築する場合には、このような通信距離の特性を十分に考慮しなくてはならない。

次に、本報告では、通信の際の消費電力を実機を用いて測定し、それをもとにして電力消費モデルを作成した。作成した電力消費モデルを用いて消費電力の少ないネットワーク構成に対する考察を行った結果、送信電力は出来るだけ小さくした方がネットワーク全体の消費

電力は小さくなることが分かった．

本報告では，1対1の通信においてパケット損失率の測定を行い，その結果に基づいて電力消費モデルを作成した．しかしながら，ノード数が増えパケットの衝突が発生するような場合には，その影響でパケット損失率は低下する．また衝突の発生は送信電力によっても影響を受けるので，負荷が高いような状況における消費電力を導出するには，パケット衝突の影響を考慮したモデル化が必要になるであろう．また，実測した結果より，通信の向きの違いによる通信特性の差が大きいことが明らかとなったが，これもネットワーク性能や消費電力に対して大きな影響を与えられと考えられる．すなわち，通信距離の非等方性を考慮したモデル化も今後の課題である．

謝辞

本報告を終えるにあたり、ご指導、ご教授を頂いた宮原秀夫教授に心から感謝致します。また、本報告において直接ご指導頂いた村田正幸教授、日頃から適切なご指導、ご助言を頂いた大阪府立看護大学総合リハビリテーション学部の菅野正嗣助教授に深く感謝致します。

並びに、適切な助言を頂きました大阪大学大学院情報学科研究科 若宮直紀助教授、大崎博之助教授、長谷川剛助教授、牧一之進助手、経済学部の荒川伸一助手にも深く感謝の意を申し上げます。

最後に、日頃から様々な相談に答えて頂いた山本貴之氏、樫原俊太郎氏をはじめとする宮原研究室及び村田研究室の皆様的心からお礼申し上げます。

参考文献

- [1] A. Savvides, S. Park, and M. Srivastava, “On Modeling Networks of Wireless Microsensors,” *ACM SIGMETRICS 2001/Performance*, June 2001.
- [2] L. M. Feeney and M. Nilsson, “Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment,” *In Proceedings of IEEE INFOCOM 2001*, Apr. 2001.
- [3] Y. Chen, E. G. Sirer, and S. B. Wicker, “On selection of optimal transmission power for ad hoc networks,” *In Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan. 2003.
- [4] D. Ganesan, B. Krishnamachari, A. Woo, D. Culler, D. Estrin and S. Wicker, “Complex behavior at scale: An experimental study of low-power wireless sensor networks,” *Technical Report CSD-TR 02-0013*, Feb. 2002.
- [5] “TinyOS.” available at <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>.
- [6] “MPR/MIB Mote User Manual.” available at http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MPR-MIB_Series_User_Manua%1_7430-0021-05_A.pdf.