

RF チップの消費電力が環境発電型 WSN のデータ収集率に与える影響の考察

荒木 拓也[†] 猿渡 俊介[†] 渡辺 尚[‡]

[†] 静岡大学情報学部 [‡] 静岡大学創造科学技術大学院

1 はじめに

無線センサネットワークでは、自然エネルギーで発電する環境発電技術を電源として利用することでバッテリー交換が不要となるため、長期的なネットワークの運用が可能となる。本稿では、MAC プロトコルにおける送信電力制御が環境発電型の無線センサネットワークのデータ収集性能に与える影響を、送信電力コストと受信電力コストを変えながら評価する。評価結果より、将来的にハードウェア技術が進歩して RF チップの消費電力が飛躍的に削減された上で、パケットの発生レートが高く、充電レートの低い応用において、送信電力制御が環境発電型無線センサネットワークにおいて有効であることを示す。

2 関連研究

無線センサネットワークでは、センサノードの電源が半永久的に利用できるというネットワーク運用などの利点から、環境発電技術の利用が検討されている。環境発電では、発電量が環境に依存するため、不安定かつ利用可能なエネルギーの量に制約がある。そのため、センサノードの起動時間が限定され、予定された時間に起動することができない場合があり、同期が困難である。同期が困難という問題に対し、環境発電型無線センサネットワークのプロトコルでは、従来の無線センサネットワークと異なる工夫がされている。例えば、PRT (Probabilistic ReTransmission) [1] では、周辺センサノードの状態から同一パケットを反復送信する回数を決定する。パケット送信時に周辺の全センサノードが充電、送信状態の場合、パケットを受信するセンサノードがないためにパケットの損失が発生する。パケットの反復送信によってパケットが受信する機会を増やすことで、パケット損失を防いでいる。

本稿では、環境発電型無線センサネットワークにおいて発電量が不安定かつ使用可能なエネルギーの量に制約があるという問題に対し、送信電力を制御することでデータ収集の効率化ができるかどうかを検討する。送信電力を制御することで、通信距離を調節することができるため、周辺のセンサノードとの衝突を削減することができる。また、送信で消費する電力の節約も期待できる。例えば、文献 [2] では、シンクノードに対してシングルホップで送信できるセンサノードの送信電力を制御することでデータ収集効率が向上することが示されている。

しかしながら、マルチホップでの送信電力制御は有効ではない可能性がある。マルチホップは中継時の受信に伴う電力のオーバーヘッドが生じるので、シングルホップと比較してエネルギーを多く消費するからである。また、通信距離が小さくなることで干渉を与えるセンサノード数は減少するが、中継による送信回数の増加によって送信に伴う電力や信号の衝突する機会が増加することも考えられる。

3 評価環境

2. で述べたように、環境発電型の無線センサネットワークにおける送信電力制御による性能はさまざまな要因で決定されるため、定式化によって性能を評価するのが困難である。このような観点から、環境発電型の無線センサネットワークにおける送信電力制御の効果をコンピュータシミュレーションによって評価する。

3.1 電力モデル

本稿の評価では送信電力制御の効果を検証することを目的としているため、電力モデルでは送信に必要なエネルギー、受信に必要なエネルギー、充電エネルギーのみを扱い、センサノード等の周辺回路の消費電力はないものとして扱った。

センサノードが一度の送受信で必要なエネルギーを $E_{node}[J]$ としたとき、 E_{node} は送信に必要なエネルギー $E_{tx}[J]$ と受信に必要なエネルギー $E_{rx}[J]$ の和であるため、次の式で表すことができる。

$$E_{node} = E_{tx} + E_{rx} \quad (1)$$

送信状態では、送信電力 $P_{tx}[W]$ とチップ消費電力 $P_{chip}[W]$ の和が送信状態の総電力となる。送信時間を $T_{tx}[sec]$ とした場合、送信に必要なエネルギー E_{tx} は送信状態の総電力を用いて次の式で表すことができる。

$$E_{tx} = (P_{tx} + P_{chip})T_{tx} \quad (2)$$

チップ消費電力 P_{chip} は RF チップが起動している送信状態と受信状態のときに消費する電力を意味する。例えば、MICAz で用いられている CC2420 では、受信状態のとき 70.92 mW、送信電力

-25 dBm のとき 30.60 mW、0 dBm のとき 62.64mW の電力を消費する。半導体製造技術の進歩によって、チップ自体の消費電力は今後ますます小さくなっていくと考えられる [3]。

受信状態の消費電力は送信電力とは無関係であるため、チップ消費電力 P_{chip} に等しい。受信時間を $T_{rx}[sec]$ としたとき、受信に必要なエネルギー E_{rx} は次の式で表すことができる。

$$E_{rx} = P_{chip}T_{rx} \quad (3)$$

充電レートを $R_{charge}[J/s]$ 、センサノードに残ったエネルギーを $E_{remain}[J]$ としたとき、充電時間 $T_{charge}[sec]$ は R_{charge} でセンサノードが E_{node} と E_{remain} の差を充電する時間であるため、次の式で表すことができる。

$$T_{charge} = \frac{E_{total} - E_{remain}}{R_{charge}} \quad (4)$$

式 (1), (2), (3), (4) より、 T_{charge} は次の式で表すことができる。

$$T_{charge} = \frac{(P_{tx} + P_{chip})T_{tx} + P_{chip}T_{rx} - E_{remain}}{R_{charge}} \quad (5)$$

3.2 MAC プロトコル

図 1 にセンサノードの通信プロトコルを示す。本稿の通信プロトコルは充電状態、送信状態、受信状態の 3 つの状態をもつ。充電状態では、環境発電によってパケットの送受信に必要なエネルギー E_{node} を充電する。充電状態に遷移した時点でセンサノードに残ったエネルギー E_{remain} と式 (5) を用いて充電時間 $T_{charge}[sec]$ を算出する。充電状態に遷移してから $T_{charge}[sec]$ 経過した後に受信状態に遷移する。受信状態の時のみ、センサノードはパケットを受信することができる。受信状態において受信時間 $T_{rx}[sec]$ 経過した後、パケット送信キューにパケットが格納されている場合は送信状態、パケット送信キューにパケットが格納されていない場合は充電状態に遷移する。本稿では、受信時間が短すぎるとセンサノードがパケットの受信に失敗し、長すぎると充電状態が長くパケット送信の機会が減少するという制約と、送信電力制御の効果を考慮して、 $T_{rx} = 0.1 [sec]$ とする。送信状態では、パケット送信キューの先頭に格納されているパケットを 1 つ送信する。送信時間 T_{tx} はパケットサイズと物理層の伝送レートから算出する。例えば、パケットサイズが 800 [bit] と物理層の伝送レートが 250 [kbps] の場合、 $T_{tx} = 3.2 [msec]$ となる。送信状態終了時、送信したパケット送信キュー先頭のパケットを破棄して充電状態へ遷移する。

3.3 ネットワークプロトコル

各センサノードはそれぞれが他のセンサノードと独立して充電時間を求めるため、マルチホップでパケットを転送する際に経路が不安定になる。そこでネットワーク層では、フラッディングを用いて経路を冗長化してデータ収集を実現する。

フラッディングを用いた場合、パケットキューは有限のサイズしか具備できないため、重複パケットによる偏りが生じてしまうことが考えられる。重複パケットとは、パケット送信キューに既に同一のパケットが格納されている受信パケットのことである。パケット受信時、受信パケットとパケット送信キューに格納されているパケットと比較し、受信パケットと格納されているパケットが重複した場合は受信パケットを破棄することでセンサノードが重複パケットを持たないようにしている。

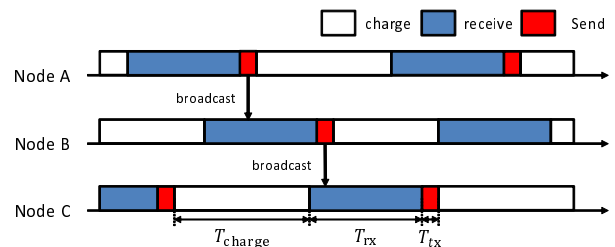


図 1: センサノードの MAC プロトコル

センサノードは自ノードの位置は既知であるという前提を置いており、各送信パケットには位置情報を含めている。パケットに含まれた位置情報を用いることで、自身よりもシンクノードに近いセンサノードからのパケットは破棄する。シンク方向からの受信パケットを破棄することで、ネットワーク内のセンサノードは常にシンクノードの方向へパケットを送信するようにしている。

パケットは、自身の発生したセンサノードの ID と、各センサノード ID でのシーケンス番号の 2 個の情報をもつ。センサノードとシンクノードは ID とシーケンス番号を組み合わせた情報を用いてパケットを識別する。パケットの識別により、重複の確認やシンクノードが受信したパケットの量を計算する。

3.4 通信環境

シミュレーションでは、10 × 10 のグリッド状にセンサノードを配置し、中心にシンクノードを配置した。隣接する各センサノードは 20 [m] の等間隔となっている。送信パケットは 800 [bit]、ビットレートは 250 [kbps]、電波伝搬モデルは [4] を参考に以下の式を用いた。

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

d は送受信間の距離を表し、 n はパスロス係数を表している。 d_0 は基準距離を表している。シミュレーションではそれぞれ $d_0 = 1$ [m]、 $PL(d_0) = 30$ [dBm]、 $n = 3.5$ を用いた。

キャプチャ効果を再現するため、衝突モデルは干渉波が累積的に加算し、パケットの受信時間全体で SN 比が閾値以上を維持した時のみ受信する。受信時に干渉波によって一部でも SN 比が下回った時に衝突が発生する。以上の条件での各送信電力での最大通信距離は、-10 dBm で 28m、0 dBm で 50m、10dBm で 82m となる。

4 評価結果

本稿での評価ではデータ到達率 $R_{arrival}$ を用いる。データ到達率とは、ネットワーク全体で発生したパケット数 N_{total} [packet] に対するシンクノードが受信したパケット数 $N_{received}$ [packet] の割合を意味し、次の式で表す。

$$R_{arrival} = \frac{N_{received}}{N_{total}} \quad (6)$$

4.1 チップ消費電力を変えた場合の評価

チップの消費電力は今後のハードウェアの進歩によって小さくなっていく可能性があるため、まず、チップの消費電力を変化させた場合の評価を行った。送信電力 $P_{tx} = \{-10, 0, 10\}$ [dBm]、充電レート $R_{charge} = 1$ [mJ/s]、パケット発生レート $R_{generate} = 0.1$ [packet/sec] とした。

図 2 にチップ消費電力に対するデータ到達率を示す。図 2 より、送信電力が高い方が常にデータ到達率が高いことが分かる。例えば、チップ消費電力が 10^1 [mW] のデータ到達率は、-10 dBm で 0.04、0 dBm で 0.16、10 dBm で 0.72 となっている。以上の結果から、本節のパラメータでは送信電力制御の効果が確認できないことが分かった。

4.2 パケット発生レートを変えた場合の評価

4.1 の評価で用いたパラメータでは送信電力制御の効果が無いという結果が得られた。センサノードが送受信に必要なエネルギーは、受信電力とチップ消費電力で決定される。チップ消費電力が小さいほど、必要なエネルギーは送信電力の影響を受け、送信電力制御の効果が大きくなると考えられる。このような観点から、チップ消費電力 $P_{chip} = 0$ [mW] に固定し、パケット発生レート $R_{generate}$ [packet/sec] を変化させた場合の評価を行った。

図 3 にパケット発生レートに対するデータ到達率を示す。図 3 より、送信電力が高い方が常にデータ到達率が高いことが分かる。例え

ば、パケット発生レートが 10^{-1} packet/sec のデータ到達率は、-10 dBm で 0.81、0 dBm で 0.95、10 dBm で 1.00 となっている。パケット発生レートが高いときネットワーク全体のパケット数が増えるため、センサノードのパケット送信回数も増える。送信電力制御は送信時のエネルギーを節約することで、エネルギー量に対する送信回数を増やすことができる。すなわち、パケット発生レートの 10^1 packet/sec の時に送信電力制御の効果が最も高くなるにも関わらず、10 dBm のほうが 0 dBm よりもデータ到達率が高い。以上の結果から、本節のパラメータでは送信電力制御の効果が確認できないことが分かった。

4.3 充電レートを変えた場合の評価

4.2 の評価で用いたパラメータでは、送信電力制御による効果が得られないという結論が得られた。4.1、4.2 の結果を踏まえ、最も送信電力制御の効果が発揮できるであろうとの観点から、チップ消費電力 P_{chip} を 0 [mW] に、パケット発生レート $R_{generate}$ を 10 [packet/sec] に固定し、充電レート R_{charge} [J/s] を変化させた場合の評価を行った。

図 4 に充電レートに対するデータ到達率を示す。図 4 より、充電レートが低いとき送信電力制御による効果が得られることが分かる。充電レートが 10^{-3} mJ/s のとき、-10 dBm のデータ到達率が最も高く、送信電力が小さいほどデータ到達率が高い。充電レートが 10^{-2} mJ/s のとき、0 dBm のデータ到達率が最も高く -10 dBm、10 dBm と続いている。充電レートが 10^{-1} mJ/s 以上のとき、10 dBm のデータ到達率が最も高く、送信電力が大きいほどデータ到達率は高い。本節のパラメータで送信電力制御の効果が得られるのは、充電レートが 10^{-1} mW よりも小さいときである。

環境発電技術の発電量は、太陽電池、圧電、振動、熱、音響雑音それぞれ 1 cm^3 あたり 15 mJ/s、0.33 mJ/s、0.116 mJ/s、0.04mJ/s、0.00096 mJ/s である [5]。環境発電では、単位体積あたりの発電量と、デバイスの大きさにより発電量は変化するため、デバイスのサイズが小さいとき、送信電力制御の効果が得られると考えられる。しかしながら、発電したエネルギーに蓄積される場合にはリーク電流 [6] も考慮しなければならないため、蓄電蓄電技術に関する技術進歩も求められる。また、4.3 の評価では、パケット発生レートは 10 packet/s に固定されていることから、送信電力制御の効果が得られるのはパケット発生レートが高く、充電レートが非常に小さいときであることが分かった。

5 おわりに

本稿では、シミュレーションによって、環境発電型無線センサネットワークにおける各ノードで異なる送信電力での評価を行った。その結果、環境発電型無線センサネットワークでは、RF チップの消費電力が限りなく低く、パケット発生レートが高く、充電レートが小さいとき、送信電力制御の効果が得られることが分かった。本稿の結果は、RF チップ、環境発電デバイス、蓄電技術が将来的に飛躍的に進歩した場合に送信電力制御が有効となる可能性を示唆している。

参考文献 [1] Yoshida, M., et al.: Probabilistic Data Collection Protocols for Energy Harvesting Sensor Networks, (*IEEE LCN 2011*), pp.370-377 (2011). [2] 稲葉ほか: 環境発電型 WSNs におけるデータ到達率向上のための送信電力制御方式について, (*IPSN DICOMO 2012*), pp.1487-1495 (2012). [3] Courtland, R.: Wi-Fi Radio Takes a Digital Turn, *IEEE Spectrum*, Vol.49, No.11, pp.14-18 (2012). [4] Zuniga, M., et al.: Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links, (*IEEE SECON 2004*), pp.517-526 (2004). [5] Vijay, R., et al.: Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems, (*IPSN 2005*), pp.457-462 (2005). [6] Merrett, G.V., et al.: Supercapacitor Leakage in Energy-Harvesting Sensor Nodes: Fact or Fiction?, (*INSS 2012*), pp.1-5 (2012).

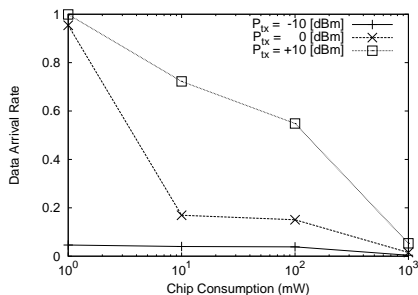


図 2: チップ消費電力に対するデータ到達率

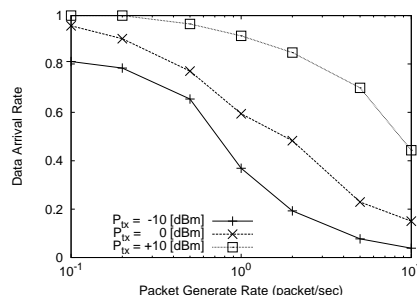


図 3: パケット発生レートに対するデータ到達率

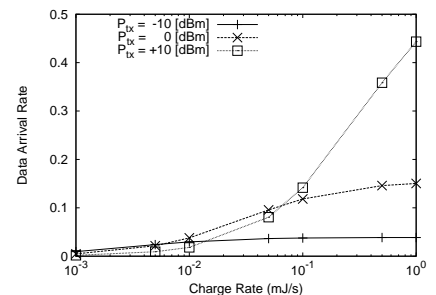


図 4: 充電レートに対するデータ到達率