

電源供給が不安定な環境発電型無線センサネットワークへのレートレス符号の適用について

稲葉 友紀[†] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]

[†] 静岡大学大学院情報学研究科 [‡] 静岡大学情報学部

1 はじめに

環境発電型無線センサネットワークは、センサノードが太陽光や熱から電力供給を行うことでネットワークの長期運用を可能にする。一方で、不安定な電力供給により周囲のセンサノードの稼働状態の予測が困難となり、効率的なデータ収集を行うことができない [1]。本稿では、環境発電型無線センサネットワークにおいて不安定な電力におけるパケット欠落に対応し、高いデータ収集効率を目的とするレートレス符号化を用いたデータ収集方式 Burnet を提案する。

2 関連研究

図 1 にバッテリー駆動のセンサノードと環境発電駆動のセンサノードのエネルギー量を示す。環境発電では、バッテリーと異なり、電力の充電と消費を繰り返す不安定な動作モデルを持つ。電力供給が不安定であると、各センサノードは周囲のセンサノードが送信時に受信可能であるか、充電中かを把握することが困難となる。そのため、通信相手の状態を把握しなくとも通信範囲内のいずれかのセンサノードがパケットを受信できるようにフラッディングベースの通信を行う。また、フラッディングを用いたとしても、環境から得られるエネルギーが少ない場合には隣接ノードが受信状態にない可能性があるため、反復送信方式でパケット到達率を高めている [1]。反復送信方式とは、複数回同じパケットを送信する方式である。

フラッディングベースの通信はパケットがブロードキャスト送信されるため、複数のセンサノードが同一のパケットを受信し、ネットワーク内の重複パケットが増加するという問題が発生する。ネットワーク内での重複パケットの増加は不必要な通信を発生させ、無駄に電力を使用する。また、重複パケットは各センサノードのパケットキューを圧迫し、送るべきパケットの送信を妨げる。図 2 は、パケットキューのサイズが 2 であるセンサノード D, E, F がセンサノード A, B のパケットを受信し、パケットキューが一杯である状態を示している。図 2 の状態でセンサノード C がパケットを送信するとセンサノード D, E, F はパケットキューが一杯であるため、センサノード C のパケットをパケットキューに格納することができずに、パケット損失が発生する。

一方で、文献 [2] では、レートレス符号化を用いて時間によって変動するチャネル状態に対処する方式を提案している。レートレス符号化を用いた方式は複数のパケット情報を持つ符号化パケットを生成し続け、受信センサノードがデコードできるまで符号化パケットを送信する。レートレス符号化を用いた方式は、チャネル状態が全知であるという前提の最適方式と同等のスループットを達成している。環境発電型無線センサネットワークでは、チャネル状況と同様に充電レートは常に変動するため、レートレス符号化をデータ取



図 4: 符号化パケットのフォーマット

集方式に用いることで高いパケット到達率を達成することが期待できる。

3 提案方式

2. での議論を基に、環境発電型無線センサネットワークにおけるレートレス符号化を用いたデータ収集方式 Burnet を提案する。Burnet は電力の不安定さによって発生するパケット損失や重複パケットに対してレートレス符号化を適用することで、パケット到達率を向上する。パケット到達率とは、発生したパケット数に対してシンクノードに届いたユニークなパケット数の割合である。各センサノードが電力に余力がある限り、異なるパケット情報を持つレートレス符号化パケットを生成することで、重複パケットによる無駄な通信を削減する。また、パケット損失が発生したとしても、符号化パケットから損失したパケットの復号を可能とする。

図 3 に、各センサノードが具備しているパケットキューを示す。各センサノードは未送信パケット用キューと、送信済みパケット用キューの 2 種類のキューを持つ。未送信パケット用キューでは、未送信パケットを格納している。送信済みパケット用キューは、送信済みのパケットを格納している。図 4 に、Burnet で用いるパケットのフォーマットを示す。生成されたパケットのフォーマットはヘッダに符号化されたパケットのセンサノード ID とシーケンス番号を持ち、ヘッダの後に符号化後のデータを持つ。

各センサノードは発生したパケットを未送信パケット用キューの最後尾に格納する。送信状態になったとき、未送信パケット用キューの先頭からパケットをブロードキャスト送信する。各センサノードは未送信パケット用キューのパケットを送信した後、送信パケットを送信済みパケット用キューに格納する。もし送信済みパケット用キューに空きがなくなった場合、キューの先頭からパケットを削除する。送信状態に入る前に、未送信パケット用キューが空の場合、各センサノードは送信済みパケット用キューに格納されているパケットのうちランダムに x 個以下を選択し、XOR 演算により符号化パケットを生成する。未送信パケット用キューが空の時のみ符号化するのは、符号化パケットを生成しすぎることによって発生するキュー詰まり問題を避けるためである。生成した符号化パケットを未送信パケット用キューの最後尾に格納する。各センサノードが未送信パケット用キューから符号化パケットを送信した場合、送信した符号化パケットを送信済みパケット用キューには格納せず削除する。送信されたパケットをセンサノードが受信した場合、パケットが発生した時と同様に未送信パケット用キューの最後尾に格納する。未送信パケット用キューに空きがない場合は、直前に受信したパケットを破棄する。

シンクノードでは、受信した符号化パケットから以下の手順でセンサデータを抽出する。 $x = 3$ とした場合、センサノードは 3 個以下のパケットを符号化する。図 3 のようにセンサノードが送信済み

Fundamental Study on Rateless Code for an Unstable Power Source on Energy Harvesting Sensor Networks
[†]Yuki INABA [‡]Shunsuke SARUWATARI [†]Takashi WATANABE
[†]Graduate School of Informatics, Shizuoka University
[‡]Faculty of Informatics, Shizuoka University

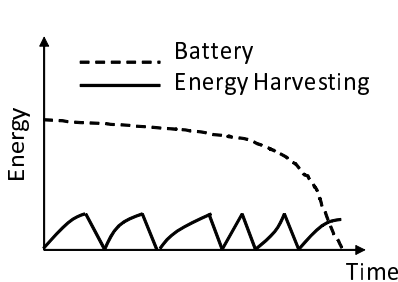


図 1: 各センサノードのエネルギー量の変化

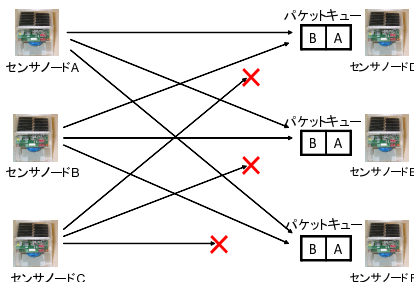


図 2: キュー詰まり問題

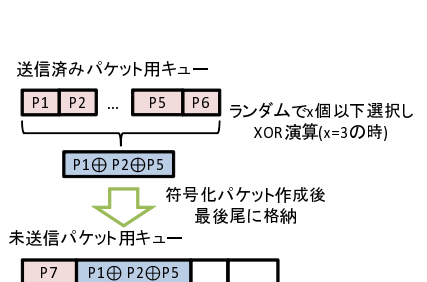


図 3: センサノードのパケットキュー

表 1: シンクノードにおける復号例

受信パケット	P1	P2	P3	P4	P5	復号パケット
R1						
R2						
R3						
R4						
R5						
						P1(R1⊕R2)
						D1(R1⊕R3)
						D2(R2⊕R3)
						D3(R2⊕D1)
						D4(R3⊕R5)
						P3(R4⊕R5)
						P2(R4⊕D4)
						⋮
						P5(D2⊕P3)

パケット用キューに格納されているパケット P1, P2, P5 を選択し符号化した場合、パケットのフォーマットはヘッダに各 P1, P2, P5 のセンサノード ID とシーケンス番号を持ち、ヘッダの後ろに P1, P2, P5 を XOR 演算したデータを持つ。シンクノードでは受信パケット同士のセンサノード ID とシーケンス番号を比較して、共通のセンサノード ID とシーケンス番号を持つパケット同士を XOR 演算して、新しいパケットを生成する。ただし、復号の複雑化を避けるため、新しく生成されるパケットの要素パケット数は x 個以下とする。要素パケット数とは、符号化パケットに含まれているパケットの種類の数である。

復号例を表 1 に示す。ここでの R はシンクノードが受信したパケット、P は符号化されていないパケット、D は復号することで生成した新しいパケットを意味する。表 1 では、シンクノードは受信パケット R1, R2, R3, R4, R5 を持つ。それぞれの受信パケットは表 1 のように 3 個以下のパケットの情報を持っている。まず R1 と R2 を比較する。R1 と R2 は P2 と P5 の共通項を持つため、XOR 演算を行うことで P1 が復号される。次に、R1 に対して R3, R4, R5 を比較し、共通項がある場合のみ XOR 演算を行い、新しいパケットの組み合わせの復号パケットを生成する(例: D1, D2...)。R1 が終了した後、次のステップでは生成した復号パケットも比較対象に加え、R2 に対して R3, R4, R5, P1, D1 との比較を行う。

このように新しく生成した復号パケットも含め総当たりで比較する。生成するパケットの要素が 4 つ以上または既に存在するパケットの要素と同一でない限り新しいパケットの生成を繰り返す。比較を繰り返した結果、5 つの受信パケットから 5 つのパケットの復号が可能となる。

4 基礎評価

Burnet の基本性能を検証することを目的として、コンピュータシミュレーションによるパケット到達率の評価を行った。

4.1 評価環境

評価トポロジとして、一番左側にシンクノードを配置し、シンクノードの右側に 5 つのセンサノードを直線に配置した。各センサノードでは 10 秒に 1 つのパケットを定期的に発生し、1 回のシミュレーションあたりのパケット発生数を 50 パケットとした。また、各センサノードは 80msec 毎に送信状態に入り、パケットキューに送信

すべきパケットが存在するときのみパケットを送信する。Burnet の性能を相対的に評価するために、反復送信方式と比較した。反復送信方式とは、センサノードが各パケットに毎に 5 回送信する方式である。

4.2 パケットロス率に対するパケット到達率

センサノードは常に変動する充電レートによってパケットを損失する割合が異なる。Burnet の基本性能を確認するため、パケットロス率に対するパケット到達率を評価した。本評価でのパケット到達率とは、発生した全パケット数と復号できたパケット数の比率であり、反復送信方式では発生した全パケット数と届いたユニークなパケット数の比率である。

図 5 に、パケットロス率を変化させた場合のパケット到達率を示す。また、重複パケット数を図 6 に示す。図 5, 6 より、次の 3 つのことがわかる。

- (1) パケットロス率が低いとき、Burnet は反復送信方式よりも高いパケット到達率を示している。Burnet のパケット到達率はパケットロス率が 0~0.4 にかけて反復送信方式の約 4.17 倍である。Burnet はキューが空の時に符号化パケットを送信し、受信したパケットからパケットを復号するため、余分なパケットの送受信をせず、キュー詰まり問題を軽減してくれるからだと考えられる。
- (2) 反復方式のパケット到達率は送信回数とパケットロス率のバランスによって決まる。送信回数がパケットロス率に対して適切な時は、高いパケット到達率となっている。一方で、パケットロス率が低い場合では、送信回数が多いと冗長なパケット送受信の回数が増えることにより、パケット到達率が低くなっている。
- (3) Burnet の重複パケット数はパケットロス率が高くなるにつれ、減少傾向から増加傾向に変化している。パケットロス率が 0~0.4 にかけて、受信確率が低くなることで受信パケット数が減少する。これにより符号化パケットの生成数が増加し、異なるパケットがシンクノードに届けられている。また、0.4~0.8 では、各センサノードの受信したパケット数が少なくなるため、符号化パケットを生成する要素数が少なくなり、重複パケットが増加していると考えられる。

5 まとめ

本稿では、環境発電を用いた無線センサネットワークにおいて高いデータ収集効率の達成するレートレス符号を用いたデータ収集方式 Burnet を提案した。現在、充電レートが変動するシナリオでの評価を進めている。

参考文献

[1] Masaya Yoshida, Tomoya Kitani, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Pai Chou, Winston Seah, "Probabilistic Data Collection Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, Vol. 11, No. 2/3, IJAHUC, 2012

[2] Aditya Gudipati, Sachin Katti, "Strider: Automatic Rate Adaptation and Collision Handling," in Proceeding of the ACM Special Interest Group on Data Communication 2011 (ACM SIGCOMM'11), pp. 158-169, 2011.

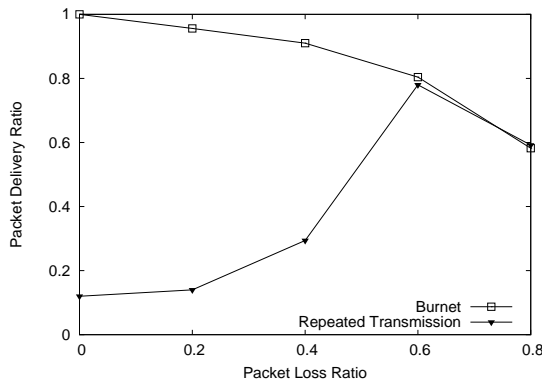


図 5: パケットロス率に対するパケット到達率

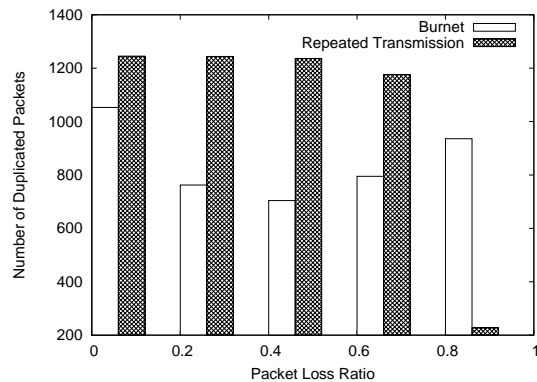


図 6: パケットロス率に対する重複パケット数