

省電力端末を用いた無線センサネットワークにおける通信の信頼性向上の提案

M2009MM009 泉井雄仁

指導教員：河野浩之

1 はじめに

近年開発されている、ある種の低価格省電力無線センサ [1] は周期的に短時間だけ起動し、処理機能も限られている。つまり通信の高信頼性を確保した上でシステムの長寿命化を可能にすることが重要である。本研究では端末数 50 以下の小規模ネットワークにおいて、無線端末は通信の際に一意に通信する端末を決めるのではなくすべての隣接ノードに中継を求めることで、end-to-end の通信成功率を上げることが目的とする。評価方法として当研究室で開発中のネットワークエミュレータ GINE [2] に無線通信のエミュレーション機能を追加し評価する。端末の電力消費と通信成功率を算出し、他のルーティング方式 [3] と比較する。大規模ネットワークの場合、放送には無駄が多くなるため、放送方向を限定するなどの制約を付加した拡張が必要となる。本研究におけるネットワーク寿命の定義は無線端末が一つでも通信不可能 (電池切れ) となった場合ネットワーク寿命とする。低機能通信機器を用いて通信の信頼性を確保した上で長寿命化を可能にする。省電力ルーティング方式を提案し、エミュレーションによって評価する。

2 既存方式

先行研究である RIP を応用したルーティング方式について説明する。

2.1 RIP を応用したルーティング方式

先行研究ではルーティング方式の一つとして RIP をもとに考察している。経路決定の基準は最短通信距離を選択することである。さらにインターフェースメトリックをホップ数に加えることで消費電力の偏りを回避する。ルーティングは以下のような流れになる。

- (1) インターフェースメトリックの値は電力残量の逆数をもとにしている。
- (2) 各ノードが隣接ノードに自分の持つ経路情報を定期的に送信する (初期 4 回と 1 日 1 回程度)
- (3) 送信する情報は宛先論理アドレスと通信距離
- (4) RIP では経路情報をブロードキャストするが、この場合は各隣接ノードに個別に送信

問題点として遠いノードからのピーコンを受信して隣接ノードとして認識した場合、中継を依頼すると成功率が低下する。このような問題に対処するために通信成功率の低い隣接ノードは隣接ノードリストから消去する。

3 システムアーキテクチャ

本節ではシステムアーキテクチャについて説明する。

3.1 ネットワーク構成

本研究で構築するネットワーク構成と条件は次の通りである。

- 構成は図 1 のような集合住宅におけるネットワークシステムを想定している。
- ネットワークの中の任意のノードを基地局として外部ネットワーク接続することによって集合住宅内の情報を外部へ報告することができる。
- 住宅内のネットワークでは隣接ノード間で通信を繰り返すことで end-to-end の通信を確立する。
- 実験の周期性をなくすために時間差で起動させる。
- 無線通信においてデータを送信する際に必要な電力は距離の 2 乗に比例し各無線端末間の距離は遠すぎると大きな電力消費の原因となってしまう。そこで隣接端末間の 10 m 程度とした。
- 通信の成功率は距離の 2 乗に反比例している。
- 10m で成功率は約 90% だが 15m では 70% になる。
- ノード間の距離を空けすぎるとは適切ではない。

図 1 中の四角内の数字はノード ID を示している。ノードの中で任意のノードを基地局として外部のネットワークと接続する。図 1 ではノード 25 を基地局としてグローバルネットワークに接続する。各ノードは一日一回基地局と通信する。

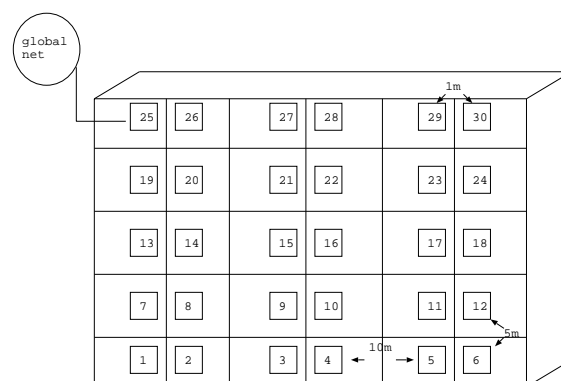


図 1 ネットワークの構成例

4 ルーティング方式

本節ではルーティング方式について説明する。

4.1 ルーティング方式の概要

本研究では2節で紹介したRIPの応用を更に改造する。先行研究では隣接端末間の通信の信頼性が高くなければend-to-endの通信成功率が低いことがわかった。決定した経路によってはend-to-endの通信が不成立になる。またデータの再送によって余分な電力を消費する。

- (1) 電力消費は、端末起動時のビーコン送信が電力消費の9割以上を占めることから、データ送信を相対的に増やして、end-to-endの通信成功率を高めることが適切であると判明した。
- (2) 50ノード以下の小規模ネットワークにおいて、起動している全ての隣接ノードにデータを送信する。
- (3) (2)よりネットワーク上に複数の同一データが存在するため、データが欠損を生じた場合でも別のノードから正しいデータを得る事で高信頼性を維持できる。
- (4) ノードの状態は大きく分けてsleep状態と通信可能状態がある。
- (5) 2つの状態を遷移することによって特に仕事が無いノードまたは一定時間通信可能状態であったノードはsleep状態となり電力を節約する。
- (6) 通信可能状態にあるノードはデータ受信状態の場合は自分の状態を伝えるために隣接ノードに対してビーコンを送信する。
- (7) データ送信状態にあるノードは受信したビーコンを送ってきたノードに対して送信する。

4.2 ルーティング方式の流れ

図2では通信を経過時間に合わせて表現してある。図中のN1, N2, N3はノードである。

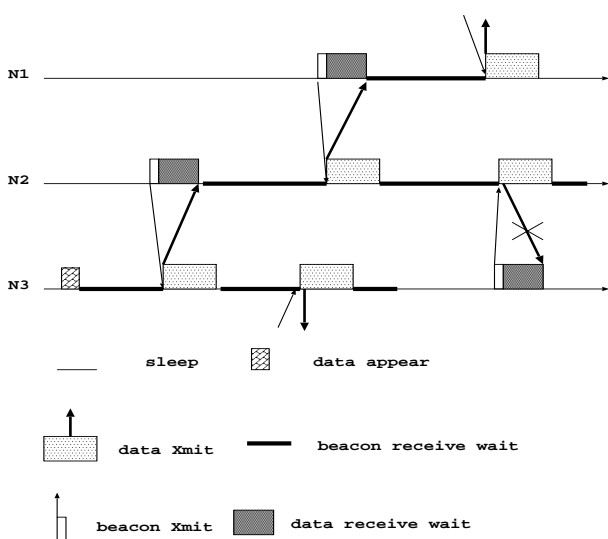


図2 ルーティング方式

- (1) N3に送信が必要なデータが存在すると仮定する。

- (2) N3はデータを送信するためビーコン受信状態に遷移する。
- (3) 隣接ノードであるN2からビーコンを受信したらN2に対してデータを送信する。
- (4) N3はその後も他の隣接ノードに対してデータ送信を続ける。
- (5) N2はN3から受信したデータを中継をする。
- (6) N2は隣接ノードであるN1からビーコンを受信したのでデータを送信する。
- (7) N2はN3からビーコンを受信したが、データの発生源なのでデータを送信しない。

4.3 ルーティング方式の状態遷移

提案するルーティング方式は図3の状態遷移図を用いて説明する。無線端末のsleep状態は、ルーティングの処理はしない。決められた時間分、休止することで電力を節約する。状態を遷移するときは2種類である。データの発生またはデータを持っている場合はbeacon receive wait状態へ遷移する。タイムアウトの場合はbeacon Xmit状態へ遷移する。無線端末のbeacon Xmit状態は、自分が受信可能状態であることを知らせるために隣接端末へビーコンを送信する。状態を遷移するときはビーコンの送信が終了したらdata Receive wait状態へ遷移する。

無線端末のdata Receive wait状態は自分が送ったビーコンを受信した端末からデータが送られてくるのを待つ状態である。状態を遷移するときは以下の2種類である。

- データを受信した場合
data received状態へ遷移する。
- データが何も届かなかった場合
time outとなりsleep状態へ遷移する。

無線端末のdata receiving状態は届いたデータの受信処理をする状態である。受信処理が終了すればprocess状態へと遷移する。無線端末のprocess状態は受信したデータ送信が必要か不必要かを判断する。

- 送信が必要な場合
beacon receive wait状態へ遷移する。
- 送信が不必要な場合
受信したデータを確認して既に受信したことがあるデータの場合、データを破棄してsleep状態へ遷移する。

またprocess状態は無線端末の通信以外での処理のために設けた状態である。通信機器に付属した端末はここで処理をする。

無線端末のbeacon receive wait状態はbeacon Xmit状態と逆の状態である。端末は自分がデータを送信するため受信可能な隣接端末からビーコンが送られてくるのを待つ。状態を遷移するときは以下の2種類である。

- ビーコンを受信した場合

beacon receiving 状態へ遷移する。

- 一定時間ビーコンを受信できなかった場合
タイムアウトして sleep 状態へ遷移する。

無線端末の beacon receiving 状態は届いたビーコンの受信処理をする状態である。ビーコンの受信が完了したら data Xmit 状態へと遷移する。既に同一データを送信している端末からのビーコンの場合には送る必要が無いので beacon receiving 状態へと遷移する。

無線端末の data Xmit の状態は受信したビーコンを送信した端末に対してデータを送信する。送信処理が終了すれば beacon receive wait 状態へと遷移する。Beacon receive wait 状態, beacon receiving 状態, data Xmit 状態を繰り返すことによって、全ての隣接端末に中継を求めることができ、ネットワークの信頼性を向上させることができる。

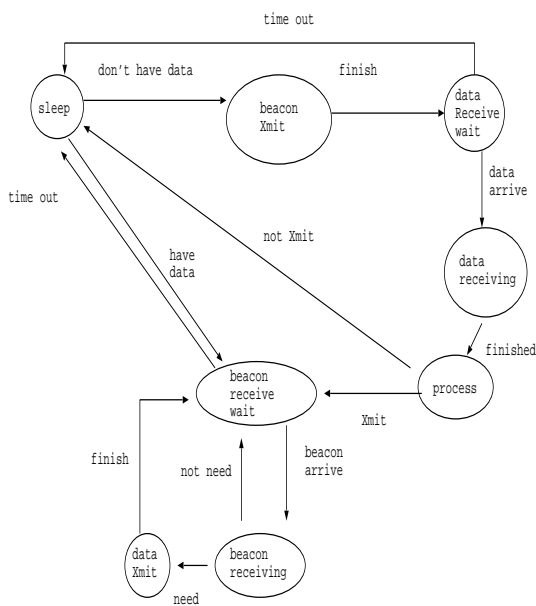


図 3 ノードの状態遷移

無線端末が beacon Xmit(40 octets) data Receive wait(10 msec) sleep (5sec) この 3 つの状態を遷移したした場合 1 サイクルにおいての時間と消費電力はそれぞれ 5.0433sec , 0.685masec よって 1 日では 17131.527 サイクルなので 1 日の消費電力は約 3.258mAh となる。バッテリー稼働時間は $7560/3.258 = 2320$ 日 (6.36 日) となる。

5 エミュレーション

本節では、エミュレータの基本構成について説明する。

5.1 GINE

GINE は多数のルータやリンクで構成される広域ネットワークを模倣することが出来るネットワークエミュレータである。各リンクごとに与えられた確率分布に従って、遅延やパケットロスなどの通信障害を容易にエミュレートすることができ、バンド幅を独自に設定することができる。また、C++ クラスライブラリを用いたユーザスペースプログラムで記述されているため、自由に機能の追加が可能で

ある。本研究では GINE に無線機能を追加し提案するルーティング方式を評価する。

5.2 基本構造

プログラムの基本構造はスレッドでノードを複数用意するのではなくキューを用いてプログラムを作成した。ノードオブジェクトからセルフイベント用に 1 つ、通信用に switch に対して 2 つ準備する。図 4 に構造を示す。

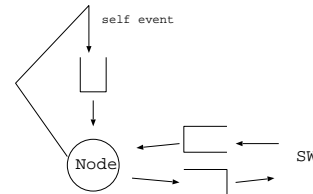


図 4 実装図

図 4 の構造を実現するために GINE の ProcessQueue , FrameQueue を使用した。

- ProcessQueue 定期的に登録された Queue を監視する
- FrameQueue 遅延, パケットロスなどを指定してのリンクを表現する

ProcessQueue がこのノードの FrameQueue チェックして、出力時刻になっていたら、Frame を受け取る。

- 1) 自分からのフレームならば状態遷移の処理
- 2) 他からのフレームならば現在の状態に依存した処理

5.3 データの重複判定

データのフラッディングには多くの送信データが発生する。それらを判断するために送信中または送信待ちフレームをもとに xmitList というリストを構成する。

isDuplicate メソッド

データをフラッディングした場合、データの重複受信が問題となる。一度受信したフレームかどうかを調べる必要がある。xmitList を検索する。シーケンス番号とソースアドレスとディスティネーションアドレスで判定する。重複判定用のシーケンス番号を新たに追加したので、RIP の場合とはヘッダが異なる。よってフレームのペイロード部分で 1 octet 増加する。

isBacklog メソッド

ノードは何かジョブが残っている状態でタイムアウトとなりスリープ状態へ遷移する場合がある。そのような場合を考慮しノードは wakeup ごとに isBacklog メソッドを呼び出す。isBacklog メソッドはジョブが残っていないか確認する。残っている場合は送信待ち状態へ遷移する。また、全ての送信が終了していない中継フレームもしくは検針フレームがあるか確認する。スリープは一定間隔で発生するが全てのデータ送信が完了した場合、そのタイミング

でスリープになる．その場合すでにイベント予約された一定間隔のスリープが不必要になる．図 5 中の 1 のイベントである．このイベントを削除するためにキューに入っているフレームをポインタで記憶しておき検索キーワードとすることで，イベントの削除が出来る．

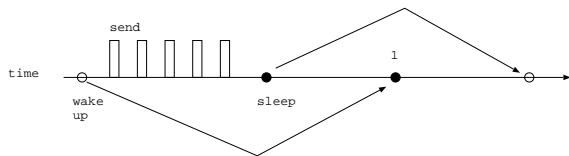


図 5 イベントタイミング

6 性能評価

RIP をもとにしたルーティング方式とフラッディングをもとにしたルーティング方式と比較し評価する．

消費電力

基地局においての 1 日当たりの平均消費電力は以下のようになった．

- RIP : 3.3mAh/day
- フラッディング : 5.63mAh/day

相対的にデータ通信が増加するフラッディングにおいて電力消費の増加は必然である．しかし，RIP を応用したルーティング方式の場合，中継回数が多いノードが必要となり，負荷が集中する可能性があったが，フラッディング場合は特定ノードに中継が多くなることが RIP に比べて少ないので，負荷分散される．

通信の信頼性

RIP を用いたルーティング方式では，基地局と目的地ノードの距離に比例して通信の成功率は低下した．さらに一年間分の実験を通して，一度も返信が確認されないノードが存在した．フラッディングを用いたルーティング方式では，各ノードがそれぞれ同一データを 5 回ずつ通信したところ全てのノードからの返信を確認することができた．多くの返信を確認できたノード 6 は 220 回/年，最小はノード 27 で 25 回/年である．図 6 に全てのノードについての成功回数を示す．

本研究で提案したフラッディングを用いたルーティング方式の今後の課題について考察する．ノード数と同一データの再送回数には大きく関係がある．

- ノード数:30
- 再送回数:10

以上の値でパラメータを設定した場合，全てのノードが送信待機状態となりビーコンを送信するノードがなくなりシステムがダウンした．

nodeID(RIP)->(flooding)

24(base)	25(365)->(61)	26(354)->(171)	27(266)->(159)	28(89) ->(98)	29(189)->(110)
18(365)->(220)	19(364)->(85)	20(278)->(98)	21(189)->(171)	22(158) ->(37)	23(81) ->(49)
12(363)->(146)	13(364)->(37)	14(288)->(49)	15(172)->(50)	16(83) ->(38)	17(41)->(47)
6(363)->(73)	7(358)->(52)	8(224)->(61)	9(209)->(25)	10(86) ->(66)	11(60)->(23)
0(339)->(45)	1(345)->(39)	2(229)->(24)	3(0) ->(25)	4(89) ->(38)	5(80)->(27)

図 6 成功回数一覧

7 おわりに

本研究ではフラッディングを使用し信頼性の向上を提案した．RIP をもとにした通信方式の場合は全てのノードとの通信が不可能であったが，フラッディングを用いた場合は全てのノードとの通信が確認できた．しかし，ネットワーク全体における通信の総成功回数が減少した．その原因はデータ送信待機中にデータ受信できないという点である．送信待機時にデータを受信可能にするため，仕様や状態遷移の考察が必要がある．

仕様を改善する場合，現在は受信側のみビーコンを送信するという仕様になっているので，送信待機状態と受信待機状態に分ける必要がある．ノードが起動している時はビーコンを送信するという仕様に変更する．しかし，仕様を改善すると状態遷移を大きく変更する必要がある．

状態遷移のみを改良する場合は送信回数の上限に達していなくても，データ送信を中止し，データ受信状態に遷移する．このとき中止した送信データを保持するか，破棄するかは端末の性能に依存する．

参考文献

- [1] Hatauchi, T.: PHY and MAC Proposals for battery operated SUN, <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0285-00-004g-mac-and-phy-proposal-for-80201504g-for-smart-utility-networks.ppt>, (May 2009).
- [2] Sugiyama, Y. and Goto, K.: Design and Implementation of a Network Emulator using Virtual Network Stack, *Proc. of the Seventh International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA2008), Lecture Notes in Operations Research, Vol.8*, pp. 351–358 (2008).
- [3] 泉井雄仁，後藤邦夫：省電力端末を用いた無線センサネットワークにおける高信頼通信の提案，第 9 回科学技術フォーラム講演論文集，L-005(DVD-ROM) (Sep. 2010).