

受信端末駆動無線マルチホップネットワークにおける 無線チャネルの品質変動に対するロバスト性

小南 大智[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†] 畠内 孝明^{†††}

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪府立大学総合リハビリテーション学部 〒 583-8555 羽曳野市はびきの 3-7-30

^{†††} 富士電機システムズ 〒 191-8502 日野市富士町 1

E-mail: [†]{d-kominami,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp,

^{†††}hatauchi-takaaki@fesys.co.jp

あらまし 無線センサネットワークの主な課題の1つに無線チャネル品質の不安定性に対する通信信頼性の向上がある。掲記方式は、各無線機が間欠的に自身のIDを周囲に送信し、自身が受信可能状態であることを通知することにより通信を行う方式であり、省電力性と高信頼性を目指して提案された。本稿では、様々な周期で発生する無線チャネル品質の変動について、掲記方式の定めるMAC層およびルーティング層のいずれの層が通信の信頼性を保証すべきかを議論し、計算機シミュレーションを用いた評価によってそれらを明らかにする。シミュレーションによる評価より、短い変動周期に対してはMAC層による対応が、長い変動周期に対してはルーティング層による対応が効果的であることを示す。さらに双方を組み合わせることで、パケット収集率の最小値を46.6%から80.1%に向上できることを示す。

キーワード センサネットワーク, 間欠動作, ロバスト性, シミュレーション

Robustness of intermittent receiver-driven wireless networks against fluctuations of wireless channel quality

Daichi KOMINAMI[†], Masashi SUGANO^{††}, Masayuki MURATA[†], and Takaaki HATAUCHI^{†††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

^{††} School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University
3-7-30 Habikino, Habikino-shi, Osaka, 583-8555, Japan

^{†††} Fuji Electric Systems
1, Fujicho, Hino-shi, Tokyo, 191-8502, Japan

E-mail: [†]{d-kominami,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp,

^{†††}hatauchi-takaaki@fesys.co.jp

Abstract Ensuring robust data collection against the instability of the wireless channel is the big subjects in realization of wireless sensor networks. In the intermittent receiver-driven data transmission (IRDT) protocol, which aims to save energy and get high reliability, communication between nodes commences when multiple receiver nodes transmit their own IDs intermittently and a sender node receives them. In this paper, we clarify which layer of MAC or routing should guarantee the communication reliability when the wireless channel quality fluctuates at various cycles. By computer simulation, we show that the MAC-layer setting is advantageous to the short cycle fluctuations of the wireless channel and that the routing-layer modification has a favorable effect when the wireless channel fluctuates at long cycle. Moreover, we show that the combination of the MAC-layer settings and the routing-layer modification can attain 33.5% improvement in minimum packet collection ratio.

Key words Sensor network, Intermittent operation, Robustness, Simulation

1. まえがき

近年、無線センサネットワークに関する関心が高まり、広く研究が行われている。その中で解決すべき技術的課題として、センサ端末の小型化や低コスト化、無線通信の信頼性の向上、省電力化等がある。特に有限容量のバッテリーによって動作するセンサ端末においては、システムの長寿命化のために省電力化が重要な課題となる。省電力化のアプローチとしては、回路の微細化、充電機器の搭載、ノードにスリープ状態を設けるメディアアクセス制御 (MAC)、送信電力を抑制するために中継転送を用いるマルチホップルーティング等が研究されている [1-4]。

中でも非通信時にノードの無線機能をスリープ状態とし、間欠的に無線機能を起動して通信を行う間欠通信によって、消費電力の大きな削減が可能である。これはスリープ時の消費電力が起動時の数百から数千分の一であることに基づいている [5]。間欠通信は起動タイミングの制御方法によって、同期式 [4, 6, 7] あるいは非同期式 [8-10] に分類できる。トラフィック負荷が小さい場合には、同期のためのオーバーヘッドを要しない非同期式が、電力消費の抑制では優れていると考えられる。そこで我々は、自動検針システムを対象とした通信方式として、受信端末駆動型の非同期間欠通信方式である Intermittent Receiver-driven Data Transmission (IRDT) を提案した [11]。IRDT は信頼性の向上と消費電力の抑制を目的としており、現在 IEEE 802.15.4 におけるスマートメータリングシステムの標準プロトコルの一部として提案中である [12]。これまでに我々は、IRDT と送信端末駆動型の Low Power Listening (LPL) [9] 方式と比較することで、その基本性能を明らかにしてきた [13]。

IRDT は物理層からネットワーク層までの機能を規定しており、特にデータリンク層におけるリンクの確立方式が複数ノードとの通信を可能としているため、メッシュネットワークを構築する。さらに、非同期式の MAC では、データを送信するノードは通信相手が起動するまで待機する必要がある、この時多くの電力を消費してしまうが、IRDT は複数ノードとの通信が可能であるためこの待機時間を削減できる。以上の特徴によって IRDT は高い通信信頼性と省電力化を実現している。具体的な IRDT の動作は図 1 に示している。IRDT は受信端末駆動の通信方式であり、各端末は間欠周期ごとに自身の ID を周囲に送信して、自身が受信可能状態であることを通知する。データを所持しているノードは ID の受信を待機し、受信した ID が通信先候補からのものであれば送信要求 (SREQ) パケットを送信する。さらに SREQ 受信確認を通知する RACK パケットの到着後にデータパケットを送信して、データ受信確認の DACK パケットを待つ。

省電力化以外の重要な課題として、環境変動に対するシステムの耐性向上がある。環境変動によってネットワークの経路が変化することで、システム全体のパフォーマンスが劣化してしまうことを防ぐため、不安定な無線リンク、ノードの電力枯渇や故障によって発生する経路変動に対して、宛先ノードへの接続性を維持することが必要となる。IRDT におけるデータ送信ノードは、通信先候補となるノードから ID が届いた場合に

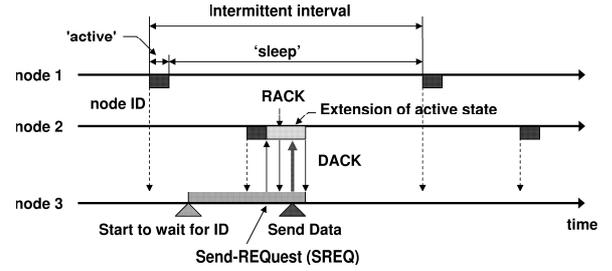


図 1 Intermittent Receiver-driven Data Transmission (IRDT) におけるリンク確立

データの送信を行えばよく、例えば局所的なノードの故障やリンク障害が発生した場合にも代替経路を柔軟に利用することができる。一方チャンネルの変動により頻繁にバーストエラーが発生する状況は無線通信において無視できない問題である [14]。非常に短い周期で無線チャンネルが変動し、バーストエラーが発生する状況では、誤り訂正ができずにパケットレベルでの再送が必要となってくる。また、変動の周期が長くなると、通信相手となるノードとのデータリンクレベルでの再送や、異なる経路の利用によるルーティングレベルでの対応を要し、さらに長い変動周期では、各ノードの持つ経路情報自体の更新、トランスポートレベルでの再送の必要性が高まる。すなわち、異なる変動周期ごとに異なるレイヤからの対応が必要となる。通信プロトコルがチャンネル変動への対処を行わなければ、データ収集の失敗や収集遅延時間の増加、消費電力の増大などの問題が生じてしまう。

本稿では、IRDT における無線チャンネルの品質変動に対するロバスト性を評価する。ここでロバスト性とは、チャンネル変動が生じた場合にもシステムの性能が悪化せず元の状態を維持する性質と定める。ギルバートモデル [15] を用いることで様々な周期のチャンネル変動をモデル化し、計算機シミュレーションによって、チャンネル変動が IRDT を用いたシステムに及ぼす影響を明らかにするとともに、各レイヤのパラメータを適切に設定することで、チャンネル変動への耐性を高める方法を議論する。

2. Intermittent Receiver-driven Data Transmission の概要

2.1 MAC 層

IRDT の MAC 層では、図 1 に示したとおりの手順でリンクを確立する。そのため、受信ノードとしてのリンク確立の機会は、各ノードが間欠周期ごとに一度だけ得られることになる。いずれのパケットを送信する際にも CSMA/CA による衝突回避を行うが、パケットの種類によって再送制御は異なる。ID および SREQ 送信の前には CSMA/CA に基づきキャリアセンスを行うが、この際に現在通信中のノードがある場合にはこれらのパケット送信を行わない。他のパケットについては、隣接するノードが通信中の場合、ランダムなバックオフ時間待機した後に再送を最大で 5 回行う。 n 回目の再送を行う際のバックオフ待機時間 T_b は、 $i = \min\{BE_{max}, \max\{n + 2, BE_{min}\}\}$ 、整数 rnd を 0 から $2^i - 1$ の乱数値と定めるとき、 $T_b = 20 \times T_{sym} \times rnd$

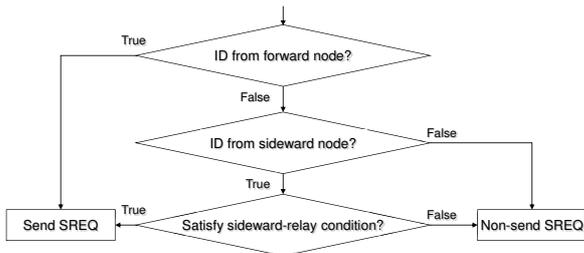


図 2 ルーティング関数の例

で与えられる．ここで， T_{sym} は 1 シンボルの送信に要する時間である．各ノードは SREQ の受信を T_S ，RACK，データ，DACK の受信を T_D だけ待機するが，この時間は T_b によって適切に設定する必要がある．またこのリンク確立手順において，データパケットを所持するノードへ適切なノードからの ID や RACK，DACK パケットが届かない，あるいは届いてもビットエラーが生じている状況が考えられる．この際には，この送信ノードはどこにもデータを送れずに起動し続けるため，非常に多くの電力を消費してしまう．これを防ぐために，各ノードは最大データ所持時間を T_{dt} としてタイマで管理しており，同一のデータを所持し始めてから T_{dt} だけ時間が経過すると，ノードはそのデータを破棄する．

2.2 ルーティング層

IRDT のルーティングは距離ベクトル型ルーティングに基づいており，全てのノードは経路テーブルとルーティング関数をデータパケットの送信決定のために用いる．例えば図 1 では，ノード 3 はノード 2 の ID の受信後にルーティング関数に基づきノード 2 を送信先として決定し，SREQ の送信を行っている．

2.2.1 ルーティングテーブル

経路テーブルには全てのノードまでの最小ホップ数が登録されており，ID を受信した際にその ID を送信したノードまで 1 ホップで到達可能であると登録される．この ID の受信のために，各ノードはサンプリング周期 (T_i) ごとに起動して ID の受信を待機する．この時，2 ホップ以上先の情報を得るためには隣接するノードとテーブルを交換する必要がある．各ノードは ID のサンプリングの際に必要なであればテーブルの交換を行う．テーブル更新が必要かどうかについては，テーブルにシーケンス番号 (TSN) を対応させ，テーブルの内容に変更があるごとに TSN をインクリメントすることで管理する．ID パケットにこのシーケンス番号を含めて送ることで，交換の必要性が判断できる．具体的なテーブル交換の手順は以下の通りである．

(1) サンプリングの際に受信した ID パケットに含まれる TSN を参照する．同時に，自身が以前受信したテーブルの TSN を参照し，最新のテーブルを所持しているか調べる．

(a) テーブルが最新のものである場合，テーブル交換不要通知 (TBNX) パケット処理を送る．

(b) テーブルが最新のものでない場合，テーブル交換を行うために (2) 以降の処理を行う．

(2) テーブル交換要求 (TBEX) パケットを送信する．

表 1 IRDT における基本パラメータ値

パラメータ名	デフォルト値
BE_{min}	3
BE_{max}	5
T_{sym}	0.2 ms
T_S	2.0 ms
T_D	20 ms
T_{dt}	5 s
T_i	1 h
TTL	$H + 5$

TBEX には宛先ノードから以前受け取ったテーブルの TSN (TSN1) と，自身のテーブルの TSN (TSN2) を含める．

(3) 自身宛の TBEX を受け取ったノードは，TSN1 と自身のテーブルの TSN とを比較し，以前のテーブルと最新のテーブルの差分を求めて Table パケットとして返信する．そのために，各ノードは自身のテーブルの履歴を保持しておく必要がある．また，TSN2 を調べて，ID を送ってきたノードの最新のテーブルが必要となった場合は，Table パケットに相手のテーブルの TSN を追加する．

(4) Table パケットを受信したノードは，必要であれば自身もテーブルを送り，必要ないならば ID サンプリングに戻る．

これらの隣接ノード情報およびテーブル管理はソフトステートに行う．周期 T_i のサンプリングを終えるごとに ID の送信を確認できないノードとの隣接関係はリセットされ，そのノードと以前交換したテーブルは破棄される．

2.2.2 ルーティング関数

ルーティング関数は SREQ パケットの送信を決定する論理関数である．図 2 には，最小ホップルーティングを行いつつ，横向き転送条件を満たす際には迂回路を利用する関数を例示している．ここで，‘forward node’ とは宛先により近い隣接ノード (前向きノード) であり，‘sideward node’ とは宛先までの距離が等しい隣接ノード (横向きノード) である．また，横向き転送条件の例としては「全前向きノードへの送信に失敗している場合は真を返す」などがあり，IRDT ではこの条件を利用している．横向き転送を効率的に用いることでノードの故障等が発生した場合も，柔軟に迂回経路を利用することが可能となるが，一方でループ経路の発生や迂回の連続が生じてしまう．これらの状況を防ぐために，各データパケットには TTL を設定している．表 1 にここまで説明したパラメータとその基本的な設定値を示す．ここで，表における H は，自身の経路テーブルから得られる宛先ノードまでの最小ホップ数である．

3. チャンネル変動に対する IRDT のロバスト性向上

3.1 無線チャンネル変動モデル

無線チャンネルにおけるパケット受信時のバーストエラー発生をギルバートモデル [15] を用いてモデル化する．ギルバートモデルではチャンネルは good と bad のいずれかの状態をとる．各状態のビットエラー率はそれぞれ P_g ， P_b と異なる値であり， $P_g \ll P_b$ である．また，各状態における次状態への遷移確率

は, good から bad へは P_{gb} , bad から good へは P_{bg} で表され, この遷移はチャネル変動周期ごとに, ネットワーク中の各リンクについて起こる. 当然, good および bad での非遷移確率はそれぞれ $1 - P_{gb}$, $1 - P_{bg}$ となる.

3.2 MAC における向上方法

1. で述べたように, MAC プロトコルによって, 短い周期で無線チャネルが変動する状況への対応が可能である. 本稿では最大データ所持時間 T_{dt} を増加させることで, 短い周期の変動に対応する. ノードの間欠周期が T の場合, 送信ノードは少なくとも $\frac{T_{dt}}{T}$ 回だけ隣接ノードへのデータ送信を試みることが可能となる. 実際は複数の通信相手を利用することで, 送信の機会をさらに増加するが, いずれにせよ T_{dt} を増加させることでリンク確立試行回数は増え, チャネル変動によってパケットレベルで正常受信に失敗する場合にもデータ収集率を向上できる.

3.3 ルーティングにおける向上方法

無線チャネル変動の周期が長くなるとネットワークポロジ自体が変化したが, 各ノードの持つ経路情報の更新頻度が低い場合には実際の経路とは異なる情報を所持することになる. そのため, 宛先ノードにより遠いノードへのデータ転送や, 正常に届くことのない ID の待機などの問題が発生してしまう. これにより, 最大データ所持時間 T_{dt} の超過, データパケット被転送回数の TTL 超過が生じ, データパケットが破棄されてしまう. この問題に対しては, ルーティングレベルでの対応, あるいは経路情報の更新頻度の変更による対応, トランスポートレベルでの対応を要する. 本稿ではルーティングによる対応として, 横向き転送条件を変更する. このことにより, T_{dt} が超過する前にいずれかの隣接ノードにデータを送る可能性が高くなる. また, 経路情報の取得周期であり更新周期でもある T_i を短縮することで, 各ノードの所持する経路情報を最新の情報に近づけ, TTL の超過を防ぐ.

4. シミュレーション結果

4.1 シミュレーションモデル

この章では, C++ で作成したイベントドリブンモデルの計算機シミュレーションプログラムを用いて, チャネル変動に対する IRDT の性能とロバスト性を評価する. チャネル変動周期を 10 ms, 100 ms, 1 s, 10 s, 100 s, 1000 s の 6 値それぞれに設定した時の, パケット収集率, 平均遅延時間, 平均消費電力を調べ, IRDT におけるそれぞれのロバスト性について議論する. また, 3. で説明したアプローチによって, IRDT のロバスト性向上を行える点を明らかにする. パケット収集率とは, シンクノードに届いた, 重複を除いたデータパケットの数を, センサノードにおいて発生したデータパケットの総数で割った値である. このとき届いた全パケットについてパケットが発生してからシンクノードに到着するまでの時間を求め, その平均値を平均遅延時間としている. また, 平均消費電力は, 全ノードにおける消費電力の総和をノード数で除算したものである.

ネットワークモデルとして一辺 300 m の正方領域を想定し, そこに 50 個のセンサノードをランダムに配置し, その内の 1 つをシンクノードとして領域の隅に設置する. 各センサノード

表 2 パラメータ設定値

パラメータ名	値
シミュレーション時間	6 h
間欠周期	1 s
パケット発生率 (λ)	0.002 packet/s/node
無線速度	100 kbps
通信範囲	100 m
送信時電流	20 mA
受信時電流	25 mA
スリープ時電流	0 mA
ID, SREQ, TBEX パケットサイズ	24 byte
データパケットサイズ	128 byte
RACK, DACK パケットサイズ	22 byte
P_g	0
P_b	1

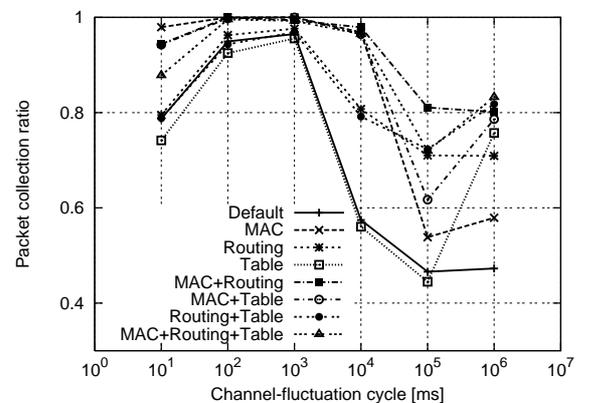


図 3 パケット収集率

では平均 λ のポアソン過程に従ってデータパケットが発生し, シンクノードへマルチホップで送る. データの収集は, 初期設定として一定時間経路テーブルを交換した後で行われる. また, シミュレーションにおけるパケット受信モデルとして以下の 3 点を仮定する.

- 通信範囲内に存在するノードに対して送信する電波の減衰は起こらず, 通信範囲内のノードに対しては 100% の確率でパケットが届く.
- パケット受信中に別のパケットと衝突した場合には, ビットエラーによっていずれのパケットも受信できずに破棄される.
- チャネルの状態によるビットエラーの発生はパケット受信終了直後の状態で決定され, P_g あるいは P_b に従って発生する.

また, シミュレーション中のパラメータ設定に関しては, 表 2 に示したとおりである.

4.2 ロバスト性評価

図 3 には, チャネル変動周期を変化させるときの収集率の変化を示しており, また, 数値結果に関してを表 3 に示している. 図中のラベルは IRDT の MAC 層およびルーティングの動作を表わしており, ‘Default’ では 2. で説明した基本的な設定を利用している. ラベル ‘MAC’ では T_{dt} の値を 30 s に, ‘Table’ では, T_i を 300 s に設定しており, ‘Routing’ では横向き転送

表 3 チャンネル変動に対する収集率 [%]; 薄灰色が 5 % 以上, 濃灰色が 20 % 以上の向上を表す

	10 ms	100 ms	1 s	10 s	100 s	1000 s
Default	78.8	95.0	96.5	57.5	46.6	47.3
MAC	98.0	100	100	96.9	53.8	57.9
Routing	79.5	96.3	97.6	80.8	71.0	70.9
Table	74.2	92.5	95.5	56.0	44.5	75.7
MAC+Routing	94.4	100	99.4	97.9	81.1	80.1
MAC+Table	94.3	99.8	100	96.5	61.7	78.6
Routing+Table	78.8	94.3	96.9	79.1	72.3	81.8
MAC+Routing+Table	87.8	99.6	99.3	96.5	72.0	83.3

条件を「50%の確率で真を返す」としている。さらにこれらの設定を組み合わせることで、複数のチャンネル変動周期に対してもロバスト性を向上することが可能となる。図において、10 ms から 10 s の変動周期では「MAC」を用いたいずれの場合でも収集率が改善しており、特に「MAC」のみを利用する場合には、これらの変動周期において 96.9% 以上の収集率を示している。また、100 ms, 1 s の変動周期では「Default」を用いた場合でも 95% 以上の高い収集率が得られており、これは複数の通信経路を利用できるという IRDT が本来持つ高い信頼性による結果である。「MAC」とは逆に、「Table」ではテーブルの交換が他の通信を阻害しているために、最大でも 4.6% 程度ではあるが収集率が低下している。図 4 には最大データ所持時間 T_{dt} の超過によるパケット破棄が発生した回数をチャンネル変動周期ごとに示しており、「MAC」によって短い変動周期におけるパケット破棄数が減少していることが分かる。一方でチャンネル変動周期が 10 s 以上の場合には、「Routing」によって大きく収集率が改善されているが、図 5 から分かるように、単純な確率に従って迂回路を利用するため、TTL の超過によるパケットロスが生じる回数も増加している。また変動周期が 1000 s の場合を見ると、「Table」によって収集率が改善していることが確認できる。これは、変動周期よりもチャンネルの更新周期のほうが短いことで、各ノードがより新しい経路情報を所持できているためであるが、前述の通り他の変動周期に関してはテーブル交換のオーバーヘッドが問題となり収集率の低下を引き起こす。図において最もロバスト性が高いといえるのは「MAC+Routing」の組み合わせであり、「Default」において 46.6% となっていた最低の収集率を 80.1% まで改善できている。

平均遅延時間については、図 6 に示しており、「Default」と比較すると、「MAC」を用いる場合は遅延時間が増大し、「Routing」を用いて迂回を行う場合はほとんど遅延時間が増加していない。すなわち通信候補となるノードからの ID が届きにくい場合には、特定の通信候補へのデータ送信を優先するよりも、一旦すぐに使える迂回路を利用することが有利に働いている。一方で「MAC」は高い収集率を得るためには必要な機能であり、これらはトレードオフの関係にあるといえる。以上の結果より、平均遅延時間に関してロバストなネットワークを構築する場合には、「MAC」の利用よりも、「Routing」が効果的であるといえる。

図 7 に示した平均消費電力は平均遅延時間と同じ傾向を示している。遅延時間が発生する最大の原因は送信ノードの ID 待

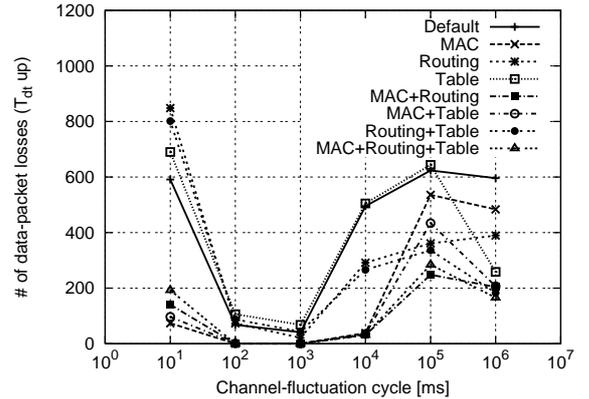


図 4 T_{dt} 超過によるパケット破棄数

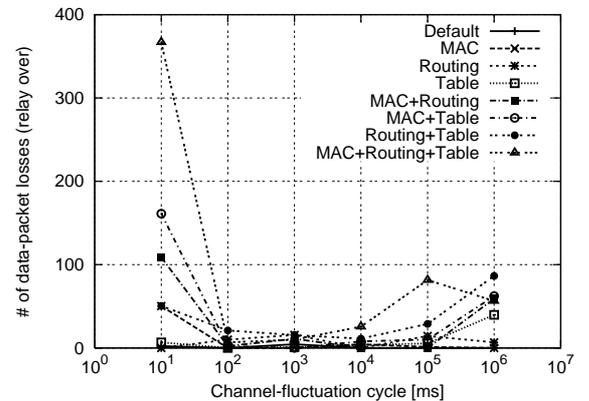


図 5 TTL 超過によるパケット破棄数

機時間であり、ID を待機している間は送信ノードは起動状態を取るため、その時間に比例して電力を消費する。よって、平均遅延時間と同様に、「MAC」によって平均消費電力が増加しており、「Routing」ではほとんど増加しない。10 ms の変動周期において「Routing」と「Default」の差が見られるのは、シンクノードまで届くパケット数が異なるからである。平均遅延時間と同様に、平均消費電力に関してロバストなネットワークを構築する場合には「MAC」よりも「Routing」が効果的であるといえ、平均遅延時間と同様に、平均消費電力とパケット収集率はトレードオフの関係にある。

5. まとめ

本稿では、受信端末駆動通信方式である IRDT に関して、様々な周期で発生するチャンネル変動に対するロバスト性を評価

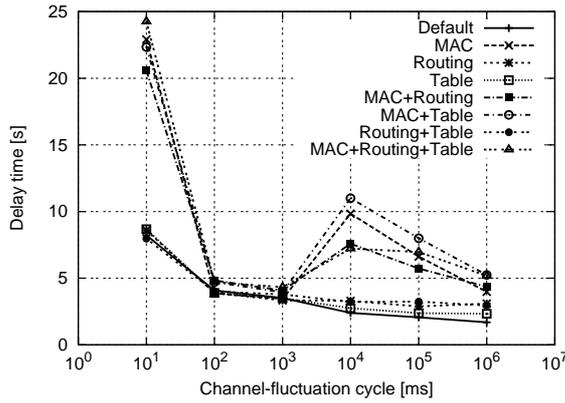


図 6 平均遅延時間

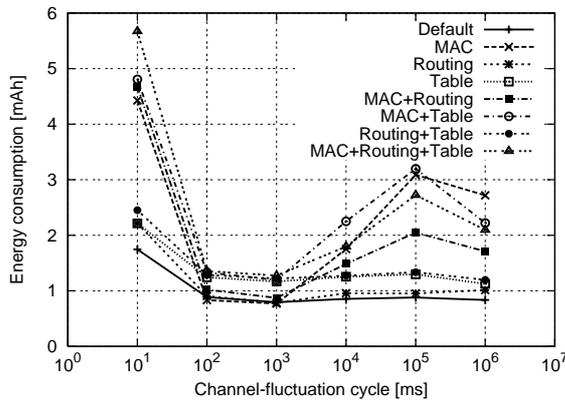


図 7 平均消費電力

した．チャネル変動によって生じるバーストエラーのモデル化のためにギルバートモデルを用いて，IRDT におけるデータ収集システムを想定した計算機上のシミュレーションによって，パケット収集率，平均遅延時間，平均消費電力を調べた．パケット収集率に関して，10 ms から 1 s 程度の短い変動周期に対しては MAC による対応が効果的であり，それ以上の周期ではルーティングアルゴリズムによる対応が効果的であることを示した．さらに双方を組み合わせることで，パケット収集率の最小値を 46.6 % から 80.1 % まで改善できることを示した．また，チャネル変動が発生する状況下における，パケット収集率と平均遅延時間，パケット収集率と平均消費電力の間のトレードオフについても明らかにした．今後の課題としては，トランスポート層でのデータ再送を含めたロバスト性の評価がある．エンドエンド間での再送によっていずれの変動周期に関しても高い収集率が得られることが期待できる．

謝辞 本研究の一部は，文部科学省科学研究費基盤研究 (A) 21240004，積水化学自然に学ぶものづくり研究助成プログラム，および大川情報通信基金によるものである．ここに記して謝意を表す．

- [1] X. Du, Y. Xiao and F. Dai: "Increasing Network Lifetime by Balancing Node Energy Consumption in Heterogeneous Sensor Networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, **8**, 1, pp. 125–136 (2008).
- [2] S. J. Baek and G. de Veciana: "Spatial Energy Balancing through Proactive Multipath Routing in Wireless Multihop Networks", *IEEE/ACM Transaction on Networking*, **15**, 1, pp. 93–104 (2007).
- [3] J. Polastre, J. Hill and D. Culler: "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, pp. 95–107 (2004).
- [4] K. Pister and L. Doherty: "TSMP: Time Synchronized Mesh Protocol", *Proceedings of the 20th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS)*, pp. 391–398 (2008).
- [5] "MICA2". available at http://www.xbow.com/products/product_pdf_files/wireless_pdf/mica2_datasheet.pdf.
- [6] Y. Wei, H. John and D. Estrin: "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 3, pp. 1567–1576 (2002).
- [7] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, J. Min and M. L. Sichitiu: "Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **16**, 3, pp. 511–524 (2008).
- [8] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson and R. Han: "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, pp. 307–320 (2006).
- [9] R. Jurdak, P. Baldi and C. V. Lopes: "Adaptive Low Power Listening for Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **6**, 8, pp. 988–1004 (2007).
- [10] E. A. Lin, J. M. Rabaey and A. Wolisz: "Power-Efficient Rendez-vous Schemes for Dense Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Vol. 7, pp. 3769–3776 (2004).
- [11] T. Hatauchi, Y. Fukuyama, M. Ishii and T. Shikura: "A Power Efficient Access Method by Polling for Wireless Mesh Networks", *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, **128**, 12, pp. 1761–1766 (2008).
- [12] F. Kojima, H. Harada, T. Hatauchi, M. Tanabe, K. Sakamoto, A. Kashiwagi, T. Banno and H. Nishiyama: "Low energy MAC for non-beacon enabled PAN". available at <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0594-01-00.pdf>.
- [13] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, T. Hatauchi and Y. Fukuyama: "Performance Evaluation of Intermittent Receiver-driven Data Transmission on Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 141–145 (2009).
- [14] R. Tal and L. Philip: "Burstiness and Scaling in the Structure of Low-Power Wireless Links", *SIGMOBILE Mobile Computer Communication Review*, **13**, 1, pp. 60–64 (2009).
- [15] E.N. Gilbert et al: "Capacity of a Burst-Noise Channel", *Bell. System Technical Journal*, **39**, 9, pp. 1253–1265 (1960).