

平成29年度 修士論文

エネルギーハーベスティング電源のための
適応的受信機駆動型MACプロトコルに関する研究

学籍番号 1631091

氏名 田邊 稜

指導教員 石橋 功至 准教授

電気通信大学 情報理工学研究科

情報・ネットワーク工学専攻

提出日 平成30年3月13日



概要

近年、周辺環境のエネルギーを利用して環境情報を収集するエナジーハーベスティング無線センサネットワークへの注目が高まっている。しかし、エナジーハーベスティングによる回収電力は確率的であるため、端末が瞬時的に電池切れを引き起こし、ネットワークの通信信頼性が著しく低下する可能性がある。そこで本研究では、端末の電池切れを抑圧する手法として、ENRI-MAC (Energy-Neutral Receiver-Initiated Medium Access Control) の提案を行う。ENRI-MACは、エナジーハーベスティングによる回収電力と消費電力の均衡を保つように端末をスリープ、起動させるものである。ENRI-MACにより、端末の電池切れが抑圧され、ネットワーク全体の通信信頼性が向上することを計算機シミュレーションおよび実環境実験を介して示す。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 システムモデル	4
2.1 ネットワークモデル	4
2.2 エナジーハーベスティングモデル	6
第3章 Intermittent Receiver-driven Data Transmission	8
3.1 IRDT	8
3.2 通信失敗確率解析	11
3.3 消費電力解析	13
3.4 数値結果	14
第4章 提案手法	19
4.1 PG 回路	19
4.2 ENRI-MAC	19
4.3 パラメータ設計	21
4.4 数値結果	22
第5章 実装および実験	26
5.1 実装	26
5.2 実験環境	31
5.3 実験結果	31
第6章 結論	34
謝辞	34
関連発表	35

目次

2.1	本稿で扱うネットワークの一例. 三角はゲートウェイ (GW) を表し, 点はセンサノード (SN) を表す	5
2.2	エネルギーハーベスティングモデル	6
2.3	遮蔽物密度 λ_s に対する日陰端末の割合 ϵ	7
3.1	IRDT の動作フロー. 横軸は時間の流れを表し, Tx, Rx の各時間における動作を示す. 上向き, 下向きの矢印は対応するパケットの送信を意味し, 色付きの四角は受信状態にあることを表す	9
3.2	IRDT における Rx 動作のフローチャート	9
3.3	IRDT における Tx 動作のフローチャート	10
3.4	端末の集合の一例. 三角は GW を表し, 点は SN を表す. また, GW を中心とする円は, クラスタリングレンジを表し, 塗りつぶし円は SN i の通信可能範囲を表す	11
3.5	間欠間隔に対する通信失敗確率	15
3.6	間欠間隔に対する RTR 衝突確率および SREQ 衝突確率	16
3.7	間欠間隔に対する T_g 単位時間におけるネットワークの総消費電力 [J]	17
3.8	間欠間隔に対する T_g 単位時間における Rx および Tx 駆動時のネットワークの総消費電力 [J]	18
4.1	Power Good 回路. VD は Voltage Detector を表す	20
4.2	IRDT, 動的制御付 IRDT および ENRI-MAC の ϵ に対するパケット損失率	23
4.3	IRDT, 動的制御付 IRDT および ENRI-MAC の ϵ に対する電池切れを起因とするパケット損失率	24
4.4	IRDT, 動的制御付 IRDT および ENRI-MAC の ϵ に対する端末の平均電流	25
5.1	Lazurite Sub-GHz および太陽光パネル AT-7665	27
5.2	Lazurite Sub-GHz の回路ブロック図	28
5.3	起動時の端末動作	29
5.4	実験環境	32
5.5	IRDT, ENRI-MAC における RO1 および RO2 のパケット所持確率	33

索引

- CRC, ... 巡回冗長検査 (Cyclic Redundancy Check)
- DACK, ... データ肯定応答 (Data ACKnowledgement)
- DATA, ... データパケット (Data packet)
- EH, ... エナジーハーベスティング (Energy Harvesting)
- EHWSN, ... エナジーハーベスティングワイヤレスセンサネットワーク (Energy Harvesting Wireless Sensor Network)
- EN, ... エネルギー均衡性 (Energy Neutrality)
- ENRI-MAC, ... Energy-Neutrality Receiver-Initiated MAC
- GW, ... ゲートウェイ (GateWay)
- IoT, ... モノのインターネット (Internet-of-Things)
- IRDT, ... Intermittent Receiver-driven Data Transmission
- MAC, ... 媒体アクセス制御 (Medium Access Control)
- PG, ... Power Good
- PLR, ... パケット損失率 (Packet Loss Rate)
- PPP, ... ポアソン点過程 (Poisson Point Process)
- PV, ... 太陽光電池 (PhotoVoltaic)
- RACK, ... 送信要求肯定応答 (ACKnowledgement for SREQ)
- RI-MAC, ... 受信機駆動型 MAC (Receiver-Initiated MAC)
- RO, ... 中継機 (ROuter)
- RTR, ... 受信可能通知 (Ready-To-Receive)
- Rx, ... 受信端末 (Receiver node)
- SN, ... センサノード (Sensor Node)
- SREQ, ... 送信要求 (Send REQuest)
- Tx, ... 送信端末 (Transmitter node)
- VD, ... Voltage Detector
- WSN, ... ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network)

第1章 序論

1.1 研究背景

様々なモノが無線通信を介してインターネットに接続することで相互に連携し、ユーザにサービスを提供するモノのインターネット (IoT: Internet-of-Things) への注目が高まっている。IoT 技術は、農業、工業、物流といった様々な社会インフラへの導入が想定される。これらのアプリケーションでは周囲の環境や状況などを認識する必要があり、ワイヤレスセンサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) による自律的な情報収集が必要不可欠である [1]。WSN により効率的な情報収集が可能となるが、喫緊の課題として、センサのエネルギー制約が挙げられる。WSN では多数のセンサが利用されるため、センサの回路およびバッテリーは小型かつ低コストであることが求められる。ゆえに、センサを限りなく低消費電力で動作させ、バッテリー切れに伴うバッテリー交換などのメンテナンスコスト削減を図る必要がある。エネルギー制約を緩和する手法として、エナジーハーベスティングワイヤレスセンサネットワーク (EHWSN: Energy Harvesting Wireless Sensor Network) が提唱されている [2]。EHWSN では、太陽光、風力、振動などからエネルギーを回収するエナジーハーベスティング (EH: Energy Harvesting) 電源をセンサ端末に具備することで、半永久的な情報収集が可能となる。しかし、EH による回収電力は確率的であるため、EHWSN であってもネットワークのエネルギー制約からは逃れられない。

また、WSN は様々なアプリケーションに利用されることが想定され、それらの要求に応じてカバレッジエリアを拡大、縮小する必要がある。そのため、WSN で利用される通信方式には、ネットワークの構造を容易に変更できる拡張性も省電力と併せて要求される。拡張性を満たす最も簡単な手法は、送信電力を増減させることによりセンサ一台当たりのカバレッジエリアを変更することであるが、増幅器などの利用により消費電力の増加を招く。もう一つの手法として、マルチホップネットワークの適用が考えられる。しかし、中継伝送によりセンサ当たりの情報送信回数および消費電力が増加するため、効率的かつ省電力な中継伝送を可能とする媒体アクセス制御 (MAC: Medium Access Control) プロトコルが必要となる。

マルチホップネットワークに適用可能であり、省電力性を併せ持つ MAC プロトコルとして、S-MAC が提案されている [3]。S-MAC は、頻繁に端末がスリープするネットワークのための同期型 MAC プロトコルであり、端末間で時間同期を行うことで同時にスリープ状態から起動し通信を行う。端末の起動時間を極限まで削減することで端末の省電力での駆動が可能となるが、情報送信とは別に時間同期のための通信が必要となり、消費電力が増大するという問題がある。さらに端末間で時間同期がずれてしまった場合には、さらなるオーバーヘッドが必要となり、消費電力が著しく増大するという問題がある。ネットワーク内での時間同期を必要としない非同期型プロトコルとして、X-MAC と呼ばれる送信機駆動型 MAC プロトコルが提案されている [4]。X-MAC では、間欠間隔と呼ばれる間隔毎に端末が別個に起動する。通信可能な端末を探知するために、送

信端末が送信要求 (SREQ: Send REQuest) を連続的に送信し、受信端末は SREQ を受信するために間欠的に短時間受信を行う。SREQ を受信した端末は応答を返し、送信端末は SREQ に対する応答があった端末へデータパケットを送信する。これにより、時間同期を行うことなくスリープする端末間での情報伝送が可能となる。しかし、SREQ の連続送信により、ネットワーク内のエアトラフィックが増加し、スループットが低下するという問題がある。

一方、文献 [5] において、受信機駆動型 MAC (RI-MAC: Receiver-Initiated MAC) が提案されている。X-MAC では送信端末が主導して通信を行うのに対し、RI-MAC では受信端末が主導して通信を行う。起動した受信端末は受信可能通知 (RTR: Ready-To-Receive) を周囲に送信し、起動した送信端末は RTR 受信のための連続受信を行う。RTR を受信した送信端末は、RTR を送信した端末へとデータ送信を行う。これにより、X-MAC と比較してエアトラフィックを低減しながら、端末間のリンクを確立することが可能となる。しかし、送信された RTR を複数の送信端末が受信した場合には、これらの端末が同時にデータを送信してしまい、干渉が発生する。この場合、データの再送が必要となり、スループットの低下、エアトラフィックの増加、ひいてはエネルギー利用率の低下を引き起こしてしまう。そこで文献 [6] では、RI-MAC を改良した IRDT (Intermittent Receiver-driven Data Transmission) が提案されている。IRDT では、RTR を受信した送信端末はデータパケットではなく、まず SREQ を送信し、受信端末は SREQ を受信すると、送信要求肯定応答 (RACK: ACKnowledgement for SREQ) を返送する。送信端末は、SREQ と RACK により端末間のリンクを確立した後にデータパケットの送信を行う。RI-MAC におけるデータパケットの衝突確率と IRDT における SREQ の衝突確率は同等であるが、SREQ はショートパケットであるため再送に必要なエネルギーが小さくなり、パケットの衝突によるエネルギー利用率の低減が可能となる [6]。X-MAC, RI-MAC, IRDT の性能は間欠間隔によって変動することが知られており、パケット衝突確率を低減させる間欠間隔制御手法が文献 [7] において提案されている。同手法により通信信頼性が向上することが計算機シミュレーションを介して示されているが、間欠間隔と通信信頼性の関係は経験的に得られたものであり、理論的な保証はなされていない。また、EHWSN では誤り訂正符号などで解決可能であるパケット衝突よりも、電池切れによるパケット損失を原因として性能が劣化することが明らかにされている [8]。そのため高信頼なネットワークの構築には、パケット衝突のみならず、端末の電池切れを抑圧する手法が必要となる。

端末の電池切れを抑圧するために、エネルギー均衡性 (EN: Energy Neutrality) という考え方が提唱されている [9]。EN は端末の消費電力と EH による回収電力が均衡した状態を表すもので、最も効率的なエネルギーの利用が可能となる。文献 [10, 11, 12] では、EN を満足させるようなデューティサイクル制御手法が提案されており、スループットの最大化、ネットワーク遅延の最小化が可能であることが示されている。しかし、この制御手法では端末の中央制御が必要であり、端末の消費電力の増加を招くため、EHWSN では望ましくない。

本研究では、IRDT の通信失敗確率および消費電力に関して理論解析を行い、間欠間隔との関係を明らかにする。また、理論解析から得た知見から、分散間欠間隔制御付き IRDT である ENRI-MAC (Energy-Neutrality Receiver-Initiated MAC) を提案する。ENRI-MAC では、各端末が理論解析に基づいた間欠間隔制御を自律的に行うため、中央制御を行うことなく、EN を満足させることが可能となる。電池切れの抑圧により、ENRI-MAC が従来手法と比較してより高い通信

信頼性を達成することを計算機シミュレーションを介して示す。さらに、提案手法を汎用ボード Lazrite Sub-GHz へ実装し、提案手法が実環境においてもより優れた通信信頼性を達成することを示す。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章で、通信路や EH などのシステムモデルを定義する。第 3 章において、本研究の基本となる IRDT について述べた後、IRDT の通信信頼性および消費電力について理論解析を行う。第 4 章で、提案手法である ENRI-MAC について述べ、その有用性を計算機シミュレーションから示す。また、第 5 章では、ENRI-MAC を実装し、実環境における有用性を実験から示す。最後に、第 6 章で本論文を総括する。

第2章 システムモデル

2.1 ネットワークモデル

図 2.1 に、本稿で扱うネットワークの例を示す。ネットワークは $1,000 \times 1,000$ [m²] のユークリッド閉領域であり、宛先端末であるゲートウェイ (GW: GateWay) はその原点に存在するものとする。また、センサノード (SN: Sensor Node) は密度 λ_N のポアソン点過程 (PPP: Poisson Point Process) [13] に従い分布する。ただし、各 SN は GW からの距離に応じて、 L [m] 毎にクラスタリングされており、GW 側のクラスタに属する端末へのみ情報送信する。

各端末間のチャネルは時不変周波数非選択性レイリーフェーディング環境を仮定し、各端末間のチャネル係数 h は平均 0、分散 1 の複素ガウス分布に従うものとする。このとき、各端末は等方性アンテナを具備しており、アンテナによる利得を 0 [dB] とすると瞬時受信電力 P_R [dB] は、

$$P_R = P_T + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{d}{|h|} \right) \quad (2.1)$$

と表すことができる [14]。ただし、 P_T [dB] を送信電力、 λ [m] を電波の波長、 d [m] を送受信端末間のユークリッド距離とする。各パケットは、理想的に誤り訂正符号化されているものとし、受信感度 P_S に対し $P_S < P_R$ の関係が成立していれば、正しく復号できるものとする。ただし、 $P_S < P_R$ の関係を満たす信号が同時に複数受信された場合、それらは干渉を起し、正しく受信できないものとする。また、各端末は各パケット送信前にキャリアセンスを行い、 $P_S < P_R$ の関係を満たす信号を理想的に検知可能とする。

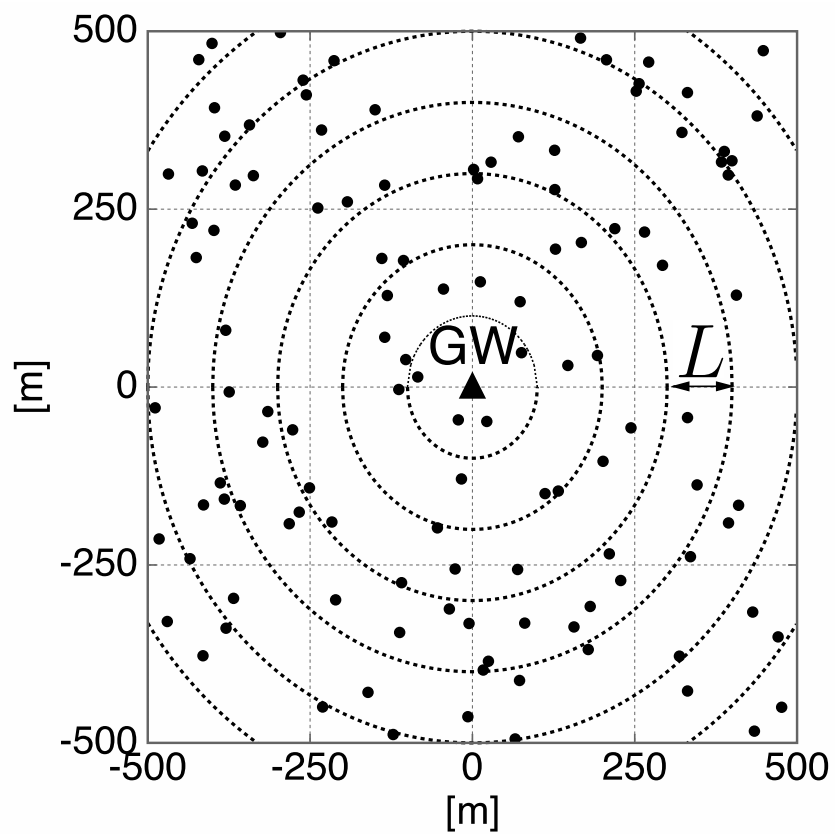


図 2.1: 本稿で扱うネットワークの一例. 三角はゲートウェイ (GW) を表し, 点はセンサノード (SN) を表す

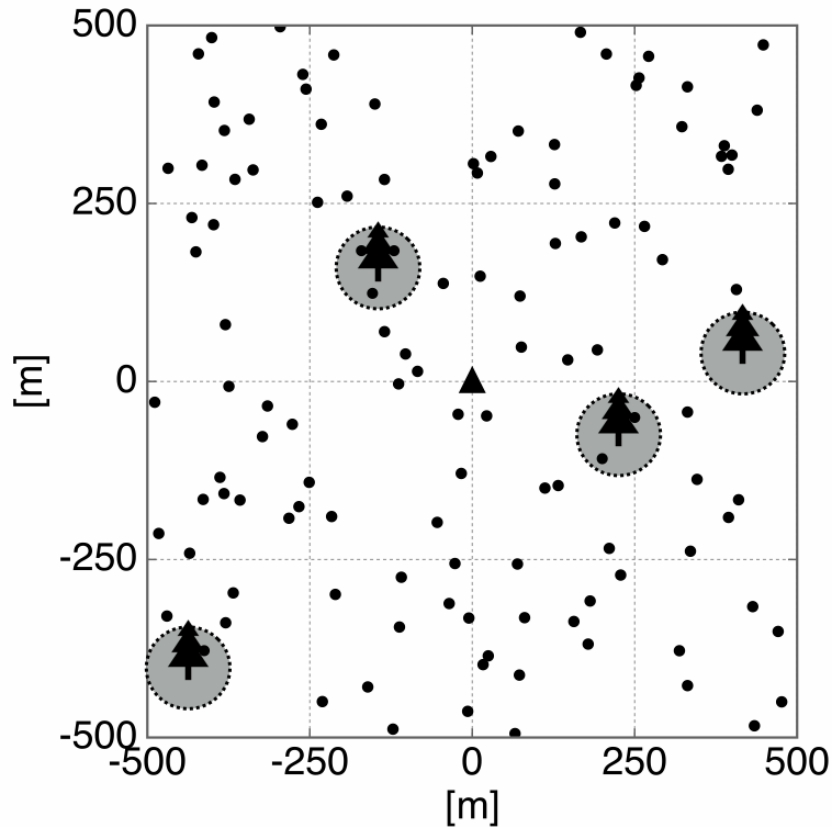


図 2.2: エナジーハーベスティングモデル

2.2 エナジーハーベスティングモデル

各 SN は電源として太陽光電池 (PV: Photo Voltaic), バッテリーとして容量 $0.5[F]$ のスーパーキャパシタを具備しており, スリープしている間に電力の回収を行うものとする. 一方で, GW は固定電源を具備しているものとする.

太陽光発電による回収電力は, 一般にマルコフ連鎖モデルを用いて表される [13]. しかし, 回収電力の遷移時間はパケットの送受信時間と比べて十分に大きいことから, 本稿では以下のような現実に即したモデル化を行う.

ネットワーク内には, 十分な回収電力が得られるだけの日光が照射しているものとする. ただし, 図 2.2 に示すように, 木や建造物などの遮蔽物が密度 λ_s の PPP に従い分布し, 遮蔽物から半径 $5m$ には日光が十分届かないものとする. このとき, 日向にいる端末, 日陰にいる端末の日照量, 単位時間当たりの回収電力を表 2.1 に示す. 以降では, 日向にいる端末を日向端末, 日陰にいる端末を日陰端末と呼称する. なお, 表 2.1 の値は実験的観測に基づいて設定されたものである.

ここで, 図 2.3 に遮蔽物の密度 λ_s に対するネットワーク内の全端末に対する日陰端末の割合 ϵ を示す. ただし, λ_s は対数表示とする. 第 4 章では, λ_s に対する提案手法の評価を行っているが, 簡潔さのために同図の ϵ に変換して表示することに留意されたい.

表 2.1: 日照量と回収電力

	日照量 [lx]	単位時間当たりの回収電力 [mW]
日向端末	100,000	87
日陰端末	1,000	0.7

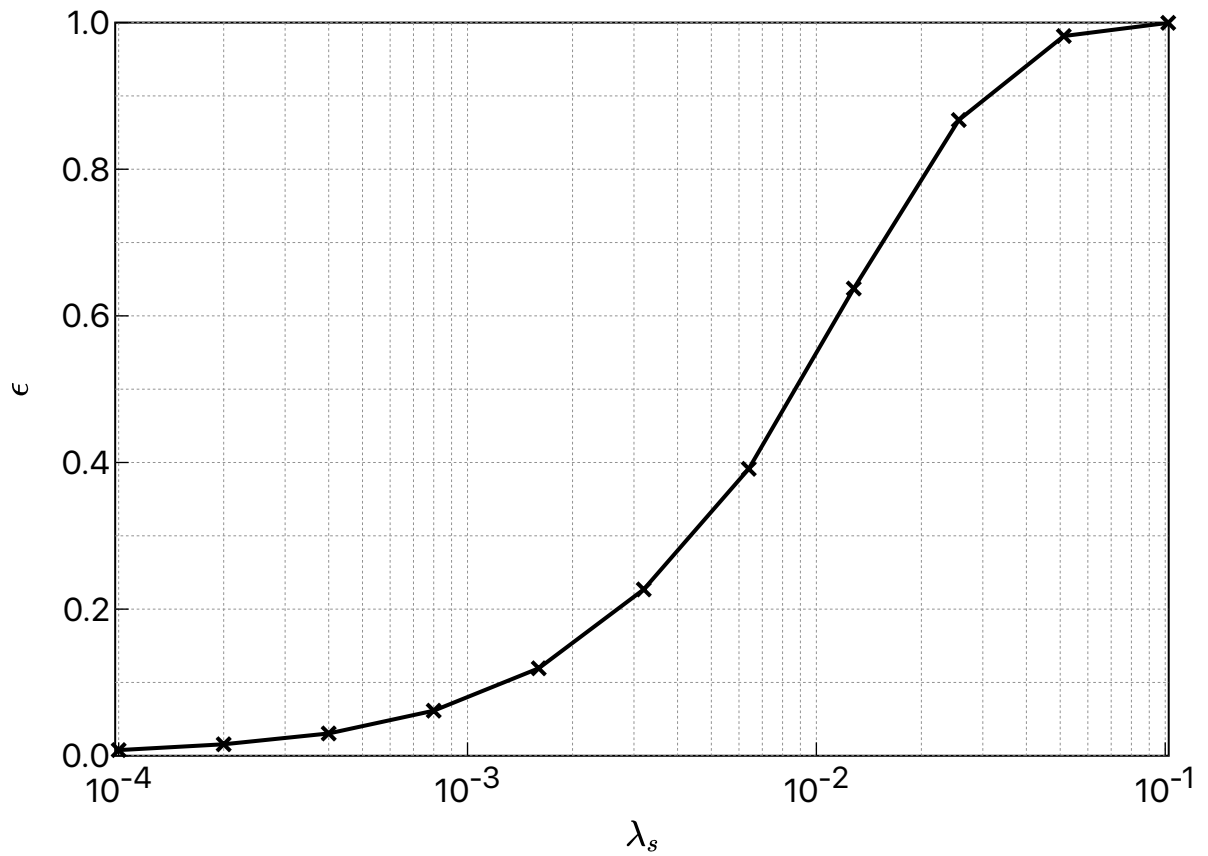


図 2.3: 遮蔽物密度 λ_s に対する日陰端末の割合 ϵ

第3章 Intermittent Receiver-driven Data Transmission

本章では、文献 [6] で提案されている IRDT の動作について説明する。その後、間欠間隔と通信失敗確率および消費電力の関係を理論的に明らかにするため、IRDT の通信失敗確率および消費電力に関して理論解析を行う。

3.1 IRDT

IRDT では、各 SN は送信端末 (Tx), 受信端末 (Rx) としての役割を併せもち、適宜、役割に応じた動作を行う。以降では、一ミリ秒を一単位時間として定義する。このとき、 $SN_i = 1, 2, \dots$ および GW は、 $T_R^{(i)}$ および $T_R^{(GW)}$ 単位時間を一区間として、一区間中の任意のタイミングで起動する。また各 SN は、 T_g 単位時間毎を一区間として、一区間中の任意のタイミングでデータパケット (DATA) を生起する。起動した SN は、パケットを所持している場合は Tx, 所持していない場合には Rx として駆動する。

図 3.1 に IRDT における端末の動作フローを示す。起動した Rx は RTR の送信を行い、その後 SREQ 受信のために短時間受信を行う。一方、Tx は RTR 受信のために連続受信を行い、RTR を受信すると即座に SREQ の送信を行う。RTR を受信できなかった場合には、Tx は所持している DATA を破棄し、スリープ状態となる。SREQ を受信した端末は RACK を Tx へ送信し、端末間のリンクを確立する。リンクの確立後、Tx は DATA を送信し、Rx が DATA を正しく受信できた場合には、データ肯定応答 (DACK: Data ACKnowledgement) を送信し、通信を終了する。Tx は SREQ 送信後の T_{wr} の短時間受信中に RACK を受信できない場合、再び SREQ 送信待機状態となる。ただし、同一端末が常時 Tx となることを防ぐため、SREQ の再送信は最大 $C_S = 3$ 回までしか行われえないものとする。また、DACK を受信できない場合には、DATA の再送信を行う。DATA の再送は、最大 $C_D = 3$ 回まで行われ、SREQ もしくは DATA の再送を取りやめた場合、Tx は所持している DATA を破棄するものとする。なお、Rx, Tx の動作の詳細をまとめたフローチャートを図 3.2, 3.3 に示す。

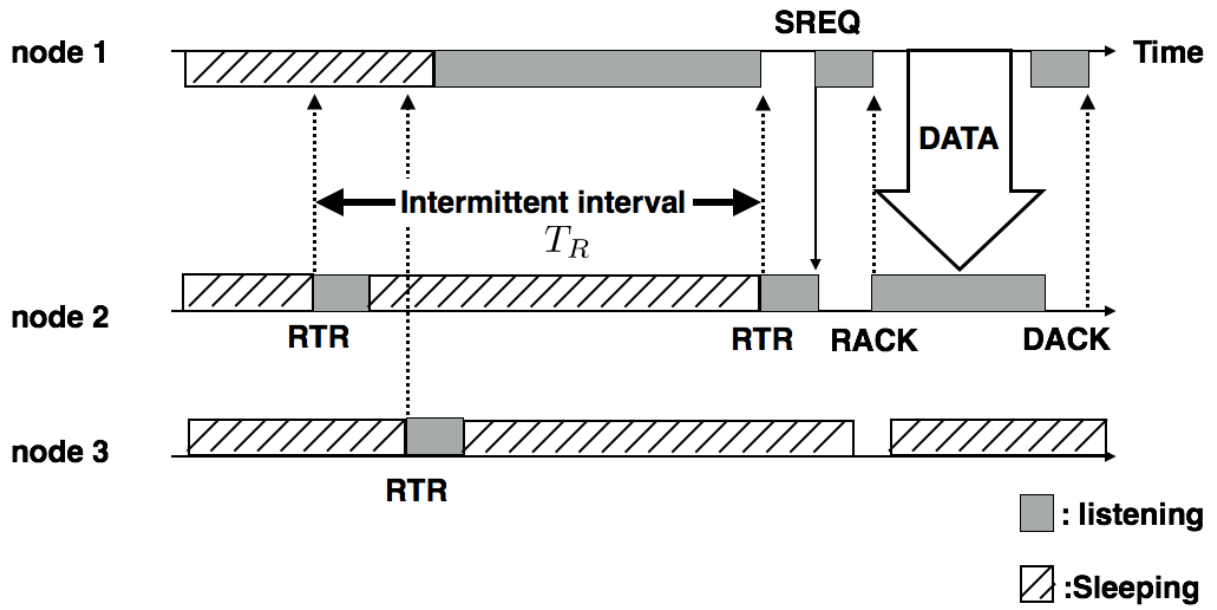


図 3.1: IRDT の動作フロー. 横軸は時間の流れを表し, T_x , R_x の各時間における動作を示す. 上向き, 下向きの矢印は対応するパケットの送信を意味し, 色付きの四角は受信状態にあることを表す

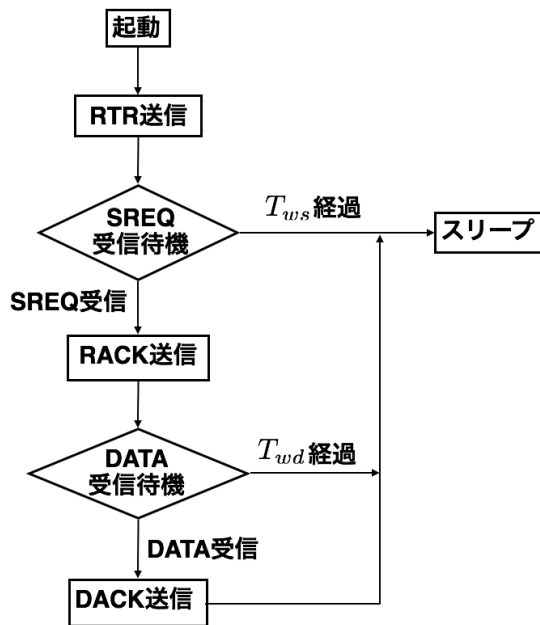


図 3.2: IRDT における Rx 動作のフローチャート

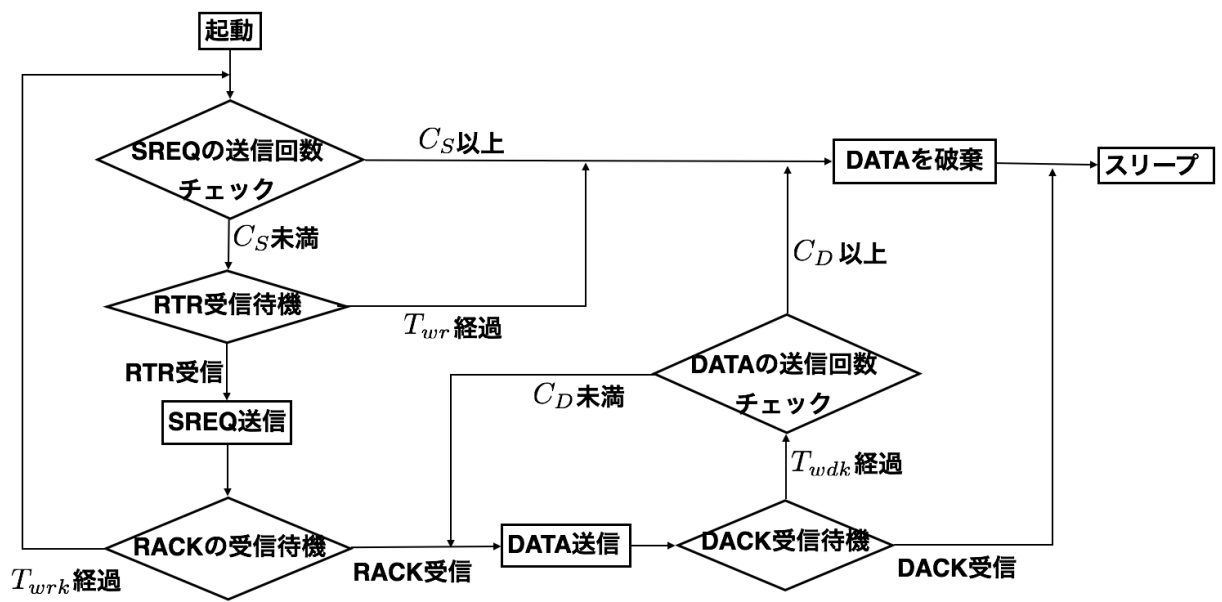


図 3.3: IRDT における Tx 動作のフローチャート

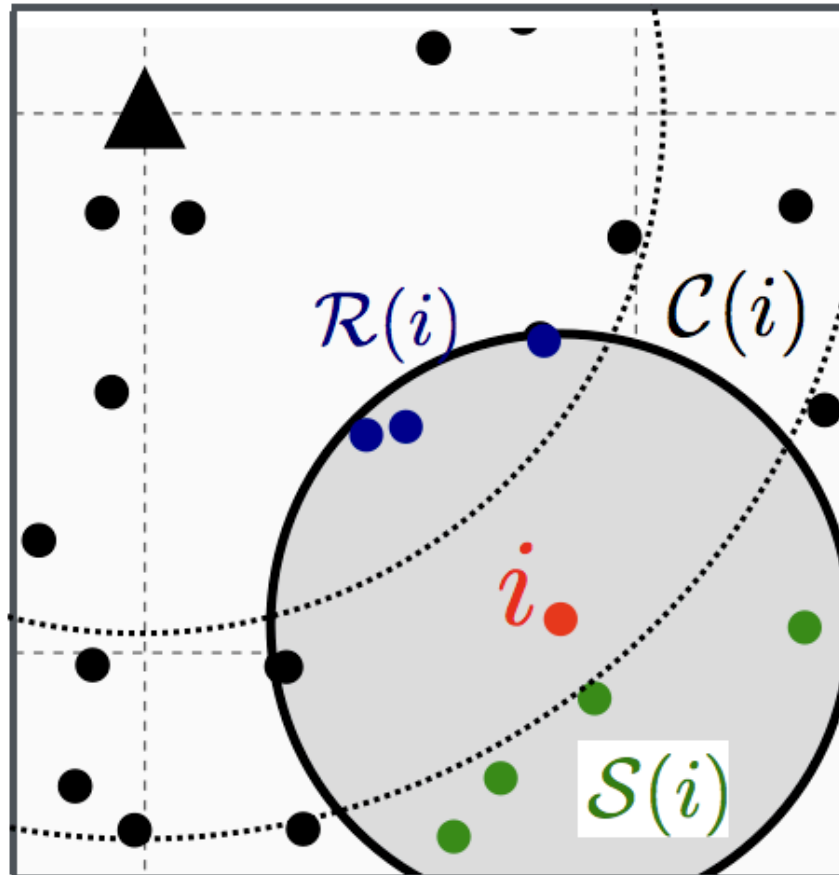


図 3.4: 端末の集合の一例. 三角は GW を表し, 点は SN を表す. また, GW を中心とする円は, クラスタリングレンジを表し, 塗りつぶし円は SN i の通信可能範囲を表す

3.2 通信失敗確率解析

前節で述べた IRDT に従い端末が動作した場合の通信失敗確率について理論解析を行う. ただし, 簡単のために端末は固定電源を具備しており, パケットの再送信は行われぬものとする.

はじめに, 解析のために端末の集合を定義する. 図 3.4 に示す一例のように, SN i の通信可能範囲内にある端末の集合を $C(i)$ とする. その中でも SN i の属するクラスタよりも GW に近いクラスタに所属している端末の集合を $R(i)$, 遠い端末の集合を $S(i)$ とする. このとき, $R(i), S(i), R(i) \cup S(i) \subset C(i)$ である. 以降では, $R(i)$ を上位端末, $S(i)$ を下位端末と呼称する.

本節では, IRDT において DATA が送信できない, もしくは DATA が正しく受信できない確率である通信失敗確率について理論的に評価する. ただし, 各パケットは理想的に誤り訂正符号化されているため, パケット同士が衝突した場合にのみ通信が失敗するものとする.

IRDT において送信されるパケットは, RTR, SREQ, RACK, DATA, DACK がある. RTR, SREQ, RACK, DACK は, DATA と比較して十分に短いため, それら同士が衝突する確率は, DATA との衝突確率と比較して十分に低いと考えられる. 特に, SREQ, RACK, DACK が送

信される確率および DATA と衝突する確率は十分に小さいため、最も頻繁に送信される RTR と DATA の衝突確率のみを考慮する。一方で、複数端末が同一の受信端末に対し SREQ を送信するケースが想定されるため、SREQ 同士の衝突についても考慮するものとする。以降では、RTR と DATA の衝突を RTR 衝突、SREQ 同士の衝突を SREQ 衝突と呼称する。

SREQ 衝突は、複数の SN の送信した SREQ が衝突したケースである。ある一台の Rx が送信する RTR に対し、複数の Tx が連続受信状態であった場合、これらの端末は同時に SREQ を送信し、Rx において衝突が発生する。ゆえに、受信機はそれらのパケットを正しく復調することができない。RTR 衝突は、異なる SN の送信する DATA と RTR が衝突したケースである。Rx が DATA の受信を行っている間に他端末が RTR を送信した場合には、DATA と RTR が衝突し、受信機では DATA を正しく復号できない。ただし、端末は RTR の送信に際して、理想的なキャリアアセスメントを行うため、RTR 衝突は隠れ端末の関係にある端末間でしか発生しない。

以上のことを踏まえると、SREQ 衝突が発生する、もしくは SREQ 衝突が発生せず、RTR 衝突が発生した場合に通信が失敗する。そのため、SN i から端末 $k, k \in \mathcal{R}(i)$ への通信が失敗する確率 $P_e^{i \rightarrow k}$ は、SREQ 衝突確率 $P_S^{i \rightarrow k}$ 、RTR 衝突確率 $P_R^{i \rightarrow k}$ を用いて以下の様に表される。

$$P_e^{i \rightarrow k} = P_S^{i \rightarrow k} + (1 - P_S^{i \rightarrow k})P_R^{i \rightarrow k} \quad (3.1)$$

まず、SREQ 衝突確率 $P_S^{i \rightarrow k}$ を導出する。この導出に際し、端末の動作には各々時間相関があることから、マルコフ連鎖の使用が適切であると考えられる。しかし、その導出は非常に煩雑となるため、本研究では端末のある時刻の動作は前回の動作に依存しないことを仮定し、導出を行うことに留意されたい。

SREQ 衝突が発生するのは、SN i が端末 k の送信する RTR を受信するまでの t 単位時間の中に、 k の通信範囲にいる他の SN が DATA を所持した場合である。その確率 $P_d(t)$ は、SN i の DATA 所持確率を ρ_i とすると、

$$P_d(t) = 1 - \prod_{l \in \mathcal{S}(k) \setminus \{i\}} (1 - \rho_l)^t \quad (3.2)$$

と表される。ただし、 $A \setminus B$ は集合 A と B の差集合を表す。このとき、 t は 1 から T_R のいずれかの値を等確率でとることから、SREQ 衝突確率は以下のように求められる。

$$P_S^{i \rightarrow k} \approx \sum_{t=1}^{T_R^{(i)}} \frac{P_d(t)}{T_R^{(i)}} \quad (3.3)$$

ただし前述のように、SN i が DATA を所持する以前に他の SN が DATA を所持する、または、SN k が DATA を所持しているなどの確率を考慮していないため、式 (3.3) は近似となる。

また、端末がパケットを所持するのは、自身で DATA を生起する場合と他の端末から DATA を受信する場合である。これらの事象は排反であるから、パケット所持確率 ρ_i は自身で DATA を生起する確率と $\mathcal{S}(i)$ の端末から DATA を受信する確率の和をとることで求められる。

$$\rho_i \approx \frac{1}{T_g} + \sum_{l \in \mathcal{S}(i)} \frac{\alpha}{T_R^{(i)}} \rho_l (1 - P_e^{l \rightarrow i}) \quad (3.4)$$

このとき、 α は $\sum_{m \in \mathcal{R}(l)} \frac{\alpha}{T_R^{(m)}} = 1$ とする正規化定数であり、 $\frac{\alpha}{T_R^{(i)}}$ は送信端末 l が $\mathcal{R}(l)$ のうちから、SN i を選択して DATA を送信する確率を表す。式 (3.4) より端末 i の間欠間隔 $T_R^{(i)}$ のみを伸長または短縮させた場合、送信端末 m が端末 l に対して DATA を送信する確率、ひいてはパケット所持確率がそれぞれ減少、増加する。つまり、間欠間隔を変動させることにより、各端末のパケット所持確率を任意に設計できるといえる。

次に、RTR 衝突確率の導出を行う。RTR 衝突が発生するのは、SN i が DATA を受信している間に隠れ端末が RTR を送信した場合となる。ゆえに、DATA の受信時間を T_d とすると、RTR 衝突確率は、

$$P_R^{i \rightarrow k} \approx 1 - \prod_{n \in \mathcal{C}(k) \setminus \mathcal{C}(i), \{i\}} \left(1 - \frac{T_d}{T_R^{(n)}} \right) \quad (3.5)$$

と表される。RTR 衝突確率も SREQ 衝突確率と同様に、端末 n が Tx として駆動しており、RTR を送信しない確率などが考慮されていないため、近似式である。

最終的な宛先である GW への通信が失敗するのは、 i が DATA の送信に失敗するもしくは i から DATA を受信した SN が通信を失敗するケースであるため、その確率 $P_e^{i \rightarrow \text{GW}}$ は、以下のように表わされる。

$$P_e^{i \rightarrow \text{GW}} = \sum_{k \in \mathcal{R}(i)} \frac{\beta}{T_R^{(k)}} \left[P_e^{i \rightarrow k} + (1 - P_e^{i \rightarrow k}) \left\{ \sum_{l \in \mathcal{R}(k)} \frac{\gamma}{T_R^{(l)}} \left\{ P_e^{k \rightarrow l} + (1 - P_e^{k \rightarrow l}) (\sum \dots) \right\} \right\} \right] \quad (3.6)$$

ただし、 $\frac{\beta}{T_R^{(k)}}$, $\frac{\gamma}{T_R^{(l)}}$ は、それぞれ SN k , l が受信端末として選択される確率であり、 α と同様に計算される。ネットワーク全体の通信失敗確率は、各 SN の DATA 生起確率が等しいことから、式 (3.6) をすべての SN に関して平均化することで求められる。

3.3 消費電力解析

次に IRDT における端末の消費電力を理論的に解析する。IRDT における端末の消費電力は、Rx 駆動時と Tx 駆動時のものに大別できる。Rx 駆動時の消費電力としては、間欠間隔における RTR の送信および T_{ws} の短時間受信、また Tx から DATA を受信する際の各パケットの送受信に伴う消費電力が挙げられる。Tx 駆動時の消費電力としては、RTR 受信のための連続受信および各パケットの送受信に関する消費電力が計上される。ゆえに、端末 i の単位時間当たりの消費電力 $E(i)$ は、各イベントとその発生確率を乗算することで以下のように求められる。

$$E(i) = \frac{E_{\text{RTR}}}{T_R^{(i)}} + \left(\rho_i - \frac{1}{T_g} \right) E_{\text{RX}} + \rho_i E_{\text{TX}} \quad (3.7)$$

このとき、 E_{RTR} および E_{RX} は定数であり、それぞれ RTR 送信と短時間受信の消費電力、Tx から DATA を受信する際の各パケットの送受信に伴う消費電力である。一方で、Tx 駆動時の消費

表 3.1: シミュレーション諸元 1

PPP 密度 λ_N	0.0001
クラスタリングレンジ L [m]	100
周波数 [MHz]	920
送信電力 P_T [dB]	0
受信感度 P_S [dBm]	-80
伝送レート [kbps]	250
動作電圧 [V]	3.0–3.6
送信時平均電流 [mA]	14.4
受信時平均電流 [mA]	17.5
DATA 生起間隔 T_g [min]	10
RTR, SREQ サイズ [byte]	9
RACK, DACK サイズ [byte]	8
DATA サイズ [byte]	26
SREQ 受信待機時間 T_{ws} [ms]	5
RACK 受信待機時間 T_{wrk} [ms]	5
DATA 受信待機時間 T_{wd} [ms]	30
DACK 受信待機時間 T_{wdk} [ms]	5
RTR 最大受信時間 T_{wr} [sec]	15

電力 E_{TX} は、周囲の端末の間欠間隔によって変動する。ここで、単位時間あたりの受信時の消費電力を E_{receive} 、RTR 待機の連続受信の平均時間を τ 、各パケットの送受信の消費電力を E_{DATA} とすると、

$$E_{TX} = \tau E_{\text{receive}} + E_{\text{DATA}} \quad (3.8)$$

$$\tau \approx \sum_{t=0}^{T_{R,\min}-1} t \left(1 - \prod_{l \in \mathcal{R}(i)} 1 - \frac{1}{T_R^{(l)} - 1} \right) \prod_l \left(1 - \frac{t}{T_R^{(l)}} \right) \quad (3.9)$$

と表される。ただし、 $T_{R,\min} = \min_l T_R^{(l)}$ とする。ネットワーク全体の消費電力は、式 (3.7) をすべての SN に関して平均化することで求められる。

3.4 数値結果

本節では、前節で導出した消費電力の理論値と計算機シミュレーションから算出した値の比較を行う。表 3.1 にその諸元を示す。

図 3.5 に間欠間隔に対する通信失敗確率の理論解析および計算機シミュレーションの結果を示す。このとき、ネットワーク内の全端末は横軸の間欠間隔に従い動作するものとする。同図より、理論解析とシミュレーション結果が十分一致していることが分かる。若干の乖離が見られるが、こ

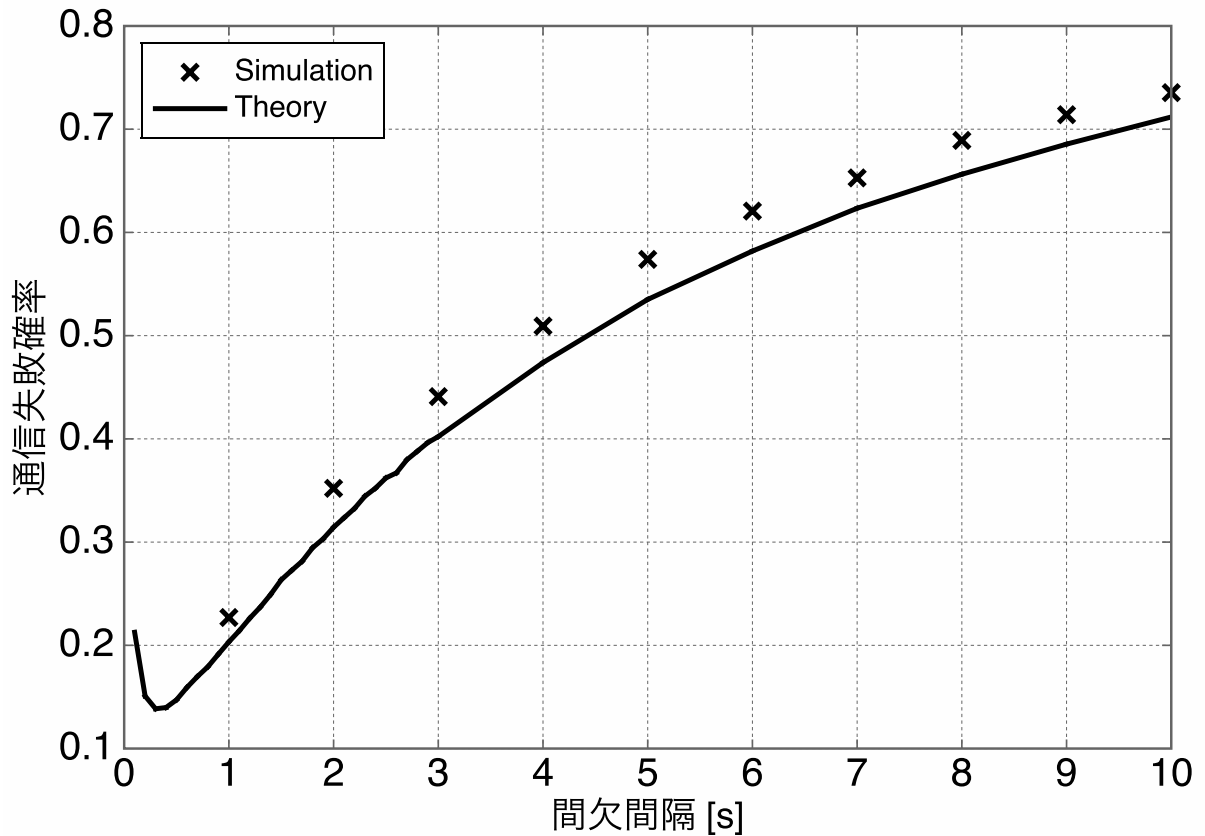


図 3.5: 間欠間隔に対する通信失敗確率

これは式 (3.3), (3.4) の近似の影響で, SREQ 衝突確率が小さく見積もられているためである. 図 3.6 に間欠間隔に対する RTR 衝突確率および SREQ 衝突確率の理論解析の結果を示す. 同図から, 間欠間隔が長くなるにつれ SREQ 衝突確率が増加しているのに対し, RTR 衝突確率は急峻に減少することが分かる. これは, 式 (3.3), (3.5) に示すように, 間欠間隔が短い領域では RTR のエアトラフィックが膨大であり, その衝突確率が高いのに対し, 間欠間隔が長い領域では RTR のトラフィック量が需要を満たしていないため, ネットワーク内の送信端末数が増大するためである. ゆえに, 図 3.5 の概形が下に凸となり, パケット衝突確率を最小とする間欠間隔が存在することが確認できる.

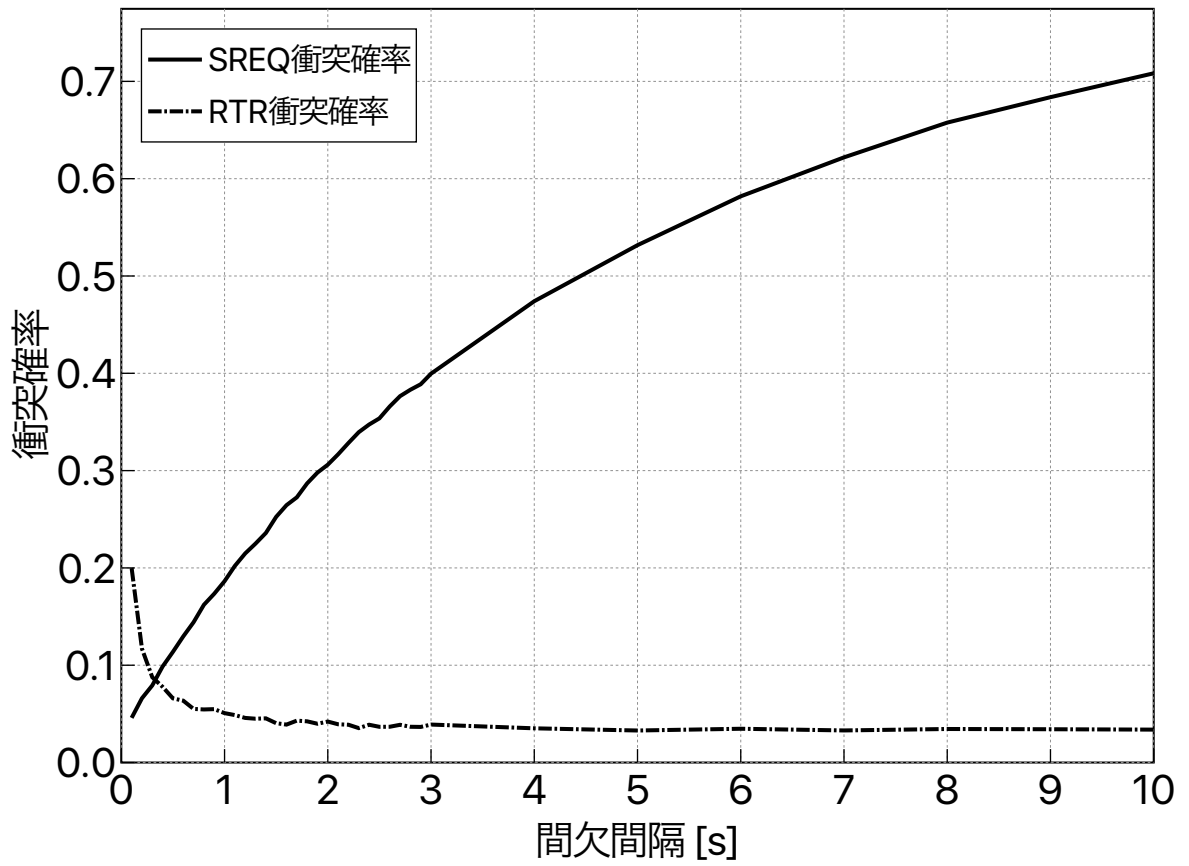


図 3.6: 間欠間隔に対する RTR 衝突確率および SREQ 衝突確率

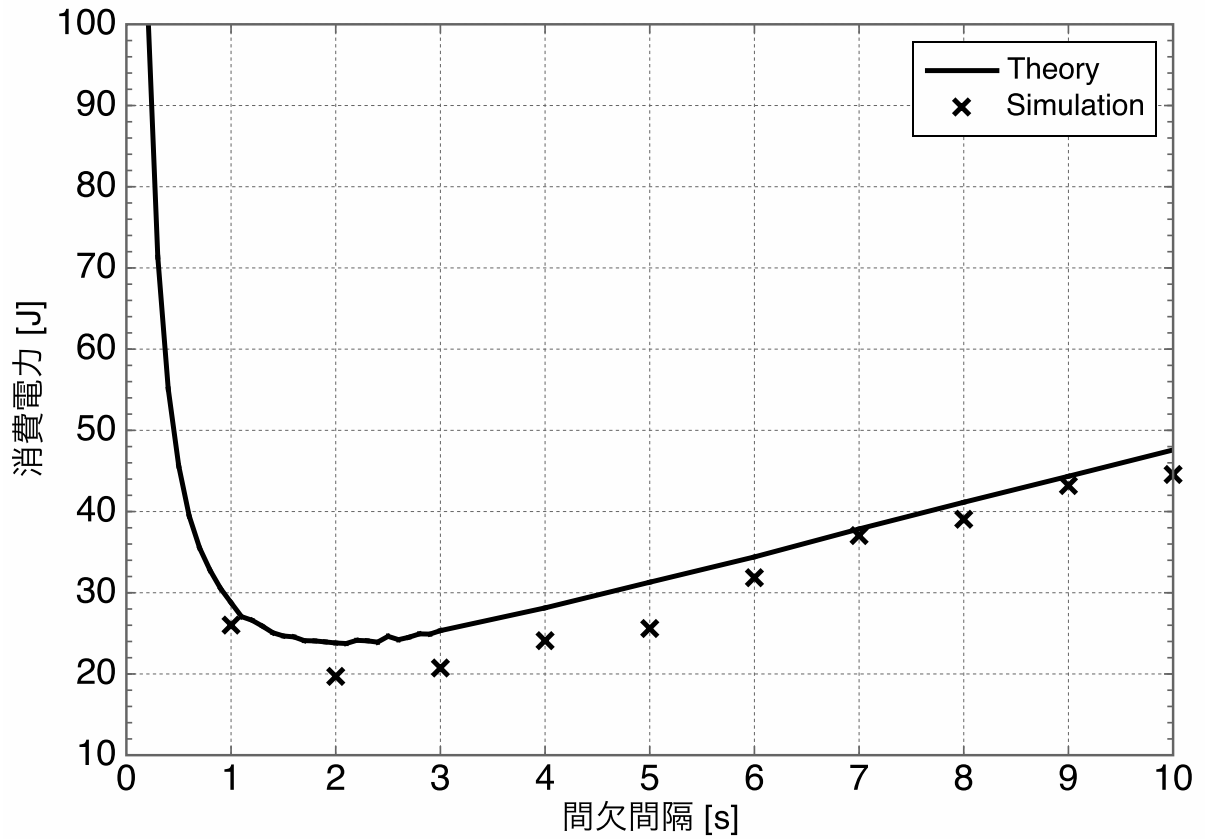


図 3.7: 間欠間隔に対する T_g 単位時間におけるネットワークの総消費電力 [J]

図 3.7 に間欠間隔に対する T_g 単位時間当たりのネットワーク内の総消費電力の理論解析および計算機シミュレーションの結果を示す. 同図から, 理論解析と計算機シミュレーションの結果が十分に一致していることが分かる. この乖離は, 図 3.5 と同様に, 式 (3.4), (3.9) の近似によるものである. 図 3.8 に, 間欠間隔に対する T_g 単位時間当たりのネットワーク内の Rx 駆動時, Tx 駆動時それぞれの総消費電力の理論解析の結果を示す. 同図から, 間欠間隔が短い領域では RTR のエアトラフィックが膨大であるため, 式 (3.7) に示すように Rx 駆動時の消費電力が間欠間隔に反比例していることが分かる. 一方で, 式 (3.9) に示すように, 間欠間隔が長くなるにつれ RTR 待機の連続受信時間 τ が増加し, Tx 駆動時の消費電力が線形的に増大していることが分かる. ゆえに, 図 3.7 の概形が下に凸となり, 消費電力を最小とする間欠間隔が存在することが確認できる.

上述の解析の結果から, 通信失敗確率および消費電力が周囲の端末および自身の間欠間隔に応じて変動することが分かる. 特に, 端末 i の間欠間隔 $T_R^{(i)}$ を他の端末よりも長く設定した場合, 前述の通り ρ_i が減少し, SN i の消費電力 $E(i)$ が減少する. 一方で, (3.8) に示すように τ は周囲の上位端末の間欠間隔に依存しているため, $i \in \mathcal{R}(k)$ となる端末 k の消費電力は増加する. また, 間欠間隔を短く設定した場合, ρ_i が増加, 他の端末の τ が減少し, 自身の消費電力は増加するが, 他端末の消費電力を減少させることができる. つまり, 間欠間隔を端末毎に異なる値に設定することで, 端末毎の消費電力を変化させることが可能といえる.

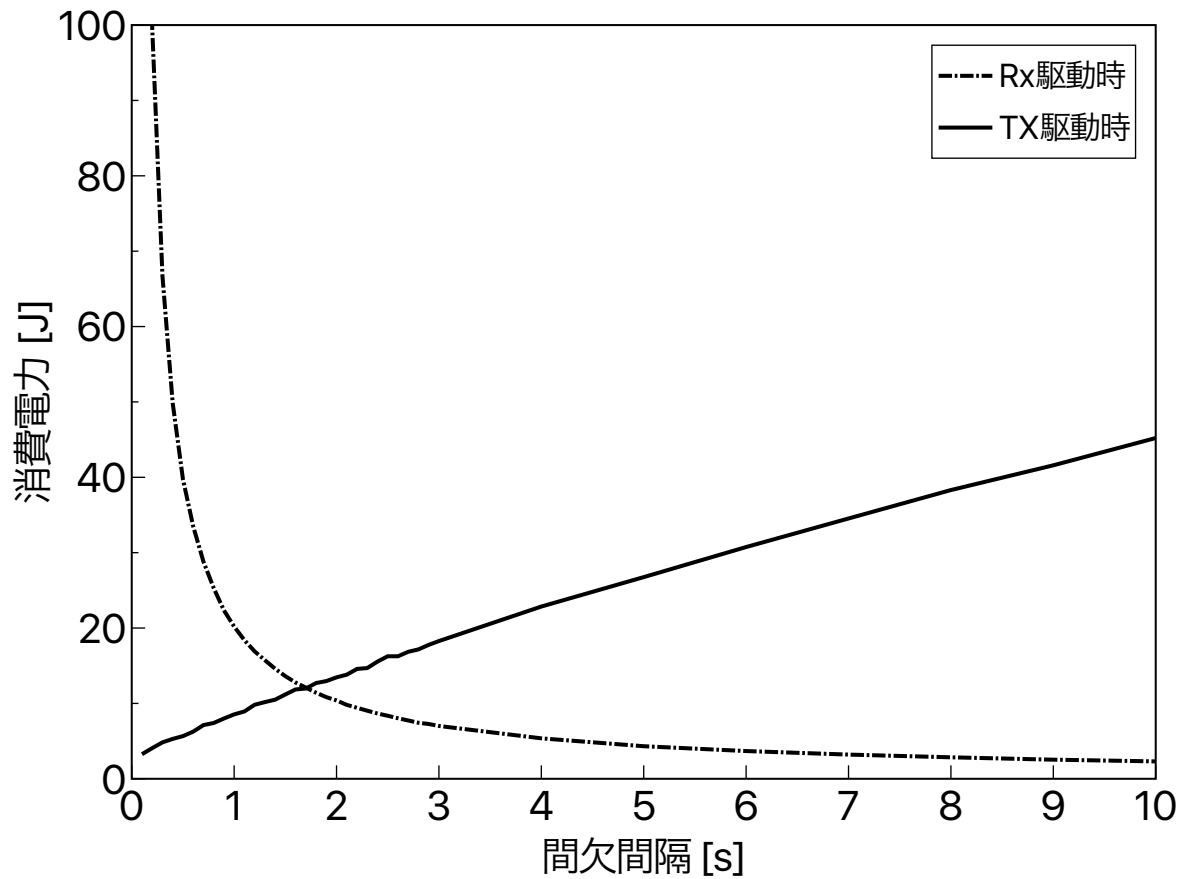


図 3.8: 間欠間隔に対する T_g 単位時間における Rx および Tx 駆動時のネットワークの総消費電力 [J]

次章では、この特徴を利用し、端末の消費電力に対して制約のかかる EHWSN に適した間欠間隔の制御手法を提案する。

第4章 提案手法

前章では、間欠間隔を端末ごとに変動させることで、端末の消費電力が制御できることを示した。本研究の目的は、間欠間隔の制御により EN を達成することであるが、完全な EN の達成には全端末の回収電力および消費電力の情報を用いた中央制御が必要となる。そこで本研究では、端末が自身の残存電力および回収電力の閾値情報、周囲の上位端末の情報を用いて分散的に間欠間隔を制御する ENRI-MAC (Energy-Neutral Receiver-Initiated MAC) を提案する。ENRI-MAC では、完全な EN の達成は困難であるが、その状態に近づけることで、端末の電池切れ確率を低減させる。本章では、はじめに端末が自身の残存電力および回収電力の閾値情報を得るための回路として、Power Good (PG) 回路を提案する。次に、提案手法である ENRI-MAC について述べ、従来手法と比較して優れた通信信頼性を達成することを計算機シミュレーションを介して示す。

4.1 PG 回路

ENRI-MAC では、間欠間隔制御のために、自身の残存電力および回収電力の情報が必要となる。最も簡易な方法は、回路に電圧計を組み込むことであるが、端末の消費電力を著しく増大させる。そこで、低消費電力でスーパーキャパシタおよび PV からの出力電圧の閾値情報を得る回路として図 4.1 に示す PG 回路を提案する。PG 回路では、スーパーキャパシタおよび PV からの出力電圧が任意の閾値を超えた場合に、PG 信号が出力される。ENRI-MAC では、この PG 信号を用いて自身の残存電力および回収電力の多寡を判定する。なお、図 4.1 に示す回路は、閾値が 3.36[V] となるように設計されたものである。

4.2 ENRI-MAC

前章の理論解析において、自身の間欠間隔を短縮することで、周囲の端末の消費電力が低減可能であり、一方で、間欠間隔を伸長した場合、自身の消費電力を低減できることを示した。ENRI-MAC ではこの特徴を用いて、PG 信号が出力されている電力の潤沢な端末は、自身の間欠間隔を短縮させ、他の端末の負荷を低減させる。一方で、PG 信号が出力されていない端末は、間欠間隔を伸長し、自身の消費電力を低減させる。ただし、送信先のいない孤立端末つまり $\mathcal{R}(i) = \phi$ である端末 i に DATA を送信した場合、式 (3.3)(3.5) より通信失敗確率が 1 となる。ゆえに、孤立端末が DATA を所持する確率を低減させるために、孤立端末は PG 信号が出力されている場合でも、間欠間隔を伸長することが望ましい。また、GW は最終的な DATA の宛先であり、固定電源を具備していることから、最短の間欠間隔に設定し、負荷を集中させる。以上の動作をまとめたアルゴリズムを以下に示す。

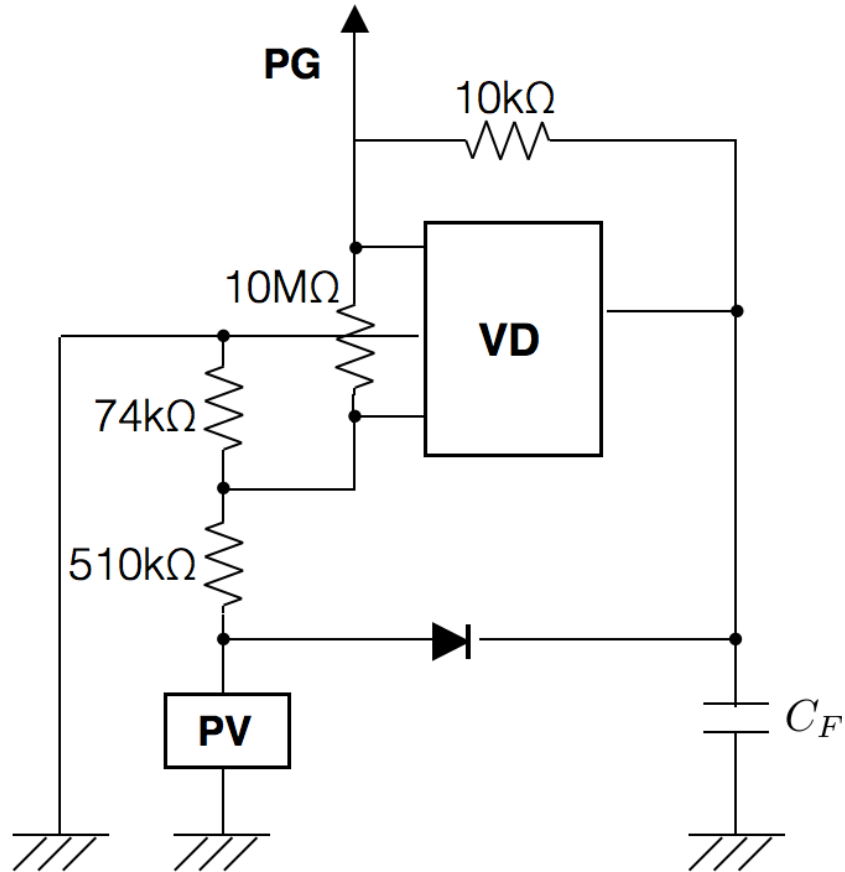


図 4.1: Power Good 回路. VD は Voltage Detector を表す

Algorithm 1 アルゴリズム

- 1: Check if node i is GW or not
 - 2: **if** GW **then**
 - 3: set own intermittent interval $T_R^{(i)}$ to T_{GW}
 - 4: **else if** PG is HIGH and $|\mathcal{R}(i)| \geq C_{th}$ **then**
 - 5: set own intermittent interval $T_R(i)$ to T_S
 - 6: **else**
 - 7: set own intermittent interval $T_R^{(i)}$ to T_L
 - 8: **end if**
-

このとき、 T_{GW} は GW の間欠間隔、 T_S は短間欠間隔、 T_L は長間欠間隔、 C_{th} は任意の閾値である。

$|\mathcal{R}(i)|$ の把握のために、各端末は周囲の端末の観測を行うことが必要である。ENRI-MAC では、PG が出力され始めた場合、 T_L だけの連続受信を行い、周囲の RTR を受信し、上位端末台数を計測する。このとき、ネットワークに応じて C_{th} の値を適切に設計することでネットワーク

内の消費電力を減少させることが可能である。

4.3 パラメータ設計

ENRI-MAC は、適切にパラメータを設計することで、より優れた特性を得られるプロトコルである。設計すべきパラメータとしては、 T_{GW} 、 T_S 、 T_L 、 C_{th} および PG 閾値が挙げられる。はじめに、 T_{GW} 、 T_S 、 T_L の設計について述べる。

EN を満たす条件は、端末 i の単位時間あたりの回収電力を $H(i)$ とすると、

$$H(i) \geq E(i) \quad (4.1)$$

と表せる。ここで、周囲の端末の台数および日陰端末の割合 ϵ を既知とすると、日陰端末、日向端末それぞれの平均的な消費電力を式 (3.7) より求められる。日陰端末、日向端末の消費電力がそれぞれ式 (4.1) を満たすように T_S, T_L を各 ϵ ごとに設計することで、ネットワーク内で平均的に EN を満たすことができる。ただし、時間の遷移とともに日陰の割合も変動するために、 ϵ によらず普遍的に良好な特性を示す設計が望ましい。また、一般に太陽光発電による回収電力には空間相関が存在し、近傍に位置する端末の回収電力は類似する。そのためネットワーク全体は、回収電力の多い端末からなるネットワークと少ない端末からなるネットワークの混在するネットワークとして考えられる。ゆえに、それぞれのネットワークに適した設計を施すことで、平均的に良好な特性を得られるネットワークの構築が可能となる。本研究では、回収電力の多いネットワーク、少ないネットワークを $\epsilon = 0.0, 1.0$ とし、設計を行う。

$\epsilon = 0.0$ の点では、すべての端末が潤沢な電力を回収できるため、多くの端末が T_S の間欠間隔で動作する。また、電池切れの発生確率は低いことから、パケット衝突を最小化する間欠間隔で動作することが望ましい。そこで、全端末が T_S で動作した場合にパケット衝突確率を最小化する間欠間隔を T_S として、式 (3.6) を用いて以下のように定めた。

$$T_S = \arg \min_{T_R} \mathbb{E}[P_e^{i \rightarrow GW}] \quad (4.2)$$

このとき、 $P_e^{i \rightarrow k}$ は、

$$T_R^{(i)} = T_R, \forall i \quad (4.3)$$

の条件のもとで、式 (3.1), (3.3), (3.4), (3.5) から求められる。

一方で、 $\epsilon = 1.0$ は、電池切れが最も発生しやすい領域と言える。ゆえに、端末の消費電力を最小化する値を T_L として以下のように定めた。

$$T_L = \arg \min_{T_R} \mathbb{E}[E(i)] \quad (4.4)$$

ただし、 $P_e^{i \rightarrow k}$ と同様に $E(i)$ は、式 (4.3) の条件のもとで、式 (3.7), (3.8), (3.9) より求められる。また、前述のように GW に最も負荷を集中させるべきであることから、 T_{GW} は T_S よりも短く、DATA の送受信時間 T_d よりも十分に長い値とする。

表 4.1: ENRI-MAC パラメータ

PG 閾値 [V]	3.36
通信可能上位端末閾値 C_{th} [台]	1
GW 間欠間隔 T_{GW} [sec]	0.1
短間欠間隔 T_S [sec]	0.3
長間欠間隔 T_L [sec]	2.7

表 4.2: IRDT, 動的制御付 IRDT 諸元

IRDT	間欠間隔 [sec]	2.7
動的制御付 IRDT	最大間欠間隔 T_{max} [sec]	0.1
	最小間欠間隔 T_{min} [sec]	2.7
	間欠間隔変動幅 T_A [sec]	0.1

上位端末台数閾値 C_{th} は、ネットワークの密度および通信可能距離に応じて設計すべきである。本稿では、計算機シミュレーションによって求めた、ネットワークの消費電力を最小とする C_{th} の値を用いた。また、PG 閾値は電力の多寡を判断するためのものであることから、回路の動作可能電圧のほぼ中央値とする。

実際に設定したパラメータを表 4.1 に示す。

4.4 数値結果

本節では、ENRI-MAC を計算機シミュレーションを用いて評価する。なお、比較のために IRDT および文献 [7] において提案されている間欠間隔動的制御付 IRDT の特性も併せて示す。この動的制御は、パケット衝突確率を低減させることを目的としたもので、間欠間隔の長短により RTR 衝突確率と SREQ 衝突確率が変動することを利用している。各端末は、エアトラフィックの低減のために、起動する度に間欠間隔を T_A だけ増大させる。間欠間隔は最大 T_{max} まで伸長されるが、SREQ 衝突が感知された場合、SREQ 衝突確率の低減のために T_{min} まで間欠間隔を短縮させる。なお、評価の公平性のために、両手法で GW の間欠間隔を ENRI-MAC と等しくする。また、IRDT の間欠間隔は、理論解析から端末の消費電力を最小にするものとし、動的制御付 IRDT もそれに準じたものとする。その諸元を表 4.2 に示す。また、他の諸元は表 3.1 に従うものとする。

図 4.2 に IRDT, 動的制御付 IRDT, ENRI-MAC のパケット損失率 (PLR: Packet Loss Rate), 図 4.3 に各手法の電池切れを起因とする PLR を示す。図 4.2 から、ENRI-MAC が従来手法と比較して優れた PLR 特性を有していることが分かる。また、図 4.2 と図 4.3 を比較すると、パケット損失の多くが電池切れを原因として発生していることが分かる。ENRI-MAC は、端末ごとの回収電力に差があるときに有効に働くプロトコルであるため、 $\epsilon = 1.0$ の点では、それほど大きな利得は存在しない。しかし、日陰端末と日向端末が混在する $0 < \epsilon < 1$ の領域では、消費電力の負荷を日向端末に集中させることで、端末の電池切れ確率ひいては PLR が減少していることが両図から分かる。

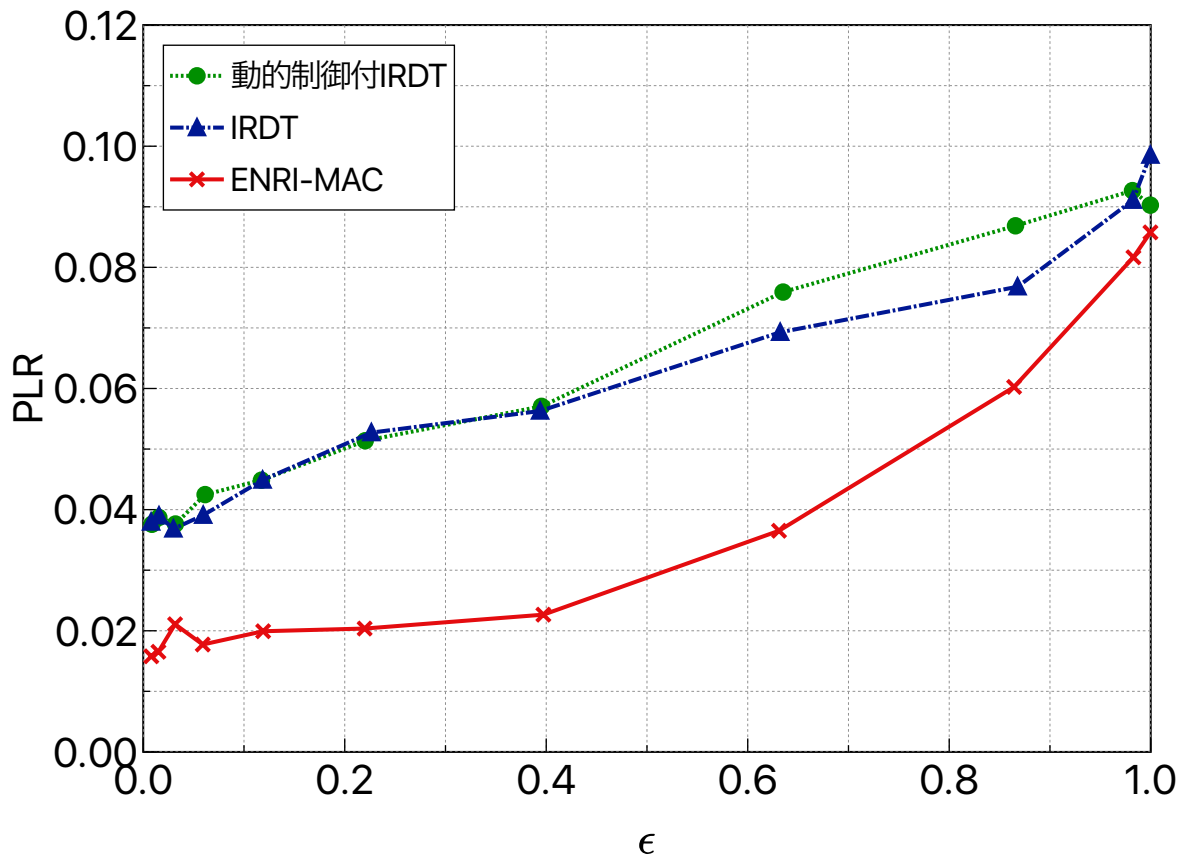


図 4.2: IRDT, 動的制御付 IRDT および ENRI-MAC の ϵ に対するパケット損失率

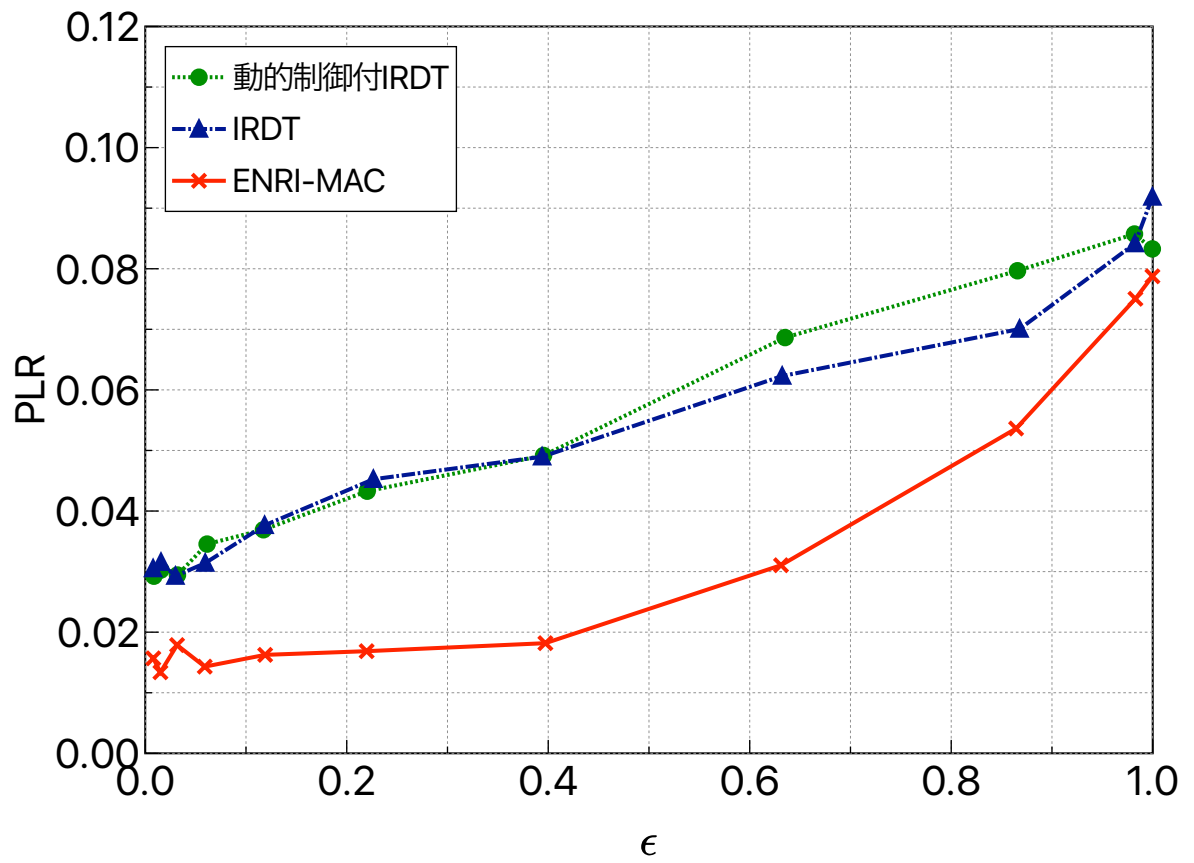


図 4.3: IRDT, 動的制御付 IRDT および ENRI-MAC の ϵ に対する電池切れを起因とするパケット損失率

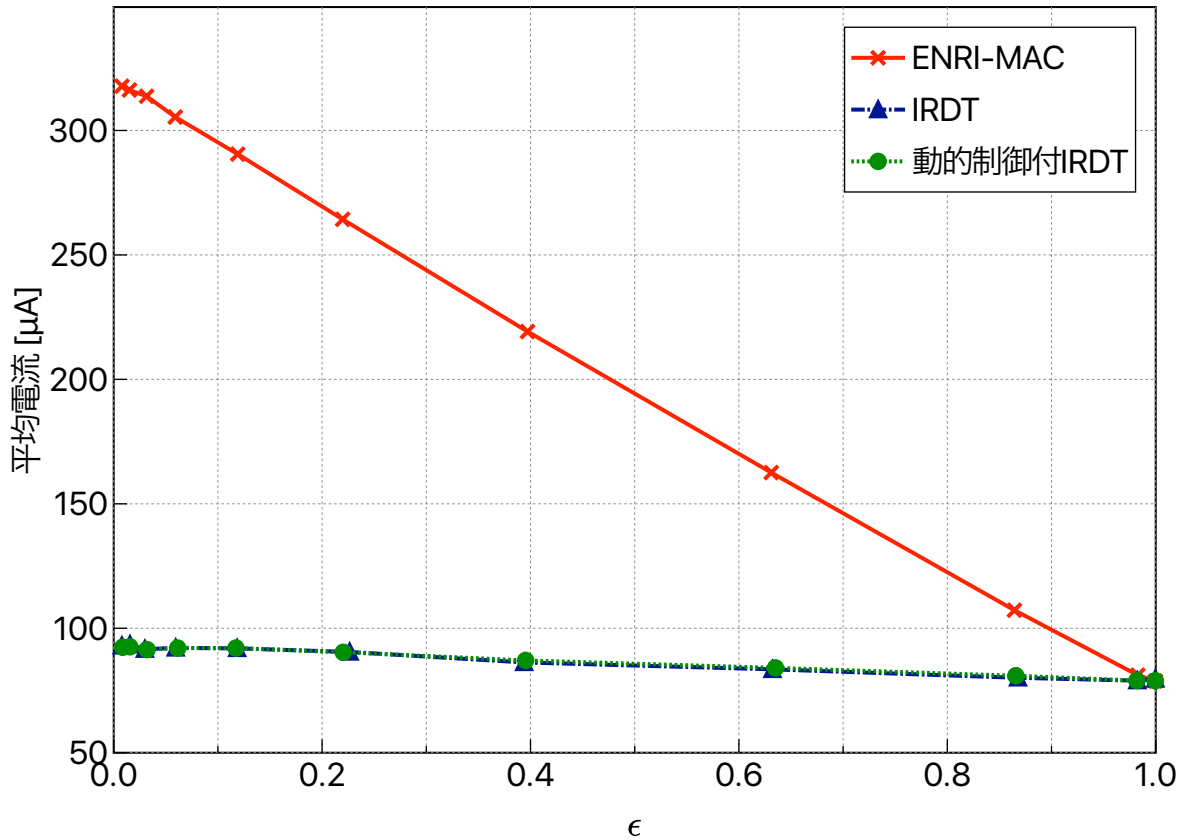


図 4.4: IRDT, 動的制御付 IRDT および ENRI-MAC の ϵ に対する端末の平均電流

図 4.4 に IRDT, 動的制御付 IRDT, ENRI-MAC の端末あたりの平均電流を示す. 同図から, 端末の消費電力は従来の IRDT の方が抑圧できていることが分かる. 一方で, 図 4.2 に示すように PLR は ENRI-MAC の方が優れた特性を示している. これは, ENRI-MAC ではネットワーク内の消費電力を下げるのではなく, ネットワーク内の電力を有効に利用することを目的としているためである. ネットワーク内の全端末の回収電力が等しい場合, ネットワーク全体の消費電力を下げることで, EN を達成することができ, 電池切れは発生しない. しかし, 端末ごとに回収電力が異なる場合, ネットワーク全体で EN を満たしていても, 回収電力の少ない端末の EN が満たされることが考えられる. ENRI-MAC では, 端末ごとに EN ををみたすように間欠間隔を制御させているため, 回収電力の少ない端末の電池切れを抑圧可能となる. そのため, ENRI-MAC は IRDT と比較して消費電力が増大しているが, 優れた PLR 特性を達成している.

第5章 実装および実験

実環境における提案手法の評価のために、ラピスセミコンダクタ社製の汎用ボード Lazurite Sub-GHz および三洋電機株式会社製の太陽光パネル AT-7665 を用いて、実装および実験を行った。本章では、実装、実験内容および結果について述べる。

5.1 実装

実装した回路を図 5.2, Lazurite Sub-GHz の回路のブロック図を示す。なお、Lazurite Sub-GHz および AT-7665 の仕様は表 5.1, 5.2 の通りである。

Lazurite Sub-GHz の無線モジュールは、信号送信を行う前に $160[\mu \text{ sec}]$ のキャリアセンスを行う。一方、キャリアセンス後の動作は実装されておらず、これをマイコン上に記述することで、IRDT を実現する。ここでは、実装に際し計算機シミュレーションと異なる点について詳細に述べる。

端末は起動時に DATA を所持しているかどうかで、Rx もしくは Tx 駆動するかを決定する。その実現のために、端末は起動時に図 5.3 に示す動作を行う。端末は、起動すると内部メモリを参照し、DATA の有無を確認する。DATA が存在した場合は Tx として動作し、存在しない場合には Rx として駆動する。Tx として駆動し、DATA の送信に成功した場合、内部メモリの DATA を削除する。ただし、GW は常に Rx として駆動する。

IRDT で用いる各パケットの構成を表 5.3, 5.4, 5.5 に示す。このとき、シーケンス番号は IRDT の動作フローの中でどの段階にいるかを表すものであり、端末番号には自身の ID が格納される。ネットワーク番号は、複数ネットワークが同環境に存在した場合にネットワークを分離するためのものであり、L-Con は端末間リンクを制御する値を格納する。また、宛先端末番号は宛先端末の ID が格納される。ただし、RTR はブロードキャストで送信されるため、0 を格納する。各パケットには、巡回冗長検査 (CRC: Cyclic Redundancy Check) が付加されており、誤り検出が行われる。CRC は誤り検出符号の一種であり、本実装では CRC16 を利用した。

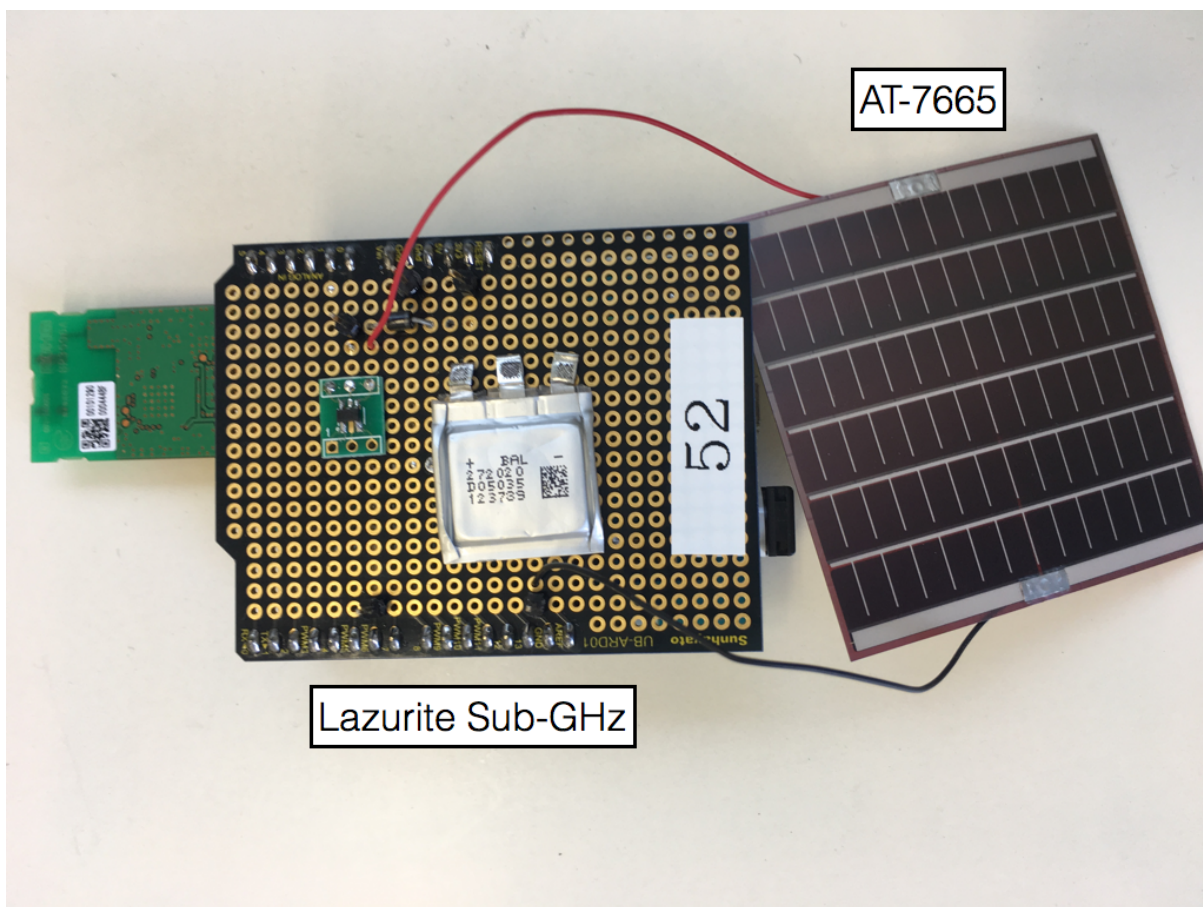


図 5.1: Lazurite Sub-GHz および太陽光パネル AT-7665

表 5.1: 無線仕様

送信電力 [mW]	1.0
周波数帯 [MHz]	920
周波数偏差 [ppm]	± 20 以下
変調方式	二値ガウス型周波数偏移変調
アンテナ利得 [dBi]	-1.8
アンテナ受信感度 [dBm]	-100
伝送レート [kbps]	100
無線規格	IEEE802.15.4g

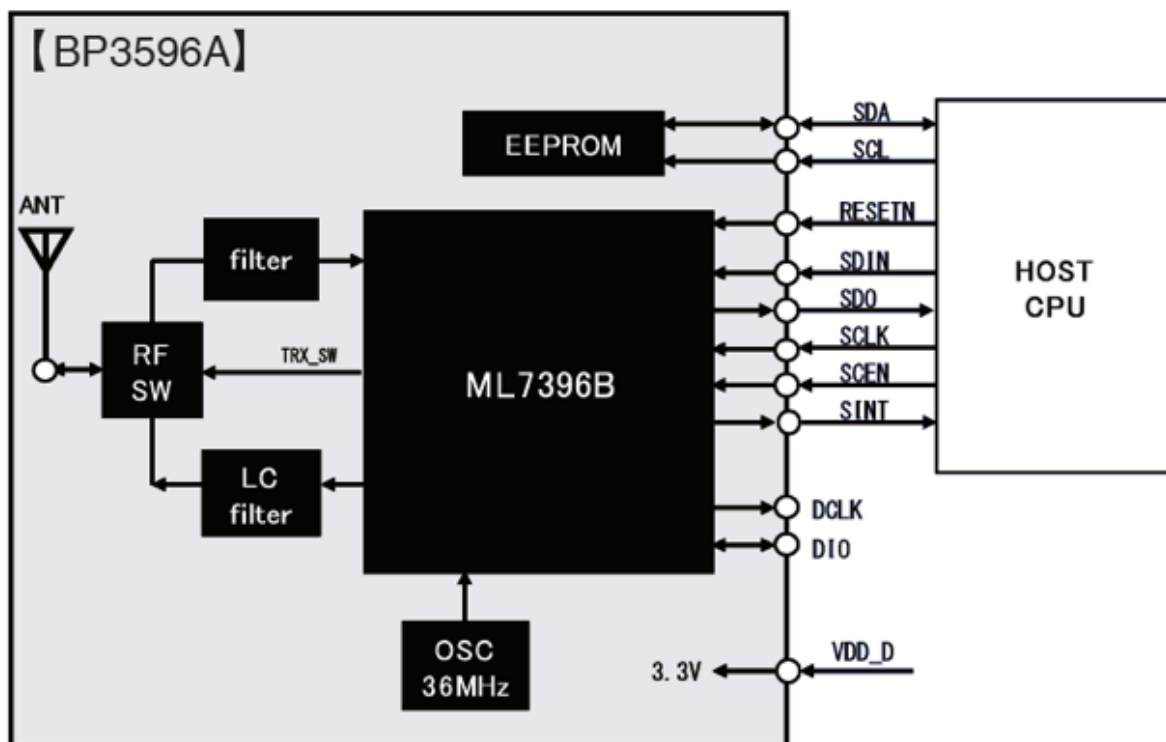


図 5.2: Lazurite Sub-GHz の回路ブロック図

表 5.2: AT-7665 仕様

動作電圧 [V]	3.0
動作電流 [mA]	17.3
最適動作電圧 [V]	3.6
最適動作電流 [mA]	16.2
幅 × 長さ × 厚み [mm]	58.4×56.0×0.3

表 5.3: RTR, SREQ パケットフレーム

名称	サイズ [byte]	値
シーケンス番号	1	0~ 0xFF
端末番号	1	0x01
ネットワーク番号	1	0~ 10
データサイズ	1	18
Link Control (L-Con)	1	0x30
宛先端末番号	1	1~ 0xFF
Cyclic Redundancy Code(CRC)	2	0~ 0xFFFF

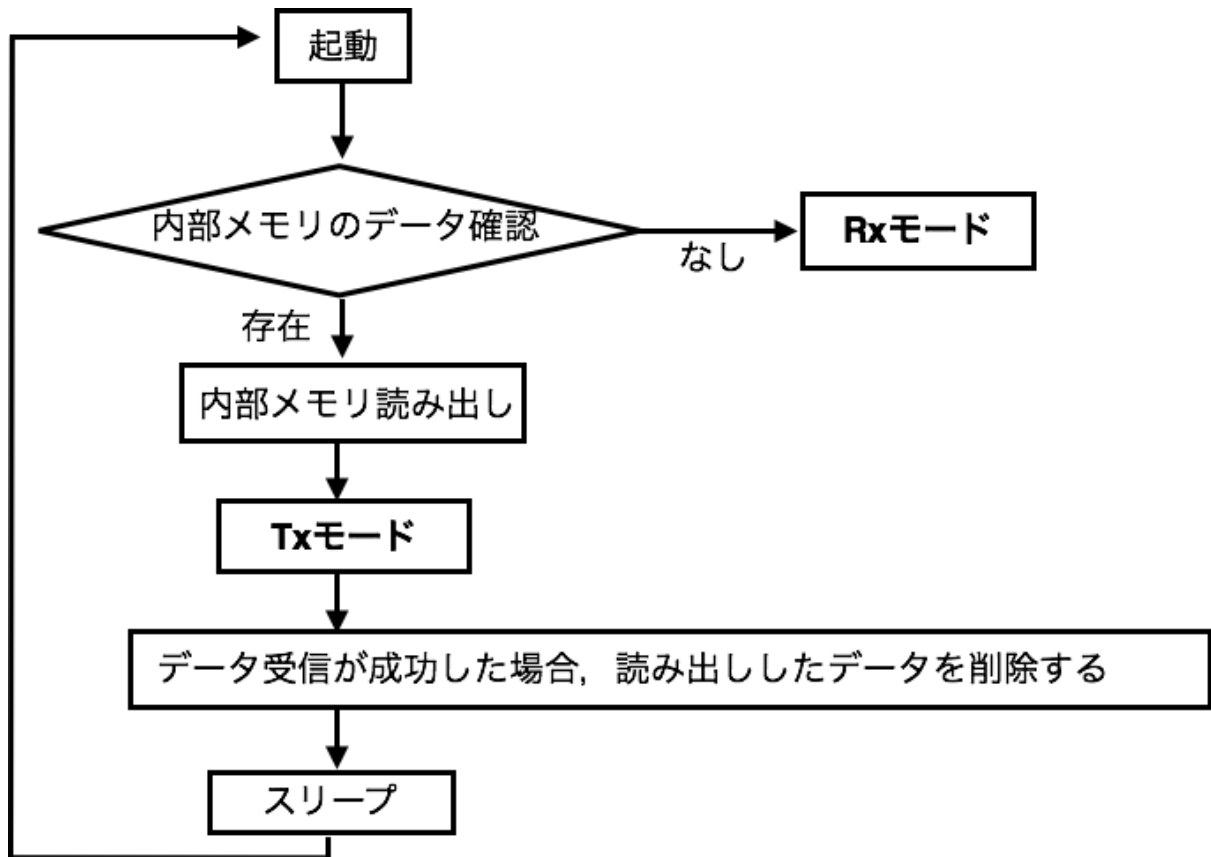


図 5.3: 起動時の端末動作

表 5.4: RACK, DACK パケットフレーム

名称	サイズ [byte]	値
シーケンス番号	1	0~ 0xFF
宛先端末番号	1	0x01
ネットワーク番号	1	0~ 10
データサイズ	1	18
Link Control (L-Con)	1	0x30
Cyclic Redundancy Code(CRC)	2	0~ 0xFFFF

表 5.5: DATA パケットフレーム

名称	サイズ [byte]	値
シーケンス番号	1	0~ 0xFF
宛先端末番号	1	0x01
ネットワーク番号	1	0~ 10
データサイズ	1	18
Link Control (L-Con)	1	0x30
センシングデータ	18	
Cyclic Redundancy Code(CRC)	2	0~ 0xFFFF

5.2 実験環境

実験では、固定電源を具備した GW および SN を各一台、EH 電源を具備した中継機 (RO: ROuter) を二台用いた。このとき、RO は DATA を生起せず、中継伝送のみを行う。DATA は、SN にて 19 秒毎に生起され、いずれかの中継機を経由して GW へと送信されるものとする。提案手法の動作の確認のため、中継機は一台が回収電力の多い日向、もう一台を日陰に設置した。このとき、日照量の多い端末を RO1、少ない端末を RO2 とする。実験を行ったときの環境を表 5.6 および図 5.4 に示す。

5.3 実験結果

実験では、比較のために従来の IRDT および提案手法を実装し、それぞれ 200, 203 個のパケットを SN から GW へ伝送した。このとき、従来の IRDT ではパケット損失率が 0.01 であったのに対し、提案手法ではパケット損失は発生しなかった。図 5.5 に示すように、従来手法では RO1 と RO2 の負荷が等しいため、回収電力の少ない RO2 において電池切れが発生している。一方で、提案手法では間欠間隔を短縮することで RO1 に負荷を集中させた結果、RO2 の電池切れおよびパケット損失を抑圧でき、パケット損失率が改善したと考えられる。以上から、提案手法を用いることで、高い通信信頼性の EHWSN を実環境で構築可能であるといえる。

表 5.6: 実験環境

日時	2017 年 7 月 14 日
気温 [°C]	31.0 ± 1.0
RO1 における日照量 [lx]	100,000 ± 5,000
RO2 における日照量 [lx]	6,000 ± 1,000

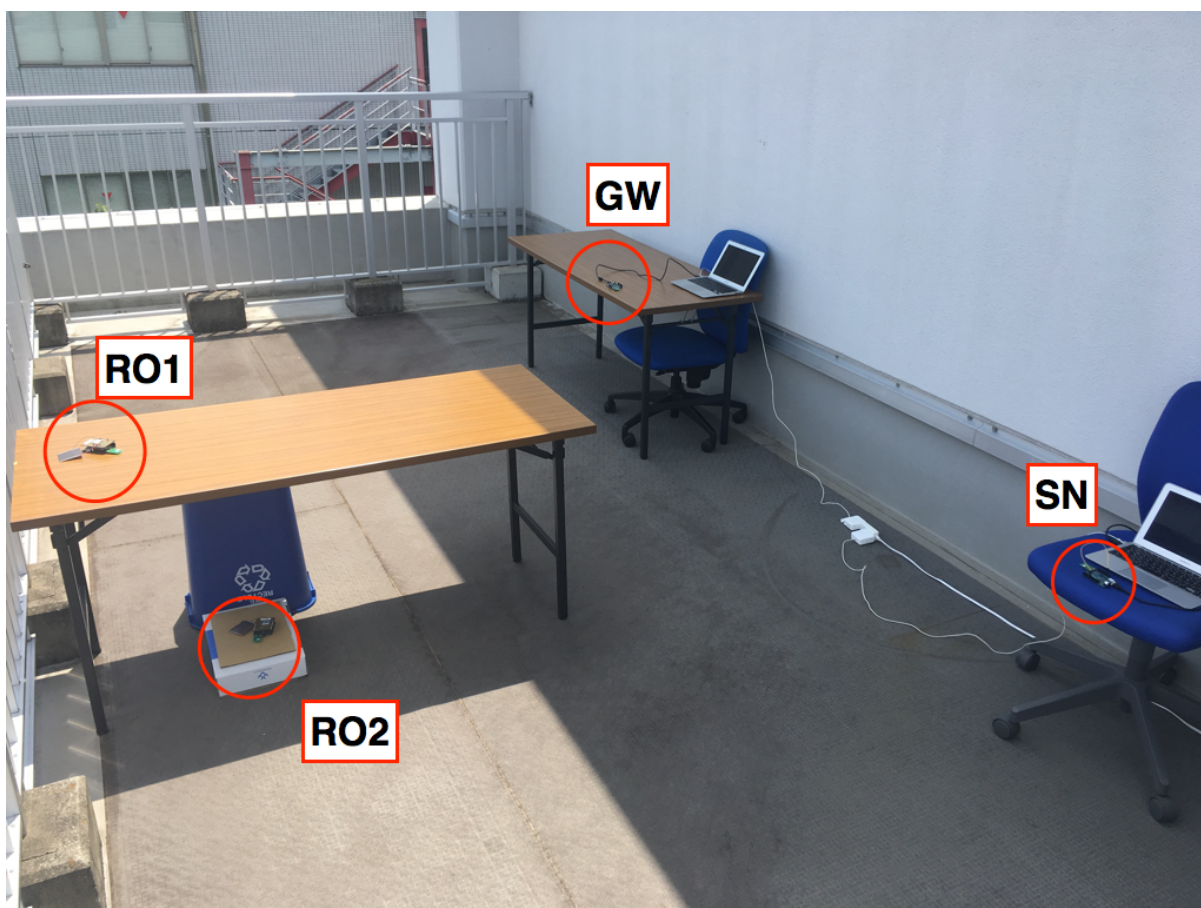


図 5.4: 実験環境

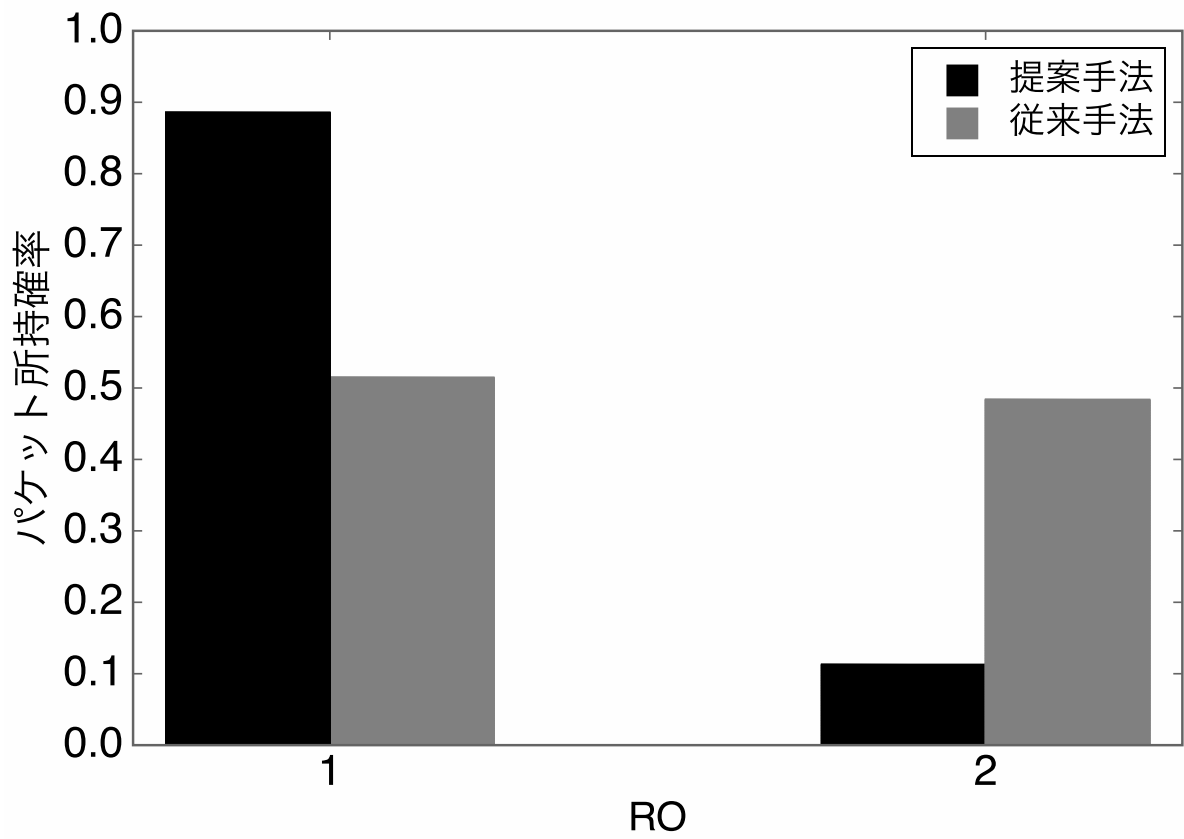


図 5.5: IRDT, ENRI-MAC における RO1 および RO2 のパケット所持確率

第6章 結論

本研究では、IRDTの通信信頼性および消費電力と間欠間隔の関係を理論解析から明らかにし、その知見からENRI-MACを提案した。ENRI-MACは、ENを満足させるようにIRDTの間欠間隔を制御することで、EHWSNにおける端末の電池切れを抑圧する。この間欠間隔制御により、従来手法と比較してネットワーク全体の通信信頼性が向上することを計算機シミュレーションから示した。また、ENRI-MACを実装し、幾つかの実験を介して、実環境においてもENRI-MACが優れた通信信頼性を達成することを示した。

謝辞

初めに、本論文の執筆、及びこれまでの研究活動にあたり、非常に多くの助言を賜りました石橋功至准教授に深く感謝致します。また、同研究室尾形駿さん、川口達広さん、電通大石橋孝一郎研究室の皆様には、論文や回路の作成、実験協力など多大なご支援をいただきました、ここに御礼申し上げます。加えて、研究内容に関し、有意義な議論を交わして頂いた電通大 AWCC 山尾泰教授、藤井威生教授、安達宏一准教授にも感謝申し上げます。AWCC メンバーの皆様にも日頃より大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に、ここまで支えていただいた家族に心より感謝の意を表します。

関連発表

査読付き国際会議 2 件

1. R. Tanabe, T. Kawaguchi, R. Takitoge, K. Ishibashi, and K. Ishibashi, “Energy-Aware Receiver-Driven Medium Access Control Protocol for Wireless Energy-Harvesting Sensor Networks,” *IEEE CCNC*, Las Vegas, NV (2018.1)
2. T. Kawaguchi, R. Tanabe, R. Takitoge, K. Ishibashi, and K. Ishibashi, “Implementation of Condition-Aware Receiver-Initiated MAC Protocol to Realize Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks,” *IEEE CCNC*, Las Vegas, NV (2018.1)

国際会議 2 件

1. T. Kawaguchi, R. Tanabe, and K. Ishibashi, “Experimental Evaluation of Condition-Aware Receiver-Initiated MAC Protocol for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks,” *in Proc. SmartCom 2017 (IEICE Tech. Rep.)*, vol. 117, no. 257, SR2017-92, pp. 71-72, Rome, Italy (2017. 10)
2. M. D. Nguyen, C. Tran, T. Kawaguchi, R. Tanabe, M. Oinaga, R. Takahashi, K. Ishibashi, and W.-Y. Shin, “Energy-aware receiver-driven medium access control protocol for wireless energy-harvesting sensor networks with multiple gateways,” *in Proc. the Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS) Winter Conference*, JeongSeon, Korea, Jan. 2018

国内研究会 7 件

1. 田邊稜, 石橋功至, “エネルギーハーベスティングセンサネットワークのための受信駆動型 MAC プロトコルの動的間欠間隔制御に関する一検討,” 電子情報通信学会 2016 ソサイエティ大会, B-18-54, 北海道大学, (2016.9)
2. 田邊稜, 石橋功至, “エネルギー到来情報に基づく分散間欠間隔制御付き受信機駆動型 MAC プロトコルに関する一検討,” 信学技報, vol. 116, no. 308, ASN2016-46, pp. 7-12, 名古屋大学, (2016.11)
3. 田邊稜, 石橋功至, 川田拓也, 土屋創太, 相澤礼奈, “受信機駆動型 MAC プロトコルを用いた無線センサネットワークの設計と解析,” 情報理論とその応用シンポジウム 2016, pp. 136-141, 高山市, (2016.12)

4. 田邊稜, 石橋功至, “他システム干渉環境における受信機駆動型 MAC プロトコルの通信失敗確率の解析,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-130, 名城大学, 名古屋市, (2017.3)
5. 田邊稜, 石橋功至, 川田拓也, 相澤礼奈, “無線共存ネットワークのための再送付き受信機駆動型 MAC プロトコルの性能解析,” 信学技報, vol. 117, no. 11, RCS2017-16, pp. 77-82, (2017.4)
6. 川口達広, 田邊稜, 石橋功至, “エネルギーハーベスティングセンサーネットワークの実現に向けた受信機駆動型 MAC プロトコルの実装と実験的評価,” 信学技報, vol. 117, no. 132, RCS2017-109, pp. 97-102, (2017.7)
7. 田邊稜, 川口達広, 石橋功至, “エネルギーの流入出量に基づく分散間欠間隔制御付き受信機駆動型 MAC プロトコル,” 情報理論とその応用シンポジウム 2017, pp. 559-564, 新発田市, (2017.11-12)

参考文献

- [1] 三瓶政一, 阪口啓 他, **無線分散ネットワーク**. 電子情報通信学会, 2011.
- [2] V. Raghunathan, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, “Emerging techniques for long lived wireless sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, pp. 108–114, Apr. 2006.
- [3] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” *Proc. 21st Ann. Joint Conf. IEEE Comput. and Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 1567–1576, 2002.
- [4] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, “X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks,” *Proc. Int’l Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys ’06)*, pp. 307–320, 2006.
- [5] Y. Sun, O. Gurewitz and D. B. Johnson, “RI-MAC: A receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks,” *Proc. Int’l Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys ’08)*, pp. 1–14, 2008.
- [6] T. Hatauchi, Y. Fukuyama, M. Ishii and T. Shikura, “A power efficient access method by polling for wireless mesh networks,” *IEEJ Trans. Electron. Inform. Syst.*, vol. 128, pp. 1761–1766, Dec. 2008.
- [7] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, “Energy-efficient receiver-driven wireless mesh sensor networks,” *Sensors 2011*, pp. 111–137, 2011.
- [8] H. Kawabata, K. Ishibashi, S. Vuppala, and G. Abreu, “Robust relay selection for large-scale energy harvesting IoT networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, pp. 384–392, Apr. 2017.
- [9] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, M.B. Srivastava, “Power management in energy harvesting sensor networks,” *ACM Transaction on Embedded Computer Systems*, vol. 6, p. 32, Sep. 2007.
- [10] V. Sharma and U. Mukherji and V. Joseph and S. Gupta, “Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, pp. 1326–1336, Apr. 2010.
- [11] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus and A. Yener, “Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, pp. 1732–1743, Sep. 2011.

- [12] S. Reddy and C. R. Murthy, “Dual-stage power management algorithms for energy harvesting sensors,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, pp. 1434–1445, Apr. 2012.
- [13] P. Poggi, G. Notton, M. Muselli, and A. Louche, “Stochastic study of hourly total solar radiation in corsica using a markov model,” *Int. J. Climatol.*, vol. 20, pp. 1843–1860, Nov. 2000.
- [14] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press 2005, 2005.