

## 無線バックホールシステムにおける多段無線中継

金, 光日

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

<https://doi.org/10.15017/21680>

---

出版情報 : 九州大学, 2011, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

# 無線バックホールシステムにおける 多段無線中継

金 光日

平成 24 年 2 月

# 概要

次世代ブロードバンド無線通信に求められる数百 Mbps の伝送レートを実現するためには、守備半径が数十メートルの狭小セル基地局（スモールセル基地局）を多数敷設することが必要となる。スモールセル基地局の敷設コスト削減は次世代ブロードバンド無線通信を実現する鍵と言っても過言ではない。この目的のため、スモールセル基地局を無線で多段中継接続するセルラシステムが検討されている。基地局群のうち幾つか（コアノード）を有線で基幹網へと接続し、その他（スレーブノード）はコアノードを介した多段無線中継により基幹網と接続される。基地局と基幹網を接続するための有線回線の敷設数を削減できるため、システム全体の敷設コストを低減することができる。また基地局が有線で縛られないため、基地局の再配置や追加が楽に行える利点も有する。当該無線中継網は通称、無線バックホールと呼ばれている。無線中継可能な段数が多ければ多いほど、システムの敷設に必要な有線回線の敷設量を削減できる。また欧州などで数多く現存する歴史的建造物等の一部の建物における無線エリア構築では、有線回線の敷設が不可能な場合があり、無線中継可能な段数が多ければ多いほど、当該無線システムの適用可能範囲を拡大することができる。すなわち許容可能な無線中継段数は、無線バックホールの性能を測るもっとも重要な指標である。

多段無線中継を阻害する最大の課題は電波干渉である。我々の研究室では無線バックホールにおいて多段無線中継を高効率に行う手法として、周期的間欠送信法（IPT : Intermittent Periodic Transmission）を提案している。IPT は、パケットの送信源となるノードにおいて一定の送信周期（IPT 送信周期）を持って間欠的に送信することにより、中継経路上での同一周波数リユース間隔を調

整し、最適な送信周期を設定することで電波干渉によるパケット衝突を回避することを特徴とする。IPT による中継伝送効率の改善効果は実証実験によっても確認されており、10 段以上の多段中継も可能であることが実機上で示されている。本論文では IPT によりもたらされた多段無線中継の性能を更に向上させるため、3つの研究について取り組んだ。

第一の研究は、安定した IPT の運用を保証するための中継経路の安定性改善である。IPT はツリー構造の中継経路上で運用され、中継経路の設定（ルーティング）は IPT の伝送性能を大きく左右する。無線バックホールシステムでは各基地局は固定的に設置されるため、基地局間の伝搬路特性は変動しないものと誤解される場合があるが、実際には人の移動やドアの開閉等によって変動する。従来のルーティング手法では、無線伝搬路特性の時間変動を考慮しておらず、経路を構築した瞬間の伝搬路特性によって構築された中継経路は、それ以降も最適である保証はない。動的な伝搬路特性の変動に追随しようと、ルーティングを繰り返すと、中継経路が不安定となってしまう。本論文では無線伝搬路特性が時間変動する環境でも安定したルートを構築するためのルーティング手法を提案し、システムスループットの改善について評価を行った。提案手法は、一定間隔でシステムの中継経路の更新を行い、その際、ノード間の伝搬損を過去の履歴を加味した逐次平均で表すことで、漸近的に安定した中継経路へと収束させることを特徴とする。提案手法を実機上で評価した結果、伝搬路が動的に変動する実環境において安定した中継経路が構築でき、システムのスループットが改善されることが確認できた。

第二の研究は、IPT の効果を最大化する最適送信周期の自動設定プロトコルについてである。無線バックホールにおいて、IPT に基づいた多段無線中継を行う場合、IPT 送信周期は最も重要なパラメータであり、適切に設定しないと IPT の効果は発揮できない。IPT 送信周期は、ノード配置や周辺環境などに依存するため、机上計算であらかじめ適切な数値を設定することは難しい。IPT 送信周期を自動的に設定する手法が必要となる。本論文ではコアノードが各スレーブノードに対しトレーニングパケットを送信することにより、コアノードから各スレーブノードまでのスループットが最大になる IPT 送信周期を設定する手法を提

案し、実験とシミュレーション両方で評価を行った。その結果、提案手法によって獲得された IPT 送信周期は常に最適な送信周期となることを確認した。

第三の研究は、指向性アンテナにより電波干渉を物理的に抑制した状態での IPT の実現についてである。指向性アンテナは送信電力を一定方向へ集中させることにより、他ノードへの干渉を軽減できる長所を有する。指向性アンテナの適用により IPT の性能は更に向上するものと期待されるが、全方位接続性を担保するためには異なる主軸方向の複数の指向性アンテナを装備する必要がある、その適応的な切り替え処理で生じる遅延時間の影響によって中継伝送効率の低下が生じる問題があった。本論文では各ノードに複数の無線インタフェースを搭載し、インタフェース毎に固定的な指向性を持ったアンテナを接続することにより、この切り替え処理遅延の影響を軽減できる手法（FDA: Fixed Directional Antenna）を提案した。FDA が適用された無線中継ノードに適したルーティング手法を提案し、これと IPT を併用することによって高い中継伝送効率を達成した。提案手法を実機テストベッドにより評価し、無指向性アンテナを適用した場合に比べて約 30% の性能改善が確認できた。

スマートフォンの爆発的普及に伴うトラフィックの急増により、無線通信のブロードバンド化への要求は一層高まってきている。本論文の成果は、無線バックホールの多段無線中継時の性能を向上させるものであり、無線バックホールが適用できる建造物の対象範囲を広げるものである。これによってスモールセルの導入が促進され、大容量な無線通信網の実現を容易なものとする。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.2	無線バックホール	5
1.3	研究課題と目的	7
1.4	本論文の構成	10
<b>第 2 章</b>	<b>無線バックホールを支える基本技術</b>	<b>11</b>
2.1	IEEE802.11 無線 LAN のアクセス制御方式	11
2.2	周期的間欠送信法 (IPT)	16
2.3	本章のまとめ	19
<b>第 3 章</b>	<b>無線バックホールにおける安定ルーティングプロトコル</b>	<b>21</b>
3.1	無線バックホールにおける従来のルーティング手法とその問題点	21
3.2	ルーティング手法におけるアルゴリズムとメトリック	23
3.3	RSSI の逐次平均に基づく安定ルーティングプロトコル	32
3.4	提案プロトコルの実験による評価	37
3.5	本章のまとめ	55
<b>第 4 章</b>	<b>無線バックホールにおける送信周期自動設定法</b>	<b>56</b>
4.1	既存の IPT 送信周期設定法	56
4.2	トレーニングによる送信周期自動設定法	58
4.3	提案手法の評価	61
4.4	本章のまとめ	69

---

<b>第5章</b>	<b>無線バックホールにおける指向性固定アンテナシステム</b>	<b>71</b>
5.1	指向性アンテナによる無線バックホールの性能強化……………	71
5.2	指向性アンテナの適用によって生じる諸問題と従来の対策	73
5.3	指向性固定アンテナシステム……………	75
5.4	FDA システムにおけるルーティング手法とパケット中継手	77
5.5	実験による評価……………	82
5.6	本章のまとめ……………	85
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>86</b>
	謝辞	89
	参考文献	90

# 略語一覽

ACK	ACKnowledge
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTP	Clear To Send
CTPACK	CTP ACKnowledge
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
CWmax	Maximum CW
Cwmin	Minimum CW
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF IFS
ETX	Expected Transmission Count
FDA	Fixed Directional Antenna
FTTH	Fiber To The Home
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IFS	Inter Frame Space
IMT	International Mobile Telecommunication
IPT	Intermittent Periodic Transmission
ITU-R	International Telecommunication Union-Radio



---

	communication
LAN	Local Area network
LB	Lunch Box
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad-Hoc Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NAV	Network Allocation Vector
OPET	Optimum Packet Scheduling for Each Traffic flow
OSI	Open System Interconnection
PCF	Point Coordination Function
PIFS	PCF IFS
PktPair	Per-hop Packet Pair Delay
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTS	Request To Send
RTT	Round Trip Time
SIFS	Short IFS
SINR	Signal to Interference plus Noise power Ratio
SOC	System on Chip
SRL	Short Retry Limit
SSID	Service Set Identifier
TM	Training Metric
W-CDMA	Wideband-Code Divided Multiple Access
WCETT	Weighted Cumulative Expected Transmission Time
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WMR	Wireless Multi hop Relay

# 図目次

1.1	4G への流れ	4
1.2	バックホールの種類	5
1.3	無線バックホール	6
2.1	IEEE802.11MAC の構成	12
2.2	Contention Window 長	13
2.3	Basic モードでのアクセス手順	13
2.4	隠れ端末問題 (Hidden terminal problem)	15
2.5	RTS/CTS モードでのアクセス手順	15
2.6	ノード配置	15
2.7	RTS/CTS モードにおけるリユースクラスタ 3 と無限大のホップ数に対するスループット	17
2.8	3 パケット時間長ごとにパケットを送信した場合に生ずるリユースクラスタ	19
3.1	重み付きグラフ G	23
3.2	ツリー構造ネットワーク	31
3.3	最小伝搬損ルーティング	31
3.4	RSSI の時間変動	32
3.5	RSSI の逐次平均	32
3.6	コアノードの動作	36
3.7	スレーブノードの動作	36
3.8	PicoMesh LunchBox の外観	38

3.9	実験フィールド 1:九州大学 W2 号館 8 階	38
3.10	実験フィールド 2:九州大学 W2 号館 2 階	38
3.11	実験フィールド 1 での伝搬路変動	40
3.12	実験フィールド 2 での伝搬路変動	40
3.13	実験フィールド 1 での受信レベル変動値分布	41
3.14	実験フィールド 2 での受信レベル変動値分布	41
3.15	固定ルートシステム 1	42
3.16	固定ルートシステム 2	42
3.17	スループット測定系	42
3.18	固定ルートシステム 1 でスループットの変動	44
3.19	固定ルートシステム 2 でスループットの変動	44
3.20	実験シナリオ 1 のノード配置	44
3.21	実験シナリオ 2 のノード配置	44
3.22	Route 1 の中継ルート	47
3.23	Route 2 の中継ルート	48
3.24	パスの変動	48
4.1	衝突回避 IPT 周期設定法	57
4.2	メッシュクラスタ	57
4.3	シミュレーションシサイト 1	62
4.4	マニュアルで測定したスループット値 : Node 3, 4, 5, 6	62
4.5	マニュアルで測定したスループット値 : Node 7, 10, 11	65
4.6	マニュアルで測定したスループット値 : Node 14, 15, 16, 17	65
4.7	マニュアルで測定したスループット値 : Node 18, 21, 22, 23	65
4.8	提案プロトコルにより計算された送信周期、 $\triangle = 100 \mu \text{ sec}$ 、 Node 1 ~ 11	66
4.9	提案プロトコルにより計算された送信周期 $\triangle = 100 \mu \text{ sec}$ 、 Node 12 ~ 23	66
4.10	提案プロトコルにより計算された送信周期、 $N = 300$ , $\triangle =$	67

	50, 100, 200 $\mu$ sec	
4.11	システムスループットの改善	67
4.12	実験配置：九州大学ウエスト 2 号館 8 階	68
4.13	マニュアルで測定した IPT とスループット特性	68
5.1	中継経路間の電波干渉	72
5.2	指向性アンテナの適用による空間効率の向上	72
5.3	無指向性アンテナを搭載した 3 つのノード間の通信	74
5.4	指向性アンテナを搭載した 3 つのノード間の通信	74
5.5	Deafness (キャリアセンス不可) 問題	74
5.6	F-3 指向性固定アンテナシステムのノード	76
5.7	ツリー構造の無線バックホール	79
5.8	コアノードのインタフェース毎に IPT を適用	79
5.9	PicoMesh SHELL の写真	84
5.10	実験シナリオのノード配置：九州大学 W2 号館 8 階	84
5.11	提案プロトコルにより構築されたルート	84
5.12	SHELL と LB のスループット特性	84

# 表目次

3.1	LB の主要諸元	38
3.2	提案プロトコルのパラメータ	38
3.3	シナリオ1の実験結果	47
3.4	シナリオ2の実験結果	47
3.5	シナリオ1: 従来手法実行時、各パスの出現頻度とスループット	51
3.6	シナリオ1: 提案手法実行時、各パスの出現頻度とスループット	51
3.7	シナリオ1: 平均スループットの比較と従来手法のスループット変動範囲	52
3.8	シナリオ2: 従来手法実行時、各パスの出現頻度とスループット	52
3.9	シナリオ2: 提案手法実行時、各パスの出現頻度とスループット	53
3.10	シナリオ2: 平均スループット比較と変動範囲	54
4.1	シミュレーションパラメータ	63
4.2	マニュアル測定により得られた最適な送信周期 ( $\mu$ sec)	66
4.3	N=300 の場合のプロトコルの実行時間	67
4.4	プロトコルにより計算された送信周期	68

# 第1章

## 序章

本章では、本論文における研究の背景と目的、及び論文の構成について説明する。

### 1.1 研究背景

情報化社会の発展に伴いインターネットは我々の生活に深く浸透し、今や日常生活になくてはならない存在となった。ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line) や FTTH (Fiber To The Home) などの有線ブロードバンド通信の普及は、ありとあらゆる情報を、インターネットを経由して高速に送受することを可能にした。この流れは、無線通信の世界へと波及しつつあり、その牽引役はスマートフォンやタブレットPCである。特に 2007 年に出現した iPhone を契機とし、スマートフォンの普及速度は一気に高まり、市販されている携帯端末の過半数が同種端末となるまでに市場は変化した。これらのスマートフォンのデータ通信量は従来のフィーチャーフォンのデータ通信量に比べて数十倍であるとされ、携帯通信網へ大きな負荷をかけている。無線通信システムの大容量化は喫緊に取り組むべき課題として、昨今の無線通信キャリアの最大の関心事である。本節ではこれまでの無線通信システムの進化について概観し、無線通信の大容量化への取り組みについて説明する。

無線通信システムの代表例として携帯電話システムを取り上げ、説明を行う。日本の携帯電話サービスは 1979 年にアナログ方式を用いた音声通話を中心とする第一世代が開始されて以来、1993 年にはデジタル方式を採用した第二世代方式、2001 年にはデータ通信機能を強化した第三世代方式が開始された。現在日本の携帯電話サービスの加入者数は一億人を超え、そのほとんどが第三世代方式である。更に第四世代方式に向け、2010 年から LTE (Long Term Evolution)

のサービスも部分的に開始されている。

第一世代の携帯電話システムはアナログ方式を採用していて、各利用者に異なる無線周波数を割り当てる周波数分割多重 (FDMA: Frequency Division Multiple Access) によりチャンネルを割り当てている。当方式は周波数利用効率が悪く、システムの容量に限界があった。そのため第二世代システムではデジタル通信方式が採用され、その代表例である GSM システムでは一つの周波数チャンネルを時間で分割した、時間分割多重 (TDMA: Time Division Multiple Access) によりチャンネル割り当てが行われた。GSM を進化させた EDGE (Enhanced Data Services for GSM Evolution) ではデータ伝送レートが最大 384Kbps まで達成できる。第二世代から第三世代へと至る過渡期には、符号分割多重 (CDMA: Code Division Multiple Access) 方式の研究開発が活発化した。CDMA 方式では隣接した基地局間で同一周波数を割り当て、さらに一つの端末が複数の基地局と通信を行うことでシステム容量の拡大を図った。第三世代方式は標準化機構 ITU-R (International Telecommunication Union-Radio Communication) において国際標準化が進められた。ITU-R は、第三世代方式が満たすべき要件として IMT-2000 (International Mobile Telecommunication 2000) を勧告した。同勧告では、国際ローミングへの対応や最大 2 Mbps のブロードバンドデータ通信が盛り込まれた。ITU-R の勧告後、第三世代方式の標準化の推進母体として、1998 年に各国の標準化団体等が連携し、3GPP (Third Generation Partnership Project) が設立された。3GPP が仕様を策定した第三世代方式の代表的方式である WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) システムでは、静止時の最大下り伝送レートとして 2Mbps をサポートした。但し光ファイバーなどの有線ブロードバンド回線で提供されている 100Mbps オーダーの伝送レートに比べれば依然ナローバンドであった。

有線ブロードバンド環境において発達してきた高度なサービスをモバイル環境でも使用するためには、無線通信の更なるブロードバンド化が必須である。以下では 4G 或いは Beyond 3G とも呼ばれる、次世代ブロードバンド無線通信方式への流れについて説明する。ITU-R では 2003 年 6 月に “Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond

IMT-2000” というタイトルの「ITU-R M. 1645」 勧告を発表した。本勧告では、次世代のブロードバンド通信インフラは、そのコア・ネットワークはすべて IP 化し、低速移動時 1Gbps および高速移動時 100Mbps を実現するシステムであることが規定されている。本勧告を想定して、各国で次世代ブロードバンド無線通信へ向け開発が進められた。2006 年には W-CDMA の拡張モードとして、HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) の運用が開始された。HSDPA は下り方向の伝送レートを最大 14.4Mbps まで向上させた仕様となっている。その後、上り方向の高速化が行われ (HSUPA: High Speed Uplink Packet Access)、HSDPA とともに総称して HSPA (High Speed Packet Access) と呼ばれている。HSPA は既存 3G ネットワークとの互換性を重要視していることから、第 3.5 世代方式とも呼ばれている。

一方、3GPP では HSPA と並行して新しい無線アクセス方式である、LTE (Long Term Evolution)、さらにその先の LTE Advanced の標準化も進められた。LTE では既存の 3G ネットワークとの互換性に囚われることなく、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) や MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) などの新しい技術の導入により高速データ伝送を図っている。OFDM は低速レートの情報信号を被変調波とする複数のサブキャリア変調波を束ねることを特徴としており、周波数選択性フェージングに対する耐性が強く、高速データ伝送を可能としている。一方、MIMO は、送信機と受信機においてそれぞれ複数のアンテナを使用することで、異なる情報信号を空間的に多重し、同一時間同一周波数を用いて信号を伝送するため、安定した通信を実現可能としている。LTE は下り方向で最大 100Mbps、上り方向で最大 50Mbps を、そして LTE-Advanced は下り方向最大 1Gbps、上り方向最大 500Mbps の伝送レートを目標としている。

ブロードバンド無線通信を実現するためのその他のアプローチに、無線 LAN (Local Area Network) と WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) による取り組みがある。無線 LAN システムは 90 年代前半に出現してから、家庭やオフィスのブロードバンド無線インフラとして急速に普及した。無線 LAN は標準化団体 IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 802 委員会により発行された 802.11 標準規格に準拠しており、無線 LAN 業界の



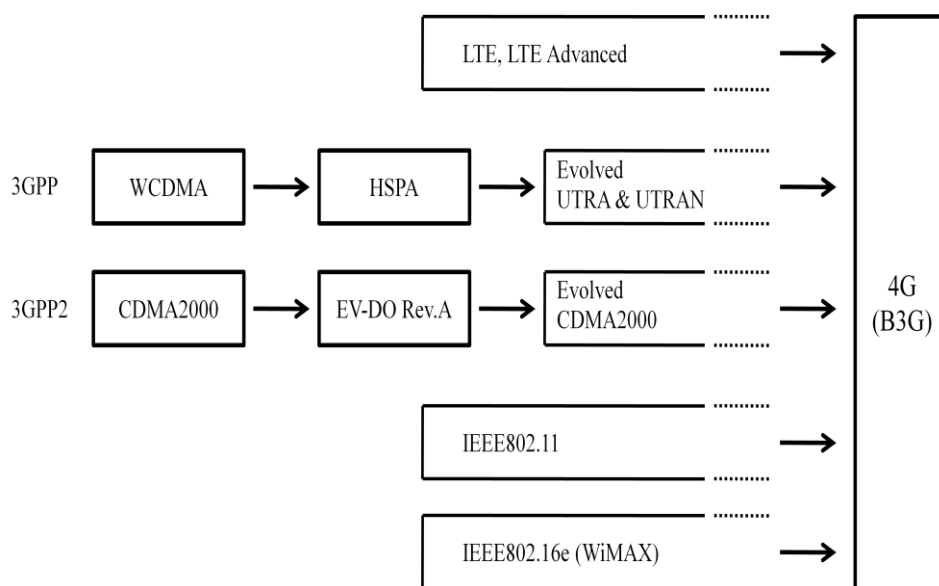


図 1.1 4G への流れ

団体である WiFi (Wireless Fidelity) Alliance により装置の相互接続のための認証が行われる。無線 LAN の最大伝送速度は 802.11b (1997 年) では 11Mbps、802.11a と (1999 年) 802.11g (2003 年) では OFDM 変調方式を採用し 54Mbps まで上げられた。更に 2010 年に仕様が確定した 802.11n では最大 600Mbps までの高速通信をサポートしている。1999 年スタートした IEEE802.16 ワーキング・グループでは MAN (Metropolitan Area Network、都市域通信網) の標準を策定し、その後 2001 年 4 月 WiMAX フォーラムが形成された。IEEE802.16 は当初、ポイントツーポイントあるいはマルチポイントツーマルチポイント型の固定無線通信のための規格であったが、新たに移動端末への接続性を保証するべく、IEEE802.16 を発展させた IEEE802.16e が策定された。WiMAX として現在サービスが展開されている通信方式は、一般にこの IEEE802.16e 規格を指す場合が多い。同規格の最大伝送速度は 20MHz 帯域幅の時約 75Mbps に達する。

図 1.1 に 4G への大まかな流れを示している。上記で説明したように、4G へ向け無線通信の伝送速度は著しく向上しているものの、スマートフォンの普及により急増しているトラフィックに追いつくことは、LTE の導入をもっても困難と言われている。無線通信システムには、データ伝送レートの向上だけではなく、トラフィックをさばく能力、即ちシステム容量の拡大も欠かせない。KDDI の発

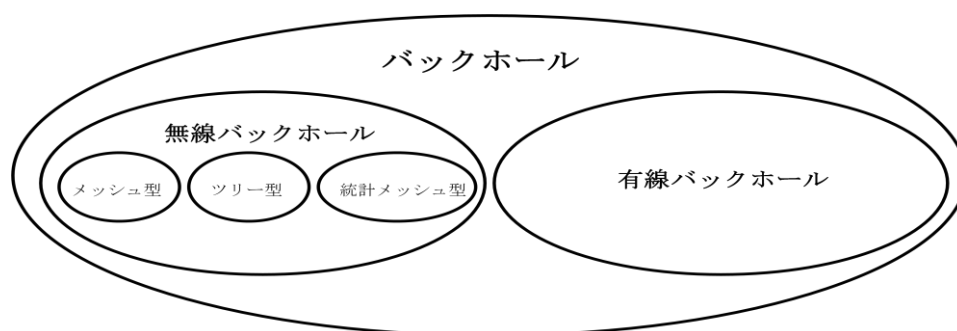


図 1.2 バックホールの種類

表によれば 2011 年の時点で、スマートフォンはまだ 10%しかいないが、既にトラフィックの 60%を超えていて、2012 年に LTE を導入した後もシステム容量を超えるトラフィックが発生すると予測されている。急増するトラフィックの対応策には、データ通信を様々な回線に分散させる「データオフロード」、例えば WiFi 或いは WiMAX の回線にトラフィックを分散させる取り組み、或いは LTE により Small Cell を採用するなどの手法がある。

## 1.2 無線バックホール

本節では無線通信システムの高速化と大容量化に伴い顕在化する基地局敷設コスト増大の問題について説明し、その対策である無線バックホールについて説明する。

無線通信システムでデータ伝送の高速化を行うためには、ビット当たりの送信電力を大きくする必要があり、送信電力の制限下で要求された伝送レートに達するためには、基地局と端末間の通信距離を短縮し、各基地局の守備するエリアを狭小化することが必要となる。一方無線通信システムの大容量化を行うためには、各基地局の守備範囲を縮小することにより、基地局当たりの負荷を軽減することが必要となる。そのため Small Cell（半径数十メートルの狭小基地局）化は次世代無線通信システムにおいて必要かつ必須なことである。但し広いサービスエリアをカバーするためには、Small Cell を多数敷設する必要が生じ、基地局の敷設コストが増える。そのためコスト削減は次世代無線通信を実現する鍵と言っても過言でない。

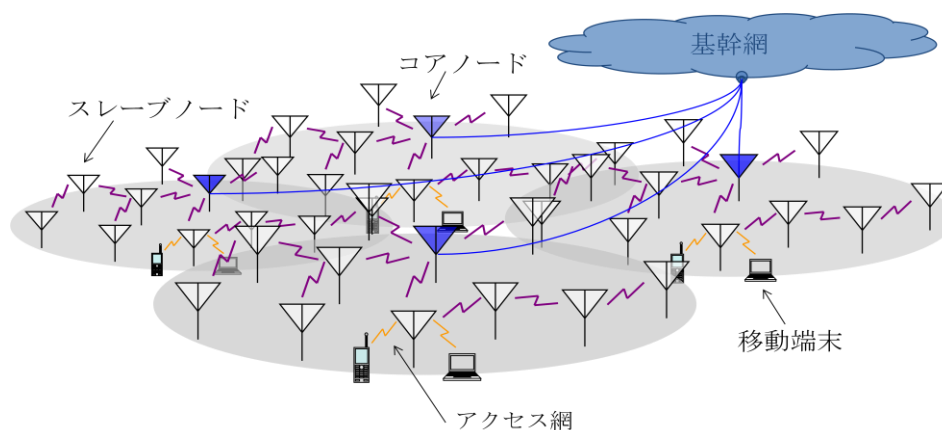


図 1.3 無線バックホール：基地局間の回線及びコアノードと基幹網を結ぶ回線

基地局敷設コストを削減する手法として、各基地局を無線で多段中継するセルラシステムが検討されている。基地局群のうち幾つか（コアノード）を有線で基幹網へと接続し、その他（スレーブノード）はコアノードを介した多段無線中継により基幹網と接続される。当該無線中継網は通称、無線バックホールと呼ばれている。ここでバックホールとは基地局と基幹網を接続する回線のことを指し、基幹網とは遠隔地を結ぶ広域ブロードバンド通信網を指す。バックホールは通信媒体の採用により有線バックホールと無線バックホールに分類でき、無線バックホールはさらにメッシュ型とツリー型、そして統計メッシュ型などに分類できる（図 1.2）。メッシュ型の無線バックホールは、ノード間を互いに Multi-Point to Multi-Point 状に接続し、中継経路を網の目状に形成しているため、無線メッシュネットワークとも呼ばれている。無線メッシュネットワークでは、各ノードが複数の中継パスを有するため、パケットの伝送調停が必要となり、中継伝送効率が低下する問題がある。これに対し、ツリー型の無線バックホールでは有線網にケーブルで接続されたノードを基幹とし、各ノードにおける枝分かれ分岐点の数を減らすことが可能であるため、パケットの衝突調停にかかる制御負荷を軽減し、パケット伝送効率を向上することが可能となる。そのため本論文ではツリー構造の無線バックホールを検討の対象とする。一方ツリー型無線バックホールにおいて、伝搬路の時間変動を考慮し、システムの中継経路を定期的に更新すると、長期間で観測した平均的ルートはメッシュ状になる。このような経路制御手法を採用した無線バックホールは統計メッシュ

型と呼ばれている。図 1.3 にツリー型の無線バックホールにおける基幹網、アクセス網の関係を模式的に示している。ここでアクセス網とは移動端末と基地局の間のアクセス回線のことを指す。

無線バックホールはこれまで広く応用されている。例えば北米ではデジタルデバイド解消のため地方自治体を中心となったブロードバンド無線インフラを敷設する動きが活発になり、そこで低コストで基地局を整備するために無線バックホールが利用されている。一方 IEEE802.11s では無線 LAN を用いた無線マルチホップ中継に関する標準化が行われている。無線バックホールでは基地局と基幹網を接続するための有線回線の敷設数を削減できるため、システム全体の敷設コストを低減することができる。また基地局が有線で縛られないため、基地局の再配置や追加が楽に行える利点も有する。無線中継可能な段数が多ければ多いほど、システムの敷設に必要な有線回線の敷設量を削減できる。また欧州などで数多く現存する歴史的建造物等の一部の建物における無線エリア構築では、有線回線の敷設が不可能な場合があり、無線中継可能な段数が多ければ多いほど、当該無線システムの適用可能範囲を拡大することができる。すなわち許容可能な無線中継段数は、無線バックホールの性能を測るもっとも重要な指標である。

### 1.3 研究課題と目的

本論文では無線バックホールにおける高性能多段無線中継手法について検討を行う。無線バックホールの性能を改善するアプローチとして、主に2つの手法が考えられる。その一つは与えられた無線インタフェース (OSI 参照モデルが指すところの第1層及び第2層部分、即ち MAC 層以上) に変更を加えることなく、多段中継することにより中継伝送効率を最大化するシステムレベルでの対応である。もう一つの手法は新しい無線インタフェースの設計による、リンクレベルでの対応である。リンクレベルでの対応は LSI の設計などを必要とするためコストの増加が大きく、安価で無線バックホールを構築することは難しい。そのため本論文では前者のシステムレベルによる無線バックホールの性能改善に着目する。

多段無線中継を阻害する最大の課題は電波干渉である。著者が所属している研究室では無線バックホールにおいて多段無線中継を高効率に行う手法として、周期的間欠送信法 (IPT: Intermittent Periodic Transmission, [24]) を提案している。IPT は、パケットの送信源となるノードにおいて一定の送信周期 (IPT 送信周期) を持って間欠的に送信することにより、中継経路上での同一周波数リソース間隔を調整し、最適な送信周期を設定することで電波干渉によるパケット衝突を回避することを特徴とする。IPT による中継伝送効率の改善効果は実証実験によっても確認されており、10 段以上の多段中継も可能であることが実機上で示されている。本研究室では IPT を基本中継方式とし、設置すれば即座にブロードバンド通信エリアが確保できるような、小型で可搬性のある無線バックホールの研究開発を進めている。その推進母体として、MIMO-MESH プロジェクトを立ち上げた。MIMO-MESH プロジェクトは「地域イノベーションクラスタープログラムグローバル型 (第 II 期)」事業のプロジェクトで、文部科学省と福岡県の補助を受けている (2007-2012, [37])。著者は本プロジェクトにおいて、ルーティングとパケット中継プロトコルの研究開発に従事している。

文献[24]では IPT による性能改善は示しているものの、IPT 送信周期の具体的な設定手法については検討しておらず、無線バックホールのルーティング手法が IPT の性能へ及ぼす影響についても検討していない。さらに指向性アンテナが適用された無線バックホールでの IPT の応用方法についても検討されていない。そのため本論文では IPT によりもたらされた多段無線中継の性能を更に向上させるために、以下に示す3つの研究について取り組んだ。

第一の研究は、安定した IPT の運用を保証するための中継経路の安定性改善である。IPT はツリー構造の中継経路上で運用され、中継経路の設定 (ルーティング) は IPT の伝送性能を大きく左右する。無線バックホールシステムでは各基地局は固定的に設置されるため、基地局間の伝搬路特性は変動しないものと誤解される場合があるが、実際には人の移動やドアの開閉等によって変動する。従来のルーティング手法では、無線伝搬路特性の時間変動を考慮しておらず、経路を構築した瞬間の伝搬路特性によって構築された中継経路は、それ以降も最適である保証はない。動的な伝搬路特性の変動に追随しようと、ルーティン

グを繰り返すと、中継経路が不安定となってしまふ [31]。本研究を始める際に、無線バックホールにおいて安定的な中継経路を構築するルーティング手法はまだ提案されていなかった。従来のルーティング手法とその問題点については第3章で詳しく検討する。本論文では無線伝搬路特性が時間変動する環境でも安定したルートを構築するためのルーティング手法を提案し、システムスループットの改善について評価を行った。提案手法は、一定間隔でシステムの中継経路の更新を行い、その際、ノード間の伝搬損を過去の履歴を加味した逐次平均で表すことで、漸近的に安定した中継経路へと収束させることを特徴とする。提案手法を実機上に実装し、ルーティング特性とスループットに改善について評価を行う。

第二の研究は、IPT の効果を最大化する最適送信周期の自動設定プロトコルについてである。無線バックホールにおいて、IPT に基づいた多段無線中継を行う場合、IPT 送信周期は最も重要なパラメータであり、適切に設定しないと IPT の効果は発揮できない。IPT 送信周期は、ノード配置や周辺環境などに依存するため、机上計算であらかじめ適切な数値を設定することは難しい。IPT 送信周期を自動的に設定する手法が必要となる。本研究を始める際パケットの衝突回避を可能にする IPT 送信周期設定法が提案されていた [23]。但し本手法は既存 MAC プロトコルの変更を必要としているため、実用性に乏しい。本論文ではコアノードが各スレーブノードに対しトレーニングパケットを送信することにより、コアノードから各スレーブノードまでのスループットが最大になる IPT 送信周期を設定する手法を提案し、実験とシミュレーション両方で評価を行う。

第三の研究は、指向性アンテナにより電波干渉を物理的に抑制した状態での IPT の実現についてである。指向性アンテナは送信電力を一定方向へ集中させることにより、他ノードへの干渉を軽減できる長所を有する。指向性アンテナの適用により IPT の性能は更に向上するものと期待されるが、全方位接続性を担保するためには異なる主軸方向の複数の指向性アンテナを装備する必要がある、その適応的な切り替え処理で生じる遅延時間の影響によって中継伝送効率の低下が生じる問題があった [30]。本論文では各ノードに複数の無線インタフェースを搭載し、インタフェース毎に固定的な指向性を持ったアンテナを接続する

ことにより、この切り替え処理遅延の影響を軽減できる手法（FDA: Fixed Directional Antenna）を提案した。FDA が適用された無線中継ノードに適したルーティング手法を提案し、これと IPT を併用することによって高い中継伝送効率を達成した。提案手法を実機テストベッドにより評価し、無指向性アンテナを適用した場合との比較を行う。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では本論文の背景となる無線 LAN 規格と、本論文で研究の基礎としている IPT の概念など、無線バックホールを支える基本技術について説明する。

第3章では本論文の最初の研究課題である、無線バックホールにおいて安定した中継経路を構築する手法について検討を行う。本章ではまず無線バックホールにおける従来のルーティング手法の問題点について指摘し、次に伝搬路の時間変動を考慮した安定ルーティング手法を提案する。提案手法を実機テストベッド実装し、実験により評価を行い、更に提案手法によるスループットの改善に対して評価を行う。

第4章では本論文の二番目の研究課題である、無線バックホールにおける送信周期自動設定法について検討する。本章ではまず既存の送信周期自動設定法とその問題点について説明し、次にトレーニングに基づいた新しい送信周期自動設定手法を提案する。そして提案手法を実験とシミュレーション両方で評価を行う。

第5章では本論文の三番目の課題である無線バックホールにおける指向性アンテナの適用方法について検討する。本章ではまず無線バックホールにおいて指向性アンテナを適用する場合に生じる問題について説明し、次にその対策として指向性固定アンテナシステム (FDA) について提案する。次に FDA が適用された無線中継ノードに適したルーティング手法を提案し、FDA と IPT を併用する手法について提案する。そして提案手法を実機テストベッドにより評価する。

最後に第6章で本論文の結論を述べる。

## 第2章 無線バックホールを支える基本技術

本論文では低コストでの無線バックホールの構築を可能とするために、無線インタフェースに市場で購入できる汎用の無線モジュールを使用することを前提とする。特に近年急速に普及され高性能且つ安価になっている IEEE802.11 無線 LAN モジュールを採用することにした。そのため本章ではまず無線 LAN 規格に関する基本概念について説明し、次に本論文で基礎としている周期的間欠送信法について説明する。

### 2.1 IEEE802.11 無線 LAN のアクセス制御方式

本節では IEEE802.11 無線 LAN ([41]) でのアクセス制御機構の詳細を説明する。IEEE802.11MAC (Media Access Control) ではアクセス制御機能として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) が採用されている。CSMA/CA では、パケットの送信を試みようとする無線局が無線チャネルの使用状況をキャリアセンスによる搬送波の検出有無により判断し、搬送波を検出する間 (Busy) は送信待機し、一定期間検出しなければ (Idle) 送信を開始する、図 2.1 には IEEE802.11MAC の構成を示している。IEEE802.11MAC におけるアクセス制御方式には DCF (Distributed Coordination Function) と PCF (Point Coordination Function) の 2 つが規定されている。基本アクセス制御方式とされている DCF では各無線局が CSMA/CA により自律分散的にパケットの送信タイミングを決定する。しかし CSMA/CA では偶然同時にパケットを送信し、パケット衝突となり通信が失敗してしまう可能性があるため、IEEE802.11MAC ではオプションとして PCF を設けている。PCF では無線セル内においてポーリングに基づく集中制御によるアクセス制御が行われる、ポーリングとは、基地局が各端末に順番にポーリング信号を送信し、基地局からポーリング信号を受け取った端末のみがパケットの送信を許可されるというアクセス手順である。基地局が PCF



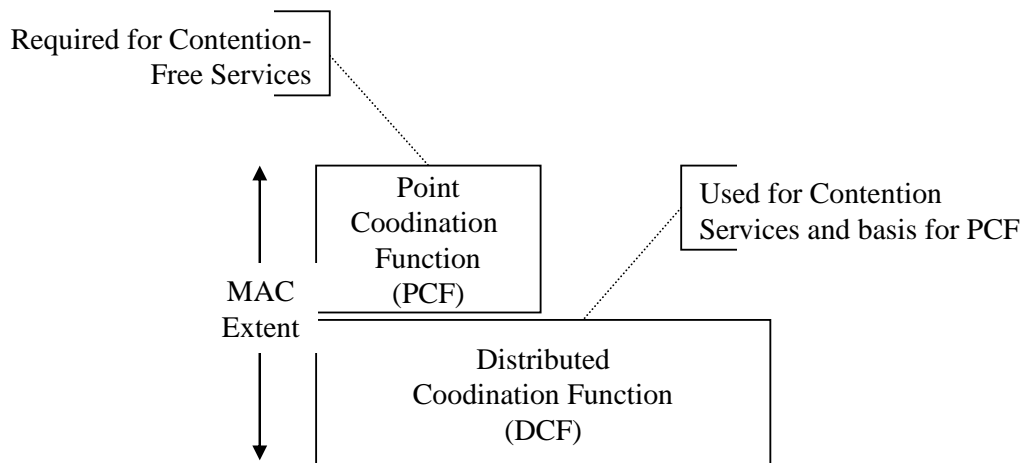


図 2.1 IEEE802.11MAC の構成

をサポートする場合、無線セル内では DCF によるアクセス制御を行う期間と、PCF によるアクセス制御を行う期間を周期的に切り替えて運用する。本研究では複数の基地局が集中管理されなくとも高い中継伝送効率を達成可能な中継基地局自律分散的型のマルチホップ中継を目指しているため、DCF による運用を前提とする。

IEEE802.11 無線 LAN の基本アクセス制御方式である DCF では、CSMA/CA とランダムバックオフ (Random Backoff) により、同一周波数を利用する複数無線局の自律的にアクセス制御できるようにする。ランダムバックオフはチャンネルが Idle となった直後に複数の無線局が同時に送信を開始することを避けるために設けられている。バックオフ期間では、Slot time で規定される時間長の整数倍の時間送信待機し、このときの整数は $[0, CW$  (Contention Window)長]の範囲で一様乱数により決定される。図 2.2 に示すように CW 長は新規のデータパケットを送信する度に規定された最小値 (Minimum CW, MinCW) に設定され、再送の都度指数的に増加するが、規定された最大値 (Maximum CW, MaxCW) に到達するとそれ以上の増加は行わない。また、IEEE802.11 では信号を送信する前の時間間隔として IFS (Inter Frame Space) を定めている。IFS には SIFS (Short IFS), PIFS (PCF IFS)、および DIFS (DCF IFS) があり、その大きさ ( $SIFS < PIFS < DIFS$ ) によりパケットの種類に応じた送信優先度を与える。

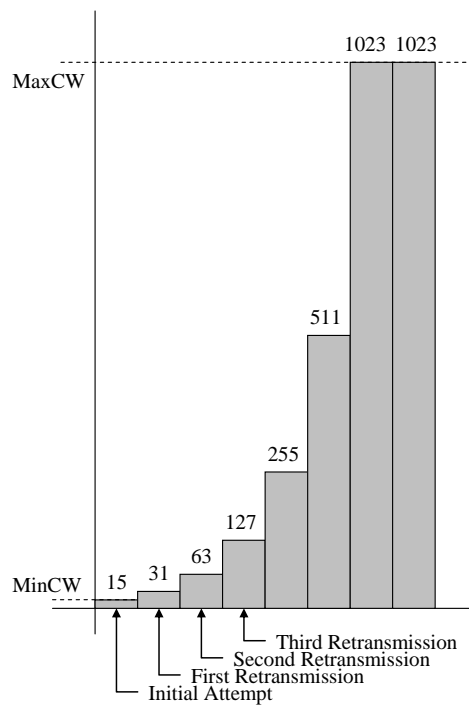


図 2.2 Contention Window 長

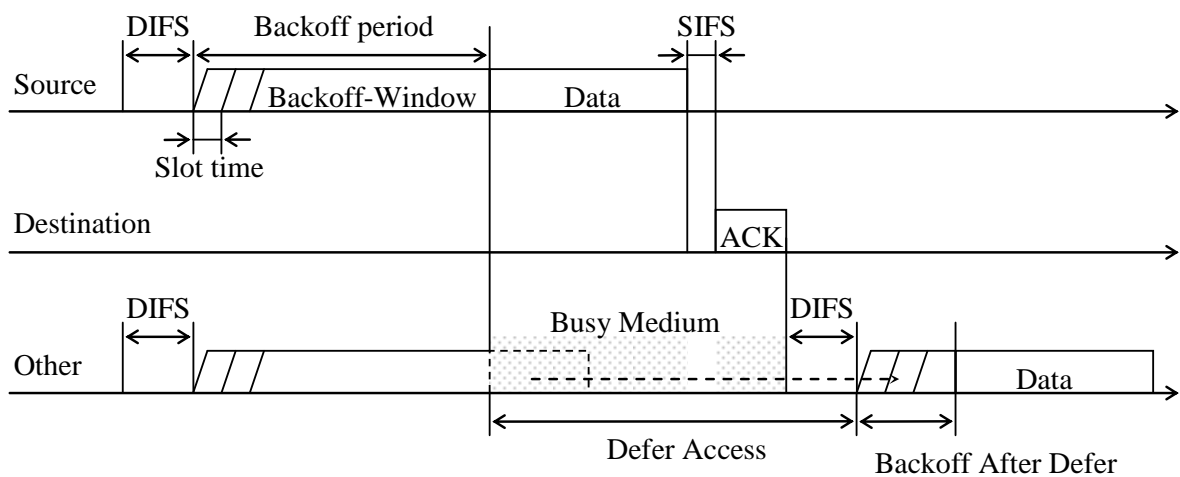


図 2.3 Basic モードでのアクセス手順

DCF にはさらに大きく 2 つのアクセス手順、Basic モードと RTS/CTS モードが規定されており、以下では Basic モードと RTS/CTS モードのそれぞれについて説明する。

### 2.1.1 Basic モード

DCF において、Basic モードの基本アクセス手順を図 2.3 に示す。

図 2.3 に示すように、パケットの送信を試みようとする無線局 (Source, Other) はキャリアセンスによりチャネルが Idle である期間が DIFS 期間続くとバックオフ期間に入る。さらにチャネルが Idle である期間がバックオフ期間続くとデータパケットの送信を開始する。バックオフ期間中に搬送波を検出すると、残りのバックオフ期間を保持し、チャネルが DIFS 期間 Idle になるのを待つ。チャネルが再び DIFS 期間 Idle になると、続きのバックオフを再開する。目的局 (Destination) では、データパケットの受信に成功すると、SIFS 期間を経て、確認応答である ACK (Acknowledge) パケットを送信局 (Source) に送信する。送信局はデータパケットの送信後、規定時間内に ACK を受信しなければ通信に失敗したと判断し、再送を行うためにキャリアセンスを開始する。送信局では再送においても同様の手順を繰り返すが、前述のように CW 長は MaxCW に達するまでは再送の都度指数的に増加する。

### 2.1.2 RTS/CTS モード

Basic モードでは回避できないパケット衝突の例を図 2.4 に示す。図 2.4 ではノード A がノード B に向けてパケットの送信を行い、ノード C もノード B に向けて送信を試みている。ここでノード A とノード C が距離的に離れた位置関係、あるいは間に障害物が存在するなどの理由で互いに搬送波を検出できない場合、ノード A がパケットを送信中にも関わらずノード C はノード B に向けパケットの送信を開始してしまい、パケット衝突となり通信が失敗する。このように、複数の無線局が互いに搬送波を検出できない場合、同時にパケットを送信し互いに干渉を与え通信が失敗してしまう問題を、隠れ端末問題と呼ぶ。

IEEE802.11 では隠れ端末問題のような CSMA/CA が有効に機能しない伝搬環境に対応するために RTS (Request To Send) / CTS (Clear To Send) と呼ばれる対策が定義されている。RTS/CTS モードの通信では、Basic モードの手順に加え、データパケットの送信の前に送信局 - 目的局間で RTS パケットならびに CTS パケットのやり取りを行う。RTS/CTS モードでのアクセス手順の例を図 2.5 に示す。

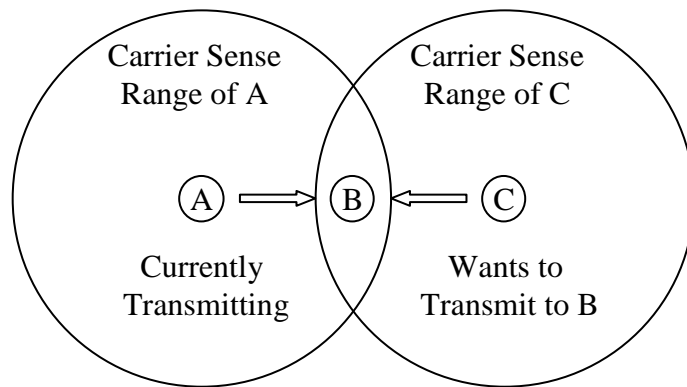


図 2.4 隠れ端末問題 (Hidden terminal problem)

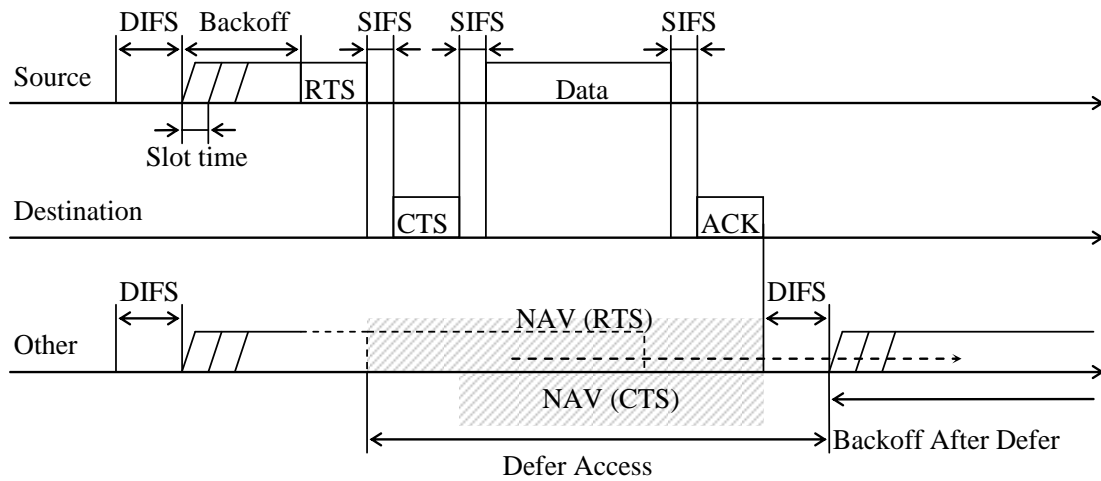


図 2.5 RTS/CTS モードでのアクセス手順

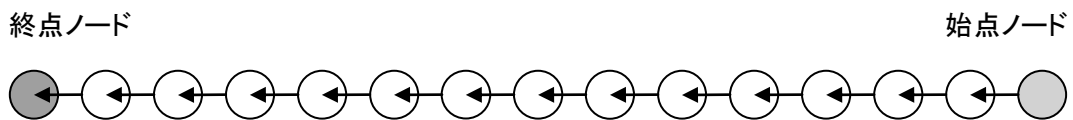


図 2.6 ノード配置

送信局 (Source) では、Basic モードの手順と同様にキャリアセンスによりチャンネルが DIFS 期間 Idled であるとバックオフを開始する。送信局はバックオフ期

間を終了すると、データパケットではなく RTS パケットを送信する。RTS パケットには送信局がこれからチャネルを使用する期間の情報が含まれている。目的局(Destination)は RTS を受信後すぐに CTS パケットを送信局に向け送信する。CTS パケットにも RTS の情報を基にこれからチャネルが使用される期間の情報が含まれている。RTS、CTS パケットは送信局ならびに目的局周辺の無線局でも受信され、受信した無線局では NAV (Network Allocation Vector) が設定され、チャネルの予定使用期間の間送信待機状態となる。こうして送信局は隠れ端末の関係にある無線局にもチャネルの使用を報知できるため、隠れ端末に起因するデータパケットの衝突が回避できる。無線局はバックオフ期間中に RTS/CTS パケットをすると、残りのバックオフ期間を保持し、NAV の期間経過した後チャネルが DIFS 期間 Idle になるのを待って、続きのバックオフを再開する。RTS/CTS モードにおいても、RTS パケットもしくは CTS パケットの伝送時には隠れ端末の影響を受けるが、しかし、両パケットともデータパケットに比べて時間長が短く、隠れ端末による RTS/CTS パケットの衝突確率は低い。

## 2.2 周期的間欠送信法 (IPT)

本節では、前節で解説した IEEE802.11 規格の無線 LAN を適用した無線バックホールの特性を示し、周期的間欠送信法 (IPT) の原理について詳述する。

### 2.2.1 無線 LAN を使用した無線バックホールの特性

IEEE802.11 規格の無線 LAN を無線中継回線インタフェースに用いた場合の無線バックホールにおいて周波数リユース効果がどの程度発揮されるかを計算機シミュレーションにより調べる。想定したノード配置を図 2.6 に示す。図のようにノードを直線上に等間隔で配置し、パケットの送信源を始点ノード、最終到着ノードを終点ノードとする。ここではノードを 15 個並べ、常に隣のノードに中継する 14 ホップの中継伝送を行う場合を考える。各ノードは中継するべきパケットを受信すると直ちに中継する。自ノードと、自ノードから互いに干渉せずに同時にパケット送信ができる最も近いノードとの間

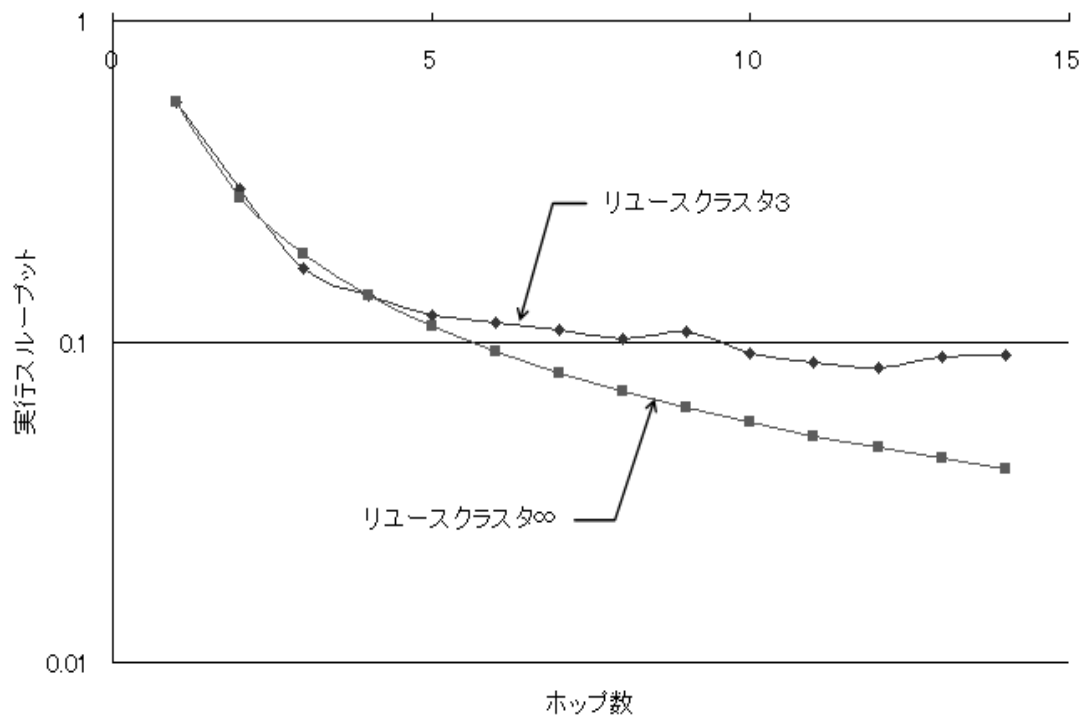


図 2.7 RTS/CTS モードにおけるリユースクラスタ 3 と無限大のホップ数に対するスループット

に含まれるノード数に 1 を加えた値をリユースクラスタと定義する。例えば、あるノードが他のノードへ及ぼす干渉が隣接する 1 ノード先までで、2 ノード以上先のノードでの干渉は 0 だとすると、リユースクラスタは 3 となる。所要 SINR は 10dB とし、受信したパケットの品質が当該所要値以上の場合は確率 1 で受信に成功し、そうでない場合は確率 1 で受信に失敗するものとする。データパケット長は 11Mbps 伝送で 1500 バイト相当のデータパケットを送信する場合を想定して、130SIFS とする。また ACK、RTS、CTS パケットのパケット長は同一とし、データパケットの 1/6.5 倍とした。最小 CW 長は 64[SIFS]とし、最大 CW 長は 2048[SIFS]とした。

評価は終点ノードで観測される実効スループットにより評価する。実行スループットは次のように定義する。まず終点ノードにおいて先頭データパケットの受信開始から最終データパケットの受信完了までの時間を測定し、終点ノードにおいて受信した全データパケットに含まれる情報ビット数を当該時間で割

ったものをスループットとする。次に終点ノードにおいて連続するデータパケットが空き時間なくかつ重複なく受信できるとした場合のスループットを最大スループットとする。また終点ノードにおいて同一パケットの平均受信回数をパケット重複率とし、スループットを最大スループットならびに重複率で割ったものを実効スループットとする。リユースクラスタ 3 の場合と無限大の場合に RTS/CTS モードを用いた場合のホップ数に対するスループットの評価結果を図 2.7 に示す。

図 2.7 から分かるように、リユースクラスタ無限大では隠れ端末が発生しないため、ホップ数が少ない領域においてリユースクラスタ 3 の場合よりもわずかに高いスループットを示している。しかし、ホップ数が大きくなるにつれてリユースクラスタ 3 の方が無限大の場合よりも相対的にスループットは高くなる。すなわち、ホップ数が大きな領域では、隠れ端末の発生する危険性が高まっても周波数リユースの効率を高めるほうが、より中継伝送効率を高められるのである。これを周波数リユース効果と呼ぶことにする。このようなマルチホップネットワークにおける周波数リユース効果はフィールド実験でも確認されている ([11])。更なる周波数リユース効率の改善を達成するために、周期的間欠送信法が提案された ([20])。

### 2.2.2 周期的間欠送信法 (IPT)

周期的間欠送信法 (IPT) では、パケット送信源となるノードにおいて連続的にパケットを送るのではなくある時間間隔を付与する。この方法により時間間隔に応じて中継経路上の同一周波数リユース間隔を意図的に調整することが可能となり、適切な時間間隔を設定することによりスループットの改善が達成される。

IPT の原理を詳細に説明する。11 個のノードを直線上に配置し常に隣のノードへ中継する 10 ホップの中継伝送を行う場合を考える (図 2.8)。説明の利便性を考え、パケットの発信源となるノードを始点ノード、最終到着ノードを終点ノードと定義する。パケット長は常に一定であるものとする。今、始点ノードから 3 パケット時間長おきにパケットを送信する場合を考える。

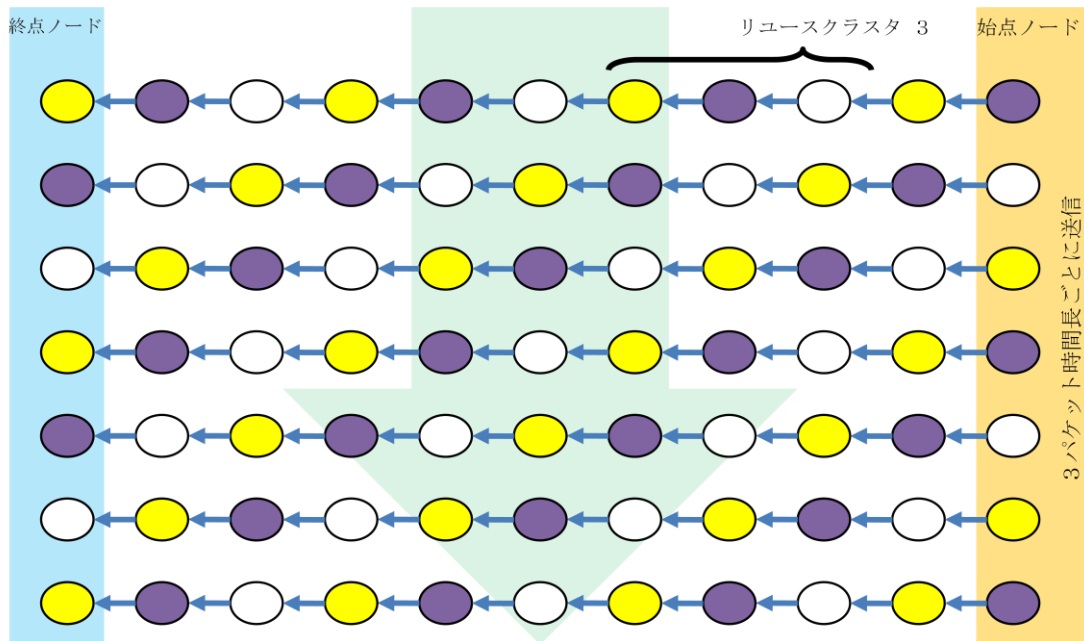


図 2.8 3 パケット時間長ごとにパケットを送信した場合に生ずるリユースクラスタ

図 2.8 のように、始点ノードより 3 パケット時間長毎にパケットを送信した場合、同時にパケットの送信が行われるノードの間隔は 3 である。各受信ノードにおいてパケットが正しく受信できるならば、これはすなわちリユースクラスタ 3 の同一周波数繰り返しが生じることを意味する。この場合始点ノードにおいて観測されるスループットは  $1/3$  (最大スループットに対する相対値) となる。このように送信源ノードにおいて連続的にパケットを送信するのではなくある送信時間間隔によりパケットを送信することによりリユース間隔を制御することができる。適当なパケット送信時間間隔の設定を行えば規則的な周波数リユースが行われ、これにより中継ノード間のパケット衝突が軽減されてスループットを向上させることができる。

### 2.3 本章のまとめ

本章では IEEE802.11 準拠の無線 LAN の概要について説明し、IPT の基本原理について説明した。

本論文では低コストで無線バックホールが構築できるように、市販の



IEEE802.11 準拠の無線 LAN を無線インタフェースに使用している。そのため無線 LAN を使用した無線バックホールにおけるパケット伝送特性について評価を行い、周波数リユースによる性能改善の可能性について説明した。その後無線バックホールにおいて意図的に周波数リユースを形成することにより中継効率を改善する IPT の基本原理について説明した。

IPT は無線バックホールにおいてパケット中継の性能向上を実現するための鍵である。本論文のこの以降の各章では、IPT を適用した際の無線バックホールの性能を更に向上するための手法について検討を行う。

# 第3章 無線バックホールにおける安定 ルーティング手法

本章では無線バックホールにおいて安定的に IPT を運用するために、安定した中継経路を構築する手法について検討を行う。

無線バックホールにおける中継経路の設定（ルーティング）は IPT の性能を大きく左右する。無線バックホールにおいて IPT を応用してシステムの性能改善を図る時、コアノードはスレーブノード毎に適切な送信周期を持ってパケット送信を行う。但しその際パケットの中継経路はすでに確定されていることとしている。そのため中継経路を適切に設定することは IPT の性能を発揮するための重要な条件である。

無線バックホールシステムでは各基地局は固定的に設置されるため、基地局間の伝搬路は変動しないと誤解される場合があるが、実際には人の移動やドアの開閉等によって基地局間の伝搬特性が変動する。従来のルーティング手法では、無線伝搬路特性の時間変動を考慮しておらず、経路構築の瞬間の伝搬路特性だけによって経路を構築しているが、構築された中継経路はそれ以降も最適である保証はない。動的な伝搬路特性の変動に追随しようと、ルーティングを繰り返すと、中継経路が不安定となってしまう。

本章ではまず無線バックホールにおける従来のルーティング手法とその問題点について説明し、次に無線伝搬路特性が時間変動する環境でも安定した中継経路を構築する新しいルーティング手法を提案し、評価を行う。

## 3.1 無線バックホールにおける従来のルーティング手法とその問題点

本節ではまず無線バックホールにおける既存のルーティング手法の概要について説明し、次にその問題点について指摘する。

無線バックホールは従来 Ad-Hoc ネットワークの分野で研究されていて、既に多数のルーティング手法提案されている。標準化機構 IETF (Internet Engineering Task Force) の MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) WG では Ad-Hoc 型の無線マルチホップネットワークのためのルーティング手法の標準化も進めている。従来のルーティング手法は On-Demand 型と Static 型に分類できる。On-Demand 型のルーティング手法では通信要求が発生する都度ルーティング処理が行われ、通信が終了すると当該ルートは削除される。On-Demand 型のルーティング手法はルーティング処理の負荷は大きいネットワークトポロジーの変化に早く対応でき、移動性の大きいモバイルアドホック型ネットワークに向いている。Static 型ルーティング手法ではネットワークを構築する際、システムの起動と同時にルートを構築し、その後は当該ルートを保持したままサービスを提供する。本論文で検討している無線バックホールで、各基地局は固定して設置されるため Static 型のルーティング手法が適している。そのため本論文では Static 型のルーティング手法に焦点を絞る。

無線バックホールで各基地局は固定設置されるが、伝搬路は人の動きなどによるフェージングの影響を受け変動する。しかし、従来のルーティング手法では伝搬路の変動を考慮したアルゴリズムの設計がなされていない。例えば、文献[31], [13], [5], [25], [3], [12]では伝搬路の時間変動がルートの構築に与える影響を無視しているので、同じノード配置でもルーティングの実行時刻によって異なるルートが構築される。無線バックホールの Static 型ルーティング手法において、システム起動時の伝搬路状況だけを見てルーティングを行うと、その後伝搬路が変動すれば、当該ルートによるシステムの性能が保証できなくなり、最悪の場合中継経路が断絶される場合もある。文献[31]では独自のテストベッドを用いて無線バックホールにおける伝搬路の変動とルーティング手法の関係について実験により調べ、従来の手法により構築されたルートは生存期間が短く伝搬路状況に適応するために頻繁にルートを再構築する必要があることを示した。無線バックホールではシステムの起動時にルートを構築し、そのあとは長時間変更しないためルートの頻繁な再構築は望ましくない。

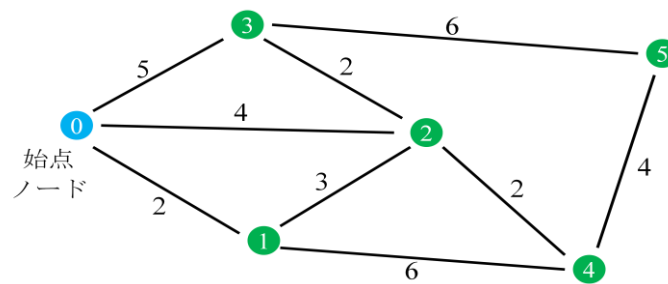


図 3.1 重み付きグラフ G

### 3.2 ルーティング手法におけるアルゴリズムとメトリック

本節ではまず従来のルーティング手法におけるアルゴリズムとメトリックの概要について説明し、次に本論文でルーティング手法の基礎としている最小伝搬損ルーティング及びその問題点について説明する。

#### 3.2.1 アルゴリズム

無線バックホールにおけるルーティング手法はアルゴリズムとメトリックにより特徴づけられ、従来よく使われているルーティングアルゴリズムには Bellman-Ford アルゴリズムと Dijkstra アルゴリズムなどがある ([5], [3])。

Bellman-Ford アルゴリズムと Dijkstra アルゴリズムはグラフ理論において単一始点の重み付きグラフにおける最短経路問題を解くアルゴリズムである (図 3.1)。なおグラフの有向性と無向性は区別する必要がない。Bellman-Ford アルゴリズムは負の重みを持つグラフにも対応しているのに対し、Dijkstra アルゴリズムは非負の重みを持つグラフだけを対象にしている。Bellman-Ford アルゴリズムにおいて非負の重みを持ったグラフだけに限定すると、Dijkstra アルゴリズムと近い手法が使われる。本論文で検討している無線バックホールではメトリック、即ちグラフのエッジの重みはホップカウントなど正の値である。そのため以下ではまず、Dijkstra アルゴリズムの動作について説明する。

Dijkstra アルゴリズムは図 3.1 に示すように、各辺が正の重みを持っているグラフ G に対し、始点ノードから各ノードまでの距離、即ち経路上の重みの和が最小になるような経路を探す手法である。Dijkstra アルゴリズムは次のように表現できる。

1. 初期化：始点ノードの値（コスト）は0、その他のノードの距離は $\infty$ に設定する。
2. 確定すべきノードがなくなるまで以下の処理を繰り返す：
  - 1) 現時点で始点ノードまでの最短経路が確定されていないノードのうち、最小の値を持つノードを見つけ、確定ノード（決定された）とする。
  - 2) 確定ノードからエッジが伸びているノードをそれぞれチェックし、「確定ノードのコスト（始点ノード間での経路上の重みの和） + エッジのコスト（重み）」を計算し、そのノードの保持している値より小さければ、値を更新し、経路情報即ち「上り中継先」を確定ノードを指すようにする。

以下では図 3.1 のグラフ  $G$  を用いて Dijkstra アルゴリズムの動作について詳しく説明する。なお動作途中確定されたノードは赤色で示す。

まずアルゴリズムの最初のループで始点ノード自身が確定されるので、図 3.1.1 のような状態になり、始点ノード 0 が赤い色になる。次に始点ノードからエッジが伸びているノード 1、2、3 の値（始点ノードまでの重みの和）2、4、5 を計算し（青い色）、経路変数もそれぞれ始点ノード 0 を指すようにし、図 3.1.2 の状態になる。

次に 2 回目のループで始点ノードまでの距離が最短であるノード 1 が選択され、確定される（図 3.1.3）。このときノード 1 からエッジが伸びているノード 0、2、4 の距離も計算されている。但しこの場合始点ノードへ戻る経路は意味がないので破棄する（最短経路にはなれないから）。更にこのときノード 2 では値 4 と値 5 が現れるが、大きい値である 5 は破棄され、経路は更新されない。なおノード 4 では経路が更新され値が 8（もともとは $\infty$ ）、上り中継ノードはノード 1 とされ、最終的に図 3.1.4 の状態になる。

3 番目のループで、始点ノードまで最短距離を持つノードとして、ノード 2 が選択され、確定される。そしてノード 2 からエッジが伸びているノード 3、1、4（始点ノードは除く）で、ノード 2 を経由する経路のコストがそれぞれ 6, 7, 8 と計算され、図 3.1.5 になる。ここで新しく計算されたコストは緑色に表示する。更にノード 3、1、4 では新たに計算された値と保持していた値が比較され、ノード 3 とノード 4 で経路情報が更新され図 3.1.6 の状態になる。

4 番目のループではノード3が選択され、確定される。そしてノード3からエッジが伸びているノード2、5に対し新しい値が計算される。そしてノード5の経路情報が更新され図 3.1.7 の状態になる。

5 番目のループではノード4が選択、確定される。そして同じようにノード5の経路情報が更新され、図 3.1.8 の状態になる。

6 番目のループで最後のノード5が選択され、すべての動作が終了する。

上記で説明した Dijkstra アルゴリズムの動作から分かるように、各ノードの経路情報即ち上り中継ノードの情報は保持した値がもっと小さい値に更新される時のみ更新されることが分かる。そのため本アルゴリズムにより確定される中継経路は、始点ノードを頭とするツリー構造となり、経路上にはループ（即ちノード間に二つ以上の経路が存在する）は生じない。

Dijkstra アルゴリズムによりループが生じない理由は図 3.1.10 を使っても説明できる。図 3.1.10 に示すように、仮に Dijkstra アルゴリズムで構築された経路上に赤い線で示したようなループが現れたとする。この時ノード5は始点ノードまでの中継経路が少なくともノード2とノード4を経由する2つを持つことになる。但し Dijkstra アルゴリズムの実行時上り中継ノードはコストが更新される時のみ更新されるので、その値は常に一つしかないことと矛盾してしまう。

以上では Dijkstra アルゴリズム（Bellman-Ford アルゴリズムの同じように処理をおこなっている）についてグラフを用いて説明したが、無線バックホールにおける経路構築アルゴリズムとして説明するためには以下のような若干の修正が必要となる。

1. 初期化: 始点ノードの値(コスト)は0、その他のノードの距離は $\infty$ に設定する。
2. 最初に始点ノードは自分のコスト情報(0)を周辺ノードにフラッディングする。
3. タイムアウトまで以下の処理を繰り返す:

フラッディングを受けたノードは「フラッディングコスト+エッジのコスト(重み)」を計算し、保持している値より小さければ、値を更新し経路情報、即ち「上り中継先」を、フラッディングを受けたノードを指すようにする。更に新しい値(コスト)をエッジが伸びているすべてのノードにフラッディングする。

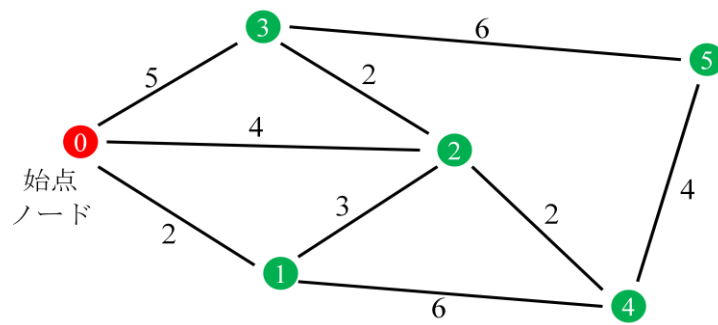


図 3.1.1 Dijkstra アルゴリズムの動作 1

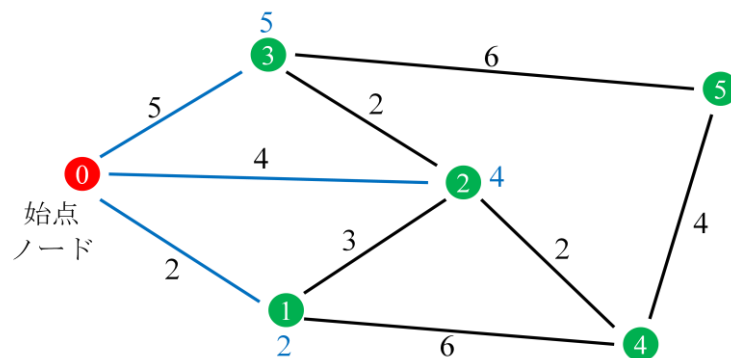


図 3.1.2 Dijkstra アルゴリズムの動作 2

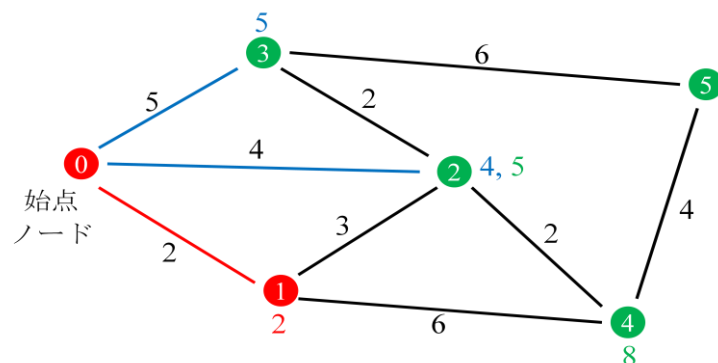


図 3.1.3 Dijkstra アルゴリズムの動作 3

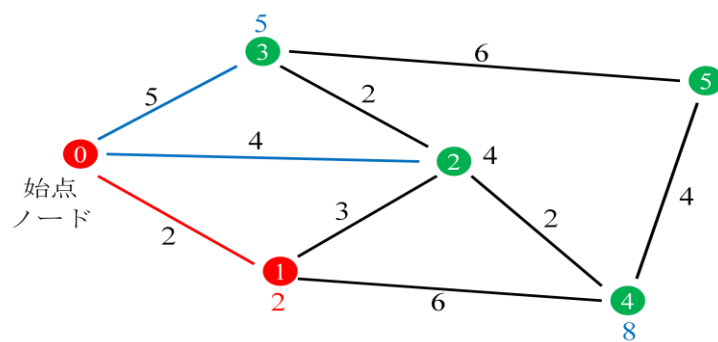


図 3.1.4 Dijkstra アルゴリズムの動作 4

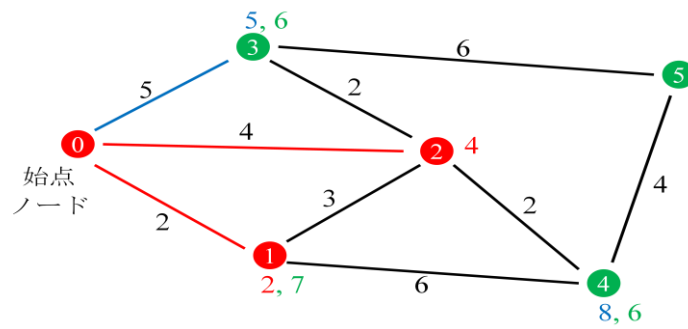


図 3. 1. 5 Dijkstra アルゴリズムの動作 5

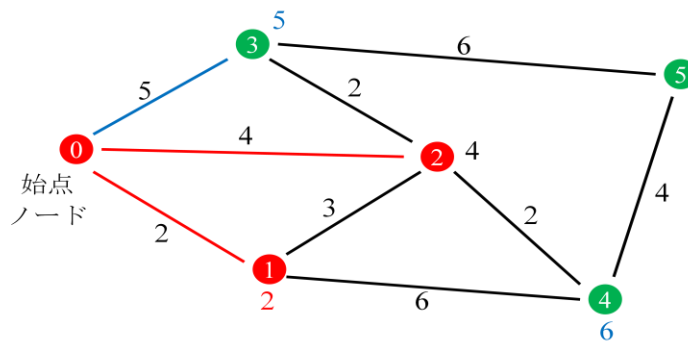


図 3. 1. 6 Dijkstra アルゴリズムの動作 6

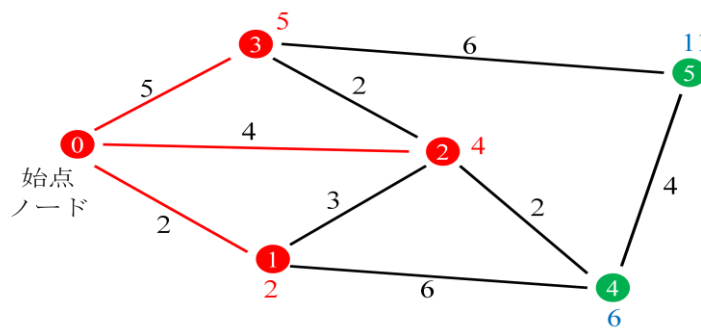


図 3. 1. 7 Dijkstra アルゴリズムの動作 7

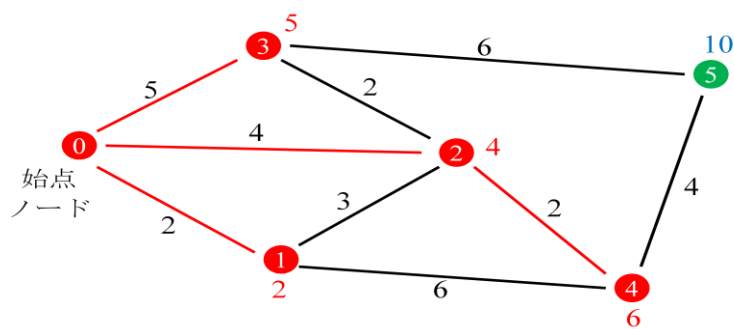


図 3. 1. 8 Dijkstra アルゴリズムの動作 8



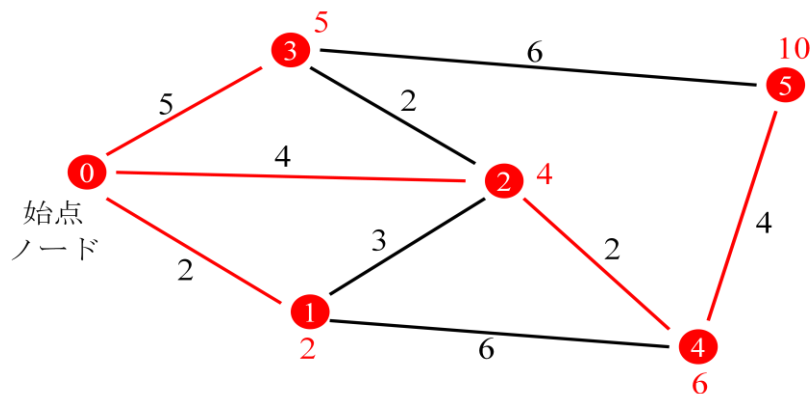


図 3. 1. 9 Dijkstra アルゴリズムの動作 9

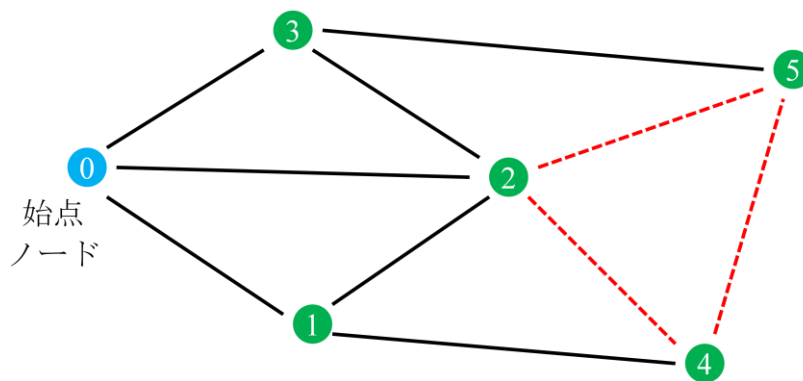


図 3. 1. 9 Dijkstra アルゴリズムでループが生じない理由

補足：

- 1) 上記の説明で、「フラッディング」は無線バックホールにおけるパケットのブロードキャストに相当する。
- 2) 「エッジが伸びているノード」はブロードキャストされたパケットを受信しているノードに相当する。
- 3) Dijkstra アルゴリズムではループ処理の最初に何時も始点ノードからの最短距離のノードを選択している。但し「フラッディング」の処理ではその必要はなく経路情報が更新される都度フラッディングを繰り返す。これにより処理時間は長くなるが、アルゴリズムの収束には問題ない。

### 3.2.2 メトリック

無線バックホールの経路構築用のメトリック（グラフにおける重み）として、

従来はホップカウントを使用し、ノード間のホップカウントが最小になるように経路を構築していた。但しホップカウントを最小にすることはノード間の距離が最大なパスを選択することになり、信号レベルの低下とパケットロス率の増加を招く[14]。そのため近年ノード間の無線リンクの品質をメトリックとする幾つかの手法も提案されている。例えば、ETX (Expected Transmission Count) メトリック[17]、WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time) メトリック[18]、RTT (Per-hop Round Trip Time) メトリック[2]、PktPair (Per-hop Packet Pair Delay) メトリック及び伝搬損メトリック[8] などである。

従来のルーティング手法では伝搬路の変動に対して安定的な経路を獲得するような機構は持ち合わせていない。そのため構築されたルートは“特定時刻に最適”なルートに過ぎず、伝搬路の変動に対処するために頻繁な経路再構築が必要となりネットワークの負荷を高めてしまう。例えば ETX メトリックを採用したルーティング手法ではノード間のパケットロス率を、短いブロードキャストパケットの送受信により測定しているため、パケットの伝送レートが高くなった場合の無線リンクの品質を反映できない欠点がある。WCETT メトリックは複数チャンネルの使用のために提案され、ETX メトリックの組み合わせにより計算されているためオーバーヘッドが大きい([17])。RTT メトリックを採用する手法では隣接ノード間のパケット伝送遅延をユニキャストパケットの送受信により測定しているため、メトリックの計算には大きなオーバーヘッドが生じている。PktPair メトリックを採用した場合、オーバーヘッドは更に大きくなる([8])。

一方伝搬損をメトリックとする最小伝搬損ルーティングでは、ノード間の伝搬損の和が最小になるようにルートを構築しているため、中継経路全体として干渉への耐性が高く、高品質・高効率な伝送特性が期待できる([8])。またオーバーヘッドが小さく、汎用無線モジュールによる実装が便利である利点も有するため、本論文では伝搬損をルーティング手法のメトリックとして採用する。

### 3.2.3 最小伝搬損ルーティングとルート不安定の問題

本節では最小伝搬損ルーティングの概要について簡単に説明し、その後伝搬路の変動によりルートが不安定になる問題を指摘する。

最小伝搬損ルーティングはノード間の受信電力 (RSSI、Received Signal Strength Indicator) により伝搬損を求め、これをメトリックとし、Bellman-Ford アルゴリズム (前節で説明した Dijkstra アルゴリズムと同じ手順) により中継経路を構築する。具体的に表現すると次のようになる：

- 1) 初期化：各ノードはメトリックを $\infty$ に初期化し、上り中継先を未確定にする。
- 2) コアノードがメトリック 0 を含んだルーティングパケットをブロードキャストする。
- 3) スレーブノードはルーティングパケットを受信する都度下記の処理を繰り返す：
  - ① スレーブノードはルーティングパケットを受信したら受信時の RSSI により伝搬損を計算し、これと受信パケット中に含まれる累積メトリック (当該受信パケットを送信したノードからコアノードまでの伝搬損の和を表す) を加算して新しいメトリックを計算する。
  - ② この新しいメトリックが自ノードの保持している累積メトリックより小さいならルートを更新し、新しいメトリックを含むルーティングパケットを周囲にブロードキャストする。

最小伝搬損ルーティングは前節で説明したフラッディング処理を行っていることが分かる。そのため最小伝搬損ルーティングにより図 3.2 のような、コアノードを中心とするツリー型の経路が構築される。図 3.3 に最小伝搬損ルーティングの流れを示す。

従来の最小伝搬損ルーティングでは伝搬路の変動の影響を考慮していないが、実環境においては各ノードは固定的に設置しているにもかかわらず、人の往来等により RSSI が変動する。図 3.4 に IEEE802.11a を無線インタフェースにした場合の実際に観測された RSSI の時間変動の様子を示す。

図 3.4 に示したように、RSSI の値は時刻により変動しているので、それにより計算されたメトリックの値も時刻より変動する。結果的には最小伝搬損ルーティングにより構築された中継経路が、ルーティングの実行時刻により変動し不安定になってしまう。

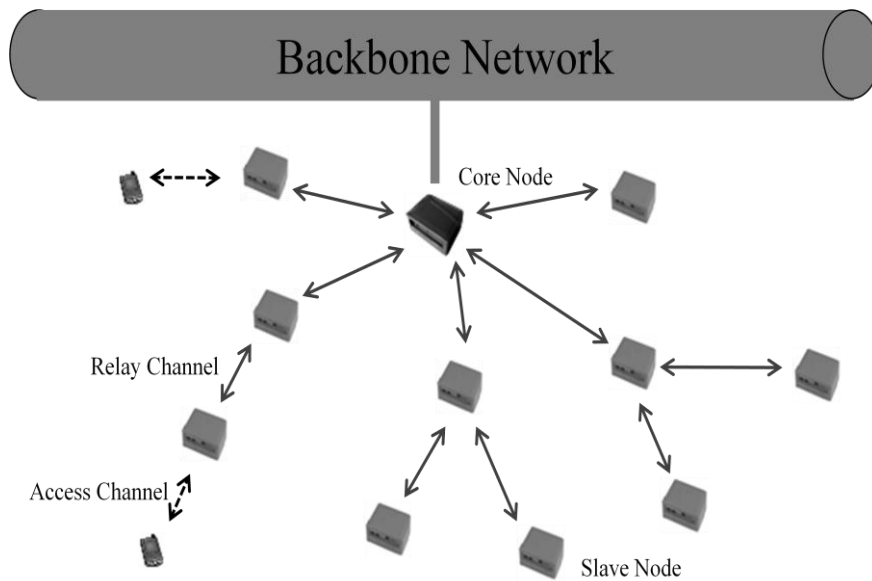
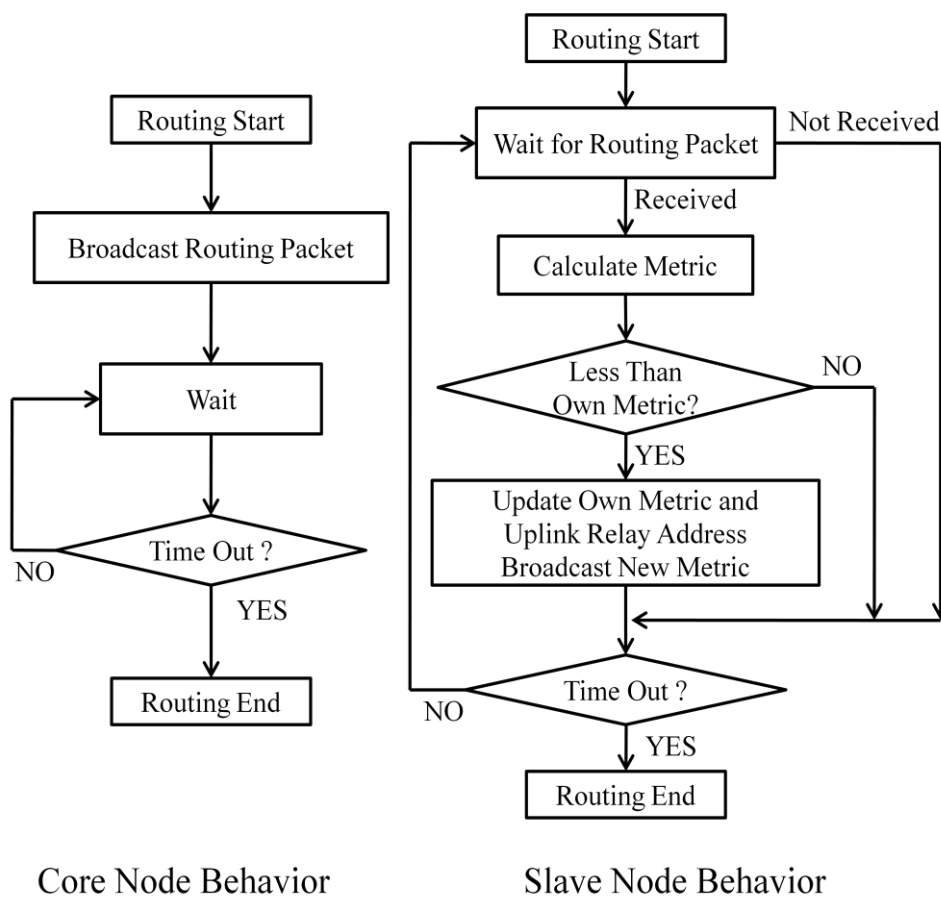


図 3.2 ツリー構造ネットワーク



Core Node Behavior

Slave Node Behavior

図 3.3 最小伝搬損ルーティング

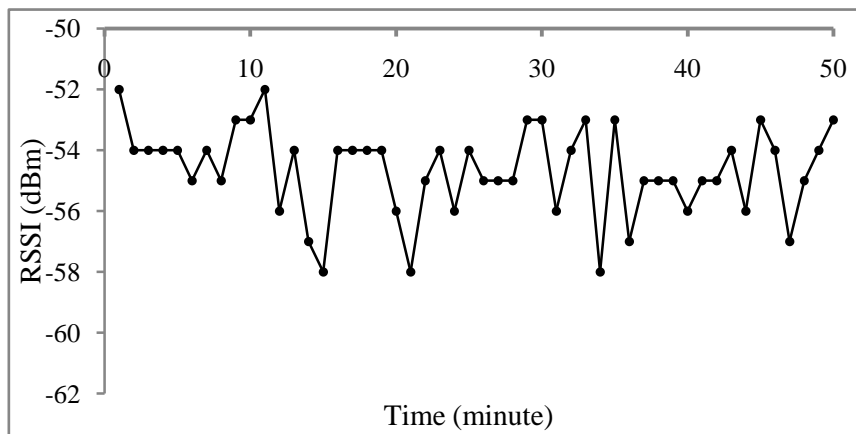


図 3.4 RSSI の時間変動

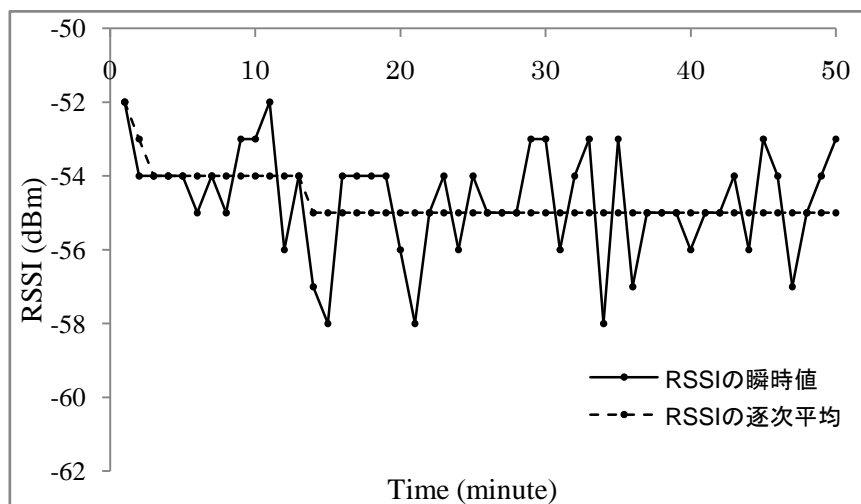


図 3.5 RSSI の逐次平均

### 3.3 RSSI の逐次平均に基づく新しいルーティング手法

本節では RSSI の逐次平均を取るにより変動を抑制し、漸近的に収束した RSSI の値をベースにルートを構築することにより、漸近的に安定したルートを構築する新しいルーティング手法を提案する。

#### 3.3.1 RSSI の逐次平均

無線バックホールの電波伝搬において、ノード間に見通しパスがある場合受信信号はライス分布に従い、見通しパスがない場合はレイリー分布に従っていることが知られている ([4])。但し無線バックホールの伝搬路は人の動きなどの

周辺環境により変化する。その統計的性質は場所のみならず時間帯によっても変化する。これらの現実で起こる現象を、計算機上で正確にモデル化する手法は確立されていない。本章では実機を用いた実フィールド上での実験により、プロトコル研究ならびに検証を行うことにする。

無線バックホールでノード間の受信電力がデシベルで表示された RSSI は一種の確率過程である。ノード間の RSSI を一定時間間隔で均一サンプリングした値の系列 $\{R_n, n = 1, 2, \dots\}$  の逐次平均値 $\{A_n, n = 1, 2, \dots\}$ を次式のように定義する：

$$A_n = \frac{A_{n-1} * (n - 1) + R_n}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (3-1)$$

逐次平均の系列 $\{A_n, n = 1, 2, \dots\}$ は、 $n$ が大きくなるにつれ当該確率過程の平均値 $E\{R_n\}$ に収束する ([42])。図 3.4 に示した RSSI の変動の場合に、式(3-1)によって得られる逐次平均の変化の様子を図 3.5 に示している。図 3.5 が示す通り、ノード間の RSSI を一定間隔でサンプリングして逐次平均を取って行けば、一定時間後 RSSI の変動は抑制できることが分かる。

### 3.3.2 RSSI の逐次平均に基づくルーティング手法

本節ではノード間 RSSI の逐次平均を用いたルーティング手法について説明する。なお本論文で対象とする無線バックホールで、各ノードは一定の高さを持って設置され(2メートル以上)、ノード間の見通し内伝搬路を障害物が長時間遮る等ネットワークのトポロジーが根本的に変化した場合はルートを再構築する。

#### 3.3.2.1 提案手法の概要

提案手法は複数回のラウンドにより構成され、毎回のラウンドでは暫定的なルートを一つ構築する。ルーティングの実行中、各中継ノードは周辺ノードとルーティングパケットの送受信を繰り返し行い、RSSI の逐次平均を計算する。ラウンドの回数を増やすと各ノード間の RSSI の逐次平均は一定の値に収束するので、各ラウンドで構築したルートは次第に安定したルートへと収束する。

#### 3.3.2.2 ルーティング用の変数とパラメータ

提案手法で扱っているルーティングパケット、各ノードが保持するルーティング変数およびパラメータ等について定義する。

#### (1) 自ノードメトリック

各ノードは、当該ノードからコアノードまでの中継経路上の伝搬損の和を自ノードメトリックとして保持し、電源投入時に最大値で初期化する。自ノードメトリックを伝搬損の和として定義するのは、Bellman-Ford アルゴリズムを適用するためである。Bellman-Ford アルゴリズムはコアノードから各スレーブノードまでのメトリックの和が最小になるようにルートを構築する。自ノードメトリックを伝搬損の和とし、アルゴリズムの実行時自ノードメトリックが小さくなるようにルートを更新していけば、ループが発生しなく収束する。

#### (2) ルーティングパケット

コアノードが各スレーブノードに対し既存ルート情報のクリア要求を出す時に使う `Reset_Routing_Packet` と、ルートを構築する時に使う `Normal_Routing_Packet` の2種類を定義する。各ルーティングパケットには累積メトリックとパケット ID の情報が含まれる。累積メトリックとは当該受信パケットを送信したノードが送信時に保持していた自ノードメトリックである。

#### (3) 上り中継先

本ルーティング手法は Bellman-Ford アルゴリズムを採用するので、構築される中継経路は図 3.2 のようなツリー構造となる。図 3.2 のように、各スレーブノードは唯一の上り中継先のみを持つ。そこでルーティング情報として上り中継先ノードのアドレスを保持する。下り中継先は中継動作時、上り方向に中継されるパケットの送信元アドレスを調べて確認することができるので、ルーティング時には決定せず、経路が確定した後に調べる。

#### (4) 自ノード TimeID

各ルーティングパケットの送信時刻を識別するために持つタイムスタンプである。

### (5) 周辺ノードテーブル

自ノードの周辺に位置するノードのアドレス、RSSI の逐次平均ならびにルーティングパケットの受信回数を記録したテーブルである。ここで周辺ノードとは自ノードとパケットの送受信ができる範囲内にあるノードを指す。

### (6) パラメータ

本プロトコルでは以下のパラメータを必要とする。

- (a)  $T_w$  コアノードが各スレーブノードの履歴クリアを待つ時間
- (b)  $N_r$  ラウンドの実行回数
- (c)  $T_c$  ラウンド間の間隔
- (d)  $T_r$  各ラウンドでコアノードの待ち時間
- (e)  $T_s$  スレーブノードの待ち時間

以下では、ルーティングの実行時コアノードとスレーブノードの動作についてそれぞれ説明する。

#### 3.3.2.3 コアノードの動作

システムを新規に構築した場合や、システムのノード配置が変更された場合など、初期化が必要な場合、コアノードは `Reset_Routing_Packet` をブロードキャストし、 $T_w$  時間待つ。その後  $T_c$  間隔で `Normal_Routing_Packet` を周囲に一回ブロードキャストする。この時ルーティングパケットの累積メトリックは0で、パケット ID はコアノードがブロードキャストパケットを送信する時刻に設定する。これが一回のラウンドであり、コアノードはラウンドが始まってから  $T_r$  時間経つとラウンドを終了する。これでシステムは一回のルートを構築し、次のラウンドを開始する。

コアノードはラウンドの回数が  $N_r$  に達したらルーティングを終了する。図 3.6 にコアノードの動作フローを示す。



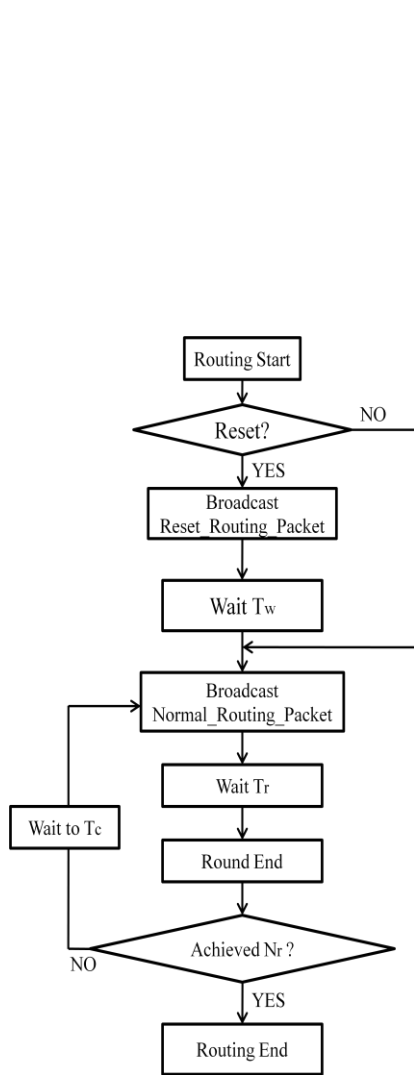


図 3.6 コアノードの動作

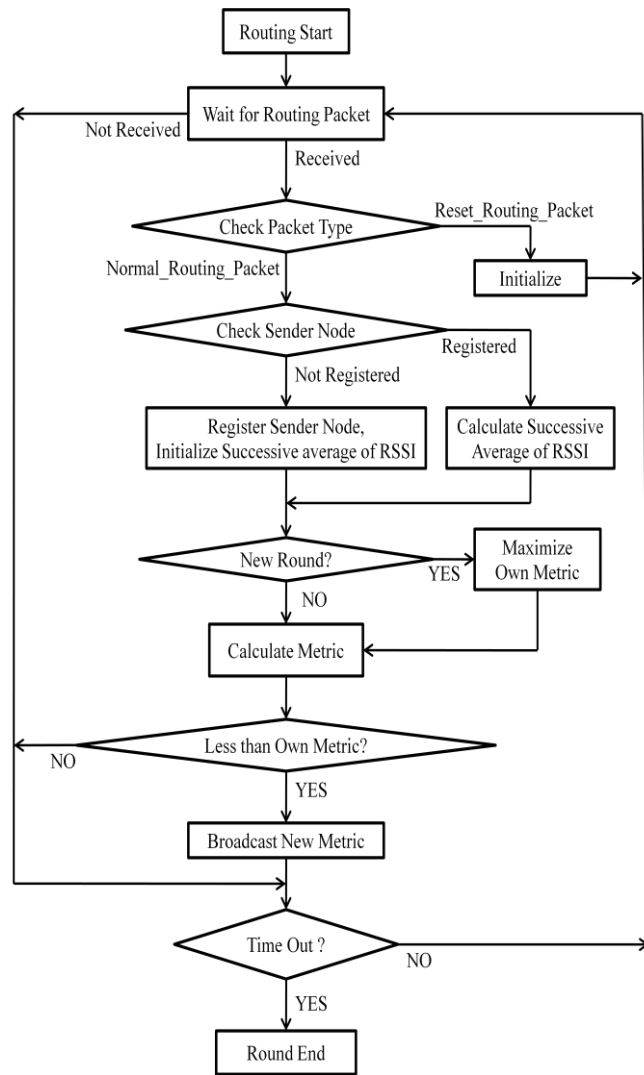


図 3.7 スレーブノードの動作

### 3.3.2.4 スレーブノードの動作

スレーブノードは Reset\_Routing\_Packet を受信すると受信パケットの packet ID を調べる。もし packet ID が自ノード TimeID より新しければ周辺ノードテーブルをクリアし自ノードメトリックを最大値に設定し、自ノード TimeID を受信パケットの packet ID に設定する。そして周囲に新しい TimeID の Reset\_Routing\_Packet をブロードキャストする。

Normal\_Routing\_Packet を受信したら送信元ノードを確認し、周辺ノードテーブルに当該送信元ノードの登録がないかを調べ、登録されていないならば登録

する。なお受信時の RSSI を逐次平均の初期値とし、受信回数は 1 に設定する。

次に受信パケットの packet ID を調べ、自ノード TimeID より新しい場合、新しいラウンドが始まったと判断し、自ノードメトリックを最大値に、また自ノード TimeID を受信パケットの packet ID に設定する。

既にテーブルに登録されているノードからのルーティングパケットである場合、当該送信元ノードに対する現逐次平均と受信 RSSI から式(3-1)により新たな逐次平均を求め、計算した値でテーブルの当該ノードの逐次平均を更新し、受信回数を 1 回増やす。

その後逐次平均された RSSI を用いて送信元ノードから自ノードまでの伝搬損を計算し、受信パケットに含まれる累積メトリックと加算して新しいメトリックを得る。

ここで、伝搬損は下記の式(3-2)により計算する。TX\_POWER は送信電力を表し、単位は dBm である。

$$\text{PathLoss} = 10^{\frac{\text{TX\_Power} - \text{RSSI}}{10}} \quad (3-2)$$

新しいメトリックが自ノードメトリックより小さい場合、自ノードメトリックを当該値で更新し、上り中継先を受信パケットの送信元ノードのアドレスに更新する。そして新しいメトリックを累積メトリックとする新しいルーティングパケットをブロードキャストする。

スレーブノードは新しいラウンドが始まってから  $T_s$  時間が経過したらラウンドを終了する。図 3.7 にスレーブノードの動作フローを示す。

提案手法の実行中、各ラウンドでは暫定的なルートが一つ構築されるので、システムはルーティングの途中でもパケット中継サービスを提供できる。各ラウンドの実行時間は数秒以内であり、ルート構築に必要なオーバーヘッドは小さい。

### 3.4 提案手法の実験による評価

本節では提案手法と従来の最小伝搬損ルーティングを実機テストベッドに実装し、ルートの安定性とスループットの安定性について評価する。



図 3.8 PicoMesh LunchBox の外観

表 3.1 LB の主要諸元

CPU	AMD Geode LX800
Memory	DDR 512MB
Backhall Wireless	IEEE802.11b/g/a ×2
Access Wireless IF	IEEE802.11b/g/a ×1
Wired IF	Ether × 1
OS	Linux kernel 2.6
Wireless Driver	MadWiFi 0.9.3.3

表 3.2 提案手法のパラメータ

$T_r$ : 各ラウンドでコアノードの待ち時間	2 秒
$T_s$ : 各ラウンドでスレーブノードの待ち時間	2 秒
$T_w$ : スレーブノードのリセット待ち時間	5 秒
$T_c$ : 各ラウンドの間隔	3 分
$N_r$ : ラウンド回数	100 回

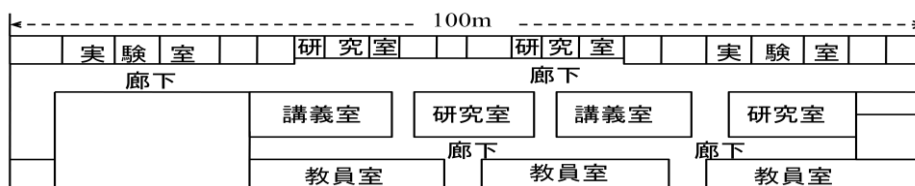


図 3.9 実験フィールド 1 : 九州大学 W2 号館 8 階

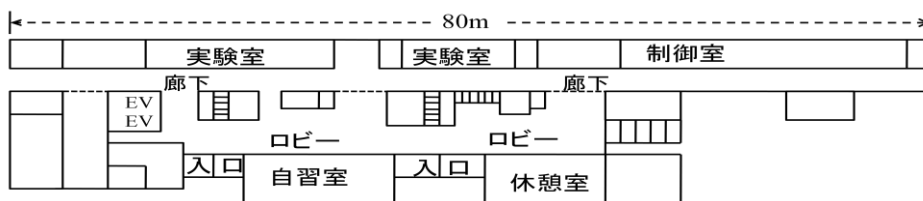


図 3.10 実験フィールド 2 : 九州大学 W2 号館 2 階

### 3.4.1 テストベッドの概要

テストベッドには著者等が推進する「地域イノベーションクラスタープログラムグローバル型（第 II 期）」、「MIMO-MESH ポイントの開発」プロジェクト[37]の成果物である Picomesh LunchBox（以下 LB）を用いる（図 3.8）。

LB は 802.11b/g/a 準拠の汎用無線 LAN モジュールを 3 系統搭載していて、中継回線用に 2 系統、アクセス回線用に 1 系統割り当てられている。各無線モジュールには異なる周波数チャンネルを割り当て、アクセス回線と中継回線間の干渉を回避する。LB の主要構成要素を表 3.1 にまとめている。

LB はアクセス回線或いは LAN ケーブルで端末と通信を行い、中継動作は MAC 層と Network 層の間に位置する独自のソフトウェアで実現する。

実験時 LB の中継回線に IEEE802.11a、アクセス回線に IEEE802.11g を使用し、提案手法のパラメータは表 3.2 のように設定する。

### 3.4.2 実験環境と伝搬路特性

本節では実験環境と伝搬路特性について説明する。

#### 3.4.2.1 実験環境の概要

本論文の実験は九州大学 W2 号館の 8 階（図 3.9、以下実験フィールド 1）と 2 階（図 3.10、以下実験フィールド 2）の 2 箇所で行われている。

実験フィールド 1 は複数の研究室と実験室、講義室及び教員室などにより構成されており、平日には 100 人ぐらいが同時に存在していて、歩行者数が立ち止まっている人の数より少ない。それに対し実験フィールド 2 は自習室と休憩室、複数の実験室と制御室及びロビーにより構成されており、平日には数十人ぐらいまでが同時に存在するが、建物の出入り口を含んでいて、歩行者数が立ち止まっている人の数より多い特徴がある。

#### 3.4.2.2 伝搬路特性

無線バックホールで伝搬路の時間変動は主に電波干渉と人の動きなどによるフェージングに起因する。本節では両実験フィールドにおける伝搬路特性につ

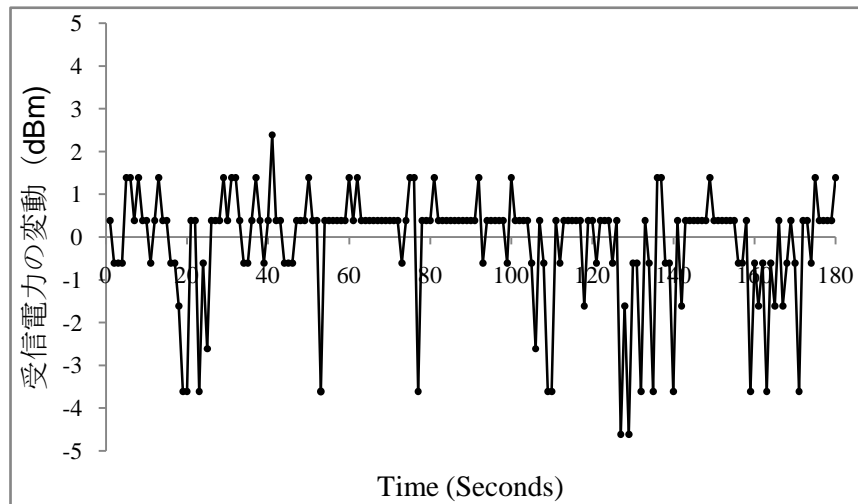


図 3.11 実験フィールド 1 での伝搬路変動

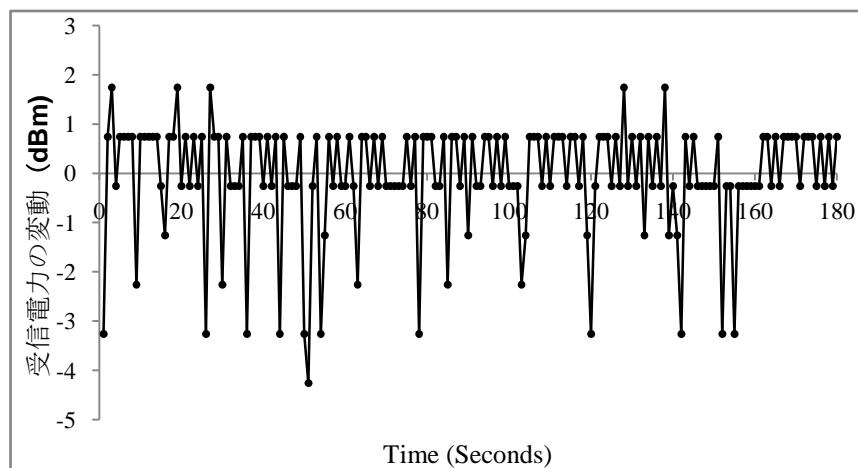


図 3.12 実験フィールド 2 での伝搬路変動

いて実験により調べる。具体的には実験フィールド 1 の廊下と実験フィールド 2 のロビーに、30 メートル間隔で（見通し内伝搬路あり、高さは 2 メートル）LB を二台ずつ設置し、ノード間の受信電力を 1 秒間隔で、24 時間（平日）連続して測定する。

### (1) 伝搬路の時間変動

測定した受信電力の値 (dBm) から平均値を引いて、受信電力の時間変動について調べる。測定結果の一部として、実験フィールド 1 と実験フィールド 2 の測定値から正午 12 時からの 180 秒間のデータを取り出し、図 3.11 と 3.12 に示す。

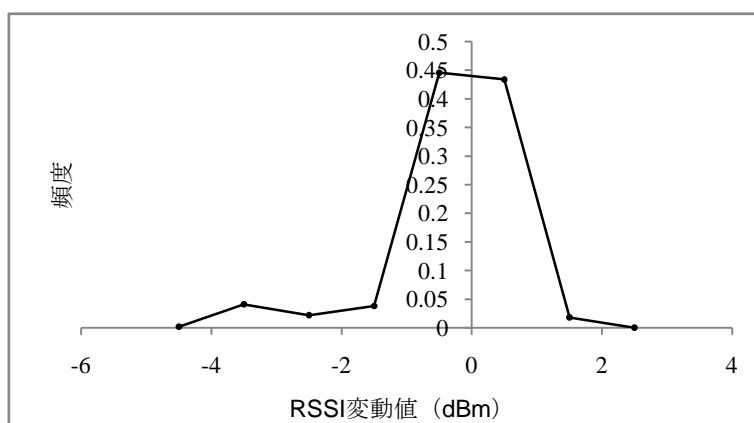


図 3.13 実験フィールド1での受信レベル変動値分布

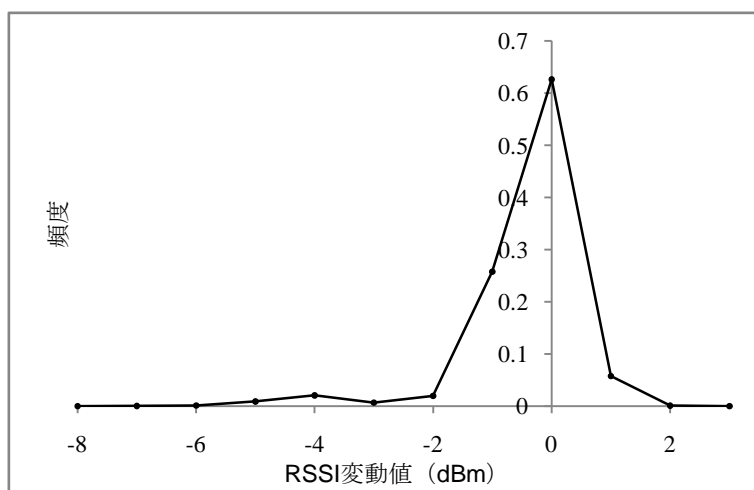


図 3.14 実験フィールド2での受信レベル変動値分布

実験フィールド1と実験フィールド2で伝搬路は人の動きによるフェージングの影響で、秒単位の速さで変動している。そのため従来のルーティング手法を採用した場合、伝搬路の変動に追従するためには、ルート再構築の間隔は1秒以下にしなければならない。但し実際の無線バックホールで、一回のルート構築には少なくとも数百ミリ秒から数秒の時間がかかり、このような頻繁なルート再構築は不可能である。従来のルーティング手法でルート再構築の間隔を大きくした場合、スループットの変動については次節で評価を行う。

また両図から実験フィールド2は実験フィールド1に比べ人の動きがより頻繁であるため、伝搬路の変動もより激しくなっているのが分かる。

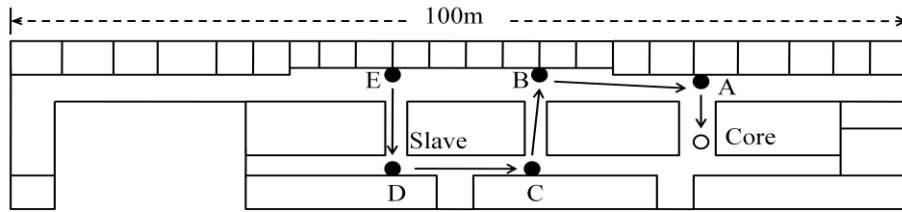


図 3.15 固定ルートシステム 1

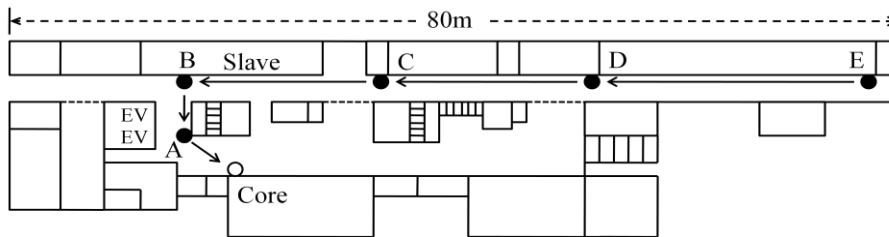


図 3.16 固定ルートシステム 2

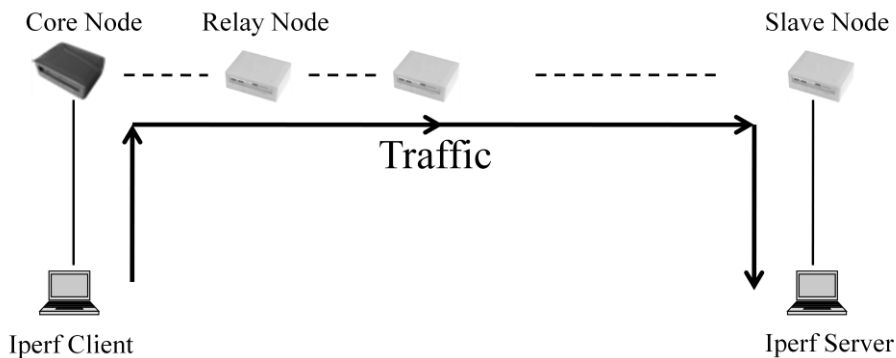


図 3.17 スループット測定系

(2) 受信レベルの変動値の分布

図 3.13 と図 3.14 に、両実験フィールドで測定した値を元に、受信電力の変動値 (dBm) の分布を示す。

両実験フィールドで伝搬路の変動は主に人の動きにより発生しているため、受信電力の変動値の分布も実験フィールドの特徴に依存して異なっている。

3.4.3 固定ルートにおけるスループットの変動

無線バックホールでシステムのスループットはルートの変動により変動するが、ルートが固定された場合にも伝搬路の変動により変動する。本節ではルートが固定された時、伝搬路の変動がスループットに与える影響について実験により調べる。

### 3.4.3.1 実験方法

#### (1) 測定ツール

スループットの評価には iPerf を使用する。iPerf はサーバとクライアントをペアにし、エンド・ツー・エンドでスループットを測定することのできるソフトウェアである[43]。iPerf には TCP モードと UDP モードがあるが、ここでは UDP モードを採用し、クライアントからサーバまでのスループットを測定する。

#### (2) システム構築

図 3.15 と図 3.16 に示すように、実験フィールド 1 と実験フィールド 2 にコアノード 1 つとスレーブノード 5 つのシステムを構築する。両システムにおいて各スレーブノードの中継先は手動で設定することにより、システムのルートを図に示すように固定する。

#### (3) 測定方法

図 3.15 と図 3.16 のシステムにおいて、コアノードからホップカウントが 1、3、5 のスレーブノード A、C、E までのスループットをノード毎に測定する。

具体的には、まずコアノードと有線で接続した PC に iPerf クライアントを立ち上げ、次に測定するスレーブノードと有線で接続した PC に iPerf のサーバを立ち上げる(図 3.17)。そして各スレーブノード毎に 3 分間に一回ずつ、24 時間連続してスループットを測定する。但し毎回 iPerf の測定時間は 30 秒とする。

### 3.4.3.2 実験結果

実験フィールド 1 のシステムと実験フィールド 2 のシステムでの測定結果を図 3.18 と図 3.19 に示す。

### 3.4.3.3 考察

実験結果からルートが固定された場合にも、ノード間のスループットは伝搬路の変動により測定時刻によって変化しているが、その変化幅は小さく(6%以内)安定しているのが分かる。一方ノード間のスループットはホップカウントに依存しており、ホップカウントの増大により著しく低下している。



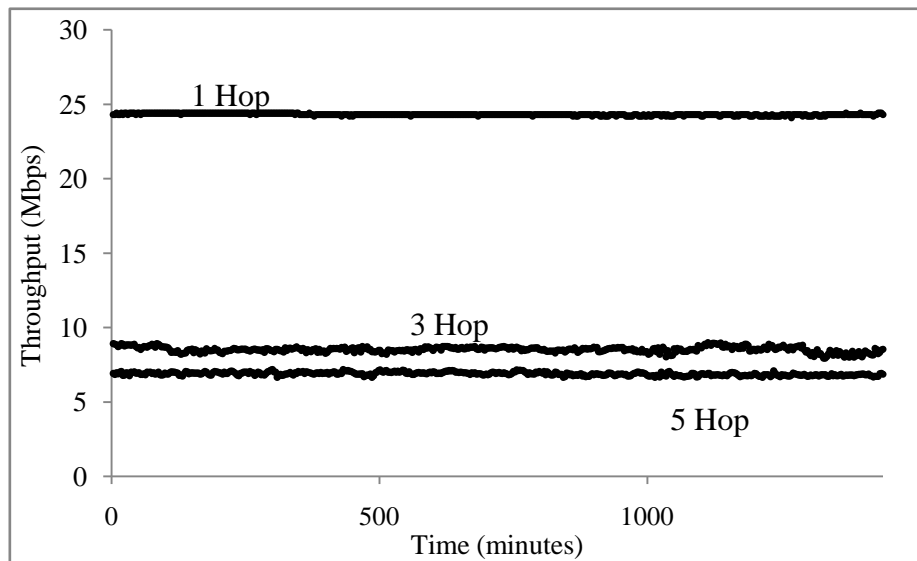


図 3.18 固定ルートシステム 1 でスループットの変動

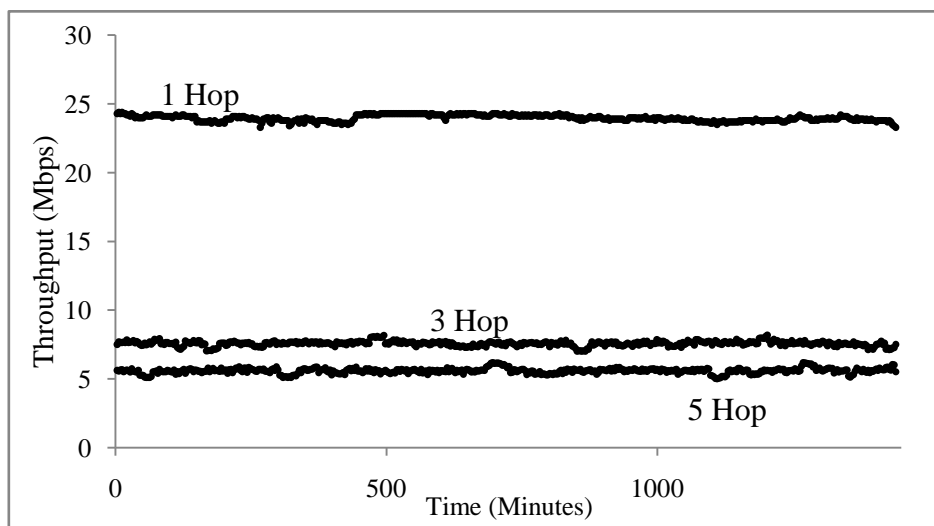


図 3.19 固定ルートシステム 2 でスループットの変動

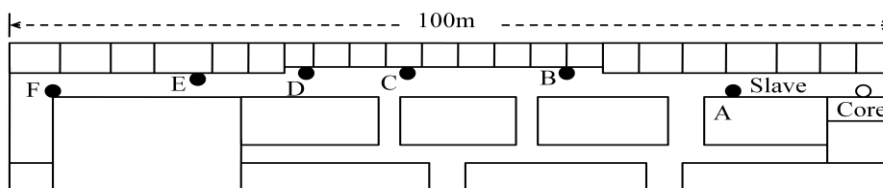


図 3.20 実験シナリオ 1 のノード配置

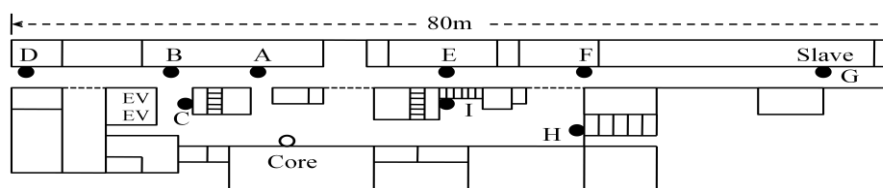


図 3.21 実験シナリオ 2 のノード配置

無線バックホールでルートが変化すれば、通過するノードとホップカウントなど、ノード間の中継経路が変化し、スループットも大幅に変化する(次節で定量的に評価を行う)。そのため無線バックホールで安定したスループットを獲得するためには、まず安定したルートを構築しなければならない。

### 3.4.4 ルート安定性の評価

本節では提案手法によるルートの安定性について評価を行う。なお本論文では評価尺度として、変動幅が 10%以内なら安定とする。

#### 3.4.4.1 実験方法

実験フィールド 1 にコアノード 1 つとスレーブノード 6 つの無線バックホール(シナリオ 1、図 3.20)を構築し実験フィールド 2 にコアノード 1 つとスレーブノード 9 つの無線バックホール(シナリオ 2、図 3.21)を構築し、下記のようなシナリオで実験を行う。

##### (1) シナリオ 1

図 3.20 のシステムに対し、先ず従来の最小伝搬損ルーティングを 3 分間に 1 回、200 回実行し、出現したルートパターンを統計する。次に提案手法を実装し、表 3.2 のパラメータ設定で提案手法を 100 回実行し、出現パターンを統計する。

##### (2) シナリオ 2

図 3.21 のシステムにおいて従来の最小伝搬損ルーティングを 3 分間に 1 回、300 回実行し、出現したルートパターンを統計する。次に提案手法を実装し、表 3.2 のパラメータ設定で提案手法を 100 回実行し、出現パターンを統計する。

4.2 節で説明したように従来の最小伝搬損ルーティングは伝搬路の変動に追従できない。但し無線バックホールの伝搬路は時刻によって変動するため、一定間隔でルートを再構築しなければならない。従来の最小伝搬損ルーティングの実行には数秒ぐらいの時間がかかり、実際の応用では 3 分~5 分間隔で経路再構築を行っている。本実験では十分な統計を取るためにルート再構築間隔を 3 分、実験回数は 200 回と 300 回にしている。一方提案手法では既にラウンド間

隔  $T_c$  を 3 分、ラウンド回数  $N_r$  を 100 (プロトコルが収束するのに十分大きいと) に設定しているため、実験時間を考慮して実行回数は 100 回に設定している。

#### 3.4.4.2 実験結果

##### (1) シナリオ 1

シナリオ 1 の実験結果を表 3.3 に示す。従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合、11 通りのルートパターンが出現しているのに対し、提案手法を実行した場合、Route 1 しか出現していない(図 3.22)。

##### (2) シナリオ 2

シナリオ 2 の実験結果を表 3.4 に示す。従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合、15 通りのルートパターンが出現しているのに対し、提案手法を実行した場合、Route 2 しか出現していない(図 3.23)。

#### 3.4.4.3 安定性の考察

両シナリオで実験は人の動きなど周辺環境の変化が激しい平日に行っているため、従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合、シナリオ 1 のようなシンプルなトポロジーを持っている無線バックホールでも、出現ルートは時刻によって激しく変動している。

これに対し提案手法を実行した場合、伝搬路が激しく変動する環境で、シナリオ 2 のように複雑なトポロジーを持っている無線バックホールでも、ラウンド回数が増えるとともに構築されるルートは、常に固定パターンに収束するので、提案手法の有効性が確認できる。

図 3.22 に示すシナリオ 1 の安定ルートで、スレーブノード C は B を経由しないで、直接 A を中継先としている。これは実験時ノードの設置場所、アンテナの向きなどにより、B と A の間の伝搬損が大きくなっているのに対し、C と A の間の伝搬損が比較的小さくなっているのが原因である。類似した原因でスレーブノード E は直接 A を中継先としている。

両シナリオで、従来の最小伝搬損ルーティングを実行した時、最大頻度で出現するルート(シナリオ 1 の Route 1、シナリオ 2 の Route 2)は提案手法により

表 3.3 シナリオ 1 の実験結果

出現ルート	従来手法	提案手法
Route 0	10.0 %	0%
Route 1	60.5 %	100%
Route 2	4.0 %	0%
Route 3	10.5%	0%
Route 4	0.5 %	0%
Route 5	10.5 %	0%
Route 6	0.5 %	0%
Route 7	0.5 %	0%
Route 8	1.0 %	0%
Route 9	0.5 %	0%
Route 10	1.5 %	0%

表 3.4 シナリオ 2 の実験結果

出現ルート	従来手法	提案手法
Route 0	0.3%	0%
Route 1	30.3%	0%
Route 2	61.6%	100%
Route 3	2.3%	0%
Route 4	0.3%	0%
Route 5	1.3%	0%
Route 6	0.3%	0%
Route 7	0.6%	0%
Route 8	0.3%	0%
Route 9	0.3%	0%
Route 10	0.3%	0%
Route 11	0.6%	0%
Route 12	0.3%	0%
Route 13	0.3%	0%
Route 14	0.3%	0%

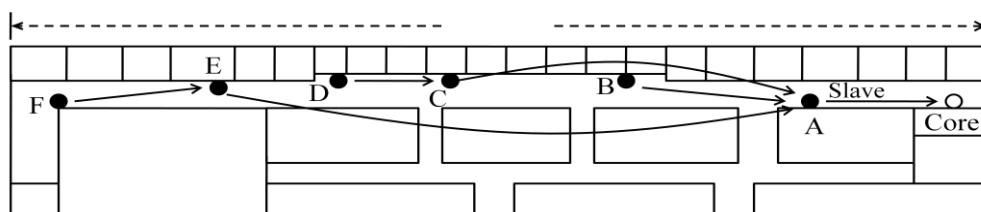


図 3.22 Route 1 の中継ルート

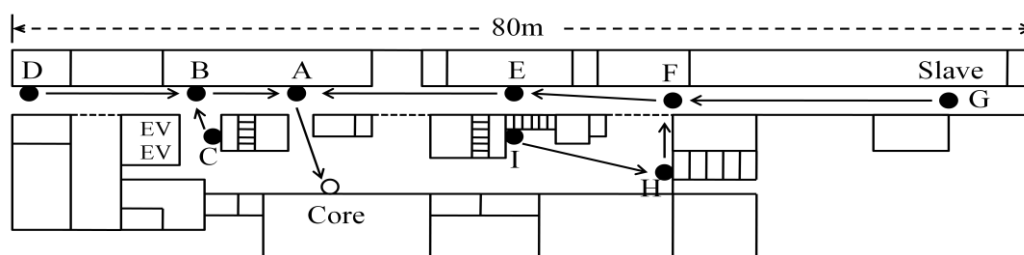


図 3.23 Route 2 の中継ルート

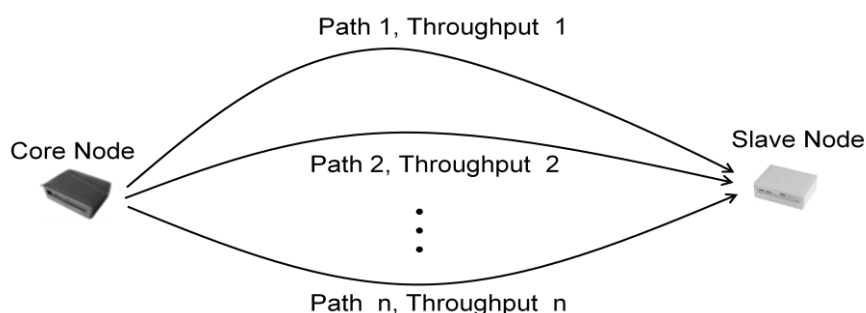


図 3.24 パスの変動

得られるルートと一致している。従来の最小伝搬損ルーティングはノード間の伝搬損の瞬時値を基にしているのに対し、提案手法は伝搬損の平均を基にしている。そのため提案手法により構築されるルートは、従来の最小伝搬損ルーティングにより構築される各ルートの中で、最も出現しやすいルートに収束しているのである。

### 3.4.5 スループット安定性の評価

本節では従来手法に比べ、提案手法によりシステムのスループットの安定性がどのように改善されるかを定量的に評価する。

#### 3.4.5.1 実験方法

前節のシナリオ 1 とシナリオ 2 のシステムにおいて、コアノードから各スレーブノードまでのスループットをスレーブノード毎に測定する。但し測定ツールと測定方法は 4.3 節と同じにし、従来の最小伝搬損ルーティング或いは本論

文の提案手法を実行し、ルートが確定してから測定を開始する。そしてスループット測定中にルートの再構築は行わない。

本節ではルートの変動によるスループットの変動について調べるので、スループットを測定する際に、伝搬路の変動によるスループットの変化の影響を抑制しなければならない。そのため各スレーブノードにおいて 5 回ずつスループットを測定し、その平均値を取る。

### (1) パスの変動とスループット

無線バックホールにおいて、従来のルーティング手法を用いて構築されるルートは時刻により変化するので、コアノードからスレーブノードまでのパスも変化し、各パスによるスレーブノードのスループットも異なる(図 3.24)。

本論文ではスループットの評価尺度として、各スレーブノードの平均スループットとスループットの変動範囲を定義する。コアノードからスレーブノードの間に出現するパスが  $Path_1, Path_2, \dots, Path_n$  で、各パスの出現頻度が  $P_1, P_2, \dots, P_n$ 、各パスによるスループットが  $T_1, T_2, \dots, T_n$  であるなら、該当スレーブノードの平均スループットは次のように計算する。

$$T_A = \sum_{i=1}^n T_i * P_i \quad (3-3)$$

更に  $T_{min}$ 、 $T_{max}$  を各パスによるスループットの最小値と最大値とし、

$$\alpha = \left( \frac{T_{min}}{T_A} - 1 \right) \times 100, \quad \beta = \left( \frac{T_{max}}{T_A} - 1 \right) \times 100 \quad (3-4)$$

とする。 $(\alpha, \beta)\%$  を該当スレーブノードのスループット変動範囲と定義する。

スループットの変動範囲は、ルーティング手法により各スレーブノードのスループットが如何に変動するかを示す。

### (2) 実験シナリオ

スレーブノード毎に各出現パスの頻度の測定し、各パスのスループットを測定する。

#### (a) パス出現頻度測定

提案手法によりルートは固定パターンに収束するので、従来の最小伝搬損ルーティングだけに対し、各スレーブノード毎にパスの出現頻度を測定する。

前節のシナリオ 1 とシナリオ 2 のシステムに対し、従来の最小伝搬損ルーティングを 3 分間隔で 1000 回ずつ実行し、スレーブノード毎に出現パスを統計し、頻度を求める。

#### (b) スループット測定

シナリオ 1 とシナリオ 2 のシステムに対し、まず従来の最小伝搬損ルーティングを実行し、ノード毎に出現する各パスによるスループットを測定する。次に提案手法を実行し、ルートが収束したらノード毎にスループットを測定する。

最後に式 3-3、3-4 により、従来の最小伝搬損ルーティングと提案手法による各スレーブノードの平均スループットと変動範囲を計算する。

### 3.4.5.2 実験結果

#### (1) シナリオ 1

表 3.5 と表 3.6 に従来の最小伝搬損ルーティングと提案手法を実行した場合、ノード毎の出現するパスの頻度とスループットを示し、表 3.7 に従来手法と提案手法の平均スループットの比較及び、従来手法の各ノードスループット変動範囲を示す。

#### (2) シナリオ 2

表 3.8 と表 3.9 に従来の最小伝搬損ルーティングと提案手法を実行した場合、ノード毎の出現するパスの頻度とスループットを示し、表 3.10 に従来手法と提案手法の平均スループットの比較及び、従来手法の各ノードスループット変動範囲を示す。

表 3.5 シナリオ 1: 従来手法実行時、各パスの出現頻度とスループット

Node	パス	頻度	スループット
A	Path_A1	100%	24.6Mbps
B	Path_B1	98.5 %	12.8Mbps
	Path_B2	1.5%	8.16Mbps
C	Path_C1	76 %	12.5Mbps
	Path_C2	24 %	8.3Mbps
D	Path_D1	76 %	8.15Mbps
	Path_D2	22 %	6.0Mbps
	Path_D3	0.5 %	7.58Mbps
	Path_D4	1.5 %	12.1Mbps
E	Path_E1	74 %	12.2Mbps
	Path_E2	21 %	8.19Mbps
	Path_E3	4.5 %	6.0Mbps
	Path_E4	0.5 %	6.0Mbps
F	Path_F1	74 %	8.4Mbps
	Path_F2	20.5 %	6.0Mbps
	Path_F3	4.5 %	6.0Mbps
	Path_F4	0.5 %	12.2Mbps
	Path_F5	0.5 %	4.85Mbps

表 3.6 シナリオ 1: 提案手法実行時、各パスの出現頻度とスループット

Node	パス	頻度	スループット
A	Path_A1	100 %	24.6Mbps
B	Path_B1	100 %	12.8Mbps
C	Path_C1	100 %	12.5Mbps
D	Path_D1	100 %	8.15Mbps
E	Path_E1	100 %	12.2Mbps
F	Path_F1	100 %	8.4Mbps



表 3.7 シナリオ 1: 平均スループットの比較と従来手法のスループット変動範囲

Node	従来手法と変動範囲		提案手法	比較
A	24.6Mbps	(0, 0)%	24.6Mbps	0%
B	12.73Mbps	(-35.9, 0.5)%	12.8Mbps	+0.5 %
C	11.49Mbps	(-27.7, 8.7)%	12.5Mbps	+8.8 %
D	7.73Mbps	(-22.4, 56.5)%	8.15Mbps	+5.4 %
E	11.04Mbps	(-45.7, 10.5)	12.2Mbps	+10.5 %
F	7.80Mbps	(-37.8, 56.4)%	8.4Mbps	+7.7 %

表 3.8 シナリオ 2: 従来手法実行時、各パスの出現頻度とスループット

Node	パス	頻度	スループット
A	Path_A1	100%	23.8Mbps
B	Path_B1	98.0%	12.3Mbps
	Path_B2	0.7 %	7.91Mbps
	Path_B3	0.4 %	5.49Mbps
	Path_B4	0.9 %	12.6Mbps
C	Path_C1	98.6 %	8.20Mbps
	Path_C2	0.1 %	11.4Mbps
	Path_C3	0.4 %	21.9Mbps
	Path_C4	0.9%	2.0Mbps
D	Path_D1	65.3 %	8.22Mbps
	Path_D2	32.6 %	6.10Mbps
	Path_D3	2.1 %	12.0Mbps
E	Path_E1	98.0 %	12.1Mbps
	Path_E2	1.3 %	8.12Mbps
	Path_E3	0.7 %	8.21Mbps
F	Path_F1	97.3%	8.20Mbps
	Path_F2	0.3 %	4.87Mbps

	Path_F3	0.6 %	11.6Mbps
	Path_F4	1.8 %	6.03Mbps
G	Path_G1	97.6 %	6.03Mbps
	Path_G2	0.1 %	7.90Mbps
	Path_G3	0.3 %	7.93Mbps
	Path_G4	2.0 %	4.63Mbps
H	Path_H1	97.6 %	8.13Mbps
	Path_H2	1.3 %	6.05Mbps
	Path_H3	0.6 %	6.05Mbps
	Path_H4	0.5 %	6.00Mbps
I	Path_I1	97.3 %	6.00Mbps
	Path_I2	1.4 %	4.67Mbps
	Path_I3	0.6 %	4.67Mbps
	Path_I4	0.4 %	4.77Mbps
	Path_I5	0.3 %	7.11Mbps

表 3.9 シナリオ 2: 提案手法実行時、各パスの出現頻度とスループット

Node	パス	頻度	スループット
A	Path_A1	100%	23.8Mbps
B	Path_B1	100%	12.3Mbps
C	Path_C1	100%	8.20Mbps
D	Path_D1	100%	8.22Mbps
E	Path_E1	100%	12.1Mbps
F	Path_F1	100%	8.20Mbps
G	Path_G1	100%	6.03Mbps
H	Path_H1	100%	8.13Mbps
I	Path_I1	100%	6.00Mbps

表 3.10 シナリオ 2: 平均スループット比較と変動範囲

Node	従来手法と変動範囲		提案手法	比較
A	23.8Mbps	(0, 0) ¥%	23.8Mbps	0%
B	12.2Mbps	(-55.0, 3.2) ¥%	12.3Mbps	+0.8 %
C	8.20Mbps	(-75.6, 167.1) ¥%	8.20Mbps	0 %
D	7.61Mbps	(-19.8, 57.7) ¥%	8.22Mbps	+8.0 %
E	12.0Mbps	(-32.3, 0.8) ¥%	12.1Mbps	+0.8 %
F	8.17Mbps	(-40.4, 41.9) ¥%	8.20Mbps	+0.4 %
G	6.01Mbps	(-22.9, 31.9) ¥%	6.03Mbps	+0.3 %
H	8.07Mbps	(-25.6, 0.7) ¥%	8.13Mbps	+0.7 %
I	5.97Mbps	(-21.7, 19.0) ¥%	6.00Mbps	+0.5 %

### 3.4.5.3 スループットの考察

- (1) 各スレーブノードにおいて、提案手法により構築されるパスは、従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合に現れるパスの中で、最大出現頻度を持つパスと一緒である。これは前節の安定性実験と類似した結果となる。
- (2) 各スレーブノードにおいて、提案手法を実行した場合の平均スループットは、従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合の平均スループットより良くなるか、或いは同じである。
- (3) 表 3.5 と表 3.8 から分かるように、従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合、各スレーブノードには複数のパスが選択されるが、その中で低い頻度で出現するパスのスループットは低くなっている (例えば表 3.5 のノード B の Path\_B2)。従来の最小伝搬損ルーティングの実行時、伝搬路がこれらのパスが選択されるような特殊な状況下にあったので、これらのパスが選択されている。但し伝搬路は何らかの原因で (例えば人の動きなど)、その後すぐ変化している。スループットの測定は 30 秒間も続いているが、この時間内で伝搬路の変動に追随しなかったため、低いスループットが得られている。
- (4) 従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合、各スレーブノードは一定のスループット変動範囲を持っており、スループットは時刻によって変動する。例えばシナ

リオ1のノードDの変動範囲は(-22.4, 56.5)%となっている。従来の最小伝搬損ルーティングにより、提案手法によって構築されるパスよりスループットが大きいパス、Path\_D4 が出現しているが、その出現頻度は非常に低いので(1.5%)、安定したパスではなく、平均スループットに対する影響は小さい。一方で 22%の頻度で提案手法よりスループットが 26.4%も低い Path\_D2 が出現していて、平均スループットが落ちている。提案手法を実行した場合、各スレーブノードに固定したパスが構築されるので、各スレーブノードのスループットは変動せず、安定する。

- (5) ノード間の伝搬損はその平均値を中心として、時刻により変動する。従って従来の最小伝搬損ルーティングを実行した場合、各ノードに選択されるパスも最多出現パスを中心に変動し、スループットも平均スループットを中心に変動する。しかし、最多出現パスは提案手法により構築されるパスと一緒であるため、従来の最小伝搬損ルーティングにより得られる各ノードの平均スループットは提案手法により得られる安定スループットに近い値となる。

以上から提案手法はルートの安定性を確保するだけでなく、今回の比較方法により、各スレーブノードで安定且つ高いスループットが得られることを明らかにした。

### 3.5 本章のまとめ

無線バックホールにおいて IPT を適用し、システムの性能改善を行うためにはまず、適切な中継経路を設定することが前提条件である。そのため本章では従来の最小伝搬損ルーティングを改良し、安定的なルートを構築する手法を提案した。

提案手法は伝搬路の変動を考慮し、受信電力の逐次平均を取ることにより漸近的に安定した中継経路を構築する。提案手法を実機テストベッドに実装して性能を評価した。その結果、伝搬路が変動する実環境でも安定した中継経路が構築でき、各スレーブノードに安定且つ高いスループットを持つパスを割り当てることが確認できた。

## 第4章 無線バックホールにおける送信周期 自動設定法

本章では無線バックホールにおいて IPT の効果を最大化するための、送信周期の自動設定手法について検討する。無線バックホールにおいて IPT を適用する場合、IPT 送信周期は最重要なパラメータであり、適切に設定しないと IPT の効果は発揮できない。IPT 送信周期はノード配置や周辺環境などに依存するため、机上計算であらかじめ適切な数値を設定することは難しい。IPT 送信周期を自動的に設定する手法が必要となる。

本章ではまず無線バックホールにおける既存の送信周期自動設定法について説明し、その問題点について指摘する。次にコアノードから各スレーブノードまでのスループットが最大になる新しい IPT 送信周期を設定する手法を提案し、評価を行う。

### 4.1 既存の IPT 送信周期設定法

文献[23]ではパケットの衝突回避が可能となる、Hand Shake に基づいた IPT 送信周期自動設定手法を提案し、評価を行っている。本節ではまず当提案手法について説明し、その問題点を指摘する

#### 4.1.1 衝突回避-送信周期自動設定法

当提案手法ではまず 3 種類の新しい MAC 層のパケットを定義している：RTSS(Request to Stop Sending)、CTP(Clear to Pilling Up)、CTPACK(CTP ACKnowledgement)。そして下記に記述する Hand Shake アルゴリズムにより IPT 送信周期を探す。

図 4.1 に示すように、IPT 周期設定が始まると、始点ノードは終点ノードに向

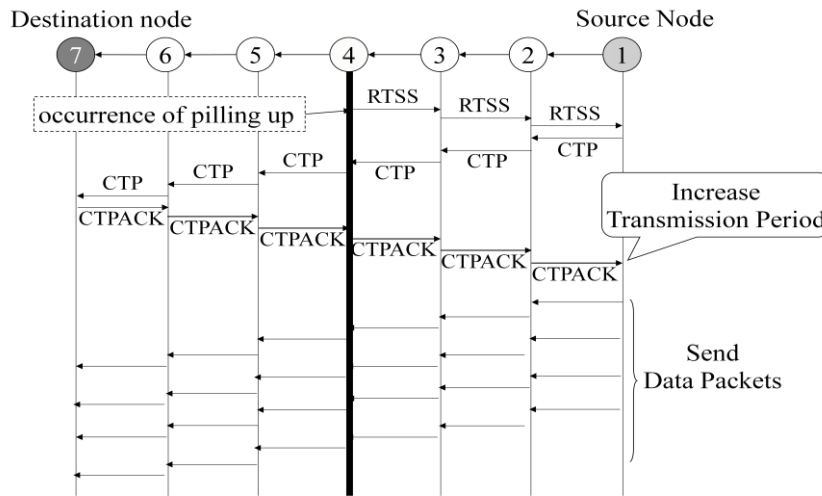


図 4.1 衝突回避 IPT 周期設定法

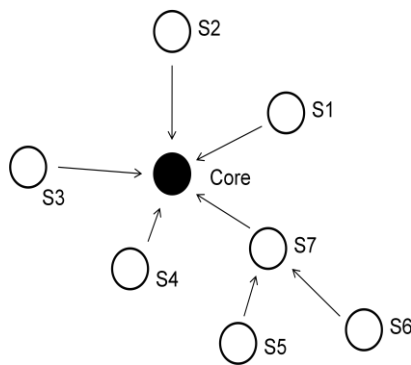


図 4.2 メッシュクラスタ

け一定の送信周期をもってパケットを送信する。パケット中継途中、もしある中継ノードにおいて（図 4.1 の場合はノード 4）パケットの送信失敗が発生したら、当該ノードは始点ノードへ向けて即座に RTSS (Request to stop sending) パケットを送信し、中継される。RTSS パケットを受信した始点ノードはデータパケットの送信を一旦停止し、即 CTP (Clear to piling up) パケットを終点ノードへ向けて送信する。CTP パケットを受信した終点ノードは CTPACK (CTP Acknowledge) を始点ノードへ即座に送信し、CTPACK を受け取った始点ノードは送信時間間隔をある一定値だけ増大させて送信を再開する。RTSS、CTP、および CTPACK、いずれのパケットもユニキャストパケットである。この処理はネットワーク内にパケットの滞留が発生しなくなるまで繰り返される。

#### 4.1.2 衝突回避-送信周期設定法の問題点

前節で説明した衝突回避-送信周期設定法により得られた送信周期により、ネットワーク上のパケットの衝突が回避できる。但し当手法には複数の問題点を持っており、実用性に乏しい。

- (1) 当手法では新しく MAC 層のパケットを定義、使用している。そのため当手法を汎用モジュール（例えば市販の WiFi モジュールなど）を用いて実装することは容易なことではない。
- (2) 当手法ではパケットの送受信状態を、MAC 層の状態を直接参照して確認しているが、既存の MAC 層のドライバ（例えば MadWiFi など）ではその様な機能を提供していない。あるいは安全のためアプリケーションソフトが MAC 層を直接参照することは禁止している。
- (3) 当手法は Hand Shake によりパケット衝突を回避するように送信周期設定を行っているため、得られる送信周期により、ネットワーク上のパケット衝突は回避できるが、システムのスループットは直接反映していないため、得られた送信周期により最大のシステムスループットが得られることが保障されない。

本論文では既存のスタンダードに変更を加えることなく、汎用の無線モジュールにより無線バックホールを構築することを目標としているため、この手法は応用できない。なお無線バックホールではコスト削減が主要な利点の一つであることから、新しい周期設定法の開発が必要となる。

#### 4.2 トレーニングによる送信周期自動設定法

本節では、コアノードから各スレーブノードまでのエンド・ツー・エンドのスループットを最大にする新しい送信周期設定法を提案する。提案手法はトレーニングパケットを利用し、各スレーブノードに対しトレーニングを行うことにより、最適な IPT 送信周期を算出する。トレーニングするとき、コアノードは対象スレーブノードに一定のトレーニングパケットを送信し、該当ノードに

おけるメトリックが最大になるまで送信周期を徐々に増やす。

本章を通して、無線バックホールの中継経路は既に決定されているとし、送信周期の設定はその後行うことにする。

#### 4.2.1 提案手法における変数とパラメータ

本手法では以下の変数とパラメータを使用している：

- (1) トレーニングパケット
- (2) トレーニングパケットの数：  $N$
- (3) ノード毎のトレーニング時間：  $T$
- (4) トレーニングメトリック：  $TM$
- (5) ノード毎の送信周期：  $D(\mu \text{ sec})$
- (6) トレーニングステップ：  $\Delta(\mu \text{ sec})$

上記の変数でトレーニングパケットは OSI Link 層以上の層のデータパケットであり、パケット長は 1450 バイト、各パケットはパケット ID により識別される。パラメータ  $TM$  と  $D$  はトレーニングが始まったとき、スレーブノード毎に初期化される。トレーニングメトリック  $TM$  はトレーニングを行う際の尺度である。

#### 4.2.2 提案手法の詳細

図 1.2 に示すように、無線バックホールはコアノードを中心とした複数のサブシステムに分割できる。各サブシステムで、スレーブノードは該当コアノードを経由して外部ネットワークに接続される。本論文ではこのサブシステムをメッシュクラスタと呼ぶことにする (図 4.2)。提案手法は各メッシュクラスタ毎に同じ方法で実行される。

今コアノード  $C$  とスレーブノード  $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  からなるメッシュクラスタを対象とする。コアノード  $C$  はスレーブノード  $S \in \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  に対し、以下のような処理を行う：



- Step1.** コアノード C はスレーブノード S のためにトレーニングメトリック  $TM$  を  $-1.0$  と初期化し、 $D$  を  $D_0$  と初期化する。 $D_0$  十分小さい正の値である。
- Step2.** コアノード C は  $N$  個のシーケンス番号が  $\{1, 2, \dots, N\}$  のトレーニングパケットをスレーブノード S に送る。但しこのとき IPT 送信周期  $D$  を持つ。
- Step3.** スレーブノード S は自分宛のトレーニングパケットを受信すると、シーケンス番号と受信時刻を記録する。
- Step4.** 自分宛のトレーニングパケットの受信が終わると、スレーブノード S は最初に受信したパケットの受信時刻とシーケンス番号( $Seq1, T_1$ )、そして最後に受信したパケットの受信時刻とシーケンス番号( $Seq2, T_2$ )により実際のトレーニング時間  $T$  を次式のように推定する：

$$\delta = \frac{T_2 - T_1}{Seq2 - Seq1} \quad (4-1)$$

$$T_{start} = T_1 - \delta * (Seq1 - 1),$$

$$T_{end} = T_2 + \delta * (N - Seq2)$$

$$T = T_{end} - T_{start}$$

次にスレーブノード S は新しいメトリック  $New\_TM$  を次式のように計算する：

$$New\_TM = \frac{Num}{T}$$

ここで  $Num$  は受信したトレーニングパケットの数である。その後 S はコアノードに向け  $New\_TM$  を含むレポートパケットを送信する。

- Step5.** コアノード C はスレーブノード S からのレポートパケットを受信したら、含まれている  $New\_TM$  により処理の分岐を行う：
- 1) もし  $New\_TM \leq TM$  ならコアノード C はスレーブノード S のためのトレーニングを終了し、S の IPT 送信周期を  $(D - \Delta)$  と設定し、次のスレーブノードのトレーニングを開始する。
  - 2) もし  $New\_TM > TM$  ならコアノード C は IPT 送信周期  $D$  を  $D \leftarrow D + \Delta$  に増やし、 $TM \leftarrow New\_TM$  に入れ替え、上記の Step2 ~ Step5 を繰り返す。
- Step6.** コアノード C は Step2 ~ Step5 をすべてのスレーブノードのトレーニングが完了するまで繰り返す。

### 4.2.3 提案手法の特徴

本節では提案手法についていくつかの説明を行う。

- (1) 本章を通してシステムは IPT 周期設定を行うときはパケット中継サービスを提供しないと過程する。そのためシステムにはトレーニングに関連するパケットしか存在しない。なおコアノードは一つのスレーブノードのトレーニングが終了してから次のスレーブノードのトレーニングを開始する。そのためトレーニングするノードの順番は結果に影響しない。
- (2) トレーニング実行途中、干渉などの影響によりトレーニングパケットの欠落が起こりうるため、実際のトレーニング時間は式(4-1)のように推定しなければならない。式(4-1)で  $\delta$  はトレーニングパケットの平均送信時間であり、トレーニングパケットの受信開始時刻と終了時刻はそれぞれ  $\delta$  により補完され、さらにトレーニング時間  $T$  を補完している。
  - (3) 提案手法は各スレーブノードにおいて、メトリック  $TM$  が最大になるまで送信周期を初期値から徐々に増やし、 $TM$  が最大値を超えたところで終了する。そのため該当スレーブノード  $S$  のための IPT 送信周期は Step5 の 1) に示すように 1 ステップ以前の値としている。
- (4) トレーニングメトリックの計算から、このメトリックはコアノードからスレーブノードまでのエンド・ツー・エンドスループットに直結されているのが分かる。(実際メトリックにパケット長を追加すればスループットとなる) そのためメトリック  $TM$  が最大になるような送信周期はエンド・ツー・エンドスループットを最大にすることである。一方トレーニングパケットの数  $N$  は十分大きい値に設定し、十分な精度でスループットを反映しなければならない。 $N$  については次節でシミュレーションにより評価する。
- (5) 提案手法で使用しているトレーニングパケットは MAC 層以上の層のパケットとして定義されているため、既存の標準に変更を加える必要がなく実装ができる。例えば IEEE802.11 モジュールを使用する場合、トレーニングパケットはリンク層のパケットとし、ドライバにより提供される関数を使用して実装ができる。

### 4.3 提案手法の評価

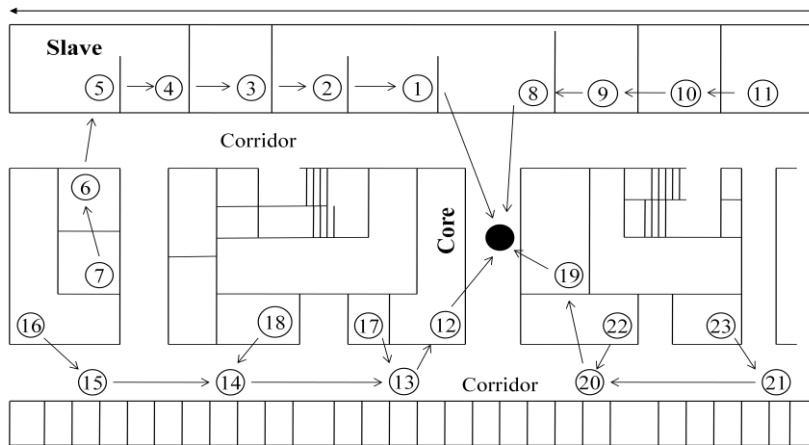


図 4.3 シミュレーションシサイト 1

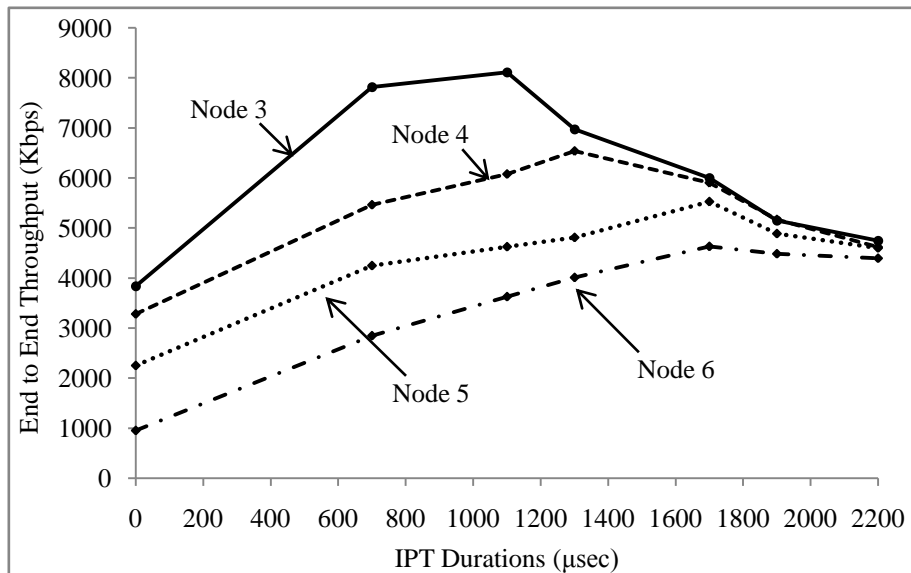


図 4.4 マニュアルで測定したスループット値 : Node 3, 4, 5, 6

本節では提案手法についてコンピュータシミュレーションとテストベッドを使用した実験により評価を行う。

#### 4.3.1 コンピュータシミュレーションによる評価

本節では大規模のノード配置により提案手法の性能を評価する。本シミュレーションでは IEEE802.11a を無線インタフェースとし、図 4.3 に示すようにコアノード 1 つとスレーブノード 23 個のシミュレーションサイトを構築する。本システムは一つだけのメッシュクラスタからなる。シミュレーション時のパラメータ設定を表 4.1 に示す。

表 4.1 シミュレーションパラメータ

MAC Model	IEEE802.11a, Basic Mode, Retry Count = 3.
PHY Model	Packet reception fails when SINRlevel becomes lower than 10dB.
Propagation Model	2 Ray Ground Reflection Model. No Fading Effect. 12dB Attenuation by a Wall.
Routing Method	Minimum Path Loss Routing.
Data Packet Length	1500 Byte.
Traffic Model	Log Normal: mean = 20, var = 5.

#### 4.3.1.1 シミュレーションシナリオ

本シミュレーションではコアノードから各スレーブノードまでのエンド・ツー・エンドスループット (TP<sub>ee</sub>) を以下の式(4-2)により測定する。

$$TP_{ee} = \frac{PactNum * PactLen}{TransmissionTime} \quad (4-2)$$

式 4-2 で PactNum はスレーブノードが重複無しに受信したパケットの数で、PactLen はパケットの長さを示す。

シミュレーションでは、まず IPT 送信周期を徐々に増やしながら、スレーブノードのスループットをマニュアル的に測定し、そのスループットの値が最大になる IPT 送信周期を探す。このように手動で探した IPT 送信周期は提案手法により計算された値と比較することにする。本シミュレーションでは各スレーブノードのスループットを測定する際、他にトラフィックが発生しないと、スループット測定に発生させたパケットの数は 2000 個とする。

次に提案手法を実行し、各ノードの送信周期を自動的に計算する。但しこのときの各パラメータの値は  $D_0 = 0$  とし、 $\Delta$  は 50, 100, 200  $\mu$  sec の場合に分けてそれぞれ評価を行う。最後に、計算された最適な IPT 送信周期を持って、システム全体のスループット (TP<sub>all</sub>) を評価する。具体的にはコアノードにおいて、対数正規分布に従って一定の負荷のトラフィックを生成し、各スレーブノード

で受信したパケットを以下のように統計する。

$$TP\_all = \frac{\text{TotalPactNum} * \text{PactLen}}{\text{TransmissionTime}} \quad (4-3)$$

式(4-3)で、TotalPactNum はすべてのスレーブノードで重複無しに受信したパケットの総数で、PactLen はパケットの長さを示す。TP\_allについて、提案手法により計算された送信周期を適用した場合どれくらい改善が得られるかを評価する。

#### 4.3.1.2 シミュレーション結果

図 4.4 ～ 4.7 に各スレーブノードのマニュアルで測定した IPT 送信周期とスループットの特性を示している。なお各スレーブノードにおいて、スループットが最大となる IPT 送信周期の値を表 4.2 に示す。トレーニングステップ  $\Delta$  を  $100 \mu\text{sec}$  に固定し、 $N = 50, 100, 300, 500, 1000$  にした場合計算された各ノードの送信周期を図 4.8, 4.9 に示す。なお  $N=300$  に固定し、 $\Delta = 20, 50, 100, 200 \mu\text{sec}$  にした場合計算された送信周期を図 4.10 に示している。表 4.3 に  $N = 300$ 、 $\Delta = 20, 50, 100, 200 \mu\text{sec}$  の場合の提案手法の実行時間を示している。図 4.11 に提案手法により計算された送信周期を適用した場合システムのスループット特性を示している。

図 4.8, 4.9 に示すように、提案手法により計算されたスレーブノード 1, 2, 8, 9, 12, 13, 19, 20 の送信周期は 0 である。周期的間欠送信法の特徴によれば、システムの中でコアノードと互いにキャリアセンスができる範囲内にあるノードは隠れ端末の問題が生じないため、これらのスレーブノードに中継を行う場合 IPT 送信周期は設定しない（即ち 0 にする）でいい。その故これらのノードに対してのマニュアルスループットの測定結果は省いている。

図 4.8, 4.9 に示すように、 $N = 300, 500, 1000$  の場合提案手法により自動で計算された送信周期の値は表 4.2 に示したマニュアル的に測定した最適な値と一緒である。一方  $N = 50, 100$  の場合は、提案手法で計算された値はマニュアル的に測定した最適な値と一緒でない。N が十分大きくない場合、スレーブノードが受信したトレーニングパケットと N の比は実行する度に変動が大きくなり、

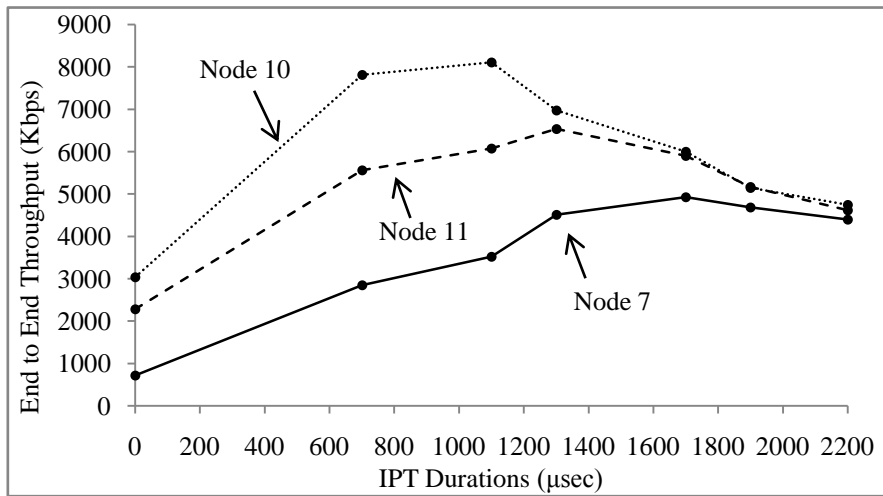


図 4.5 マニュアルで測定したスループット値 : Node 7, 10, 11

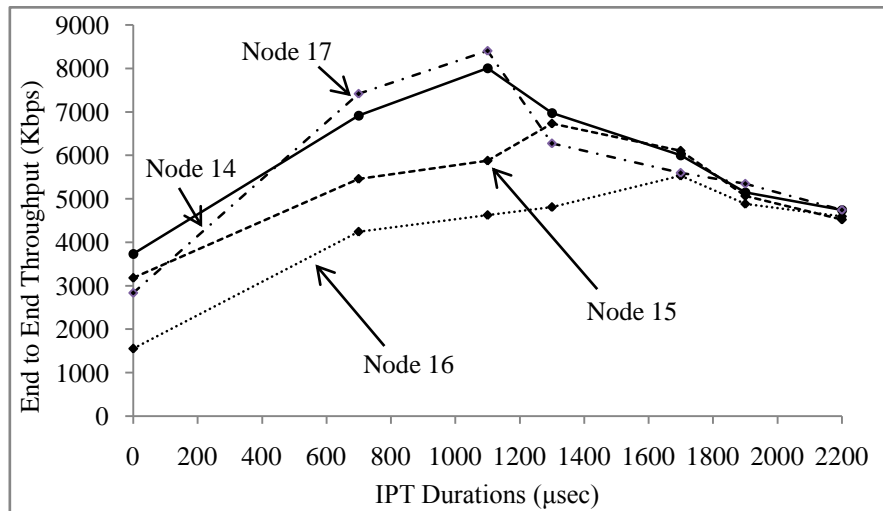


図 4.6 マニュアルで測定したスループット値 : Node 14, 15, 16, 17

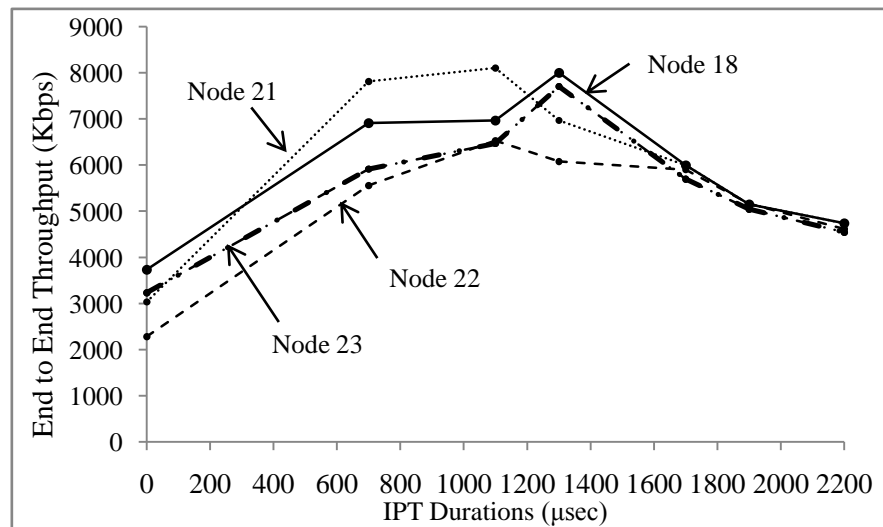


図 4.7 マニュアルで測定したスループット値 : Node 18, 21, 22, 23

表 4.2 マニュアル測定により得られた最適な送信周期 ( $\mu\text{sec}$ )

Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7
1100	1300	1700	1700	1700
Node 10	Node 11	Node 14	Node 15	Node 16
1100	1300	1100	1300	1700
Node 17	Node 18	Node 21	Node 22	Node 23
1100	1300	1100	1100	1300

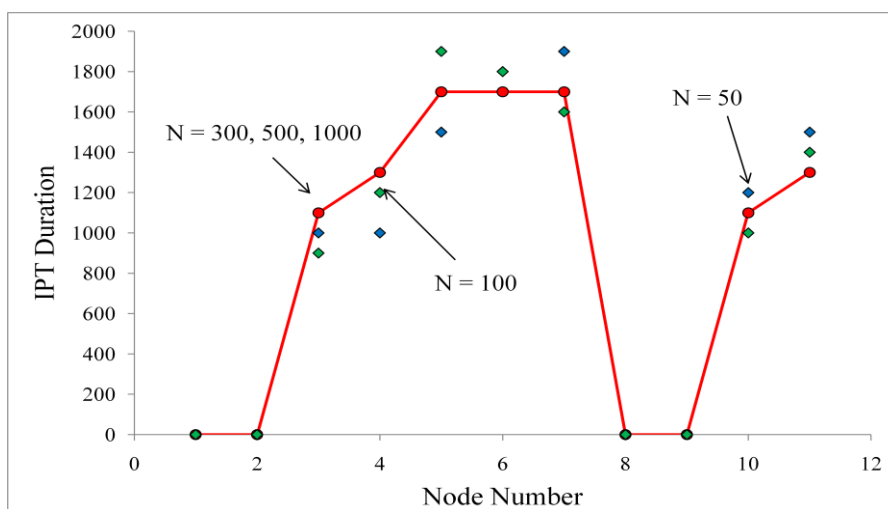


図 4.8 提案手法により計算された送信周期、 $\triangle = 100 \mu\text{sec}$  : Node 1 ~ 11

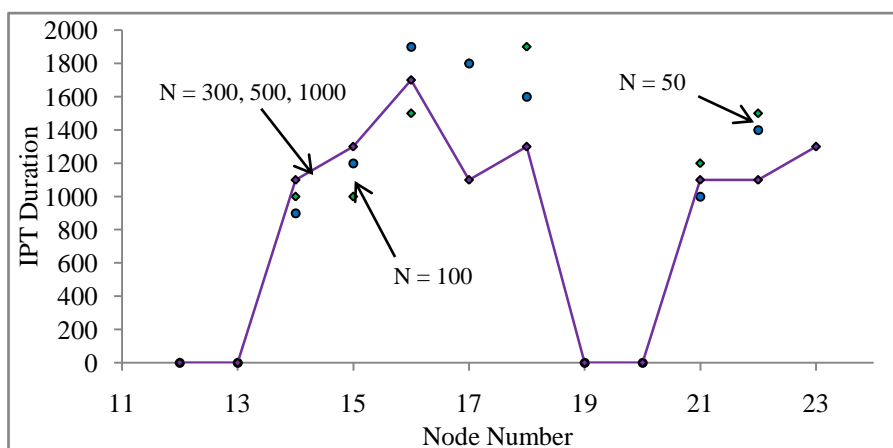


図 4.9 提案手法により計算された送信周期  $\triangle = 100 \mu\text{sec}$  : Node 12 ~ 23

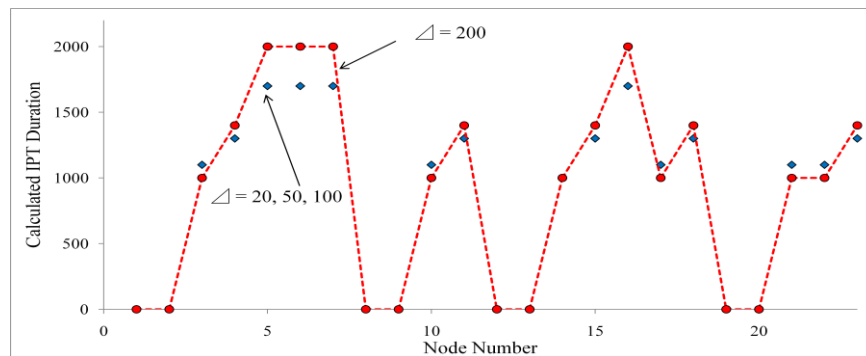


図 4.10 提案手法により計算された送信周期,  $N = 300$ ,  $\Delta = 50, 100, 200 \mu sec$

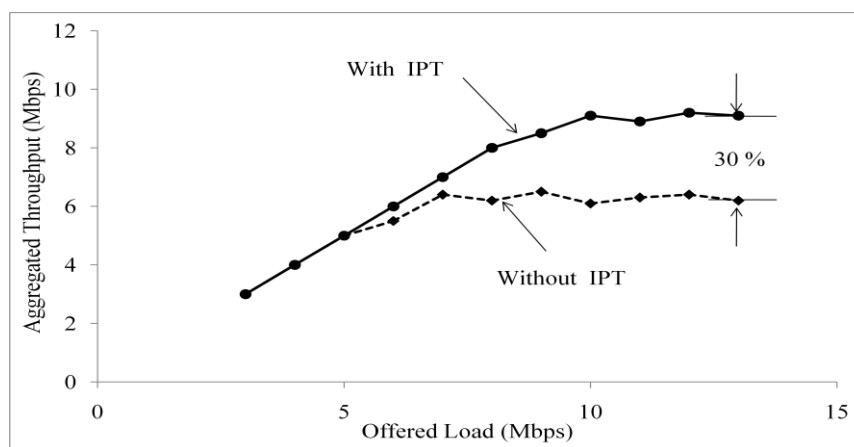


図 4.11 システムスループットの改善

表 4.3  $N=300$  の場合の提案手法の実行時間

$\Delta (\mu sec)$	Protocol run time (sec)
20	113.1
50	43.2
100	24.1
200	13.5

トレーニング時間の推定も十分精密にできない。一方  $N$  が十分大きくなるにつれ (今度のシミュレーションでは  $N \geq 300$ )、その変動は徐々に収束し、計算された値は最適な値と一緒である。図 4.10 に示すように  $N=300$ 、トレーニングステップ  $\Delta = 20, 50, 100 \mu sec$  の場合、提案手法は同じ結果を得ている。一方  $\Delta = 200 \mu sec$  の場合得られた結果はマニュアルで測定した最適な値とずれている。



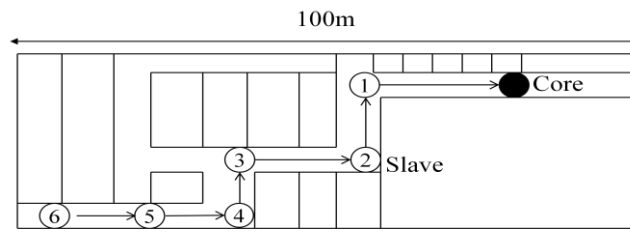


図 4.12 実験配置：九州大学ウェスト 2 号館 8 階

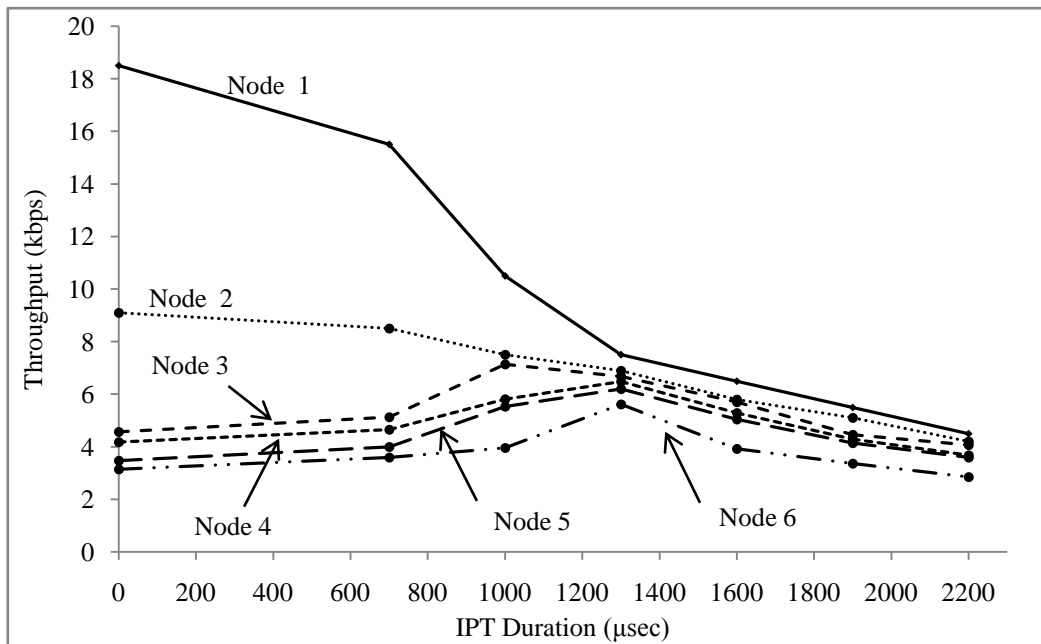


図 4.13 マニュアルで測定した IPT とスループット特性

表 4.4 提案手法により計算された送信周期

Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	実行時間
0	0	1000	1300	1300	1300	1300

即ちトレーニングステップが大きすぎると十分正確な結果が得られない。一方表 4-3 には各  $\Delta$  の設定値における提案手法の実行時間を示している、 $\Delta$  の値が小さすぎると実行時間が長くなるのが分かる。実用的に考えれば、 $\Delta = 100 \mu \text{ sec}$  は適切な設定である。

図 4.11 には提案手法により計算された送信周期を適用した場合、システム全体のスループット特性を示している。図に示すように下り方向のスループットは 30% ぐらいの改善が達成されている。

### 4.3.2 実験による評価

本節では提案手法を実機テストベッドに実装し、評価を行う。

#### 4.3.2.1 テストベッドと実験シナリオ

本実験では第 3.4.1 節で説明した PicoMesh LunchBox を使用し、スループット測定も iPerf を使用する。

実際の応用で一つのメッシュクラスタは 3~10 ぐらいのノードにより構成される[40]。その故本実験ではコアノード1つとスレーブノード1つのメッシュクラスタを九州大学ウェスト2号館の8階に構築した(図 4.12)。

本実験ではまずコアノードから各スレーブノードまでのスループットを、iPerf を用いて測定する。毎回 iPerf の測定時間は 30 秒とし、スループット測定の際にはほかのトラフィックは発生しないとする。各スレーブノードにおいてマニュアル的に測定したスループット特性によりスループットが最大になるような送信周期を探し、その後提案手法により計算される送信周期と比較する。

次に提案手法を実行し、各スレーブノードの IPT 送信周期を自動的に計算する。その際のパラメータ設定は  $D_0 = 0, \Delta = 100 \mu \text{sec}$  とする。

#### 4.3.2.2 実験結果

マニュアル的に測定した IPT 送信周期とスループット特性を図 4.13 に示し、提案手法を実行して得られた各スレーブノードの送信周期と実行時間を表 4.4 に示す。

表 4.4 に示すように、Node 1 と Node 2 の送信周期は 0 となっており、この二つのノードはコアノードのキャリアセンス範囲内にあることを示している。なお図 4.13 から分かるように、この二つのノードにおいては送信周期が 0 の場合最大のスループットを達成することが分かる。なおトレーニング packets を 1000 個にしても 11 秒で完了しているため、実用性も確認できる。

## 4.4 本章のまとめ

IPT 送信周期は無線バックホールにおいて IPT を応用する際に最も重要なパラ

メータであり、適切に設定しないと IPT の効果が発揮できない。そのため本章ではトレーニングに基づいた IPT 送信周期の自動設定法を提案し、評価を行った。提案手法により求められた IPT 送信周期により、コアノードから各スレーブノードまでのエンド・ツー・エンドのスループットが最大にできる。

提案手法はシミュレーションと実験、両方により評価され、その有効性と実用性を確認できた。提案手法は既存のスタンダードの変更を求めているため、汎用の無線モジュールにより容易に実現できる。

# 第5章 無線バックホールにおける指向性 固定アンテナシステム

本章では無線バックホールにおいて、指向性アンテナを応用することにより電波干渉を物理的に抑制した状態での IPT の実現について検討する。

指向性アンテナは送信電力を一定方向へ集中させることにより、他ノードへの干渉を軽減できる長所を有する。指向性アンテナの適用により IPT の性能は更に向上するものと期待されるが、全方位接続性を担保するためには異なる主軸方向の複数の指向性アンテナを装備する必要がある、その適応的な切り替え処理で生じる遅延時間の影響によって中継伝送効率の低下が生じる問題がある。

本章では各ノードに複数の無線インタフェースを搭載し、インタフェース毎に固定的な指向性を持ったアンテナを接続することにより、この切り替え処理遅延の影響を軽減できる手法（FDA: Fixed Directional Antenna）を提案する。更に FDA が適用された無線中継ノードに適したルーティング手法を提案し、これと IPT を併用する手法について検討を行う。なお提案手法を実機テストベッドに実装し、性能改善について評価する。

## 5.1 指向性アンテナによる無線バックホールの性能強化

第3章と4章では無線バックホールにおける中継経路の安定性と、適切な IPT 送信周期の自動設定法という視点から無線バックホールの性能強化を行っていた。その時各ノードの無線モジュールには無指向性（オムニ）アンテナの使用を前提としている。IPT の適用により中継経路上の電波干渉は抑制できるが、ネットワークの規模が大きくなり、異なる中継パス間の相互干渉（本論文ではパス間干渉と呼ぶ）が発生すると、パケットの中継効率が劣化してしまう（図 5.1）。

パス間干渉を軽減し、無線バックホールでパケット中継を更に効率的に行う

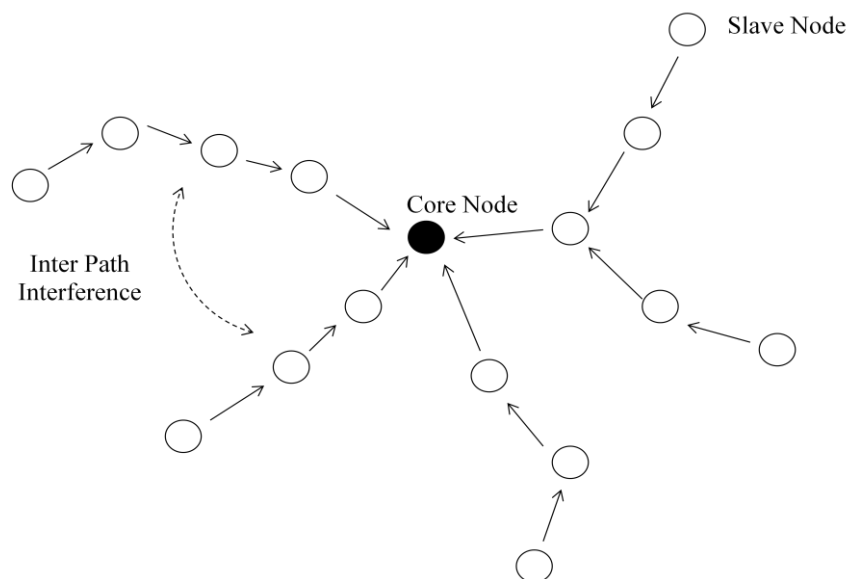


図 5.1 中継経路間の電波干渉

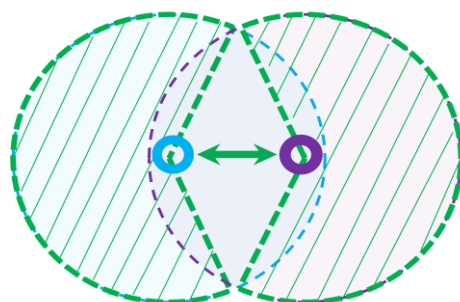


図 5.2 指向性アンテナの適用による空間効率の向上

ために、文献[34]では中継パスの予約により IPT を適用する手法を提案している。当手法ではソースノードがパケット中継を行う際に、まず宛先ノードまでの中継パスを予約し、その中継パス周辺のノードはパケット送信を控えるようにし、該当パス上のパケット送信が終了したら中継パスを解放する。予約された中継パス上で IPT を適用することにより、当手法はパス間干渉を回避することができる。但し当手法はパス間干渉の問題は解決するが、ネットワーク負荷を増やしてしまう欠点がある。更に当手法では複数の中継パスでの同時伝送を禁止しているため、ネットワーク性能向上を制限している。

本章では指向性アンテナの適用によりパス間干渉を軽減し、無線バックホー

ルの性能を更に向上させる手法について検討する。指向性アンテナの適用により期待される利点は、干渉抑制により周波数利用効率（空間周波数利用率）が向上されることである。例えば図 5.2 に示すように、水平方向に指向性を持たせた二点間通信においては、上下方向に放射される電波を抑制することができるので、この領域に存在する中継ノード群への干渉を低減できる。

## 5.2 指向性アンテナの適用によって生じる諸問題と従来の対策

前節で説明したように、指向性アンテナの適用により無線バックホールの性能改善が期待できる。しかしながら、指向性アンテナの適用は隠れ端末の発生を一層顕著なものとし、更に送信先ノードのキャリアセンス不可という新たな問題を引き起こす。そのため本節では指向性アンテナの適用に起因する指向性隠れ端末問題の発生メカニズムについて説明を行う。

### 5.2.1 指向性隠れ端末問題

指向性アンテナの適用による隠れ端末問題について説明する。図 5.3 は無指向性アンテナによる 3 ノード間の伝搬環境を表し、図 5.4 は同じ伝搬環境において指向性アンテナを適用した場合の様子である。

図 5.3 で示すような無指向性アンテナを適用した場合では、ノード B とノード C は互いの存在をキャリアセンスにより認識することができるので、一方のノードとノード A とが通信を行っている最中に他方のノードが割り込んでくることはない。一方、図 5.4 に示すような指向性アンテナを適用した場合には、ノード B はノード C の無線信号を検知できず、したがってノード C がノード A にデータを送信中に、ノード B がパケット送信を開始する恐れがある。このような問題を指向性隠れ端末問題と呼ぶ。

### 5.2.2 Deafness 問題

指向性アンテナの適用により、送信先ノードの送信有無状態の検出ができなくなってしまう、パケット伝送が失敗する場合もある。以下で図 5.5 を用いて説明する。

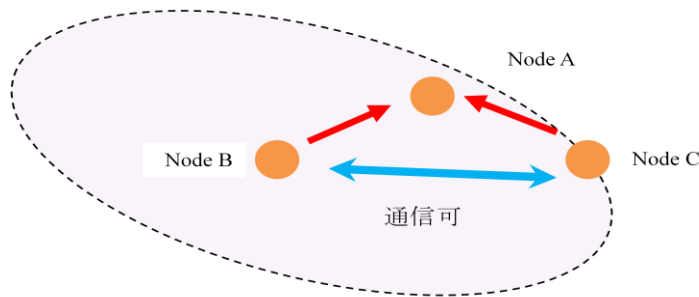


図 5.3 無指向性アンテナを搭載した3つのノード間の通信

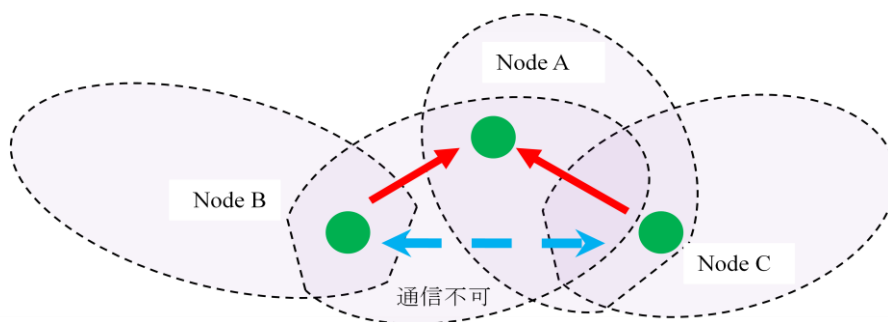


図 5.4 指向性アンテナを搭載した3つのノード間の通信

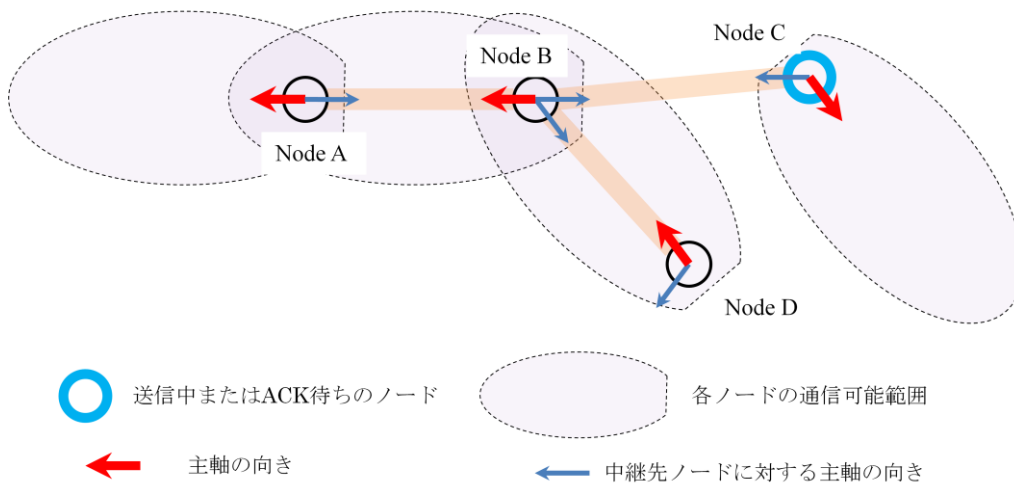


図 5.5 Deafness(キャリアセンス不可)問題

図 5.5 に示しているように、各ノードは特定の指向性パターンを持つ指向性アンテナによる中継伝送を行う。今ノード B が送信状態にあるノード C へ向けてパケットを伝送しようとする。ノード C の指向性パターンにより、ノード B は

ノード C の搬送波を検出することができない。その結果ノード B はノード C が送信状態であるにもかかわらずノード C へパケットの送信を行ってしまい、その結果パケット伝送は失敗してしまう。

このように指向性アンテナを適用すると送信ノードは送信先ノードの通信状態を判断できず、結果として送信先ノードが送信状態にあるにもかかわらずデータパケットを送信してしまう。これを Deafness (或いはキャリアセンス不可) 問題と呼ばれる。この問題は送信元ノードがアンテナの方向を如何様に切替えたところで解決できない。

### 5.2.3 指向性問題に対する従来の解決手法

無線バックホールにおいて指向性アンテナを適用する際に生じる指向性問題を解決するために、これまで数多くの研究がなされている ([6], [27], [28], [35])。

既存の研究では指向性問題を解決するための手法として、新しい指向性プロトコルの研究に重点を置いている。例えば文献[6]では RTS パケットと CTS パケットをオムニアンテナにより送受信し、DATA パケットと ACK パケットは指向性アンテナにより送受信する手法を提案している。当手法により指向性問題は解決できるが、周波数リユースの効率が劣化する。文献[28]ではオムニアンテナにより制御チャンネルを使用し、指向性アンテナによりデータチャンネルを使用する手法を提案している。但し当手法は周辺ノードの位置情報を取得することを前提にしているため、GPS 情報が取得できない屋内の伝搬環境では応用できない。文献[36]では指向性アンテナと周期的間欠送信を組み合わせる手法を提案しているが、複雑な MAC プロトコルの設計を伴っているため汎用モジュールによる実装は不可能となる。

### 5.3 指向性固定アンテナシステム

前節で説明したように、既存の手法では指向性問題を解決するため複雑な MAC 層のアルゴリズム設計を伴っているため汎用無線モジュールにより実現するのは困難である。なお既存の標準を変更することは無線バックホールの敷設コストの増加を招き、コスト削減という無線バックホールの利点を損なってしまう。



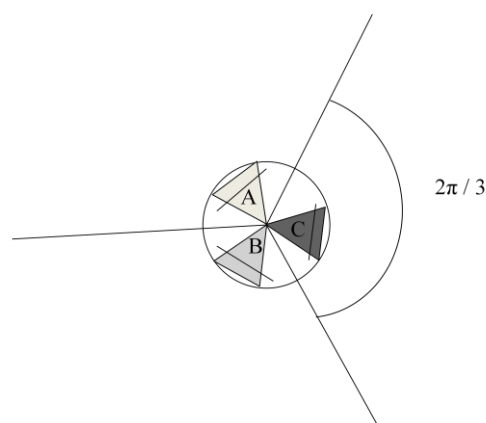


図 5.6 F-3 指向性固定アンテナシステムのノード

一方近年商用向けの汎用モジュール (Commercial Off-The-Shelf, COTS)、例えば WiFi モジュールなどが低コスト且つ高性能化しているため ([29])、ひとつのノードに複数の無線インタフェースを搭載することが可能となっている。

そのため本章では複雑な指向性 MAC プロトコルの設計を必要としないで、無線バックホールで指向性アンテナを適用するため、各ノードに複数の無線インタフェースと複数の指向性アンテナを搭載する、指向性固定アンテナシステム (FDA) の概念を提案する。

◆ 定義：指向性固定アンテナシステム (Fixed Directional Antennas, FDA)

F-n の指向性固定アンテナシステムにおいて、各ノードは n 個の無線インタフェースを持っており、各無線インタフェースは一つの指向性アンテナと接続している。各指向性アンテナは空間上均一に配置され、それぞれ  $1/n$  の空間をカバーしている。

本章を通して指向性アンテナのビーム幅は  $2\pi/n$  を超えないとする。FDA システムの一例として、図 5.6 に F-3 ノードを示す。この例で、該当ノードは 3 つの無線インタフェースと 3 つの指向性アンテナを搭載しており、各指向性アンテナは  $2\pi/3$  の空間をカバーしている。

FDA システムで、パケットの送受信は各ノード間の対応する無線インタフェース間で行われるため、システム运行时アンテナを切り替える必要がなくなる。

各ノードは一つの無線インタフェースから受信したパケットを、 $n$  個のインタフェースの一つから送信すればいい。FDA システムのこの特徴は無線バックホールにおける指向性アンテナの適用を大幅に簡単にしている。

文献[30]では Ad-Hoc ネットワークにおいて指向性固定アンテナを採用する可能性について理論的検討を行っている。文献[30]によれば、無線インタフェースを2つだけ搭載した F-2 システムでも、ネットワークの接続性は十分保たれていて、その性能は無指向性アンテナのシステムより優れている。

#### 5.4 FDA システムにおけるルーティング手法とパケット中継手法

FDA が適用された中継ノードは複数の無線インタフェースを搭載しているため、前章で説明したルーティング手法とパケット中継手法は複数インタフェースに対応できるように修正する必要がある。本節では FDA システムのためのルーティング手法とパケット中継手法を提案する。

##### 5.4.1 FDA システムのルーティング手法

FDA システムでルートを決める際には、各スレーブノードの中継先ノードを決定するだけでなく、二つのノード間の対応する無線インタフェースをペアとして一緒に決定しなければならない。

第3章では伝搬損をメトリックとする最少伝搬損ルーティングは干渉に強く高スループットを達成するなどの利点を有することを示した。そのため以下では従来の最小伝搬損ルーティングを基礎とし、FDA システムに適用できるように拡張する。

##### (1) ルーティング手法における変数

提案ルーティング手法では以下のような変数を使用する。

- $up_o$  : 各ノードの上り中継用の無線インタフェースである。
- $up_d$  : 各ノードの上り中継先ノードの、対応する無線インタフェースである。
- $M$  : ノードメトリックであり、各スレーブノードからコアノードまでの中継経路上の伝搬損の和である。システムが初期化される時、 $M$  は最大値（十分大きい実

数値であれば良い) に初期化される。

- ルーティングパケット：ブロードキャストパケットで、メトリックを含む。その値は各ノードがルーティングパケットをブロードキャストする際に、保持していたノードメトリックの値と等しい。

## (2) ルーティングの詳細

ルーティング処理は、コアノードがメトリック 0 のルーティングパケットを、 $n$  個の無線インタフェースを通して一つずつブロードキャストすることで開始される。

スレーブノードは自分の  $n$  個の無線インタフェースからルーティングパケットを受信したら、パケットに含まれているメトリックと受信時の伝搬損の和を計算し、新しいメトリックを計算する。その新しいメトリックが自分の保持していたメトリック  $M$  より小さければ、スレーブノードは上り中継先アドレス  $up\_d$  を、該当ルーティングパケットを送信したノードの対応する無線インタフェースにし、上り中継用アドレス  $up\_o$  を自分の無線インタフェースの中で、該当ルーティングパケットを受信したインタフェースのアドレスに更新する。そしてスレーブノードは新しいメトリックを含んだメトリックをすべての  $n$  個のインタフェースからブロードキャストする。

上記の説明から、提案ルーティング手法は第 3 章で説明した Bellman-Ford (或いは Dijkstra) アルゴリズムに基づいて、ルーティングパケットのフラッディングにより中継経路を構築する手法であることが分かる。そのため提案ルーティング手法により、図 5.7 に示すようなツリー構造の無線バックホールが構築される。図 5.7 に示すように、隣接ノード間の対応する無線インタフェースのペアがパス情報として決定されているのが分かる。

提案ルーティング手法では各ノードの上り中継情報だけを決定し、下り中継情報は決定していない。本論文で対象としている無線バックホールでは、トラフィックは有線網側のサーバと無線バックホールのノードに接続された端末の間で発生していると想定している。そのためパケット伝送は何時も端末から始まることになる。そこで下り中継情報は上り中継パケットのアドレス情報を参照することにより決定でき、ルーティング時には決定しなくていい。

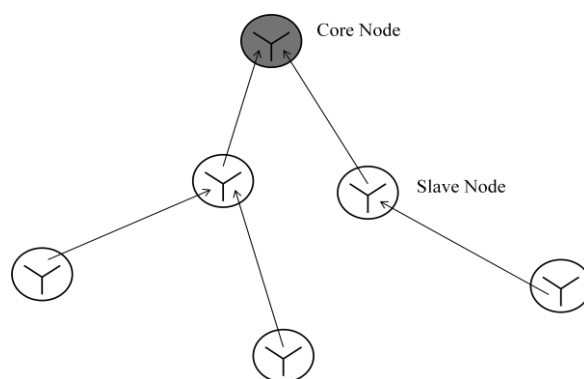


図 5.7 ツリー構造の無線バックホール

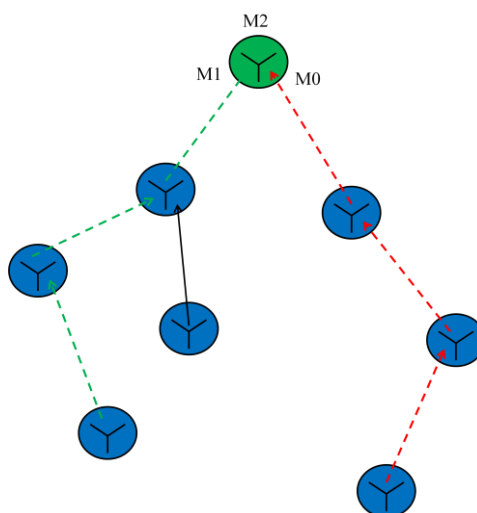


図 5.8 コアノードのインタフェース毎に IPT を適用

#### 5.4.2 FDA システムの packets 中継

前節のルーティング手法により FDA システムの中継経路が確定されると、パケット中継を行うことができる。FDA におけるパケット中継は、コアノードの無線モジュール毎に分類できる。例えば図 5.8 に示した F-3 のシステムでは、コアノードのモジュール M0、M1、M2 毎に経路トラフィックを分類できる。FDA システムでは中継経路が確定されるとパケットの中継時各ノードのモジュールおよびアンテナを切り替える必要がない。そのためコアノードの無線モジュール毎に独立的に IPT を適用することができる。更にコアノードが下り方向のパケットを中継する際に、無線モジュールを切り替える時は一定の間隔を持つ（本章ではパス間送信周期と呼ぶ）ことにする。

#### 5.4.2.1 IPT の適用による指向性問題の回避

本節では FDA システムにおいて IPT（そして前節で説明したパス間 IPT）の適用により指向性アンテナの使用に起因する指向性問題が回避できることを説明する。

第 5.2 節で説明したように、無線バックホールにおける指向性問題は、パケットを中継するノード間でアンテナの同期が行われていないため、隠れ端末問題により発生している。但し FDA システムにおいて、中継経路が確定した後パケット中継時にはアンテナの切り替えが必要なくなるため、アンテナの同期を取る必要がなくなる。そのため中継パス上の隠れ端末問題は IPT を適用することにより回避できる。

次にパケット中継効率の劣化を引き起こすのは異なる中継パス間で発生する、パス間干渉である。一方パス間の干渉を引き起こすトラフィックは、コアノードの異なる無線モジュールから発せられるため、その二つのモジュール間での切り替え間隔、即ちパス間送信周期を適切に設定すれば、対応するトラフィックが互いに干渉しないように離すことができる。即ちパス間 IPT 送信周期の設定により、パス間干渉が回避できる。

#### 5.4.3 FDA システムにおける送信周期自動設定法

本節では FDA システムにおける送信周期自動設定法について提案する。第 4 章ではトレーニングに基づいた送信周期自動設定法について提案し、評価を行った。本章の FDA システムにおいてコアノードの無線モジュール毎に、送信周期は前章の手法をそのまま適用できる。そのため以下では当手法を拡張し、前節におけるパス間送信周期を自動的に設定する手法を提案する。

提案手法は、FDA システムにおいてコアノードの任意の二つの無線モジュールから始まる中継パス上のスレーブノードのペアに対し、同じ手順で行われる。以下その二つのノードを  $S1$  と  $S2$ 、それぞれコアノードの無線インタフェース  $M1$  と  $M2$  から始まるパス  $Path1$  と  $Path2$  上にあるとする。なお  $S1$  と  $S2$  の間のパス間送信周期を  $D_i$  とし、コアノードはパケット中継途中  $M1$  から  $M2$  へ切り替えるとする。更に  $Path1$  と  $Path2$  上の送信周期はすでに決定されていて、それぞ

れ  $D1$ 、 $D2$  とする。

パス間送信周期  $D_i$  は  $S1$  と  $S2$  の間トラフィックが互いに干渉しないように十分大きくしなければならないが、スループット向上のためにはなるべく小さく設定しなければならない。最適なパス間送信周期はそのスレッシュホールドである。

提案手法では次のような変数とパラメータを定義する。

- (1) トレーニングパケット
- (2) トレーニングパケットの数:  $N$
- (3) トレーニング時間:  $T$
- (4) トレーニングメトリック:  $TM(\text{for } D_i)$ ,  $TM1(\text{for } S1)$ ,  $TM2(\text{for } S2)$ .
- (5) トレーニングステップ:  $\Delta$

次に提案手法はスレーブノード  $S1$  と  $S2$  に対し、以下の処理を繰り返す。

**Step1:** コアノードは  $TM1$ ,  $TM2$  を  $-1.0$  と初期化し、 $D_i$  を  $D_{i0}$  で初期化する。 $D_{i0}$  は必要に応じて十分小さい正の値であればいい。

**Step2:** コアノードは  $N$  個のトレーニングパケットを、シーケンス番号  $1, 2, \dots, N$  と送信周期  $D1$  を持って  $S1$  に送信し、 $D_i$  間隔待つ。その後コアノードは  $N$  個のトレーニングパケットを、シーケンス番号  $1, 2, \dots, N$  と送信周期  $D2$  を持って  $S2$  に送信する。

**Step3:** スレーブノード  $S1$  と  $S2$  はトレーニングパケットを受信したら、受信パケットをシーケンス番号と受信時刻を記録する。

**Step4:** スレーブノード  $S1$  と  $S2$  はトレーニングパケットの受信が終わると、最初に受信したトレーニングパケットのシーケンス番号と受信時刻  $(Seq1, T1)_{S1}$ ,  $(Seq1, T1)_{S2}$ 、そして最後に受信したトレーニングパケットのシーケンス番号と受信時刻  $(Seq2, T2)_{S1}$ ,  $(Seq2, T2)_{S2}$  をコアノードにレポートパケットとして送信する。なお両ノードで重複無しに受信したトレーニングパケットの数、 $Num1$  と  $Num2$  も一緒に送信する。

**Step5:** コアノードはスレーブノード S(S1 或いは S2) からレポートパケットを受信したら、下記の式(5-1)により実際のトレーニング時間を推定する。

$$\begin{aligned}\sigma &\stackrel{\text{def}}{=} (T_2 - T_1) / (Seq2 - Seq1) \\ T_{start} &= T_1 - \delta * (Seq1 - 1) \\ T_{end} &= T_2 + \delta * (N - Seq2) \\ T &= T_{end} - T_{start}\end{aligned}\tag{5-1}$$

その後、 $S_i(i = 1, 2)$ の新しいメトリックを $TM_i = \frac{Num}{T}$  ( $i = 1, 2$ ), として計算し、最終的に新しいメトリックを  $New\_TM = TM1 + TM2$  として計算する。そして処理は次のように分岐する。

- a)  $New\_TM \leq TM$ の場合、コアノードは S1 と S2 のためのトレーニングを終了し、対応するパス間の送信周期を $(Di - \Delta)$ に設定する。
- b)  $New\_TM > TM$ の場合、コアノードはパス間送信周期  $Di$  を $\Delta$ 増やし、メトリック  $TM$ を $New\_TM$ に更新し、**Step2~Step5**を繰り返す。

上記の処理で実際のトレーニング時間  $T$  を推定する理由は、第 4.2.3 節での説明と一緒である。なおトレーニングメトリックが最大になるようにパス間送信周期を設定することにより、スレーブノード S1 と S2 のエンド・ツー・エンドスループットの和が最大にできることは明らかである。

## 5.5 実験による評価

本章ではこれまで提案した FDA システムとルーティング手法、パケット中継手法について実験により評価を行う。

### 5.4.1 テストベッドと測定ツール

本章の実験では二種類のテストベッド、PicoMesh LunchBox (LB) と PicoMesh SHELL (SHELL) を使用する。LB については前章で説明した通りで、SHELL は MIMO-MESH プロジェクトの成果物である。

SHELL は 9 つの無線インタフェース (WiFi モジュール) を搭載しており、そのうち 1 つはアクセス回線用、残り 8 つは中継回線用に使用できる。図 5.5 に

示すように、SHELL は 6 枚の正六角形的に配置された PCB ボードに囲まれ、各 PCB ボードには 8 枚ずつの指向性アンテナが均一に搭載されている。なお SHELL は 4 枚の RF スイッチを搭載しており、各中継用の無線モジュールと指向性アンテナを接続している。RF スイッチを適切に設定することにより、SHELL は F-2 或いは F-3 の FDA システムノードに設定できる。本章では SHELL を F-2 システムに設定し、スループット測定には iPerf を使用する。

#### 5.4.2 実験シナリオ

図 5.10 に示すように、本章では九州大学 W2 号館 8 階でコアノード 1 つとスレーブノード 6 つの無線バックホールを構築する。このノード配置のシステムに対し、無指向性アンテナを搭載した LB と指向性アンテナを搭載して SHELL の場合に分けて、また IPT を適用と不適用時に分けて性能評価を行う。

最初に各ノードに SHELL を配置し、5.3 節で提案したルーティング手法によりシステムのルート構築する。その後各スレーブノードのエンド・ツー・エンドスループットを、適切な IPT 送信周期を持って測定する。更に各スレーブノードのエンド・ツー・エンドスループットを、IPT を適用しないで測定する。

次に各ノードの SHELL を LB に入れ替え、システムのルートを SHELL と同じように設定する（マニュアル設定）。そして前章で提案した送信周期自動設定法により各ノードの IPT 送信周期を計算する。その後該当 IPT 送信周期を持って、各スレーブノードのエンド・ツー・エンドスループットを測定する。

#### 5.4.3 実験結果

図 5.11 に提案手法により構築されたルートを示す。図示するように隣接ノード間で、互いにアンテナを向いているモジュールのペアがパスとして選択されている。これは最小伝搬損ルーティングにより、信号の品質が最良のパスが選択されるからである。

図 5.12 に、SHELL を配置した時の F-2 システムのスループット特性、F-2 システムにおいて IPT を適用していない場合のスループット特性、IPT を適用した場合の無指向性アンテナの LB のスループット特性を示す。



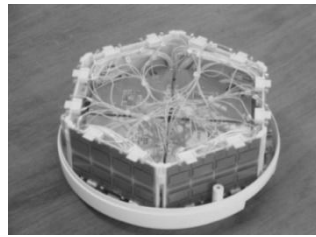


図 5.9 PicoMesh SHELL の写真

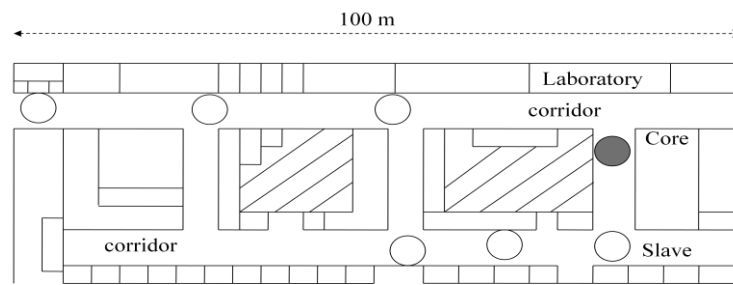


図 5.10 実験シナリオのノード配置：九州大学 W2 号館 8 階

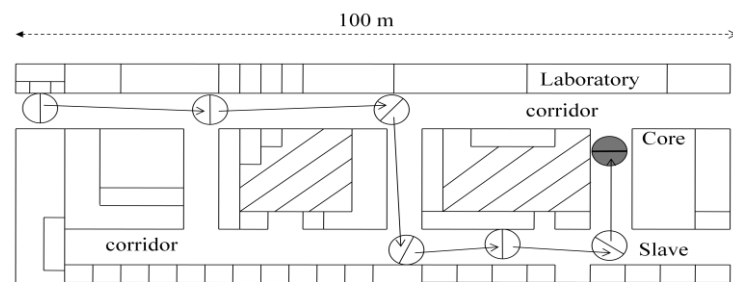


図 5.11 提案手法により構築されたルート

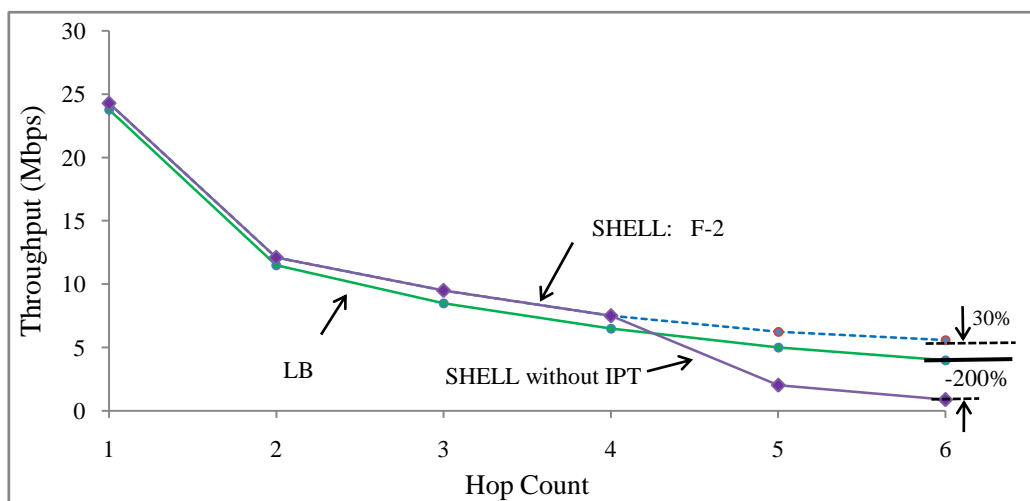


図 5.12 SHELL と LB のスループット特性

実験結果、LB に対し前章の送信周期自動設定法により計算された IPT 送信周期はすべて 0 であった。これは図 5.10 のシステムにおいて、無指向性アンテナの LB を採用した場合、すべてのスレーブノードがコアノードの CSMA 範囲内にあり、周波数リユースが実現できないことを示す。

一方 SHELL による指向性アンテナの F-2 システムの場合は、ノード 3, 4, 5, 6 に対し、無指向性アンテナの LB に比べ、30% ぐらいのスループット改善が達成できたのが分かる。即ち FDA システムにより指向性アンテナの採用したことで、周波数リユースが実現されている。

F-2 システムの SHELL に対し、IPT を適用してない場合、ノード 5, 6 においてスループットが LB に比べ 200% ぐらい劣化しているのが分かる。即ち、IPT を適用しないと、指向性問題が発生しているため、スループットが悪くなるのである。

## 5.6 本章のまとめ

本章では指向性アンテナを無線バックホールに適用することにより、無線バックホールの更なる性能強化を行った。無線バックホールにおける指向性アンテナの使用において、従来は複雑な MAC プロトコルを提案しているため、システムの構築コストが高い。

それに対し本章では各ノードに複数の無線インタフェースと指向性アンテナを搭載する FDA システムを提案した。FDA システムではパケット中継の際にアンテナの切り替えを行わないため、システムがシンプルに設計でき、ネットワーク構築のコストが削減できる。本章では更に FDA システムのために新しいルーティング手法とパケット中継手法を提案した。そして FDA システムで IPT を適用することにより、指向性アンテナの使用に起因する隠れ端末などの問題が回避できることを説明した。

提案手法を実機テストベッドに実装し、評価を行った。その結果 FDA と IPT を併用することにより、無指向性アンテナの場合に比べ 30% ぐらいのスループット改善が得られることが確認できた。一方 IPT を適用しない場合、指向性問題の発生によりスループットが劣化することも確認された。

## 第6章 結論

次世代ブロードバンド無線通信システムを実現するためには、基地局敷設コストを削減することが必須であり、無線バックホールはその実現の鍵とされている。無線バックホールの性能は、多段無線中継を如何に有効に行うかにより決定される。周期的間欠送信法、即ち IPT は無線バックホールにおいて高効率パケット中継を達成するための核となる技術として提案されている。本論文では IPT によりもたらされる多段無線中継の性能を更に向上させるため、中継経路の安定性改善と最適送信周期の自動設定法、そして指向性アンテナの適用手法について検討を行った。以下では各章で検討した課題とその結果についてまとめる。

第 3 章では無線バックホールにおける安定ルーティング手法について検討した。無線バックホールにおいて各基地局は固定設置されているものの、伝搬路は人の動きなどにより時間変動する。但し無線バックホールにおける従来のルーティング手法では、伝搬路の時間変動を考慮していなかったため、ルーティング実行時刻に特化したルートを構築し、その後のシステムの性能を保障することはできなかった。そのため本章では、伝搬路の時間変動を考慮し、一定間隔でシステムの中継経路の更新を行い、その際ノード間の伝搬損を過去の履歴を加味した逐次平均で表すことで、漸近的に安定した中継経路へと収束させる、新しいルーティング手法を提案した。提案手法を実機へ実装し、実験により性能確認を行った。その結果伝搬路が時間変動する環境下で、何時でも安定した中継経路を構築できることが確認できた。また提案手法によるシステムのスループットの改善に対して評価を行った。その結果提案手法を実装しなかった場合に比べ、最大で約 160%のスループット改善が確認できた。

第 4 章では無線バックホールにおける送信周期自動設定法について検討した。IPT は無線バックホールの性能改善を達成する核となる技術であり、IPT 送信周

期は IPT を応用する際に最も重要なパラメータである。但し IPT 送信周期は無線バックホールの設置環境に依存しているため、適切に設定することは容易ではない。そのため本章ではあらゆる環境でも IPT 送信周期を適切に設定できる、IPT 送信周期自動設定法を提案した。提案手法ではコアノードが各スレーブノードに対しトレーニングパケットを送信することにより、コアノードから各スレーブノードまでのエンド・ツー・エンドのスループットが最大になる IPT 送信周期を設定する。本手法はシステムレベルで実装が可能であるため、汎用モジュールを採用した基地局に容易に適用できる。提案手法はシミュレーションと実機テストベッドにより評価され、その結果全てのシミュレーションと実験で、提案手法によって獲得された IPT 送信周期は常にマニュアル的に測定した最適な送信周期、即ちスループットが最大になる送信周期と一緒にすることが確認できた。

第 5 章では指向性アンテナにより電波干渉を物理的に抑制した状態での、IPT の実現について検討した。指向性アンテナは送信電力を一定方向に集中することにより、通信速度の向上及び他ノードへの干渉軽減などが実現できる。一方指向性アンテナは隠れ端末問題の顕著など新しい指向性問題も引き起こす。無線バックホールで指向性アンテナを採用することにより性能改善を達成するために、既に数多くの手法が提案されている。但しその殆どは新しい指向性 MAC プロトコルを提案することにより指向性問題の解決を図っていて、汎用無線モジュールでの適用は難しい。そのため本章では各ノードに複数の無線インタフェースを搭載し、インタフェース毎に固定的な指向性を持ったアンテナを接続することにより、アンテナの切り替え処理遅延の影響を軽減できる手法 (FDA: Fixed Directional Antenna) を提案した。そして FDA が適用された無線中継ノードに適したルーティング手法を提案し、これと IPT を併用することによって高い中継伝送効率を達成した。提案手法を実機テストベッドにより評価し、無指向性アンテナを適用した場合に比べて約 30% の性能改善が確認できた。

本論文では以上のように 3 つの視点から無線バックホールの性能改善を図ってきたが、まだ残された問題もあり、将来の研究課題とする。第 3 章では(3-1)式により逐次平均を計算しているが、ルートの収束を早めるためには(3-1)式に

対する更に詳しい検討が必要である。第4章では実フィールドでの評価実験を、ストリングトポロジーの無線バックホールで行っているが、もっと大規模な無線バックホールでの実験評価が必要である。第5章のFDAシステムにおいては、実験条件（例えばテストベッドの数など）の制限により2系統の無線モジュールだけで評価を行っているが、今後3系統以上での実験によりFDAシステムの性能を更に詳しく評価することが必要である。一方IPTと指向性アンテナを併合利用するためにFDAシステムを提案しているが、無線バックホールの性能を更に向上するためには、汎用無線モジュールに限定せず、指向性アンテナとIPTを効率よく併用する新しい専用無線モジュールの仕様に関する検討が必要である。新しい専用モジュールに関する仕様は、今後全てのルーティングと中継の機能を一つのチップに集積した専用SOC(System on Chip)の開発に繋がり、無線バックホールの性能とコストを更に改善できると予測できる。

スマートフォンなどのモバイル端末からのトラフィックの急増により、無線通信のブロードバンド化、大容量化への要求は一層高まってきている。本論文の成果は無線バックホールの多段無線中継時の性能を向上させるものであり、無線バックホールの構築を容易にするものである。これによってスモールセルの導入が促進され、大容量無線通信網の実現を容易なものとする。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導を頂いた、九州大学大学院システム情報科学研究所の古川浩教授に心から感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導を頂いた九州大学 情報基盤研究開発センターの岡村 耕二教授に感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導を頂いた九州大学 大学院システム情報科学研究所の堀 良彰准教授に感謝いたします。

通信理論の基礎や伝搬路特性などについて数多くの議論をした、九州大学大学院システム情報科学研究所の牟田修准教授に感謝いたします。

計算機シミュレーションだけでなく、実機を使った検討の機会を下さったMIMO-MESHプロジェクトの皆様に感謝いたします。

本研究は文部科学省及び福岡 IST の支援により行われましたので、深く感謝いたします。

最後に本研究を進めるに当たり、私を支えてくれた家族に心から感謝します。

## 参考文献

- [1] R. Nelson and L. Kleinrock, "Spatial TDMA: A Collision Free Multihop Channel Access Protocol", IEEE Trans. Comm., Vol. 33, No.9, pp. 934-944, September 1985.
- [2] S. Keshav. "A Control-Theoretic Approach to Flow Control", SIGCOMM, September 1991.
- [3] C. P. P. Bhagwat. "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", ACM SIGCO-MM'94, pp.234-244, Sept. 1994.
- [4] J. B. Andersen, T. S. Rappaport, S. Yoshida, "Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels", IEEE Communications Magazine, pp. 42-49, January 1995.
- [5] D.B. Johnson and D.A. Maltz. "Dynamic Source Routing in Ad-hoc Wireless Networks", Mobile Computing, T. Imielinski and H.Korth, Eds., Kluwer, pp.153-81, 1996.
- [6] A. Nasipuri, S. Ye, J. You, R. Hiromoto. "A MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Using Directional Antennas", IEEE (WCNC), pp1214-1219, September 2000.
- [7] Y. Yamao, H. Suda, N. Umeda, and N. Nakajima, "Radio Access Network Design Concept for the Fourth Generation Mobile Communication System", Proc. VTC'00-Spring, pp.2285-2289, 2000.
- [8] K. Ebata, H. Furukawa, "A Study on Number of Directional Antennas and Required Bandwidth for Wireless Base Node Repeater Network", Tech. Rep. of IEICE, July 2001.
- [9] J. Li, C. Blake, D. S. J. De Couto, H. I. Lee and R. Morris, "Capacity of Ad Hoc Wireless Network", in Proc. ACM MobiCom 2001, July 2001.
- [10] S. Bansal, R. Shorey, A. Misra, "Energy efficiency and throughput for TCP traffic in multi-hop wireless networks", Proc INFOCOM2002, 23-27, pp. 210-219, 2002.
- [11] 徐, 山本, 吉田, "マルチホップ接続による無線LANスループット向上の実験的検討", 信学会ソ大, B-5-117, 2003年9月.
- [12] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)", IETF RFC 3626, October 2003.
- [13] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. "Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing", Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 3561, July 2003.

- [14] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris. "A High Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing", ACM MOBICOM, September 2003.
- [15] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", IETF RFC 3684, February 2004.
- [16] R. Pabst et al, "Relay Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio", Proc. IEEE Com. Mag, pp.80-89, September 2004.
- [17] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill. "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks", In ACM Mobicom, Philadelphia, PA, September 2004.
- [18] A. Adya, P. Bahl, J. Padhye, A. Wolman, L. Zhou. "A Multi-Radio Unification Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks", International Conferences on Broadband Networks (BroadNets), 2004.
- [19] R. Draves, J. Padhye, B. Zill, "Comparisons of Routing Metrics for Static Multi-Hop Wireless Networks", ACM Annual Conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM), pp.133-144, August 2004.
- [20] H. Furukawa, "Hop Count Independent Throughput Realization by a New Wireless Multihop Relay", Proc. VTC04, fall, September 2004.A.
- [21] H. Li, D. Yu and Y. Gao, "Spatial Synchronous TDMA in Multihop Radio Network", Proc. VTC'04 Spring, 8F-1, May 2004.
- [22] H. Zhai, J. Wang, Y. Fang, and D. Wu, "A Dual-channel MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", in Proc. IEEE Workshop on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, in conjunction with IEEE GlobeCom, pp.27-32, 2004.
- [23] Y. HIGA and H. Furukawa, "Time Interval Adjustment Protocol for the New Wireless multihop Relay with Intermittent Periodic Transmit", IEICE 2004, B-5-180, September 2004.
- [24] H. Furukawa, "Hop Count Independent Throughput Realization by A New Wireless Multihop Relay", Proc. VTC'04 fall, pp.2999-3003, September 2004.
- [25] D.B. Johnson, D.A. Maltz, and Y.C.Hu, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)", draft-ietf-manet-dsr-1-.txt, July 2004.
- [26] モバイル IT フォーラム第4世代モバイル部会システム専門委員会. モバイル IT フォーラム 4G モバイルシステム要求条件規定書 ver.1.1, 2005.10.
- [27] R. Ramanathan, J. Redi, C. Santivanez, D. Wiggins, S. Polit. "Ad hoc networking with directional



- antennas: A complete system solution”, IEEE Journal on Selected Areas in Com., vol.23, No.3, March 2005.
- [28] D. Han, J. W. Jwa, H. Kim, “A Dual-Channel MAC Protocol Using Directional Antennas in Location Aware Ad Hoc Networks”, proc. ICCSA 2006, LNCS 3983, pp. 594-602. 2006.
- [29] C.M. Cheng, P.H. Hsiao, H.T. Kung, D.Vlah “Adjacent Channel Interference in Dual-Radio 802.11a Nodes and Its Impact on Multihop Networking”, proc. IEEE Globecom06, pp1-6, San Francisco, November 27 - December 1, 2006.
- [30] K. K Yap, W.L. Yeow, M. Motani, C.K Tham, “Simple Directional Antennas: Improving Performance in Wireless Multihop Networks”, in proc INFOCOM 2006, pp1-12, April 2006.
- [31] K. Ramachandran, I. Sheriff, E. Belding, K. Almeroth, “Routing Stability in Static Wireless Mesh Networks”, Passive and Active Measurement Conference, Louvain-la-neuve, Belgium, April 2007.
- [32] J. Gronkvist, J. Nilsson and D. Yuan, “Throughput of Optimal Spatial Reuse TDMA for Wireless Ad-Hoc Networks”, Proc. VTC'04 Spring, 11F-3, May 2004.
- [33] Y. HIGA, H. Furukawa, “Experimental Evaluations of Wireless Multihop Networks Associated with Intermittent Periodic Transmit”, IEICE Trans. Comm., vol. E90-B, no.11, November 2007.
- [34] Y. Tohzaka, Y. Higa, H. Furukawa, “Evaluations of Wireless Multihop Network Incorporating Intermittent Periodic Transmit and Packet Forwarding Path Reservation”, VTC2007-Spring, pp212-216, 22-25 April 2007.
- [35] G. Jakllari, W. Luo, S.V. Krishnamurthy, “An Integrated Neighbor Discovery and MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Directional Antennas”, IEEE Trans. On Wireless Com. Vol.6, no.3, March 2007.
- [36] K. Mitsunaga, K. Maruta, Y. HIGA and H. Furukawa, "Application of directional antenna to wireless multihop network enabled by IPT forwarding", proc. ICSCS, December 2008.
- [37] 西本, 木下, 比嘉, 小寺, 大崎, 古川, “ショートレンジ無線バックホールで形成された広域WiFiブロードバンド空間での車型リアルアバターの制御”, 信学技報 AN2008-59, pp 41-46, December 2008.
- [38] E. M. Mohamed, D. Kinoshita, K. Mitsunaga, Y. HIGA and H. Furukawa, “An Efficient Wireless Backhaul Utilizing MIMO Transmission and IPT Forwarding”, International Journal of Computer Networks, IJCN, vol. 2, No. 1, pp.34-46, March 2010.

- 
- [39] G. Jin, H. Furukawa, "A Stable Routing Protocol for Wireless Backhaul", IEICE Trans. on Comm. vol.J94-B No.4 pp.615-628, April, 2011
- [40] Z. Li, Q. Li and H. Furukawa, "Tradition Mesh Network and Statistical Mesh Network Large-Scale Multicell WLAN Enabled by Short Range Multihop Wireless Backhaul", IEEE VTS APWCS2011, Singapore, August 2011.
- [41] IEEE Computer Society LAN MAN Standard Committee, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", IEEE Std. 802.11, 1997.
- [42] B.P. Lathi, "Modern Digital and Analog Communication system".
- [43] <http://www.noc.ucf.edu/Tools/Iperf/>