

OFDM 協調通信を用いるマルチホップマルチキャスト方式

内藤 克浩^{†1,a)} 森 香津夫^{†1} 小林 英雄^{†1}

概要: 本研究では, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) ではガードインターバル長内の複数の同一 OFDM 信号を復調可能な特性に着目し, 無線マルチホップネットワーク向けの新たな協調マルチキャスト通信方式の提案を行う. 提案方式では, 複数の転送グループ端末が同一の OFDM 信号を同時に送信する. そのため, 下流端末は複数の同一 OFDM 信号を異なる上流端末から受信することが可能であり, 経路ダイバシティ効果によるパケット配信率の改善が可能となる. 数値例では, 提案方式は既存の Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) 方式と比較してパケット配信率を改善でき, エンド端末間の配送遅延も削減可能な事を示す.

キーワード: マルチホップネットワーク, マルチキャスト, 協調通信, OFDM

Multi-hop multicasting mechanisms with OFDM cooperative communication

KATSUHIRO NAITO^{†1,a)} KAZUO MORI^{†1} HIDEO KOBAYASHI^{†1}

Abstract: In this paper, we focus on the features of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), where receivers can demodulate some same OFDM signals within Guard Interval (GI) period, and propose a new cooperative multicast communication scheme for wireless multi-hop networks. In the proposed scheme, some Forwarding Group (FG) nodes transmit a same OFDM signal simultaneously. Therefore, downstream receivers can receive some same OFDM signals from different upstream transmitters, and improve the packet delivery ratio by route diversity effect. From the numerical results, we can find that our proposed scheme can improve the packet delivery ratio and can reduce end-to-end delivery delay comparing to the conventional Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) scheme.

Keywords: Multi-hop networks, multicast, cooperative communication, OFDM

1. はじめに

マルチホップ通信ネットワークは, 各端末がパケット中継を行う事により, 広域の自律通信ネットワークを実現するものである. このネットワークを実現するためには, 自律分散によるアクセス制御技術, 経路制御技術が不可欠であり, 多数の研究が行われている [1]. 通信形態としては, エンド端末間の通信を実現するユニキャスト通信, 全ての端末への通信を実現するブロードキャスト通信, 複数の特定端末への通信を実現するマルチキャスト通信について主

に研究が行われている [2].

上記の通信形態を実現するためには経路制御プロトコルが必要であり, ユニキャスト通信向けの Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV)[3], Optimized Link State Routing protocol (OLSR)[4] などが既に提案されている. また, 効率的なブロードキャスト通信方法として, フラッディング機構を改良する方式も提案されている. そして, マルチキャスト通信向けとしては, Multicast Ad hoc On-demand Distance Vector (MAODV)[5], On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)[6] などが提案されている.

一方, 上記研究を通して, マルチホップネットワークでは, 多数の端末が同時に無線通信を行う事による干渉の影響が大きい事が判明している. そこで, 近年マルチホップ

^{†1} 現在, 三重大学大学院工学研究科
Presently with Graduate School of Engineering, Mie University

a) naito@elec.mie-u.ac.jp

通信の性能改善を目的として、干渉を抑制可能な方式についての議論が行われている [7], [8]. 指向性アンテナ又はスマートアンテナなどを利用する方式では、不必要な方向の信号を送受信しない方式が提案されており、大きな効果を上げている [9]. 一方、送受信端末間の指向性制御で複雑な処理が必要となる。複数のインターフェースを利用する方式では、異なる無線チャネルを利用することで、干渉を削減することができ、複数の無線チャネルを前提としたアクセス制御技術、経路制御技術などが提案されている [10], [11]. これらの研究の多くは、近隣の無線端末が同一チャネル上で同時に信号を送信することを防ぐものである。

マルチホップ通信を実現するための無線通信方式として、IEEE 802.11 は有力な候補である。また、IEEE 802.11g 及び IEEE 802.11a などの近年のデバイスは Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) を変調方式として採用している [12]. OFDM はマルチパス耐性が非常に強く、Guard Interval (GI) 長内の遅延波が受信された場合にも、シンボル間干渉なしに高精度の復調が可能な事が知られている [13]. この特性は、地上波デジタル放送の Single Frequency Network (SFN) などでも活用されている。著者らは、本特性をマルチホップ通信技術に適用した協調通信方式を研究しており、フラッディング時に利用することで、高いパケット配送率と低遅延を実現可能である事を明らかにした [14], [15].

本稿では、上記の協調通信方式を新たにマルチキャスト通信に適用することを目指す。提案方式では、既存のマルチキャスト経路制御プロトコルを利用することで、送信元端末から宛先端末への配送経路を構築する。また、送信元端末からのホップ数が同一の端末は、同時に同一 OFDM 信号を送信することにより、構築したマルチキャスト配送木に基づいた協調通信を実現する。シミュレーション結果より、提案方式と Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) を比較し、高いパケット配送率と低遅延配送が実現可能であることを示す。

2. ODMRP

本研究で提案する協調通信方式を利用可能な条件は、同一 OFDM 信号をほぼ同時に送信可能な端末が複数存在することである。マルチキャスト経路制御プロトコルでは、送信元端末から宛先端末までの配送木を構築するため、配送木上には、多数の転送端末が存在する。そのため、提案する協調通信方式は、多くのマルチキャスト経路制御プロトコルと共に利用することが可能である。本研究では、マルチホップ通信向けのマルチキャスト経路制御プロトコルである ODMRP と共用するため、ODMRP の基本動作について説明する。

2.1 マルチキャスト参加ノードの探索

ODMRP では、送信元端末毎に経路の構築と維持が行われる。具体的には、送信元端末は、送信元端末自身のアド

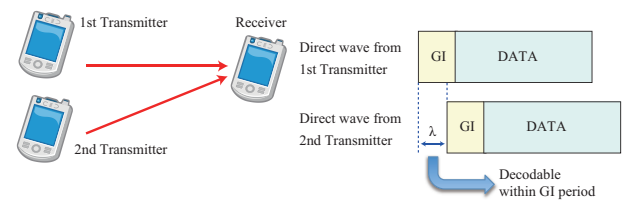


図 1 Concept of cooperative communication in OFDM.

レスが付加された参加要求パケット (JQ : Join Query) を定期的にブロードキャスト送信する。近隣端末が参加要求パケットを受信した場合、送信元端末のアドレスと、受信した参加要求パケットを送信した端末のアドレス (次端末アドレス) を自身の経路テーブルに保存する。次に、送信元端末と自身のアドレスが付加された参加要求パケットを作成し、隣接端末に向けて再ブロードキャスト送信する。以上の動作により、参加要求パケットは、周囲の端末を経由してネットワーク全体にフラッディングされる。なお、近隣端末が重複した参加要求パケットを受信した場合、及び、参加要求パケットの Time To Live (TTL) が 0 となった場合には、参加要求パケットは破棄される。

2.2 マルチキャスト経路の構築

マルチキャスト参加端末が、参加要求パケットを受信した場合、送信元端末のアドレスと受信した参加要求パケットを送信した端末のアドレス (次端末アドレス) を付加した参加応答パケット (JR : Join Reply) を作成し、隣接端末に向けてブロードキャスト送信する。参加応答パケットを受信した隣接端末は、参加応答パケット内の次端末アドレスが自身の端末アドレスであるか確認する。次端末アドレスと自身の端末アドレスが一致した場合、自端末がマルチキャスト配送木上の端末であることを認識し、マルチキャストパケットの転送を行う転送グループ (FG: Forwarding Group) 端末となる。また、FG 端末となる場合には、経路テーブルに格納されている送信元端末アドレスと次端末アドレスを付加した参加応答パケットを作成し、近隣端末に向けてブロードキャストする。この動作は、参加応答パケットが送信元端末に到着するまで繰り返され、最終的には送信元端末から宛先端末へのマルチキャスト配送木が構築される。なお、送信元端末アドレスが同一の参加応答パケットを複数受信した場合には、重複した参加応答パケットは破棄される。また、送信元端末は定期的に参加要求パケットをフラッディングすることにより、FG 端末の状態を維持する。そして、FG 端末は一定時間以上マルチキャスト配送が行われない場合には、中継動作を停止する。

3. OFDM 協調通信

図 1 は著者らが検討している OFDM 協調通信方式を示しているものである。OFDM はマルチパスに対する耐性が高く、直接波に遅れて遅延波が到着した場合にも、直接波と遅延波の到着時間差 λ が、OFDM 信号後半の一部であ

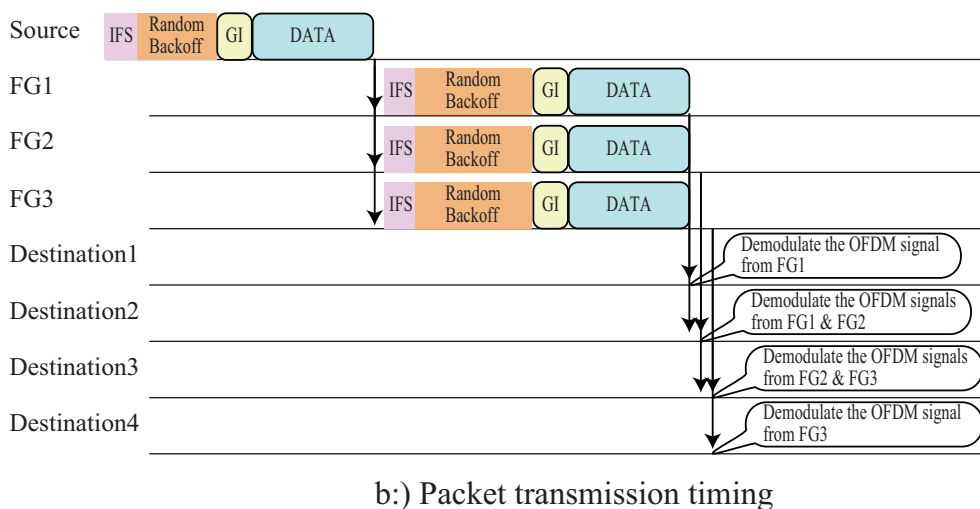
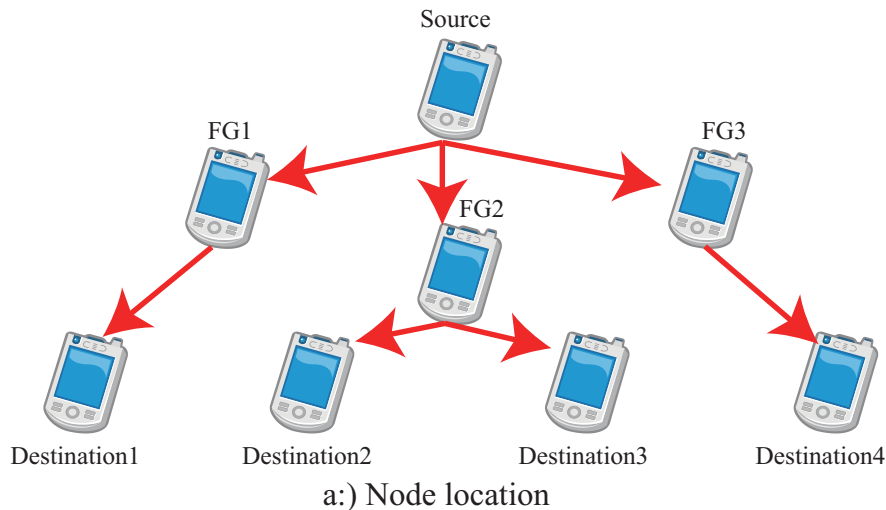


図 2 Example operations of proposed communication.

る GI 長内である場合、高精度の復調が可能である。そのため、IEEE 802.11 をはじめとして、多くの OFDM を採用するシステムでは、伝搬環境に応じた適切な GI 長を選択して、OFDM 信号に GI を付加した上で送信している。

提案する OFDM 協調通信方式では、送信端末間で同一 OFDM 信号の送信タイミングを同期することにより、受信端末での OFDM 信号の到着時間差を GI 長内におさめる。提案方式のメリットは、複数端末から同一 OFDM 信号を重畳送信することから新たな無線資源が必要なく、送信端末数が増加した場合にも、1 端末の送信とほぼ同じ無線資源で協調通信が実現可能な点である。さらに、多数の送信端末と受信端末間の伝送路状態は独立に変化しているため、複数送信端末を利用することにより、ダイバシチ効果も得る事が可能となる。

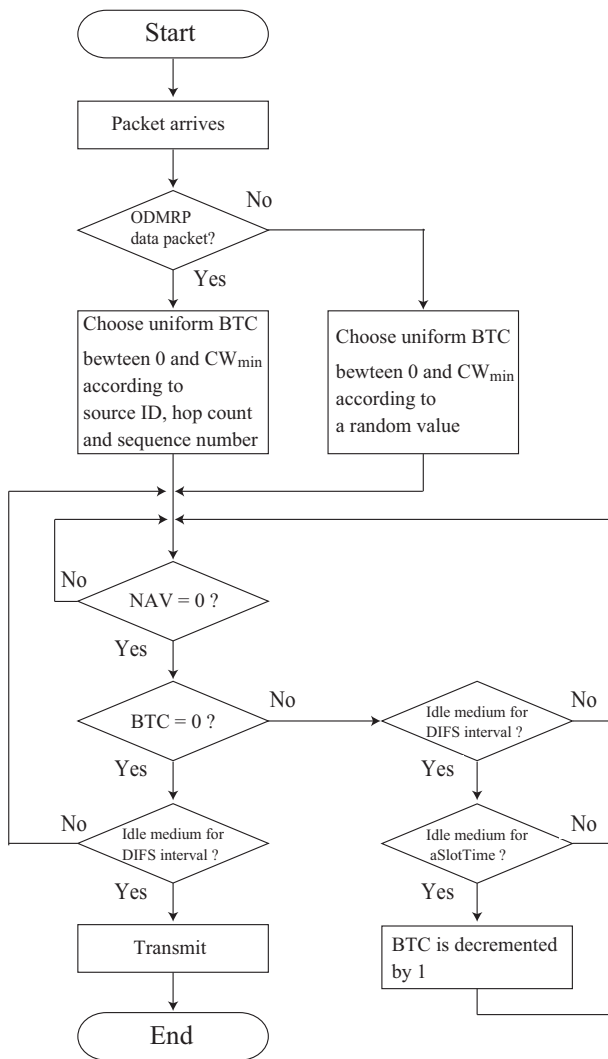
提案方式を実現するためには、送信端末間で送信タイミングの同期技術が必要不可欠である。特にマルチホップネットワークでは、制御の中心となるような基地局は存在しないため、自律分散処理の中で、同一 OFDM 信号を受信した端末の送信タイミングを同期する必要がある。マル

チキャスト通信を想定した送信タイミング制御方式については、次章で説明する。

4. OFDM 協調通信を用いるマルチホップマルチキャスト方式

図 2 に提案方式の動作を示す。図 2 a.) は端末配置例を示し、送信元端末から 3 台の FG 端末を経由して、4 台の宛先端末への転送経路を矢印で示す。本例では、ODMRP などのマルチキャスト経路制御プロトコルにより、これらの転送経路を構築する事を想定する。

通常の CSMA/CA を利用した場合、送信元端末から送信された信号は、ほぼ同時に 3 台の FG 端末に受信される。また、各端末は CSMA/CA の動作に基づいて、理想的には異なるタイミングで受信パケットの転送処理を行う。しかし、マルチホップ通信を利用したマルチキャスト配送では、FG 端末同士が隠れ端末であるにも関わらず、各 FG 端末の信号到達範囲に下流端末が存在する可能性がある。本例では、宛先端末 2 及び 3 は FG 端末 1, 2 及び FG 端末 2, 3 の信号到達範囲に存在しているため、FG 端末 1, 2 及



CW_{min} : Minimum value of Contention Window
BTC : Backoff Time Counter
NAV : Network Allocation Vector
DIFS : Distributed Inter Frame Space

図 3 Flowchart of proposed access control.

び FG 端末 2, 3 の送信タイミングが同一の場合、干渉によるパケット損失が発生する。このような現象は、FG 端末が比較的密に存在する送信元端末周辺で発生しやすく、パケット損失時は下流経路の全ての宛先端末がパケット受信に失敗するため影響が大きい。

提案方式では、各 FG 端末は送信元端末からのホップ数に基づいて、同期して同一 OFDM 信号の転送処理を行う。図 2 b:) は提案方式のパケット送信過程例であり、送信元端末が送信した OFDM 信号は FG 端末 1, 2, 3 により受信される。提案方式では、全ての端末は同一の乱数発生表を保持していることを想定しており、送信元端末アドレス、送信元端末からのホップ数、パケットシーケンス番号など、パケットを一意的に識別可能なパラメータから乱数を発生させることにより、各 FG 端末は自律分散的に同一の乱数

表 1 Simulation parameters.

Simulator	QualNet 5.01
Simulation time	300 [s]
Simulation trial	100 [times]
Number of nodes	100 [nodes]
Number of multicast members	10 - 99 [nodes]
Node position	Random
Simulation area	1250 x 1250 [m]
Transmission rate	256, 512 [kbps]
Packet size	1000 [Bytes]
Communication device	IEEE 802.11g
Transmission rates	54 [Mbps]
Transmission power	16 [dBm]
Channel frequency	2.4 [GHz]
Antenna gain	0 [dB]
Antenna type	Omni directional
Antenna height	1.5 [m]
Propagation path loss model	Free Space
Wireless environment	AWGN

を取得可能である。各 FG 端末は乱数に基づいたバックオフ値を採用することにより、ほぼ同時のタイミングで同一 OFDM 信号の転送を行う。本例では、宛先端末 1 は FG 端末 1 から、宛先端末 2 は FG 端末 1 及び 2 から、宛先端末 3 は FG 端末 2 及び 3 から、宛先端末 4 は FG 端末 3 から OFDM 信号を受信している。通常の CSMA/CA では、同一 OFDM 信号が GI 長内におさまる保証がないため、宛先端末 2 及び 3 は信号衝突によりパケット受信に失敗する可能性がある。一方、提案方式では、送信タイミングをほぼ同時にそろえているため、同一 OFDM 信号が GI 長内に到着する可能性が高く、信号衝突が発生しているにも関わらず、OFDM 信号を高精度に復調可能である。結果として、マルチキャスト配送におけるパケット配信率を改善可能と考える。さらに、提案方式では、各 FG 端末が異なるタイミングで OFDM 信号を送信するのではなく、同時に送信するため、パケット転送に伴う遅延も削減可能と考える。

図 3 は提案するアクセス制御方式のフローチャートである。提案方式では、以下の手順により、OFDM のデータパケットの送信タイミングをそろえる。

- パケットが到着した場合、パケット種別を確認し、ODMRP のデータパケット及びその他の一般パケットなのかを判定する。ODMRP のデータパケットの場合には、協調受信用のアクセス制御処理を行う。また、一般パケットの場合には、通常の CSMA/CA に準じたアクセス制御処理を行う。
- ODMRP のデータパケットの場合、送信元端末アドレス、送信元端末からのホップ数、パケットシーケンス番号など、パケットを一意的に識別可能なパラメータから乱数を発生させることで、0 から Minimum value of Contention Window (CW_{min}) 内の Backoff Time Counter (BTC) 値を取得する。結果として、各端末が同一データパケットを受信した場合、同一の BTC 値が

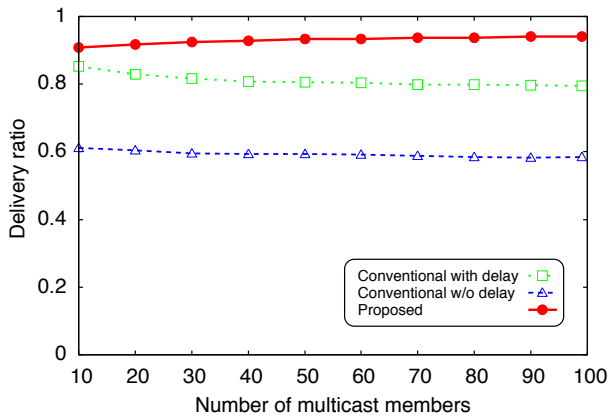


図 4 Packet delivery ratio (256kbps).

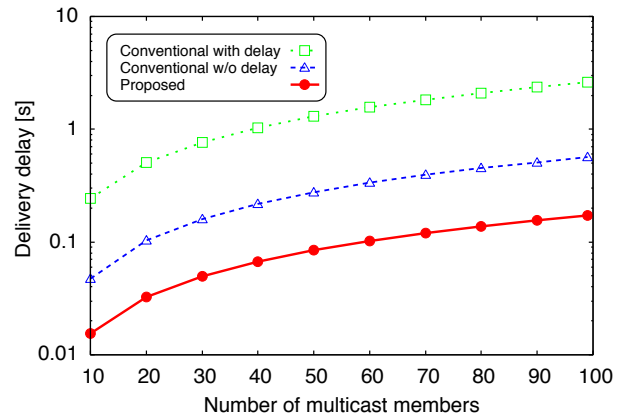


図 6 End-to-end delay (256kbps).

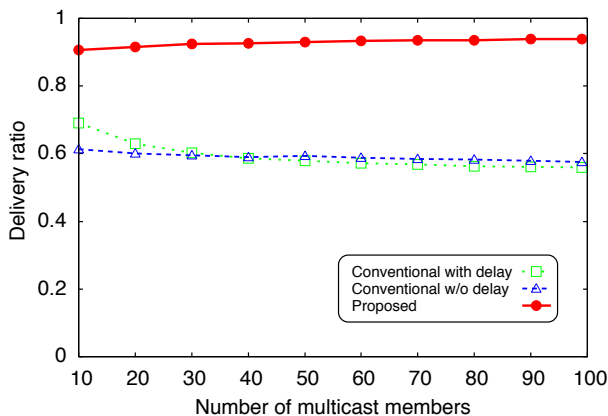


図 5 Packet delivery ratio (512kbps).

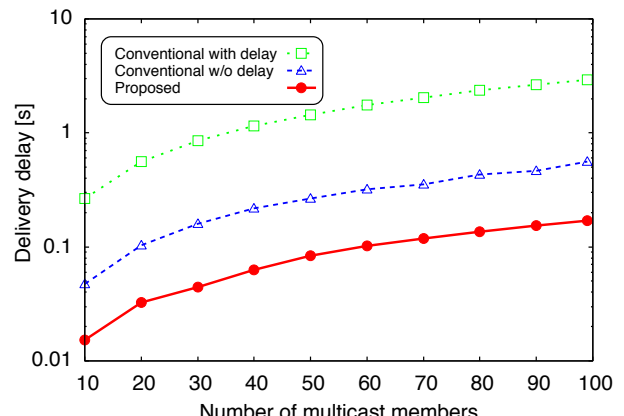


図 7 End-to-end delay (512kbps).

取得される。なお、一般パケットの場合は、CSMA/CAに基づき、各端末が0から CW_{min} 内の異なる BTC 値をランダムに取得する。

- Network Allocation Vector (NAV) 値が0の場合は、BTC 値が0であるか確認する。BTC 値が0ではない場合、CSMA/CA に準じた処理により、BTC 値の減算を行う。
- BTC 値が0となった場合、Distributed Inter Frame Space (DIFS) 時間チャネルがアイドルであることを確認した後、パケットの送信を行う。本処理の結果として、データパケットを受信した場合には、各端末の無線利用状況が同一であれば、同時に BTC 値は0となり、各端末は同時にデータパケットの送信を開始する。また、一般パケットは各端末で異なるタイミングで BTC 値が0となるため、異なるタイミングでパケット送信が行われる。

5. 数値例

提案方式の有効性を検証するため、ネットワークシミュレータである QualNet [16] 上に予め実装されている IEEE 802.11a の機能を拡張することにより、提案 OFDM 協調通信方式に基づいたパケット送受信処理を実装した。シミュレーションでは、100 台の端末を 1250m 四方の空間にラン

ダム配置し、1 台の送信元端末と 10~99 台までの宛先端末をランダムに選択した。また、トラヒックとして、256kbps と 512kbps の Constant Bit Rate (CBR) を想定した。比較対象としては、通常の CSMA/CA を利用した場合を想定し、ODMRP 内のデータパケット転送時にランダム遅延を付加した場合と、付加しない場合を想定した。これは、Qualnet4.0 以前の実装では、ランダム遅延が付加されていないが、Qualnet4.5 以降の実装では、FG 端末間の信号衝突を防ぐために、ランダム遅延が付加されているためである。表 1 にシミュレーションでのパラメータ詳細を示す。

図 4 及び図 5 に各トラヒックでのパケット配信率を示す。結果より、CSMA/CA に遅延を付加しない場合が最も特性が悪く、提案方式が最も高い配信率を示している事が確認できる。遅延を付加しない場合の既存特性が最も悪い理由は、遅延を付加しない場合、隠れ端末が存在した場合には必ず信号衝突が発生するためと考えられる。また、マルチキャスト配送では、送信元端末に近い上流部ほど FG 端末が密に存在する可能性があり、上流部での信号衝突が全ての下流端末での受信失敗に繋がるためと思われる。次に、遅延を付加した既存方式では、特にトラヒックが低い場合に大きな改善が見られる。これは、FG 端末の転送タイミングを意識的に分散させることにより、信号衝突が抑制されたためと考えられる。しかし、トラヒックが高い場

合には、遅延を付加するだけでは大きな改善は見られていない。これは、トラヒックが高いため、FG 端末の転送タイミングを意識的に分散したとしても、信号衝突の可能性を十分に小さくできなかったためと思われる。一方、提案方式が遅延を付加した場合の特性よりも高い配信率を達成しているのは、隠れ端末が存在した場合にも複数の信号を復調可能な場合が高いためと考えられる。さらに、提案方式では、トラヒックが高い場合にも高い配信率を維持できている。これは、提案方式では、多数の FG 端末が存在したとしても、パケット転送はほぼ同時に行われており、利用される無線資源は 1 パケット転送時間で十分である。結果として、転送タイミングを分散することによる無線資源の浪費をおさえる事ができたためと考えられる。

図 6 及び図 7 に各トラヒックでのエンド端末間遅延を示す。なお、マルチキャスト配送では、送信元端末と宛先端末の位置関係により、エンド端末間の遅延は大きく異なる。そのため、本結果は全宛先端末での平均値となる。結果より、CSMA/CA に遅延を付加する場合は最も遅延が大きく、提案方式が最も短い遅延値を達成していることが確認できる。図 4 及び図 5 において、遅延を付加した既存方式は、配信率の改善が見られたが、本結果から実用上問題が出るほどの大きな遅延につながる事が確認できる。また、特性悪化の理由は、各ホップ毎で信号衝突回避のための転送タイミングの分散に伴う遅延が付加されたため、特に遠方宛先端末ほど大きな遅延が発生したと考えられる。次に、遅延を付加しない既存方式の遅延は実用上許容される範囲におさまっているが、提案方式よりは大きな値となっている。これは、既存方式では、各 FG 端末が順番に転送をすることから、CSMA/CA の動作に伴う遅延が生じるためと考えられる。一方、提案方式では、同一ホップの端末の多くは同時に同一 OFDM 信号を送信することから、FG 端末数が増加したとしても、パケット転送に必要な送信時間が大きく増加することはない。そのため、低遅延のパケット配送が実現できたと考えられる。

6. おわりに

本研究では、多数の同一パケットの転送が行われるマルチホップマルチキャスト通信において、OFDM 方式の特徴に着目した OFDM 協調通信方式の提案を行った。提案方式では、マルチキャスト経路制御プロトコルにより構築される配送木上の転送端末間で自律的に送信タイミングをそろえる事で、マルチホップ通信環境でも OFDM を用いた協調通信を実現した。シミュレーション結果より、既存方式では、高配送率と低遅延を両立することは困難であることが判明した。一方、提案方式は高配送率と低遅延を同時に達成可能であることを示した。

謝辞 本研究の一部は科研費 (23700075) の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Djohara Benyamina, Abdelhakim Hafid, Michel Gendreau, "Wireless Mesh Networks Design — A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, no. 2, pp. 299 – 310, 2012.
- [2] Luo Junhai, Ye Danxia, Xue Liu, Fan Mingyu, "A survey of multicast routing protocols for mobile Ad-Hoc networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 11, No. 1, pp. 78 – 91, 2009.
- [3] C.E Perkins, S.Das Royer, "Ad Hoc On-Demand Distance Vector(AODV) Routing," Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-13.txt, work in progress, Feb. 2003.
- [4] T. Clausen, P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC 3626, Oct. 2003.
- [5] E. M. Royer and C. E. Perkins, "Multicast ad hoc on-demand distance vector (maodv) routing," draft-ietf-manet-maodv-00.txt, 2000.
- [6] S. Lee, W. Su, and M. Gerla, "On-demand multicast routing protocol in multihop wireless mobile networks," Mobile Networks and Applications, vol. 7, no. 6, pp. 441 – 453, 2002.
- [7] Haitao Zhao, Shan Wang, Yong Xi, Ji-Bo Wei, "Modeling intra-flow contention problem in IEEE 802.11 wireless multi-hop networks," IEEE Communications Letters, Vol. 14, No. 1, pp. 18 – 20, 2010.
- [8] Ping Wang, Weihua Zhuang, "A collision-free MAC scheme for multimedia wireless mesh backbone," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 7, pp. 3577 – 3589, 2009.
- [9] Antonis Kalis, "A co-operative beamforming solution for eliminating multi-hop communications in wireless sensor networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 28, No. 7, pp. 1055 – 1062, Sep. 2010.
- [10] Long Le, "Practical Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks," in Proc. of the 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2010), 2010.
- [11] Guokai Zeng, Bo Wang, Yong Ding, Li Xiao, Matt W. Mutka, "Efficient Multicast Algorithms for Multichannel Wireless Mesh Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 21, No. 1, pp. 86 – 99, 2010.
- [12] Feng Daquan, Jiang Chenzi, Lim Gubong, L.J. Cimini, Feng Gang Feng, G.Y. Li, "A Survey of Energy-Efficient Wireless Communications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 1, pp. 167 – 178, 2013.
- [13] D. Lee and K. Cheun, "A new symbol timing recovery algorithm for OFDM systems," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 43 No. 3, pp. 767–775, Aug. 1997.
- [14] Katsuhiko Naito, Kazuo Mori, and Hideo Kobayashi, "OFDM cooperative flooding mechanisms for Multi-hop networks," in Proc. of the 9th International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA 2012), July 2012.
- [15] Katsuhiko Naito, Kazuo Mori, Hideo Kobayashi, "Co-operative Vehicle Information Delivery Scheme for ITS Networks with OFDM Modulation Techniques," in Proc. of the Tenth International Conference on Networks (ICN 2011), Jan. 2011.
- [16] QualNet, URL:<http://www.scalable-networks.com>