

OFDM協調通信を用いるマルチホップフラッディング方式

内藤 克浩^{†1,a)} 萩野 智幸^{†1,b)} 森 香津夫^{†1,c)} 小林 英雄^{†1,d)}

概要: すべての端末が同一の情報をネットワーク全体に再転送するフラッディングは、マルチホップネットワークにおけるルーティングプロトコルや情報配信手法で利用されている。また、フラッディングは無線帯域を過剰に消費し、特に端末数やトラフィックが増加した場合には、ブロードキャストストーム問題が発生することも知られている。本研究では、IEEE 802.11a でも採用されている Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) の特徴に着目する。OFDM では、複数の同一 OFDM 信号をガードインターバル内の到来時間差で受信した場合にも受信機は正しく復調が可能である。そこで、提案方式では複数の送信端末が、同一 OFDM 信号を同期して受信端末に向けて送信を行う。また、提案する送信手法を実現可能な、自律的な送信タイミング同期方式の提案も行う。シミュレーション結果より、提案方式を用いることにより利用される無線資源を削減可能なだけでなく、パケット受信成功率及び遅延特性なども改善可能であることを示す。

Multi-hop flooding mechanisms based on OFDM cooperative communication

KATSUHIRO NAITO^{†1,a)} TOMOYUKI HAGINO^{†1,b)} KAZUO MORI^{†1,c)} HIDEO KOBAYASHI^{†1,d)}

Abstract: Flooding mechanisms, where all nodes retransmit same information to a whole network, are used in various routing protocols and dissemination schemes in multi-hop networks. It is well known that flooding mechanisms consume a lot of wireless resources. Additionally, broadcast storm problems occur when a number of nodes or traffic increase in a network. In this paper, we focus on features of orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM), which is employed in IEEE 802.11a standard. In OFDM, receivers can demodulate some same OFDM signals within guard interval (GI) period. Therefore, some senders transmit a same OFDM signal to a receiver synchronously in the proposed method. In addition, the paper proposes autonomous synchronous method for the proposed transmission method. Simulation results show that the proposed method can reduce consumed a wireless resource and improve a packet delivery ration and delay performance.

1. はじめに

近年の無線通信技術の発展に伴い、無線マルチホップ通信技術を用いるネットワークの研究が行われている。また、

これらの研究の応用例として、無線通信網を用いてバックボーンを構築するメッシュネットワーク、広域エリアの情報収集を行うセンサネットワーク、車両間の情報交換を行う車両間ネットワークなどが研究されている。これらのネットワークは異なる特徴を持つため、異なるタイプの経路制御プロトコルも多数提案されている。

メッシュネットワークで主に用いられる経路制御プロトコルとして、AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [1], DSR (Dynamic Source Routing) [2], DYMO (Dynamic

^{†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
b) hagino@com.elec.mie-u.ac.jp
c) kmori@elec.mie-u.ac.jp
d) koba@elec.mie-u.ac.jp

MANET On-demand) [3], OLSR (Optimized Link State Routing)[4] などが知られている。AODV, DSR, DYMO では、ネットワーク内の目的端末を発見するために、経路探索メッセージをすべてのノードに再転送させる。また、OLSR では、制御情報が一部のノードにより再転送されることで、ノードはネットワーク全体の経路を把握する。このようなメッセージの再転送処理を一般にフラッディングと呼び、ノード位置が不明な場合にノードを発見する上で有効な方式である [5], [6], [7].

センサネットワークでは、メッシュネットワークで利用されるプロトコルに加えて、消費電力を削減可能な経路制御プロトコルが研究されている [8], [11]. これらのプロトコルでは、各ノードの電池残量などをネットワーク全体で交換した後に、よりネットワークの稼働時間を延長可能な経路を構築する。このような情報共有などでフラッディングメカニズムは頻繁に利用されている [9], [10].

車両間ネットワークでは、走行中の車両情報を交換するだけではなく、衝突防止などの低遅延通信を要求するアプリケーションも想定されている [12]. 特に低遅延通信を目標とした場合、経路制御プロトコルを用いて予め通信経路を作成することは困難な場合もあり、転送方向を限定したフラッディングなどを用いて緊急メッセージを転送する方式も研究されている [13], [14], [15].

このようにフラッディングは自律分散型のネットワークにおいて非常に頻繁に利用されている。一方、すべてのノードが再転送処理を行うため、ノード数が増加した場合には、トラヒックが急増するブロードキャストストーム問題が発生することも知られている [16], [17], [18]. また、ノード数が少数の場合においても、すべてのノードが無線帯域の未使用を検出して再転送処理を順次行うため、遠方への転送には時間がかかるとの問題が知られている。

本研究では、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) の通信特徴に着目することで、効率的に信頼性高いフラッディングを行う手法の提案を行う。提案方式では、OFDM では GI (Guard interval) 長内に到着する複数の OFDM シンボルを高精度に復調可能な点に着目する [19], [20]. また、アクセス制御方式である CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) を拡張することにより、複数のノードが自律的に同一 OFDM シンボルの再転送タイミングを同期する方式を提案する。結果より、提案方式を利用することにより、パケット受信成功率の改善と配送遅延の削減が可能であることを示す。

2. OFDM 協調通信

マルチホップ通信技術を実現する候補技術として IEEE 802.11 準拠のデバイスが存在する。近年多くのデバイスが採用している IEEE 802.11a, g などの規格では OFDM を

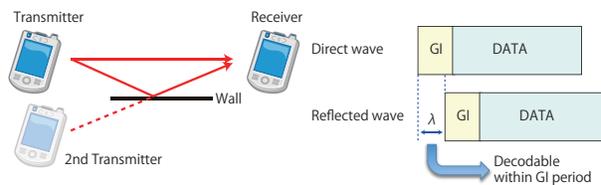


図 1 Concept of cooperative communication in OFDM.

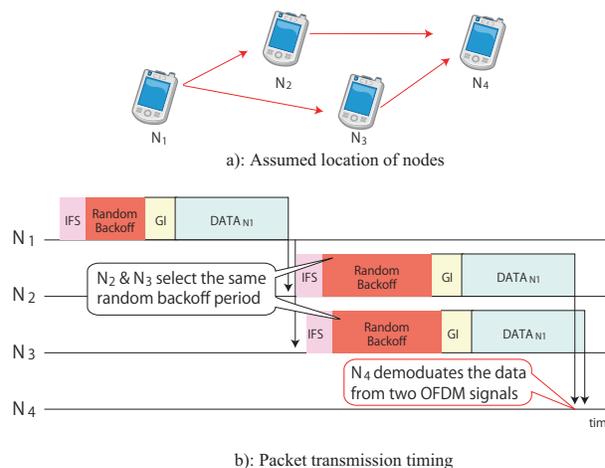


図 2 Concept of proposed access control mechanism.

利用することで、高速通信を実現している。OFDM は複数の直交関係にある狭帯域サブキャリアを利用することで、周波数利用効率の高い通信が可能であることが知られている。また、実用環境で頻繁に発生する反射波が存在する場合にも、高い通信性能を示すことが知られている。

図 1 は OFDM の耐マルチパス性能を示しているものである。本例では、受信機は送信機が送信した OFDM 信号を直接受信するとともに、壁で反射した遅延波も同時に受信している。本例では、直接波に λ 遅れて遅延波が到着した状況を想定している。一般に、OFDM を用いた通信では、送信機において、OFDM 信号の後半の一部を GI (Guard Interval) として、OFDM 信号の前に付加してから送信を行う。結果として、受信機で受信される遅延波の遅延時間が GI 長以下の場合、高精度の復調が可能となるため、適切な GI 長を選択することで、多数の遅延波が存在する状況においても高い通信性能を維持可能である。

本論文で提案する OFDM 協調通信では、受信機において遅延波と同一とみなせる OFDM 信号を、異なる送信機から送信する方式である。図 1 では、2 番目の送信機が異なる場所から、ほぼ同一時刻に同一 OFDM 信号を送信することにより、受信機において送信機からの遅延波が受信された場合と同様の状況を発生させることが可能である。また、異なる送信機から OFDM 信号が送信されることにより、経路ダイバシチ効果による特性改善も見込むことが可能となる。

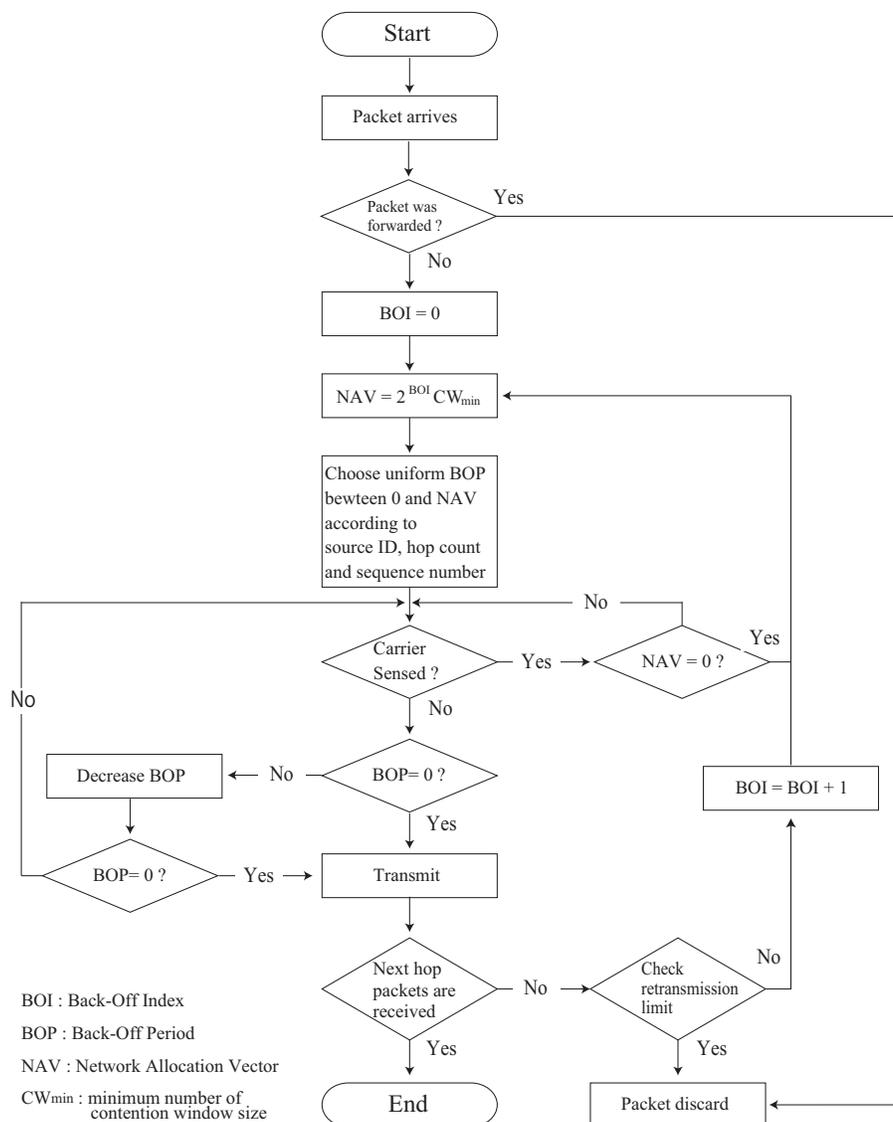


図 3 Flowchart of media access control.

3. OFDM 協調通信用アクセス制御

提案する OFDM 協調通信を実現するためには、異なる端末が自律的に OFDM 信号の再転送タイミングを同期する必要がある。図 2 は提案するアクセス制御方式である。提案アクセス制御方式は IEEE 802.11 でも採用される CSMA/CA を拡張したものである。図 2 は提案アクセス制御方式の動作例であり、端末 1 が送信した OFDM 信号を、端末 2 及び 3 が再転送することで、端末 4 が OFDM 信号を受信する状況を想定している。本例では、端末 2 及び 3 は端末 1 が送信した OFDM 信号を受信する。端末 2 及び 3 は OFDM 信号の復調を行い、パケット内の送信元アドレス、ホップ数、パケットシーケンス番号などを利用することで CSMA で利用する乱数の初期化を行う。そして、端末 2 及び 3 は同一の情報で初期化された乱数から同一のバックオフ値を得る。また、端末 2 及び 3 は同一の OFDM 信号を

同一のバックオフ値に基づいて送信することにより、端末 4 はほぼ同時に 2 端末からの OFDM 信号を受信可能となる。なお、2 端末からの OFDM 信号の到来時間差が GI 長内であれば、高精度の復調が可能となる。

図 3 に提案アクセス制御方式のフローチャートを示す。一般的な CSMA 方式では、ランダムバックオフ値は各端末で独立に選択される。そのため、各端末は異なるバックオフ値を選択する可能性が高くなり、パケット衝突を予め防ぐことが可能となる。提案アクセス制御方式では、同一 OFDM 信号を送信する端末は同一のランダムバックオフ値を自律的に選択する必要がある。下記に手順を示す。

- 近隣端末からのパケット受信に基づいて処理を開始する。
- 端末は転送履歴を確認することで、重複パケットの破棄を行う。
- 端末は Back-Off Index (BOI) の初期化を行うことで、Network Allocation Vector (NAV) の初期化も行う。な

お、 CW_{min} は最小のコンテンションウィンドウサイズを示す。

- 端末はパケット内の送信元アドレス、ホップ数、パケットシーケンス番号を用いて乱数の初期化を行い、その後乱数を発生させる。結果として、端末は送信元アドレス、ホップ数、パケットシーケンス番号に基づいた一意の乱数を得る。また、同一 OFDM 信号を受信した端末は、同一の乱数を得ることから、同一のバックオフ値を得ることとなる。
- 端末はチャネルセンシングを行う。チャネルが利用されている場合、端末は NAV 値を確認し、チャネルセンシングを繰り返す。また、チャネルが利用されていない場合、端末は BOP 値の確認を行う。
- 端末は BOP 値が 0 ではない場合、BOP 値に減算処理を行う。また、BOP 値が 0 となった場合には、OFDM 信号の送信を開始する。
- 端末は OFDM 信号の送信後、端末は送信した OFDM 信号のデータが近隣端末により再転送されたか確認を行う。
- 端末が送信した OFDM 信号のデータを近隣端末から受信した場合、処理を終了する。もし、受信できない場合、予め設定された回数、再転送を試みる。その際、BOI 値を増加させることで、衝突確率の削減を図る。

4. 数値例

4.1 OFDM 協調通信の BER 特性

提案する OFDM 協調通信の特性改善効果を確認するために、Matlab を用いたシミュレーションを実施した。本シミュレーションでは、一般的な OFDM 送受信機を想定し、52 本のサブキャリアを想定した。また、等間隔で配置された 14 本のサブキャリアを伝送路推定用のパイロット信号を送信するために利用した。

提案する OFDM 協調通信では、送受信機間の位置関係に制約はないが、シミュレーションの簡単化のため、複数の送信機が受信機から等距離に存在する状況を想定した。また、各送信機と受信機間のチャネルはレイリーフェージング環境を想定した。表 1 にシミュレーション諸元を示す。

図 4 に協調端末数を変化させた場合のビット誤り率特性を示す。結果より、協調端末数を増加させることにより、ビット誤り率は 1 送信機の場合と比べて、平行移動する形で改善していることが確認できる。本シミュレーションでは、各送信機の送信電力は一定としている。そのため、協調端末数を増加させた場合、送信機の台数が増加するため総送信電力も増加する。結果として、受信機はより大きな受信電力を得ることができるため、CNR(Carrier to Noise ratio) が改善していると考えられる。さらに、OFDM 信号を送信する端末は異なる場所に存在するため、送信端末と

表 1 Simulation parameters in physical layer simulation

Simulator	Matlab 6.5
Number of FFT points	64
Number of Subcarriers	52
Number of pilot subcarriers	14
Bandwidth	20 [Mhz]
Modulation scheme	16QAM
Symbol period	2.6 [μ s]
GI period	0.52 [μ s]
Channel model	Rayleigh fading
Number of multi-path	5

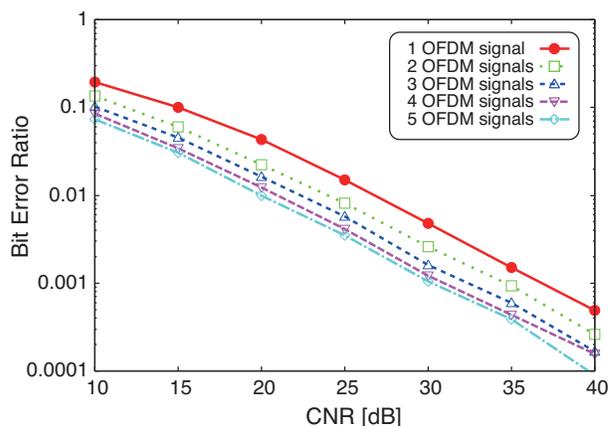


図 4 BER performance in OFDM cooperative communication.

受信端末間の伝送路特性は独立となる。そのため、提案方式は経路ダイバシチ効果による特性改善も見込めると考えられる。

4.2 OFDM 協調通信を用いたフラッディング特性

本研究では提案する OFDM 協調通信方式をマルチホップネットワークにおいて活用することを目的としている。そこで、多くの経路制御プロトコルなどで利用されるフラッディング性能に着目して、提案方式の有効性を検証する。検証では、ネットワークシミュレータである QualNet [21] 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 1000m 四方の空間にランダム配置し、ソースとなる端末は 1 秒に 512bytes のパケットを 1 個送信するものとする。また、各端末はランダムウェイポイントに基づいて移動するものとした。比較対象として、すべての端末が再転送処理を行うフルフラッディングと、75%の確率で端末が再転送処理を行う確率的フラッディングについても結果を示す。表 2 にシミュレーションでのパラメータ詳細を示す。

図 5 にパケット受信成功率を示す。ここでのパケット受信成功率とは、正しく受信できたパケット数を信号を検出できた回数で除算したものである。結果より、フルフラッ

表 2 Simulation parameters in network layer simulation

Simulator	QualNet 5.01
Simulation time	150 [s]
Simulation trial	100 [times]
Number of nodes	100 [nodes]
Node movement	Random waypoint Pause time : 5 [s] Speed : 0.1 - 2 [m/s]
Node position	Random
Simulation area	1000 x 1000 [m]
Transmission interval	1 [s]
Packet size	512 [Bytes]
Communication device	IEEE 802.11a
Transmission rates	6 [Mbps]
Transmission power	19 [dBm]
Channel frequency	5 [GHz]
Antenna gain	0 [dB]
Antenna type	Omni directional
Antenna height	1.5 [m]
Propagation path loss model	Free Space
Wireless environment	Rayleigh fading

ディングの packets 受信成功率は最も低く、半分弱の packets 受信に失敗していることがわかる。フラッディングでは、多数の端末が無線チャネルが利用されていないことを確認後、同一 packets を順次送信を行う。しかし、IEEE 802.11a などではフラッディングはブロードキャストモードを利用されるが、ブロードキャストモード利用時は隠れ端末問題も発生する。そのため、多数の端末が packets の再転送処理を行うことにより、多数の packets 衝突も発生していると考えられる。また、確率的フラッディングを採用することにより、packets 受信成功率は若干改善していることが確認できる。これは、一部の端末が packets の再転送処理を取りやめたことにより、packets 衝突数が若干減少したためと思われる。しかしながら、確率的に再転送処理を取りやめるだけでは、大きな特性改善は見込めないことが確認できる。一方、提案する OFDM 協調通信方式を用いた場合の packets 受信成功率は 8 割ほどと大幅に改善している。提案方式では、同一ホップの packets はほぼ同時刻に送信されることから、無線帯域の利用効率が改善している。さらに、受信機が複数の packets を受信した場合であっても、同一 packets が GI 長内の時間で複数受信された場合には、高精度の復調が可能となる。結果として、packets 衝突による受信誤りを大幅に削減できたと思われる。

図 6 に送信元端末と各端末間の配送遅延を示す。なお、送信元端末と各受信端末の関係により、実際の配送遅延は大幅に異なるが、本結果では全端末の平均値を示す。結果より、フルフラッディングの配送遅延は、送信元端末数が増加することにより、大幅に増加していることが確認できる。

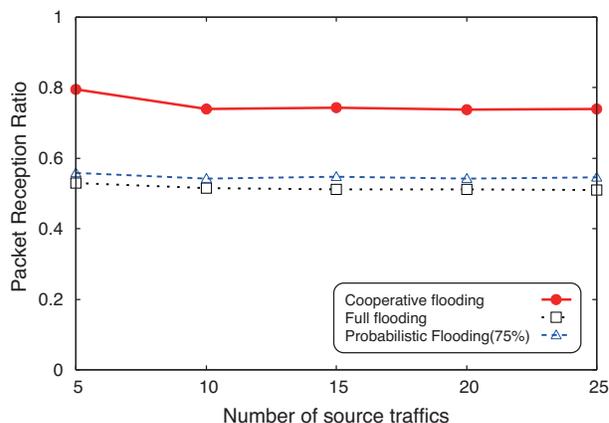


図 5 Packet reception ratio.

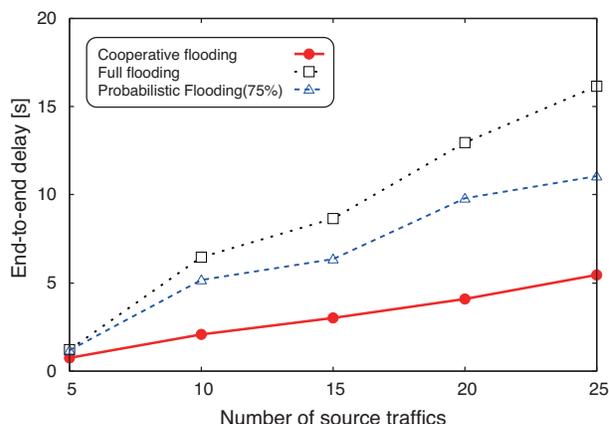


図 6 End-to-end delay.

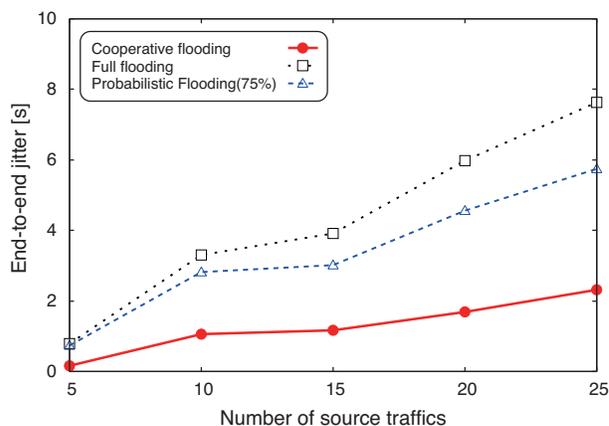


図 7 End-to-end jitter.

これは、送信元端末数が増加することにより、ネットワーク内の総トラヒックが増加するため、各端末が無線チャネルが利用されていないことを確認できる機会も減少するためと思われる。同様に、確率的フラッディングの配送遅延もフルフラッディングと比較すると少なくなるが、送信元端末数の増加にともなって大幅に増加していることが確認できる。なお、確率的フラッディングの再転送確率を調整することにより、配送遅延を削減することは可能となるが、最適値はネットワーク状況に応じて異なることが予想される。

る。そのため、最適値を動的に発見することは困難であり、再転送確率の調整だけでは、配送遅延の大幅な削減は困難と思われる。一方、提案する OFDM 協調通信方式を用いた場合の配送遅延は、フルフラディングの 3 割ほどと大幅に削減できていることが確認できる。提案方式では通常のフラディングとは異なり、同一データを送信する場合には、同時に送信を行うことが可能となる。そのため、送信元端末数が同一の場合、端末が無線チャンネルが利用されていないことを確認できる可能性がより高くなる。結果として、提案方式では配送遅延を大幅に削減可能になると考えられる。

図 7 に各端末でのジッターを示す。結果より、フルフラディングのジッターは最も大きく、配送遅延の半分ほどの値となっている。また、確率的フラディングのジッターはフルフラディングと比較すると削減されているが、同様に配送遅延の半分ほどの値となっている。一方、提案方式のジッターは既存方式と得らべるとより小さな値である上、配送遅延の 4 割ほどの値であることが確認できる。これは、配送遅延が削減できた理由と同様に、提案方式では同一データを同時に送信することにより、より短時間で再転送処理が実行できるためと思われる。

5. まとめ

本研究では、マルチホップ通信技術で頻繁に利用されるフラディングを効率化するために、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、複数の端末が同一パケットを同時に送信することにより、消費無線資源の削減及びパスダイバシチ効果を得ることが可能となる。また、同一パケットの再転送タイミングを自律的に複数端末間で同期することも可能である。シミュレーション結果より、提案方式を用いることにより、物理層レベルでの特性が改善可能であることを確認した。さらに、提案方式をフラディングで利用することにより、既存方式と比較して、より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も確認した。

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] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF Request for Comments 3561, Jul. 2003.
- [2] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," IETF Request for Comments 4728, Feb. 2007.
- [3] I. Chakeres, C. Perkins, "Dynamic MANET On-demand (DYMO) Routing," IETF internet draft (work in progress), Jul. 2010.
- [4] T. Clausen, P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," IETF Request for Comments 3626,

- Oct. 2003.
- [5] K. Zeng; Z. Yang; W. Lou, "Location-Aided Opportunistic Forwarding in Multirate and Multihop Wireless Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, Issue 6, Jul. 2009.
- [6] D. Chen, J. Deng, P.K.Varshney, "Selection of a Forwarding Area for Contention-Based Geographic Forwarding in Wireless Multi-Hop Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, Issue 5, Sep. 2007.
- [7] M. Naghshvar, T. Javidi, "Opportunistic Routing with Congestion Diversity in Wireless Multi-hop Networks," in Proc. of the IEEE Conference INFOCOM 2010, November 2010.
- [8] M. J. Miller, C. Sengul, and I. Gupta, "Exploring the Energy-Latency Trade-Off for Broadcasts in Energy-Saving Sensor Networks." In Proc. of ICDCS ' 05, 2005.
- [9] P. Kyasanur, R. R. Choudhury, and I. Gupta. Smart Gossip, "An Adaptive Gossip-based Broadcasting Service for Sensor Networks," In Proc. of MASS ' 06, 2006.
- [10] F. Stann, J. Heidemann, R. Shroff, and M. Z. Murtaza. RBP, "Robust Broadcast Propagation in Wireless Networks." In Proc. of SenSys ' 06, 2006.
- [11] Shuo Guo, Yu Gu, Bo Jiang and Tian He. "Opportunistic Flooding in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks with Unreliable Links," In Proc. of MobiCom' 09, 2009.
- [12] F. Li and Y. Wang, "Routing in vehicular ad hoc networks: A survey," IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 2, No. 2, pp. 12-22, Jun. 2007.
- [13] V. Naumov and T.R. Gross, "Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad-hoc Networks," IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007), pp. 1919-1927, May 2007.
- [14] Q. Yang, A. Lim, S. Li, J. Fang and P. Agrawal, "ACAR: Adaptive Connectivity Aware Routing for Vehicular Ad Hoc Networks in City Scenarios," MOBILE NETWORKS AND APPLICATIONS, Vol. 15, No. 1, pp. 36-60, Feb. 2010.
- [15] Y. Mylonas, M. Lestas, A. Pitsillides, "Speed adaptive probabilistic flooding in cooperative emergency warning," ACM WICON '08, No. 81, Nov. 2008.
- [16] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," Wireless Networks, Vol. 8, pp. 153-167, 2002.
- [17] W. Lou and J. Wu, "On reducing broadcast redundancy in ad hoc wireless networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 1, No. 2, pp. 111-122, 2002.
- [18] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, E.-Y. Shih, "Adaptive approaches to relieving broadcast storms in a wireless multihop mobile ad hoc network," IEEE Transactions on Computers, Vol. 52, No. 5, pp. 545-557, May 2003.
- [19] 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.
- [20] L. Thibault and M. T. Le, "Performance evaluation of COFDM for digital audio broadcasting. I. Parametric study," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 43, No. 1, pp. 64-75, Mar. 1997.
- [21] QualNet, URL:<http://www.scalable-networks.com>