

指向性無線通信における最小送信間隔推定に基づく QoS 制御方式

海津 悠輝¹ 阪田 史郎¹ 小室 信喜¹

概要：無線通信端末が数多く社会に普及しつつあり，現在の主要な通信方法である全方位に電波を発信する無指向性通信では空間利用効率に限界がある．そこで，近年は送受信における電波干渉を抑制することができる指向性無線通信に注目が集まっている．指向性 MAC プロトコルの中でも，輻輳等の原因で通信が失敗した際に別方向のフレームを先に処理することでネットワーク全体のスループットを向上させる，OPDMAC(Opportunistic Directional MAC) が提案されている．また，近年ではリアルタイムサービスを中心として通信の品質 (QoS: Quality of Service) が重要視されるようになってきている．本稿では，指向性無線通信において ROC を用いて優先通信のスループットを確保する一方で，優先通信に干渉しない範囲で非優先通信を増加させ，ネットワーク全体の性能を向上させる優先制御方式を提案する．シミュレーション評価により，提案方式が有効であることを示す．

QoS Control Scheme based on Minimum Transmission Interval Estimation for Directional Antenna-used Wireless Multi-hop Networks

YUKI KAIZU¹ SHIRO SAKATA¹ NOBUYOSHI KOMURO¹

1. はじめに

無線通信端末が数多く社会に普及しつつあり，現在の主要な通信方法である全方位に電波を発信する無指向性通信では空間利用効率に限界がある．そこで，送信する際には電波を特定の方向のみに発信し，受信する際には特定の方向の感度のみを高めることにより，送受信における電波干渉範囲を抑制し，空間利用効率を高める指向性アンテナの利用に注目が集まっている．

ネットワーク全体のスループットを高めることを目的とした指向性無線通信の MAC プロトコルとして，OPDMAC (Opportunistic Directional MAC) [1] が提案されている．OPDMAC は，通信失敗時に別方向の端末を宛先とするフレームを保持している場合，再送を行わずに別フレームを先に処理する．通信失敗の可能性が高い通信を避け，成功の可能性が高い通信を多く行うことで，時間資源と空間資源を有効に活用することでネットワーク全体の性能を向上させる．

また，近年では様々なサービスが提供されるようになり，動画や音声といった，マルチメディア通信等のサービスの品質 (QoS: Quality of Service) が重要視されるようになった．この QoS 要求に対応するため，リアルタイムサービスのデータフレームを優先的に送信し，スループットや遅延といったものを一定以上に保つことが必要とされるようになった．しかし OPDMAC はネットワーク全体の空間利用効率を高める点を重視しており，フレームの優先度が区別されていない．そのため，優先フレームの通信成功率が低い場合は非優先フレームの処理ばかりを行うことになる．優先フレームの送信機会が少なくなり，スループットと遅延が劣化して優先フローの要求に対して適切に対応できない場合がある．

無指向性通信における QoS 制御方式の一つとして，MAC フレーム受信機会制御方式 (ROC: Receiving-Opportunity Control in MAC Frame) [3] が提案されている．ROC は，ACK 制御とバックオフを利用し，非優先端末のフレーム送信機会を減らし，優先端末のフレーム送信機会を相対的に増加させる QoS 制御方式である．ROC では，設定された

¹ 千葉大学大学院融合科学研究科

条件や式に従い、非優先端末からのフレームに対する ACK を破棄する。破棄された端末は次の送信時におけるバックオフ時間が長くなるため、他の競合端末と比べて送信機会が少なくなる。一方、優先端末からのフレームに対しては破棄を行わず、通常通り通信を行う。このようにして、優先フレームの処理時間を相対的に増加させることで、QoS 制御を実現する。

本稿では、OPDMAC に基づき、ROC を利用した優先制御を行うことによって、空間利用効率を高めつつ優先フローの要求スループットに対応した優先制御方式を提案する。優先フレームを処理する端末は、要求スループットから優先フレームの最小送信間隔を計算する。最後に優先フレームの送信を完了してから最小送信間隔以上の時間が経過した場合、端末は優先通信のみを行うことで、優先フローのスループットを確保する。通信を拒否された端末は、OPDMAC と同様に通信成功率が低い宛先に対する再送を行わずに、他方向に存在する端末を宛先とするフレームを先に処理することで、ネットワーク全体の性能を向上させる。このように、優先通信の要求スループットに適切に対応する一方で、優先通信に影響が無い範囲で通信量を増加させることにより、ネットワーク全体の性能の劣化を最小限に抑えた優先制御を実現する。以上の提案方式をシミュレータに実装し、優先フローとネットワーク全体のスループットを測定し、評価する。

2. 関連研究

指向性 MAC プロトコルのうち、DNAV (Directional Network Allocation Vector) [4] を用いて、RTS/CTS/DATA/ACK フレームの送信を指向性で送信することにより、電波干渉を低減させる DMAC [2] が提案されている。DMAC ではバッファの先頭フレームから順に処理されるため、通信に失敗して再送処理を繰り返す場合がある。この時、送信が完了するか再送回数の上限に達してフレームが破棄されるまで後続の全てのフレームが待たされることになり、結果としてスループットが低下する。

この問題を解決し、指向性通信の利点を最大限に活かす MAC プロトコルとして、OPDMAC (Opportunistic Directional MAC) [1] が提案されている。OPDMAC は、先頭フレームが送信不可能であれば、後続の送信可能な他のフレームを先に処理することにより無駄な待ち時間を減らす。無駄にアイドル状態で待機することなく、できる限り通信を行うことにより、スループットと遅延を改善することができる指向性 MAC プロトコルである。

無指向性アンテナを用いた QoS 制御方式の一つとして、MAC フレーム受信機会制御方式 (ROC: Receiving-Opportunity Control in MAC Frame) [3] が提案されている。これは、IEEE 802.11 DCF において ACK 制御とバックオフ再送制御を利用し、QoS 制御する方式である。ROC

には、フレーム受信拒否方式と、擬似 ACK 送信方式がある。フレーム受信拒否方式は、非優先端末からのフレームに対して意図的に ACK フレームを返信せず、送信端末の CW (Contention Window) を増加させてバックオフ時間の平均を長くすることで、優先端末の送信機会を相対的に増加させる方式である。擬似 ACK 送信方式は、受信端末が正しく DATA フレームを受信できなかった場合でも ACK を返信し、送信端末に再送処理を行わせないという方式で、VoIP (Voice over IP) のようなリアルタイムアプリケーションにおいて遅延を抑制するために用いられる方式である。

指向性 MAC プロトコルの QoS 制御方式として、筆者らは OPDMAC と ROC を組み合わせ、フィードバックを行って受信拒否確率等を変動させていくことで優先通信のスループットを確保する方式 [5] を提案した。この方式は受信拒否確率の初期値次第で通信開始時のスループットが大きく変動する他、フィードバックによる確率変動によって通信中のスループットも安定しない。アドホックネットワークでは通信の開始と終了が頻繁に発生するため、それに対応できる MAC プロトコルが求められる。

3. 提案方式

本稿では、優先通信の要求スループットが満たされている場合や非優先通信のみが存在する場合は OPDMAC [1] と同様の動作を行うことでネットワーク全体の性能を向上させ、要求スループットが満たされていない場合は特別な送信制御と受信制御を行うことで優先通信のスループットに対して適切に対応する優先制御方式を提案する。優先通信の要求スループットが満たされているかどうかの判断のため、次の最小送信間隔を計算し、それに基づいて送受信制御を行う。

3.1 最小送信間隔

最小送信間隔とは、要求スループットを満足させるための優先フレームの最小処理間隔を意味する。最後に優先フレームを処理してから最小送信間隔以上の時間が経過していれば端末は優先通信のスループットが確保されていないと判断し、経過していなければ要求スループット以上のスループットを確保できていると判断する。要求スループットを満足させるための最小送信間隔 $Interval[sec]$ は、スループット要求値を $Rate_{Req}[Mbps]$ 、DATA フレーム内のペイロード長 $Payload_{DATA}[bytes]$ を用いると以下の式で表すことができる。

$$Interval = \frac{Payload_{DATA}}{Rate_{Req}} \quad (1)$$

ここで、優先通信における最小受信間隔は最小送信間隔 $Interval[sec]$ と同一となる。 $Interval[sec]$ 以内に優先フレームの処理がされなかった場合、端末は優先通信の要

求スループットを下回る可能性があるとして判断し、送受信において優先制御を行うことで優先通信のスループットを確保する。

3.2 送信制御

多くの方式では、フレームを保持している端末はキャリアアセス時にアイドル状態を確認すると送信処理に移行し、バッファ内の先頭フレームから順に送信を行う。提案方式ではアイドル状態を確認して送信処理に移行した際、最後に優先フレームを送信してから $Interval[sec]$ 経過しているかどうかで優先制御を行うかを決定する。優先制御を行う場合、バッファに格納されているフレームの順番に関係なく優先フレームを選択して送信処理を行い、この通信が失敗した際は続けて再送処理を行うことで優先通信のスループットを確保する。また、優先通信のスループットが確保されていて必ずしも優先通信を行う必要がない場合、フレームの衝突や 3.3 等によって通信が失敗した際は OPDMAC[1] と同様に再送を行わず他方向の端末を宛先とするフレームを先に処理することで、ネットワーク全体の性能を向上させる。

3.3 受信制御

指向性無線通信では、提案されている多くの方式が RTS/CTS フレームの交換により通信を開始する方式を採用している [1] [2]。ROC[3] は ACK フレームを意図的に破棄することで他の通信を優先的に処理することを可能にする方式であるが、RTS/CTS フレームを用いる場合に ACK フレームの破棄によって受信拒否を行う場合はより多くの通信時間が無駄となる可能性がある。そこで、提案方式における優先制御では ACK フレームを破棄するのではなく CTS フレームを破棄することで無駄となる通信時間の削減を行い、時間資源のより有効的な活用を可能とする。提案方式では自身を宛先とする RTS フレームを受信した際、最後に優先フレームを受信してから $Interval[sec]$ 経過しているかどうかで優先制御を行うかを決定する。優先制御を行う場合、端末は非優先通信に対して CTS フレームを返信しないことで通信を拒否する。非優先通信を意図的に失敗させる一方で優先通信を行うことで、優先フレームの処理時間を増加させて優先通信のスループットを確保する。

4. シミュレーション評価

以上の提案方式をシミュレータに実装し、DMAC[2]、OPDMAC[1]、フィードバック方式 [5] との比較評価を行った。シミュレーションにおけるトポロジーおよび優先フローと非優先フローの構成は図 1 とし、他のシミュレーション諸元は表 1 の通りである。また、3 種類の非優先フローは常に発生し、優先フローはシミュレーション時間 5[sec] ~ 15[sec] の期間で発生するものとする。優先フロー

のスループット要求値は 1.0[Mbps] と 1.2[Mbps] の 2 種類を想定し、それぞれシミュレーションを 10 回を行い、その平均値を結果とする。

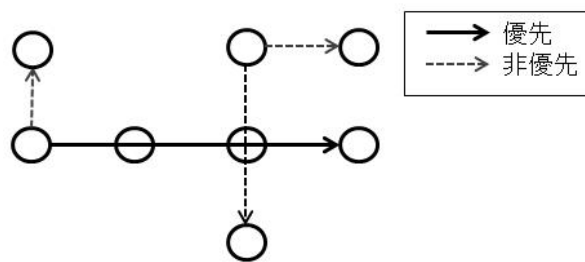


図 1 トポロジー

表 1 シミュレーション諸元

通信距離	250[m]
端末間距離	200[m]
ビーム幅	60°
データ送信レート	11[Mbps]
ペイロード長	1[Kbytes]
要求スループット	1.0, 1.2[Mbps]
シミュレーション時間	20[sec]

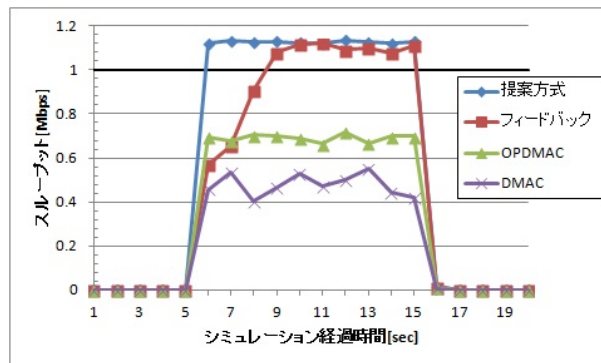


図 2 要求値 1.0[Mbps] 時における優先フローのスループット

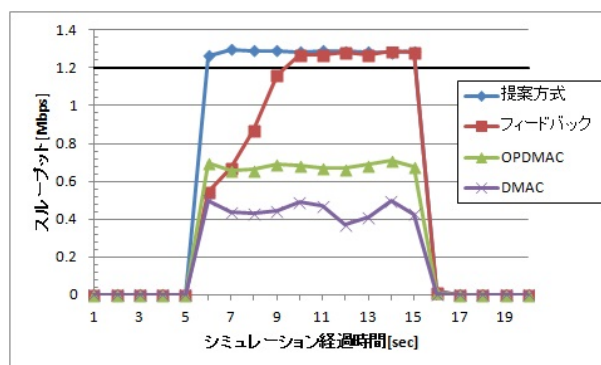


図 3 要求値 1.2[Mbps] 時における優先フローのスループット

図 2 と図 3 に、優先フローのスループット要求が 1.0[Mbps]

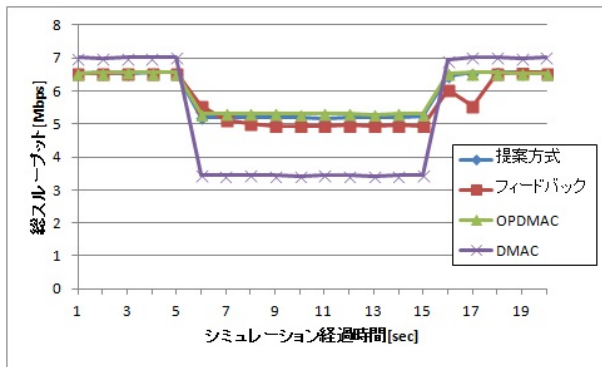


図 4 要求値 1.0[Mbps] 時におけるネットワーク全体のスループット

と 1.2[Mbps] のそれぞれの場合における、各方式の優先フローのスループット推移を示す。提案方式は優先フロー発生からすぐに要求スループットに対応できているのに対し、フィードバック方式は優先フロー発生から数秒を要していることがわかる。これは、フィードバック方式では送受信制御に対する入力パラメータの再設定の間隔が長いことと、パラメータ変動幅が小さいことによるものだと考えられる。このような方式は、フローの発生と消失が頻繁に起こるネットワークには不向きである。一方で、提案方式では優先フロー発生時に要求スループットを満足させるための最小送信間隔を計算し、通信開始時からそれを守ることによって要求スループットに対して適切に対応している。また、優先制御がない DMAC と OPDMAC ではフレームの衝突や優先フレームの送信機会減少により、スループットが著しく低下していることがわかる。

図 4 と図 5 に、優先フローのスループット要求が 1.0[Mbps] と 1.2[Mbps] のそれぞれの場合における、各方式のネットワーク全体の総スループット推移を示す。優先フローが未発生時には、DMAC が最も高い性能を示していることがわかる。これは、OPDMAC をベースとしている他の方式は通信成功後に一定時間アイドル状態で待機するという動作が存在しているためと考えられる。優先フローが発生している期間においては、輻輳発生方向への通信を避けて通信成功率が高い通信を数多く行う OPDMAC が最も高い特性を示している。提案方式とフィードバック方式は OPDMAC をベースとしているが、優先制御のために意図的に非優先通信を失敗させることがあるため、無駄な通信時間が存在する分性能が若干低下していると考えられる。DMAC では、輻輳が発生した場合であっても同方向へ続けて再送を行うため、フレームの衝突が頻繁に起こることによってネットワーク全体の性能を大きく引き下げていると考えられる。

5. おわりに

本稿では、指向性無線通信における優先制御方式として、優先通信に関わる端末が要求スループットから最小送信間

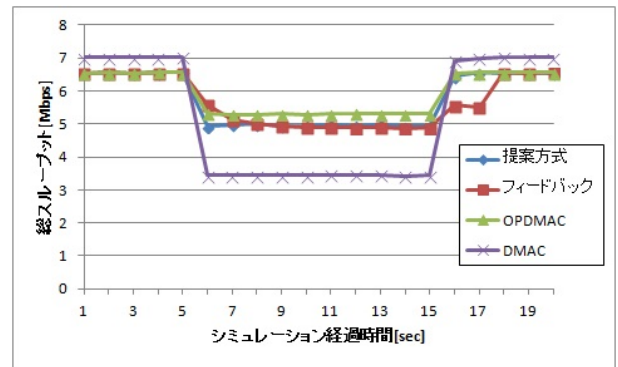


図 5 要求値 1.2[Mbps] 時におけるネットワーク全体のスループット

隔を計算し、優先フレームの処理間隔が最小送信間隔を上回った場合に送受信において制御を行うことで、優先通信の要求スループットに対して即時的かつ適切に対応する方式を提案した。シミュレーションにより、提案方式が優先通信の要求スループットに適切に対応できていることが確認された他、ネットワーク全体の性能の低下を小さく抑えることができることを示した。

参考文献

- [1] O. Bazan and M. Jaseemuddin, "An Opportunistic Directional MAC Protocol for Multihop Wireless Networks with Switched Beam Directional Antennas," Proc. ICC, pp. 2775-2779 May 2008.
- [2] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan and N. H. Vaidya, "Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks," Proc. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), pp.59-77, Sept. 2002
- [3] T. Murase, K. Uchiyama, Y. Hirano, S. Shioda, S. Sakata, "MAC-Frame Receiving- Opportunity Control for Flow QoS in Wireless LANs," IEICE Trans. Commun, vol.E92-B, no.1, pp.102-113, Jan. 2009.
- [4] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, and A. Ren, "Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks," Proc. ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), pp. 39-46, June 2002.
- [5] 海津悠輝, 小室信喜, 阪田史郎, 馬ジン, "指向性アンテナを用いたアドホックネットワークにおける End-to-End フロー優先制御方式" 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp.1981-1985, 2012.07.