Vol.2014-MBL-73 No.19
Vol.2014-ITS-59 No.19
2014/11/21

ns-3に対する無線全二重通信方式の実装

杉山 佑介[1,a)]　猿渡 俊介[1,b)]　渡辺 尚[2,c)]

概要：
モバイルコンピューティングの分野では，重畳符号化，逐次干渉除去，全二重通信などの新しい L1 (物理層) や干渉除去を駆使した L2 (データリンク層) の研究が活発化している．これまで，L1 や L2 をブラックボックス化してルーティングプロトコル等の L3 (ネットワーク層) の研究がなされてきた．本稿では，これまでブラックボックスであった L1 や L2 に新しい概念が導入されたとしても，これまでの L3 が有効であるかどうかを検証することを目的とする．具体的には，モバイルコンピューティングの分野で一般的に使われている ns-3 上に全二重通信を可能とする fdwifi モジュールを作成実装し，シミュレーションによって評価した．fdwifi モジュールは，上位層に影響を与えることなく既存の wifi モジュールを置き換え可能なように設計されている．シミュレーションによる評価の結果，無線全二重通信をマルチホップ環境で利用するためには L3 の仕組みも変更しなければならないことが明らかになった．

1. はじめに

この数十年，モバイルコンピューティングの分野では，ハードウェア改変のコストがあまりに高いことに起因して L1(物理層) は IEEE 802.11a/b/g や IEEE 802.15.4 で固定であるという前提で研究が進められてきた．USRP や WARP を始めとしたソフトウェア無線技術の登場により，モバイルコンピューティングの潮流に変化が生まれている．具体的には，レートレス符号化や干渉除去を駆使した新しい L1 と L2(データリンク層)，L3(ネットワーク層) を統合したクロスレイヤのアプローチが盛んになっている．

ソフトウェア無線技術が登場した現在でも，評価できるパラメータの豊富さと柔軟さという観点ではネットワークシミュレーション技術は依然として重要である．しかしながら，既存のモバイルネットワークで用いられていたシミュレータでは，全二重通信や重畳符号化といった新しい L1 の仕組みが提供されていない．これまでの既存の L1 を前提に構築された L2 や L3 の AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) や DSR (Dynamic Source Routing) を始めとしたルーティングプロトコルが新しい L1 にも対応できるかどうかを検証するための環境整備が不可欠である．

このような観点から，本稿では，新しい L1 の 1 つである無線全二重方式モジュール「fdwifi」の ns-3 に対する実装について述べる．ns-3 は，ACM の SIGCOMM や SIGMOBILE コミュニティを中心に利用されているネットワークシミュレータであり，既に多くの通信プロトコルが実装されている．筆者らによる fdwifi の実装では，ns-3 上に既に実現されている L3 のプロトコルをそのまま利用できるようにするために，ns-3 が提供している wifi モジュールをそのまま置き換える形で実装した．

実装した fdwifi と筆者らが過去の研究で利用していた L2 のシミュレータ Tsubasa を比較評価した結果，無線全二重通信をマルチホップ環境で利用するためには L3 の仕組みも改変しなければならない可能性も明らかになった．これまで，筆者らは，Tsubasa で L3 を評価する場合には理想的なソースルーティングを前提としていた．今回の評価では，L2 と L1 の評価においては，Tsubasa と fdwifi は同様の傾向が得られた．それに対して，L3 の評価では，まず，Tsubasa 上での評価と ns-3 上での評価では性能が大きく異なることが分かった．さらに，ns-3 の AODV や DSR においては，無線全二重通信を用いたとしても，現状では半二重通信と比べて全くスループットが向上しないという結果が得られた．

本稿の構成は以下のとおりである．2 節では，新しい L1 技術に関する研究動向を概観して，本稿の位置づけを明らかにする．3 節では，新しい L1 技術を検証するためのネットワークシミュレータに求められる要件を議論する．4 節では，ns-3 上に既存の wifi モジュールを拡張する形で実装した無線全二重通信対応の fdwifi モジュールについて述べる．5 節では，実装さ板 fdwifi モジュールを用いて無線全二重通信という L1 の変化が L2，L3 に与える影響について検証する．最後に 6 節でまとめとする．

2. 関連研究

本研究は次世代のワイヤレスネットワークにおける L1 技術と，ネットワークシミュレータに関連する．図 1 にこれまでのワイヤレスネットワークを示す．これまで 1 つの周波数帯の干渉空間内で 1 対 1 の 1 方向のみの通信を前提としていたワイヤ

[1] 静岡大学
Shizuoka University
[2] 大阪大学
Osaka University
[a)] sugiyama@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp
[b)] saru@inf.shizuoka.ac.jp
[c)] watanabe@ist.osaka-u.ac.jp

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

レスネットワークは，今，まさに大きな転換期を迎えている．ここ数年，国際会議 ACM SIGCOMM や ACM MobiCom において，無線全二重通信方式 (図 2)，重畳符号化 (図 3)，逐次干渉除去 (図 4)，MIMO (図 5: Multiple Input Multiple Output) などの空間多重を利用した新しい L1 技術を用いたワイヤレスネットワークの発表が盛んになされている．

「1 つの空間内で 1 対 1 かつ 1 方向のみの通信」の前提が崩れると，L1 だけにとどまらず，上位層にも大きな影響を与える．例えば，L2 ではキャリアセンスの意味も変わってくることが予想される．また，文献 [1] や文献 [2] のような干渉除去を駆使した MAC プロトコルなど L2 の取り組みも始まっている．筆者らは，既に取り組みが始まっている新しい L1 技術の中でも，無線全二重通信方式に着目して研究を進めている [3–6]．

無線全二重通信方式は，同じ無線の周波数帯で同時に送信しながら受信することが可能な通信である [5, 6]．従来の無線通信は，送信電力に対して受信機の受信電力が小さすぎるために自身の送信電波により受信電波が打ち消され，半二重通信しかできなかった．しかしながら，アナログ干渉除去技術とデジタル干渉除去技術の発展により，無線全二重通信が実証できるようになった．例えば，文献 [7] では，アナログ干渉除去とデジタル干渉除去を含めて最大 110 dB の自己干渉除去を達成している．実証実験でも，無線半二重通信と比較して無線全二重通信が 1.87 倍のスループットを達成することを示している．

L1 で無線全二重通信が可能になると，L2 のデザインも変えなければならない．例えば，無線全二重通信では，干渉除去性能を最大化するために上りの通信と下りの通信のタイミングと電波の放出期間を揃える必要がある．これに向けて，L1 での busytone の利用や，L2 での同期式の MAC プロトコル [8,9] や非同期式の MAC プロトコル [3,4,10] が提案されている．

無線全二重通信方式をアドホックネットワークやメッシュネットワークなどのマルチホップ通信に利用することもできる．通常の無線全二重通信方式では，図 6(a) に示すように，2 つのノード間で同時に通信が発生する．一方で，図 6(b) のように，マルチホップ通信の中継ノードにおいてフレームを受信しながら次のホップにフレームを送信する際にも無線全二重通信を利用できる．本稿では，このような中継に無線全二重通信を利用する形態を中継全二重通信と呼ぶ．無線全二重通信をマルチホップ通信に適用することで，干渉範囲や送信タイミングが変わってくるため，様々な MAC プロトコルの研究がなされている [3,4,9,11–13]

3. 要件

無線全二重通信のような新しい L1 や L2 を前提とした場合に，これまでアドホックネットワークやメッシュネットワークで用いられてきた AODV や DSR などのルーティングプロトコルはそのまま利用することができるだろうか？この疑問が本稿の取り組みの出発点である．

ワイヤレスネットワークで性能を評価する方法として，数値解析，シミュレーション，フィールド試験が挙げられる．数値解析は，ワイヤレスネットワークを抽象化して近似式を用いて性能評価をする手法である．ワイヤレスネットワークでは下の層である L1 に近づけば近づくほど，実用上の目標値となる理想的な状況での限界値が重要であるため，数値解析が利用される傾向がある．しかしながら，ワイヤレスネットワークにおける数

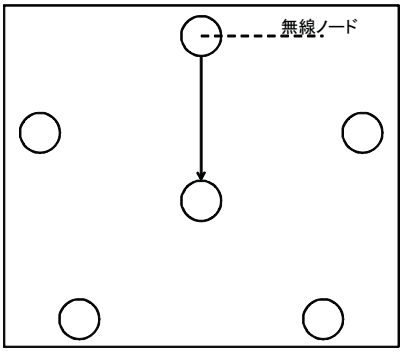


図 1 これまでの無線通信

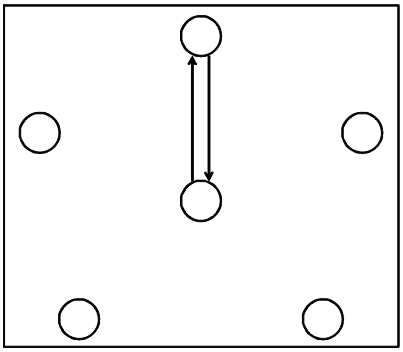


図 2 無線全二重通信

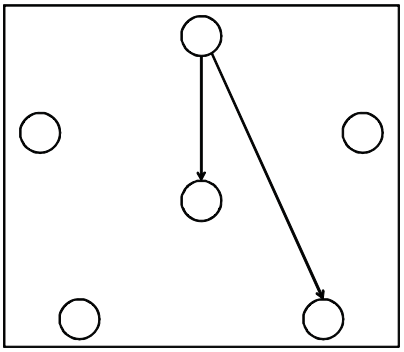


図 3 重畳符号化通信

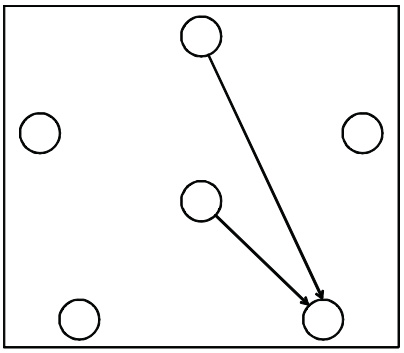


図 4 逐次干渉除去

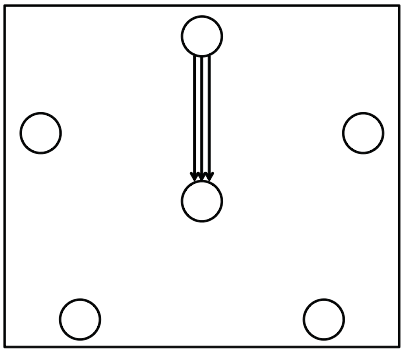


図 5 MIMO

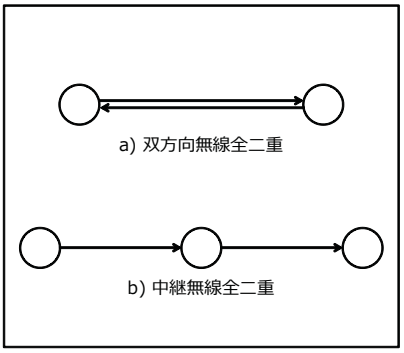


図 6 無線全二重通信方式の種類

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

値解析ではモデリング誤差が無視できないため，L2 や L3 などの周囲のノードの通信などの外乱によって複雑さが増す上位層に近づけば近づくほど現実との乖離が生じてしまう．特にルーティングプロトコルなどの制御パケットの存在や実現方式の影響が大きい技術を評価することには数値解析は向いていない．

一方で，フィールド試験を用いることで最終的なシステムに近い形である全階層の検証を行うことができる．フィールド試験とは，評価の対象となる実システムを構築，稼動して，任意の環境において実稼動評価する手法である．しかしながら，フィールド試験は実施コストが大きいという問題がある．また，フィールド試験では，ソフトウェア無線技術等の利用によって実施コストが下がったとしても，試験実施環境の電波伝播や，外乱 (周囲の車の動き，大気の状態，他のシステムからの干渉波) が環境固有であり，評価パラメータの網羅性や再現性に欠けるという問題がある．

筆者らは，既にルーティングプロトコルの評価の実績のあるネットワークシミュレータを用いて無線全二重通信方式が AODV や DSR に与える影響を検証する．これに向けては，
(1) ネットワークの全階層が提供されていること
(2) オープンソースで利用できること
(3) 研究コミュニティにおいて実績があること
の 3 つを満たす必要がある．

「(1) ネットワークの全階層が提供されていること」は，本研究の目的が，L1 技術である無線全二重通信方式が L3 技術に与える影響を調べるといった層を跨った検証であることに起因する．ワイヤレスネットワークにおけるシミュレーションでは，検証対象以外の層は理想的であるという前提で設計されているものが多い．本研究では，下位層が上位層に与える影響の検証という目的に鑑み，ネットワークシミュレータの中でも L1 から L4 まで実現されていることが必要となる．この要件を満たすシミュレータとしては，QualNet [14]，ns-3 [15]，OMNeT++ [16] INET Framework の 3 つが挙げられる．

「(2) オープンソースで利用できること」は本研究の目的が研究課題を見つけることにあることから重要である．本研究の成果はウェブ上において公開し，他の研究者が自由に本研究の結果を追試して改良できるようにしたい．そのためには，オープンソースで誰でも自由に利用できることが望ましい．このような観点では，QualNet は商用のシミュレータであるため，本研究の選択肢からは消える．

「(3) 研究コミュニティにおいて実績があること」は必須要件ではない．しかしながら，候補として残った ns-3 と OMNeT++ INET Framework は共に完成度が高く，オープンソースであり，甲乙つけがたい．そこで，ユーザコミュニティの観点において，無線全二重通信方式の研究が多くなされている ACM SIGCOMM コミュニティ，ACM SIGMOBILE コミュニティでの利用実績が多いことから [17–24]，本研究では ns-3 を用いることとした．

ns-3 はオープンソースで開発されている離散イベント駆動型のネットワークシミュレータである．2006 年から教育・研究を目的として開発が始まり，2008 年に最初のバージョンがリリースされた．Washington 大学の Tom Henderson，INRIA の Walid Dabbous，Mathieu Lacage を中心に現在も開発が進んでいる．

4. ns-3 上への無線全二重通信の実装

2 節，3 節での議論を元に，ns-3 上に無線全二重通信モジュール fdwifi を実装した．fdwifi は，ns-3 が標準として提供している wifi モジュールを，他のモジュールとの接続性を損なうことが無いように必要最小限の変更を加えて実装したものである．2 つのノード間で相互に同時通信を行う際に無線全二重通信を行う FD-MAC と，中継時に無線全二重通信を行う RFD-MAC [3] の 2 つに対応している．ソースコードは全て `sdlabo.org` [25] にて公開している．

4.1 ns-3 が提供するモジュール

ns-3 では，1. 共通，2. プロトコル，3. ユーティリティ，4. デバイスの 4 つに分類されるモジュールが提供されている．これらのモジュールは C++で記述されており，ユーザはこれらのモジュールを Python や C++を用いて接続することで各種シミュレーションを構築する．筆者らが実装する fdwifi は，既存のモジュールとの接続性を損なわないように設計する必要がある．

1 つ目の共通モジュールとしては，internet モジュール，network モジュール，mobility モジュールなどの現在のコンピュータネットワークで基本となる一般的な機能が提供されている．例えば，internet モジュールでは，TCP (Transmission Control Protocol) や UDP (User Datagram Protocol) などの L4 (トランスポート層) のプロトコル，IP (Internet Protocol) や ARP(Address Resolution Protocol) などの L3 のプロトコルを利用できる．

2 つ目のプロトコルモジュールとしては，特定の用途で利用される様々なプロトコルが提供されている．例えば，AODV，DSR，OLSR (Optimized Link State Routing) などのルーティングプロトコルや，OpenFlow の機能がそれぞれ aodv モジュール，dsr モジュール，olsr モジュール，openflow モジュールとして利用できる．

3 つ目のユーティリティモジュールとしては，シミュレーションやデバッグに必要な機能が提供されている．XML 形式のファイルに書き込まれたノードの動作をアニメーション表示する機能，シミュレーション結果の平均値・最大値・最小値などを算出する機能，シミュレーション結果をデータベースや各種フォーマットに変換する機能などがモジュールとして利用できる．

fdwifi で変更を加えるのは 4 つ目のデバイスモジュールだけである．デバイスのモジュールとしては，様々なデバイスの L2 と L1 の機能が提供されている．無線通信のためのモジュールとしては，IEEE 802.11，IEEE 802.15.4，IEEE 802.16，LTE などがそれぞれ wifi モジュール，lr-wpan モジュール，wimax モジュール，lte モジュールとして利用できる．有線通信のためのモジュールとしては，IEEE 802.3 が csma モジュール，RS-232，RS-422 などの各種 1 対 1 通信方式が point-to-point モジュー

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

ルとして利用できる．

本実装では，デバイスモジュールで提供されている wifi モジュールを上位層との接続性を損なわないようにしながら拡張して無線全二重通信方式を実装する．

4.2 wifi モジュールの解析

図 7 に ns-3 で提供されている wifi モジュールの全体像を示す．wifi モジュールは大きく分けて，デバイスドライバ，L2 (データリンク層)，L1 (物理層)，レート制御の 4 つに分けられる．図 7 の実線の四角がクラスと一致している．

デバイスドライバ

デバイスドライバは外部の L3 のモジュールと wifi モジュールを接続するためのインタフェースの役割を担う．WifiNetDivice クラスとして実装されている．既存の上位層のモジュールからそのまま fdwifi を利用できるようにするためには，WifiNetDivce は変更すべきではない．

L2 (データリンク層)

L2 は通信インタフェースの動作モードの設定，DCF (Distributed Coordination Function) の制御，フレームの送受信の制御などの役割を担う．デバイスドライバである WifiNetDevice クラスと直接やり取りするのが WifiMac クラスである．通信インタフェースの動作モードにアドホックモードを用いる場合には AdhocWifiMac クラスを，アクセスポイントとして動作させる場合には ApWifiMac クラスを，端末として利用する場合には StaWifiMac クラスを用いる．デバイスドライバと直接やり取りをする部分であるため，WifiMac クラスは変更しないことが望ましい．

実際の L2 の送受信制御は，DcaTxop クラスが送信キューの管理を，DcfManager クラスがバックオフや NAV (Network Allocatoin Vector) などの時間の制御を，MacLow クラスが DATA/ACK/RTS/CTS などのフレームの送受信をそれぞれ担っている．

L1 (物理層)

L1 は物理インタフェースの状態，信号の送受信を制御する役割を担う．WifiPhyStateHelper クラスでは，物理インタフェースの Idle，Busy (Clear Channel Assessment)，TX (Transmission)，RX (Reception) の 4 つの状態を管理している．InterferenceHelper クラスと YansErrorRateModel クラスでは，受信信号から SNR (Sginal to Noise Ratio) や PER (Packet Error Rate) を算出する．エラーモデルを変更したい場合には，YansErrorRateModel クラスを置き換えれば良い．実際，wifi モジュールでは NistErrorRateModel クラスも提供されている．

YansWifiPhy クラスは，信号の送信と受信の開始や終了を制御するための機能を提供する．YansWifiChannel は，受信範囲内にいるノードとの信号をやりとりして送信遅延や伝搬損失を算出する機能を提供する．

レート制御

L2 と L1 を統合してレートを制御する役割を担うのが ConstantRateWifiManager クラスである．ConstantRateWifiManager では固定レートの通信を提供している．チャネルの状況に応じてレートを制御するなどの機能を実現したい場合には ConstantRateWifiManager クラスを変更する．実際に，wifi モジュールでは，ARF (Automatic Rate Fallback) [26] を用いる場合は ArfWifiManager クラス，AARF (Adaptive ARF) [27] を用いる場合は AarfWifiManager クラス，AARF-CD (AARF Collision Ditection) [28] を用いる場合は AarfcdWifiManager クラスが利用できる．

4.3 fdwifi モジュールの実装

図 8 に実装した fdwifi モジュールの全体像を示す．色つきの四角が改変を加えたクラスである．RFD-MAC で必要となる隣接ノードを管理する SurroundingNodeTable を追加した以外は fdwifi のクラス構造をそのまま使用している．

また，wifi モジュールと連携する他のモジュールとのインタフェースに関係する部分は変更せずに実装することに成功した．具体的には， 1) デバイスドライバである WifiNetDevice クラス，2) デバイスドライバと L2 とのインタフェースである AdhocWifiMac クラスの 2 つには手を加えていない．

レート制御を担う ConstantRateWifiManager クラスも変更を加えずそのまま利用できるようにした．しかしながら，現在

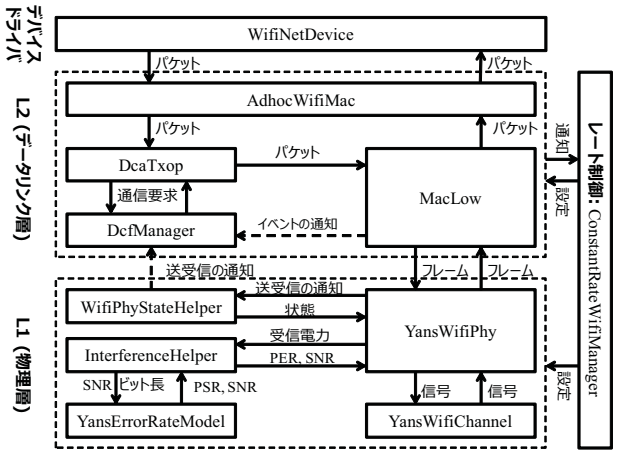


図 7 wifi モジュールの全体像

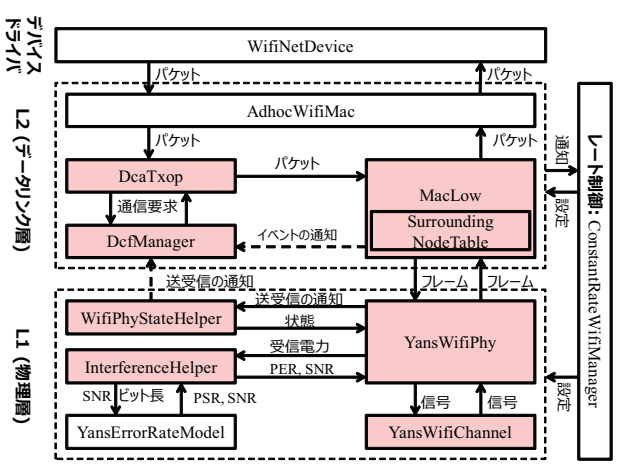


図 8 fdwifi モジュールの全体像: 色つきは拡張部分

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

のところ ARF，AARF，AARF-CD などの他のレート制御の方式と置き換えても動作しない．既存の ArfWifiManager クラス，AarfWifiManager クラス，AarfcdWifiManager クラスは半二重通信にしか対応していないからである．無線全二重通信に対応したレート制御方式自体が今後の研究課題となっている．

L2 (データリンク層)

L2 における wifi モジュールからの 1 つ目の変更点は，RFD-MAC に対応するために近隣のノードの情報を格納する SurroundingNodeTable クラスを追加して MacLow クラスからアクセスできるようにしたことである．MacLow クラスは，SurroundingNodeTable クラスを用いて周囲のノードの情報を取得して，文献 [3] に記載されている RFD-MAC のアルゴリズムに従って無線全二重通信の可否や宛先を決定する．

L2 における 2 つ目の変更点は，FD-MAC と RFD-MAC の両方に対応できるようにしつつも IEEE 802.11 ヘッダの構造を保つように MAC ヘッダを設計したことである．中継全二重通信を実現する RFD-MAC では，自分から中継局を指定するアドレスと，中継局から中継先を指定するアドレスの 2 つが必要となる [3]．さらに，RFD-MAC では無線全二重通信することができる後続パケットを保持しているかどうかを通知するための仕組みが必要となる．

IEEE 802.11 の MAC ヘッダでは，Address 1 フィールドが受信ノード，Address 2 フィールドが送信ノード，Address 3 フィールドがルータのアドレスとして使用されている [29]．そこで fdwifi では，中継局から中継先を指定するアドレスを Address 4 フィールドに設定するようにしてある．FD-MAC のように双方向全二重通信する場合には，Address 4 フィールドに対して，Address 2 フィールドに設定されている送信ノードと同じアドレスを設定することで対応している．さらに，無線全二重通信することができる後続パケットを保持しているかどうかも同様に IEEE 802.11 ヘッダの MoreData フィールドに設定する．

L2 における 3 つ目の変更点は，無線全二重通信の開始と終了を制御する仕組みの追加である．具体的には，DcaTxop クラスに対して無線全二重通信を開始する機能を追加し，DcfManager クラスに対して無線全二重通信の開始判定や終了時間を制御する仕組みを導入した．

L1 (物理層)

L1 では，WifiPhyStateHelper クラスにおいて管理されていた Idle, Busy，TX，RX の 4 つの状態に加えて新たに FD (Full-duplexing) を加えた．また，InterferenceHelper において，無線全二重通信時の PER の計算方法を変更した．具体的には，無線全二重による干渉がまだ発生していない MAC のヘッダ部分で SNR を取得し，フレームの長さ調整に使用している busytone 部分を除いて PER を算出するようにした．さらに，YansWifiChannel において他のノードとの無線全二重通信開始・終了を通知・受信する仕組みを追加した．

5. 評価

無線全二重通信方式が L3 にどのような影響を与えるかを検証するために，ns-3 が提供するルーティングプロトコルと実装した fdwifi を組み合わせて end-to-end スループットを計測した．L2 以外の層が理想的であると想定した場合として，筆者らが過去の研究で利用していた L2 のシミュレータ Tsubasa との比較も行った．理想的な L3 とは，本稿では，送信元と宛先の 2 つのノードを指定した場合に，制御パケットをやりとりすることなく，最短のホップ数でルーティングするプロトコルを意味するものとする．

表 1 シミュレーション環境

	L2 シミュレータ (Tsubasa)	ns-3
L3	最短経路・制御パケット無し	AODV or DSR
L2	RFD-MAC	RFD-MAC
L1	距離による 1/0 判定	信号強度による PER 判定

表 1 にシミュレーション環境を示す．Tsubasa の L3 は制御パケットを用いず，送信元から常に最短のホップ数で宛先に到達できる理想的なルーティングプロトコルを仮定している．Tsubasa の L1 は，通信距離によって通信できる・通信できないの 1/0 で判定をしている．例えば通信距離を 100 m に設定していた場合，ノード間の距離が 100 m 以下の場合は通信でき，100 m を超える場合には通信できない．また，通信距離を超えた範囲には干渉の影響は無いと仮定している．

一方で，ns-3 の L3 は DSR や AODV を想定しているため，制御メッセージのオーバヘッドが存在したり，経路の決め方によって常に最短経路が選ばれるとは限らない．ns-3 の L1 は，2 ノード間の距離，送信電力，伝搬モデルから到達する信号強度を算出して，エラーモデルから SNR に基づいて PER を算出するため，通信距離範囲外のノードにも干渉の影響が発生する．

それぞれの評価では，直線トポロジを用いた．ノードを左から右に等間隔で並ぶように配置し，最も左側にいるノードが最も右側にいるノードを宛先としてパケットを送信して，最も右側にいるノードがパケットを受け取る．L1 の伝送レートは IEEE 802.11a の最低レートである 6 Mbps とした．

5.1 無線半二重通信時の基本性能 (2 ホップ)

まず，ns-3 におけるワイヤレスネットワークの基本性能を確認するために，wifi モジュールを用いて半二重通信の 2 ホップでの性能評価を行った．L2 は全て 802.11 DCF である．ns-3 の L3 は AODV と DSR の 2 種類，Tsubasa の L3 は理想的なソースルーティングの 1 種類である．3 ノードによる 2 ホップの直線トポロジにおいて，発生させるトラヒックを 0〜6 Mbps に変化させた．各ノード間の距離は通信限界である 100 m とした．

図 9 にシミュレーション結果を示す．まず，理想的な L3 (Tsubasa) と AODV の結果がほぼ一致していることが分かる．スループットが 3 Mbps 弱で飽和しているのは，中継時に帯域幅が L1 の伝送レート 6 Mbps の半分になるからだと考えられる．また，DSR のスループットが AODV よりも低いことが分かる．原因の考察は 5.2 節にて行う．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

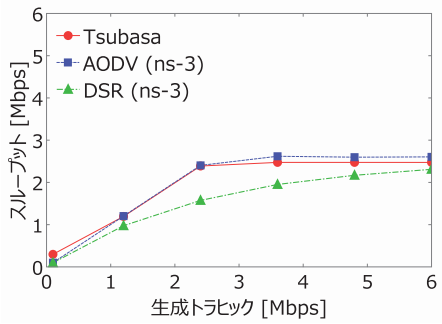


図 9 無線半二重通信のスループット．直線トポロジで 2 ホップ．伝送レートは 6 Mbps．L2 は 802.11 DCF.

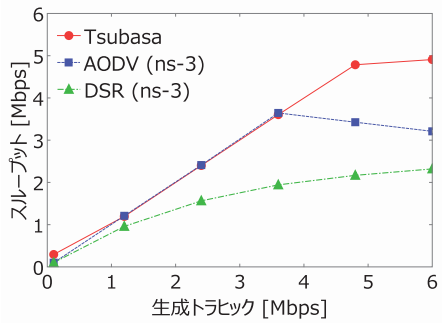


図 10 無線全二重通信のスループット．直線トポロジで 2 ホップ．伝送レートは 6 Mbps．L2 は RFD-MAC [3].

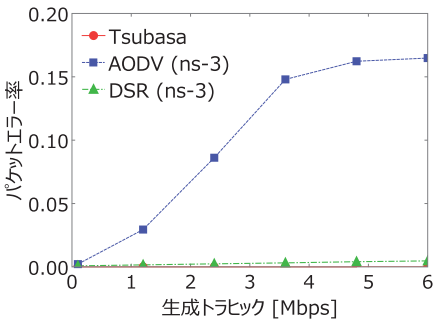


図 11 無線全二重通信のパケットエラー率．直線トポロジで 2 ホップ．伝送レー トは 6 Mbps．L2 は RFD-MAC.

5.2 無線全二重通信時の基本性能 (2 ホップ)

次に，無線全二重通信と AODV，DSR を組み合わせた時の基本性能を確認するために，fdwifi モジュールを用いた場合の 2 ホップでの性能評価を行った．L2 は全て中継全二重通信に対応した RFD-MAC [3] である．ns-3 の L3 は AODV と DSR の 2 種類，Tsubasa の L3 は理想的なソースルーティングの 1 種類である．3 ノードによる 2 ホップの直線トポロジにおいて，発生させるトラヒックを 0〜6 Mbps に変化させた．各ノード間の距離は通信限界である 100 m とした．

図 10 にシミュレーション結果を示す．予想としては，半二重通信と同様に，理想的な L3 (Tsubasa)，AODV (ns-3) は同等の性能が得られると考えていた．しかしながら，AODV は無線全二重通信によるスループットの向上は見られるものの，理想的な L3 (Tsubasa) よりも低いスループットしか達成できなかった．

AODV が理想的な L3 よりも低いスループットしか達成できなかった原因を調査するために，同じ環境でのパケットエラー率の計測を行った．図 11 に計測結果を示す．Tsubasa に比べて，AODV がはるかにパケットエラー率が高いことが分かる．Tsubasa では通信範囲を超えた領域には干渉が及ばないことを仮定しているのに対して，ns-3 では受信信号強度に基づいてパケットエラー率を算出しているため，干渉が及ぶ範囲が広いからだと考えられる．

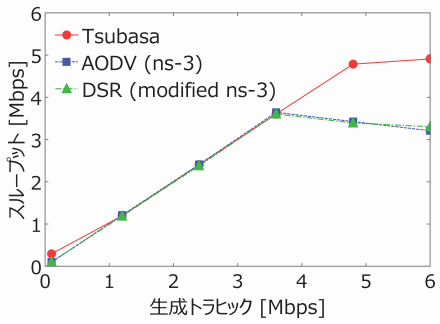


図 12 ns-3 の DSR の実装に手を加えた場合の無線全二重通信のスループット．直線トポロジで 2 ホップ．伝送レー トは 6 Mbps．L2 は RFD-MAC.

一方で，DSR は AODV と比較して半分以下の性能しか出ていない．DSR のスループットが低い現象は 5.1 節の無線半二重通信での評価でも発生した．

DSR のスループットが低い原因を調査したところ，ns-3 における DSR の実装方式に依存していることが分かった．ns-3 の DSR では，経路切断時に直ちに別の経路が選択されるように，同じ宛先のパケットは L2 に 1 つしか渡さないような工夫を行っている．具体的には，L2 においてある任意の宛先の送信が成功したことが分かる ACK を受信するまでは L3 から L2 に同じ宛先を持つパケットを渡さない．しかしながら，中継全二重通信を行う場合，1 ホップ先のノードが確実に，さらに次のノードにパケットを送る準備ができている必要がある．現在の ns-3 における DSR の実装では，中継全二重通信を発生させたいタイミングに L2 にパケットが揃っていないという事象が発生しているため，無線半二重通信と同程度の性能しか出ていない．

ns-3 における DSR の実装の問題を検証するために，L3 から L2 に無条件でパケットを渡すように変更して再度シミュレーションを行った．図 12 にシミュレーション結果を示す．図 12 から分かるように，ns-3 の AODV と DSR が同程度のスループットを達成していることが分かる．

このように，2 ホップの場合においては，ns-3 の DSR を修正すれば無線全二重通信の性能を引き出せる．しかしながら，先ほども述べたように，無線全二重通信の妨げとなっている仕組みは本来はリンクロスからの回復を早くするために導入されたものと予想される．すなわち，他の環境 (例えばノードが移動するような環境) で今回修正を加えた DSR を用いると著しく性能が劣化することが予想される．無線全二重通信を実現するという L1 の影響が L3 まで波及した例であるとみることができる．

5.3 ノード間の距離が通信限界よりも短い場合の評価

これまでの評価はノード間の距離が通信限界であるという前提であった．ノード間の距離が通信限界の場合は，理想的な L3 を想定している Tsubasa よりもスループットは低下するものの，ns-3 の AODV は半二重通信よりも高いスループットが得られていた．しかしながら，アドホックネットワークやメッ

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

シュネットワークにおいてノード間距離が常に通信限界であるとは考えがたい．特にアドホックネットワークでは車車間通信などノードが移動する場合も考えられる．このような観点から，ノード間距離が通信限界よりも短いために干渉の影響が強くなると予想される環境での評価を行った．

図 13 に，評価環境を示す．10 ノードを等間隔かつ直線状に配置して，end-to-end の距離を変化させた．End-to-end の距離が近い場合はホップ数が少なく，遠い場合にはホップ数が増加する．L2 は全て無線半二重通信の 802.11 DCF と，中継全二重通信に対応した RFD-MAC [3] である．ns-3 の L3 は AODV と DSR の 2 種類，Tsubasa の L3 は理想的なソースルーティングの 1 種類である．トラヒックは 6 Mbps の固定，各ノードの通信限界は 100 m である．

図 14 と図 15 にそれぞれ無線半二重通信と無線全二重通信の評価結果を示す．無線半二重通信に関しては，Tsubasa と ns-3 の傾向が一致していることが分かる．一方で，全二重通信に関しては，Tsubasa と ns-3 の結果で大きく乖離が見られた．例えば，Tsubasa ではスループットが 0 になる点がほとんど見られなかったのに対して，ns-3 では AODV と DSR で共に end-to-end の距離が短い場合，すなわち，ホップ数が短い場合でもスループットが極端に低い結果が多発した．全体としても，ns-3 の評価では半二重通信の方が全二重通信よりも高いスループットを達成している傾向にある．Tsubasa の L1 が通信限界を超えたノードには干渉の影響がないモデルを用いているのに対して，ns-3 の L1 は通信限界を超えたノードにも干渉を与えるモデルに起因すると考えられる．ns-3 の方が現実に近いモデルであるため，通信限界よりも近いノードが多数存在するような環境では RFD-MAC は有効ではない可能性が高い．

また，ns-3 では，無線半二重通信と無線全二重通信共に，数 m 距離が異なるだけで性能が大きく変わる現象が見受けられる．この現象は制御パケットがデータパケットよりもパケットエラー率が低くなるからだと考えられる．制御パケットはデータパケットよりも短い．ns-3 では，BER (Bit Error Rate) に基づいてパケットエラー率を算出しているため，パケットが短いほどパケットエラー率が低くなる．すなわち，制御パケットのやり取りによって通信できると判定された経路がデータフレームでは通信できない現象が発生するために，スループットが著しく低下している点が発生しているのだと予想している．

6. おわりに

本稿では，ns-3 に対する中継全二重通信可能な fdwifi モジュールの実装について述べた．ns-3 を用いて無線全二重通信が L3 のプロトコルに与える影響を検証したところ，以下のことが分かった．

- ns-3 における現状の DSR の実装では，L1 と L2 を無線全二重通信に対応させたとしても性能が全く向上しない．この現象はリンク断絶時に早く回復する工夫に依るものであるため，シミュレーションだけでなく，実際の実装においても同様の問題が発生する可能性がある．
- 各ノード間の距離が通信限界にある場合は，無線全二重通信を用いたとしても ns-3 の AODV と，ns-3 と異なる単純化された L1 と L3 を具備した L2 シミュレータで同様の傾向が得られる．
- 各ノード間の距離が通信限界よりも短い場合には，AODV や DSR を用いると，無線全二重通信に対応していたとしても無線半二重通信よりも性能が低くなる．
- 各ノード間の距離が通信限界よりも短い場合には，無線全二重通信を用いると，ns-3 の評価結果と，ns-3 と異なる単純化された L1 と L3 を具備した L2 シミュレータとでは，全く異なる結果が得られる．

無線全二重通信だけでなく，重畳符号化，逐次干渉除去，MIMO などの新しい技術が L1 に導入されたとすると，L2 だけでなく L3 も含めて抜本的に作り直さなければならない可能性が示唆されたと言える．

参考文献

[1] Gollakota, S. and Katabi, D.: ZigZag Decoding: Combating Hidden Terminals in Wireless Networks, *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication 2008 Conference on Data Communication (SIGCOMM'08)*, pp. 159–170 (2008).
[2] Li, T., Han, M. K., Bhartia, A., Qiu, L., Rozner, E., Zhang, Y. and Zarikoff, B.: CRMA: Collision-resistant Multiple Access, *Proceedings of the 17th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11)*, Las Vegas, Nevada, pp. 61–

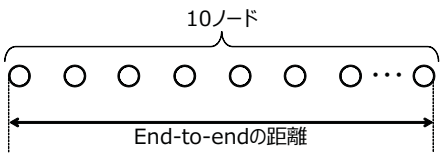


図 13 10 ノードの直線トポロジにおいて end-to-end の距離を変えた場合の評価環境

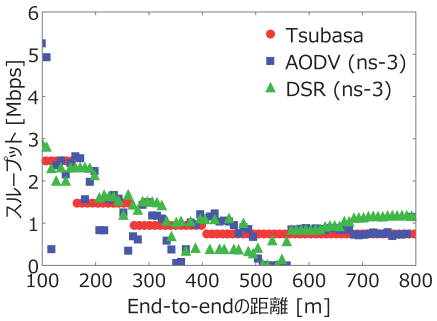


図 14 半二重通信において，10 ノードの直線トポロジでの end-to-end の距離を変えた場合のスループット

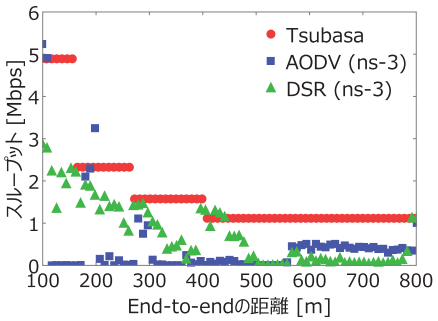


図 15 全二重通信において，10 ノードの直線トポロジでの end-to-end の距離を変えた場合のスループット

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

72 (2011).
[3] Tamaki, K., Rapitino, A., Bandai, M., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Full Duplex Media Access Control for Wireless Multi-hop Networks, *Proceedings of the 77th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'13)* (2013).
[4] 杉山佑介，玉置健太，猿渡俊介，渡辺　尚：マルチホップ無線全二重通信における指向性メディアアクセス制御方式，電子情報通信学会論文誌， Vol. J96-B, No. 7, pp. 753–766 (2013).
[5] 西田昇平，山崎景太，猿渡俊介，渡辺　尚：無線中継局と干渉除去におけるブロードキャスト通信に関する考察，情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム，pp. 1–9 (2014).
[6] 中川　翔，杉山佑介，木崎一廣，猿渡俊介，渡辺　尚：無線通信の高速化に向けた中継全二重通信のための全二重無線通信装置の基礎的実装，情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム，pp. 1–13 (2014).
[7] Bharadia, D., McMilin, E. and Katti, S.: Full Duplex Radios, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on Data Communication (SIGCOMM'13)*, pp. 375–386 (2013).
[8] Sahai, A., Patel, G. and Sabharwal, A.: Pushing the Limits of Full-duplex: Design and Real-time Implementation, Technical report, Rice University TREE1104 (2011).
[9] Miura, K. and Bandai, M.: Node Architecture and MAC Protocol for Full Duplex Wireless and Directional Antennas, *Proceedings of the 23th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'12)*, pp. 385–390 (2012).
[10] Jain, M., Choi, J., Kim, T. M., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. and Sinha, P.: Practical, Real-time, Full Duplex Wireless, *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11)*, pp. 301–312 (2011).
[11] Cheng, W., Zhang, X. and Zhang, H.: RTS/FCTS Mechanism Based Full-duplex MAC Protocol for Wireless Networks, *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'13)*, pp. 9–13 (2013).
[12] Goyal, S., Liu, P., Gurbuz, O., Erkip, E. and Panwar, S.: A Distributed MAC Protocol for Full Duplex Radio, *Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 788–792 (2013).
[13] Fukumoto, M. and Bandai, M.: MIMO Full-duplex Wireless: Node Architecture and Medium Access Control Protocol, *Proceedings of the IEEE Seventh International Conference onMobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU'14)*, pp. 76–77 (2014).
[14] Scalable Network Technologies: QualNet. `http://web.scalable-networks.com/content/qualnet`.
[15] Henderson, T. R., Lacage, M. and Riley, G. F.: Network Simulations with the ns-3 Simulator, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2009 Conference on Data Communication (SIGCOMM'08)*, Seattle, Washington, p. 527 (2008).
[16] Varga, A.: The OMNeT++ Discrete Event Simulation System, *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'01)*, Prague, Czech Republic, pp. 1–7 (2001).
[17] Li, D., Bansal, T., Lu, Z. and Sinha, P.: MARVEL: Multiple Antenna Based Relative Vehicle Localizer, *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, pp. 245–256 (2012).
[18] Bansal, T., Chen, B., Sinha, P. and Srinivasan, K.: Symphony: Cooperative Packet Recovery over the Wired Backbone in Enterprise WLANs, *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'13)*, pp. 351–362 (2013).
[19] Zhu, Y., Zhou, X., Zhang, Z., Zhou, L., Vahdat, A., Zhao, B. Y. and Zheng, H.: Cutting the Cord: A Robust Wireless Facilities Network for Data Centers, *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'14)*, Maui, Hawaii, pp. 581–592 (2014).
[20] Bansal, T., Chen, B., Sinha, P. and Srinivasan, K.: Symphony: Cooperative Packet Recovery over the Wired Backbone in Enterprise WLANs, *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'13)*, Miami, Florida, pp. 351–362 (2013).
[21] Li, D., Bansal, T., Lu, Z. and Sinha, P.: MARVEL: Multiple Antenna Based Relative Vehicle Localizer, *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, Istanbul, Turkey, pp. 245–256 (2012).
[22] Vamanan, B., Hasan, J. and Vijaykumar, T.: Deadline-aware Datacenter TCP (D2TCP), *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM'12)*, Helsinki, Finland, pp. 115–126 (2012).
[23] Cidon, A., Nagaraj, K., Katti, S. and Viswanath, P.: Flashback: Decoupled Lightweight Wireless Control, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM'12)*, Helsinki, Finland, pp. 223–234 (2012).
[24] Zats, D., Das, T., Mohan, P., Borthakur, D. and Katz, R.: DeTail: Reducing the Flow Completion Time Tail in Datacenter Networks, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM'12)*, Helsinki, Finland, pp. 139–150 (2012).
[25] Software Defined Laboratory: SDLab Web site. `http://sdlabo.org`.
[26] Kamerman, A. and Monteban, L.: WaveLAN-II: A High-performance Wireless LAN for the Unlicensed Band, *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 2, No. 3, pp. 118–133 (1997).
[27] Lacage, M., Manshaei, M. H. and Turletti, T.: IEEE 802.11 Rate Adaptation: a Practical Approach, *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Modeling, analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 126–134 (2004).
[28] Maguolo, F., Lacage, M. and Turletti, T.: Efficient Collision Detection for Auto Rate Fallback Algorithm, *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'08)*, pp. 25–30 (2008).
[29] ISO/IEC: *IEEE 802.11 Standard. IEEE Standard for Information Technology* (1999). ISO/IEC 8802-11.

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan