

# Collision detection による超高効率無線伝送方式の無線装置実装に関する 研究開発（継続）

代表研究者	平栗 健史	日本工業大学工学部・准教授
共同研究者	西森 健太郎	新潟大学工学部・准教授
共同研究者	吉野 秀明	日本工業大学工学部・教授

## 1 はじめに

無線通信は、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送技術などの伝送速度の高速化を図る技術が注目され、現在までに様々な研究開発がなされてきた。しかし、MIMO 伝送技術により、PHY (PHYsical) レイヤで伝送速度を上げて結局、MAC (Medium Access Control) レイヤにおけるアクセス制御プロトコルのオーバーヘッドにより、伝送効率が低下し、MIMO 伝送で得られた無線帯域を高効率で十分に利用できない課題がある。また、無線 LAN (Local Area Network) は、ユーザ数およびトラフィック増加に伴い電波干渉やパケット衝突による伝送効率が低下する大きな課題がある。

現在までに、伝送効率低下を飛躍的に改善するため、MIMO フレームを利用した MAC- PHY 融合の新しい衝突検出アクセス制御方式を提案し、輻輳時においても 90%以上の伝送効率を実現することを確認した。この先行研究による成果は、平成 24 年度電気普及財団助成（研究調査）により遂行し、国内の学会および国際会議において数多くの発表や、査読付き論文採録として成果を残している。しかし、これらの評価では、MAC レイヤと PHY レイヤに関する技術をレイヤ毎に個別で評価するに留まっていた。

そこで、本研究では、これまでの検討をベースとした提案方式のトータルでの効果検証を目的として、遅延やパケット損失、再送回数など MAC 層の詳細な評価と、PHY 層の実験による検証を行い、システムの実現性を確認した。

## 2 提案方式の概要と課題

先行研究として高い伝送効率を実現する無線 LAN の衝突検出技術と、そのアクセス制御方式について研究を遂行してきた。図 1 に提案方式の原理を MAC プロトコルで示す。検討する IEEE802.11n [1]ベースの無線 LAN では、AP と端末が信号の同期やチャネル推定をするため、プリアンブルが使用される。この中でショートプリアンブルは、データフレームの先頭検出に用いられ、MIMO 伝送の場合は、片側のアンテナ(図 1 では、アンテナ 1)のみから送信されることを利用する。提案方式では、このショートプリアンブル (SP) が送信されていない未使用のアンテナ 2 でキャリアセンスを行い、信号の衝突を検出する。衝突を検出した場合は送信を即座に中断し、データが送信される前に再送がおこなわれるため、オーバーヘッド削減が可能となる。従来の MIMO 技術[2], [3]ではこのような方法は用いられていないが、本方式では伝送効率の向上を実現する上では非常に有効な手段といえる。先行研究結果は、約 90%の伝送効率を確認した[4]。これは有線 LAN の Ethernet にも匹敵する超高効率伝送と言える。しかし、図 1 で示すように、プリアンブル送信中に干渉波を検知するため、送信アンテナからの回り込みが発生し、受信アンテナで干渉波が埋もれて検知できない課題がある。

そこで、課題を解決する方法として図 2 に提案法のブロック構成を示す。提案方式では、アンテナ 2 で受信した信号を FFT して使用する。FFT 後の周波数領域の受信信号におけるプリアンブルでマッピングされた  $k$  番目のサブキャリアの信号  $r_p(k)$  は、

$$r_p(k) = h_s(k)s_p(k) + h_l(k)s_p(k) + n(k) \quad (1)$$

で示される。ここで、 $h_s(k)$  は  $k$  番目のサブキャリアにおける AP のアンテナ 1-2 間の伝搬チャネル応答であり、 $h_l(k)$  は干渉端末と AP のアンテナ 2 間の伝搬チャネル応答、 $s_p(k)$  は SP 信号、 $n(k)$  は熱雑音である。

SP 信号は既知であるため、SP 送信後に AP のアンテナ 1-2 間の伝搬チャネルを推定する。この結果を  $\tilde{h}_s(k)$  とすると、 $\tilde{h}_s(k) = h_s(k)$  となるため、次の計算を行うことで、干渉局-AP 間の伝搬チャネル  $h_l(k)$  を推定できる。

$$\tilde{h}_l(k) = \frac{r_p(k) - \tilde{h}_s(k)s_p(k)}{s_p(k)} \quad (2)$$

推定された干渉信号  $\tilde{h}_l(k)$  と実際の干渉信号  $h_l(k)$  の推定誤差  $Err$  は以下の式により得られる。

$$Err = \left| \tilde{h}_l(k) / h_l(k) \right| \quad (3).$$

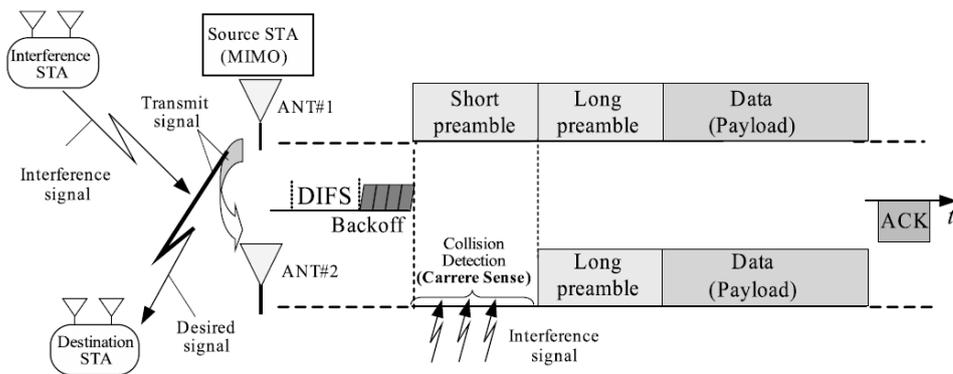


図 1 MIMO フレームを用いた提案方式の伝送手順

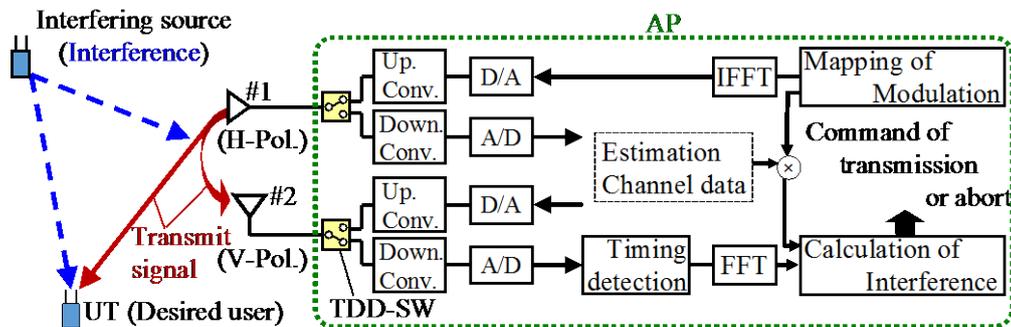


図 2 提案方式のブロック図

### 3 提案方式の計算機シミュレーション評価

#### 3.1 MAC レイヤにおける評価

提案方式および従来方式は、計算機シミュレーション (OPNETModeler) [5]を用いて評価し、比較対象となる従来方式は IEEE802.11g および IEEE802.11n に準拠したアクセス制御方式を用いた。MIMO 伝送の MAC と PHY の協調した伝送特性については、MIMO および Multi-User MIMO のサーベイ論文である文献[6]をベースに評価を行っている。また、本研究の評価結果は、文献[7]-[8]で発表されている。

評価した無線 LAN ネットワーク構成は、1AP(Access Point) のセルに 1~40 台の STA(Station) を帰属させる。発生させたトラフィックは、STA から AP 方向に UDP (User Data-gram Protocol) トラフィックのパケットデータを連続で送信し、パケットの衝突が頻繁に生じる無線環境とした。本評価では、提案方式の衝突検知の効果を解析することを目的とし、MIMO アンテナの機能は衝突検知のみに用いた。図 3 に実効スループット特性、図 4 に伝送効率を示す。

図 3 のスループット特性の評価は、STA 数が 20 台と 40 台のそれぞれを設置したネットワーク構成において評価し、全ての STA (20STAs / 40 STAs) から発生する総トラフィックを横軸とし、AP で受信するデータ全ての総スループット特性を縦軸に示す。各伝送レートの提案方式はトラフィック量が増加した際もわずかにスループットは低下するが、帰属する STA 数に関わらず高いスループットが得られた。従来方式は、トラフィック量を増やすとパケット衝突率も増加するため、再送制御によるオーバーヘッドの影響が大きくなり、スループットは抑制される。また伝送レートが高くなるにつれ、このオーバーヘッドは大きく影響している。

次に、図 3 の伝送効率は、STA 数が 1~40 台へ増加した際の帯域の利用率の変化を評価した。ここで示す伝送効率は、1 台の STA が AP と通信をする際に得られるスループット値を基準 (100%) として、STA 数を増やした際に得られた総スループットを正規化して求めている。1STA 当たりで発生するトラフィック量は、帰属する STA 数の全てで無線帯域が飽和するように設定した。すなわち、図 3 の評価と同様に 12Mbit/s, 24Mbit/s, 54Mbit/s 以上のトラフィックを発生している。また、有線 LAN との伝送効率を比較するために、Ethernet : 100Base-Tx における伝送効率もあわせて評価を行った。従来方式は STA 数が増加すると伝送効率は低下し、伝送レート 24Mbit/s, 54Mbit/s における STA 数 40 台の場合では約 65%となる。一方、提案方式では有線 LAN よりも約 10%低くなるが、STA 数が 40 台まで増加した際も高い伝送効率が維持されている。また伝送レート 12Mbit/s において、提案方式と従来方式は共に他の伝送レートよりも伝送効率は高い特性が得られている。これは、伝送レートが低い場合にはオーバーヘッドの影響は少ないことが原因と考えられ、これらの結果より伝送レートが高くなるほど提案方式は高い効果が得られる。

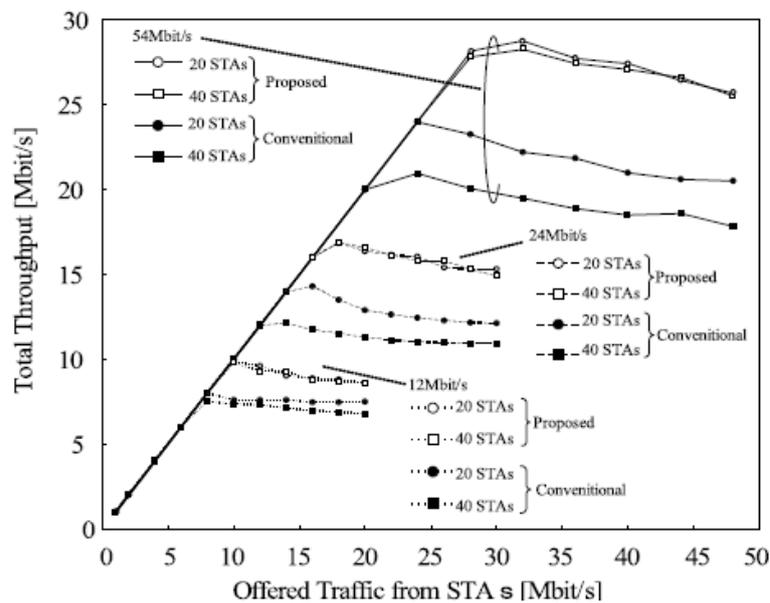


図 3 実効スループット特性の比較

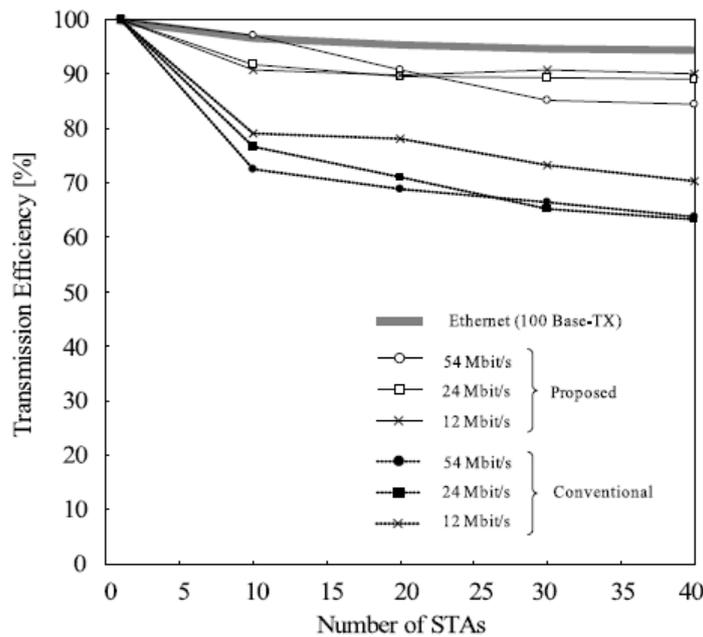
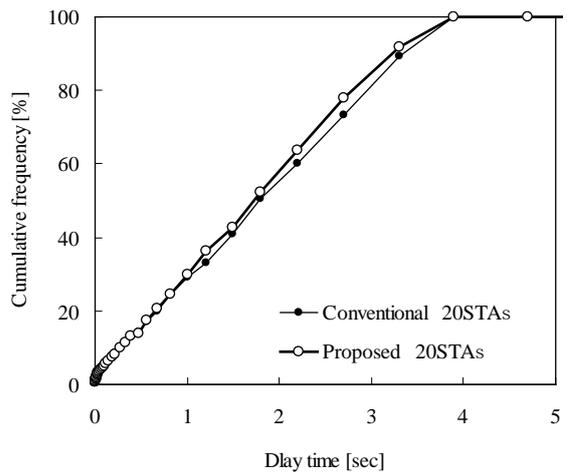


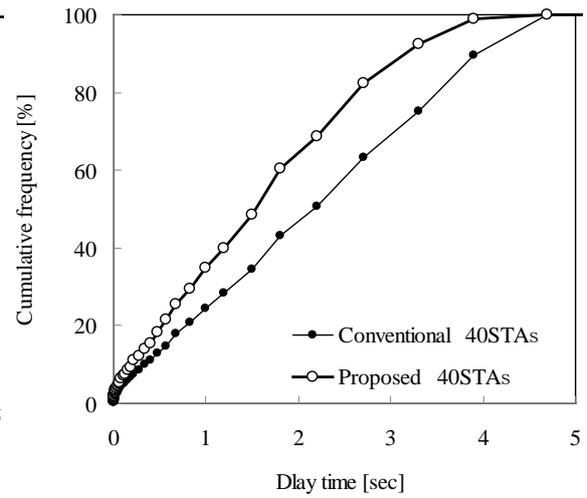
図4 伝送効率の比較

また MAC レベルでの詳細な評価として、遅延時間に対する累積遅延発生頻度を図5に示す。本評価では、STAの帰属台数をそれぞれ20台と40台とし、1台分の遅延の累積を求めている。図5(a)のSTA数が20台の際は、従来方式、提案方式ともにほぼ同じ結果が得られ、約80%の累積頻度が得られる場合は、遅延時間が約2.7secであった。図5(b) STA数が40台の際は、提案方式はほとんど変化が無いのに対し、従来方式の遅延時間が大きくなり、同様に80%の累積頻度が得られる場合には、遅延時間が約3.5secと1sec近く増加した。従来方式は、頻繁に衝突が発生した際には再送制御のためにACKを待つ時間が増えることが原因と考えられる。一方、提案方式は、衝突が頻繁に発生しても、ACKを待つことなく即座に再送制御に処理が移行するため、遅延への影響が非常に少ない。次に、STAの帰属数が40台の際の packets 損失を図6示す。本評価において、packetsの再送回数オーバは7回とし、7回を超えた場合は、packets損失となる。従来方式、提案方式ともに、20Mbit/s以上のトラフィックを発生させた際にpackets損失が発生しているが、従来方式は、提案方式の倍以上のpackets損失が発生した。一方、提案方式のpackets損失は、トラフィック増加時でも約0.3%程度であった。packets損失特と再送回数の関係を確認するために、最後に、従来方式、提案方式のトラフィック量に対する再送回数割合を図7に示す。

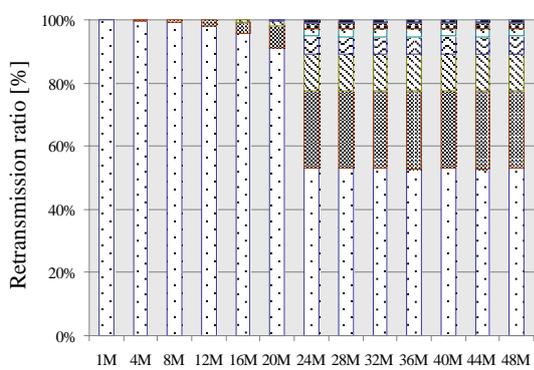
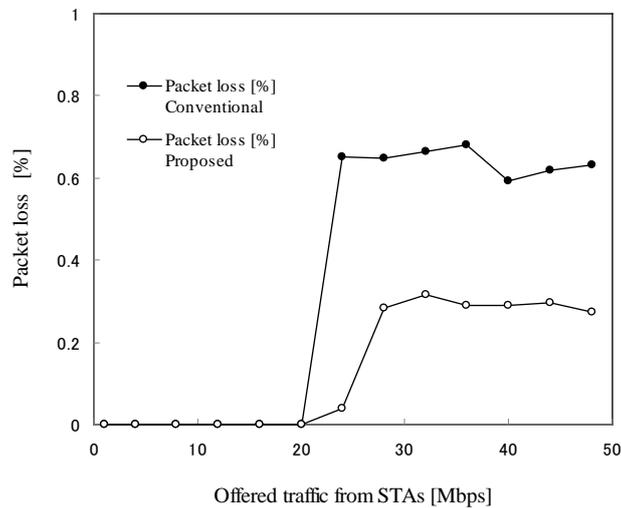
従来方式と提案方式は、packets損失特性からも確認できたように、トラフィックが20Mbit/s以上発生した際に、再送が大きく生じることがわかる。しかし、提案方式は従来方式と比べ再送回数の割合が低いことから、伝送効率の向上に影響していると考えられる。これは、従来方式が再送制御によって待機する端末が増加するのに対し、提案方式では、衝突発生時はわずかに再送処理のために待機するものの、即座に送信できるためトラフィックの輻輳が緩和されていることが予想できる。以上の評価結果により、提案方式は、通信品質に関する影響に対しても高い効果が得られることが確認できた。



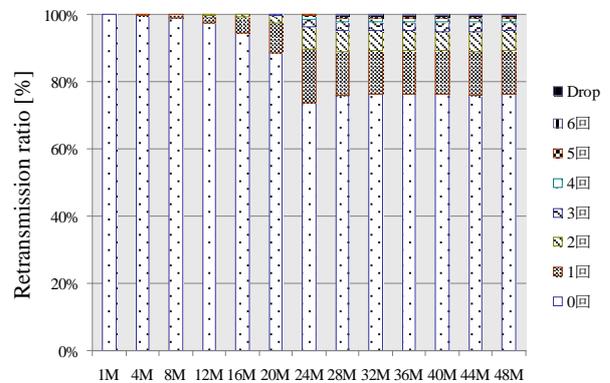
(a) STA 20台接続



(b) STA 40台接続



(a) 従来方式



(b) 提案方式

図5：遅延時間に対する累積遅延発生頻度

### 3.2 PHY レイヤにおける評価

PHY レイヤでは、2. に示した方法を拡張する新たな手法を提案した。

MIMO 技術が商用化されたことをきっかけに、主に端末局の規模を増加させない観点から、基地局に多くのアンテナを有し、複数の端末の伝搬チャネルを仮想的に大規模な MIMO チャネルとみなして基地局と複数の端末で MIMO 伝送を実現するマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 技術が検討されている。MU-MIMO 技術は、最新の無線 LAN および携帯電話のシステムである、IEEE802.11ac や LTE-Advanced で採用されており、さらなる伝送速度の向上をもたらすシステムとして注目を集めている技術である。しかしながら、現在提案されている MU-MIMO では、同時送信を行うグループの端末へのデータが全て揃ってからチャネル推定を開始し、その後全ての端末に同時に送信を行うことになる。そのため、一番初めに発生したデータは待ち時間が長くなってしまい、伝送効率が低下することが問題となる。

そこで、ランダムアクセスを実現する MU-MIMO のアクセス制御方式が提案されている(図 6)。この方式では、同時送信を行うグループの中の 1 つのデータが生成された時点でチャネル推定を開始し、チャネル推定終了時点で生成されているデータを同時送信、その後生成されるデータについても、データが生成され次第送信を行う。これにより、最初に生成されたデータは、他端末宛のデータ生成を待つ必要が無く、送信待機時間を削減することができ、伝送効率が向上することが報告されている。

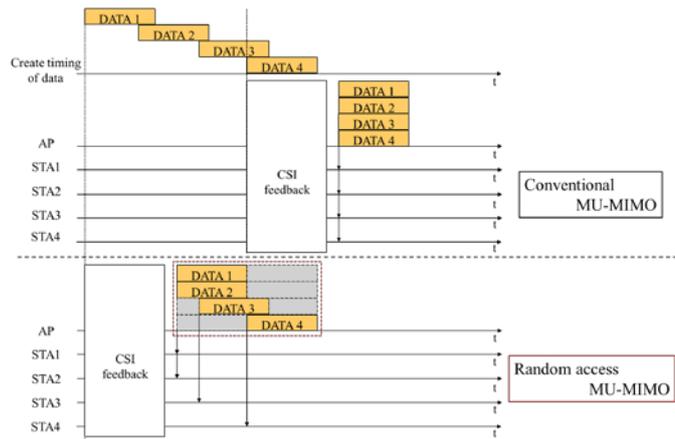


図 6：ランダムアクセスを実現する MU-MIMO のアクセス制御方式

ここでは、ランダムアクセスを実現する MU-MIMO 伝送を用いて、無線 LAN でも有線 LAN のようにデータ送信中の Collision Detection を実現できる方法を提案する(図 7)。ランダムアクセスの MU-MIMO 伝送では、データ生成間隔に送信時間が左右されるため、従来の MU-MIMO より送信を行っている時間は長くなると予想される。

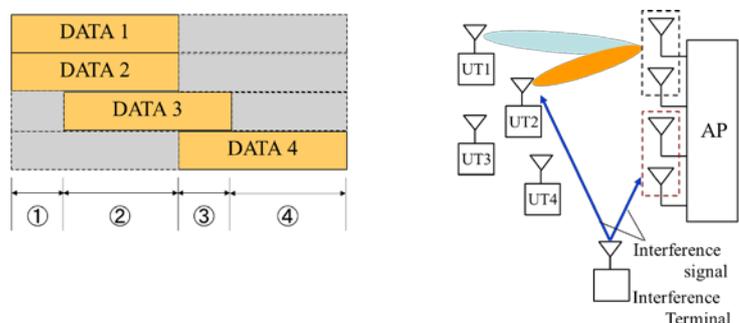


図 7：提案方式の概略図 (PHY)

また、高い伝送速度を実現しようとする、基地局のサービスエリアを小さくし、多数の基地局を密度高く配置する必要があるため、干渉信号の数は多くなる。これらにより、パケット衝突が増え、結果的に伝送効率が低下してしまうことを防ぐために、送信時の干渉信号検出は必要であると考えられる。また、伝送効率を向上させるアグリゲーションを利用する際にも、信頼性を確保することができ、より効率的な伝送が可能になると考えられる。

提案方法では、ランダムアクセスの MU-MIMO 伝送において、全てのデータが揃っていない状態では、全てのアンテナを使用して送信しなくても良いことを利用する。データ送信時に使用しないアンテナを用いて、受信動作を行うことで干渉信号の検出を行う。このとき、自身が送信するデータの先頭を検出するために、送信するデータの先頭にはプリアンブル信号を設定する。受信した信号よりプリアンブル区間を推定し、あらかじめ推定しておいた基地局の送受信アンテナ間の伝搬チャネルと既知のプリアンブル信号の積を差し引くことで、干渉信号の検出を可能にする。本報告では、計算機シミュレーションにより、提案方法を用いる

ことで干渉信号の検出が可能であることを明らかにした (図 8).

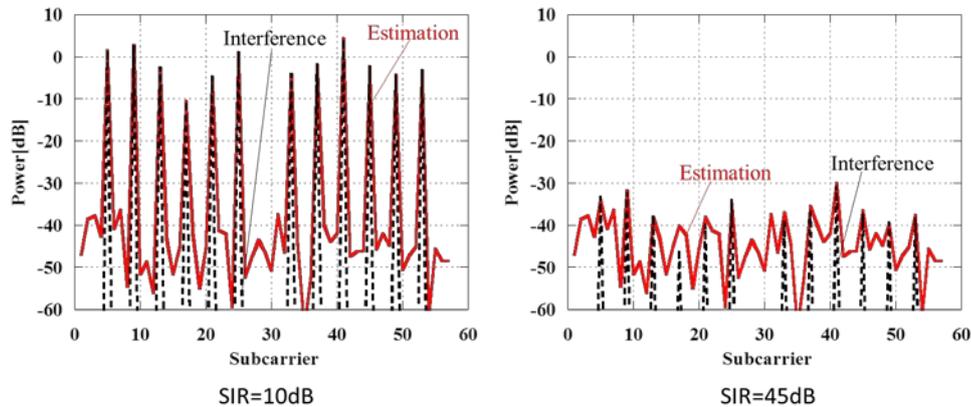


図 8: 提案方式の効果の検証

#### 4 まとめ

本研究の評価結果では、MIMO アンテナを用いた衝突検出技術によるアクセス制御方式の追加の評価を行った。従来方式と比較して、提案方式は、スループットや伝送効率の向上だけでなく、通信品質に関する遅延時間、パケット損失関しても高い効果が得られていることが確認できた。

また、最新規格である IEEE802.11ac による MU-MIMO 伝送における Collision Detection を実現する手法を提案した。提案方法は、ランダムアクセスを実現する MU-MIMO 伝送において、データ送信時に必ずしも AP の全てのアンテナを使用せずに送信を行えることを利用している。提案方法の有効性を確認するため、実測定に基づいたパラメータをもとに、MU-MIMO-OFDM 方式によるシミュレーションを行った。計算結果より、SIR が SNR より低い環境においては、熱雑音に干渉信号が埋もれない限り推定が可能であることを明らかにした。

#### 【参考文献】

- [1] IEEE802.11 Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, March 2012.
- [2] J. H. Winters, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," IEEE J. Select Areas Commun., vol. SAC-5, pp. 871-878, June 1987.
- [3] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," Wireless Personal Commun., vol. 6, pp. 311-335, 1998.
- [4] T. Hiraguri, K. Nishimori, T. Ogawa, R. Kataoka, H. Takase, M. Hideo, "Access control scheme for collision detection utilizing MIMO transmission," IEICE ComEX, Vol. 2, No. 4, pp.129-134, April. 2013.
- [5] OPNET:[http://www.johokobo.co.jp/opnet\\_rd/opnet\\_rd\\_index.html](http://www.johokobo.co.jp/opnet_rd/opnet_rd_index.html)
- [6] T. Hiraguri, K. Nishimori, "Survey of transmission methods and efficiency using MIMO technologies for wireless LAN systems," IEICE Trans. on Commun., Vol.E98-B, No.07, Jul. 2015.
- [7] Yoshiaki Morinoy, Takefumi Hiraguriy, Toshiyuki Ogaway, Hideaki Yoshinoy and Kentaro Nishimori, "Analysis evaluation of collision detection scheme utilizing MIMO transmission," Proc. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2014), Oct. 2014.
- [8] Yoshiaki Morinoy, Takefumi Hiraguriy, Toshiyuki Ogaway, Hideaki Yoshinoy and Kentaro Nishimori, "Analysis evaluation of multiplex transmission using MIMO transmission and A-MPDU for a collision detection scheme in WLAN," Proc. Networks 2014, International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, Sept. 2014.

