無線 LAN におけるランダム長信号を用いた 隠れ端末問題解決法*

山本 健人[†]・稲井 寛[†]

Solution of the Hidden Terminal Problem using Random Length Signals for Wireless LANs*

Kento YAMAMOTO[†] and Hiroshi INAI[†]

The hidden terminal problem is a big problem when we use a wireless LAN. To solve that problem, IEEE 802.11 employs the RTS/CTS scheme which informs, before packet transmission, existence of a sending terminal to the neighbors of the sender and the receiver. However, when offered load increases, collisions of RTS frames also increase and they cause performance degradation. In this paper, we replace an RTS frame with a random length jam signal which does not have any information. The proposed scheme gives a transmission privilege to the terminal which lastly completes the jam signal. Thus the terminal can proceed to the next stage, packet transmission, even if its jam signal is collided. The simulation results show that our scheme improves throughput in comparison with the RTS/CTS scheme.

1. まえがき

端末と集線装置間の配線が不要な無線 LAN[3,7] は利便性と柔軟性に優れている。それらの長所に加え、通信速度の向上や機器の低価格化により、無線 LAN は急速に普及した。現在、その利用場所は会社などの組織内や一般家庭のみならず、店舗、駅、空港などにも広がっている。しかし、無線 LAN は上述のように手軽な利用が可能である反面、無線通信特有の様々な技術的課題を抱えている。それらの中でも通信性能に大きな影響を及ぼすものの一つに隠れ端末問題がある。これは、端末間距離や障害物などの関係で、互いの存在を認識できない端末から送出されたデータフレームが頻繁に衝突することにより、通信性能が大幅に低下する現象である。

隠れ端末問題への対策として、たとえば参考文献[4,5,8–10]では、あらたにサブチャネルを設けたり、あるいは、通信チャネルの一部を割いてサブチャネルとし、そのサブチャネルに送信予約信号や送信中を周知させるための信号を流す方式が提案されている。しかし、制御専用サブチャネルを使用する方式を実現するためには、比較

的複雑な回路が必要となる。そこで、IEEE 802.11[1]では、サブチャネルを設けず、データフレーム用チャネルで RTS (Request To Send), CTS (Clear To Send) とよばれる制御フレームをやり取りする方式を規定している。この RTS/CTS 方式の元となっているのが参考文献[2,6]で提案されている方式である。本論文においてもサブチャネルを使わない方式を検討の対象とする。

RTS/CTS 方式では、データフレーム送信に先立って、端末と AP (Access Point) 間で RTS, CTS フレームをやり取りする。これにより、データフレームを送信しようとしている端末の存在を周囲に知らせて、衝突を回避する。しかし、RTS は通常の CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 手順により送出されるため、端末数が増加すると、衝突の可能性が高くなる。衝突が起これば、再送処理のオーバーヘッドが生じて、通信性能が低下する。

そこで、本論文では、RTS の代わりにランダムな長さのジャム信号（以降、ランダム長信号という）を用い、最後にランダム長信号を送出し終えた端末がデータフレーム送信権を得る方式を提案する。ランダム長信号には何の情報も含まれていないため、衝突の有無を問題にする必要はなく、最後に送出し終えた端末は次のステップであるデータフレーム送信に進むことができる。このような仕組みにより、RTS の衝突および再送による性能低下を大幅に抑えることができる。

* 原稿受付 2012 年 9 月 19 日

[†] 岡山県立大学 情報工学部 Faculty of Computer Science and System Engineering, Okayama Prefectural University; 111, Kuboki, Soja, Okayama 719-1197, JAPAN

Key Words: wireless LANs, IEEE 802.11, hidden terminal problem, RTS/CTS.

以降、2. で標準の隠れ端末問題解決法である RTS/CTS 方式の概要と課題を述べた後、3. でその課題を解決するための方式を提案する。そして、4. で提案方式の性能を評価するためのモデルを構築し、5. でシミュレーションによる性能評価を行って、提案方式の有効性を示す。最後に、6. で本論文で得られた結果のまとめと今後の課題について述べる。

2. RTS/CTS 方式

本章では、標準の隠れ端末問題解決法である RTS/CTS 方式の概要を述べる。簡単のため、Fig. 1 に示す無線 LAN において端末 A から AP へデータフレームを送信する場合を考える。図中の実線、破線の円はそれぞれ端末 A、C の通信範囲を表している。この例では、端末 A と B は互いの通信範囲内に位置している。一方、端末 A と C、端末 B と C は互いに隠れ端末となっている。

Fig. 2 に示すように、データフレーム送信に先立って、端末 A は AP を宛先とする RTS を送信する。この RTS を傍受した端末 B は、その中に書かれている送信期間（当該フレーム送出終了時点から受信側の ACK 返信が終了するまでに要する時間）を自身の NAV（Network Allocation Vector）にセットし、送信動作を停止する。RTS を正常に受信した AP は端末 A を宛先とする CTS を返信する。この CTS を傍受した端末 C は、その中に書かれている送信期間を NAV にセットし、送信動作を停止する。このような RTS/CTS のやり取りにより、送信側である端末 A と受信側である AP の通信範囲内の全端末にデータフレームを送信しようとしている端末（この場合は端末 A）の存在を知らせることができる。これにより、特に送信側端末の通信範囲外にいる隠れ端末（この場合は端末 C）の送信動作を NAV にセットされた期間停止させることによって、隠れ端末相互間のフレーム衝突を回避することができる。

しかし、RTS は通常の CSMA/CA 手順により送出されるため、端末数が増加すると RTS 同士の衝突の可能性が高くなる。衝突が起こると、再送処理のオーバーヘッドが生じて、通信性能は低下する。

3. 提案方式

前章で述べたように、標準方式である RTS/CTS 方式の課題は、端末数増加に伴う RTS の衝突に起因する通信性能の低下である。この課題の解決策として、RTS に相当するフレームが衝突しても、データフレーム送信に進むことを可能にする次のような仕組みを考案した。

データフレームを送信しようとしている端末は、バックオフ期間終了後、チャンネルがアイドルであれば、ランダム長信号を送出する。このとき、隠れ端末もランダム長信号を送出する（あるいはすでに送出している）かもしれない。ところが、信号自体には何の情報も含まれていないため、衝突が起こっても特に問題とはならない。

Fig. 1 A sample wireless LAN

Fig. 2 A sample sequence of RTS and CTS exchange on Fig. 1 wireless LAN

Fig. 3 A sample sequence of random length signal and AP response exchange on Fig. 1 wireless LAN

そして、最後にランダム長信号を送出し終えた端末がデータフレーム送信権を得る。

なお、ランダム長信号を短くして、オーバーヘッドを削減するため、ランダム長信号の長さは、SIFS（Short Inter-Fragment Space）とスロット時間の短い方を単位時間とし、1 単位時間～最大長の範囲で一様乱数により決定されるものとする。最大長については 5.1 で検討する。

また、ランダム長信号同士の衝突を許容するため、ランダム長信号にはフレーム・フォーマットを定めていない。送信側は、上述のように定めた時間、受信側がチャネル・ビジーの判断を持続することができるレベルの任意の信号を送出する。そのため、受信側は、電力検出により、ランダム長信号を認識する。

例として、前章と同様、Fig. 1 の無線 LAN において端末 A から AP へデータフレームを送信する場合を考える。このとき、提案方式を運用した場合の手順を Fig. 3 に示す。端末 C がすでにランダム長信号を送出しているが、これを検知できない端末 A はランダム長信号の送出を開始する。したがって、これらのランダム長信号は衝突するが、このことは特に問題とはならない。AP はランダム長信号の受信終了から SIFS 経過後に CTS に相当するフレーム（以降、AP 応答という）を送出する。自

身のランダム長信号送出終了から SIFS 経過後に AP 応答を受信した端末（この場合は端末 A）は、次のステップであるデータフレーム送信に進む．これに対して、予定した時刻に AP 応答を受信できなかった端末（この場合は端末 C）は、その回のデータフレーム送信を諦めて、ランダム長信号の再送処理に入る．

AP 応答のフレーム形式は CTS と同様としている．これは RTS/CTS 方式にしか対応していない従来の端末との互換性を確保するためである．しかし、ランダム長信号には情報がなため、AP 応答に記載すべき送信期間や宛先がわからない．そこで便宜的に、AP 応答の送信期間には最大長のデータフレーム送信に要する期間、また、宛先には AP 自身のアドレスを書いておくこととする．これにより、提案方式非対応端末の送信動作停止期間は実際より長くなる恐れがあるが、送信動作には支障をきたさない．

これに対して、提案方式に対応している端末は、宛先が AP である CTS を傍受した場合には、これが AP 応答であり、その中に書かれている送信期間は必ずしも正確ではないことがわかる．そのため、NAV をセットせず、後ほど ACK の傍受が完了した時点で送信動作を再開する．ところが、後述の Fig. 4 に示すようなデータフレームの衝突や回復できないビットエラーが発生した場合、通常の手順では、AP から送信側端末へ向けての ACK は返信されない．そこで、提案方式では、データフレームの衝突やビットエラーが発生した場合には、周囲の端末の送信動作再開のために、AP は自身を宛先とする ACK を送出することとしている．

なお、ランダム長信号の検出は電力検出によるため、無線 LAN 以外の機器からの干渉信号との見分けがつかない．ここで、干渉信号とランダム長信号が衝突したとしても、後者の終了が遅ければ、原理的に不都合は生じない．問題となるのは、干渉信号とランダム長信号の衝突時に前者の終了が遅い場合、または、チャネルがアイドル中に単独で発生する干渉信号である．このとき、干渉信号に対する AP 応答が送出されるため、各端末は送信動作を停止する．そこで、AP 応答終了から SIFS 経過後でもプリアンプルが検出されない場合、AP は送信動作再開用の ACK を送出することとしている．

上述のように、予定時刻での AP 応答受信の可否により、各端末は自身が最後にランダム長信号を送出し終えたか否かがわかる．しかし、たとえば Fig. 1 の無線 LAN において Fig. 4 に示すように、複数の端末がランダム長信号を同時に送出し終えた場合、それらの端末はいずれも予定時刻に AP 応答を受信する．そして、いずれもデータフレーム送信権を得たと判断してデータフレームを送信するため、これらのフレームが衝突する．ここで、互いの通信範囲内に位置する端末 A と B がランダム長信号の送出を同時に終えるのは、両端末が同じ長さのランダム長信号を同時に送出し始めたときである．送出開

Fig. 4 Sample collisions of data frames on Fig. 1 wireless LAN

(a)

(b)

Fig. 5 Sample collisions of an AP response and a random length signal on Fig. 1 wireless LAN

始時刻が異なると、後の端末はそのキャリアを検知し、自身のランダム長信号送出動作を停止するため、データフレームの衝突は起こらない．一方、互いに隠れ端末となっている端末 A と C については、互いのキャリアが検知できないため、ランダム長信号の送出開始時刻によらず、同時に送出終了したときにデータフレームの衝突が起こる．

また、提案方式運用下で発生するもう一つの衝突に AP 応答とランダム長信号によるものがある．たとえば Fig. 1 の無線 LAN において Fig. 5 に示すように、端末 A のランダム長信号終了を受けて送出される AP 応答と隠れ端末 C からのランダム長信号が同時に送出されたとき、両者は衝突する．ここで、仮に端末 C のランダム長信号より前に AP 応答が送出されたとすると、これを傍受した端末 C は自身のランダム長信号送出動作を停止するため、衝突は起こらず、端末 A がデータフレーム送信権を得る．逆に、AP 応答より前に端末 C のランダム長信号が送出されたとすると、このランダム長信号終了後

に送出される AP 応答により，端末 C がデータフレーム送信権を得る．したがって，Fig. 5 のような衝突が発生するのは，AP 応答と隠れ端末からのランダム長信号が同時に送出されたときである．

Fig. 5 のような衝突が発生しても，端末 C の通信範囲外にある端末 A は AP 応答を正常に受信し，引き続いてデータフレームを送信する．ここで，仮に端末 C のランダム長信号が AP 応答よりも短ければ，端末 A のデータフレーム送信には支障をきたさない (Fig. 5(a) 参照)．逆に，端末 C のランダム長信号が AP 応答よりも長ければ，このランダム長信号と端末 A のデータフレームが衝突する (Fig. 5(b) 参照)．いずれの場合においても，AP と端末 C の共通の通信範囲内に位置する端末は AP 応答を傍受することができないので，これらの端末が送出するであろうランダム長信号と端末 A のデータフレームが衝突する可能性がある．

以上二種類の衝突への対策については 5.3 で検討する．

4. シミュレーションモデル

本章では，隠れ端末解決法の性能を評価するためのシミュレーションモデルについて述べる．

サブチャネルを設けず，データフレーム通信チャネルと同一のチャネルで制御フレームをやり取りすることにより隠れ端末問題を解決する方式を対象としているため，AP が 1 台で単一チャネルのインフラストラクチャモード無線 LAN を考える．隠れ端末が存在する状況をつくるため，各端末をいずれかのグループに所属させ，それぞれのグループは互いに隠れ端末となっているものとした．すなわち，同一グループ内の端末同士は互いに通信範囲内に位置しているが，異なるグループの端末とは互いに通信範囲外に位置している．Fig. 6 に 8 台の端末を 4 台ずつ 2 つのグループに配置した例を示す．図中の実線，破線の円はそれぞれグループ 1, 2 の通信範囲を表している．

隠れ端末問題解決法の性能が明確に現れるようにするため，フレーム損失の原因は衝突のみで，雑音や減衰にはよらないものとする．そして，すべての端末は移動せず，常に送信すべきデータフレームを所持しているものとする．なお，IEEE 802.11b を想定して，Table 1 に示すパラメータを用いた．これにより，ランダム長信号の単位時間は $10 [\mu\text{sec}]$ となる．また，データフレームの本体部分を $1500 [\text{Byte}]$ 固定長とした．

次章で RTS/CTS 方式と提案方式の性能を比較するが，RTS/CTS 方式の性能評価の際には，無線 LAN 内のすべての端末および AP は提案方式に対応していない従来の機器とする．一方，提案方式の性能評価の際には，全端末および AP が提案方式に対応しているものとする．

Fig. 6 A sample arrangement of 8 terminals into two groups

Table 1 Parameters for the simulation

Transmission Rate	11 Mbps
SIFS	10 μsec
DIFS	50 μsec
Slot Time	20 μsec
PLCP preamble + PLCP header	192 μsec
CW _{min}	31
CW _{max}	1023

5. 性能評価

本章では，ランダム長信号の最大長が性能に及ぼす影響について検討した後，RTS/CTS 方式との性能比較により，RTS の代わりにランダム長信号を用いることの有効性を示す．さらに，3. で述べた二種類の衝突への対策についても検討する．

5.1 ランダム長信号の最大長

まず，ランダム長信号の最大長とフレーム衝突率の関係について考える．ここで，フレーム衝突率とは，AP 応答またはデータフレームが衝突により失われる確率で，ランダム長信号同士の衝突は含まれていない．

数値例として，20 台の端末を 10 台ずつ二つのグループに分けた場合のフレーム衝突率と最大長の関係を図 7 に示す．図には，同一グループ内の端末から送出されたフレーム同士と異なるグループに属する端末から送出されたフレーム同士のそれぞれの衝突率を示している．

同一グループ内での衝突は，たとえば Fig. 4 の端末 A と B のように，複数の端末からのランダム長信号が同時に終了した後のデータフレーム同士の衝突である．この衝突が起こるのは，複数の端末から同じ長さのランダム長信号が同時に送出されたときである．このようなことは最大長が大きくなるほど起こりにくくなるので，最大長が大きくなるにつれて衝突率は小さくなっている．

これに対して，異なるグループでの衝突には，Fig. 4 の端末 A と C のようなランダム長信号同時終了後のデータフレーム衝突，および，Fig. 5 のような AP 応答とランダム長信号の衝突がある．前者の衝突は，ランダム長信号の送出開始時刻によらず，ランダム長信号が同時に終了したときに起こる．ランダム長信号の最大長が大きい場合には，長さの種類が増えて，同時に終了しにくくなるため，衝突率は小さくなる．一方，後者の衝突は送

Fig. 7 Influence of the maximum length of the random length signal on the collision rate

Fig. 8 Influence of the maximum length of the random length signal on the throughput

出タイミングの問題であり、最大長との間に直接の因果関係はない。ここで示した Fig. 7 の数値例では端末数が比較的多いため、後者の衝突による影響が大きくなっていると考えられる。そのため、最大長が大きくなっても衝突率はさほど小さくなっていない。

Fig. 8 に、20 台の端末を二つのグループに分け、それぞれの台数を (20, 0), (15, 5), (10, 10) とした場合のスループットを示す。上で述べたように、最大長が大きくなるほど衝突率が小さくなるので、最大長の増加に伴ってスループットも増加する。しかし、ある程度以上になると、ランダム長信号の送信時間が増加して、データフレームを送信することのできる時間の割合が減少するため、スループットは減少に転じる。Fig. 8 より、スループットが最大となる最大長は 80 ~ 90 [μsec] であったため、以降では最大長を 80 [μsec] に設定してシミュレーションを行うこととする。なお、この設定により、ランダム長信号は AP 応答よりも短くなるので、Fig. 5(b) のような場合は起こらなくなる。

5.2 ランダム長信号の有効性

本節では、RTS/CTS 方式との性能比較により、ランダム長信号の有効性を示す。なお、本節で提案方式とよんでいるのは、RTS, CTS の代わりに、それぞれ、ラン

Fig. 9 Throughput comparison of the RTS/CTS scheme with the proposed one

ダム長信号、AP 応答を用いる方式であり、3. で述べた二種類の衝突への対策を施していない。これらの衝突への対策については、節をあらためて検討することにする。

グループ数 $G=1, 2, 3$ とし、グループ内端末数を变化させた場合のスループットの比較を Fig. 9 に示す。いずれの場合においても提案方式のスループットが RTS/CTS 方式のそれを上回っている。

とくに、隠れ端末の存在する $G=2, 3$ の場合に性能改善の度合いが大きくなっている。これは、RTS/CTS 方式では RTS 衝突時に再送処理に入るが、提案方式ではランダム長信号が同時に終了しない限り衝突してもかわらないためである。

隠れ端末の存在しない $G=1$ の場合についても、提案方式の方が高いスループットを示している。この理由は、グループ内の複数の端末のバックオフ期間が同時に終了しても、それらの端末が同じ長さのランダム長信号を送出しない限りデータフレームを送信できるためである。

また、隠れ端末の有無にかかわらずスループットが向上した理由として、ランダム長信号の最大長が RTS よりも短いため、データフレーム送信予約に要するオーバーヘッドを削減できていることがあげられる。

上述の結果から、RTS, CTS の代わりに、それぞれ、ランダム長信号、AP 応答を用いることにより、RTS/CTS 方式よりも高いスループットが得られることが示された。しかし、3. で述べたように、複数の端末から送出されたランダム長信号が同時に終了すると、それらの端末から送信されるデータフレームが衝突する。また、ランダム長信号の終了を受けて送出される AP 応答と隠れ端末からのランダム長信号が同時に送出されたとき、両者は衝突する。そこで、これら二種類の衝突への対策により更なる性能の向上を目指すことにする。

5.3 衝突への対策

本節では、上述の二種類の衝突への対策とその効果について検討する。

ランダム長信号の同時終了によるデータフレームの衝突、および、AP 応答とランダム長信号の衝突を回避す

Fig. 10 Chain of random length signals

るために、バックオフ期間が終了した端末が確率 p でランダム長信号の送出を見送ることを考えた。ランダム長信号の送出を見送った端末は再度バックオフに入るが、衝突によるものではないため、前回と同じコンテンション・ウィンドウであらたに乱数を発生してバックオフ期間を決定するものとする。

ここで考えた改良方式の副産物として、たとえば Fig. 1 の無線 LAN において Fig. 10 に示すようにランダム長信号が連続して発生することによって、実質的に最大長が増加してスループットが低下することへの対策があげられる。Fig. 10 の場合では、いずれかの端末がランダム長信号の送出を見送ると、ランダム長信号が長期間続くことがなくなり、スループットが向上する。

Figs. 11, 12, 13 にそれぞれグループ数 $G=1, 2, 3$ の場合に p を変化させたときのスループットを示す。各図にはグループ内端末数 $N=1, 3, 5, 10$ のときの結果を示している。

まず、隠れ端末が存在しない $G=1$ の場合、AP 応答とランダム長信号の衝突はなく、さらに、ランダム長信号が連続して発生することもない。したがって、問題となるのは、ランダム長信号の同時終了によるデータフレームの衝突のみである。しかし、この衝突が起こるのは同じ長さのランダム長信号が複数の端末から同時に送出されたときに限定されるため、衝突発生にはかなりの端末数が必要になると考えられる。Fig. 11 のように端末数が 10 以下の場合では、 p の増加によりデータフレーム送信機会が減少してスループットが低下している。

隠れ端末が存在する $G=2, 3$ の場合においても、Fig. 12 の $N=1, 3$ や Fig. 13 の $N=1$ のときのように端末数が少ないときには、ランダム長信号の同時終了、AP 応答とランダム長信号の衝突、および、ランダム長信号の連続発生のいずれも起こりにくいため、 p の増加によりスループットが低下する。これに対して、端末数が増えたとこれらの機会も増えて、ランダム長信号の送出を見送る効果が現れてくる。Figs. 12, 13 に見られるように、スループットを向上させるためには、端末数が増えるほど、 p に大きな値を設定する必要がある。しかし、 p を大きくし過ぎるとデータフレーム送信機会が必要以上に減ってスループットが減少に転じるため、スループット

Fig. 11 Influence of p on the throughput ($G=1$) Fig. 12 Influence of p on the throughput ($G=2$) Fig. 13 Influence of p on the throughput ($G=3$)

を最大にする p の値が存在するが、この値は条件により異なっている。

Fig. 14 に改良前の提案方式とのスループットの比較を示す。上述のように最大のスループットを示す p の値は条件によって異なるが、ここでは、端末数が少ない場合において大幅なスループットの低下を招かないようにするため、 $p=0.4$ とした。いずれの場合についても端末数が少ないときは、改良前よりもスループットが低下している。隠れ端末が存在しない $G=1$ の場合は、端末数が多い場合でもほとんど効果が得られていない。一方、隠れ端末が存在する $G=2, 3$ の場合は、グループ内端末数が非常に少ない場合を除いて、ランダム長信号の送出を

見送る効果が現れている。

5.4 AP 応答の変更

前節では、3. で述べた二種類の衝突への対策について検討した。これらの衝突のうち、ランダム長信号同時終了後のデータフレームの衝突については、5.1 で述べたように、ランダム長信号の最大長に依存する。最大長については、5.1 でほぼ最大のスループットが得られる値（本数値例では $80 [\mu\text{sec}]$ ）に設定したため、その衝突の発生をある程度抑えられていると考えられる。そこで、もう一方の衝突である AP 応答とランダム長信号の衝突に注目し、たとえ衝突が起こっても AP の通信範囲内の端末が AP 応答を認識することができるようにするため、AP 応答を固定長のジャム信号にすることを考えた。ただし、この改良により、RTS/CTS 方式にしか対応していない従来端末への互換性が失われる。

たとえば Fig. 1 の無線 LAN において、Fig. 5 に示すように端末 A のランダム長信号に対する AP 応答と端末 C が送出するランダム長信号が衝突したとする。このとき、Fig. 15 に示すように、AP 応答がジャム信号であれば、この場合の衝突は問題とはなくなる。ただし、チャンネル上に現れる任意のジャム信号がランダム長信号か AP 応答かを各端末が識別できなければならない。そこで、ランダム長信号の最大長よりも長い固定長のジャム信号（以降、固定長信号という）を AP 応答として用いることにした。

ランダム長信号を送出した端末 A は、送出終了から SIFS 経過後に固定長信号を受信すると、これを AP 応答と見なしてデータフレーム送信に進む。一方、期待した時刻に固定長信号を受信できなかった場合には、ランダム長信号の再送処理に入る。また、端末 B などの他の端末は固定長信号を受信すると、これを AP 応答と見なして、自身の送信動作を停止する。これらの端末の送信動作再開は、3. で述べたように、後に AP から送信される ACK の傍受による。一方、端末 C については、ランダム長信号と固定長信号が衝突しているため、ランダム長信号の送出終了後に受信するジャム信号が他の端末のランダム長信号なのか、固定長信号なのか区別できない。ここで、仮に前者であるとする、それは同一グループ内の端末から送出されたものであり、Fig. 4 で説明したように、端末 C のランダム長信号と同時に送出されている。逆に、後者であるとする、Fig. 5 で説明したように、これも端末 C のランダム長と同時に送出されている。いずれにしても、端末 C のランダム長信号と同時に送出されているので、端末 C は、自身のランダム長信号とその後のジャム信号の長さの合計が固定長よりも短ければ、これを他の端末のランダム長信号と見なし、固定長に等しければ、これを固定長信号と見なせばよい。

Fig. 16 に改良前の提案方式とのスループットの比較を示す。なお、AP 応答の代わりに固定長信号を用いるこ

Fig. 14 Effect of deferment of random length signal transmission

Fig. 15 Employment of a fixed length jam signal as an AP response

Fig. 16 Effect of employment of a fixed length jam signal as an AP response

との効果を明らかにするため、本節の改良方式には、前節で述べた衝突への対策を施していない。

5.1 での検討によりランダム長信号の最大長を $80 [\mu\text{sec}]$ としているため、ここでは固定長をそれよりも少し長い $100 [\mu\text{sec}]$ とした。固定長が AP 応答長（CTS フレーム長と同じ）よりも短く、これによりデータフレーム送信予約に要するオーバーヘッドが削減されるため、AP 応答とランダム長信号の衝突が発生しないグループ数 $G=1$ の場合でもスループットが向上している。 $G=2,3$ の場合には、上述のオーバーヘッド削減に加えて、AP 応答とランダム長信号の衝突が許容されるため、スループット

ト改善の度合いがより大きくなっている。

以上の結果から，AP 応答を固定長信号とすると，隠れ端末の有無や端末数に関わらずスループットが向上することが示された。

なお，ある端末の通信範囲内に同一チャネルを用いる AP が複数台存在すると，その端末のランダム長信号に対する AP 応答が衝突する．本節で検討した AP 応答のジャム信号化は，このような AP 応答同士の衝突を解決する一方策にもなっている。

6. あとがき

本論文では，無線 LAN の性能低下の一因である隠れ端末問題の解決法を提案し，その有効性を明かにした．提案方式では，従来の RTS フレームの代わりにランダム長のジャム信号（ランダム長信号）を用いる．ランダム長信号には何の情報も含まれていないため，衝突が発生しても何ら問題なく，最後にランダム長信号を送出し終えた端末がデータフレーム送信権を得る．ランダム長信号に対して AP が返す応答フレーム（AP 応答）の形式を CTS フレームのそれと同じとすることにより，提案方式に非対応の従来の端末に対しても互換性を維持することができる．シミュレーションによる性能比較により，提案方式は RTS/CTS 方式に比べて高い性能を示すことを明かにした。

また，提案方式の運用下で発生する二種類の衝突，ランダム長信号の同時終了時におけるデータフレーム同士の衝突，および，AP 応答とランダム長信号の衝突の対策として，バックオフ期間が終了した端末が確率 p でランダム長信号の送出を見送る手法を考案した．この手法は隠れ端末の台数が多いときに効果を発揮することが示された。

さらに，AP 応答の代わりに固定長のジャム信号（固定長信号）を用いる手法を考案した．この手法により，提案方式に非対応の端末への互換性は失われるが，隠れ端末の有無や端末数にかかわらずスループットが向上することが示された。

今後の課題として，可動端末を含んだアドホックモードへの対応などがあげられる。

参考文献

- [1] IEEE Std 802.11, 1999 Edition (1999)
- [2] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker and L. Zhang: MACAW: A media access protocol for wireless LAN's; *Proc. ACM SIGCOMM '94*, pp. 212–225 (1994)
- [3] M. S. Gast: *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, 2nd Edition, O'Reilly (2005)
- [4] A. C. V. Gummalla and J. O. Limb: Design of an access mechanism for a high speed distributed wireless LAN; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 9, pp. 1740–1750 (2000)
- [5] Z. J. Haas and J. Deng: Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) – A multiple access control scheme for ad hoc networks; *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, No. 6, pp. 975–985 (2002)
- [6] P. Karn: MACA - A new channel access method for packet radio; *Proc. ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference*, pp. 134–140 (1990)
- [7] N. Reid and R. Seide: *802.11 (Wi-Fi) Networking Handbook*, McGraw-Hill (2003)
- [8] F. A. Tobagi and L. Kleinrock: Packet switching in radio channels: Part II – The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution; *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-23, No. 12, pp. 1417–1433 (1975)
- [9] F. A. Tobagi and L. Kleinrock: Packet switching in radio channels: Part III – Polling and (dynamic) split-channel reservation multiple access; *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-24, No. 8, pp. 832–845 (1976)
- [10] C.-S. Wu and V. O. K. Li: Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks; *Proc. ACM SIGCOMM '87*, pp. 336–342 (1987)

著者略歴

やま もと けん と
山 本 健 人

1988年生．2010年3月岡山県立大学情報工学部情報通信工学科卒業，2012年3月同大学院情報系工学研究科電子情報通信工学専攻博士前期課程修了．2012年4月(株)シンフォーム入社，現在に至る．在学中，無線 LAN における隠れ端末問題解決法に関する研究に従事．

いな い ひろし
稲 井 寛 (正会員)

1961年生．1985年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業，1987年同大学院博士前期課程修了．1988年神戸大学総合情報処理センター助手，1993年岡山県立大学情報工学部情報通信工学科助教授，2000年同教授，現在に至る．主として計算機および通信システムの性能評価，通信プロトコル，広帯域通信網に関する研究に従事．工学博士．ACM，IEEE，電気学会，電子情報通信学会，情報処理学会の各会員．