

ミリ波通信における遮蔽特性対策に関する考察

村上 誉[†]

鄔 剛[†]

無線需要の増大から、新しい周波数資源としてミリ波帯の実用化が期待されている。ミリ波無線通信は、その伝播特性のために遮蔽により通信が遮られてしまうという性質を有している。ミリ波帯を用いた無線 LAN システムでは、この遮蔽寸断に対して長時間にわたり TCP アプリケーションにて伝送速度が著しく悪化することが確認された。

本報告では、既存の TCP プロトコルが遮蔽時に発生するバーストエラーに対する耐性がない原因を示し、その改善手法を提案し、その有効性を確認する。この手法は無線端末側のみの改良で実現できるため、従来提案されている無線対応 TCP に比べて比較的容易に実装できる。

A Rapid TCP Recovery Algorithm for Shadowing in Millimeter Wave Communications

Homare MURAKAMI[†], Gang WU[†]

Shadowing is one of the most significant problems in millimeter wave communications. Since packets transmitted are lost during shadowing, TCP applications, especially, after experiencing a relatively long shadowing period, will take a much longer time for recovery. This paper addresses the problem by a detailed discussion and proposes a rapid recovery algorithm as follows for the server-client TCP applications. Here, the server is assumed to be linked to the wireline network and the client is a wireless station in a wireless LAN in the millimeter wave band. After receiving the report of shadowing from the lower layers (e.g., MAC) at the client, an adequate number of "pseudo acknowledgement packets" are prepared and sent out with the adjusted size of advertised receive window (awnd) as soon as the end of the shadowing. The algorithm is working with a standard TCP-Reno version with the SACK option in both the server and the client. The simulation results show an immediate recovery effect.

1. はじめに

近年、携帯電話の爆発的な普及やインターネット利用の拡大により、無線通信に対する高速化のニーズが一段と高まっている。しかし、有限である周波数帯域の逼迫は年々深刻化しており、新しい周波数資源の開拓が急務となっている。ここ最近では、ミリ波帯の活用に関して様々な検討が行われており、60GHz 帯付近に関しては小電力出力に限り無免許での利用が許可され¹⁾、その利用に対する期待も一段と大きくなってきている。

当所では、周波数資源の開拓を一つのテーマとして位置づけ、既利用周波数帯の利用効率を高めるための研究を行うと同時に、未利用の周波数帯を利用するための要素技術やデバイスの開発などを行ってきた。筆者らは、ミリ波広帯域無線アクセスネットワーク(BRAIN :

Broadband Radio Access Integrated Network)という構想を提唱し、それに基づく構内系実験系試作装置としてミリ波無線 LAN システム^{2)~6)}を、また屋外系システムとして固定無線アクセスシステム⁷⁾をそれぞれ開発してきた。ミリ波帯において片方向あたり 156Mbps の無線伝送速度を実現するに至っている⁸⁾。

しかし、ミリ波は直進性が強く、かつ人体等によって容易に遮蔽されてしまうことが知られている⁹⁾。空間ダイバーシティ等により遮蔽問題を解決する方法が考えられるが、システム構築が複雑になり、高価になってしまう。そのため筆者らは、ミリ波帯の使用においてある程度の遮蔽による切断が生じてしまうのはやむを得ないと考えている。そこで本稿では、ミリ波通信を用いてインターネットアクセスを行う場合に、遮蔽がアプリケーションに与える問題について検証し、その影響を最小限に抑える方法を検討する。

インターネット上で使用されるアプリケーションは、トランスポート層に TCP または UDP を採用している。一般に、ビデオ伝送のような即時性の高いアプリケーションは UDP を、ファイル伝送や電子メール等の遅延に寛容なアプリケーションには TCP が使用される。遮蔽

[†] 独立行政法人 通信総合研究所
横須賀無線通信研究センター
Yokosuka Radio Communication Research Center
Communications Research Laboratory
Independent Administrative Institution

により無線リークが発生すると、一時的に接続が切断されてパケットロスを引き起こすが、その時にアプリケーションが受ける影響はトランスポート層が UDP なのか TCP であるのかによって異なる。

UDP を使用している場合は、誤り制御やフロー制御が行われていないため、アプリケーション自身が誤り制御を行わない限りパケットはそのままロスしてしまう。この場合、ストリーム系のアプリケーション(例えば、Real Player)であれば、有線ネットワークでの輻輳によるパケットロスの場合と同様に動作し、無線リンクの回復と共にアプリケーションも直ちに遮蔽前のスループットを得られるはずである。

一方、TCP は完璧な誤り制御とフロー制御を行うため、遮蔽によるパケットロスが発生した場合、遮蔽後に再送を行うようになっている。しかしこの再送機構は、パケットロスは輻輳により発生するものという考えに基づいており、ランダムエラーに対処できるように設計・実装されている。遮蔽時に起こりがちな複数の連続したパケットのロスに対しては、再送にかなり時間がかかってしまう。その結果、物理的な遮蔽時間に比べて TCP アプリケーションの送信不能状態がかなり長く続くことが実験により明らかにされている。

無線環境に対応した TCP に関する研究もすすめられており、これまでもいくつかの手法が提案されてきた。例えば、Indirect-TCP¹⁰⁾は有線部と無線部で2つの別の TCP コネクションを確立することで、有線側から無線の誤り率の高さを隠蔽することが試みられている。また、snoop プロトコル¹¹⁾では、基地局にエージェントを配してコネクションを監視し、無線端末が再送要求を出したときにエージェントが吸収・代理応答することで、再送動作による伝送速度低下を防ぐことが提案されている。さらに、TCP と RLP(Radio Link Protocol)の相互作用が検討されており、TCP と RLP の間に Inter Layer Signaling Pipe を設け、レイヤ間のシグナリングにより最適なシステム性能を引き出す提案も行われた¹²⁾。しかし、遮蔽時のような長時間バーストエラーの発生に対して有効な手法は、筆者らの知る限りまだ報告されていない。

そこで本報告では、ミリ波通信に特有な遮蔽問題を例として取り上げ、長いバーストエラーの発生後に TCP をすばやく正常通信状態に回復できる手法を提案し、その有効性をシミュレーションにより検証する。回復手法としては、なるべく既存 TCP 機構を変更しないよう、遮蔽後に無線端末側に擬似重複 ACK 送信機構の導入、およびウィンドウサイズ制御の変更を加えるものとする。

本報告の構成は以下のとおりである。まず2章では、ミリ波無線通信の特徴について述べ、その特性について論ずる。次に第3章では、TCP の再送動作について述べ、通常の再送とミリ波通信の遮蔽による再送の違いに



図 1 超高速無線 LAN システム (BRAIN '00)

表 1 超高速無線 LAN システム諸元

	AP	ST
Tx freq.	37.75GHz	38.75GHz
Tx power	10mW	10mW
Ant. gain	5dBi	20dBi
Half-power beamwidth	60 °	10 °
Modulation	GMSK	
MAC Protocol	Enhanced RS-ISMA	
Radio trans. rate	156Mbps (per one-way)	

ついて明らかにする。そして第4章で、それらの問題点の解決手法を提案し、計算機シミュレーションによりその有効性を調査し、結果について考察する。

2. ミリ波通信の特性

2.1 屋内ミリ波帯通信の特徴

従来の無線通信、特に移动通信で用いられていた UHF 帯やマイクロ波帯については多くの解析がなされ、伝播特性が明らかにされてきている。最近では、ミリ波帯の性質や伝播特性についても調査・研究が進められ、おおよそその特徴が解明されてきている。ミリ波帯の電波は直進性が強く、回折や反射などは大きく見込めないことが知られており、またその直進性の強さのために遮蔽による通信遮断が起こりやすいという特性をもっている。また、一部の帯域では降雨減衰が大きいことや、酸素や二酸化炭素による吸収が大きいなど、屋外での長距離伝送には障害が多いことがわかっている。そのため、まず屋内、もしくは屋外スポットエリアなどで、短距離伝送へのミリ波帯無線通信の適用が有望視されている。

CRL では、ミリ波通信を屋内無線 LAN システムに適用することを考え、人体による遮蔽によって回線稼働率がどれだけ変化するかを調査してきた⁹⁾。その結果、通常の利用形態で完全に遮蔽を防ぐことは難しく、複数の基地局を配置してダイバーシティ送受を行うのが良い

という結果を得ている。

筆者らは、これまで 38GHz 帯および 60GHz 帯を用いたミリ波無線 LAN システム^{2)~8)}を研究・開発してきた。試作システムの概要を示す(図 1, 表 1)。このシステムを実使用を想定した試験空間に配置し、アンテナの配置によってどの程度の伝送エラーが起こるかを測定した。金属製のパーティションで試験空間を配置したため、反射によるマルチパスの影響は少なからず起こっていると思われるが、円偏波を採用することでそれらの大半を抑制できている。結果として、マルチパスの影響はごく一部の条件でしか見られず、想定室内の広範囲において BER(Bit Error Rate)で 10^{-7} 以下の特性が得られている¹³⁾。この結果より、見通しを確保できるようにアンテナを設置した場合、その回線は遮蔽がない限り有線回線と同等の品質を提供できることがわかる。

2.2 屋内ミリ波帯通信での問題点

図 1 に示したように、本システムは TCP/IP プロトコルをサポートし、インターネット上のリソースを使用できるように設計されている。本システムは有線回線に劣らない回線品質を有することを前章で述べたが、ミリ波通信ゆえに遮蔽による切断は避け難い。

ミリ波通信を行う場合、設置した 1 対のアンテナ間には 1 本の不可視の線が存在することを想定すると理解が容易となる。ミリ波 LAN は、設置形態によってはそのライン上を人が横切ることが想定される。また、無指向性アンテナの使用が可能な場合は移動通信が可能となり、使用者の移動に伴ってライン上に遮蔽物が入ることもある。どちらの場合も、遮蔽物および使用者の移動に伴いその遮蔽は解消される。

この現象を回避するためには、複数のアンテナを利用したダイバーシティ受信を行うこともアプローチとしては考えられる。しかし、現在の IEEE802.11 端末のような普及を考える場合、コストと小型化の両面で障害となり、得策ではないと思われる。筆者らは、ある程度の自然発生的な遮蔽は仕方ないと考えており、アンテナの設置場所の工夫で回避するのが現実解であると考えている。

電界強度の変化は、ライン上の遮蔽物の有無の変化に一致する。よって、TCP などの上位層から回線进行评估する場合、on/off がデジタル的に切り替わるようなモデルへと単純化できる。

そこで、遮蔽の発生によってどのような伝送が行われるか、計算機シミュレーションを行った。遮蔽を前述の on/off モデルにて想定した 1Mbps の無線回線において、ファイル伝送を行っている際に遮蔽が起こったときの様子をシミュレーションした。図 2 にその前後での伝送の様子を示す。縦軸の値は TCP のシーケンス番号であり、600 秒 ~ 605 秒の 5 秒間に遮蔽があったものとしている。またグラフの傾きが伝送速度を表しており、グラ

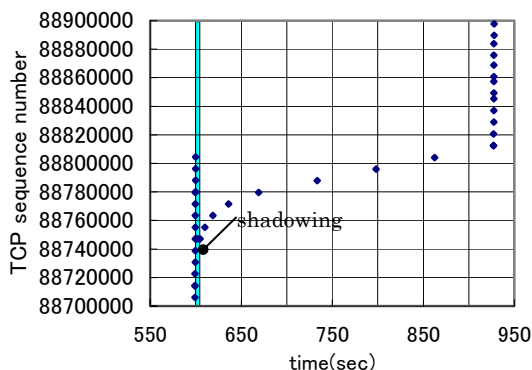


図 2 遮蔽前後のファイル転送の様子

フが平らになっているところは、伝送されていない、もしくは伝送に失敗したことを意味する。

ここで注目したいのが、5 秒間しか遮蔽していないのだが、遮蔽状態から回復してもグラフが元の傾き、すなわち元の伝送速度に回復するまでにその 60 倍以上の時間を必要としていることがわかる。無線チャネルでは on/off モデルを想定でき、遮蔽物が除かれると本来の伝送を行うことができるはずである。しかし、アプリケーションレベルではそのような動作にはならないことが結果よりわかる。この原因について次の章で考える。

3. TCP/IP の動作

3.1 TCP の再送プロセス

インターネットの一般での利用促進に伴い、今やほとんどの PC が TCP/IP スタックを搭載している。TCP/IP スタック自体も様々な修正や追加の提案を受けて、適宜実装に取り込まれており、様々な実装が存在する。本報告においては、TCP Reno バージョン¹⁴⁾に対して SACK(Selective ACKnowledgement)¹⁵⁾ オプションをサポートした環境を想定し議論を進める。(以下、TCP と表記した場合はこの意を暗に含むものとする。) なお、これらは Windows 98 などでも実装済み¹⁶⁾であり、他の多くの OS でもサポート済み、ないしはテスト実装されている。ミリ波無線通信の普及がこれからであることを考えると、上記オプション等は十分に普及されていることが予想される。

Tahoe では、輻輳制御機能として fast retransmit を実装した。Reno では、fast retransmit 発生時には fast recovery 状態になり、軽微な輻輳時や少量のパケットロス時にはスロースタートが起こらないように実装が変更されている。

複数のパケットロスが起こった場合、Tahoe や Reno では ACK にて次に受信すべきパケット番号 1 つのみを要求することしかできず、ロスが非常に大きくなる。

SACK オプションでは、正常に受信できている(番号が飛んだ先の)シーケンスについて合わせて伝えることで、どのパケットが欠落したかを送信側が検知できるようにしている。

これらを実装することでランダムなパケットロス発生時のトラヒック特性は大幅に改善され、無線通信のようなロスが発生しやすい環境でもそれなりのスループットが得られる。

3.2 遮蔽時の再送プロセス

前章で述べたような遮蔽が発生した場合、当然ながらその遮蔽中に送信しようとしたパケットは到達しない。そのため、前節で述べたような TCP の再送過程が発生することになるが、ランダムエラーによる再送とは異なった過程となる。そこで、図 3 に遮蔽回復時のパケット再送の様子を示す。

遮蔽によって、 n 個のパケット(と数個の ACK)が失われてしまう。送信パケットの消失は、ACK 待ちのタイムアウトの発生により知ることができる。タイムアウトを検知した送信側は、直ちに ACK を待っているパケットの中で最も古いものを 1 つ再送する。その時にまだ遮蔽が続いている場合は、再びそのパケットもロスしてしまう。ここで、タイムアウトが複数回にわたって発生した場合、TCP は伝送路が輻輳していると判断し、トラヒックを減少させるために再送タイムアウトの時間を指数的に長くしてゆく。それが重なると、最長で 64 秒間データを待ちつづけるようになる。図 3 の例の場合、遮蔽中にも再送が行われ、失敗していることがわかる。

遮蔽後の喪失パケット 1 を再送した結果、2 番目を要求したパケットが帰ってくる。ここではじめて送信側(server)は次のパケットも届いていないことを知るが、次にタイムアウトが起こるまで(または重複 ACK が 3 つ届くまで)再送は行われない。それが消失によるものか、単に遅延が大きいただけなのか判断できないからである。

さらに悪いことに、server 側は新しいパケットも送信できない。送信側は、cwnd(congestion window: 輻輳ウィンドウ)サイズ一杯まで送信を試みているため、cwnd が大きくなるか、ACK が返ってきてウィンドウがスライドするまで、新しいデータを送信できない。Reno がサポートしている fast recovery だが、この状態にある場合、TCP は重複 ACK が届く度に cwnd を拡大して新たなパケットを送信できるようにするが、遮蔽により相手側からの ACK も消失しているためその効果は期待できない。しかもこの場合は fast recovery 状態にも入っていない上に、通常のタイムアウトによる再送のため cwnd は 1 セグメントサイズまで小さくなっており、満足に送信も行えない状態になっている。また、SACK がサポートされていることを想定しているが、同様に ACK が届かないために SACK ブロックが届くこともなければ、そもそも遮蔽によって全てのパケットが届いて

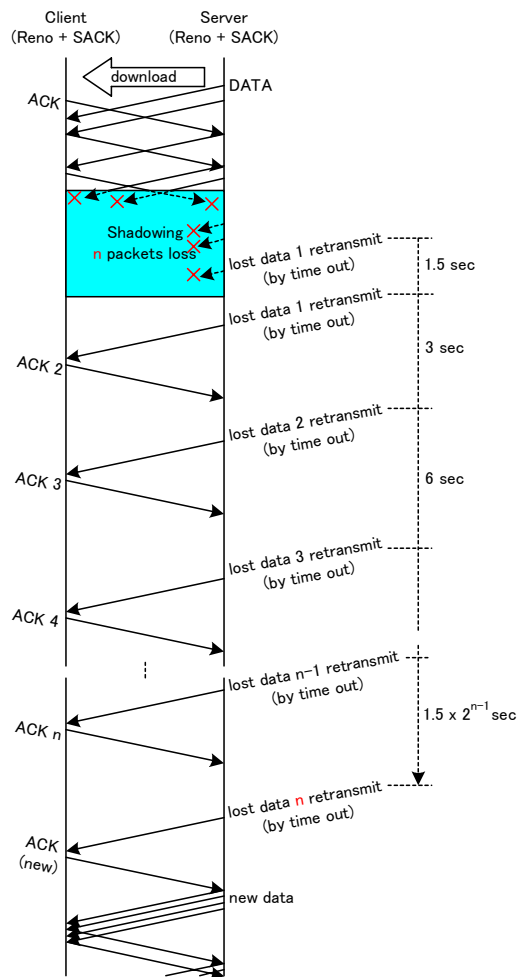


図 3 遮蔽後のパケット再送過程

いないのでこの場合は SACK が働くことはない。よって、このような双方向でバーストエラーが発生する環境においては、既存の再送対策は有効に機能しないことがわかる。

結果として、再送とタイムアウトの発生を損失パケット数である n 回だけ繰り返した後に通常の送信に復帰できることになる。タイムアウトの回数に応じて、タイムアウト時間も 2 の累乗で長くなっていく(指数バックオフ)ため、回復に要する待ち時間はそれだけ大きくなる。その典型的が図 2 の送信結果でも見られる。遮蔽直後に比べて点(実際のパケット伝送)がまばらになっているのは、タイムアウトのバックオフが多く発生しているからである。670 秒付近からは、タイムアウト時間が最大の 64 秒まで拡大していることが確認できる。

4. 提案方式

4.1 擬似重複 ACK の送信

前章において、遮蔽時の再送がなぜうまくいかないかを確認した。その中で、fast recovery や SACK といった現状の再送対策の手法は受信側からの ACK が引き金としてアクションを起こすため、遮蔽時にはそれらが有効に働かずに

- a. 再送ができない
- b. 新たなデータも送れない

という、2 つの問題が起こってしまうことを述べた。TCP は送受両方で協調動作することで信頼性の高いデータ転送を実現しているために、一定時間接続が途切れたりパースト的なエラーが発生した場合、どちらかが何らかの送信を行わない限りタイムアウトを待つしかないというところにこの問題の本質がある。

なお、本報告では無線端末側がクライアントとなり、LAN 上、もしくはインターネット上のサーバーからデータを受信する事を想定して検討を行う。Peer to Peer 接続やストリームデータの送受などに関しては、今後必要に応じて行いたい。

遮蔽が発生した場合、クライアント側は遮蔽が終わると同時にできるだけ早くデータの受信を再開したいが、送信側となる有線サーバーはクライアントの遮蔽については知る由も無いため、即座にデータが送られることはない。その対策として有線サーバー側も含めて、TCP プロトコルを全て無線対応型に改めるというのもアプローチの一つとして考えられるが、全ての実装に変更を強いるのは難しいだろう。

そこで本報告では、遮蔽回復時に無線端末側で重複 ACK を擬似的に送信する機構を導入することを提案する。無線端末側は、下り信号の有無によって遮蔽が検出できる。この遮蔽の検知部分より、回線状態が「on」になったとき(実際には、受信信号電力が閾値を超えて大きくなったとき)に、TCP 層に信号を伝えられるようなドライバ、もしくはミドルウェアなどを導入する。TCP 層では、擬似重複 ACK を送信できるようにするために各コネクションが最新の送信した ACK を保持しておくように変更を加える。

図 4 に、提案手法を採用したときの再送の様子を示す。下位層から遮蔽解除の信号が届いた時に、TCP 層の各コネクションは通信相手に対して、先程保存しておいた ACK を再送する。この時、少なくとも 4 つ(もとの ACK 1 + 重複 ACK 3)の ACK を送ることで、送信側を Fast Retransmit 状態にさせ、再送を開始させることができる。

この時、1 パケットの再送が行われたあとは fast recovery 状態となるので、重複 ACK の数を 4 つより多く送信した分だけ cwnd が大きくなり、新パケットを送信できるはずである。しかし、実際の送信には送信側の

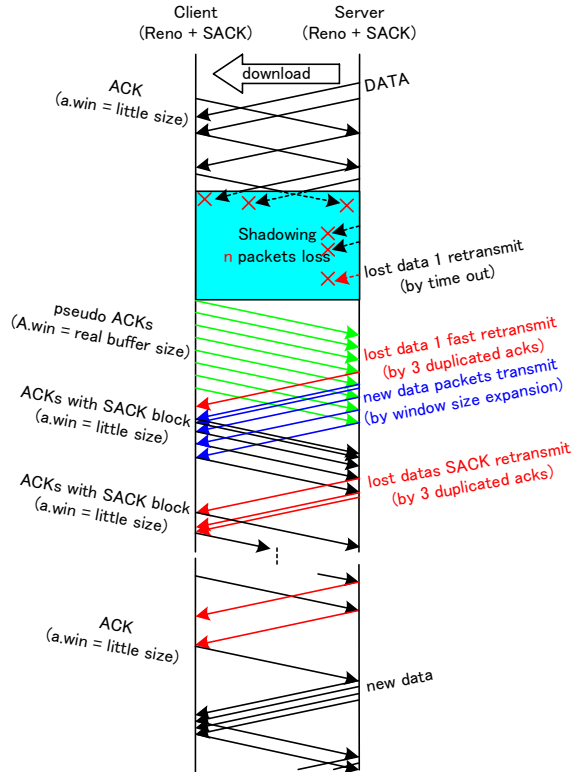


図 4 擬似重複 ACK の送信

cwnd サイズだけではなく、受信側の awnd(advertised receive window: 広告受信ウィンドウ)サイズにもよるため、重複 ACK を無尽蔵に増やせばいいと言うわけではない。ACK を受信せずに送り出せるデータの最大量は

$$send_{MAX} = \min\{cwnd, awnd\}$$

で決まる。このことより、重複 ACK を大量に送信し、cwnd サイズを大きくしていても

$$cwnd > awnd$$

となったところでそれ以上の新パケットを送信できなくなるために意味は無くなる。

ここで、cwnd と ssthresh(slow-start threshold: スロースタートと輻輳回避の閾値)の大きさの変化について考える。重複 ACK を 3 つ受信し、fast retransmit / fast recovery 状態に入る際に、ssthresh は 2MSS(Maximum segment size: 最大セグメントサイズ)にセットされ、cwnd は ssthresh の値(2MSS)に受信した重複 ACK 数分の MSS を足した値となる。つまり、重複受信した ACK 数を D とすると、

$$cwnd = (D + 2)MSS$$

となる。ここで、前述の条件式より、

$$(D + 2)MSS > awnd$$

$$D > \frac{awnd}{MSS} - 2$$

となる D のうち最小の整数値 D_0 が、有効な重複 ACK の最大値となる。

$$D_0 = \text{ceil}\left(\frac{\text{awnd}}{\text{MSS}}\right) - 2$$

ただし、遮蔽回復時に擬似 ACK を送信した場合、はじめの一つが重複とはならない場合も考えられる。(例えば、コピーされていた ACK が、本来の送信時に遮蔽され届かなかった場合などに起こる。前に「少なくとも 4 つの ACK」と書いたのも、そのはじめの 1 つを含むためである。) よって、送信が有効である擬似 ACK の送信数の最大値 D_{MAX} は、有効な重複 ACK の最大値+1 となるので、

$$\begin{aligned} D_{MAX} &= D_0 + 1 \\ &= \text{ceil}\left(\frac{\text{awnd}}{\text{MSS}}\right) - 1 \end{aligned}$$

となる。例えば、MSS が 8152 Bytes(PPP 接続でよく用いられる)、awnd サイズが 65536 Bytes(TCP 実装の最大値)だった場合、 D_{MAX} は式より 8 となる。この手法で有効最大数の擬似 ACK を送信した場合、受信側のバッファサイズ(すなわち awnd)の上限まで、新パケットを送信できることになる。

しかし、遮蔽中にも利用可能なウィンドウが存在するうちは送信が試みられており、遮蔽終了時には既にウィンドウサイズ上限までパケットがバッファリングされていることも多い。図 4 もそのようなパターンを示しており、重複 ACK の受信にもかかわらず、2 つ目以降のパケットの再送は行われずタイムアウト待ちに入ってしまう。よって、この改善手法だけでは fast recovery の特性を十分に引き出せておらず、SACK も機能していない。

4.2 広告ウィンドウサイズの調整

前節で述べたような、awnd サイズの限界値までバッファリングが行われることはデータ伝送において必然であり、これを避けることは出来ない。そこで、awnd サイズを通常時と遮蔽回復時で異なったサイズを広告することを追加提案する。

擬似 ACK の送信で、TCP を fast recovery の状態に遷移させられる。しかし、ウィンドウサイズに一致するまで送信を試み、それを遮蔽で妨げられた結果、バッファ内が再送待ちのデータで満たされてしまうため、新しいパケットを送信できず fast recovery は機能できていないことになる。そこで、通常時の awnd を実際の値より小さめに広告してバッファを一定量確保しておき、遮蔽回復時にのみ実際の awnd サイズを広告することでその差の分だけ、確実に新しいパケットが送信できることになる。

図 5 に、広告サイズの変更を行った場合のパケットの流れを図示する。擬似 ACK による 1 つ目のパケットの

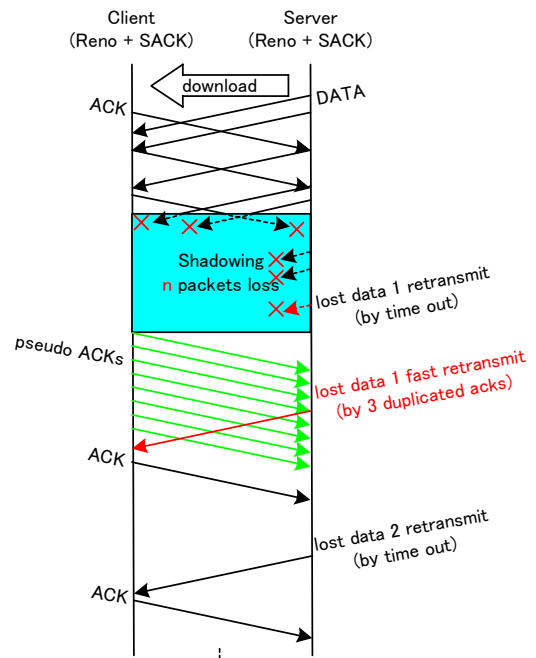


図 5 awnd を小さく広告した場合

再送が起こるまでは図 4 と変わりはない。擬似 ACK の 4 つ目以降のみ、awnd を本来の数値で広告を行う。それによって、送信側にとってはバッファに空きができたことになり、新しいパケットを送信できるようになる。なお、本来のウィンドウサイズの広告を 4 つ目以降に限定した理由は後述する。

このようにして新パケットを送信すると、受信側には遮蔽で届かなかった n 個のパケットのうち、1 番目(ここでは遮蔽で落ちたパケットを、1 番目 ~ n 番目と呼ぶことにする)以外は届いていない状態になる。そこで受信側からは、ロスしている 2 番目のパケットを要求する ACK を送信するが、その際に $n+1$ 番目が正常に届いたことをオプションフィールドに付加して伝える。それによって、受信側では n 番目までは正常に受信できていないことを知ることができ、次の再送時からは SACK 再送を行うことができるようになる。

通常時の awnd を過小広告するということは、LFN(Long Fat Network: 高速で遅延の大きいネットワーク)などではその特性に影響が出ることも考えられるため、そのような系を考えた場合この差を極力小さくすることでスループットへの悪影響を最小限に抑えたい。そこで、この SACK 再送を起こすために必要な条件を検証する。SACK 再送を素早く行うためには、図 5 のように 2 度目の fast recovery による再送を起こすのが最善である。そのためには、送信側に 4 つの ACK が届く必要があるため、1 度目の fast recovery 時に 4 つ以上の新パケットを送信できなくてはならない。つまり、

広告ウィンドウサイズの調整によって新パケットを 4 パケット送り込める必要がある．よって，awnd の調整を行い，通常時と遮蔽回復時になくはならないバッファサイズの差は

$$awnd_{diff} > 3MSS \quad (+\alpha)$$

と，3MSS より大きくなくてはならない(すなわち，最大長のパケット 3 つと，残りの小さなパケットが 1 つ)と結論付けられる．

ここで，擬似 ACK の 4 個目以降で awnd を大きくするとしているが，これは短時間遮蔽時にも正常動作を行わせるための対策である．前述の例では遮蔽中に再送タイムアウトが発生するような場合を挙げているが，実施の遮蔽にはもっと短いものも考えられる．遮蔽中にタイムアウトが発生しなかった場合，送信側の cwnd は十分に大きい状態である．(タイムアウトが発生した場合には，cwnd は 1MSS まで小さくなっている．) この状態で擬似 ACK の 1 個目で本来のバッファサイズを広告した場合，再送が起こる前にバッファを埋め尽くしてしまうことになり，再送後の SACK 再送を期待した一連の送信が行われずに図 4 の送信状況と何ら変わらなくなってしまう．これを防ぐために，再送を先に行わせるために以上のような動作が必要となるのである．

4.3 計算機シミュレーション

以上の変更により遮蔽からの早期回復が図れることを確認し，かつ通常時の awnd の過小広告によってどれだけ伝送能力が悪化するかを評価するために計算機シミュレーションを行った．シミュレーションツールには OPNET¹⁷⁾を用いている．

計算機シミュレーション条件を表 2 に示し，その結果としてサーバー側の送信シーケンス番号の推移を図 6 に示す．グラフからわかるように，5 秒間の遮蔽中に 2 回再送に失敗していることがわかる．しかし，遮蔽終了の 605 秒に，再送と思われる点と，上方に 5 つの点が確認できる．これが擬似 ACK の送信による 1 つの再送と 5 パケットの新データの送信が行われていることがわかる．ここで，5 パケットのデータの再送が行われているのは，今回のシミュレーション条件では awnd の通常時と遮蔽回復時の差は 32768 Bytes，セグメントサイズは 8152 Bytes なので，

表 2 シミュレーション諸元

TCP implementation		Reno + SACK
awnd size	normal phase	32,768 Bytes
	recovery phase	65,536 Bytes
MSS		8,152 Bytes (PPP)
Tx rate		1Mbps
Tx traffic		FTP
shadowing		5sec (600-605sec)

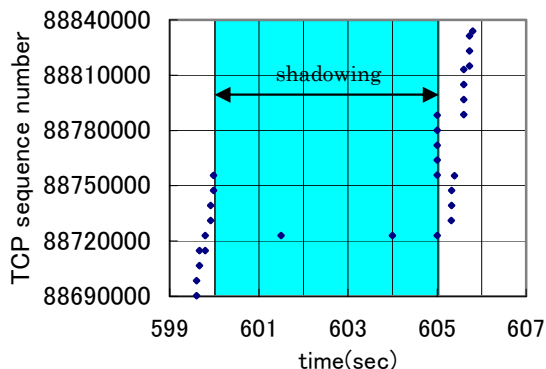


図 6 awnd 過小広告時のシーケンス

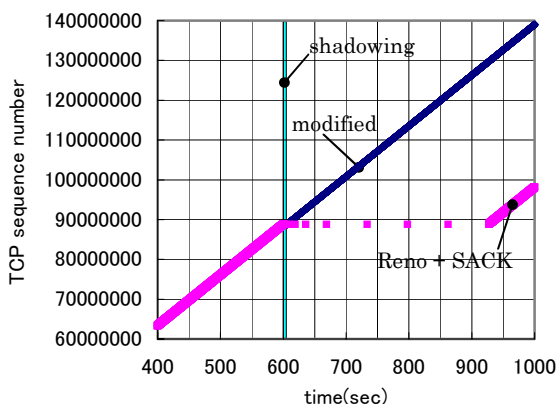


図 7 TCP シーケンス番号の推移

$$awnd_{diff} = (MSS \times 4) + 160$$

となり，最大長のパケットが 4 つと，160Bytes の小さなパケット 1 つで構成されていることがわかる．この 5 パケットにより，受信側には 5 つの SACK オプション付きの重複 ACK が戻るため，結果として SACK 再送が 605.3 秒付近で起こり，その後通常状態に復帰できていることになる．

これらの対策を行わなかったときのシーケンス(図 2 に提示)と比較したものを図 7 に示す．この結果より，遮蔽が存在しないときにも匹敵しうろ特性を得られていることが見て取れる．

5. ま と め

本報告では，屋内ミリ波通信で特に問題となる遮蔽について，TCP/IP プロトコル上で問題が起こることを明らかにした．その対策として，物理層および DLC 層と TCP 層間でシグナリングを行い，擬似的に重複 ACK を多数送信することで，早期に再送を開始できることを示した．また，cwnd の大きさを調整することで，速やか

に通常のスループットに回復できることを明らかにし、その最適な cwnd 値についても考察を行った。

今後の方針としては、この技術を実装したドライバを開発し、前述の筆者らの開発したミリ波無線 LAN に使用し、その有用性を確かめたい。

謝 辞

本検討を行うにあたりソフト開発にご尽力くださり、かつ貴重なご助言をいただいた株式会社情報工房 浅利直栄氏、渡辺薫さんに感謝いたします。また、多岐にわたりご指導・ご助言をいただいた CRL 井上真杉氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1)"60GHz 帯を使用する無線システムの普及に向けて", Sep. 2000, <http://www.mpt.go.jp/pressrelease/japanese/denki/000922j603.html>.
- 2)G. Wu, Y. Hase, K. Taira and K. Iwasaki, "A wireless ATM oriented MAC protocol for high-speed wireless LAN," Proc. PIMRC'97, pp.199-203, Sept. 1997
- 3)G. Wu, Y. Hase, and M. Inoue, "Broadband radio Access integrated network (BRAIN) in mm-wave band: indoor wireless LAN prototype," Proc. PIMRC'98, pp.23-27, Sept. 1998
- 4)M. Inoue, G. Wu, and Y. Hase, "IP-based high-speed multimedia wireless LAN prototype for broadband radio access integrated network (BRAIN)," Proc. IEEE VTC '99 Fall, pp.357-361, Sept. 1999
- 5)M. Inoue, G. Wu, Y. Hase, A. Sugitani, E. Kawakami, S. Shimizu, and K. Tokuda, "An IP-Over-Ethernet-Based Ultrahigh-Speed Wireless LAN Prototype Operating in the 60GHz Band," IEICE Trans. Commun., Vol. E83-B, No.8, pp. 1720-1730, Aug. 2000
- 6)G. Wu, Y. Hase, and M. Inoue, "An ATM-Based Indoor Millimeter-Wave Wireless LAN for Multimedia Transmissions," IEICE Trans. Commun., Vol. E83-B, No.8, pp. 1740-1752, Aug. 2000
- 7)長谷 他,"ミリ波広帯域無線アクセスネットワーク ver.4"(1)~(3), 信学総大 B-5-237~239, Mar. 2001.
- 8)G. Wu, M. Inoue, H. Murakami, and Y.Hase, "156Mbps Ultra-high-Speed Wireless LAN Prototype in Millimeter-Wave Band," Proc. WPMC'00 pp.142-147, Nov. 2000.
- 9)佐藤, 真鍋, "屋内無線 LAN における人体による遮蔽を考慮した見通し率の評価," 信学技報 AP96-161, Feb. 1997.
- 10)A.Bakre, B.R.Badrinath, "I-TCP: Indirect TCP for Mobile Hosts," Proc. 15th ICDCS, May 1995.
- 11)H. Balakrishnan, S. Seshan, and R. H. Katz, "Improving Reliable Transport and Handoff Performance in Cellular Wireless Networks," ACM Wireless Networks 1(4), Dec.1995.
- 12)G. Wu, Y. Bai, J. Lai, and A. Ogielski, "Interactions between TCP and RLP in Wireless Internet," GLOBECOM'99, pp.661-668, Dec. 1999
- 13)村上, 井上, ウー, 長谷, "ミリ波広帯域無線アクセスネットワーク ver.3 構内系ミリ波送受信部実験結果," 信学総大 B-5-236, Mar. 2001.
- 14)W. R. Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1," Addison-Wesley, Reading, Nov. 1994
- 15)M. Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd, and A. Romanow, "TCP Selective Acknowledgement Options," RFC 2018, Oct. 1996
- 16) "Microsoft Windows 2000 TCP/IP Implementation Details," Mar. 2000, <http://www.microsoft.com/technet/network/tcpip2k.asp>
- 17)Opnet Modeler, <http://www.opnet.com/products/modeler/home.html>