

100 Mビット/s 超を実現する次世代無線LAN技術

Wireless LAN Technologies Realizing Throughputs Exceeding 100 Mbit/s

高木 雅裕

■ TAKAGI Masahiro

竹田 大輔

■ TAKEDA Daisuke

足立 朋子

■ ADACHI Tomoko

LAN (Local Area Network) 及び MAN (Metropolitan Area Network) の標準規格を作成する IEEE (米国電気電子技術者協会) 802 委員会において、現在 100 Mビット/s 以上のスループットを実現することを目標とする、次世代無線LAN規格 (IEEE802.11n) の標準化作業が進められている。これまで無線LANは主にノートパソコン(PC)に應用されていたが、IEEE802.11nがもたらす通信速度の高速化と通信品質の安定性の向上によって、無線LANの應用領域が、映像や音声、更には携帯端末にまで拡大されることが期待されている。

東芝は、IEEE802.11nにおいて重要なMIMO (Multiple Input Multiple Output)、Aggregation手法、及びチャンネル帯域拡張に関する技術提案を行い、この標準化に積極的に貢献している。

The IEEE802 LAN/MAN Standards Committee of the Institute of Electrical and Electronics Engineers is now developing the next-generation wireless LAN specifications (IEEE802.11n), aiming to achieve throughputs exceeding 100 Mbit/s. With the higher throughput and robustness brought about by IEEE802.11n, the application areas of wireless LAN are expected to be extended to the audio, visual, and handheld areas in addition to the current applications such as notebook PCs.

Toshiba has proposed technologies relevant to multiple input multiple output (MIMO), the aggregation technique, and expansion of channel bandwidth, which are important to IEEE802.11n, and has actively contributed to this standardization.

1 まえがき

IEEE802.11 (米国電気電子技術者協会規格802.11)に基づく無線LANは、最近、ほとんどのノートPCに標準装備され、Wi-Fi Alliance^(注1)によれば、2005年には1億個以上のチップセットが出荷されるほど広く普及している。また、その利用領域も、オフィスや、家庭、公共空間から、航空機内にまで広がっており、ユビキタス社会を実現するインフラの一つとなりつつある。

IEEE802.11の拡張の重要な方向性の一つとして、通信速度の向上がある。1997年に承認された最初のIEEE802.11は、伝送レートが最大で2Mビット/sであった。現在は最大54Mビット/sの伝送レートを、それぞれ2.4GHz帯と5GHz帯で実現するIEEE802.11gとIEEE802.11aが広く使われるようになってきている。このような伝送レートの向上は、IEEE802.11の適用領域を広げるのに大きく貢献してきたと思われる。

現在IEEE802.11ワーキンググループ(WG)では、100Mビット/s以上のスループットを達成することを目標とする次世代無線LAN規格(IEEE802.11n)の策定作業が進んでいる。これまで、無線LANは主にノートPCに應用されていたが、

IEEE802.11nがもたらす通信速度の高速化と通信品質の安定性の向上によって、無線LANの應用領域が、映像・音声、更には携帯端末にまで拡大されることが期待されている。

東芝は、この標準化に積極的に貢献している。ここでは、IEEE802.11nの標準化の動向とその技術、及び東芝の取組みについて述べる。

2 100 Mビット/sを超える無線LAN実現のために

IEEE802.11を拡張して実質的に100Mビット/sを超えるスループットを達成するためには、物理層はもちろんのこと、MAC(Media Access Control)層の拡張も必要になる。ここで、スループットとは、MAC層の上で計測した実質通信速度を表す。通信速度向上のために、物理層に加えてMAC層を拡張する点において、IEEE802.11nは、これまでのIEEE802.11a/b/gと異なっている。

IEEE802.11nの物理層に対する拡張は、次のような方向で検討が進んでいる。物理層及びMAC層におけるオーバーヘッドを考慮すると、従来のIEEE802.11aやIEEE802.11gと比べて、物理層の伝送レートを2倍にしても、100Mビット/sのスループットは実現できない。しかし、無線LANとして許されるチャンネル帯域と送信電力の制約範囲でこれを達成するのは容易なことではない。この課題を克服するため、送信

(注1) Wi-Fi Allianceは、Wi-Fi Allianceの登録商標。

側と受信側にそれぞれ複数のアンテナを持つ、MIMO (Multiple Input Multiple Output) と呼ばれる方式を適用する。MIMO 技術の適用により、同じ帯域で複数ストリームを使って通信することができ、周波数利用効率を大きく向上できる。これにより、無線 LAN として許される制約条件内で、スループット 100 M ビット/s が実現できる。

一方、MAC 層に対する拡張について、以下に述べる。100 M ビット/s のスループットを達成するためには、物理層の伝送レートを上げるだけでは不十分であり、MAC 層のオーバーヘッドも削減する必要がある。ここで、IEEE802.11 のオーバーヘッドは、各フレームに付随する物理層と MAC 層のヘッダ、及びフレーム間の間隔などである。IEEE802.11a のパラメータを用いて、送信レートだけ増大させ、フレームごとに 1,500 バイトのデータを送るとした場合、かりに送信レートを無限大にしても、スループットは 80 M ビット/s 以下にとどまることがわかる。つまり、オーバーヘッドを削減する必要がある。オーバーヘッドを削減する技術としては、既に IEEE802.11e⁽¹⁾ で導入されたバースト送信・選択再送方式である Block Ack があるが、100 M ビット/s スループットを実現するには十分ではない。複数の MAC フレームを集約してオーバーヘッドを削減する、Aggregation (フレーム集約) 手法の導入が必要となる。

3 IEEE802.11n 標準化の経緯と技術内容

High Throughput Study Group による標準化作業範囲の規定などの準備を経て、MAC 層上で 100 M ビット/s 以上を達成するよう IEEE802.11 の物理層と MAC 層を拡張する標準仕様の作成を目的に、IEEE802.11 タスクグループ n (TGn) が 2003 年 9 月に発足した。

TGn は、提案を採択するための手続きを決めた後、2004 年 5 月に CFP (Call For Proposal) を出した。当初は 4 件の提案があったが、提案に対する投票や提案の併合などを繰り返した結果、2006 年 1 月に一つの提案にまとめた。今後、IEEE802.11 WG における詳細な技術的レビューを経て、2007 年の前半には標準化が完了する予定である。

なお、合意を形成するなかで、当初は PC と映像・音声応用で MIMO による伝送レート向上が主眼であったが、「携帯端末向けにアンテナ 1 本を認めるべきだ」という意見も強くなり、条件付きで認めることとなった。この場合、スループットは 100 M ビット/s に到達しないが、後述の時空間符号化によるロバスト性の向上や Aggregation 手法などにより、IEEE802.11n の恩恵を受けることができる。

以下に、2006 年 1 月時点で IEEE802.11 TGn に提案されている仕様の概略を説明する。

提案されている仕様では、2.4 GHz 帯及び 5 GHz 帯の仕様が規定されており、既存の IEEE802.11a/b/g との相互運用

性が確保される。ただし、単一の装置が 2.4 GHz 帯と 5 GHz 帯の両方を実装するとは限らない。

物理層は、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) の各トーンで 64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) までの変調方式を用い、帯域幅 20 MHz のチャンネルで MIMO により二つのストリームを多重するのが基本構成である。これにより、既存の IEEE802.11a/g の最大伝送レートの約 2.5 倍に相当する、130 M ビット/s の伝送レートを達成する。更に、伝送レート向上のためのオプションとして、MIMO 多重数の拡大 (最大 4 多重) や、今の日本の法律では利用できないが 40 MHz チャンネルなどが用意されており、すべてのオプションを組み合わせた最大の伝送レートは 600 M ビット/s に達する。また、ロバスト性を向上するオプションとして、送受信機間の電波伝搬環境の情報をを用いて送信側が最適にビームを形成する TxBF (Transmission Beam Forming) や、複数アンテナ間でデータに冗長性を持たせた時空間符号化、基本構成の畳み込み符号よりも誤り訂正能力を強化する LDPC (Low Density Parity Check) 符号などが採用されている。また、物理層の制御に必要な情報を含みフレーム先頭に付加されるプリアンブルは、IEEE802.11a/g との互換性を確保したものが基本であり、互換性はないがオーバーヘッドが少ないものがオプションとして用意される。

MAC 層は、Aggregation 手法がコア技術である。A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) は、単一物理フレームに集約される複数パケットを個別に再送制御可能なため、長いパケットの集約に有効である。A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit) は、個別の再送制御はできないが、オーバーヘッドが小さく短いパケットの集約に有効である。RIFS (Reduced InterFrame Space) は、フレーム間隔短縮だけで効率向上は限定されるが、フレームごとに伝送レートを変更できる。また、この Aggregation 手法と組み合わせたフレーム交換によるオーバーヘッドの削減手法や、LA (Link Adaptation) と呼ばれる伝送レート選択及び前述の TxBF を実現するために必要な情報フィードバック手法、ハンドヘルド用途を意識した省電力化の手法、新たに導入される 40 MHz チャンネルの装置と既存の 20 MHz チャンネルの装置間の共存手法など、多数の技術を含む。

MAC 層の上位において実現される実効スループットは、伝搬環境やアプリケーションに大きく依存するが、恵まれた条件下では、基本構成で IEEE802.11a/g (30 M ビット/s 強) の約 3 倍を、オプションを組み合わせた構成では 10 倍以上を達成できると期待される。

4 東芝の取組み

当社は IEEE802.11n 標準化の初期段階から参加しており、

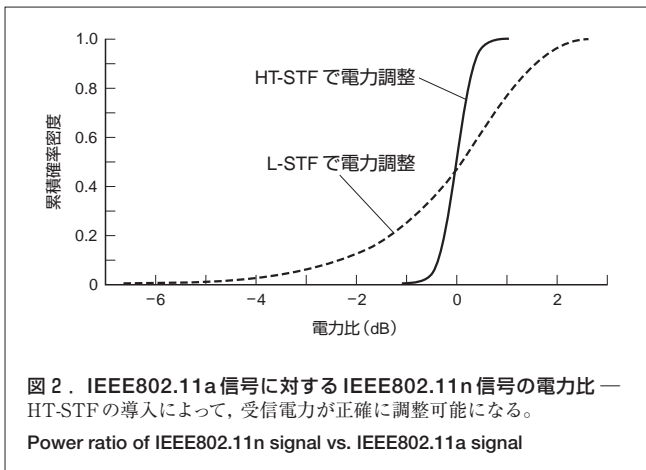
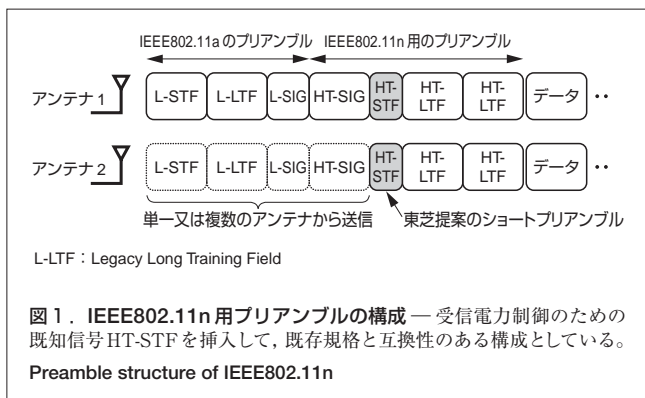
IEEE802.11nで重要なMIMOとAggregation手法について、以下に述べる技術提案を行い、標準化活動に貢献している。また、より高スループットな通信を提供するためにチャネル帯域を拡張することも検討されており、これに対しても標準化に貢献している。

4.1 MIMO 受信電力制御：プリアンブル

IEEE802.11nでは、複数のアンテナを用いて異なる情報を並列に伝送するMIMO技術が前提となっている一方で、単一アンテナからの送信が前提である既存のIEEE802.11a/gとの後方互換性が重要になる。つまり、IEEE802.11nの端末はIEEE802.11a/gの端末と通信できなければならない、また、IEEE802.11nの信号をやり取りする際には、その間にIEEE802.11a/gの端末がかつてな送信を行わないように制御する必要がある。そのため物理層においては、データ信号の前に送信されるプリアンブル(複数の既知信号の組合せ)の一部をIEEE802.11a/g端末に理解させ、制御することが考案されている。

当社は、このようなIEEE802.11aの端末が理解できる後方互換性を持ったプリアンブルに、IEEE802.11n端末の実装に役だつ既知信号を挿入することを提案している(図1)。先頭のL-STF(Legacy Short Training Field)からL-SIG(Legacy SIGnal Field)までは、既存のIEEE802.11a規格とまったく同じものになる。この部分は、IEEE802.11a端末にきちんと理解させるという制約上、単一のアンテナで送信することが望ましいが、後から来るIEEE802.11n用の信号は複数アンテナから送信されるため、複数のアンテナから送ることになる。そのためIEEE802.11a用の信号は指向性を持ってしまい、後から来る指向性の小さいIEEE802.11n用の信号とは受信電力に大きな差が生じる問題がある。

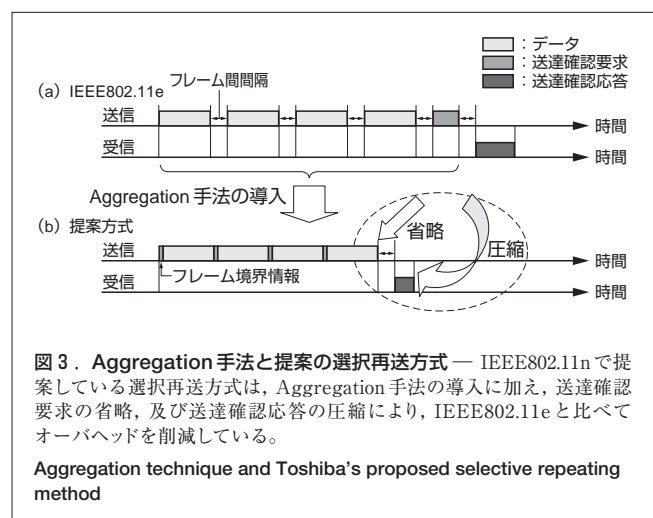
そこで当社は、HT-STF(High Throughput Short Training Field)という既知信号を、IEEE802.11a/gが理解できる部分とIEEE802.11nが理解できる部分の間に挿入することを提案している⁽²⁾。この既知信号は、IEEE802.11n用の送信形態で複数のアンテナから送られ、後から来るIEEE802.11nの受信信号の受信電力を正しく調節することに



用いられる。このHT-STFを用いた場合と用いない場合を比較すると、図2に示すように、受信信号に電力差が生じる。この差は、受信機のアナログ/デジタル変換器において、デジタル信号処理で必要となるビット数に効いてくる。HT-STFを導入することにより必要なビット数を削減でき、回路規模や消費電力の低減につながる。

4.2 Aggregation対応の再送手法：Enhanced BA

前述のようにMAC層のコア技術としてAggregation手法がある。これは、ひと言で言えば、複数のフレームをまとめてフレーム間を区切る時間や物理層ヘッダなどのオーバーヘッドを削減し、送信の効率化を図る技術である。その際、選択再送技術が深くかかわってくる。現状のIEEE802.11eでは図3(a)に示すように、データフレームを送信する際、まずチャンネルにアクセスした後、同一アて先に対し同一特性のデータフレームをバースト的に送信し、その後これらのデータの送達確認をするために送達確認要求(BAR: Block Ack Request)フレームを送信し、受信側が送達確認応答(BA: Block Ack)フレームを返すBA方式がある。また、伝送路状態に応じて再送のリスクを軽減するために、フレーム



を小さなフラグメントに分割する技術がある。この技術では、IEEE802.11eのBAフレームでは最大フラグメント数(16)まで対応するため、送達確認を示すフィールドを128バイトも用意する必要がある。

図3(b)のようにAggregation手法を適用した場合、もともと一つのフレームのようにまとめて送信しようとしているので、フラグメント処理は冗長になる。そこでフラグメント化をやめることにより、送達確認のフィールドを1/16に、つまり8バイトに圧縮することができる。これがCompressed BA方式の提案である^{(3),(4)}。

また、AggregationフレームでBARを代替し、BARフレームを省略することができる。これが当社のImplicit BAR方式である。データ受信側では、Aggregationフレーム内のデータフレームの受信状態をBAフレームで返す動作を行い、BAフレーム生成時の処理負荷を軽減する効果がある。これがPartial State BA方式の提案である⁽³⁾。

4.3 チャンネル帯域拡張：20/40 MHz 共存

物理層での伝送レートの向上技術としてMIMOが注目されていることは前述のとおりであるが、もう一つ、チャンネル帯域幅を拡張して伝送レートを向上しようとする動きがある。今までの無線LANのチャンネル帯域幅は20 MHzであったが、隣接する20 MHzチャンネルを二つ用いて40 MHzチャンネル帯域幅を用いるというものである。現在、日本では法律上適用できないが、米国などでこのチャンネル帯域拡張を使うことができる。

この場合、既存の無線LANで行われる20 MHzチャンネル帯域幅での通信との共存が重要となってくる。20 MHz通信に対して40 MHz通信を混在させる場合、40 MHz通信では2チャンネルが同時に空くの待たなくてはならないため、送信機会をなかなか得ることができない、一方、40 MHz通信と20 MHz通信が重なってしまうと、干渉により通信品質が劣化するなどの問題がある。そこで当社は、20 MHzと40 MHzの両通信方式を共存させるための提案を行っている⁽⁵⁾。概略を説明すると、図4に示すように、基地局は20 MHzの二つのチャンネルを順次予約して40 MHz通信期間を開始し、逆に、二つのチャンネルを順次開放して40 MHz通信期間を終了する。このようにして基地局が20 MHz通信期間と40 MHz通信期

間を設ける。ここで予約と開放を行う方法は、IEEE802.11で用意されている仮想キャリアセンス(NAV: Network Allocation Vector)の仕組みを応用する。

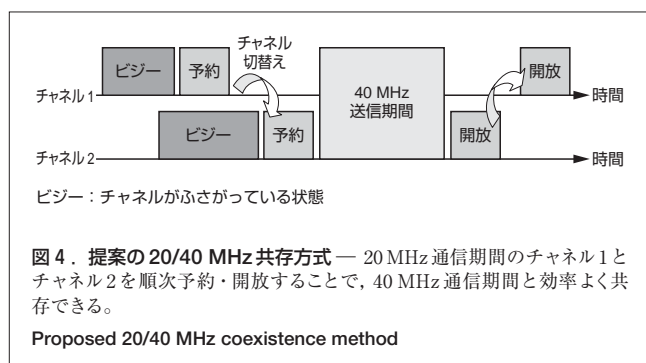
5 あとがき

IEEE802.11nは、物理層のMIMO技術とMAC層のAggregation手法などによって、100 Mビット/s以上のスループットを達成することを目指している。2003年9月に開始された標準化作業では複数の提案がなされたが、2006年1月に提案の一本化を達成した。2007年前半には標準が成立する見込みである。標準化作業の途中で携帯端末向けの1アンテナ要求を受け入れることになり、応用範囲が当初想定PCと映像・音声から、更に携帯端末にまで広がった。

当社は、MIMO受信電力制御を容易にするプリアンブルやAggregationに適した選択再送方式、チャンネル帯域拡張に対応する20 M/40 MHz共存方式を提案するなど、積極的に標準化に貢献している。

文献

- (1) IEEE Std. 802.11e-2005. "IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements". 2005, 189p.
- (2) 青木重秀, ほか. "MIMOシステムにおけるAGCを考慮したプリアンブル構成の検討". 電子情報通信学会2004総合大会講演論文集. 東京, 2004-03, B-5-25. (CD-ROM).
- (3) 足立朋子, ほか. "IEEE802.11n高速無線LAN MAC層提案(1); 標準化動向と提案概要". 電子情報通信学会2005ソサイエティ大会講演論文集. 札幌, 2005-09, B-5-172. (CD-ROM).
- (4) Nakajima, T., et al. "Compressed Block Ack, an efficient selective repeat mechanism for IEEE802.11n". IEEE PIMRC 2005. Berlin, Germany, 2005-09, F-08-05.
- (5) 宇都宮依子, ほか. IEEE802.11n高速無線LAN実現に向けた20/40 MHz 端末共存方式. 電子情報通信学会論文誌B. **J89-B**, 2, 2006, p.153 - 170.



高木 雅裕 TAKAGI Masahiro

研究開発センター 通信プラットフォームラボラトリー主任研究員。ネットワークプロトコル及びネットワークシステムの研究・開発に従事。電子情報通信学会, ACM会員。Communication Platform Lab.



竹田 大輔 TAKEDA Daisuke

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー研究主務。無線通信システムの開発・設計に従事。電子情報通信学会会員。Mobile Communication Lab.



足立 朋子 ADACHI Tomoko, Ph.D.

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー, 工博。メディアアクセス制御及びプロトコル制御の研究開発に従事。電子情報通信学会会員。Mobile Communication Lab.