

次世代ホームゲートウェイ向け 2.4GHz/5GHzデュアルバンド無線LAN技術

中原敏光* 柳 崇**
吉原幸輝*
内田 繁**

2.4GHz/5GHz Dual Band Wi-Fi Technologies for Next Generation Home Gateway

Toshimitsu Nakahara, Yukiteru Yoshihara, Shigeru Uchida, Takashi Yanagi

要 旨

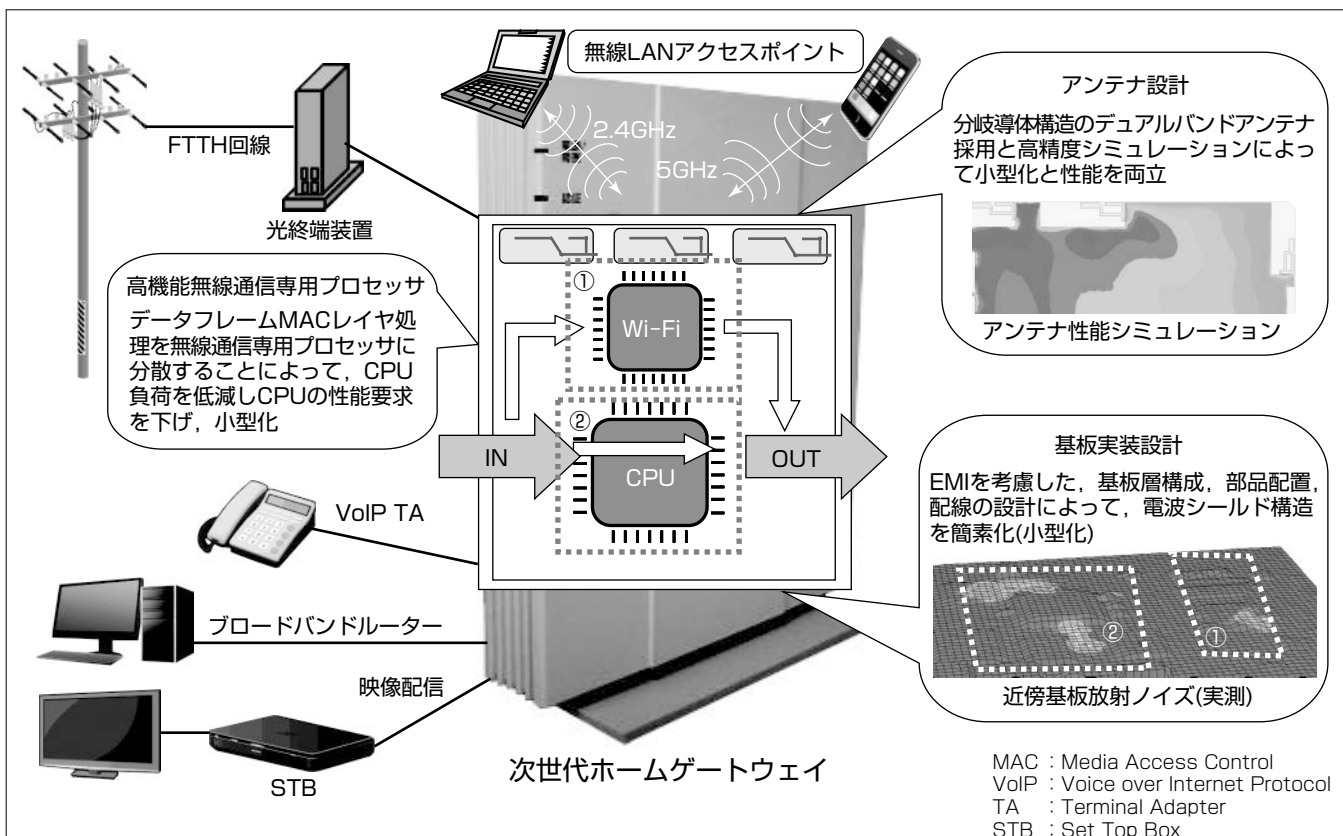
ホームゲートウェイは、パソコンやアナログ電話、スマートフォン等の無線LAN端末を収容し、FTTH(Fiber To The Home)回線を介しインターネットアクセスや電話サービスを提供するための宅内通信装置である。宅内の通信手段として大きく発展した無線LANは、高速伝送を実現するIEEE 802.11ac(以下“11ac”という。)規格⁽¹⁾が2014年1月に承認され、同時期に三菱電機は11acをサポートするホームゲートウェイの販売を開始した。この製品の無線LANの特長は次の2点である。

- (1) 高速伝送：11ac準拠、3×3MIMO(Multi Input Multi Output)によって物理層で1,300Mbpsをサポート
- (2) 2.4GHz/5GHz両帯域同時通信機能の具備

さらに、次の3つの技術によって性能確保と小型化を両立させ、140×165(mm)の基板面積にホームゲートウェイ全機能を実装した。

- (1) 基板実装技術：高密度実装を行うとともに、EMI(Electro Magnetic Interference)を抑制することによってシールド構造を簡素化する。
- (2) アンテナ実装技術：2.4GHz/5GHz両帯域を共有化したマルチアンテナを基板配線型でオンボード実装し、実装面積最適化とアンテナ性能を確保する。
- (3) CPU負荷低減技術：高速無線通信時のCPU負荷分散を図ることによって、伝送性能を確保した上で放熱構造を簡素化する。

ホームゲートウェイは、スマートハウスで家電製品を統合制御する中核機器として、またクラウドと家電製品を接続する機器として発展するものであり、今回実現した高速無線は家電製品との通信基盤技術として適用され、“スマートで安心な社会”に大きく貢献するものである。



次世代ホームゲートウェイに実装した無線LANの機能と特長

ホームゲートウェイは光通信を使ったインターネット、電話サービスを提供するための宅内通信装置である。今回製品化したホームゲートウェイは、無線LANの機能が拡張され2.4GHzと5GHz(11ac)の同時通信機能を実装した。さらに、ハードウェア要素技術(アンテナ設計、基板実装設計)、及び高機能無線通信専用プロセッサの採用によってホームゲートウェイの小型化を同時に達成した。

1. ま え が き

当社は、ドラフト仕様段階から11acをサポートするゲートウェイの開発に着手し、11acと2.4GHz／5GHz同時通信の両方をサポートするホームゲートウェイを、2014年1月に製品化した。無線LANの回路は、開発効率化のためにモジュールを採用する必要があるが、当社は小型化の市場要求に対応するために無線回路とアンテナのオンボード実装に取り組んだ。小型化取組みの要点は次の3点である。

(1) 基板実装技術

高密度実装と無線回路のEMI性能を考慮した基板実装技術によるシールド構造の簡素化。

(2) アンテナ実装技術

2.4GHz／5GHz共有マルチアンテナ採用、基板配線を使ったオンボード実装によるアンテナ実装面積の圧縮。

(3) CPU負荷低減技術

CPU負荷分散による高速無線通信時の伝送性能とホームゲートウェイ機能のソフトウェア処理の両立、さらに電力消費部位の分散による放熱構造の簡素化。

本稿では、今回実装した無線LANの仕様と、これら3件の装置小型化に取り組んだ実装技術について述べる。

2. ホームゲートウェイの無線LAN仕様

2.1 IEEE 802.11acの仕様

今回新たにサポートした11acの無線に関連する主な仕様を表1に示す。代表例として、帯域80MHz、GI (Guard Interval) = 400nsec, SISO (Single Input Single Output) 時の仕様を掲載する。変調方式256-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) によって、433.3Mbpsの高速伝送がサポートされる。参考までに、帯域(チャンネル)160Mbpsがサポートされる場合は、理論上866.7Mbpsであり、さらにMIMOによってストリーム数分の伝送高速化が実現可能である。

表1. 11acの無線仕様(@80MHzチャンネル)

MCS	変調方式	コーディングレート	伝送レート (Mbps)	EVM (dB)	受信感度 (dBm)
0	BPSK	1/2	32.5	-5	-76
1	QPSK	1/2	65.0	-10	-73
2	QPSK	3/4	97.5	-13	-71
3	16-QAM	1/2	130.0	-16	-68
4	16-QAM	3/4	195.0	-19	-64
5	64-QAM	2/3	260.0	-22	-60
6	64-QAM	3/4	292.5	-25	-59
7	64-QAM	5/6	325.0	-27	-58
8	256-QAM	3/4	390.0	-30	-53
9	256-QAM	5/6	433.3	-32	-51

MCS : Modulation Coding Scheme
 EVM : Error Vector Magnitude (送信変調精度)
 BPSK : Binary Phase Shift Keying
 QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

2.2 ホームゲートウェイの無線LAN仕様

次世代ホームゲートウェイの無線LAN仕様概要を表2に示す。レガシー仕様と呼ばれる普及済みのIEEE 802.11b/g/a⁽²⁾にも対応し、市場機器との互換性を確保した。暗号化方式はWi-Fiアライアンスのセキュリティロードマップに準拠した機能をサポートする。アンテナはオンボード回路用に2.4GHz／5GHz共有小型マルチアンテナを3本、モジュール内部に2.4GHz帯アンテナを2本実装する。図1のチャンネル構成によって、5GHz帯はW52(5.2GHz：36～48ch), W53(5.3GHz：52～64ch), W56(5.6GHz：100～140ch)の3帯域をカバーするため500MHzの広帯域アンテナ設計が必要になる。

次にデュアルバンドと同時通信の仕様について述べる。図2は無線LAN部のブロック図を示し、図に示す通り、①～③の無線LAN回路を持つ。図の①②は3×3MIMOをサポートしたデュアルバンド対応の無線LANチップをオ

表2. ホームゲートウェイの無線LAN仕様

項目	仕様
準拠規格	IEEE 802.11ac/a/b/g/n
周波数帯域／チャンネル	図1参照 2.4GHz帯と5GHz帯の同時通信機能具備
最大伝送速度 (理論値)	(1) 1,300Mbps (11ac：3×3MIMO) (2) 450Mbps (11n：3×3MIMO) (3) 54Mbps (11a, 11g) (4) 11Mbps (11b) ただし、同時通信時は1,300Mbps (11ac：3×3MIMO)と300Mbps (11n：2×2MIMO)の組合せとなる。
セキュリティ	(1) 暗号化 ①WPA2-PSK (AES) ②WPA2/WPA-PSK (TKIP/AES) ③WEP (64bit/128bit) (2) SSIDステルス (ANY接続拒否) (3) MACアドレス制限機能
アンテナ	(1) 2.4GHz／5GHz共有小型マルチアンテナ：3本 (2) 2.4GHzアンテナ：2本

WPA : Wi-Fi Protected Access
 PSK : Pre-Shared Key
 AES : Advanced Encryption Standard
 TKIP : Temporal Key Integrity Protocol
 SSID : Service Set Identifier

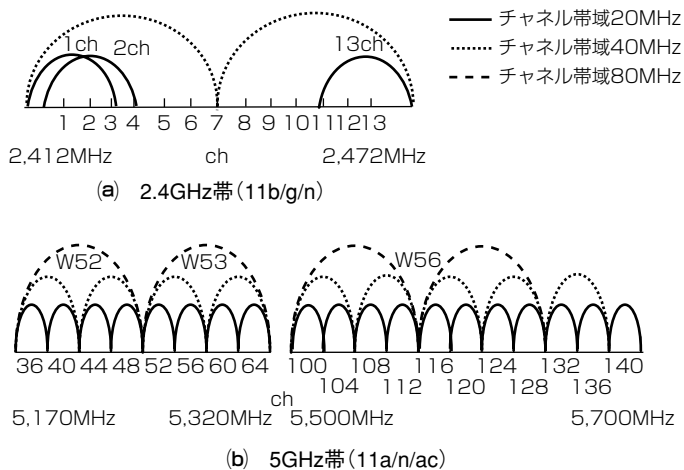


図1. 周波数とチャンネル

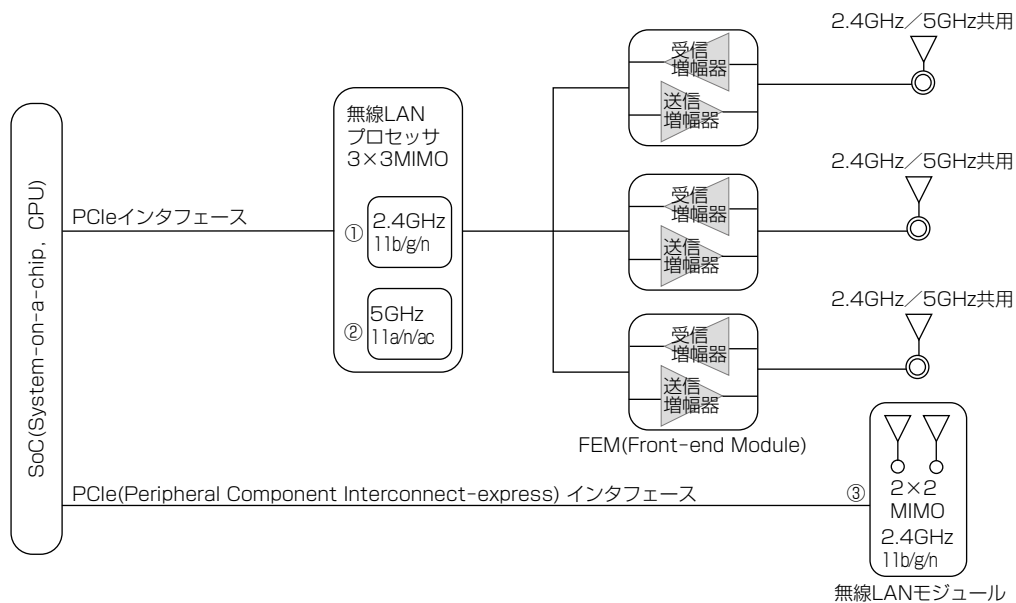


図2. 無線LAN部ブロック図

表3. 無線LANの同時動作仕様

	使用形態	動作回路
1	2.4GHz 11n (3×3MIMO)	2.4GHz単体/図2中の①
2	5 GHz 11ac (3×3MIMO)	5 GHz単体/図2中の②
3	2.4GHz 11n (2×2MIMO) 5 GHz 11ac (3×3MIMO)	2バンド同時/図2中の②+③

ンボード化した回路であり、排他的にどちらか一方を選択して使用する。③は挿抜可能なカード型モジュールである。また表3に示すように図2の②と③を同時に制御して2バンド同時通信を行う。

3. ホームゲートウェイ無線LAN実装技術

3.1 基板実装技術(無線回路のオンボード化)

3.1.1 無線回路レイアウト設計(シールド構造の簡素化)

無線性能確保のために、無線回路は、受信感度劣化の原因となる周囲ノイズの影響を遮蔽する目的で、金属製のシールドを採用する場合がある。今回は、無線回路をシールドレスでオンボード化することを目標として、次の2点に取り組んだ。

(1) 基板からの放射ノイズ抑制

今回使用したSoCは電源が7種類あり、かつ高速メモリ、USB(Universal Serial Bus)、PCIeの高速信号が接続されるため、部品配置と配線上の干渉を回避する配線設計の実現が課題であった。この課題に対して、構想設計段階に主要部品配置及び主要配線経路の基本フロアプランを検討し、次の①～③の方針で詳細設計に着手した。

- ① デジタル/電源回路と無線回路のブロックを分離した上で部品配置を行い、回路間のアイソレーションを確保する。
- ② 基板内の電源パターンと信号パターンをグラウンド層

で分離し、電源と高速信号との干渉を避ける。

③ 高速デジタル信号は表層で配線し、隣接リファレンスグラウンド層にノイズを帰還する配線ルートを確認する。

さらに、詳細設計段階では、スイッチング電源配線からのノイズ抑制や、外部装置接続用コネクタからのノイズ抑制等のノウハウで培ったEMI設計手法を配線設計に適用した。

(2) 放熱対策用金属部品の採用回避

基板のノイズ成分が、筐体(きょうたい)内の金属部品と共振して放射され、無線性能に影響を与える場合があるため、放熱対策用金属部品の採用回避が課題であった。この課題に対して、設計段階で熱解析を行い、基板及び筐体から効率的に放熱する発熱部品配置を求めることによって、放熱用金属部品採用を回避して、放熱特性と無線特性を確保した。なお、CPUの負荷分散によって、基板発熱を分散して抑制する設計も適用しており、仕組みについては後述する。

これらの取り組みによって、無線回路のシールドレス、オンボード実装を実現した。

3.1.2 無線回路基板配線最適化(無線性能向上)

無線回路に小型の0603サイズ部品(0.6×0.3(mm))を採用した。これによって従来の1005サイズ部品(1.0×0.5(mm))との比較で、フットプリントの面積が0.33mm²から0.09mm²に縮小し、浮遊容量は従来部品の約1/3になり、無線性能への影響を低減した。

また、基板上に無線回路のマイクロストリップ線路を形成して無線信号を伝送するが、線路幅と部品のパッド幅の差が大きい場合は、線路上の部品実装部でインピーダンスが不連続になり、反射による損失が増える課題があった。

この課題に対し、0603部品を採用し、リファレンスグラウンドまでの層間距離を最適化することで、線路幅と部品のフットプリントの幅を一致させて反射を抑制した。例として、20mmの配線長にチップ部品を配置したモデルによる反射特性の解析結果を図3に示す。0603チップ部品の場合、1005チップ部品に対し、5GHzで約-13dBから約-26dBと電力比で反射損失を約1/20に抑制できる。

これらの取り組みによって基板配線を最適化し、無線性能を確保した。

3.1.3 無線性能 測定結果

先に述べた基板レイアウトによる放射ノイズの抑制と基板配線の最適化に取り組んだ結果、受信性能を確保し、小型化と両立させた。受信感度はパケットエラー率10%時の受信電力で規定される。一例として図4に2.4GHz, 11n, 40MHz, MCS7(Modulation and Coding Scheme7)チャネルのエア接続時の受信感度特性を示す。規格-61dBmに対して-68dBmの測定結果を得た。

3.2 アンテナ実装技術(アンテナの小型化)

無線LANのアンテナに要求される性能は、①放射効率、②MIMO性能確保のためのアンテナ相関、③金属部品との干渉度合いの3つで規定される。特にアンテナの実装面積が限られているため、アンテナの小型化と性能の両立が課題となる。

これら課題の対策として、2.4GHz/5GHzを統合した

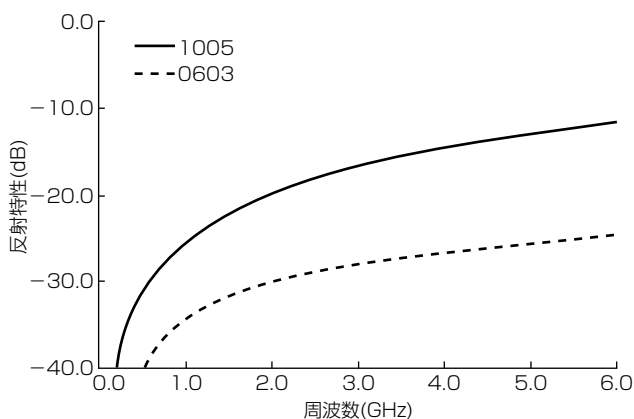


図3. 0603部品適用による反射損失抑制効果

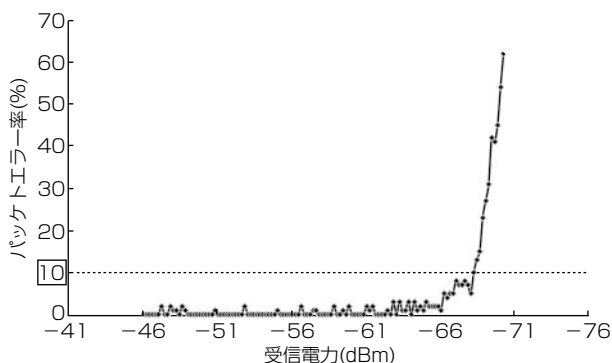


図4. エア接続2.4GHz, 11n, 40MHz, MCS7の受信感度特性

小型マルチアンテナを開発した。図5にアンテナの構造を示す。このアンテナは基板上の配線で構成するオンボードアンテナで、2.4GHz帯に対応する素子と5GHz帯に対応する素子の2つの分岐導体を持つ。2.4GHzと5GHzの相互共振を利用することによって、2.4GHz単体アンテナと同等のサイズでアンテナの広帯域化と小型化の両立を図った。

さらに、2.4GHz/5GHzそれぞれの放射効率を確保するために5GHz分岐導体を基板端に配置し、2.4GHz導体を5GHz導体と地導体の間に配置し、かつ先端を屈曲させる構造とした。

図6に内蔵アンテナのVSWR(Voltage Standing Wave Ratio)特性を示す。全てのアンテナで帯域内VSWR2以下を満足し、放射効率-1.4dB以上の良好な性能を確認した。

また、2つ目の性能要件であるアンテナ相関性能確保のためにはアンテナ間距離を大きくする方が有利である。ただし限られた実装エリアに複数のアンテナを実装するので小型化と性能の確保が課題である。そこで、シミュレーションによってアンテナ間隔、配置(向き)やアンテナ周辺のグラウンドの形状を最適化することでアンテナ間の結合を低減し、各アンテナ間の相関係数0.2以下の良好な性能を実現した。

無線LANモジュール(金属)の干渉対策に関しては、モジュール挿入部に拡張グラウンドを設けることによって、放射パターンへの影響を低減した。図7に放射パターンの一例を示す。無線LANモジュールの有無による放射パター

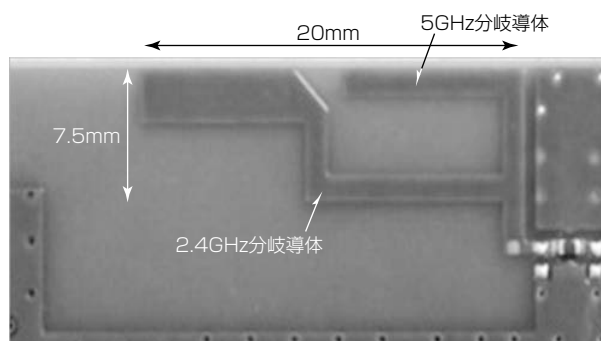


図5. 2.4GHz/5GHz共用小型マルチアンテナ

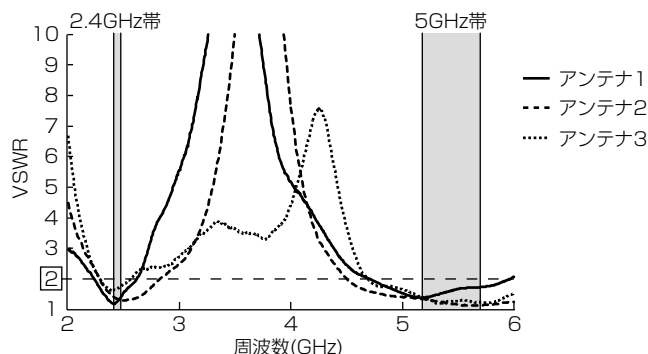


図6. 内蔵アンテナのVSWR特性

ンの変化が小さく、金属部品の干渉が少ないアンテナ性能を確保した。その結果、今回の取り組みによって1,300mm²の限られた実装エリアで性能と小型化の両立を達成した。

3.3 CPU負荷低減技術

現行ホームゲートウェイでは、無線LANデータフレーム送受信処理で、MAC処理の多くをホストCPU上で動作

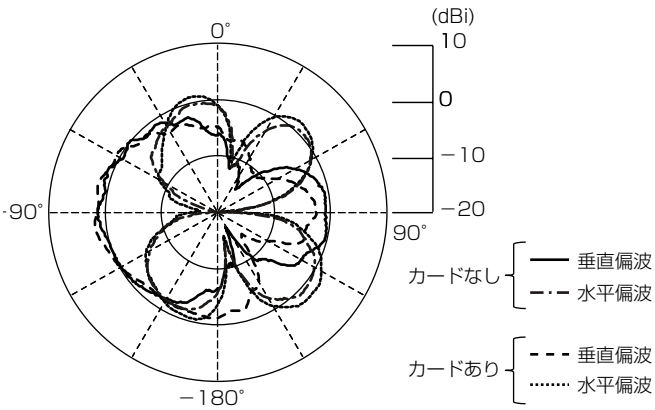


図7. 放射パターンの代表例

するホストドライバで実現している。今回開発した次世代ホームゲートウェイでは、2.2節で述べたように、最大伝送速度1,300Mbps (5GHz 11ac 3×3 MIMO) + 300Mbps (2.4GHz 11n 2×2 MIMO)を実現する必要があり、現行機の最大伝送速度300Mbps (2.4GHz 11n 2×2 MIMO)と比較して、5倍以上のソフトウェア処理性能が求められる。

そこで、次世代機では、CPU負荷の高い11acデータフレーム送受信MAC処理について、その大部分を無線LANプロセッサ上のファームウェアで処理するオフロードアーキテクチャを採用した(図8)。これによって、ホストドライバの処理負荷を大幅に軽減し、さらにCPU負荷分散によって、放熱部品の削減(3.1.1項の(2)参照)にも寄与した。

4. ホームゲートウェイの無線LAN性能評価結果

無線LANのスループット性能評価の構成を図9に示す。1,500bytesのUDP(User Datagram Protocol)パケットをデータ送信側の親機(下り時)、若しくは子機(上り時)に連続的に印加しスループットを計測する。この測定は、親機と

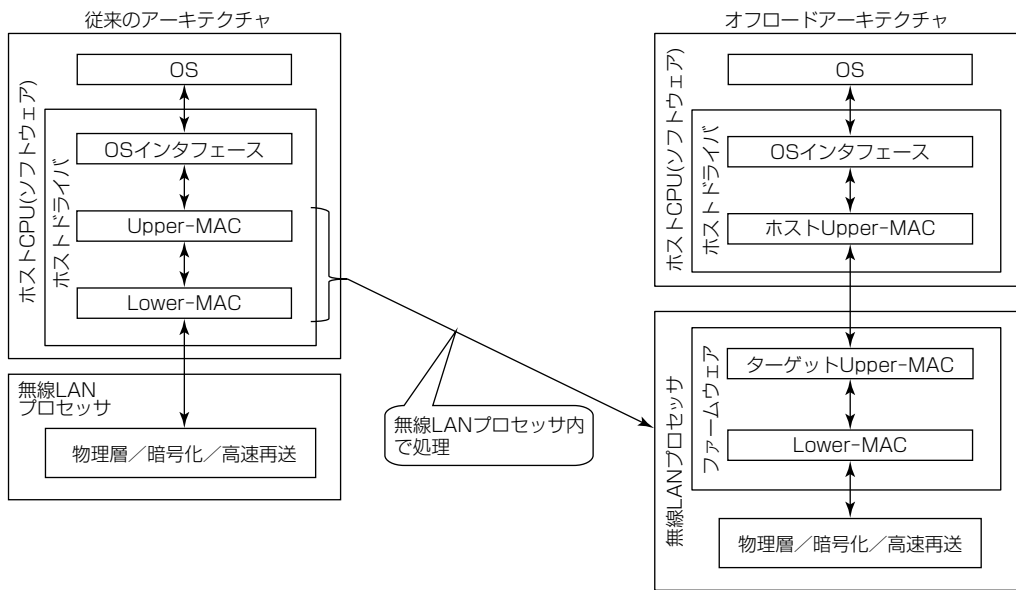


図8. 無線LANデータフレーム送受信処理アーキテクチャ

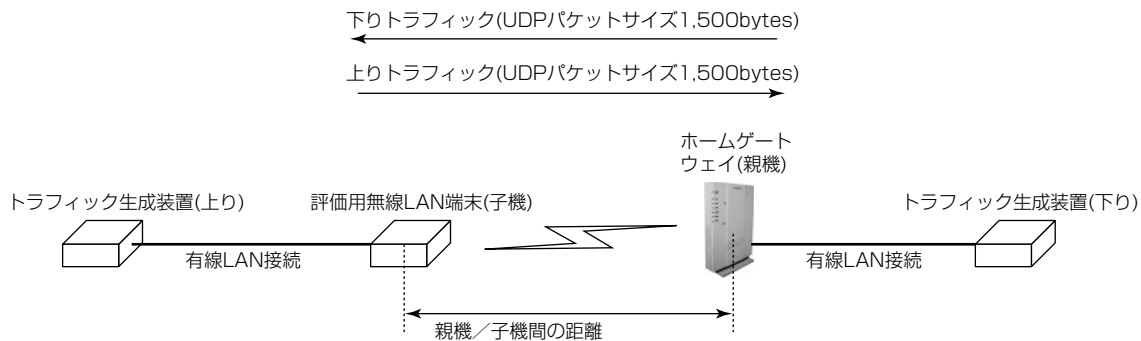


表4の測定は、親機/子機間を同軸ケーブルで接続する。表5の測定は、親機/子機間をエアで接続する。

図9. 無線LANスループット評価の構成

表 4. スループット評価結果(同軸接続)

測定条件	スループット
5 GHz 11ac 3×3 MIMO下り	980Mbps
5 GHz 11ac 3×3 MIMO上り	980Mbps
2.4GHz 11n 3×3 MIMO下り	350Mbps
2.4GHz 11n 3×3 MIMO上り	350Mbps
2.4GHz 11n 2×2 MIMO下り	250Mbps
2.4GHz 11n 2×2 MIMO上り	250Mbps

表 5. スループット評価結果(エア接続11acの例)

親-子機間距離	測定条件	スループット
(1) 約 4 m見通し	下り	680~720Mbps
	上り	660~730Mbps
(2) 約 8 m見通し外	下り	380~420Mbps
	上り	380~390Mbps
(3) 約20m見通し外	下り	約70Mbps
	上り	約70Mbps

子機の総合性能が評価数値として表現されるため、無線LAN端末(子機)は、親機と同等性能のものを評価用として使用した。

ホームゲートウェイ(親機)と無線LAN端末(子機)の同軸ケーブル接続時におけるスループット評価結果を表4に示す。同軸ケーブルで理想的に伝送した場合、5 GHz 11acの伝送は、有線LANのワイヤレート(1000BASE-T)相当の性能を確保した。また5 GHz, 2.4GHzを同時に伝送した場合でも、CPU使用率が無線LAN以外のアプリケーションの処理に影響がないことを確認した。

次に、実際の木造住宅を使用して11acのスループット評価を実施した結果を表5に示す。測定条件は図9に示す通りであり、住宅内で親機と子機の距離をパラメータにして、

スループット性能を評価する。

表5中の(2)の評価結果から、IEEE 802.11acによる無線伝送では、一部屋程度離れた環境でも、表4のIEEE 802.11nの同軸接続スループット実測値を超える性能が得られることを確認した。また、親機-子機間が20m離れた環境でも、通信が可能であることを確認した。

5. む す び

次世代ホームゲートウェイに採用した無線LAN機能の構成と小型化のための要素技術について述べた。小型化に取り組んだ結果、シールドレス化と放熱構造の簡素化を達成し、140×165(mm)の基板面積にホームゲートウェイの全ての機能を実装できた。

今後はこのプラットフォームをベースに他装置への展開を計画しており、スマートで安全な社会を実現するため、この技術の宅内HEMS(Home Energy Management System)用のゲートウェイ、車両無線LANサービス向けアクセスポイント、ビル管理システムへの展開を検討中である。

参 考 文 献

- (1) IEEE Std 802.11ac-2013, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6GHz (2013)
- (2) IEEE Std 802.11-2012, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications (2012)