

# 高速無線LAN用送信ビームフォーミング技術

## Transmit Beamforming Technology for High-Speed Wireless LAN

鍋谷 寿久                      江頭 慶真                      竹田 大輔

■ NABETANI Toshihisa                      ■ EGASHIRA Yoshimasa                      ■ TAKEDA Daisuke

無線通信では、障害物や人の影響によって伝搬路が変動するため、通信品質が利用する時間や場所によって変化する。この影響は、通信速度が高速化されるほど顕著に現れる。特に近年では、IEEE 802.11n（電気電子技術者協会規格 802.11n）に準拠した高速無線LANなど100 Mビット/sを超える通信速度を実現した無線通信システムも誕生しており、無線通信を行ううえで通信品質の向上及び安定化はいつそう重要な課題になっている。

東芝は、高速無線LANの通信品質の向上を図るため、変動する伝搬路の状態に応じた送信制御をデジタル信号処理により行う送信ビームフォーミング技術を開発した。この技術を用いることで、より安定した通信を行いつつ、通信速度の向上や通信可能エリアの拡大を実現した無線通信システムを提供できる。

The quality of wireless communications varies with the time and place due to channel fluctuations caused by the presence of obstacles and people. Improvement and stabilization of communication quality are therefore critical issues for wireless communications, particularly for high-speed wireless LAN complying with the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11n standard.

Toshiba has developed a transmit beamforming technology for high-speed wireless LAN to improve communication quality using digital signal processing according to the state of the wireless channels. This technology makes it possible to realize wireless communication systems with communication robustness, higher transmission rates, and an extended communication range.

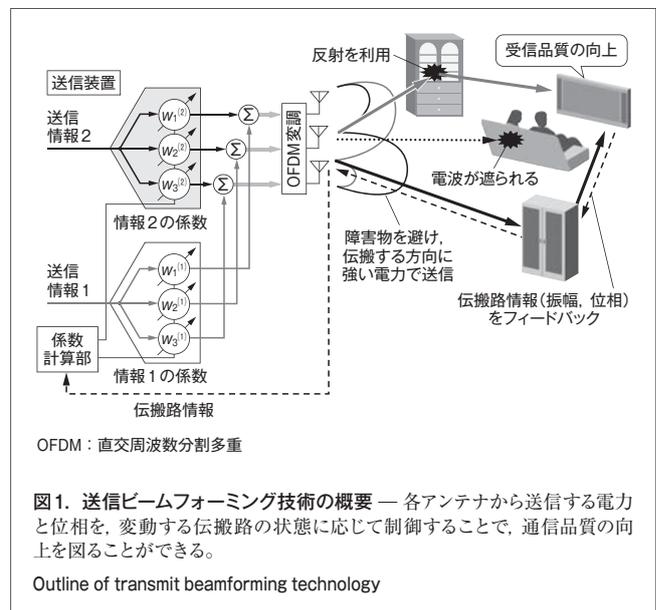
### 1 まえがき

近年、日常生活の様々なシーンで無線通信が使われるようになり、IEEE 802.11a/b/gに準拠した無線LANが広く普及している。また、更なる通信速度の向上を目指し、次世代無線LAN規格であるIEEE 802.11nの標準化作業が2003年9月に開始された。東芝は、IEEE 802.11n規格策定の作業開始当初から積極的に貢献し<sup>(1)</sup>、規格は2009年9月に制定された。

IEEE 802.11nでは、送信機と受信機で複数のアンテナを用いるMIMO（Multiple Input Multiple Output）伝送の適用により100 Mビット/s以上の高速化が実現されており、高画質な無線AV伝送などへの応用が期待されている。

一方、無線通信ではマルチパスの影響などで伝搬路が変動し、利用する時間や場所によって通信品質が変化する。通信速度が高速化されるほど周囲の状況に影響を受けやすくなるため、IEEE 802.11nを用いた通信を行ううえでは、従来の無線LAN規格以上に良好かつ安定した通信品質で無線通信を行うことが重要な技術課題になる。これを解決する技術の一つに、送信ビームフォーミング技術がある。

当社は、通信品質の向上及び、より安定した無線通信システムの提供を目的として、IEEE 802.11n用の送信ビームフォーミング技術を開発した<sup>(2)</sup>。ここでは、開発した技術の概要と試作機を用いた実際の伝搬環境での評価結果について述べる。



### 2 IEEE 802.11n用送信ビームフォーミング技術

#### 2.1 概要

送信ビームフォーミング技術の概要を図1に示す。送信ビームフォーミングは、同じ位相だと強め合い、逆の位相だと打ち消し合う電波の性質を利用する。送信機では複数のアンテナ

を搭載し、受信機の位置で電波が強め合うように各アンテナから送信する電力と位相を自動制御する。その結果、図1に示すような現象が生じ、受信機では従来に比べ通信品質の向上を図ることができる。

実際の環境では、様々な物体で複雑に電波の反射、散乱、回折が生じるため、送信機では信号が受信機までどのように伝搬するかわからない。そのため、送信ビームフォーミング技術を用いた電力と位相の適応制御は、受信機側から受信した信号の振幅や位相といった伝搬路に関する情報、すなわち伝搬路行列をフィードバックしてもらい、得られた伝搬路情報 (CSI: Channel State Information) を利用することで実現できる。

送信機は、把握した伝搬路行列に対し、特異値分解 (SVD: Singular Value Decomposition) (注1) と呼ばれるデジタル信号処理を施すことによって算出される右特異ユニタリ行列 (注2) をウェイト係数として、各アンテナから送信されるデータ信号に乗算することにより、両機器間の伝搬路に応じた最適なビーム形成となる電力と位相で送信できる。

送信ビームフォーミングは、大別して以下の三つの処理により実現できる。

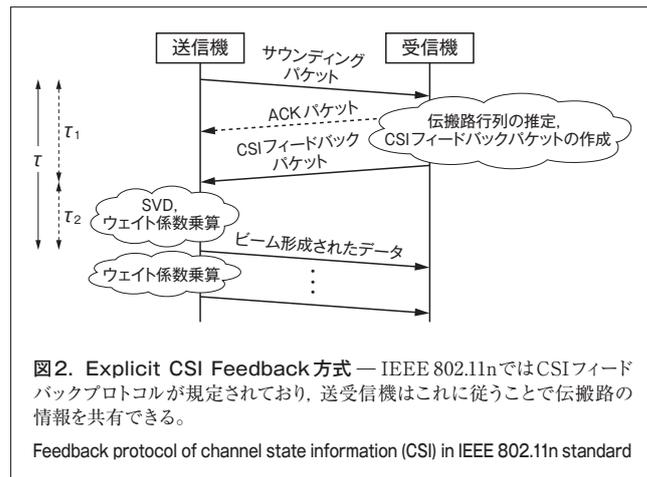
- (1) CSI 把握
- (2) SVD (ウェイト係数算出)
- (3) ウェイト係数乗算

## 2.2 CSIフィードバックプロトコル

2.1節で述べたように、送信ビームフォーミング技術では送信機側で装置間の伝搬路を把握する必要がある。そこで、IEEE 802.11n規格では、送信ビームフォーミング用に送信機と受信機の間でCSIを共有するためのCSIフィードバックプロトコルが規定されている。フィードバックする情報などに応じて4方式が規定されているが、ここではもっともシンプルで一般的な方式であるExplicit CSI Feedback方式について述べる。

Explicit CSI Feedback方式は、受信機で推定した伝搬路行列自身をフィードバックする方式である (図2)。

まず、送信機は受信機に伝搬路を推定させるためサウンディングパケットと呼ばれる伝搬路推定用のパケットを送信する。一方、自分あてのサウンディングパケットを受信した受信機は、サウンディングパケットに対する応答確認 (ACK) パケットを返信するとともに、サウンディングパケットの先頭に付加されたプリアンブル部を利用して伝搬路を推定する。推定した伝搬路行列をCSIフィードバックパケットに反映し、無線LANのアクセス制御方式 (CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) に従い、送信機へフィードバックする。



送信機は、受信したCSIフィードバックパケットの中から伝搬路行列を取り出してSVD処理を実施する。ここで、送信機の送信アンテナ数を $m$ 本、受信機の受信アンテナ数を $n$ 本とすると、受信機が推定する伝搬路行列は各送受信アンテナ間のCSIを含む $m$ 行 $\times$  $n$ 列の行列になる。そのため、フィードバック量は送受信機のアンテナ素子数に依存する。また、機器ごとに伝搬路が異なるため、送信機は、複数の機器に対して送信ビームフォーミング技術を適用する場合には各機器に対してサウンディングパケットの送信を行うことで伝搬路を把握する。

## 2.3 送信ビームフォーミングの課題と対策

2.1節で述べたとおり、送信ビームフォーミング技術では、得られた伝搬路行列から算出される右特異ユニタリ行列をウェイト係数として用いることにより、理論的には最適に指向性ビーム形成された送信となる。しかし、この技術を実際に無線システムとして運用するうえでいくつかの課題も存在する。ここでは、それらの課題と対策について述べる。

### 2.3.1 伝搬路行列のチャンネル相関低下に伴う特性劣化

受信機でのサウンディングパケットによる伝搬路行列の推定時間と送信ビームフォーミングによるデータ送信時間には、図2のシーケンスに示すように時間差 $\tau$ が生じる。一般に、送受信機がそれぞれ同じ位置のままであっても、周囲の人の移動などにより無線伝搬路は時間の経過とともに変化する。そのため、時間差 $\tau$ により、データ伝送時の実際の伝搬路行列 $H_2$ は、受信機からフィードバックを受けた伝搬路行列 $H_1$ と異なってしまふ。この時間遅延 $\tau$ が大きいほど $H_1$ と $H_2$ のチャンネル相関は小さくなるため、最適なビーム形成での送信とはならず、送信ビームフォーミングによる十分な効果が得られないことも考えられる。

そこで当社は、時間遅延 $\tau$ の短縮を図ることでこの課題に対処している。 $\tau$ には、伝搬路フィードバックに起因するプロトコル遅延 $\tau_1$ と、SVD処理とウェイト乗算処理に起因する実装処理遅延 $\tau_2$ が含まれる。そのため、受信機において、CSIフィードバックパケット作成に至るまでの時間を短縮すること

(注1)  $m$ 行 $\times$  $n$ 列の行列  $H$ を、 $H=U\Sigma V^H$  の形の形に分解する処理のこと。ここで、 $U$ 、 $V$ は $m$ 次、 $n$ 次のユニタリ行列 ( $H$ は複素共役転置)、 $\Sigma$ は対角成分のみを持つ対角行列。  
(注2)  $V^*V=I$ を満たす行列 $V$ (\*はエルミート共役)のこと。ここで、 $I$ は単位行列。

と、ほかの送信データに対しCSIフィードバック packets を優先的に送信することにより  $\tau_1$  を短縮し、送信機での特異値分解処理の演算量を1/3程度まで削減することにより  $\tau_2$  を短縮できる。これらの時間短縮により、時間遅延  $\tau$  に伴うチャンネル相関低下の影響を低減している。

また、時間遅延  $\tau$  以外に、受信機での伝搬路推定誤差も実際の伝搬路行列  $H_2$  とのチャンネル相関の低下を引き起こす要因として挙げられる。受信機が伝搬路推定を行う際、位相雑音などアナログ回路の不完全性や熱雑音によって推定誤差が生じる。送信機は、誤差を含んだ伝搬路行列のフィードバックを受けることになるため、ビーム形成に影響を受ける可能性がある。当社は、デジタル補償技術<sup>(3)</sup>を以前に開発しており、この技術の適用で伝搬路の推定誤差を補償できる。

### 2.3.2 オーバヘッド量増大に伴うスループットの低下

CSIフィードバックプロトコルに伴う一連のシーケンスが、データ送信に対するオーバヘッドとなりうる。2.3.1項で述べたように、送信機がフィードバックを受けた伝搬路行列は時間の経過とともにチャンネル相関が低下するため、通信品質向上の観点からはデータ送信のたびにサウンディング packets を送信することによってウェイト係数を更新することが望ましい。しかし、そのつど伝搬路行列のフィードバックを行うことは、送信ビームフォーミングの通信品質改善効果が最大限に得られる一方で、オーバヘッド量の増大につながる。オーバヘッド量の増大は伝送効率の低下を引き起こし、十分なスループット性能が得られないということになる。

このように、ウェイト係数の更新頻度には通信品質改善とスループット性能の間でトレードオフの関係がある。スループットの劣化を防止するには、通信品質の改善が継続できる時間範囲内で一度算出したウェイト係数を複数のデータに対して適用し続けることが望ましい。

そこで当社は、MAC (Medium Access Control) レイヤにおいて、サウンディング packets の送信頻度を可変として利用アプリケーションや伝搬路の変動速度などに応じウェイト係数の更新周期を適応的に変更できる構成にしている。これにより、必要以上の伝搬路行列フィードバックをなくすことができるため、スループットの劣化を必要最小限に抑えつつ通信品質を改善できる。

## 3 実伝搬環境下での評価

無線通信では、利用する時間や場所によって伝搬路の状態が変動することから、伝搬環境が同一になることは皆無である。送信ビームフォーミングの性能は伝搬環境に依存するため、実伝搬環境下で実際に電波を飛ばして評価することが重要になる。ここでは、準静的な伝搬環境であるオフィス環境を利用した試作機による評価結果について述べる。

### 3.1 パケット誤り率特性

IEEE 802.11n に準拠したデータに対して送信ビームフォーミング技術を適用し送信した際のパケット誤り率特性への効果について図3に示す。これは、SVD処理で算出したウェイト係数を算出直後のデータに適用した場合の特性を示している。通常のIEEE 802.11nを用いた送信に比べ、送信ビームフォーミング技術を適用することで十分に通信品質の改善効果が得られている。

送信ビームフォーミング技術の適用により、64QAM (直交振幅変調)、符号化率  $R=2/3$  の組合せ (伝送レート 52 Mビット/s に相当) の特性が、送信ビームフォーミング技術非適用の16QAM、 $R=1/2$  の組合せ (伝送レート 26 Mビット/s に相当) の特性とほぼ同等になっている。これは、送信ビームフォーミング技術を利用することで、同じパケット誤り率を維持したまま高速な送信が行えるようになることを意味する。

次に、チャンネル相関の低下に伴うパケット誤り率特性への影響を評価した結果を図4に示す。2.3節で述べたように、時間の経過とともに伝搬路が変動するため、算出したウェイト係数はチャンネル相関の低下から少しずつ有効性を失ってしまう。図4の評価結果は、サウンディング packets 送信から各時間経過後のタイミングでウェイト係数を適用したデータ送信に対するパケット誤り率特性で、時間が経過した特性ほど通信品質の向上効果が小さくなることがわかる。500 ms 経過後の特性を見ると、送信ビームフォーミング技術非適用の特性に比べて約 2 dB の改善は確認できるが、1.7 ms 経過後の特性と比べると約 3 dB の劣化となっている。一方で、100 ms 程度の経過であればチャンネル相関の低下も小さく、特性への影響は小さいことが確認できる。

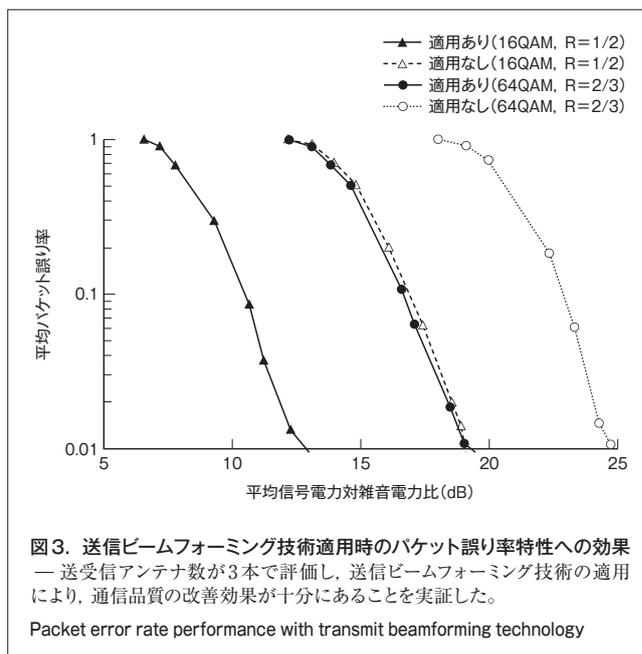


図3. 送信ビームフォーミング技術適用時のパケット誤り率特性への効果  
— 送受信アンテナ数が3本で評価し、送信ビームフォーミング技術の適用により、通信品質の改善効果が十分にあることを実証した。  
Packet error rate performance with transmit beamforming technology

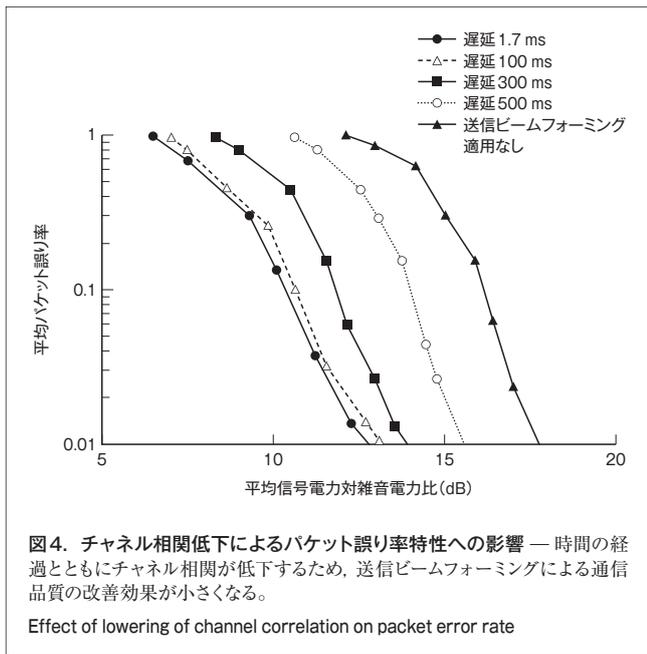


図4. チャンネル相関低下によるパケット誤り率特性への影響 — 時間の経過とともにチャンネル相関が低下するため、送信ビームフォーミングによる通信品質の改善効果が小さくなる。  
Effect of lowering of channel correlation on packet error rate

### 3.2 スループット特性評価

送信ビームフォーミング適用による通信品質の改善及びスループット性能の両面を考慮し、図4の結果から、今回のオフィス環境ではMACレイヤでのサウンディングパケット送信におけるウェイト係数の更新周期を100 msに設定している。リンクアダプテーション技術<sup>(注3)</sup>により最適な伝送レートを選択した場合のスループット特性を図5に示す。サウンディングパケット送信周期を100 msとした場合、伝搬路フィードバックに伴うオーバーヘッドによる伝送効率の低下は約2%にとどめることができる。そのため、オーバーヘッドによるスループット劣化

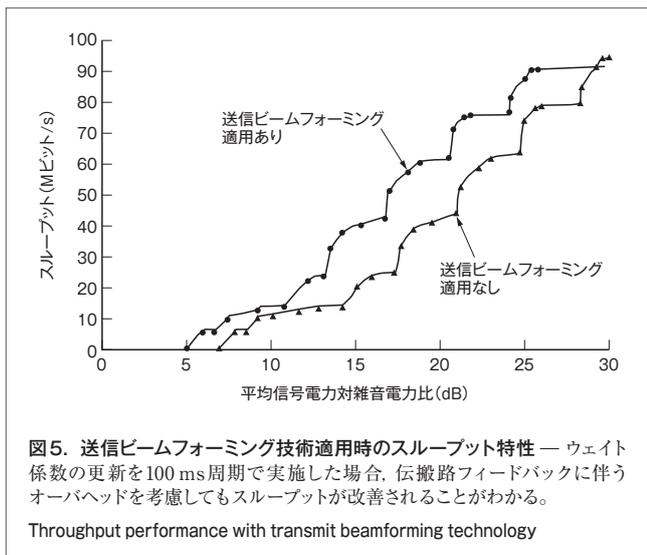


図5. 送信ビームフォーミング技術適用時のスループット特性 — ウェイト係数の更新を100 ms周期で実施した場合、伝搬路フィードバックに伴うオーバーヘッドを考慮してもスループットが改善されることがわかる。  
Throughput performance with transmit beamforming technology

(注3) 複数の伝送レートの中から伝搬環境に応じて最適な伝送レートを選択し、通信速度を適切に制御する技術。

の影響に比べ、送信ビームフォーミング技術の適用によって高速な伝送レートの選択が可能となる効果のほうがはるかに大きく、同一のSNR (信号電力対雑音電力比) 環境下で比較した場合、大幅なスループット改善効果が得られている。

## 4 あとがき

高速無線LAN用に開発した送信ビームフォーミング技術について概要を述べるとともに、実伝搬環境下での評価において大きく通信品質の向上が図れることを実証した。

この技術により、より安定した通信を行いつつ、スループットの向上や通信可能エリアの拡大を実現した無線LANシステムの提供ができるため、家庭内やオフィスなどの様々なシーンで高速無線LANの利用拡大が期待される。

送信ビームフォーミング技術は無線LANに限らず様々な無線通信システムに適用可能な技術であり、今後は、ほかの無線通信システムへの適用も検討していく。

## 文献

- 高木雅裕, ほか. 100 Mビット/s超を実現する次世代無線LAN技術. 東芝レビュー. 61, 4, 2006, p.32-35.
- 鍋谷寿久, ほか. "IEEE 802.11n 準拠 送信ビームフォーミングの試作及び実伝搬環境での効果". 電子情報通信学会 2009 総合大会. 愛媛, 2009-03, 電子情報通信学会. B-5-103.
- 田邊康彦, ほか. デジタル信号処理による無線機器の不完全性補償技術. 東芝レビュー. 63, 5, 2008, p.32-35.



鍋谷 寿久 NABETANI Toshihisa

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー。  
無線通信システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会  
会員。  
Wireless System Lab.



江頭 慶真 EGASHIRA Yoshimasa

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー。  
無線通信システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会  
会員。  
Wireless System Lab.



竹田 大輔 TAKEDA Daisuke, D.Eng.

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー 研究主務,  
工博。無線通信システムの研究・開発に従事。電子情報通信  
学会会員。  
Wireless System Lab.