

# デジタル信号処理による無線機器の不完全性補償技術

Analog Imperfection Correction Schemes Using Digital Signal Processing for Wireless Communications

田邊 康彦 竹田 大輔 江頭 慶真

■ TANABE Yasuhiko ■ TAKEDA Daisuke ■ EGASHIRA Yoshimasa

無線通信を高速・高効率化する場合、アナログ回路の不完全性が深刻な問題となる。一般に、アナログ回路の精度を高めると回路の肥大化や消費電力の増加を招き、携帯用の無線機器としては受け入れられない。特に近年は、アナログ回路を複数個必要とするMIMO (Multi-Input Multi-Output) 伝送の適用が盛んになり、アナログ回路の小型化や低消費電力化はますます重要になっている。一方、無線通信のデジタルLSIは信号処理を増やしても、それほど顕著にLSIの肥大化や消費電力の増加にはつながらない。

そこで東芝は、MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重方式)におけるアナログ回路の不完全性をデジタル信号処理で補償する技術を開発した。この技術により、低価格で低消費電力のアナログ回路を用いても、高精度の無線通信を実現する無線機器を提供できる。

Imperfections in analog circuits are a serious obstacle to the achievement of high-data-rate transmission in wireless communications. In general, highly accurate analog circuits require a relatively large area and high power consumption. On the other hand, it is not necessary that the area and power consumption of large-scale integrated circuits (LSIs) for digital signal processing increase proportionally as signal processing in the physical layer increases.

Toshiba has developed techniques to correct analog imperfections using digital signal processing for multi-input multi-output (MIMO) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). These techniques make it possible to realize highly accurate devices for wireless communications, even when low-cost and low-power-consumption analog integrated circuits are used.

## 1 まえがき

次世代の携帯電話の規格<sup>(注1)</sup>やWiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)、無線LANの規格では、高速伝送を実現し、無線通信の効率を高めるために、高次の多値変調方式がデジタル変調方式として適用されている。高次の多値変調方式を実現するためには、精度の高い信号を生成し、受信した信号を忠実に再生することが必要になり、アナログ回路への要求が高くなる。一般に、回路の肥大化と消費電力の増加を許容することでアナログ回路の精度を高められるが、携帯用の小型端末などバッテリーで動作するモビリティの高い機器では、バッテリーの使用時間に影響するため消費電力は厳しく制限される。また、回路の肥大化は、無線機器に搭載するアナログICの製造コストの増加につながる。このように、携帯用の端末では、回路のサイズや消費電力への制限が大きく、アナログ回路の精度も制限されてしまう。更に、近年の無線通信では、送信機器と受信機器で複数のアンテナを用いるMIMO (Multi-Input Multi-Output) 伝送の適用が盛んに検討されている。MIMO伝送では、各アンテナで

(注1) 3GPP LTE (Third Generation Partnership Project Long Term Evolution)規格。

無線信号を送受信するアナログ回路が必要になり、アナログ回路の肥大化や消費電力の増加は従来の無線機器よりも大きな問題となる。その結果、アナログ回路の不完全性が通信品質を制限するため、不完全性の低減が無線通信の効率を高めるために重要な課題となる。

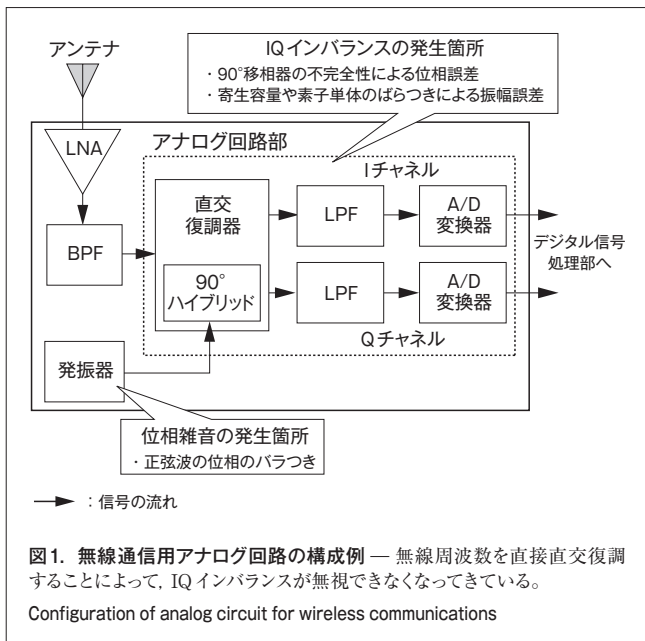
一方、マイクロ波帯の無線通信方式向けのデジタル信号処理用LSIは、アナログ回路に比べて小型化や低消費電力化が比較的容易である。そのため、アナログ回路の不完全性をデジタル信号処理で補償することにより、同一性能の無線機器を低コストで製作することができる。

東芝は、低価格かつ低消費電力で高精度な無線機器の提供を目的とし、MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重方式)伝送を適用した無線通信方式を対象に、受信部のアナログ回路の不完全性をデジタル信号処理で補償する技術を開発した。ここでは、その概要を述べる。

## 2 無線通信におけるアナログ回路の構成と不完全性

無線機器受信部のアナログ回路の構成例を図1に示す。

図1の無線機器を用いる場合、アンテナで受信した信号は



LNA (Low Noise Amplifier: 低雑音増幅器) などの増幅器で増幅された後、必要な信号の帯域だけがBPF (Band Pass Filter: 帯域通過フィルタ) で抽出され、直交復調器でI (In-Phase) チャンネルとQ (Quadrature) チャンネルが抽出され、それぞれLPF (Low Pass Filter: 低域通過フィルタ) を通過した後、A/D (Analog to Digital: アナログ-デジタル) 変換器でデジタル信号に変換される。

高次の多値変調方式を適用する場合、アナログ回路の次の二つの不完全性が、通信品質の主な劣化要因となる。

- (1) 位相雑音
- (2) IQインバランス

位相雑音は、共振器で発生する正弦波の位相揺らぎであり、源振となる水晶発振器の揺らぎや共振器で発生する雑音の影響で生じる。その結果、正弦波が線スペクトルにならずに帯域幅が生じ、キャリア間の干渉を引き起こす。

一方、IQインバランスは、直交復調器で用いる90°移相器の不完全性、IチャンネルとQチャンネルの経路長の差異、回路の寄生容量、及びA/D変換器やLPFの個体差などが原因となって生じる。その結果、IチャンネルとQチャンネルの位相差が90°ではなくなってしまう、振幅も同一でなくなってしまう。IQインバランスは、無線周波数の信号を直接直交復調するダイレクトコンバージョン方式が主流となった昨今、特に劣化が顕著になっており、数dBの振幅差、数度の位相誤差が生じる可能性がある。

### 3 デジタル補償技術

ここでは、第2章で示したアナログ回路の不完全性を補償する技術について述べる。

#### 3.1 位相雑音補償技術

MIMO-OFDM 伝送において位相雑音が無視できない場合、次の二つのひずみが生じる。

- (1) 位相変動が累積されることによって生じる全サブキャリアで共通な位相誤差
- (2) 1シンボル内での位相変動によるサブキャリア間干渉

(2)のサブキャリア間の干渉は位相雑音の中高周波成分に起因し、不規則かつ高速で変動するため、正確に補償することは困難である。それに対し、(1)の全サブキャリアで共通な誤差は、位相雑音の低周波成分が支配的な誤差であり、受信機が既知のパイロット信号を、OFDM信号の一部のサブキャリアで送信することによって、デジタル部で簡易な補償ができるようになる。位相雑音は、PLL (Phase Lock Loop: 位相同期ループ) のループフィルタで帯域制限されるため高周波成分のレベルが低くなり、一般に(2)よりも(1)の位相誤差が支配的となる。したがって、OFDM伝送を用いる無線通信方式では一般に、パイロットサブキャリアがOFDMシンボルに挿入される。

このようなパイロットサブキャリアを用いることで、位相雑音の低周波成分をデータシンボルについては補償できるが、伝搬路応答を推定するときは、伝搬路によるひずみと位相雑音によるひずみを識別できず、伝搬路応答の推定に位相雑音による位相誤差が含まれてしまう。MIMO伝送では、複数の送信アンテナからの信号を分離し、それぞれ復調する必要があるため、伝搬路応答の推定に誤差が生じると信号間の干渉が生じ、誤差の影響が顕著に現れてしまう。

一般に、MIMO伝送では、データ信号を送信する前に、相互に直交する受信側で既知のパイロット信号が各送信アンテナから送信され、各送信アンテナと受信アンテナ間の伝搬路応答を推定する。このとき、位相雑音が生じると、推定される伝搬路応答は(1)式のように表される<sup>(1)</sup>。

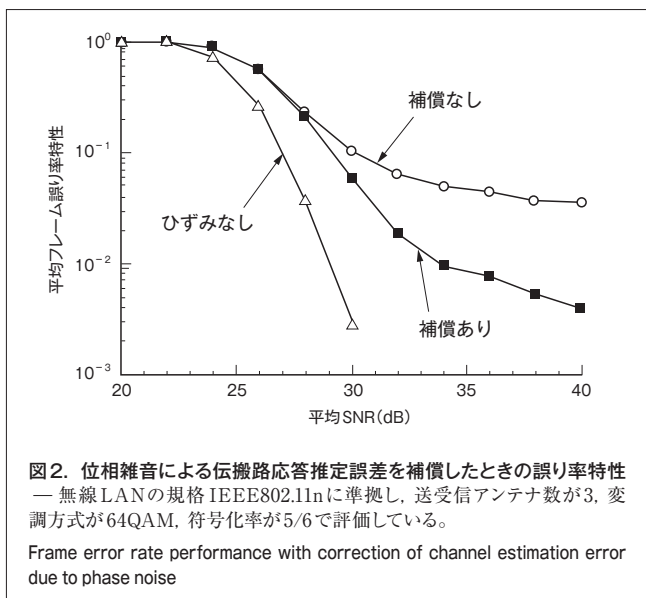
$$H'_k = H_k \Phi \tag{1}$$

ただし、 $H_k$ は、 $k$ 番目のサブキャリアにおける伝搬路応答行列の真値、 $\Phi$ は、パイロット信号の直交系列と各受信シンボルにおける位相誤差に依存して決定されるユニタリ行列である。このように、伝搬路応答の推定値にはほかのアンテナの伝搬路応答が混ざってしまうことがわかる。このような伝搬路応答行列を用いてMIMO復調を行うと、各送信アンテナからの信号が相互に干渉し、復調精度が劣化してしまう。

このように、位相雑音は、前述した二つの影響と同じく信号を直接ひずませるだけでなく、間接的なひずみも引き起こす。

そこで当社は、一般化最小二乗法を用いて伝搬路応答の推定値を補償することによって間接的なひずみも補償する技術を開発した<sup>(1)</sup>。

位相雑音に起因する伝搬路応答の推定誤差をこの技術で



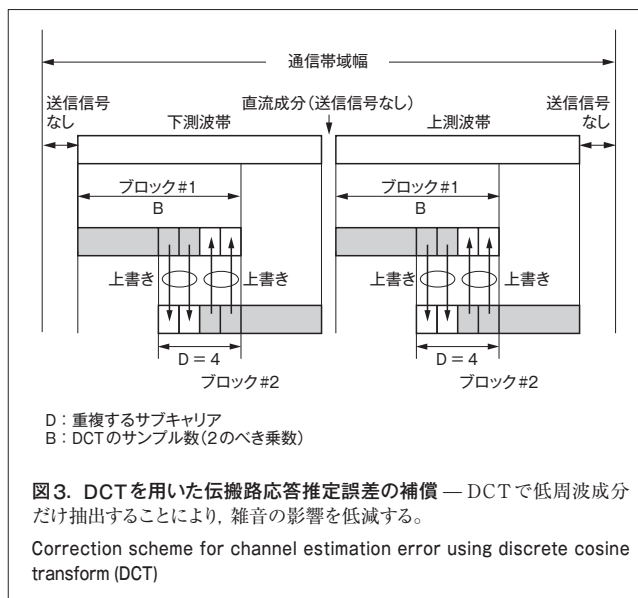
補償したときの、誤り率特性への効果を図2に示す。位相雑音によるひずみを直接補償しているわけではないため、位相雑音の影響は残留するが、それを間接的に取り除くことによって十分に効果が得られることがわかる。

一方、電波の受信電力が高く、SNR (Signal Power to Noise Power Ratio: 信号電力 対 雑音電力比)が高い場合は、伝搬路応答の推定誤差を劣化させる要因として前述の位相雑音が支配的になるが、SNRが低い領域では熱雑音が支配的になる。したがって、伝搬路応答の推定精度を高めるためには熱雑音対策も重要になる。

伝搬路応答の推定で熱雑音の影響を抑圧する手法として、伝搬路応答がサブキャリア間で相関を持つことを利用する技術が一般に適用される。熱雑音として白色雑音を仮定すると、雑音は帯域全体にスペクトルが均等に分布するのに対し、伝搬路応答は低周波成分のスペクトルが支配的になるため、DCT (Discrete Cosine Transform: 離散コサイン変換)を用いて高周波成分を抑圧する技術が提案されていた<sup>(2)</sup>。しかし、OFDM伝送では、一般に帯域両端近傍のサブキャリアは隣接チャンネルからの干渉の影響が大きくなるため、利用されないことが多い。そのため、OFDM伝送においてもサブキャリア数は2のべき乗にならないのが一般的である。したがって、従来の技術ではDCTの演算に高速変換が適用できず、演算量が多くなる問題があった。

そこで当社は、図3に示すように、一部のサブキャリアが重複することを許容して帯域全体を2のべき乗数の複数のブロックに分割し、演算量を削減する技術を開発した<sup>(3)</sup>。その結果、無線LANの規格IEEE802.11n (米国電気電子技術者協会規格802.11n)の例では、演算量を1/10以下に削減することができた。

DCTは画像圧縮で広く利用されており、DCTで高周波成分



を抑圧すると、ブロックノイズが原信号の両端に発生することが知られている。この技術でも同様のノイズが発生するが、ブロックの重複を利用してブロックノイズの影響を低減している。

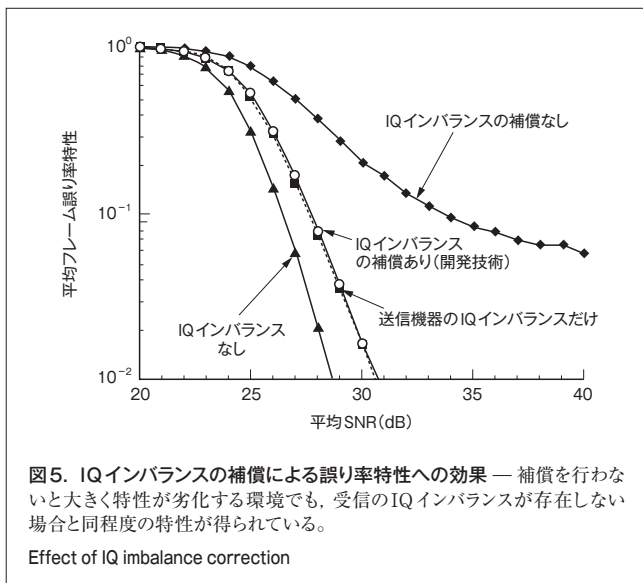
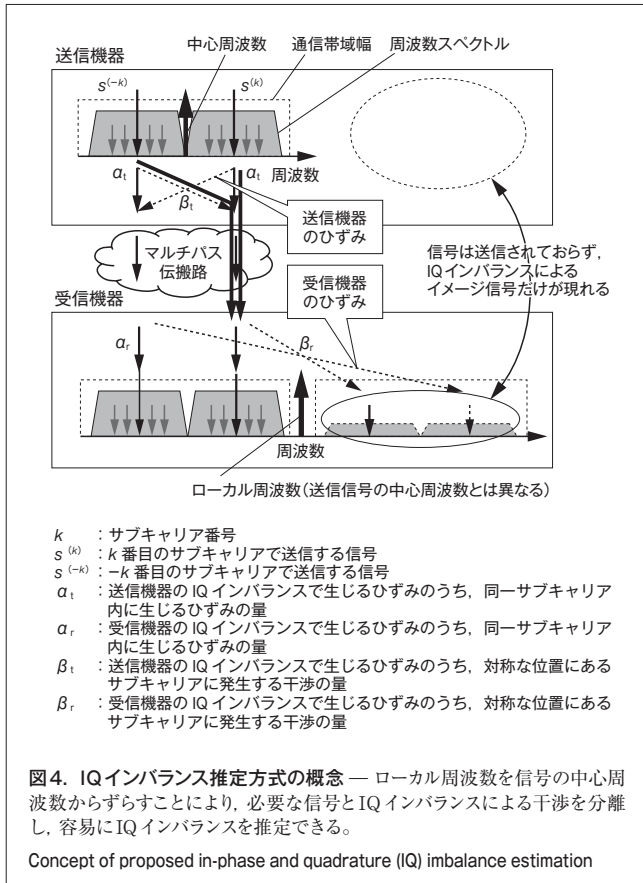
開発技術と従来技術を誤り率特性で比較した結果、開発技術では演算量を1/10以下に削減しているにもかかわらず、従来技術と同程度の特性が得られることを明らかにした<sup>(3)</sup>。

### 3.2 IQインバランス補償技術

図1に示した直交復調器やA/D変換器で発生するIQインバランスの補償は、既知の信号を入力することで振幅誤差と位相誤差を推定し、それらの誤差を打ち消すような処理を施すことによって実現できる。しかし、送信信号にも送信機器のIQインバランスが含まれる場合、受信端末のひずみだけを推定することは困難である。また、出荷前にIQインバランスを推定するのではなく、運用時に推定する場合、既知信号を用いるためには、送信信号を受信回路にフィードバックさせるか、ほかの無線機器が送信する既知信号を利用しなければならないなかった。

そこで当社は、任意の未知の信号に対して適用でき、送信機器のIQインバランスが含まれていても受信機器のIQインバランスを推定できる方式を開発した<sup>(4)</sup>。この技術では、図4に示すように、IQインバランスの振幅誤差と位相誤差を推定する際、受信機器のローカル周波数を送信された信号の中心周波数からあえてずらして受信する。この技術は、IQインバランスが生じると中心周波数を軸として対称な位置にあるサブキャリアの信号が相互に干渉することに着目している。この技術を適用すると、図4に示すように、受信した信号とIQインバランスによって発生した干渉信号が異なる周波数帯に存在する。その結果、受信信号とIQインバランスによって発生した干渉を容易に比較することができ、振幅誤差と位相誤差を推定することができる。

開発技術の性能を誤り率特性で評価した結果を図5に示す。開発技術では、送信機器のIQインバランスが含まれた信号でIQインバランスを補償しても、受信機器にIQインバランスが含まれていない場合と同程度の特性が得られており、受信機器のIQインバランスを高精度に補償できていることがわかる。



## 4 あとがき

MIMO-OFDM伝送を適用した無線機器を対象に、受信部のアナログ回路の不完全性をデジタル信号処理で補償する技術について、概要を述べた。

この技術により、アナログ回路への要求仕様を軽減し、機器を低コスト化することができる。一方、送信部の補償については、送信信号を受信回路にフィードバックする必要があり、回路設計時からデジタル信号処理方式を確定し、デジタル部とアナログ部を同時に設計する必要がある。送信部のひずみに対しても、デジタル信号処理を適用することで同様の効果が期待できるため、アナログ回路の設計とデジタル回路の設計の連携がよりいっそう重要になる。

## 文献

- 田邊康彦, ほか. "MIMO-OFDM伝送における位相雑音に起因する伝搬路推定誤差の補正方式". 電子情報通信学会 2006ソサイエティ大会. 金沢, 2006-09. 電子情報通信学会. B-5-46. (CD-ROM).
- TENG, Y., et al. Performance Evaluations of DCT Interpolation-Based Channel Estimation Method for MIMO-OFDM System. IEICE Transactions on Communications. E-88, 9, 2005, p.3806 - 3810.
- Takeda, D., et al. "Channel Estimation Scheme with Low Complexity Discrete Cosine Transformation in MIMO-OFDM System". IEEE 65th Vehicular Technology Conference. Dublin, Ireland, 2007-04, IEEE. 2007. p.486 - 490.
- Tanabe, Y., et al. "A Novel IQ Imbalance Estimation Scheme using Transient Local Frequency for OFDM Systems". IEEE 18th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Athens, Greece, 2007-09, IEEE. 2007. p.1 - 5.



**田邊 康彦 TANABE Yasuhiko, D. Eng.**

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー研究主務, 工博。  
 無線通信のデジタル信号処理に関する研究・開発に従事。  
 電子情報通信学会, IEEE会員。  
 Mobile Communication 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。  
 無線通信のデジタル信号処理に関する研究・開発に従事。  
 電子情報通信学会会員。  
 Mobile Communication Lab.



**江頭 慶真 EGASHIRA Yoshimasa**

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー。  
 無線通信のデジタル信号処理に関する研究・開発に従事。  
 電子情報通信学会会員。  
 Mobile Communication Lab.