

多様な無線通信システムに対応可能な自動整合アンテナ

Automatic Tunable Antenna Applicable to Various Wireless Communication Systems

桧垣 誠

■ HIGAKI Makoto

スマートフォンなどの無線通信端末に内蔵されたアンテナは、近傍に手や机などが接近すると周辺の電波が乱されることにより、無線機との間の整合特性が劣化しやすい。そして整合特性の劣化は、受信感度の低下や送信電力の増大といった問題を引き起こす。

そこで東芝は、アンテナに必要な実装体積を削減し、アンテナ特性をリアルタイムに自動最適化できる自動整合アンテナを開発した。アンテナと無線機の間にはMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 可変コンデンサを接続し、それを自動的に最適制御することでアンテナシステムの広帯域化と小型化を実現した。更に、送信電力をリアルタイムに制御してアンテナと無線機との間の整合状態を改善することで、送信電力を低減できることを試作機により確認した。

Built-in antennas for wireless communication terminals including smartphones are susceptible to changes in the matching condition with the transceiver due to disturbance of the radio waves caused by objects in the vicinity such as the user's hand or head, a desk, and so on. The resulting degradation of matching characteristics can lead to a reduction in the receiver sensitivity and/or an increase in the output power of the transmitter.

To address this issue, Toshiba has developed an automatic tunable antenna to achieve both reduction of the space required for installation of the antenna and automatic optimization of its characteristics in real time. Wider bandwidth and downsizing of the antenna system were realized by adopting microelectromechanical system (MEMS) variable capacitors between the antenna and transmitter together with an optimization controller. Experiments on a prototype antenna system have confirmed that it can reduce the output power of the transmitter by improving the matching condition in real time.

1 まえがき

スマートフォンをはじめとする無線通信機能を備えた情報端末の爆発的な普及に伴い、これらに搭載されるアンテナも進化を遂げてきた。また、デザインの追求やアンテナ設計技術の進歩、基地局数の増加などに伴い、端末用のアンテナは、十数年前まできょう体から引き出すタイプであったが、そのほとんど全てが内蔵・小型化されてきた。しかし、アンテナのサイズと性能の間には原理的にトレードオフ⁽¹⁾の関係がある。このため、アンテナの小型化を必要とする端末のスリム化は、アンテナの設計・実装技術における進歩の恩恵とともに、アンテナの性能限界との妥協点を模索してきた結果とも言える。

2 チューナブルアンテナ

前述したトレードオフを打破する技術として、チューナブルアンテナが以前から知られており⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、東芝も検討してきた⁽⁵⁾。アンテナサイズが小さくなると、図1(a)に示すように目標性能範囲の周波数帯域を満足できない状況が起きる。この問題を解消できるのがチューナブルアンテナである。チューナブルアンテナは、アンテナと無線機の間にはアンテナの動作周波数を可変にする素子を接続したもので、図1(b)のように、アンテナ

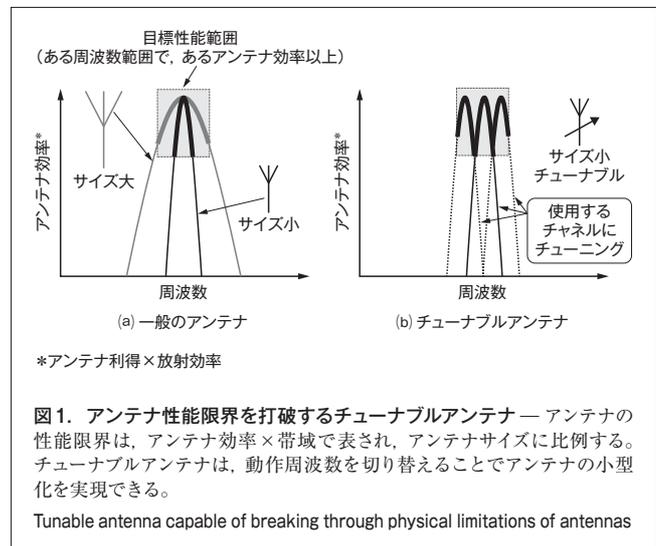


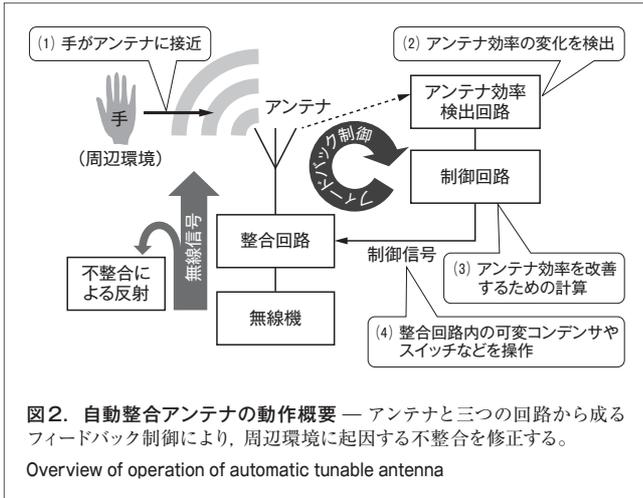
図1. アンテナ性能限界を打破するチューナブルアンテナ — アンテナの性能限界は、アンテナ効率×帯域で表され、アンテナサイズに比例する。チューナブルアンテナは、動作周波数を切り替えることでアンテナの小型化を実現できる。

Tunable antenna capable of breaking through physical limitations of antennas

の動作周波数を使用するチャンネルにチューニングして目標性能を満足することができる。

3 自動整合アンテナ

小型化に伴い、チューナブルアンテナでもチューニングした一つの状態では動作周波数の帯域が狭くなる。このため、手



などの接近による周波数ずれの問題が大きくなるほか、後述するように送信電力が大きくなっても信号がひずまない可変素子が必要になるなどの課題が残る。これらの課題を解決するのが、ここで述べる自動整合アンテナである。

3.1 構成と動作

自動整合アンテナは、以下のように動作を行う(図2)。

- (1) 電波を送受信するアンテナに手が近づくと、アンテナ近傍の電波が乱される。
- (2) 検出回路によりアンテナ効率、又はそれに相当する物理量の変化を検出する。
- (3) アンテナ効率を改善するための計算を行う。
- (4) 整合回路内の可変素子进行操作する。

この一連の動作で、アンテナの入力特性が変化したことによる不整合を修正し、不整合による反射を低減できる。自動整合アンテナにおけるループ部分はフィードバック制御システムを構成している。

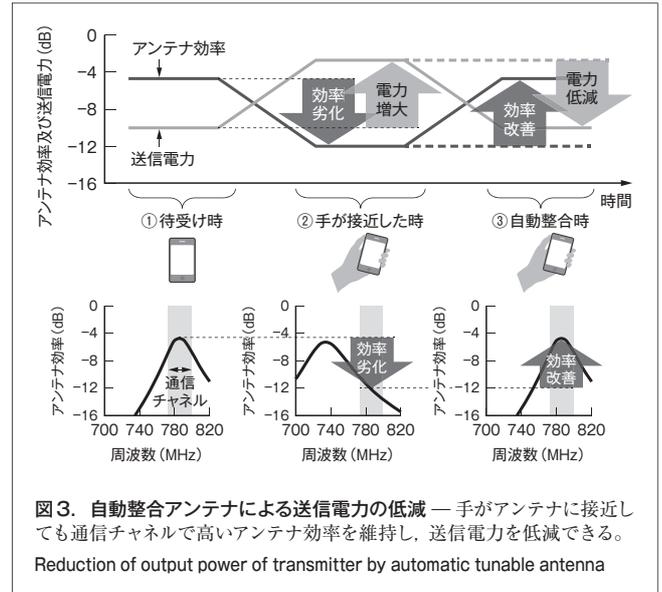
3.2 送信電力の低減

送信電力を制御している無線システムで自動整合アンテナを利用すれば、更に送信電力を低減できる。その仕組みを図3に示す。

端末が待受け時に通信チャンネルでのアンテナ効率が良くなるようにアンテナが設計されている場合(図3の①)、アンテナに手が接近するとアンテナ効率が高い周波数がずれて通信チャンネルでのアンテナ効率が劣化する。そこで、同じ通信品質を維持するために、アンテナ効率が劣化した分だけ送信電力を増大する(図3の②)。

このとき、自動整合機能があれば通信チャンネルでのアンテナ効率が改善され、その改善分だけ送信電力を低減できる(図3の③)。一方、自動整合機能がなければ、図3の③の領域に破線で示したように、低いアンテナ効率と大きい送信電力が続き、結果的に送信電力の増大を招いてしまう。

このように、通信チャンネルの電波の周波数とアンテナ効率の



高い周波数を一致させ続けることにより送信電力を低減することができる。

3.3 技術課題と対策

図2に示した自動整合アンテナを構成する検出回路、制御回路、及び整合回路の三つのブロックにはそれぞれ技術課題がある。ここでは、それらを順に対策と併せて述べる。

検出回路は広帯域化が課題である。近年、携帯電話や無線LANなどの様々な無線システムでは、利用可能な周波数帯が拡張されつつあり、多数の無線システムに対応するには検出器自体も広帯域に安定した特性が必要とされる。この対策として開発したのがプローブ方式であり、その詳細は4.1節で述べる。

制御回路は、通信状況に応じて無線機が送信電力を制御するTPC(Transmit Power Control)に対応する必要がある。TPCは、主に端末と基地局の距離によって相手の受信電力が強すぎたり弱すぎたりしないように送信電力を制御している。一方、自動整合アンテナでは、検出した電力の増減が手などの接近によりアンテナ周辺環境が変化したのか、TPCによって送信電力そのものが変化したのかを判別することが困難である。この課題に対しては、TPCトリガ制御を開発した。その詳細は4.2節で述べる。

整合回路は、特性を可変にするため半導体素子を用いると信号がひずみ、通信チャンネル以外の周波数でも信号が発生してしまうという課題がある。これは、当社が開発したMEMS可変コンデンサを使用することで解決できる⁵⁾。

4 開発技術

4.1 プローブ方式

開発したプローブ方式と従来のカプラ方式との比較を図4

比較項目	プローブ方式 (開発した方式)	カブラ方式 (従来方式)
模式図		
動作帯域の制約	○ なし (周波数に依存しない)	× あり (カブラで制限)
損失	○ 少ない <0.1 dB	× 多い 0.5~2 dB (標準値)

図4. プローブ方式とカブラ方式の比較 — アンテナから出た電波を受信するプローブ方式は、アンテナからの反射波だけを取り出さなければならない従来のカブラ方式に比べて動作帯域や損失の観点で有利である。

Comparison of conventional coupler method and newly developed probe method

に示す。

従来のカブラ方式は、整合回路と無線機の間接続されたカブラによってアンテナから無線機の方向に向かう信号だけを取り出す。このためにはある種の共振現象を利用する必要があり、一定量の信号を取り出せる周波数の範囲、すなわち動作帯域が制限される。

一方、プローブ方式はアンテナの先端付近に微小なプローブを配置して電力検出を行う。アンテナの先端は周波数によらず電荷がもっとも蓄積する箇所であり、プローブと容量結合する。このため、周波数によらずプローブでの検出電力が増えるように制御すればアンテナでの蓄積電荷も増大し、結果としてアンテナの整合状態が改善する。

4.2 TPCトリガ制御

TPCが自動整合アンテナに及ぼす問題点を図5に示す。基地局は、無線通信端末から送信された電波の受信電力に応じて端末側にTPCの指示を出す。端末側は、その指示に従って電力増幅器を制御して送信電力を増減する。一方、点線で囲まれた自動整合アンテナにおける検出電力は、TPCに連動して変化するとともに端末の周辺環境の変化、例えばユーザーの手の接近や、整合回路内の可変コンデンサ C_s 及び C_p

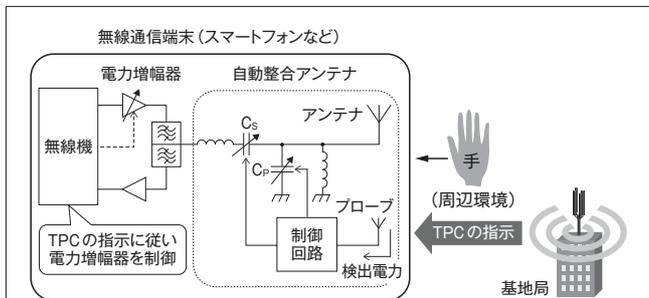


図5. TPCが自動整合アンテナに及ぼす問題点 — 検出電力の変動要因が、自動整合、周辺環境、及びTPCの三つのいずれかであるかを判別することは困難である。

Issues related to effects of transmit power control (TPC) on automatic tunable antenna

の制御などによっても変化する。

このように検出電力は三つの要因で変化するため、可変コンデンサを制御して検出電力を増加させ、整合状態を改善する自動整合アンテナにとって、周辺環境の変化とTPCは外乱になる。そして、検出電力の変動が何によるのかを特定することは困難であるという問題が生じる。

そこで、TPCはアンテナ近傍の周辺環境の変化に比べて数百 μ s間隔の高速な変化であり、制御する電力のステップ幅も無線システムごとに規定されている点に注目した。

この着眼点に基づいて考案したTPCトリガ制御の動作を図6に示す。

制御全体は、可変コンデンサを制御して最適な整合状態を目指す制御モードと、可変コンデンサは停止して周辺環境の変動を監視する待機モードの二つの期間に分かれている。制御モードで可変コンデンサが最適状態に達したと判断されると待機モードに移り、待機モードで環境変動が生じたと判断されると制御モードに移る。

制御モードでは、TPCによって一定の時間間隔で生じる+1 dB又は-1 dBの電力変動を検出した直後に検出電力のサンプリングを行い、可変コンデンサの切替えを行う。これによりTPCとサンプリング、又はTPCと可変コンデンサの切替えが同時に発生することを回避する。次に、TPCを挟んだ二つのサンプリング値による見かけの増分からTPCによる変動分を差し引いて、真の増分である“可変コンデンサの切替えによる”検出電力の増分を算出する。このようにしてTPCによる変動分を差し引いた検出電力を増大していくことで、整合回路を最適化していく。

待機モードでは、可変コンデンサは制御モードで到達した最適状態で停止している。よって、アンテナ近傍の周辺環境に変化がなければ検出電力の変動は、TPCによる+1 dB又は-1 dBに限られる。このとき、例えば手の接近による検出

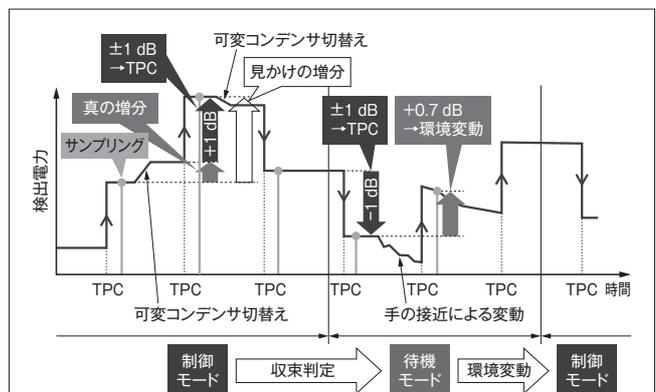


図6. TPCトリガ制御の動作 — 可変コンデンサを制御する制御モードと環境変動を監視する待機モードがあり、TPCによる電力変動の発生をきっかけとして検出電力をサンプリングし、可変コンデンサを切り替える。

Operation of TPC trigger control

電力の変動は、図6に示したようにTPCよりなだからで、TPCを挟んだ二つの検出電力サンプリング値の差は+0.7 dBとなる。この値はTPCで規定されるステップ幅±1 dBと異なるため、環境変動が生じたと判定することができる。この場合、新たな環境の状態に対して別の整合回路の状態が最適である可能性があるため、再び制御モードに移って可変コンデンサを最適化する。

5 試作機

4章で述べたプローブ方式及びTPCトリガ制御を採用した自動整合アンテナの試作機を図7(a)に示す。

試作機は、スマートフォン並みの60×100 mmの基板に、アンテナや、アンテナの先端に近接するプローブ、プローブで受信された高周波信号を直流電圧に変換する電力検出器、直流電圧をデジタル信号に変換するADC（アナログデジタル変換器）、プローブの検出電力に相当するデジタル信号に基づいてMEMS可変コンデンサに設定すべき値を演算するFPGA（Field Programmable Gate Array）、アンテナの整合回路を可変にするMEMS可変コンデンサ、などから構成されている。

回路部分は基本的にMEMS可変コンデンサと同じCMOS（相補型金属酸化膜半導体）プロセスで製造できるため、将来的にはMEMS可変コンデンサと同じICの中に搭載して製品化を目指す（図7(b)）。この自動整合アンテナ用ICにより、追加の部品やスペースがごく僅かとなり、空きスペースに液晶モニターや電池などの部品を従来どおりに搭載できる。

試作機の動作例を図8に示す。まずTPCなし、すなわち一定の電力を供給したまま可変コンデンサを全ての状態に変化させたときの検出電力をカラーマップとして作成し、次にTPCがある場合の試作機の動作履歴を、このカラーマップ上に軌

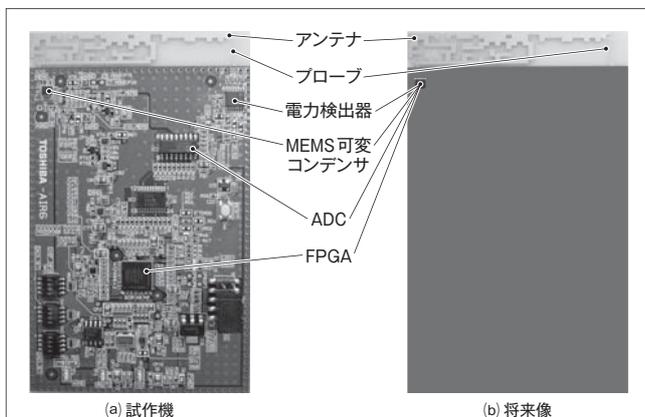


図7. 自動整合アンテナの試作機と将来像 — 図2に示した自動整合アンテナの模式図をハードウェア化した試作機は、将来的には回路部分をIC化して小型化する。

Prototype and miniaturization of automatic tunable antenna

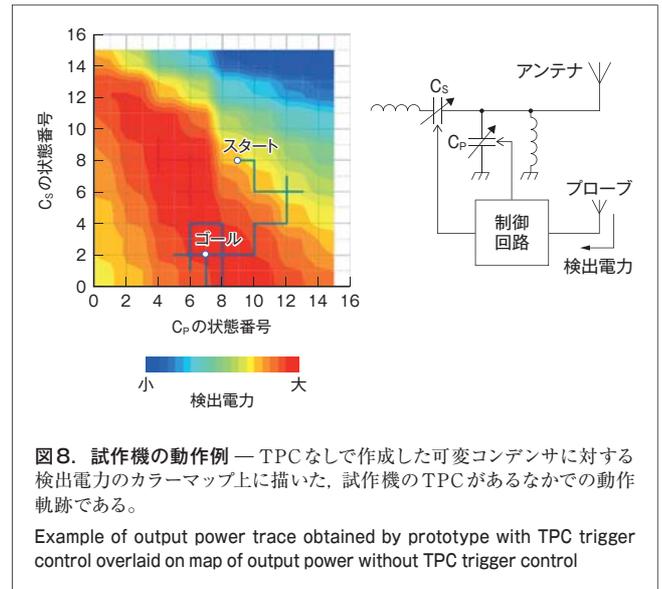


図8. 試作機の動作例 — TPCなしで作成した可変コンデンサに対する検出電力のカラーマップ上に描いた、試作機のTPCがあるなかでの動作軌跡である。

Example of output power trace obtained by prototype with TPC trigger control overlaid on map of output power without TPC trigger control

跡として描いている。検出電力が増加し、アンテナの整合状態が改善する方向に自動的に制御できていることがわかる。

6 あとがき

アンテナ効率を改善し、送信電力を低減できる自動整合アンテナを開発した。整合回路にMEMS可変コンデンサを用い、プローブ方式による広帯域化及びTPCトリガ制御による電力変動への対応ができることを確認した。

今後は、自動整合アンテナ用ICを開発し、様々な小型無線機器への適用を進めていく。

文献

- (1) Gustafsson, M. et al. Physical limitations on antennas of arbitrary shape. Proc. R. Soc. A. **463**, 2086, 2007, p.2589 - 2607.
- (2) Yang, S. et al. "Novel Reconfigurable Multi-band Antennas for Multi-radio Platforms". IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, FL, USA, 2008-01, IEEE Microwave Theory and Techniques Society, 2008, p.723 - 726.
- (3) Mak, A. C. K. et al. Reconfigurable Multiband Antenna Designs for Wireless Communication Devices. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. **55**, 7, 2007, p.1919 - 1928.
- (4) Jung, C. W. et al. "Reconfigurable Antenna for Concurrent Operation over Cellular and Connectivity Bands". IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA, USA, 2008-07, IEEE Antennas and Propagation Society, 2008, p.1 - 4.
- (5) 西尾真貴 他. 高効率な内蔵アンテナを実現するチューナブル アンテナ技術. 東芝レビュー. **66**, 4, 2011, p.16 - 19.



桧垣 誠 HIGAKI Makoto

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。アンテナの研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。Wireless System Lab.