

5Gエリア最適化に貢献する 電波可視化技術 —3GPP対応リアルタイム電波ビジュアライザー—

5Gイノベーション推進室

いのまた
猪又みのる
稔いまい
今井てつろう
哲朗

5Gでの導入が検討されている高周波数帯の電波は、これまで利用していた周波数帯よりも波長が非常に短く、携帯電話などの移動端末周辺の人体や車両などの影響を大きく受ける。ドコモは、このような影響に伴う電波の到来状況の変化を、ヘッドマウントディスプレイにより可視化できる装置を開発した。本装置は、3GPPに準拠した基地局からの電波を360度リアルタイムに可視化し、基地局のアンテナの向きや設置位置などの置局設計を効率的に実施し、エリアの最適化を可能とする。

1. まえがき

3GPP (3rd Generation Partnership Project)^{*1}では、第5世代移動通信システム (5G) の要求条件を実現可能とする新たな無線通信方式であるNR (New Radio) の規格が策定され [1]、現在、世界各国の携帯電話事業者において5G導入の検討が精力的に行われている。

5Gではより広い帯域幅を確保して高速・大容量 (eMBB: enhanced Mobile BroadBand) 伝送を実現するために、6GHz以上の高周波数帯の利用が想定されている [2]~[4]。加えて、高信頼・低遅延通信

(URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications) を実現する技術や、さらには、IoT (Internet of Things) 端末を多数収容 (mMTC: massive Machine Type Communications) するための技術検討がなされている。そのような中、NRのエリアを最適化していくためには、多様な利用環境における電波伝搬特性^{*2}を把握する必要があるが、高周波数帯の電波は波長が非常に短く、携帯電話などの端末周辺の人体や構造物などに大きく影響され、それに伴い、基地局からの電波の到来状況が変化する。この変化を容易に把握できるようにするため、2018年5月、ドコモは360度の電波の到来状況をリア

©2019 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

^{*1} 3GPP: 移動通信システムの規格策定を行う標準化団体。^{*2} 電波伝搬特性: 伝搬損失、電力遅延プロファイル、角度プロファイルなどの特性を指す。

リアルタイムに可視化できるリアルタイム電波ビジュアライザを開発した [5]。その装置は、当初、同装置の可視化範囲が180度であったのに対して、360度対応ができるようになったものの、NRに準拠した基地局からの電波については、NR信号を利用する必要があり、可視化はまだできなかった。

そこで、同年11月、ドコモは新機能であるNR信号のチャンネルサウンディング*3を採用し、NRに準拠した基地局からの電波をリアルタイムに可視化できる「3GPP対応リアルタイム電波ビジュアライザ」（以下、本装置）を開発した。本装置は、AR（Augmented Reality）*4技術により時々刻々と変化する電波の到来状況を可視化することで、基地局の設置や設定を容易にし、エリアの最適化などに活用することができる。

本稿では、本装置のシステム構成を説明し、実装例を解説する。

2. 電波可視化が対象とするチャンネル

本装置では、基地局ごとに電波を識別して可視化するためにNRのSSB（SS/PBCH Block）*5を用いる。SSBの構成を図1に示す。NRでは、直交周波数分割多重（OFDM：Orthogonal Frequency Division Multiplexing）*6を採用しており、同期信号（SS：Synchronization Signal）*7はプライマリ同期信号（PSS：Primary SS）*8とセカンダリ同期信号（SSS：Secondary SS）*9と、PBCH（Physical Broadcast Channel）および報知用チャンネル復調用参照信号（DMRS for PBCH：DeModulation Reference Signals for PBCH）*10で構成されている。また、NRでは複数のOFDMシンボル*11により、スロット*12、サブフレーム*13、フレーム*14が構成される。スロットはサブキャリア*15間隔にかかわらず14個のOFDMシンボルで構成され、フレームはサブフレーム10個で構成され、フレーム長は10msである。

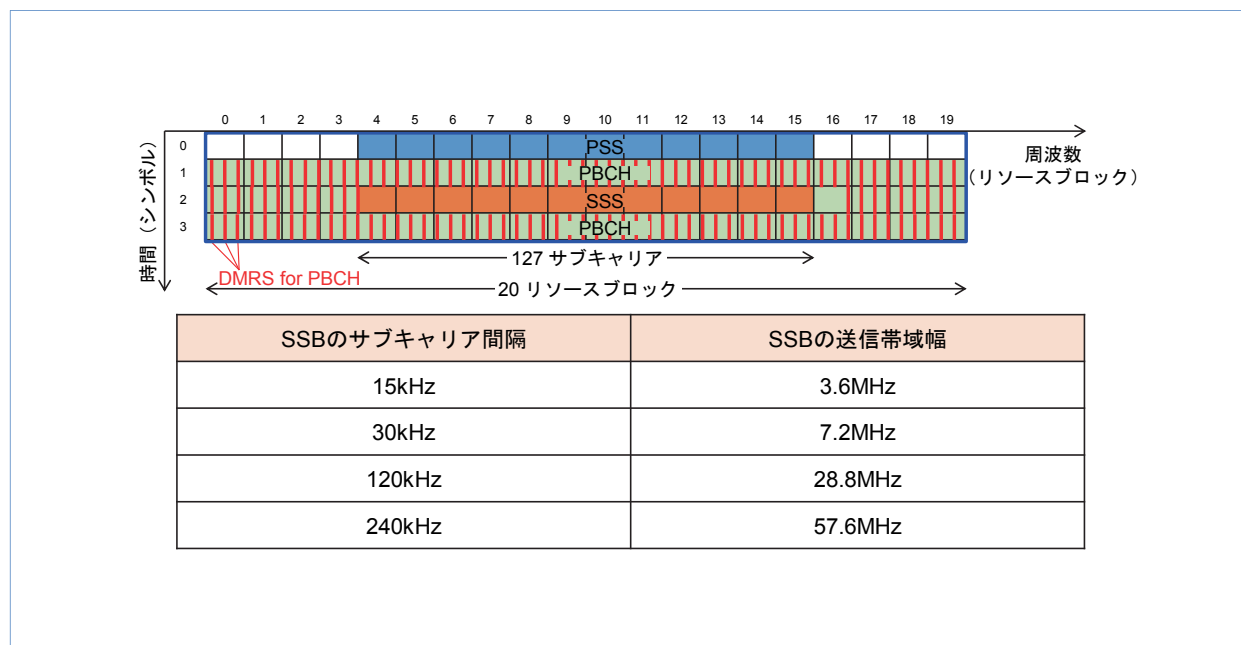


図1 SSBの構成

- *3 チャンネルサウンディング：パスロス、遅延プロファイル、角度プロファイルなどの伝搬チャネル特性の測定を行うこと。
- *4 AR：現実世界を写した映像に、電子的な情報を実際にそこに重ねるように重ねて、ユーザーに提示する技術。
- *5 SSB：SS、PBCHから構成される同期信号／報知チャンネルブロック。主に、端末が通信開始時にセルIDや受信タイミング検出を実施するために周期的に送信されるが、NRでは各セルの受信品質測定にも活用される。

- *6 直交周波数分割多重（OFDM）：情報信号を直交サブキャリアで変調するマルチキャリア変調形式。
- *7 同期信号（SS）：移動局が通信の開始に必要な周波数と受信タイミングおよび同期元識別子（セルIDなど）の検出を行うための物理信号。
- *8 プライマリ同期信号（PSS）：セルサーチ手順においてユーザー端末が最初に検出を試みる既知の信号。

このとき、SSB送信タイミングは5ms長の1/2フレーム内に位置する。図2はSSB送信数64個、SSB送信周期20ms、サブキャリア間隔120kHzとしたときのSSB送信構成例である。図2に示すようなSSB送信タイミングで、基地局は複数のSSBをそれぞれ異なるビームによって送信する。

3. 電波可視化のためのシステム構成

3.1 システム構成

本装置のシステム構成例を図3に示す。本装置では基地局からの電波到来状況をリアルタイムに可視化するため、360度カメラ、多素子アレーアンテナ^{*16}、チャンネルサウンダ、計算用PCが用いられる。基地局から放射された電波を多素子アレーアンテナで受信

し、チャンネル推定^{*17}した後、チャンネルサウンダでは、到来波の遅延—角度プロファイル^{*18}を解析する。なお、チャンネルサウンダは機能としてアンテナユニットとチャンネルサウンディングユニットをもつ。解析結果と360度カメラによって撮影した動画を計算用PCで統合し画像処理を行い、ディスプレイに表示する。

3.2 機能構成

機能構成を図4に示す。チャンネル推定を行うために異なるビームごとに放射されている複数のSSBを受信してSSB送信タイミングを検出する必要がある。

アンテナユニット^{*19}において、多素子アレーアンテナを用いて受信した電波を中間周波数（IF：Intermediate Frequency）^{*20}にコンバートし、受信

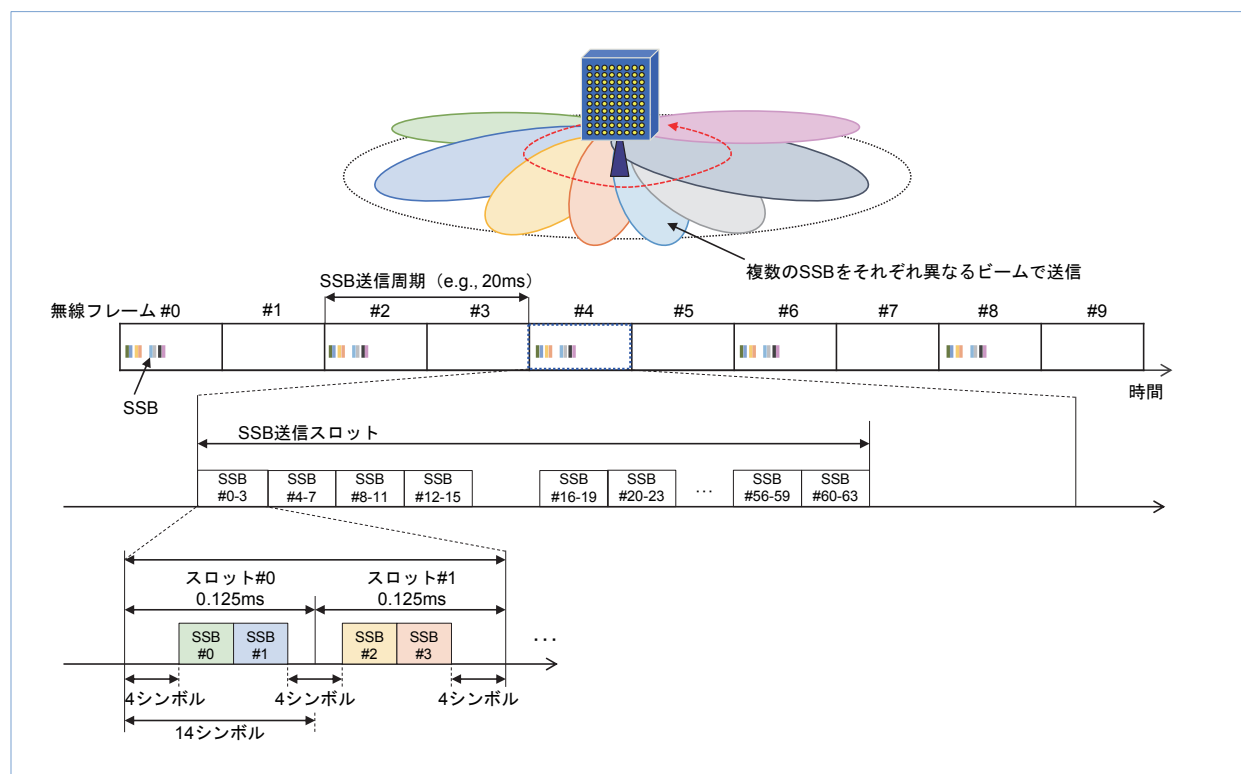


図2 SSB送信の構成例

- *9 セカンダリ同期信号（SSS）：セルサーチ手順において物理セルIDを検出するために送信される既知の信号。
- *10 報知用チャンネル復調用参照信号（DMRS for PBCH）：PBCH復調のための無線チャネル状態を測定するために送信される既知の信号。
- *11 シンボル：伝送するデータ単位。
- *12 スロット：データのスケジューリング単位。複数のOFDMシンボルから構成される。

- *13 サブフレーム：時間領域の無線リソースの単位。複数のスロットから構成される。
- *14 フレーム：エンコーダ・デコーダが動作する周期、およびそれに対応する長さのデータ信号。
- *15 サブキャリア：複数の搬送波で情報ビットを並列伝送するマルチキャリア変調方式におけるそれぞれの搬送波。
- *16 アレーアンテナ：複数のアンテナ素子を配列したアンテナのこと。

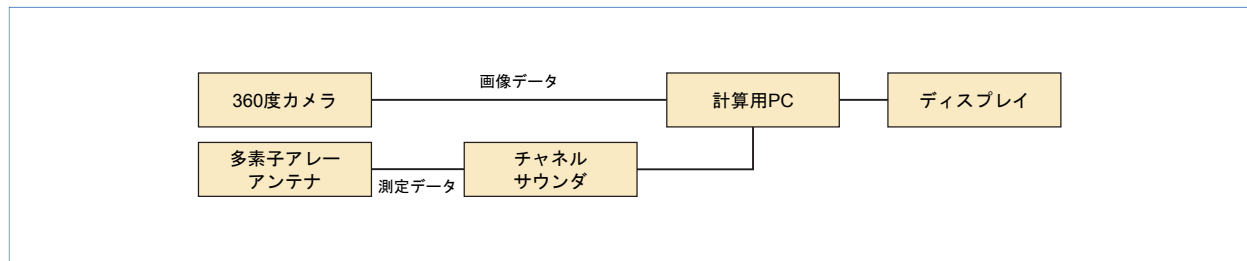


図3 システム構成

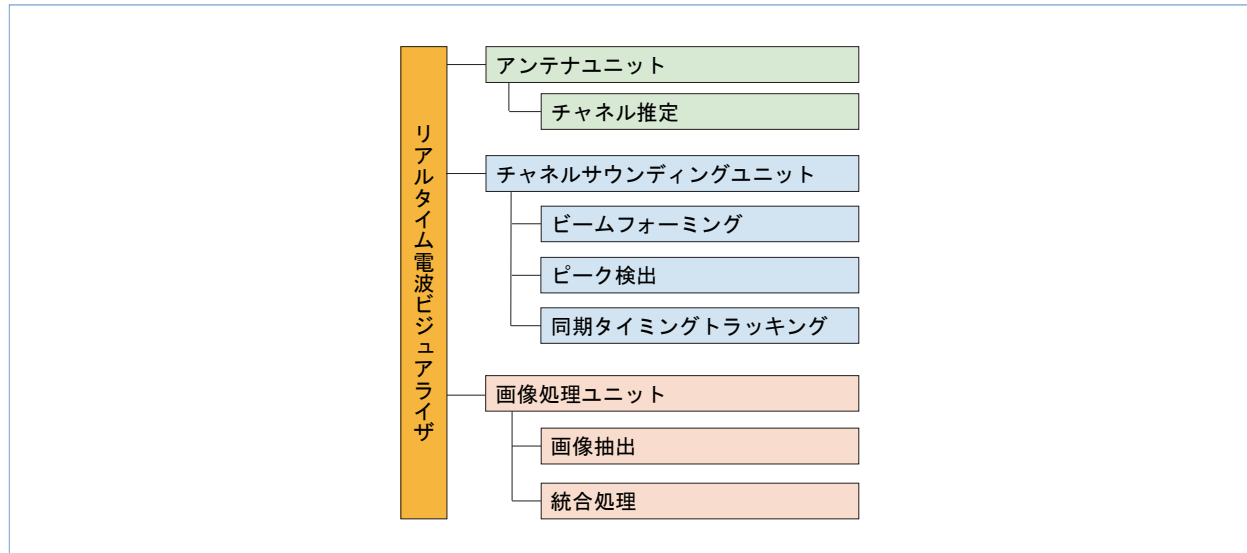


図4 機能構成

したSSと相関^{*21}演算を行い、相関値が最大となるタイミングを検出する。SSB送信タイミングの検出結果に基づきSSBを復調し、SSサブキャリア数127×アレーアンテナ素子数 N の行列であるチャンネル推定結果を算出し、逆高速フーリエ変換（IFFT：Inverse Fast Fourier Transform）^{*22}により遅延プロファイルを算出する。一方、電波暗室^{*23}などで到来角度ごとのチャンネル推定結果を事前に測定し、ビームフォーミング^{*24}を行うための、測定データの補正データを算出しておく。

次に、チャンネルサウンディングユニットにおいて、ビームフォーミングや電波の到来方向を明確にする

ために角度プロファイルのピーク検出と、チャンネルサウンディングを安定的に実施するため同期タイミング追従を実施する。まず、アンテナユニットにおいて解析した遅延プロファイルと、事前に測定した補正データとの相関演算により、ビームフォーミングを行い、到来角度ごとの遅延—角度プロファイルを算出する。算出結果から、到来角度ごとの受信レベルを算出し、到来方向を明確にするためにピーク検出を行い、角度プロファイルと到来方向を表すピークの解析結果が得られる。

最後に、画像処理ユニットにおいて、360度カメラで撮影した動画像から到来角度ごとの画像データを

*17 チャンネル推定：信号が無線チャネルを経由したときの振幅や位相などを推定すること。

*18 遅延—角度プロファイル：受信局に到達した直接波、反射波および散乱波の伝搬遅延時間と受信電力の関係を示す波形を遅延プロファイルといい、到来角度と受信電力の関係を角度プロファイルという。

*19 アンテナユニット：受信したデジタル信号を中間周波数に変換し、受信電力の増幅やアンテナ素子での受信などを行う装置。

*20 中間周波数（IF）：搬送波（キャリア）周波数よりも低い周波数。無線通信システムの多くでは、ベースバンドの送信信号を直接キャリア周波数に変調（受信信号を直接ベースバンド信号に復調）せず、中間周波数に変換した後に行う。

*21 相関：異なる信号の類似性を示す指標。複素数で表され絶対値は0～1の値をとる。1に近いほど類似性が高い。

抽出し、電波の到来状況を可視化するために、チャネルサウンディングで得られた角度プロファイルの算出結果と、抽出した画像データを統合処理する。

4. 実装方法

本装置の構築では、円周方向32素子、垂直方向8素子の計256素子からなる超多素子の28GHz帯円筒アレーアンテナと無線処理部を組み合わせたアンテナユニットと、チャネルサウンディングユニット、画像データと測定データを統合処理する計算用PC、および360度の電波到来状況を効率的に把握するた

めのヘッドマウントディスプレイ（HMD：Head Mounted Display）^{*25}を用いた（図5）。最大受信チャネル数は4チャネルであり、最大アンテナ素子数は1チャネルあたり64素子であったため、実装可能な最大数である256素子の円筒アレーアンテナを開発している。また、360度の角度範囲から到来する電波をリアルタイムに把握するために、円筒形のアレーアンテナとしている。NRにおいてSSBのサブキャリア間隔は15kHz、30kHz、120kHz、240kHzと規定されており、またサブキャリア数は一定であるため、サブキャリア間隔ごとに送信帯域幅が異なる。そこで、表1に示すように本装置では最大80MHzの

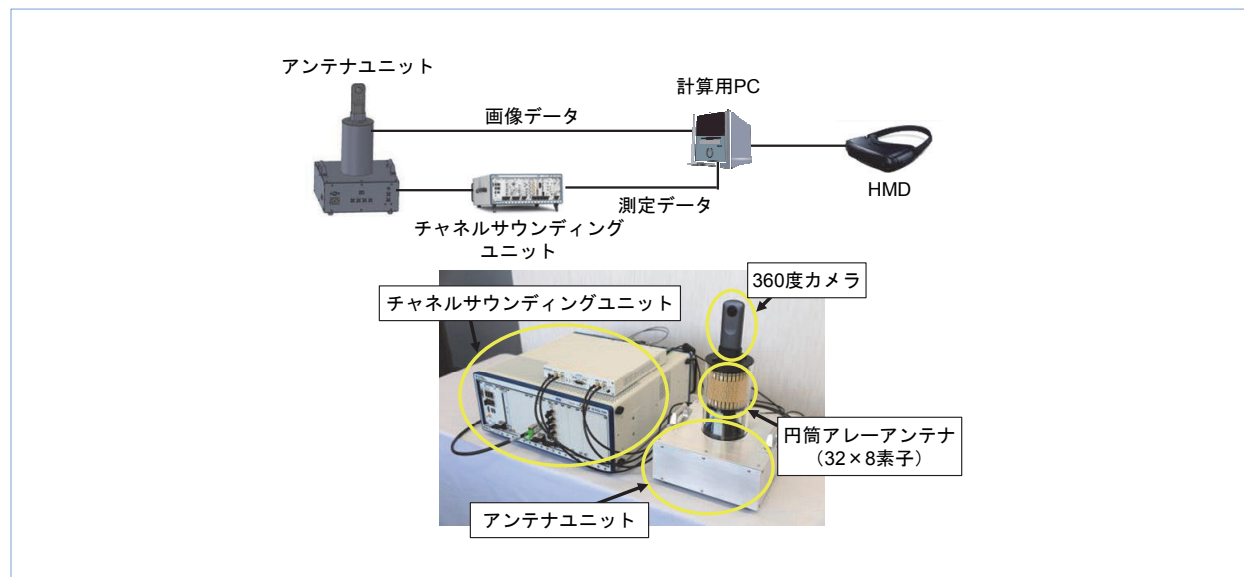


図5 システム実装例

表1 装置主要諸元

項 目	装置諸元
周波数帯	28GHz帯
最大帯域幅	80MHz
アンテナ	256素子／32面 円筒アレーアンテナ
使用チャネル	5G NR SSB

*22 逆高速フーリエ変換（IFFT）：周波数領域の離散データを時間領域の離散データに変換する高速アルゴリズム。

*23 電波暗室：外部からの電波を遮断し、内壁6面に電波吸収体を備えることで反射波を抑制した実験設備。

*24 ビームフォーミング：複数のアンテナを用いてアンテナに指向性パターンを形成する技術。

*25 ヘッドマウントディスプレイ（HMD）：ゴーグルやヘルメットの形状をした、頭部に装着するディスプレイ装置であり、目のすぐ前に小型のディスプレイ画面が設置されている。片目だけに映像を表示する単眼タイプと、両目に映像を表示する両眼タイプがある。

解析帯域幅をサポートしている。

図6に示すようにアンテナユニットでは、チャンネル推定をFPGA（Field Programmable Gate Array）^{*26}において実施する。チャンネルサウンディングユニットではFPGAもしくはソフトウェアによりビームフォーミング、ピーク検出および同期タイミング追従処理をしており、演算量が大きいビームフォーミング処理を高速化するためにFPGAに実装し、ピーク検出や同期タイミングトラッキングはソフトウェアに実装した。また、画像処理ユニットでは、計算用PCのGPU（Graphics Processing Unit）に、HMDを装着した人の向きに応じた画像抽出や測定データと画像データの統合処理を実装している。

チャンネル推定、ビームフォーミング、ピーク検出のタイミングチャートを図7に示す。さまざまな方向から到来する電波を適切に受信するため、円筒アレーアンテナの円周方向の各素子を使用し、アンテナ素子の切替制御をしながら、SSと相関演算を行い、SSB送信タイミングを検出する。チャンネル推定

では、SSB送信タイミング検出結果に基づき、円筒アレーアンテナ素子を4素子毎に切り替えながら実施し、全アンテナ素子のビームフォーミング結果を加算して360度の到来状況を可視化する。そのため、本実装による処理時間は、SSB送信周期×アンテナ切替数64回の時間を要する。なお、HMD表示は、電波の到来状況を容易に把握できるように、受信レベルに応じて配色した角度プロファイルと、どの基地局からの到来電波であるかを示すセルID^{*27}と、到来方向を示す角度プロファイルのピーク位置を合わせて、4K動画像とともに統合表示させるように実装した。また、複数基地局がある場合には、基地局ごとに周波数が同じ場合でも、異なる場合でも測定が可能であり、基地局ごとにセルIDが表示できるようにしている。

本装置では専用の制御ソフトウェアによって簡易にチャンネルサウンディングし、解析結果を確認することもできる。図8の制御ソフトウェアの制御画面に示すようにサブキャリア間隔とSSB送信周期を選

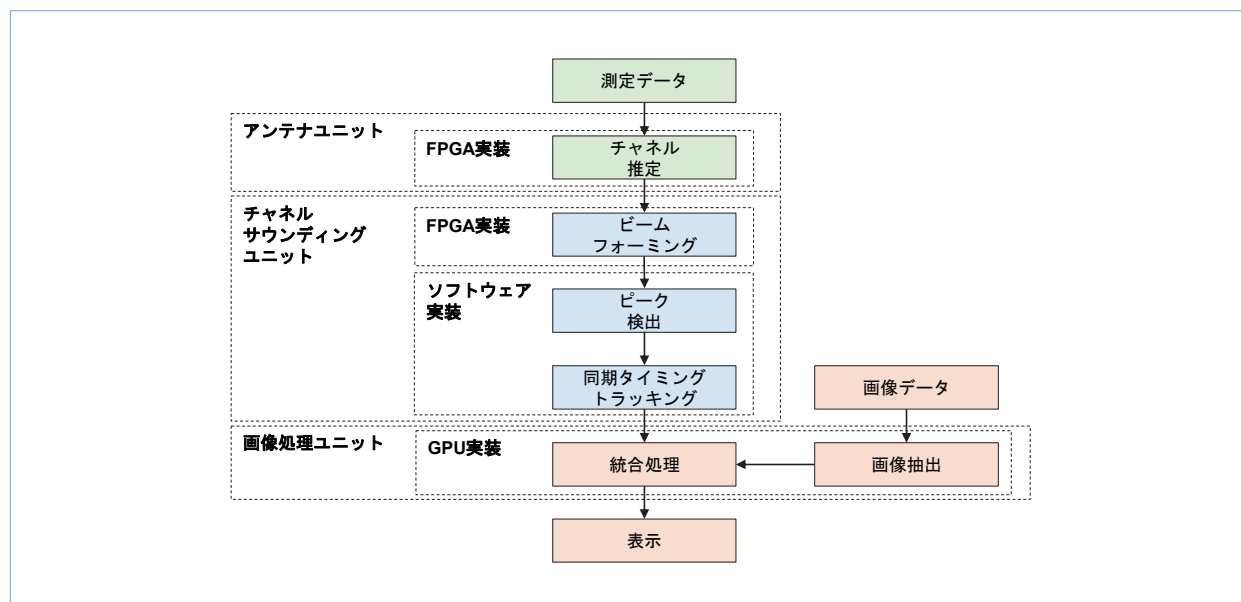


図6 実装フロー

^{*26} FPGA：アレイ状に並んだセルと配線用素子で構成されている書換え可能な大規模集積回路。

^{*27} セルID：基地局の識別子。

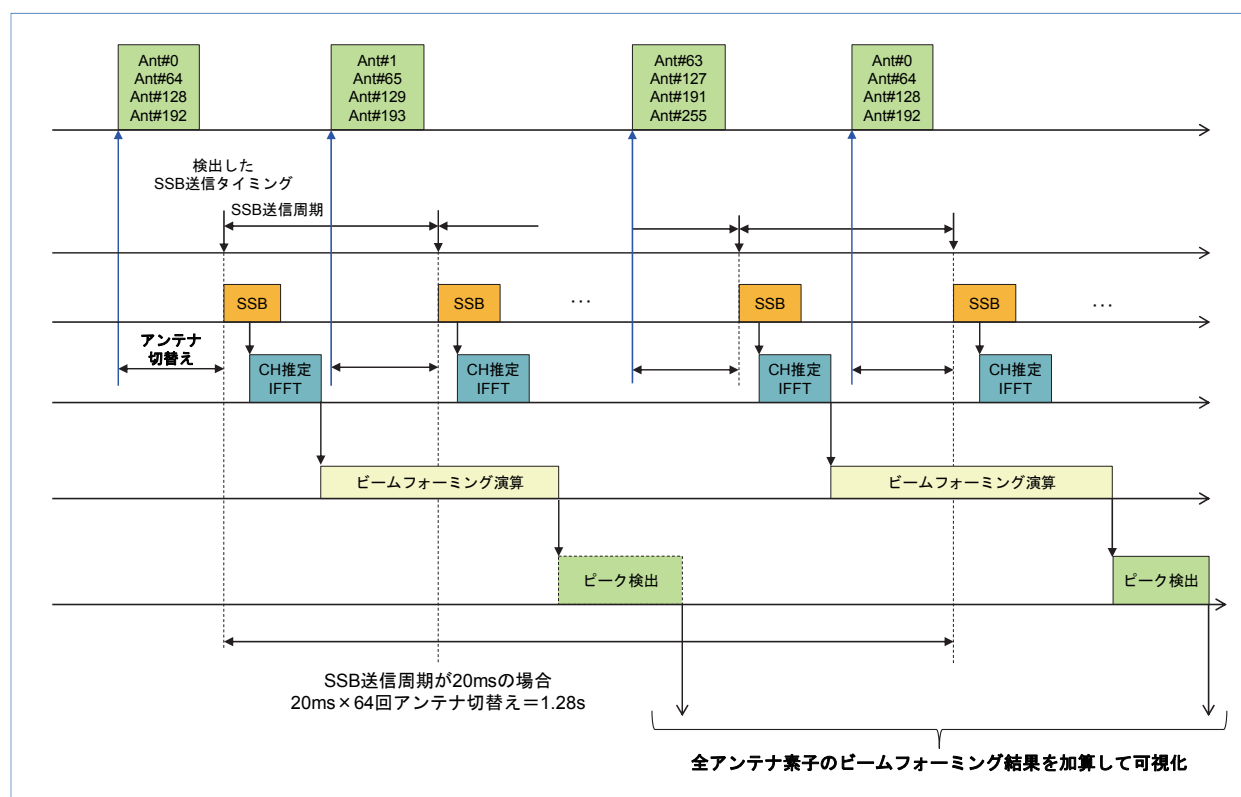


図7 チャンネル推定，ビームフォーミング，ピーク検出のタイミングチャート

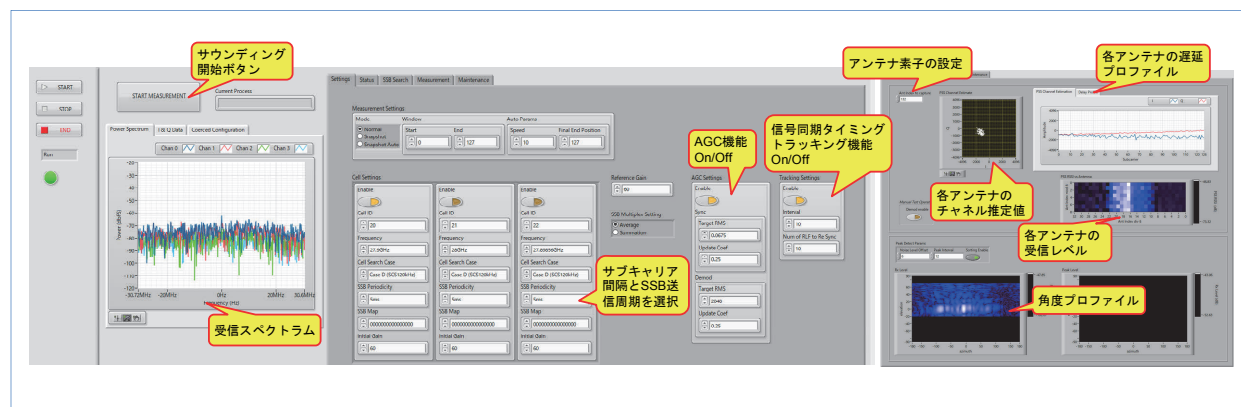


図8 チャンネルサウンディング制御ソフトウェアの画面例

択し、サウンディング開始ボタンを押せば、チャンネルサウンディングが実施され、中間データとして各アンテナ素子の受信レベル、各アンテナ素子の遅延

プロファイル、角度プロファイルを表示することができる。

5. ビジュアライザ観測結果

本装置を用いた電波の観測結果を図9に示す。

図9(a)は電波暗室において2つの基地局から異なる周波数の電波を送信し、電波到来状況を観測した結果である。周波数は基地局#0を27.9GHz、基地局#1を

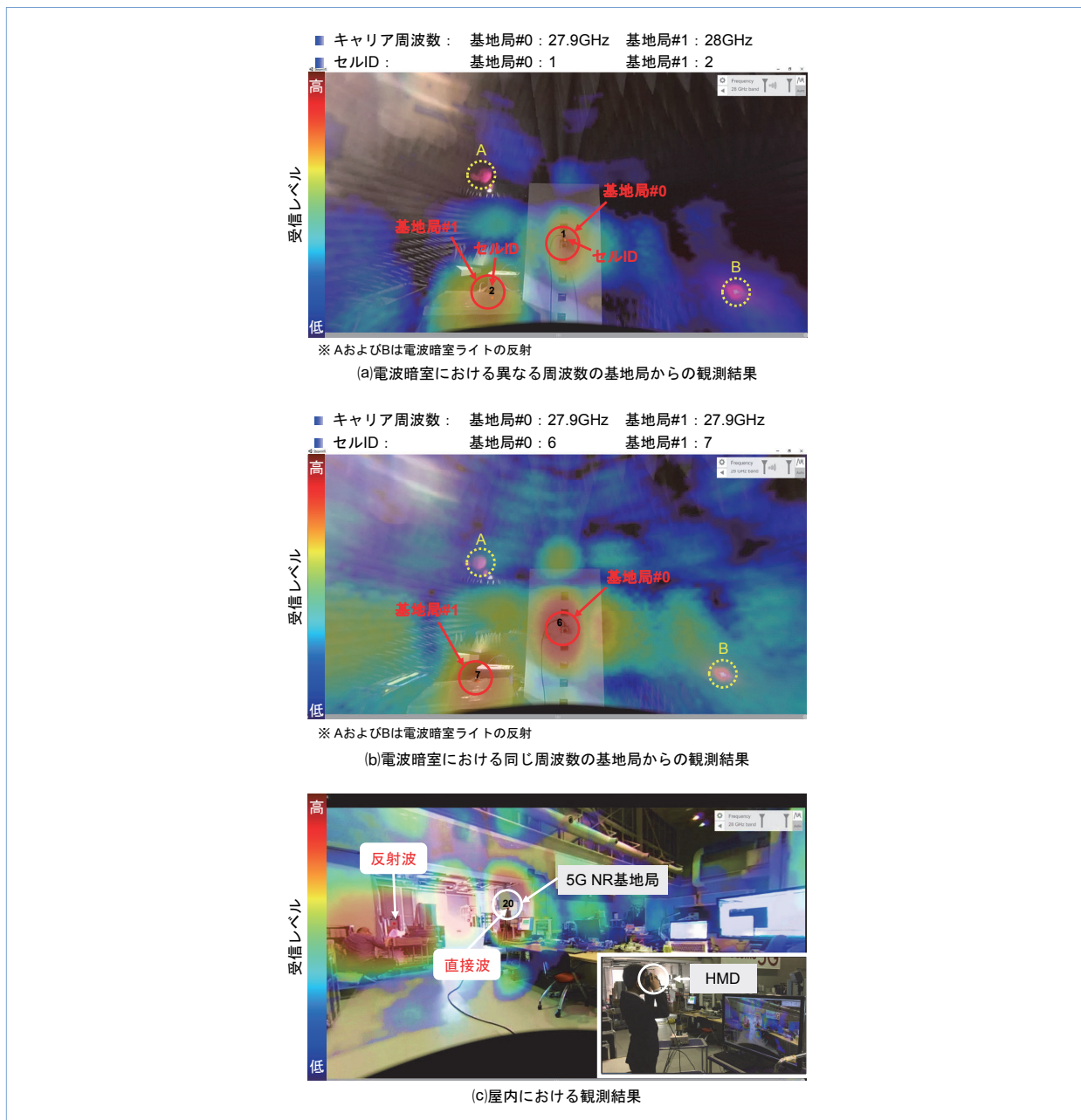


図9 観測結果

28GHzに設定し、セルIDはそれぞれ1, 2とした。図において、色のついた映像が電波の到来分布を示しており、赤色ほど受信レベルが高く、青色ほど受信レベルが低いことを示している。また、ドットは角度プロファイルのピークであり、ドットの上部にある数値がセルIDを指している。図より各基地局の送信点付近にピークが表示されており、基地局から直接到来する波を確認することができる。図9(b)は同じ周波数(27.9GHz)の電波を送信した場合の観測結果である。図9(a)よりも各基地局からの電波が干渉し、全体的に受信レベルが増加していることが確認できる。図9(c)は、屋内のマルチパス波^{*28}を観測した結果である。図より基地局からの直接波だけでなく壁などからの反射波が観測することができる。以上より装置周辺の構造物などが、基地局の電波到来状況に与える影響をリアルタイムに可視化できることを確認した。

6. あとがき

本稿では、3GPP対応リアルタイム電波ビジュア

ライザのシステム構成と実装例を解説した。本装置は、電波の到来状況を可視化し、NRに準拠した基地局におけるアンテナ指向方向などの基地局パラメータチューニングによりエリア最適化に貢献できる。今後、小型化など汎用性の高い製品開発を行い、さまざまな団体・企業に本装置をご活用いただくことで、5Gのさらなる発展に貢献していく。

文 献

- [1] 武田, ほか: “5GにおけるNR物理レイヤ仕様,” 本誌, Vol.26, No.3, pp.47-58, Nov. 2018.
- [2] NTT DOCOMO, INC.: “DOCOMO 5G white paper, 5G radio access: Requirements, concept and technologies,” Jul. 2014.
- [3] White paper on “5G channel model for bands up to 100 GHz,” Global Communications Conference, 3rd Workshop on Mobile Communications in Higher Frequency Bands, Washington DC, U.S.A, May 2016.
<http://www.5gworkshops.com/5GCM.html>
- [4] ITU-R M.2412-0: “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020,” Oct. 2017.
- [5] T. Imai, M. Inomata, K. Kitao and Y. Okumura: “Real-Time 5G Radio Wave Visualizer,” ISAP 2018, Busan, Korea, Oct. 2018

^{*28} マルチパス波: さまざまな経路を伝搬して受信局に到達する波。