

## モバイル基地局環境における電波強度評価法

モバイル基地局から放射される電波強度は、電波法施行規則により通常人の出入りする場所における基準値が定められ、関連する告示に規定される評価方法に基づき、基準値への適合が確認される。一方、モバイル基地局からの電波強度を正確に測定するには、時間と専門的な技術を要する。そのため、測定の効率化および再現性確保には、測定自動化による短時間化および測定器操作の単純化が必要である。

本稿ではモバイル基地局から放射される電波強度について、電波法施行規則および関連する告示に規定される評価方法とともに、その可視化のために開発した測定装置の構成法を解説する。

### 1. まえがき

モバイル基地局（以下、基地局）は、スマートフォンおよび携帯電話をネットワークに接続するための中継点であり、無線送受信装置とアンテナシステムから構成される。近年、ドコモは、LTEおよびW-CDMA方式の複合した基地局を用いて通信サービスを実施している。また、システム容量の拡大を図るため、複数の周波数帯を利用している。基地局アンテナは、屋外通信エリア向けにオフィスや共同住宅の屋上などに設置されている比較的大型のものから、局所的に高いトラフィックの発生する場所、地下街、およびビル屋内などに設置されている比較的小型のものまで多岐に及ぶ。規定の通信品質を得るために最適設計されたこれら

の基地局から放射される電波強度は、送信電力、アンテナの利得\*1および指向特性などのパラメータに依存する。本稿では、これら複数の基地局から放射される電波が混在する環境をモバイル基地局環境と呼ぶ。

一方、我が国の電波法施行規則は、人体の保護を目的とした電波強度の基準値\*2を規定しており、人の出入りする場所において電波強度が基準値以下となるように義務付けている[1]。この基準値は、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP：International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection）\*3の発行するガイドラインと同等である[2]。また、電波法施行規則に関連する告示は、電波強度の基準値への適合確認方法を規定している[3]。電波産業会の標準規格技術資料および国際電気標準

会議（IEC：International Electrotechnical Commission）の標準規格は、この適合確認に関連した基地局からの電波強度の具体的な評価方法および測定不確かさの評価方法を示している[4] [5]。通信事業者は、これらの規則などに基づき、基地局を設計および運用している。なお、適合確認においては、最寄りの基地局のみならず、その周辺基地局およびその他システムなどの波源からの電波強度も含めた総合的な評価が求められる[1]。そのため、モバイル基地局環境における電波強度の正確な測定には、多くの時間と専門的な技術を要する。基地局設置および運用時の電波強度測定の効率化および再現性確保のためには、測定自動化による短時間化および操作単純化が必須である。

そこでドコモは、これらを実現す

先進技術研究所 ひがしやま じゅんじ  
東山 潤司  
たるさわ よしあき  
垂澤 芳明

\*1 利得：アンテナの放射特性の1つで、アンテナの特定の方向の放射強度が基準アンテナの何倍あるかを示す指標。

\*2 電波強度の基準値：電波法施行規則第21条の3および別表第2号の3の2で規定される電波強度。基準値は、電界強度、磁界強度、

および電力密度で定義されており、その値は、周波数に依存する。本稿では、主に電界強度について各計算法を示す。

\*3 国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）：世界保健機関（WHO：World Health Organization）の協力機関。

るモバイル基地局環境向け電波強度測定装置（以下、本装置）を開発した。

本稿では、モバイル基地局環境における電波強度の評価法、本装置の構成、および測定不確かさの評価法について解説する。なおLTEは、3GPP Rel.8を想定している。

## 2. 電波強度の評価方法

### 2.1 基準値への適合確認方法

図1に示すようなモバイル基地局環境において、電波強度は最寄りおよびその周辺基地局からの強度に加え、その他システムの波源からの強度を合成した値として評価しなければならない[1]。この合成値を規格化電界強度  $e_{Total}^2$  と定義すると、 $e_{Total}^2$  が1以下となれば、基準値への適合が確認される。 $e_{Total}^2$  は、

$$e_{Total}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{E^2(f_i)}{E_R^2(f_i)} \quad (1)$$

で求められ、 $E$  は周波数  $f_i$  における電界強度、 $E_R$  は電波法施行規則に示される電界強度の基準値、 $N$  は周波数の異なる波源の数である。また、基地局とその他システムからの規格化電力密度を分けて考慮すると、 $e_{Total}^2$  は、

$$e_{Total}^2 = e_{MBS}^2 + e_{Other}^2 \quad (2)$$

と表現することができる。ここで、 $e_{MBS}^2$  は、最寄りおよびその周辺の基地局から放射される電波の規格化電界強度、また、 $e_{Other}^2$  は、その他システムの波源から放射される電波の規格化電界強度である。

### 2.2 電波強度の測定系

電波強度の測定系には、選択肢と条件が規定されており、周波数を選択して測定する場合は、電界検出用のアンテナ（以下、電界センサ）と、周波数選択型測定器であるスペクトルアナライザなどで構成される測定系を用いる[3]~[5]。測定上の留意点として、測定器の指示値が最大となる方向および偏波面\*4に電界センサの向きを合わせる必要があるが、電波の到来方向は複数であるため、電界センサは、等方性の指向性\*5を有するものが適している。

なお、観測される電波強度に対する他の波源からの影響は、基地局アンテナ近傍ではアンテナ遠方と比較すると非常に小さい。また、アンテナ直下における電波強度は、高さに依存して変化が著しいため、小型の電界センサを用いて、高い位置分解能で測定する必要がある[6]。本稿では、人の出入りの可能性がある基地局施設外側の一般環境、すなわちアンテナ遠方における測定評価を想定しており、測定器には、高い位置分

解能よりも高感度化が求められる。

### 2.3 変動する電波強度の測定方法

一般に、観測点の電波強度は、波源と観測点間の伝搬損失変動や、波源の送信電力の変化により、時間に依存して変動する。適合確認の観点においては、少なくとも過小評価とならないよう、すなわち保守的に電波強度を評価すべきである。以下にそれぞれの変動分の評価法を解説する。

#### (1)伝搬損失変動分の評価法

電波強度の基準値は、6分間平均値として規定されており[1]、伝搬損失変動分については、測定値の平均化で評価できる。あるいは、瞬時的な測定値であっても、後述する伝搬損失変動に関する測定不確かさを考察することにより、電波強度を保守的に評価できる。ここでは、電波強度の保守的な評価と、測定短時間化の両立のため、後者の評価方法をとる。観測点の電波強度の瞬時値は、周波数スペクトルアナライザを用いて、観測された周波数スペクトルか

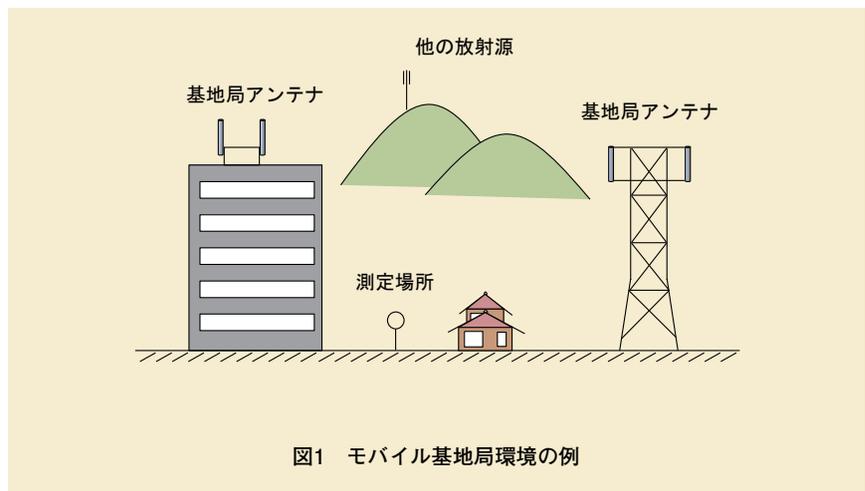


図1 モバイル基地局環境の例

\*4 偏波面：電波の伝搬方向と電界の方向によって定まる面。

\*5 指向性：アンテナの放射特性の1つで、アンテナからの放射強度（あるいは受信感度）の方向特性のこと。

ら得る。適合性評価は、測定値に基づいて式(2)を用いればよい[7]。

(2)波源の送信電力の変化による変動分の評価法

波源の送信電力の変動、特に基地局の通信トラフィック変動に基づく送信電力の変動を考慮する場合、仮に数日にわたって電波強度を測定しても、測定対象のすべての基地局が最大送信電力で電波を放射した場合の電波強度を得ることは困難である。よって、保守的な電波強度の評価と測定短時間化の両立のため、LTEおよびW-CDMA方式の基地局からの電波強度については、トラフィック変動下においても最大トラフィック相当の値を得る測定方法が必要となる。そこで、トラフィック変動下にあっても固定の送信電力で送信されるチャンネルの電波強度を測定し、該当チャンネルの送信電力に対する基地局最大送信電力の比に基づく係数を乗じて外挿することで、最大トラフィック相当の電波強度を得る方法

を用いる。

LTEおよびW-CDMA方式の基地局において、ある割当キャリア最大トラフィック相当の電波強度を求めするため、LTEについては下り送信信号におけるCRS (Cell-specific Reference Signal) \*6, W-CDMAについては下り送信信号のCPICH (Common Pilot CHannel) に注目する。CRSおよびCPICHの送信電力は一定であり、また、キャリア当りの最大送信電力は基地局装置仕様による。よって、1つのキャリアにおける最大送信電力時の電波強度は、CRSおよびCPICHの電波強度に基地局仕様で決定される比を乗じることと得られる。これらのチャンネルの電界強度を  $E_{RS}$  および  $E_{CPICH}$ , 該当キャリアの最大トラフィック相当の電界強度を  $E_{LTE}$  および  $E_{CDMA}$  とすると、これらは、

$$E_{LTE} = \sqrt{\frac{N_{RS}}{F_B}} \cdot E_{RS} \quad (3)$$

$$E_{CDMA} = \sqrt{\beta} \cdot E_{CPICH} \quad (4)$$

で求められる。ここで、 $N_{RS}$  はキャリアの周波数方向のRE (Resource Element) \*7数に相当する係数、 $F_B$  はブースティングファクタ \*8である。また、 $\beta$  は該当キャリアにおけるCPICH送信電力に対する最大送信電力の比に相当する係数である。

$E_{RS}$  および  $E_{CPICH}$  の測定には、LTEおよびW-CDMA方式に対応した無線チャンネルデコーダを用いる[8]。

$E_{RS}$  および  $E_{CPICH}$  の測定と、その結果を用いた式(3)および式(4)の計算を各セクタ、各キャリア、各周波数帯、および各通信事業者の要素単位などで実施することで、式(2)に示した総合規格化電界強度を求めることができる。各要素単位の規格化電界強度を分析できる。規格化電界強度の各要素の構成例を図2に示す。

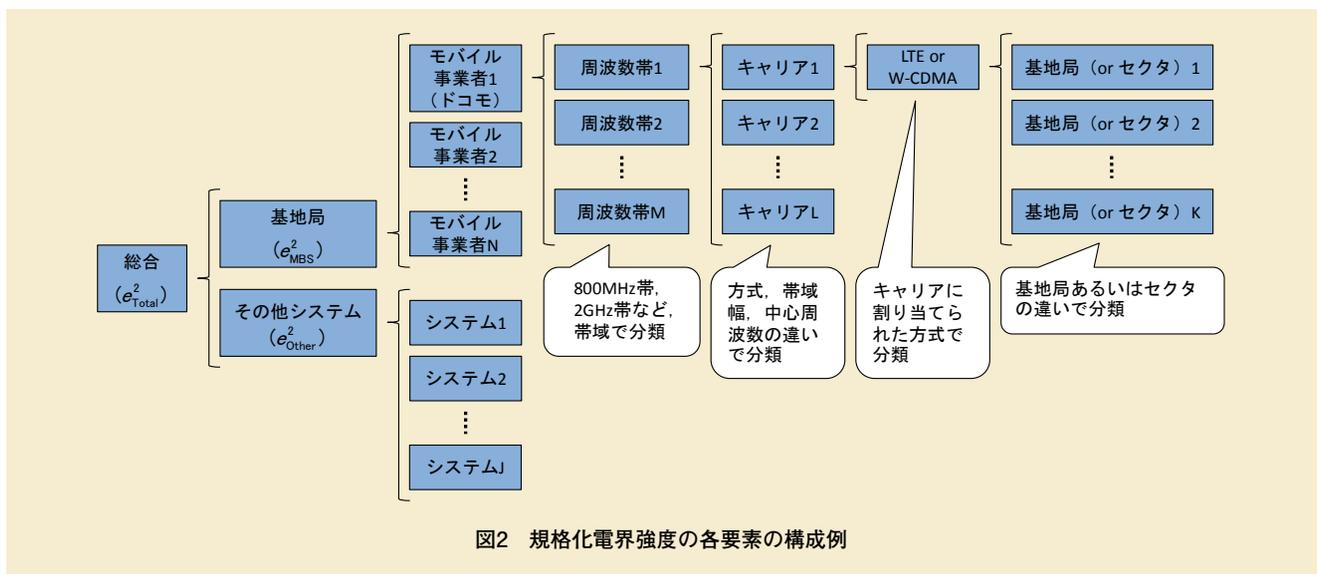


図2 規格化電界強度の各要素の構成例

\*6 CRS: 下りリンクの受信品質測定などに用いられる各セル固有の参照信号。

\*7 RE: 下りリンクのリソースの構成要素であり、1サブキャリア、1 OFDMシンボルで構成。

\*8 ブースティングファクタ: 1 OFDMシンボルの送信電力を維持しつつCRSの送信電力を増加するための係数。

### 3. 電波強度測定装置の構成

開発した本装置の構成法を以下に示す。

本装置は、図3に示すように等方性電界センサ、切換スイッチ、スペクトルアナライザ、無線チャンネルデコーダ、モバイルPCから構成される。また、本装置の概観を図4に示す。測定時は、本体に等方性電界センサを取り付ける。搬送時は、これを取り外し、簡易に移動できる構造としている。表1は、本装置の主な仕様を示す。測定対象の無線周波数範囲は、30MHzから3GHzとして、基地局に加え放送波の一部など、通常環境における主な放射源の周波数を網羅している。電界強度の感度は上記周波数全帯域において1mV/m以下であり、 $10^{-10}$ 以下の規格化電界強度の測定が可能である。ただし、比較的強いレベルの信号を検出した場合、自動的に感度を調整する。屋外での電波強度測定を効率的に行うために、電源は、内蔵電池により連続3時間の動作を可能としている。

等方性電界センサは、直交する3本のアンテナエレメントを広帯域スリーブダイポールで構成することで、広帯域に渡って高感度を実現している。広帯域スリーブダイポールは、図5に示すように、放射素子\*9、スリーブ\*10、これらを保護するFRP製カバーから構成される。スリーブと放射素子は、複数の導体をインダクタで接続した構造となっており、導体長は、周波数に関して対数周期

的となるように選んでいる。同軸フィーダ\*11の不均衡電流を抑圧す

るために、スリーブ内に円状のフェライト\*12を挿入している。

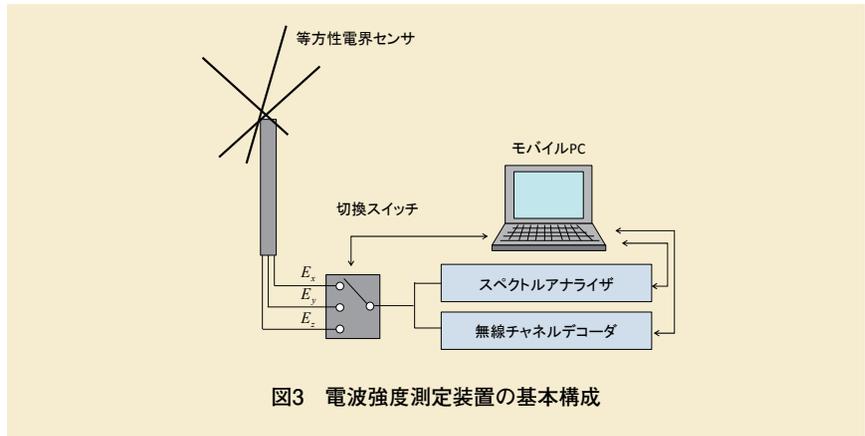


図3 電波強度測定装置の基本構成



図4 電波強度測定装置の概観

表1 開発した電波強度測定装置の主な仕様

周波数範囲	30MHzから3GHz
感 度	< 1 mV/m
主な解析機能	無線周波数スペクトル
	LTEの信号解析
	W-CDMAの信号解析
電 源	内蔵電池で3時間以上動作
重 量	< 22kg

\*9 放射素子：アンテナ利得や指向特性に支配的な高周波電流が流れる金属部分。

\*10 スリーブ：スリーブダイポールアンテナを構成する同軸ケーブルの放射素子と同じ長さの金属製の同軸円管であり、外導体の外側に取り付けられたもの。

\*11 同軸フィーダ：同軸ケーブルで構成される給電線。

\*12 フェライト：磁性材料であり、ここでは、同軸ケーブルに生じる共通モード電流を抑制。

等方性電界センサのそれぞれのアンテナエレメントで観測された電界強度を  $E_x$ ,  $E_y$ , および  $E_z$  とすると、観測点の電界強度  $E$  は、

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (5)$$

として合成する。

式(2)における基地局以外の他の波源からの規格化電界強度である  $e_{\text{Other}}^2$  は、スペクトルアナライザで測定した瞬時的な電界強度より求める。一方、基地局からの規格化電界強度である  $e_{\text{MBS}}^2$  は、式(3)および式(4)における  $E_{\text{RS}}$  と  $E_{\text{CPICH}}$  を無線チャンネルデコーダで測定することにより求める。モバイルPCは、式(2)から式(5)までの計算を行い、同じ周波数軸上に  $e_{\text{Other}}^2$  および  $e_{\text{MBS}}^2$  の各周波数成分を示したグラフ、さらに総合規格化電界強度などの評価結果を表示する。モバイルPCにおける測定結果の表示画面例を図6に示す。

スペクトルアナライザなど本装置の構成装置の操作は、専用プログラムで自動化されており、測定時の操作は、測定開始ボタンを押下するのみである。本装置は、表1に示した周波数範囲における周波数スペクトル測定に基づく電波強度の測定を5分程度、また、無線チャンネルデコーダを用いた測定に基づく最大トラフィック相当の電波強度の測定を10分程度で実現する。

このように、本装置は、測定自動化による短時間化および操作単純化を実現しており、モバイル基地局環境における電波強度の測定効率化および再現性確保に貢献する。

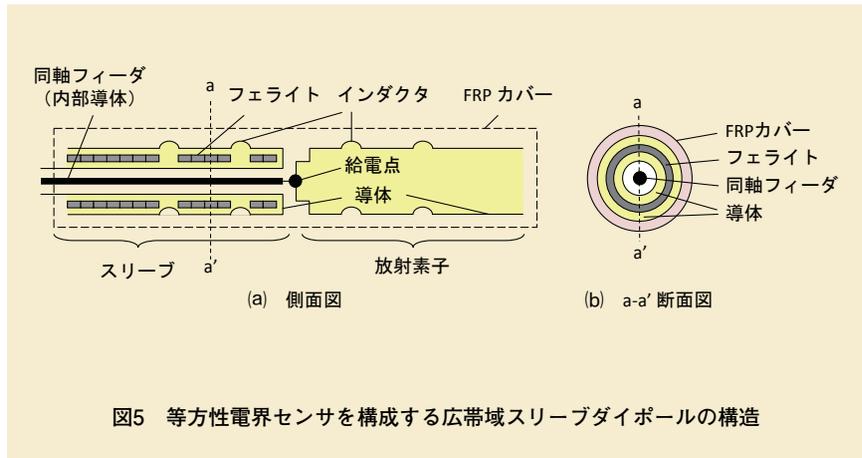


図5 等方性電界センサを構成する広帯域スリーブダイポールの構造

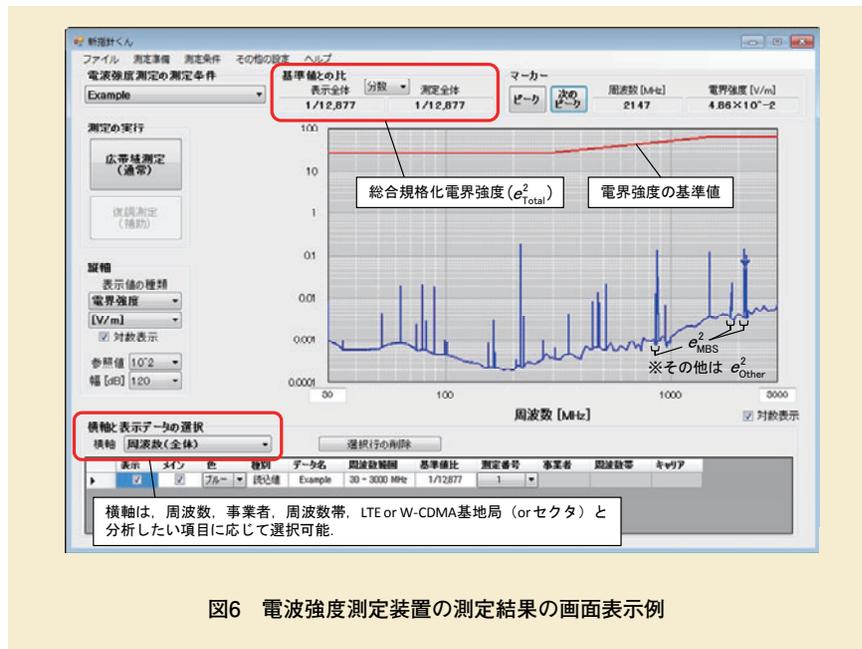


図6 電波強度測定装置の測定結果の画面表示例

## 4. 測定値の不確かさ評価法

一般に測定により得られた値は、必ず不確かさを含んでいる。国際電気標準会議および国際標準化機構 (ISO: International Organization for Standardization) は、測定における不確かさのガイドを発行しており[5] [9]、本装置についても、このガイドに従って測定不確かさを評価している。支

配的な不確かさの要因は、電界強度測定の精度に影響を与える電界センサの等方性偏差および2.3節に示した伝搬路変動である。この他にも、接続ケーブルにおける反射損失変動、スペクトルアナライザと無線チャンネルデコーダの振幅不確かさなどの要因がある。一例として、電界センサの等方性偏差による不確かさの導出法および結果と、測定全体の総合的な不確かさである拡張不確かさの計

算例を示す。

電界センサの等方性偏差による不確かさ導出のため、ここでは、電界センサの利得を球面スキャン法で求めている。直交する3軸に配置したスリーブダイポールの利得を  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  とする時、3軸合成の利得  $g$  とその対数  $G[\text{dBi}]$  は、それぞれ、

$$g(\theta_i, \phi_j) = g_x(\theta_i, \phi_j) + g_y(\theta_i, \phi_j) + g_z(\theta_i, \phi_j) \quad (6)$$

$$G(\theta_i, \phi_j) = 10 \log |g(\theta_i, \phi_j)| \quad (7)$$

と表す。ここで、 $\theta$  は仰俯角であり、 $-\pi/2$  から  $+\pi/2$  の範囲、 $\phi$  は方位角であり、 $-\pi$  から  $+\pi$  の範囲である。等方性評価のため、 $\theta$  と  $\phi$  について等角度間隔で91点、181点の利得を測定した。この結果より標本標準偏差  $S$  として、 $S$  を

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m [G(\theta_i, \phi_j) - \bar{G}]^2}{mn - 1}} \quad (8)$$

$$\bar{G} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m G(\theta_i, \phi_j)}{mn} \quad (9)$$

で求めた。ここで、 $m$  と  $n$  は、それぞれ91、181である。この標本標準偏差は、電界センサの等方性偏差が要因となる測定不確かさとなる。

図7に示すように、周波数500MHzから3GHzの範囲における不確かさの周波数依存性を評価した結果、

2.6dB以下となった。

表2は、各不確かさの要因およびその値など、さらにそれらから見積もられる測定全体の総合的な不確かさである拡張不確かさの計算例を示している。表2では、無線周波数2GHz帯における95%信頼区間の拡張不確かさは、5dBとなっている。この場合、測定で得られた総合規格化電界強度にこの5dBを加算した値で適合確認することで、保守的な評価結

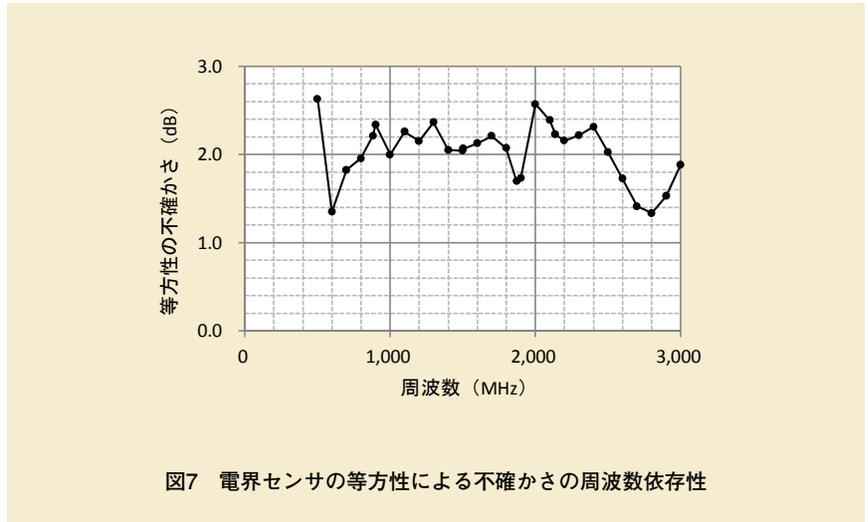


図7 電界センサの等方性による不確かさの周波数依存性

表2 周波数2GHz帯における電波強度測定の拡張不確かさの例

要因	分布の関数	不確かさ $a$	除算係数 $d$	$c^2 \times u^2$ *1 ( $u = a/d$ )
電界センサ	正規	2.23dB	1.0	4.97
RFスイッチと電界センサ間の反射損失	U字	0.5dB	1.14	0.13
RFスイッチの損失	矩形	1dB	1.73	0.33
アナライザとRFスイッチ間の反射損失	U字	0.5dB	1.14	0.13
アナライザ*2	矩形	1dB	1.73	0.33
伝搬路	レイリー	3dB	3.66	0.67
累積の標準不確かさ				2.56dB
拡張不確かさ (95%信頼区間)				5dB

\*1 ここでは、 $c=1$ 。

\*2 ここでは、スペクトルアナライザ、無線チャネルデコーダ。

果が得られる。

## 5. あとがき

モバイル基地局環境において、基地局およびその他の波源からの電波強度について、電波法施行規則および関連する告示に規定される評価方法とともに、その可視化のために開発した測定装置の構成法を述べた。特に、LTEおよびW-CDMA方式の複合した基地局からの電波強度について、トラフィック変動下においても最大トラフィック相当の値を得る方法、さらに、任意の到来方向からの電波強度の測定を30MHzから3GHzの広帯域に渡って1mV/m以下の感度で実現する構成法を中心に述べた。本装置の開発により、測定自動化による短時間化および操作単純化を実現し、基地局設置および運用時における電波強度の測定効率化および再現性確保に貢献できた。さらに、本装置を用いた測定に含まれる不確かさを評価し、周波数2GHz帯における95%信頼区間の拡張不確かさは

5dBであった。以上の装置構成と拡張不確かさにより、適合確認の観点から電波強度の保守的な評価が可能となっている。

今後は、3GPP Rel.9以降に対する電波強度の評価機能、3GHzを超える周波数への対応、さまざまな測定環境における装置のさらなる利便性向上についても検討していく。

### 文献

- [1] 郵政省（現総務省）：“電波法施行規則第21条の3（電波の強度に対する安全施設）及び別表第2号の3の2（電波の強度の値の表）,” Oct. 1998.
- [2] ICNIRP: “GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC, AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHz),” ICNIRP Guidelines, Health Physics, Vol.74, No. 4, pp.494-522, Apr. 1998.
- [3] 郵政省（現総務省）：“無線設備から発射される電波の強度の算出方法及び測定方法,” 平成11年郵政省（現総務省）告示第300号, Apr. 1999.
- [4] ARIB TR-T21：“移動無線基地局アンテナの電波防護に関わる電磁界とSAR評価のための測定・計算法,” Mar. 2012.
- [5] IEC: “Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,” IEC 62232 Edition 1.0, May 2011.
- [6] J. Higashiyama and Y. Tarusawa: “Method for Measuring Radiated Electric Field Excited by Linear Array Antenna Using Near Field to Far Field Transformation,” 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 417-420, Sep. 2007.
- [7] J. Higashiyama, T. Onishi and Y. Tarusawa: “RF Field Strength Measurement Method for Evaluation of Human Exposure in Modern Radio Frequency Spectrum Use,” BioEM2009, p.182, Jun. 2009.
- [8] J. Higashiyama and Y. Tarusawa: “Design of Electric Field Meter to Assess Human Exposure in Environment with Mobile Base Station,” EMC'14/Tokyo, 16P1-H1, May 2014.
- [9] ISO: “Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995),” ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2008.