

スマートメータ用通信ユニットの 小形ダイバーシチアンテナ

西本研悟* 秋元晋平***
林 大祐** 柳 崇†
田中豊久*

Small Diversity Antennas for Transceivers in Smart Meters

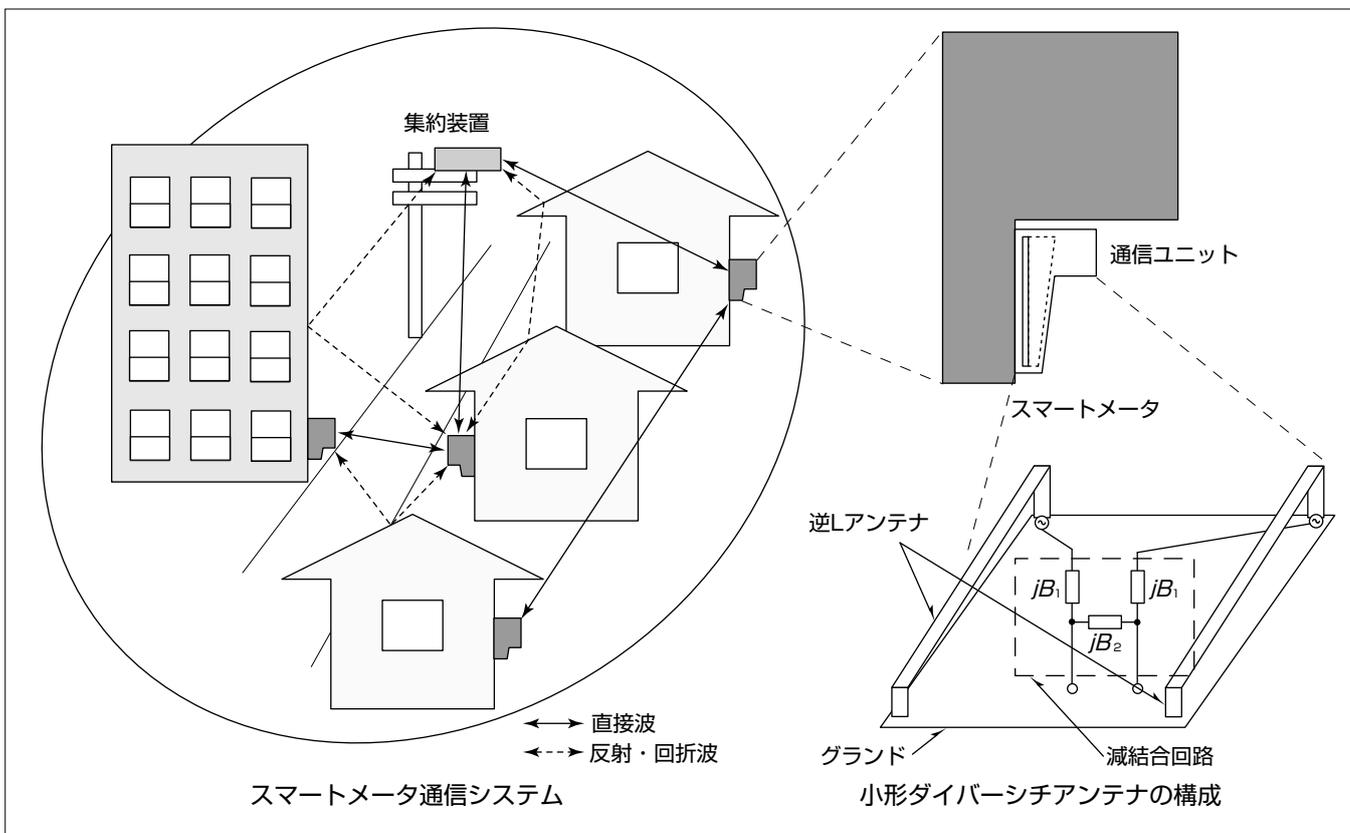
Kengo Nishimoto, Daisuke Hayashi, Toyohisa Tanaka, Shimpei Akimoto, Takashi Yanagi

要 旨

双方向通信機能を持つ電力メータであるスマートメータは、様々な場所に設置されるため、無線通信品質の改善のためにはダイバーシチ方式が有効である。ダイバーシチ方式実現のため、スマートメータに内蔵される通信ユニット内の小領域にアンテナを2本設置する場合、アンテナ間の相互結合が強くなり通信性能が劣化するという課題がある。また、小形アンテナは周囲環境の影響を受けやすいため、通信ユニットをメータと組み合わせたときの性能確保が課題となる。これらの課題を解決するためにスマートメータ用通信ユニットの小形ダイバーシチアンテナを開発した。まず、電波伝搬解析を行い、特にマルチパス環境にスマートメータが設置される場合、アンテナ指標として

放射効率と水平面内平均化利得が重要であることを示した。次に、アンテナ方式、実装エリアが異なる基板アンテナと板金アンテナを検討した結果、メータの影響を低減した小形ダイバーシチアンテナとしては、板金で作製した2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成が適していることを明らかにした。

開発したダイバーシチアンテナは、放射効率 - 3 dB以上、水平面内平均化利得 - 2 dBi以上、アンテナ相関0.1以下であり、メータとの組合せ時に、通信ユニット内の限られたスペースで良好なアンテナ特性を実現した。これによって、スマートメータの通信品質が確保される場所率を向上し、環境配慮型社会の実現に貢献していく。



スマートメータ形状に適した小形ダイバーシチアンテナ

スマートメータが設置されるマルチパス環境では、フェージングの影響で設置位置によっては通信できない場合が発生する。通信品質改善に有効なダイバーシチ方式の実現のために、スマートメータ形状に適したダイバーシチアンテナとして、2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成を示す。この構成によって、通信ユニット内の限られたスペースで良好なアンテナ特性が得られる。

1. ま え が き

低炭素社会／エネルギー安定供給を実現するために、発電、送配電網、需要家からなる電力システムを情報通信ネットワークで接続し、電力システムの最適制御によって効率的なエネルギー利用を図るスマートグリッドの導入が進んでいる。スマートグリッドを構成する重要な一要素として、双方向通信機能を持つ電力メータであるスマートメータがある⁽¹⁾。スマートメータ周辺の通信ネットワークでは、スマートメータ同士が互いに無線通信を行い集約装置までバケツリレー式にデータを伝送する無線マルチホップ通信が一般的に用いられる。

スマートメータは、一戸建ての軒下、集合住宅のパイプシャフト、繁華街など様々な場所に設置されるため、通信品質改善のためにはダイバーシチ方式が有効である。ダイバーシチ方式実現のため、スマートメータに内蔵される通信ユニット内の小領域にアンテナを2本設置する場合、アンテナ間の相互結合が強くなり通信性能が劣化するという課題がある。また、小形アンテナは周囲環境の影響を受けやすいため、通信ユニットをメータと組み合わせた時の性能確保が課題となる。

本稿では、まず、スマートメータ通信システムにおけるアンテナ指標について検証するために、電波伝搬解析を行う。次に、前述した課題を解決するために開発した、スマートメータ用通信ユニットの小形ダイバーシチアンテナについて述べる。なお、周波数は、特定小電力無線で適用される900MHz帯とする。

2. 電波伝搬解析

まず、スマートメータ通信システムにおけるアンテナ指標について検証するために、電波伝搬解析を行う。市街地、マンション群にスマートメータを設置したモデルについて、レイトレース法⁽²⁾を用いた計算を行う。

2.1 計算方法

市街地のモデルを図1に、マンション群のモデルを図2に示す。地面はアスファルト(比誘電率15.0, 導電率0.005)とし、建物はコンクリート(比誘電率5.5, 導電率0.023)とする。図3に市街地モデルでの送受信点の位置を、図4にマンション群モデルでの送受信点の位置を示す。各モデルで送信点を変化させて5ケースの計算を行う。また、送受信アンテナとしては、指向性パターンの異なる4種類のアンテナ(スマートメータ搭載ダイバーシチアンテナ, 半波長ダイポール, 正面スルアンテナ)を用いる。スマートメータ搭載ダイバーシチアンテナとしては3章の基板アンテナを用い、ダイポールモードを基板アンテナ1, モノポールモードを基板アンテナ2とする。図5に、各アンテナの放射パターンを示す。表1に示したように、指向性パターンは変

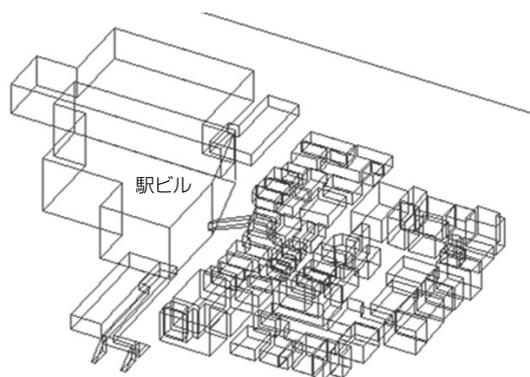


図1. 市街地モデル

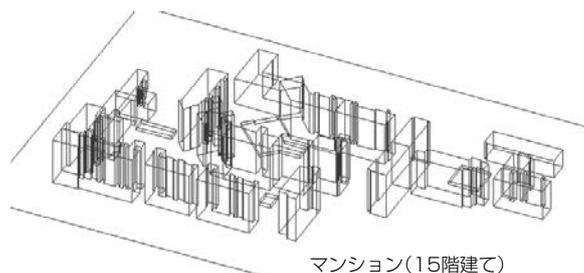


図2. マンション群モデル



図3. 市街地モデルにおける送受信点の位置

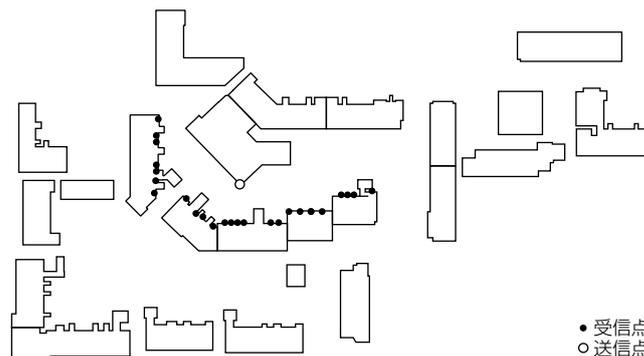


図4. マンション群モデルにおける送受信点の位置

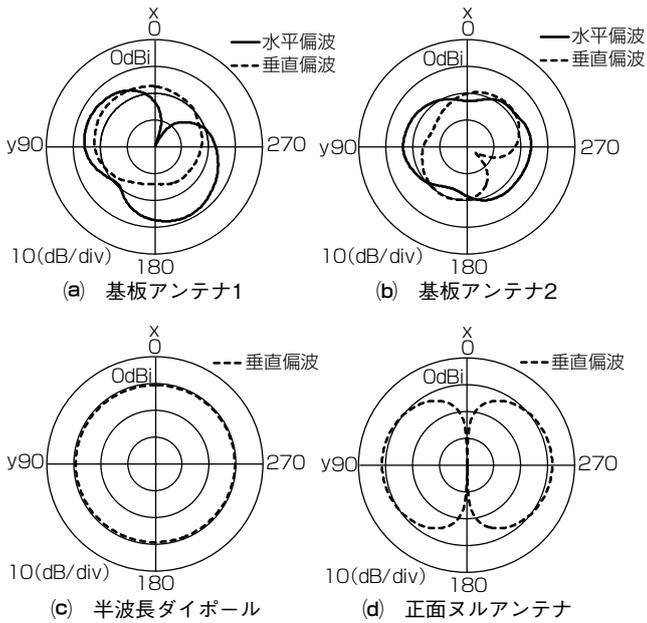


図5. 各アンテナの放射パターン(水平面)

表1. 各アンテナの放射効率と水平面内平均化利得

(a) 各アンテナの放射効率を同じにした場合				
	基板 アンテナ1	基板 アンテナ2	半波長 ダイポール	正面ヌル アンテナ
放射効率(dB)	-3.0			
水平面内平均化利得 (dBi)	-4.1	-6.1	-0.9	-0.9
(b) 各アンテナの水平面内平均化利得を同じにした場合				
	基板 アンテナ1	基板 アンテナ2	半波長 ダイポール	正面ヌル アンテナ
放射効率(dB)	-2.9	-0.9	-6.2	-6.2
水平面内平均化利得 (dBi)	-4.0			

えずに、各アンテナの放射効率を同じ(-3 dB)にした場合と、水平面内平均化利得を同じ(-4 dBi)にした場合について検討する。

2.2 計算結果

まず、各受信点で、ピーク値より-30dB以上となるレイ(幾何学的な伝搬経路)を対象として、到来波の角度の平均値、標準偏差を求める。仰角方向の到来角(送信点位置の全ケース、送信アンテナ全種類、全受信点の平均値±標準偏差)は、市街地モデルで -0.1 ± 9.4 度、マンション群モデルで -7.4 ± 14.4 度となった。市街地モデルでは、ほぼ水平方向から電波が到来していることが確認できる。一方、マンション群モデルでは、下方向からの到来波が多いことが確認できるが、これは地面反射の影響と考えられる。

図6に、受信アンテナ各種類での平均受信電力の計算結果を示す。市街地モデルでは、各アンテナの水平面内平均化利得を同じにした場合に平均受信電力がほぼ等しくなる。すなわち、アンテナの指向性パターンの形状に関わらず、水平面内平均化利得が同じであれば受信電力が等しくな

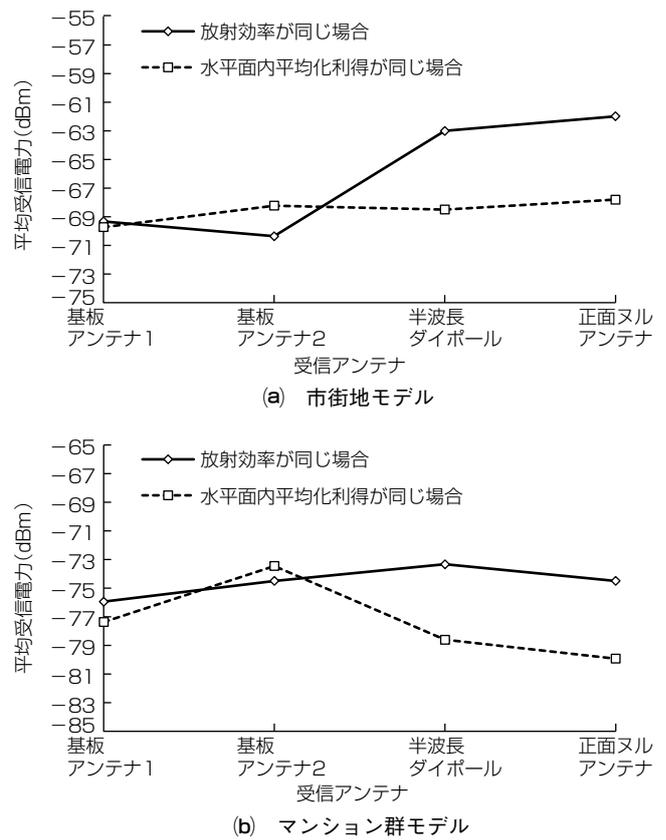


図6. 平均受信電力の計算結果

るので、到来波の仰角が低い場合には水平面内平均化利得がアンテナ指標として適当であることが分かる。一方、マンション群モデルでは、各アンテナの放射効率を同じにした場合に平均受信電力が等しくなる傾向にある。すなわち、アンテナの指向性パターンの形状に関わらず、放射効率と同じであれば受信電力が等しくなるので、到来波の仰角が高い場合には、仰角方向の分散も考慮する必要がある、放射効率がアンテナ指標として適当であると考えられる。

このように、スマートメータ通信システムでは、特にマルチパス環境にスマートメータが設置される場合、指向性の受信電力への影響は小さく、アンテナ指標として放射効率と水平面内平均化利得が重要であることを電波伝搬解析によって確認した。

3. スマートメータ用ダイバーシチアンテナ

マルチパス環境では、フェージングによってスマートメータの設置位置によっては通信できない場合が発生する。したがって、スマートメータ通信システムでは、受信レベルが落ち込む場所率を低減させる手法としてダイバーシチ方式が有効となる。そこで、スマートメータ用アンテナとして、2本のアンテナを用いた小形ダイバーシチアンテナを検討する。

3.1 アンテナ方式

図7に、通信ユニットの形状とスマートメータへの設置位置を示す。図に示すように、通信ユニット内の小領域に

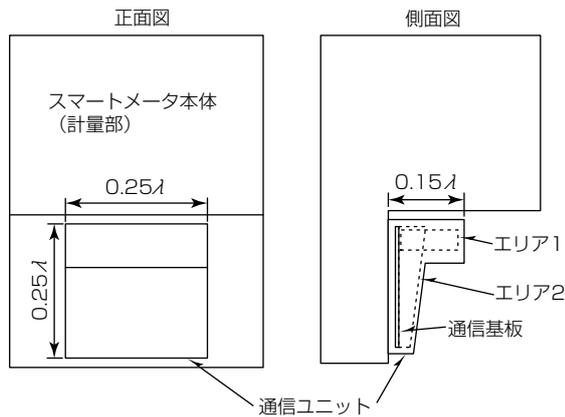


図7. 通信ユニットの形状と設置位置

アンテナを2本設置する必要がある。したがって、アンテナ間の相互結合が強くなるため、アンテナ間の相関係数が高くなりダイバーシチ効果が劣化する、放射効率・利得が低下するという課題がある。また、小形アンテナは周囲環境の影響を受けやすいため、メータと組み合わせた時の性能確保が課題となる。ここでは、これらの課題を解決するための小形ダイバーシチアンテナの構成方法として、次の2案を比較検討する。

- (1) 図7のエリア1に、基板上に構成した一体型ダイバーシチアンテナを設置した場合(基板アンテナ)
- (2) 図7のエリア2に、板金によって構成した逆Lアンテナを2本設置した場合(板金アンテナ)

3.1.1 基板アンテナ(エリア1)

小形の基板アンテナとして、エリア1にダイポール/モノポールモードを利用した一体型ダイバーシチアンテナを設置する場合を考える⁽³⁾。図8にアンテナ構成を示す。GNDは、通信基板を模擬したものである。アンテナは基板上に構成するが、図8ではモデルを簡略化している。GNDの上端から、給電線路を介して、高さ h の先端折り曲げダイポールを給電点#1によって給電する。給電線路のGNDにスリットを開け、不平衡変換を行う。また、給電線路のGNDと先端折り曲げダイポールをモノポールとして動作させるため、GNDにスロットを設け、その中央に給電点#2を設置する。給電点#2には直近に整合回路を設ける。給電点#1を励振した場合には、ダイポールに同相、給電線路GNDに逆相の電流が流れ、主としてダイポールから放射する(ダイポールモード)。一方、給電点#2を励振した場合には、ダイポールに逆相、給電線路GNDに同相の電流が流れ、主として給電線路GNDから放射する(モノポールモード)。

図8で $h=0.11\lambda_c$ 、 $h_s=0.10\lambda_c$ 、 $l_d=0.55\lambda_c$ 、 $l_s=0.31\lambda_c$ とした場合のSパラメータの測定結果を図9に示す。 λ_c は、設計の中心周波数 f_c での波長である。結合量 $|S_{21}|$ の測定値は、 f_c で-49dBであり、非常に低いことが確認できる。

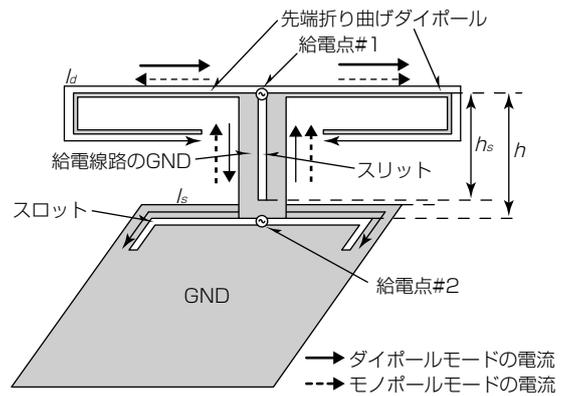


図8. 基板アンテナの構成

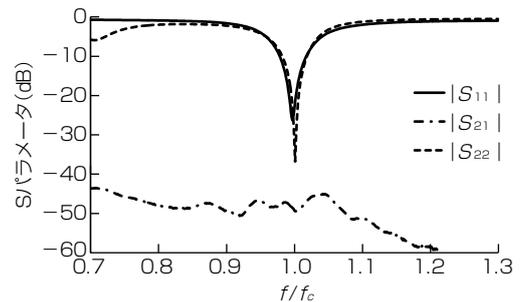


図9. Sパラメータの測定結果

これは、このアンテナが対称構造となっているためである。また、放射パターン測定結果から求めた2アンテナの相関係数は、到来波が全方向に様に分布していると仮定した場合、0.001以下である。

実際には、通信基板上の部品実装領域確保のため、図8のスロットを、ノッチ(スリット)としたモデル⁽⁴⁾について、メータに設置した場合の検討を行う。

3.1.2 板金アンテナ(エリア2)

低姿勢の板金アンテナとして、エリア2に逆Lアンテナを2本設置する場合を考える。図10にアンテナ構成を示す。逆Lアンテナ(Inverted L Antenna: ILA)は、通信ユニット筐体内に収容できる範囲で可能な限り大きくし、GNDからの高さを確保する。また、アンテナ先端部はGNDと非接続とする。

2本の逆LアンテナはGNDの左右端部に設置するが、間隔が $0.18\lambda_c$ と狭いためアンテナ間の結合の低減が必要である。そこで、アンテナによる結合を回路による結合で相殺させる減結合回路⁽⁵⁾を適用する。図11に示すように、減結合回路は2つの直列のサセプタンス B_1 と1つの並列のサセプタンス B_2 によって構成する。任意の2素子アンテナのアドミタンスマトリックス Y は、

$$[Y] = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

で表される。ここで、 $y_{ij}=g_{ij}+jb_{ij}$ とする。ポート1とポート2の結合が0となる条件から、 B_1 、 B_2 の値は次式に

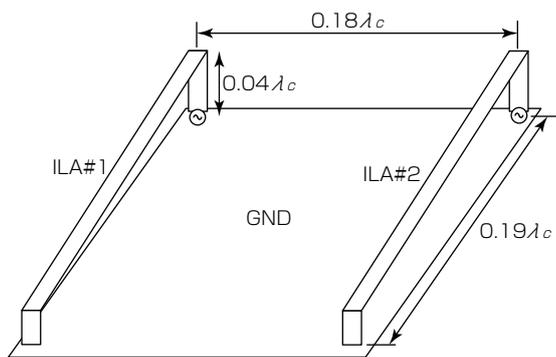


図10. 板金アンテナの構成

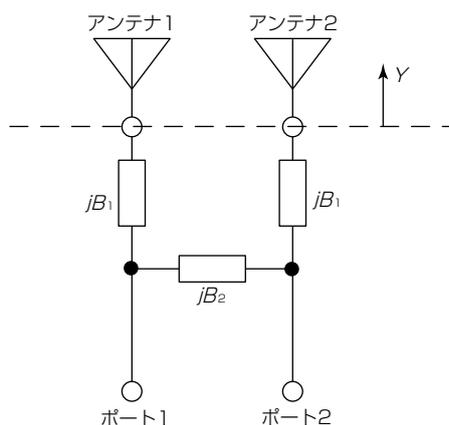


図11. 減結合回路

よって求められる⁽⁵⁾。

$$B_1 = (-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4g_{12}c_2}) / 2g_{12} \dots\dots\dots (2)$$

$$B_2 = \frac{B_1^2 g_{12}}{b_{11}g_{22} + g_{11}b_{22} - g_{12}b_{21} - b_{12}g_{21} + B_1(g_{11} + g_{22})} \dots\dots (3)$$

$$c_1 = g_{12}(b_{11} + b_{22}) - b_{12}(g_{11} + g_{22}) \dots\dots\dots (4)$$

$$c_2 = -g_{12}(g_{11}g_{22} - b_{11}b_{22} - g_{12}g_{21}) + b_{12}(-b_{11}g_{22} - g_{11}b_{22} + b_{12}g_{21}) \dots\dots\dots (5)$$

この減結合回路は、小形であるとともに、少数の集中定数素子のみで構成しているので調整が容易であるという利点がある。

3.2 スマートメータに設置した場合の測定結果

基板アンテナ、板金アンテナを内蔵した通信ユニットをスマートメータに設置した場合の放射効率、水平面内平均化利得、相関係数を表2に示す。基板アンテナでは、水平面内平均化利得が低いが、これは基板アンテナの上側にある計量部(図7)の影響によって、水平面より下方向に指向性を持つ傾向にあるためである。また、メータの影響によって、相関係数が劣化している。一方、板金アンテナでは、放射効率-3 dB以上、水平面内平均化利得-2 dBi以上が得られている。これは、アンテナ周囲にメータ金属物が少なく、また、逆Lアンテナ背面にある基板GNDによってメータの影響が小さいためと考えられる。相関係数は減結合回路によって0.07と低くなっている。以上から、

表2. 放射効率、水平面内平均化利得、相関係数の測定結果

(a) 基板アンテナ(エリア1)		
	ダイポール	モノポール
放射効率(dB)	-3.5	-4.0
水平面内平均化利得(dBi)	-4.1	-6.1
相関係数	0.43	
(b) 板金アンテナ(エリア2)		
	ILA #1	ILA #2
放射効率(dB)	-2.0	-2.4
水平面内平均化利得(dBi)	-1.5	-1.9
相関係数	0.07	

メータの影響を低減した小形ダイバーシチアンテナとしては、エリア2に設置した2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成が適していることが分かる。

4. むすび

まず、スマートメータ通信システムにおけるアンテナ指標について検証するために、市街地、マンション群のモデルに対して電波伝搬解析を行った。その結果、特にマルチパス環境にスマートメータが設置される場合、アンテナ指標として放射効率と水平面内平均化利得が重要であることを確認した。次に、アンテナ方式、実装エリアが異なる基板アンテナと板金アンテナを検討し、メータの影響を低減した小形ダイバーシチアンテナとしては、板金で作製した2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成が適していることを示した。開発したダイバーシチアンテナは、放射効率-3 dB以上、水平面内平均化利得-2 dBi以上、アンテナ相関0.1以下であり、メータとの組合せ時に、通信ユニット内の限られたスペースで良好なアンテナ特性を実現した。これによって、スマートメータの通信品質が確保される場所率を向上させ、環境配慮型社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 経済産業省：スマートメーター制度検討会報告書(2011)
- (2) 岩井誠人：移動通信における電波伝搬, コロナ社(2012)
- (3) 西本研悟, ほか：ダイポール/モノポールモードを利用した対称性を有するダイバーシチアンテナの実験検討, 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-125(2012)
- (4) Nishimoto, K., et al.: Compact diversity antenna using dipole and monopole modes, 2012 European Conference on Antennas and Propagation, 2469~2473(2012)
- (5) Nishimoto, K., et al.: Decoupling networks composed of lumped elements for diversity/MIMO antennas, 2013 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 307~310(2013)