

ガス管に近接したスマートメーター用偏波ダイバーシティアンテナの設計

前田 卓人, 佐藤 弘康, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科), 土屋 創太, 横山 睦人 (東京ガス)

概要: 近年, IoTの試みの1つとして 920 MHz 帯を利用して各種インフラメーターの検針データを無線通信により自動的に収集する Wireless Smart Utility Network(以下 Wi-SUN)が注目されている. マンションの各階における通路はマルチパス伝搬路であり, 送受アンテナ間における偏波面の変化, 複数の伝搬経路によって生じる干渉により受信電力が大幅に低下するなどのマルチパスフェージングが発生する. 通信品質の向上のためにはダイバーシティ技術の利用が有望であり, Wi-SUN 用ダイバーシティアンテナの開発も行われている. 本報告では, スマートガスメーターに用いる目的で, 管状導体に近接配置された偏波ダイバーシティアンテナを電磁界解析により設計した結果を述べる.

キーワード: Wi-SUN, ダイバーシティアンテナ

1. まえがき

近年, 様々なものをインターネットに接続する Internet of Things(IoT)の研究が盛んにおこなわれている. その試みの1つとして, 920 MHz 帯を利用して各種インフラメーターの検針データを無線通信により自動的に収集する Wireless Smart Utility Network(以下 Wi-SUN)が注目されている[1]. 通常マンションなどの集合住宅にはパイプシャフトと呼ばれるガス管などを上下階に通すためのスペースがあり, パイプシャフト内のガス管に装着して検針を行うスマートガスメーターの開発が進んでいる. しかしながら, マンションの各階における通路はマルチパス伝搬路であり, 送受アンテナ間における偏波面の変化, 複数の伝搬経路によって生じる干渉により受信電力が大幅に低下するなどのマルチパスフェージングが発生する. そのため, スマートガスメーター用アンテナには, マルチパス伝搬路において通信が途切れない, 高い通信品質を維持可能な特性が望まれる.

通信品質の向上のためにはダイバーシティ技術の利用が有望であり, Wi-SUN 用ダイバーシティアンテナの開発も行われている[2]. しかしながら, ガス管は導体でありガス管に近接してアンテナを配置する場合, ガス管の影響を考慮したダイバーシティアンテナの設計が必要となる. さらに, スマートガスメーターの内部には様々な回路部品があるものと想定されるため, これらによりアンテナの特性が変化しないロバスト性も求められる.

そこで本報告では, スマートガスメーターに用いる目的で, 管状導体に近接配置された偏波ダイ

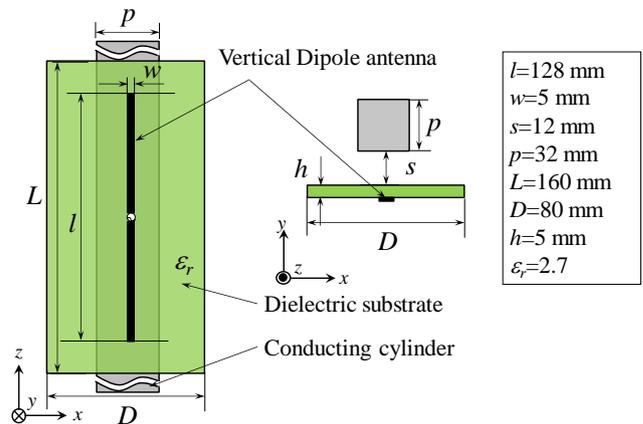


図1: 導体柱が近接した垂直偏波プリントダイポールアンテナ

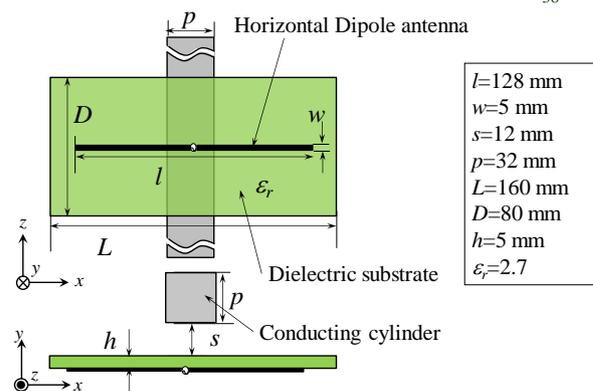


図2: 導体柱が近接した水平偏波プリントダイポールアンテナ

バーシティアンテナを電磁界解析により設計した結果を報告する.

2. 導体柱に近接したプリントアンテナの解析

新型ガスメーターはガスパイプ導体柱及び中空誘電体筐体で構成され, ガスパイプの太さが 30 mm, 筐体のサイズは長さ 180 mm, 奥行き 66 mm, 幅 80 mm が暫定的な寸法である. この寸法を元に, 誘電体筐体の表面にアンテナを貼り付けた構成を考える. 本節では, 導体柱がアンテナ特性に及ぼす影響について検討する.

導体柱が近接した垂直偏波プリントダイポールアンテナの構造を図1に示す. 誘電率 2.7 の基板の上にプリントされた長さ l , 幅 w のダイポールアンテナ

ナを導体柱と平行でかつ距離 $s=12\text{ mm}$ 離れた構造である。一方、導体柱に対してアンテナが垂直に配置された水平偏波プリントダイポールアンテナを図2に示す。どちらも導体柱として長さ 350 mm の直方体とした。

内部抵抗 $50\ \Omega$ に対する反射係数の解析結果を図3に示す。比較として、導体柱がない場合のプリントダイポールアンテナの反射係数も示した。垂直偏波プリントダイポールアンテナの場合、導体柱が無い場合は周波数 890 MHz 付近で反射係数 -28 dB が得られているが、導体柱があることにより、垂直偏波の場合は反射係数が -4.6 dB 程度まで劣化した。一方、水平偏波の場合は反射係数 -27 dB 程度が得られており、共振周波数は変化してしまいが

反射係数の劣化は少ない。入力インピーダンスの解析結果を図4に示す。垂直偏波の場合は抵抗成分が広帯域にわたり低い。これは、アンテナと導体柱の距離 $s=12\text{ mm}$ が 920 MHz の波長 326 mm で 0.04 波長程度と近いために平行伝送線路のように放射が小さくなったため低抵抗となったものと考えられる。

プリントアンテナと方形導体柱上の電流分布を図5に示す。垂直偏波の場合ダイポールで励振された電流が導体柱の軸方向に強く励振されている。一方、水平偏波の場合は中央のみ電流が励振されており、垂直偏波に比べて弱い。以上の結果から、ダイポールアンテナの軸と導体柱の軸が一致した場合にアンテナの反射特性が劣化し、入力抵抗成分が低下したものと考えられる。

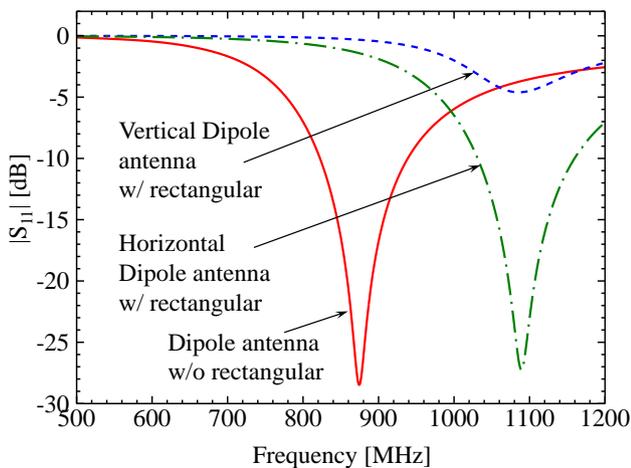


図3：導体柱が近接したプリントダイポールアンテナの反射係数

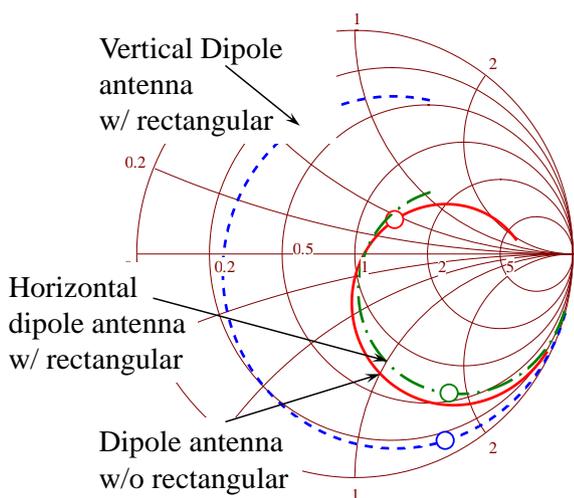
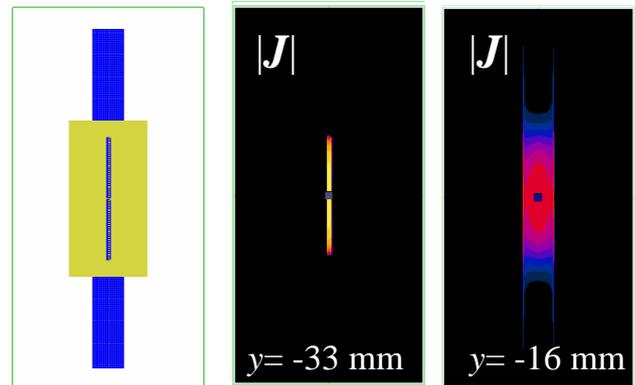
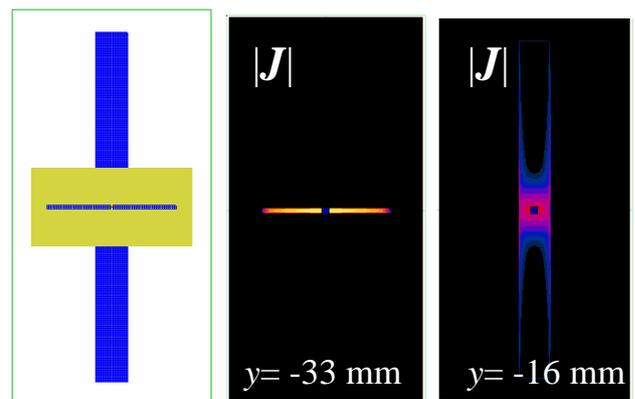


図4：導体柱が近接したプリントダイポールアンテナの入力インピーダンス



構造 アンテナ上 導体柱上

(a) 垂直偏波



構造 アンテナ上 導体柱上

(b) 水平偏波

図5：プリントダイポールアンテナと導体柱上の電流分布 ($f=1.1\text{ GHz}$)

3. 導体柱に近接したプリントアンテナの設計

内部抵抗 50Ω にアンテナの入力インピーダンスを整合するため逆 F 型アンテナを採用した. 逆 F アンテナは線状アンテナのひとつでありプリントダイポールアンテナの給電部にループ構造を持たせることでインピーダンスステップを図る手法である. 以下に垂直偏波アンテナ, 水平偏波アンテナの設計結果を述べる.

3.1 垂直偏波アンテナの設計

導体柱に近接した垂直偏波プリント逆 F ダイポールアンテナの構造, 及び設計周波数 $f_c=920 \text{ MHz}$ として設計した構造パラメータを図 6 に示す. 設計は以下の手順で行った. ループの周長 L_l は長さ d , g を用いて

$$L_l = 2(d - w + g) \quad (1)$$

で表され, $L_l=l_g/4$ となるループの反共振周波数 f_l を設計周波数 f_c より低い周波数に設定することにより, 反共振で得られた抵抗成分のうち高周波側の低い値を利用する. d と g の値を変化させて抵抗成分の調整後, アンテナ長 l を変化させて共振周波数を調整する.

入力インピーダンスと反射係数の解析結果をそれぞれ図 7, 図 8 に示す. ループがない垂直偏波プリントダイポールアンテナの場合, 920 MHz 帯における入力インピーダンスの抵抗成分は数 Ω 程度であるのに対し, 垂直偏波プリント逆 F ダイポールアンテナの場合は設計周波数 $f_c=920 \text{ MHz}$ よりも低い $f_l=800 \text{ MHz}$ 付近の周波数帯で反共振が現れており, 800 MHz では大きな抵抗が得られている. 一方, $f_c=920 \text{ MHz}$ では抵抗成分が下がり 50Ω 程度まで低下している. 920 MHz における反射係数は -13 dB であり, 概ね良好な反射特性を達成できた.

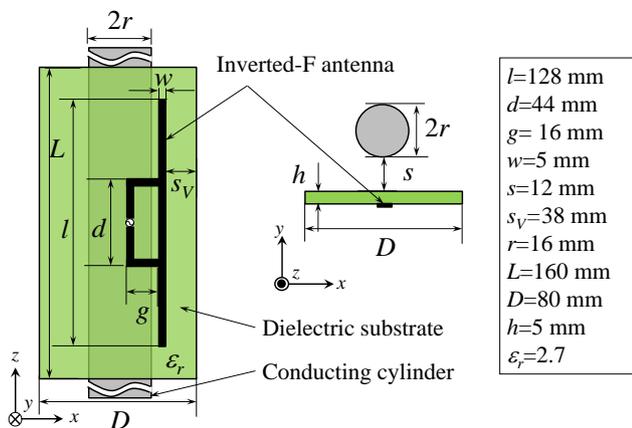


図 6 : 導体柱に近接した垂直偏波プリント逆 F ダイポールアンテナ

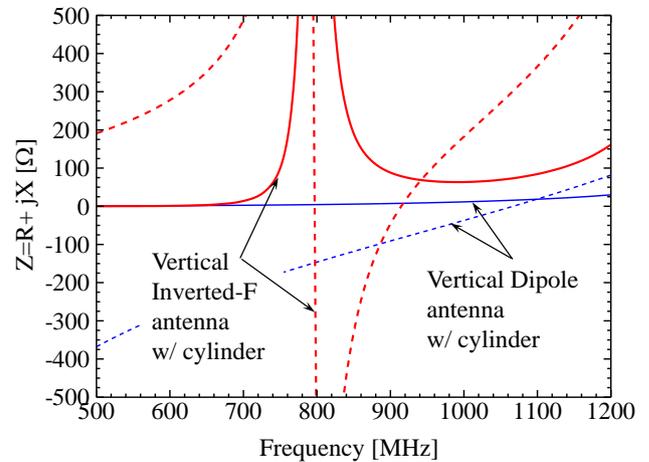


図 7 : 導体柱に近接した垂直偏波逆 F ダイポールアンテナの入力インピーダンス

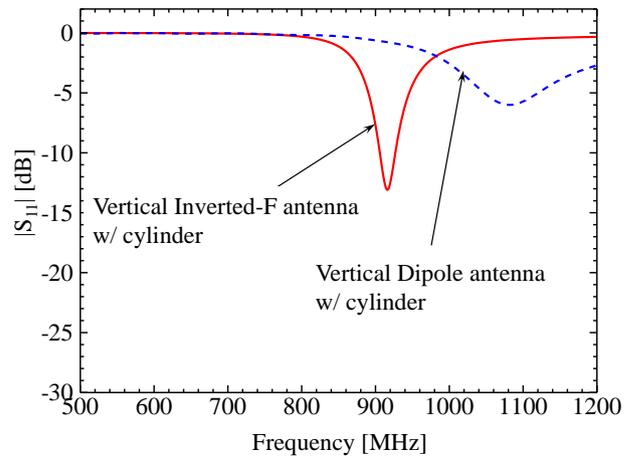


図 8 : 導体柱に近接した垂直偏波プリント逆 F ダイポールアンテナの反射係数

3.2 水平偏波アンテナの設計

図 2 に示した水平偏波プリントダイポールアンテナを新型ガスメーターの表面に貼り付けるためにはアンテナ導体を折り曲げる必要がある. 折り曲げることによってダイポールアンテナ上の電流が導体柱を囲むことになり強い電流が導体柱に励振されると考えられる. また, ガスメーターの内部には流量計を含む様々な部品が装着されることが想定されるため, 導体柱以外の部品によってアンテナ特性が変化しないロバスト性が望まれる. そこで, プリントダイポールアンテナを小型化してガスメーターの 1 面に貼り付けられる逆 F 型アンテナの構造を検討した. 導体柱に近接した水平偏波プリント逆 F ダイポールアンテナの構造, 及び設計周波数 $f_c=920 \text{ MHz}$ として設計した構造パラメータを図 9 に示す. この構造はダイポール素子の軸が導体柱と平行となるものの, 各ダイポール素子に励振される電流は逆位相となる

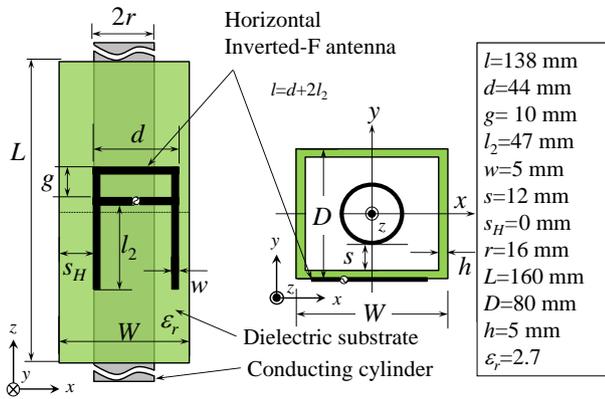


図9：導体柱が近接した水平偏波プリント逆Fダイポールアンテナ

ため導体柱に励振される電流が打ち消されるものと考えられる。

入力インピーダンスと反射係数の解析結果をそれぞれ図10, 図11に示す。比較のため, 図2の水平偏波プリントダイポールアンテナを折り曲げた場合のk結果も合わせて示した。反射係数は, 水平偏波プリント逆Fダイポールアンテナの場合920 MHzにおいて-11 dBを達成した。一方, 折り曲げた水平偏波プリントダイポールアンテナの場合であっても反射係数が-9 dB程度であり, 垂直ダイポールアンテナの場合に比べて劣化が少なく, 逆Fアンテナに比べて広帯域の特性が得られている。ロバスト性の観点からみると, 内部に置かれる部品によって共振周波数が変化しても広帯域特性があれば問題が少ないと考えられる。以上の考察により, 反射特性を多少犠牲にして広帯域を得る設計も選択の余地があるが, 本報告では逆Fアンテナを採用することにする。

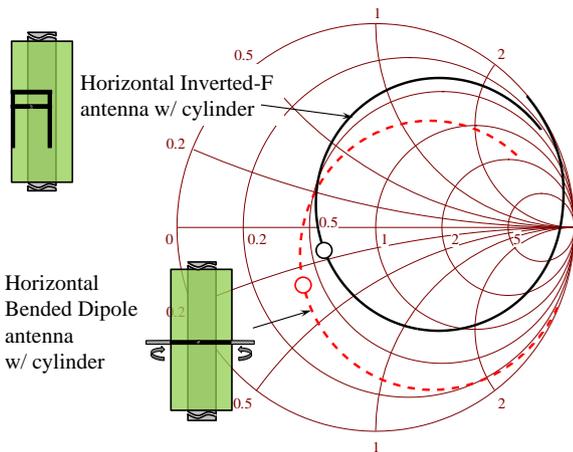


図10：導体柱が近接した垂直偏波逆Fダイポールアンテナの入力インピーダンス

4. ダイバーシティアンテナの特性評価

設計したダイバーシティアンテナの放射特性を解析し, 垂直偏波と水平偏波の空間相関係数を評価した。空間相関係数は次式で表される[3]。

$$\rho_e = \frac{|\iint_{4\pi} [\mathbf{F}_1(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{F}_2(\theta, \varphi)] d\Omega|^2}{\iint_{4\pi} |\mathbf{F}_1(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \iint_{4\pi} |\mathbf{F}_2(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (2)$$

ここで, $\mathbf{F}_1(\theta, \varphi)$, $\mathbf{F}_2(\theta, \varphi)$ はPort 1, Port 2を給電したときのアレー素子パターンであり, 記号 \cdot はエルミート内積を表す。空間相関が小さいほど垂直偏波(Port 1)と水平偏波(Port 2)の直交性が優れダイバーシティ効果が高いことを意味する。ダイバーシティアンテナとして, 逆F型とダイポール型を比較する。

逆F型とダイポール型の垂直偏波3次元アレー素子パターンを図12に示す。どちらの場合も $|E_\theta|$ 成分が大きく $|E_\phi|$ 成分が小さい指向性が得られた。 $|E_\theta|$ 成分について, 逆F型の方がダイポール型に比べわずかに強い分布が得られた。逆F型とダイポール型の水平偏波3次元アレー素子パターンを図13に示す。ダイポール型の場合, $|E_\theta|$ 成分が強い (θ, φ) で $|E_\phi|$ 成分が弱い, 直交性が観測された。一方, 逆F型の場合は直交性がわずかに劣化している。

逆F型とダイポール型の空間相関係数を図14に示す。逆F型の場合周波数920 MHzにおいて-37 dB, ダイポール型の場合は-107 dBが得られ, ダイポール型は広帯域にわたり低い空間相関係数が得られた。

以上の結果から, インピーダンス整合を重視した場合は逆F型ダイバーシティアンテナが有利であり, ロバスト性の観点から広帯域性が必要となる場合は空間相関特性に広帯域特性があるダイポール型ダイバーシティアンテナが有利と考えられる。

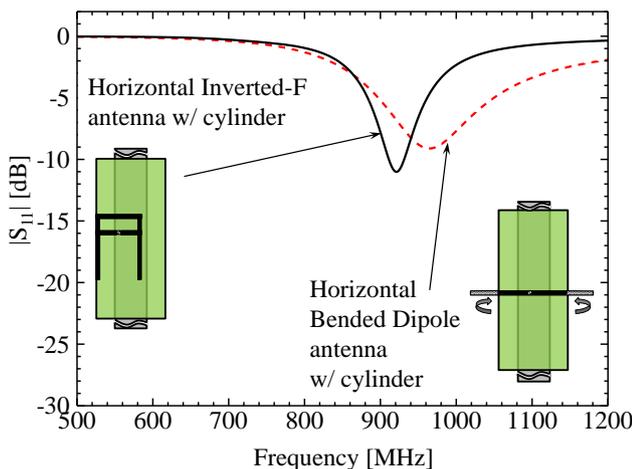


図11：導体柱が近接した垂直偏波逆Fダイポールアンテナの反射係数

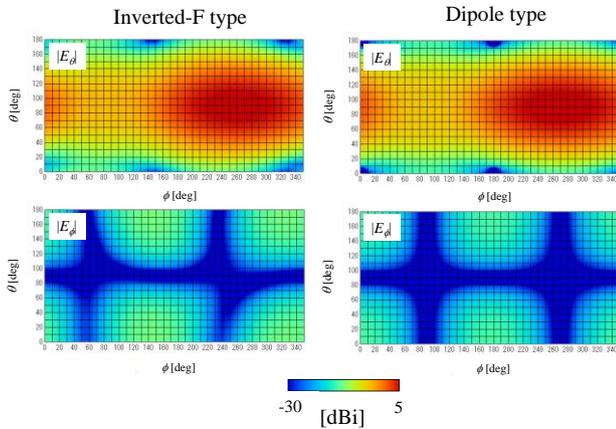


図 12: 導体柱が近接した偏波ダイバーシティアンテナの 3次元アレー素子パターン (垂直偏波の場合)

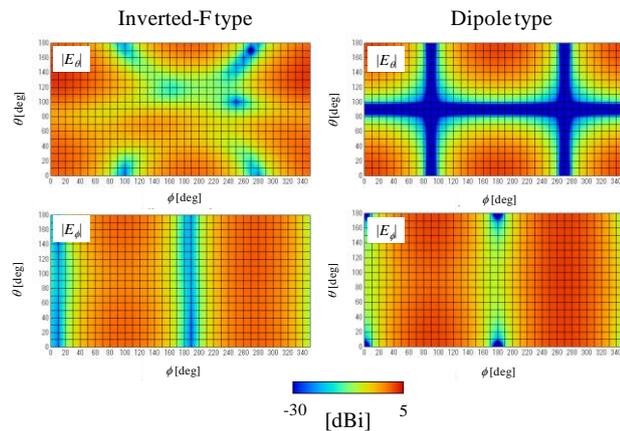


図 13: 導体柱が近接した偏波ダイバーシティアンテナの 3次元アレー素子パターン (水平偏波の場合)

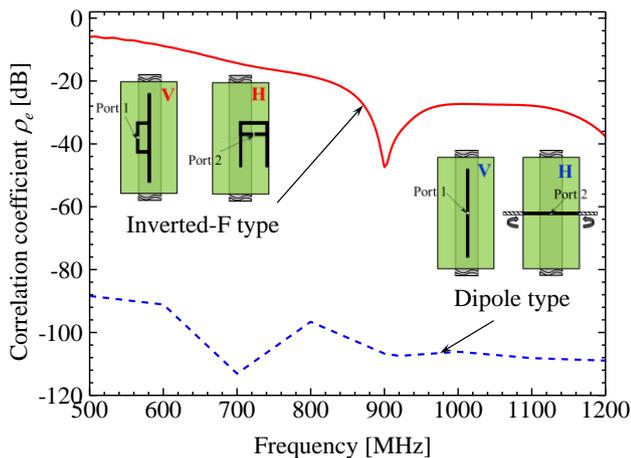


図 14: 導体柱が近接したダイバーシティアンテナの空間相関係数

5. まとめ

導体柱に近接配置された偏波ダイバーシティアンテナを電磁界解析により設計した. 導体柱と平行な垂直偏波アンテナの入力インピーダンスは導体柱の影響を強く受けて劣化すること, 導体柱と直交する水平偏波アンテナへの導体柱の影響は小さいことがわかった. また, 逆 F 型アンテナによるインピーダンス整合を図り垂直偏波, 水平偏波共に反射係数が -10 dB 以下を達成した. さらに, ダイバーシティ特性の評価を空間相関係数により行い, 逆 F 型よりもダイポール型の方が広帯域かつ低空間相関が得られることを明らかにした.

参考文献

- [1] 原田博司, 児島史秀, SUM Chin-Sean, LU Alina Liru, "高度電波監視技術を用いたスマートユーティリティネットワーク," 信学技報, IEICE Technical Report, SR2011-85, January 2012.
- [2] 堀口和希, 陳 強, 土屋創太, 川田拓也, "ガスメーター用ダイバーシティアンテナの性能評価システムの検討," 信学ソ体, B-1-47, 2015年9月.
- [3] S. Blanch, J. Romeu, I. Corbella, "Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description", Electronics Letters, vol. 39, no. 9, pp. 705-707, May 2003.