

メタマテリアル構造を用いた UWB MIMO アンテナに関する研究

研究代表者

竹村 暢康

日本工業大学 基幹工学部 電気電子通信工学科

1 はじめに

国連が 2030 年までに達成する目標として掲げている「持続可能な開発目標 (SDGs: Sustainable Development Goals)」に対し、IoT (Internet of Things) など高度情報化社会に向けた技術の活用が検討されている。あらゆるものがネットワークに繋がる IoT では、デバイス間通信や測位・測距などへの対応が必要であり、他の無線通信システムに対して通信障害を引き起こさずシステムを円滑に運用することが求められている。また、あらゆるものへ実装するため無線機器は小型化することが重要課題であると言える。UWB (Ultra-Wideband) [1] も IoT における無線通信技術の有力な手段として期待されており、屋内だけでなく屋外での利用を含めた高速通信や測位・測距など様々なアプリケーションへの適用が見込まれている [2] [3]。UWB の出力レベルは -41.3dBm/MHz に制限されているため近距離での使用が想定されている。また、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術による伝送容量の増加や通信品質の向上など IoT に向けた取り組みが進められている。

筆者は先行研究において、平面型の UWB モノポールアンテナについて提案している [4]。このアンテナは誘電体基板上に形成した UWB モノポールアンテナにショートスタブを付加した構造であり、ショートスタブを用いることで、低い周波数帯域におけるインピーダンス整合を改善し、広帯域特性を実現している。一方、移動通信で使われている携帯端末用アンテナでは、メタマテリアル構造 [5] である SRR (Split ring resonator) を使用した小型アンテナについて提案している [6]。このアンテナは L 型のモノポールアンテナに SRR を付加することで小型化を実現している。

本研究では、UWB と MIMO 技術を組み合わせることで伝送容量や測位精度の向上を図るために、あらゆるものへ実装する小型な UWB MIMO アンテナ構成を実現することを目的としている。図 1 に UWB MIMO アンテナの小型化に向けた検討課題を示す。まず、2 章では先に提案した UWB モノポールアンテナが対称構造であることに着目し、アンテナを半分にカットしたハーフ形状の UWB モノポールアンテナ構成について検討した結果を述べる。UWB モノポールアンテナをハーフ形状とすることで、MIMO 構成とした場合、小型な UWB MIMO アンテナ構成が可能となる。3 章では、ハーフ形状 UWB モノポールアンテナ間にメタマテリアル構造を付加することで、アンテナ素子間の結合を低減し、UWB MIMO アンテナの小型化に向けた構成について述べる。4 章でまとめと今後の課題について述べる。

2 UWB モノポールアンテナの小型化に向けた構造検討

2-1 提案アンテナ構成

ショートスタブを付加した UWB モノポールアンテナを小型化するために、対称構造を利用してアンテナを広帯域な特性に保ったまま概ね半分のサイズで実現する構成について検討した。図 2 にアンテナ構成を示す。アンテナは、長さ $L=30\text{mm}$ 、幅 $W=13\text{mm}$ 、厚さ $t=1.6\text{mm}$ の誘電体基板 ($\epsilon_r=4.4$, $\tan \delta=0.02$) 上に形成しており、ハーフ形状 UWB モノポールをマイクロストリップ線路で給電し、UWB モノポールの中央下部からマイクロストリップ線路のグラウンド導体に対してショートスタブを装荷した構成である。誘電体基板の表面には、UWB モノポールとマイクロストリップ線路を形成し、裏面には一部円形としたグラウンド導体とショートスタブ線路を形成し、スルーホールを介して表面の UWB モノポールと接続している。

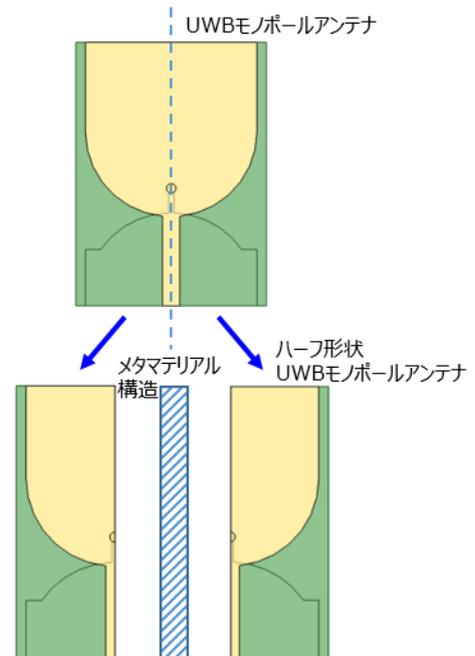
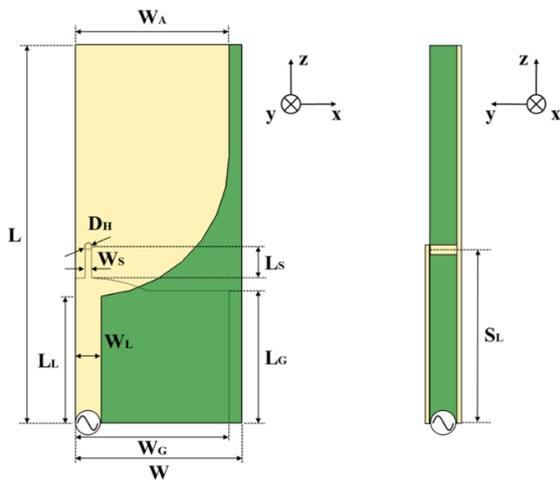


図 1 UWB MIMO アンテナの小型化に向けた検討課題



(a) 表面 (b) 側面
図2 アンテナ構成

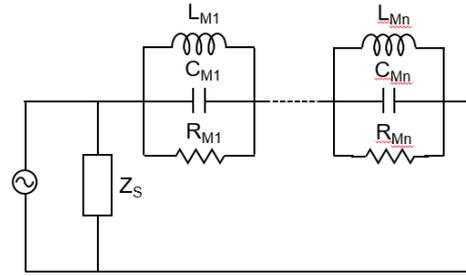


図3 アンテナ等価回路

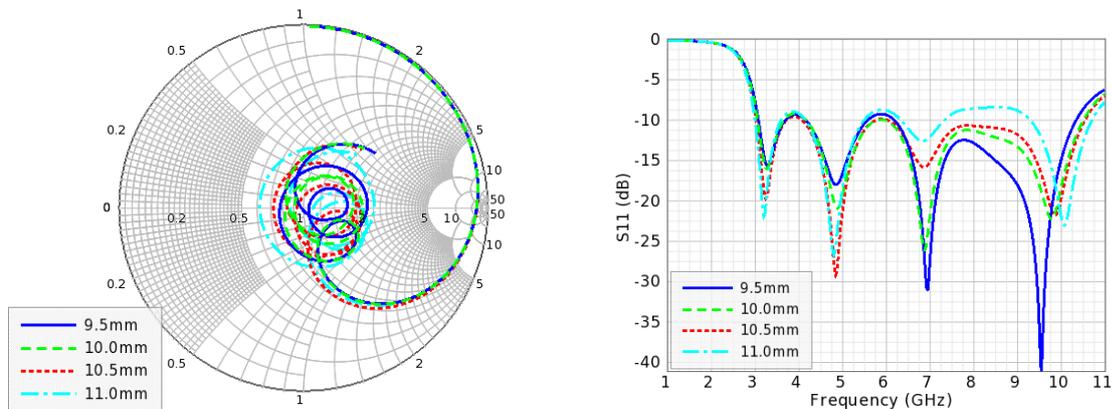
表1 アンテナの寸法パラメータ

| パラメータ | L | W | L _L | W _L | W _A |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 長さ[mm] | 30.0 | 13.0 | 10.0 | 2.0 | 12.0 |
| パラメータ | L _S | W _S | D _H | L _G | W _G |
| 長さ[mm] | 2.5 | 0.5 | 0.5 | 10.5 | 12.0 |

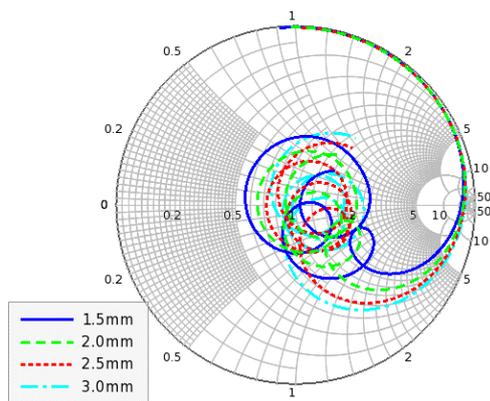
UWB モノポールアンテナのグラウンド導体はインピーダンス整合のために一部円形となっている。UWB モノポールとグラウンド導体は電気壁を利用した構造によりハーフ形状としている。図3にショートスタブを装荷したハーフ形状 UWB モノポールアンテナの等価回路を示す。一般的に UWB モノポールアンテナの等価回路は共振回路が複数段連なったものとして考えられる[7]。図において、 R_{Mk} , L_{Mk} , C_{Mk} ($k = 1, 2, \dots, n$) はハーフ形状 UWB モノポールアンテナの抵抗, インダクタンス, キャパシタンスである。隣接する周波数における共振特性により, インピーダンス整合帯域幅を超広帯域にすることが可能である。 Z_s はショートスタブの並列インピーダンスである。ショートスタブはハーフ形状 UWB モノポールアンテナに対して並列インピーダンスとして動作する。UWB モノポールアンテナおよびショートスタブの各寸法を調整することにより, アンテナ入力インピーダンスの整合をとることが可能である。アンテナの各寸法は, 給電線路の長さ (L_L) および幅 (W_L), モノポールの導体幅 (W_A), ショートスタブ線路の長さ (L_S) および幅 (W_S), スルーホール径 (D_H), グラウンド導体の長さ (L_G) および幅 (W_G) としている。これらのパラメータの基準値を表1に示す。なお, アンテナの特性インピーダンスは 50Ω である。

2-2 パラメトリック解析

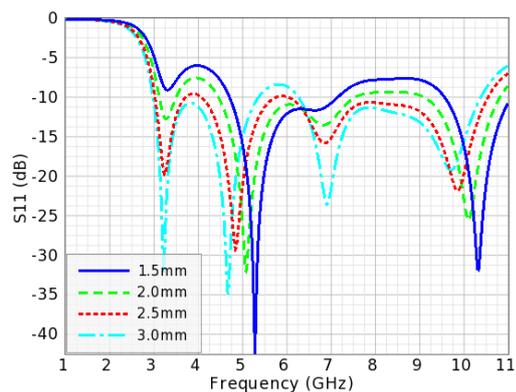
UWB モノポールアンテナおよびショートスタブの各寸法についてパラメトリック解析を行った。ここでは一例として, グラウンド導体の長さ L_G , ショートスタブ線路の長さ L_S , ショートスタブ線路の幅 W_S , スルー



(a) スミスチャート(1-11GHz) (b) 反射特性
図4 入力インピーダンス計算結果 (L_G を変化させた場合)

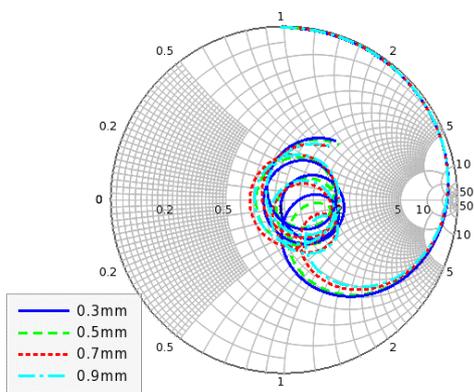


(a) スミスチャート(1-11GHz)

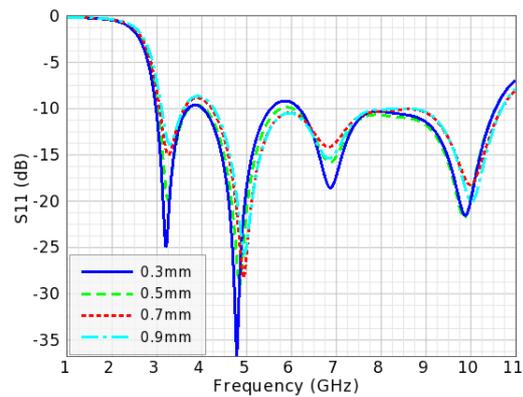


(b) 反射特性

図5 入力インピーダンス計算結果 (L_s を変化させた場合)

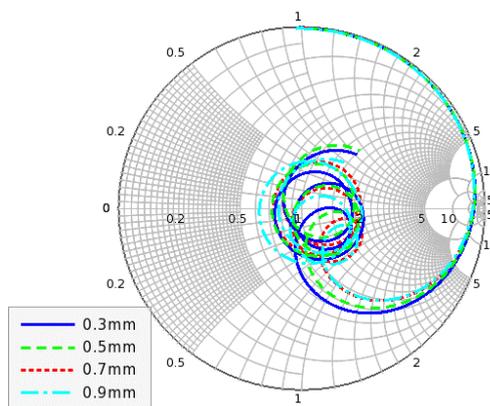


(a) スミスチャート(1-11GHz)

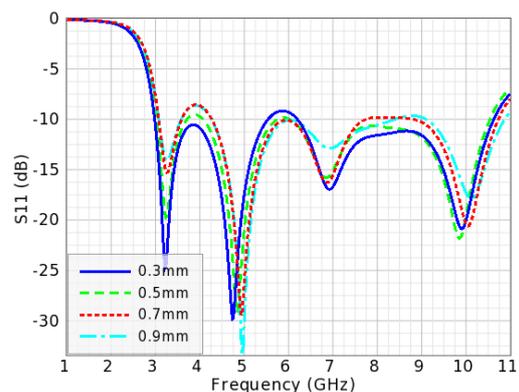


(b) 反射特性

図6 入力インピーダンス計算結果 (W_s を変化させた場合)



(a) スミスチャート(1-11GHz)



(b) 反射特性

図7 入力インピーダンス計算結果 (D_h を変化させた場合)

ホール径 D_h を変化させた場合について示す。グラウンド導体の長さ L_G を変化させたときの入力インピーダンス計算結果を図4に示す。(a)はスミスチャート, (b)は反射特性である。 L_G の値は9.5mm, 10mm, 10.5mm, 11mmと変化させた。他の寸法パラメータは表1に示す値としている。グラウンド導体の長さ L_G を長くした場合, 所望周波数帯域の高域部分の共振周波数が, 高域へシフトすることで全体の帯域が広くなり, 共振Q値は周波数の低い共振部分で大きくなり, 高い周波数での共振部分では小さくなる傾向が見られる。また, 入

入力インピーダンスの抵抗成分が小さくなる傾向が見られる。ショートスタブの長さ L_s を変化させたときの入力インピーダンス計算結果を図 5 に示す。 L_s の値は 1.5mm, 2mm, 2.5mm, 3mm と変化させた。ショートスタブの長さを長くした場合、3GHz 付近の共振周波数の共振 Q 値が大きくなり、5GHz 付近の共振周波数が低域にシフトする傾向が見られる。また、入力インピーダンスの容量成分が大きくなる傾向が見られる。入力インピーダンスの容量成分が大きくなることで、アンテナのサイズを小さくしたときに所望周波数帯域内の低い周波数で誘導成分が大きくなり、不整合だった周波数においても入力インピーダンスの整合がとれ、3.1GHz 付近の低い周波数における特性を改善している。ショートスタブの幅 W_s を変化させたときの入力インピーダンス計算結果を図 6 に示す。 W_s の値は 0.3mm, 0.5mm, 0.7mm, 0.9mm と変化させた。ショートスタブの幅を広くした場合、各共振周波数の共振 Q 値が小さくなる傾向が見られる。また、入力インピーダンスの容量成分が小さくなる傾向があることが分かる。スルーホール径 D_h を変化させたときの入力インピーダンス計算結果を図 7 に示す。 D_h の値は 0.3mm, 0.5mm, 0.7mm, 0.9mm と変化させた。スルーホール径を大きくした場合、3GHz 付近の共振周波数の共振 Q 値は小さくなり、5GHz 付近の共振周波数が高域にシフトする傾向が見られる。また、入力インピーダンスの容量成分が大きくなる傾向が見られる。計算結果より、アンテナの寸法パラメータを変化させることによって、アンテナの入力インピーダンスを調整でき、UWB システムの所望周波数帯域を満足する広帯域特性が得られることを確認した。

2-3 周波数領域解析および実測評価

パラメトリック解析により得られたアンテナおよびショートスタブの各寸法において、所望周波数帯域を満足するアンテナ構成にて計算を行った。UWB モノポールアンテナの寸法パラメータは、表 1 に示した基準値とすべて同一な値により計算している。図 8 に VSWR 計算結果を示す。比較として従来の UWB モノポールアンテナの結果を示す。計算結果より、従来の UWB モノポールアンテナと比較して、概ね半分のアンテナサイズにした場合においても、ほぼ同等の VSWR 特性となり、UWB システムの所望帯域全体で VSWR が 2 以下となる良好な特性が得られていることを確認した。図 9 に x-y 面における放射パターン計算結果を示す。計算周波数は、3.5GHz, 6.5GHz, 10GHz である。各周波数において、ほぼ無指向性の放射パターンが得られている

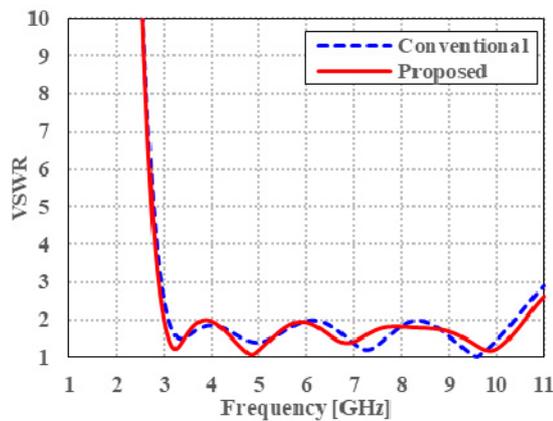


図 8 VSWR 計算結果

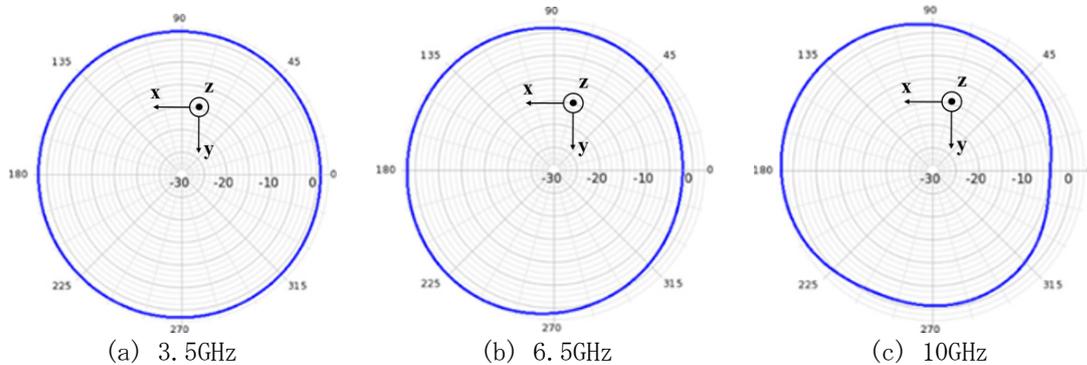


図 9 放射パターン計算結果

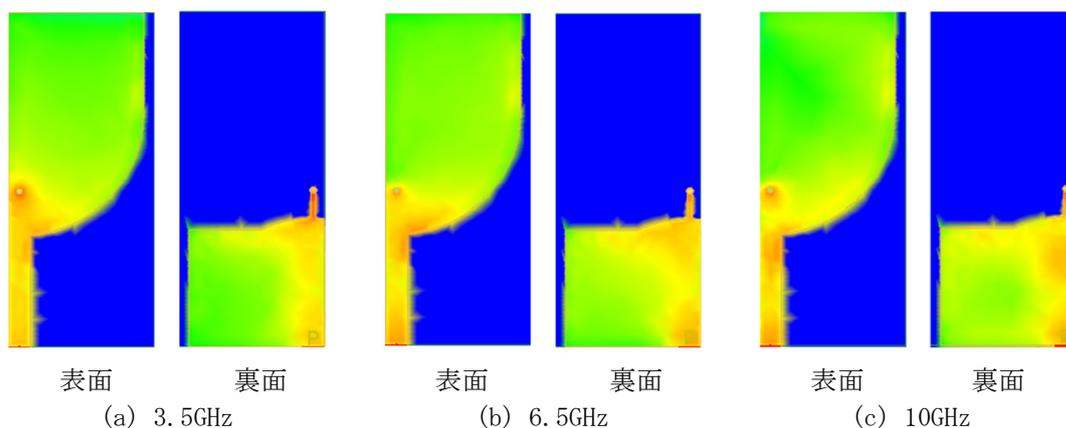


図 10 電流分布計算結果

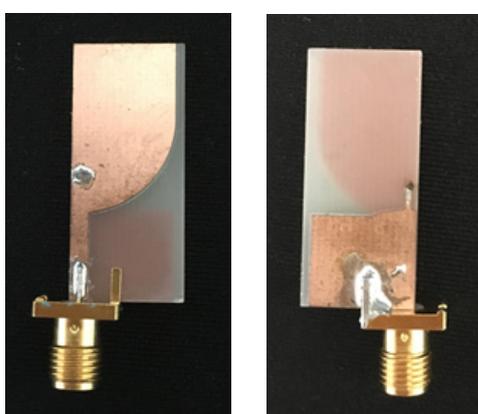


図 11 試作アンテナ外観

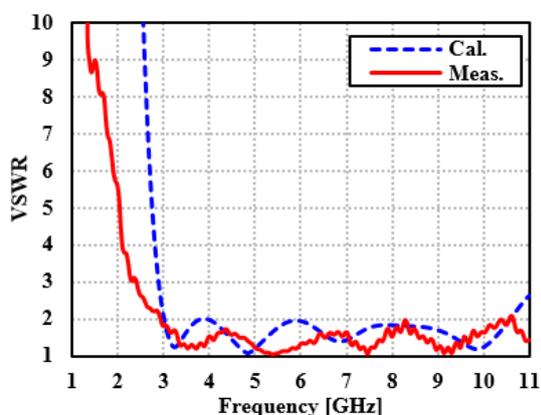


図 12 VSWR 測定結果

ことを確認した。図 10 にアンテナ導体面上における電流分布計算結果を示す。計算周波数は、3.5GHz、6.5GHz、10GHz である。各周波数の電流分布の結果を比較すると、3.5GHz においてショートスタブ上の電流分布が大きいことが確認できる。これは、ショートスタブが低域における周波数帯でインピーダンス整合として動作していると考えられる。シミュレーションモデルと同一寸法で試作したアンテナの外観を図 11 に示す。アンテナの給電点には SMA コネクタを取り付け、測定にはアンテナの SMA コネクタに RF ケーブルを介して接続したベクトルネットワークアナライザを用いた。試作したアンテナの VSWR 測定結果を図 12 に示す。比較として計算結果を図中に点線で示している。実測結果より計算値と概ね同等の VSWR 特性が得られていることを確認した。UWB システムの所望周波数帯域において VSWR が 2 以下の特性が得られており、実測においても所望周波数帯域を十分に満足する広帯域な特性が得られていることを確認した。

次に提案アンテナの群遅延特性について述べる。群遅延特性とは、信号波が回路の素子を通過するときの位相特性であり、式 (1) のように表すことができる。

$$T_d = -\frac{d\theta}{d\omega} \quad (1)$$

ここで、 θ および ω はアンテナの入力インピーダンスの位相と角周波数を表している。群遅延特性には位相特性の傾きが小さく、線形性であることが求められる。位相特性の傾きは遅延量、線形性は信号の安定性に起因する。位相特性 θ は式 (2) によって求めることができる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(S)}{\text{Re}(S)} \quad (2)$$

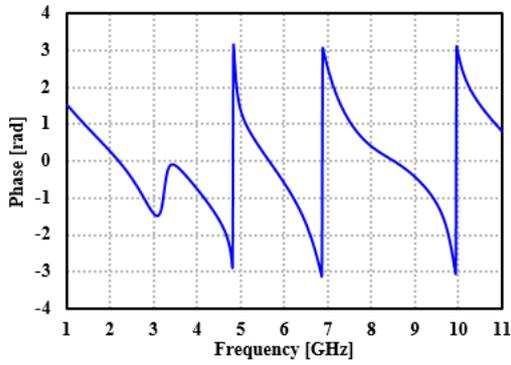


図 13 位相特性計算結果

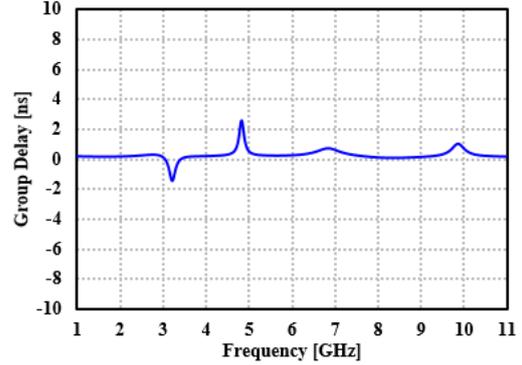


図 14 群遅延特性計算結果

ここで、 $\text{Re}(S)$ 、 $\text{Im}(S)$ はアンテナのSパラメータの実数成分および虚数成分を表している。アンテナの位相特性を図13、式(1)、式(2)より計算した群遅延特性を図14に示す。位相特性の結果から、位相反転直後の周波数帯においてはやや急な傾きとなっているが、全体としては線形的な傾きが確認できる。群遅延特性においても共振周波数に該当する周波数における遅延は、他の周波数と比べて若干大きくなっているものの、UWBシステム全域において0.2ns程度の低遅延特性が得られていることが確認できる。

2-4 時間領域解析

UWBシステムの通信方式はナノ秒以下の極めて短いパルスでインパルスまたは非正弦波信号に変換されたデジタル信号の伝送を行う方式であるため、通信に用いる信号は急速な時間変化を有する。また、高速無線

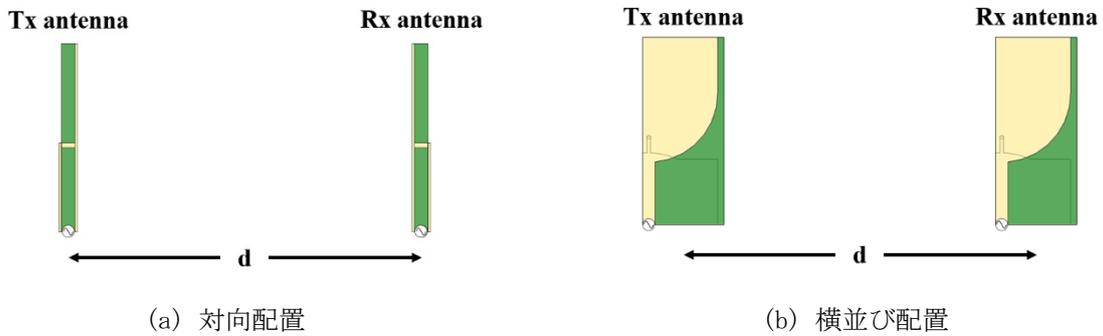


図 15 アンテナ配置

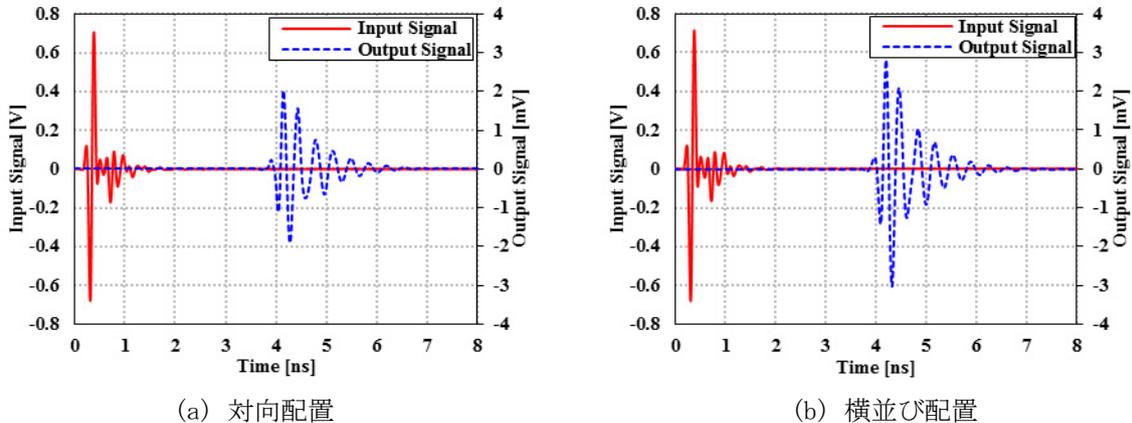


図 16 時間領域解析結果

通信用途としてのUWBアンテナには通信の方向に寄与しない通信特性が求められる。そのため、アンテナの動作の評価には、周波数領域解析と同様に時間領域解析も重要な評価要素である。

提案アンテナを2つ用いて、それぞれ送信アンテナ、受信アンテナとして送信アンテナから送信した信号と受信アンテナで受信する信号を時間領域で解析した。解析はアンテナ同士を対向させて配置した場合、横並びに配置した場合について行った。アンテナの配置イメージを図15に示す。アンテナ間距離dは1mとしている。解析結果を図16に示す。(a)はアンテナ同士を対向させて配置した場合、(b)はアンテナ同士を横並びに配置した場合である。計算結果より、受信信号の強度は横並びに配置した方が対向させて配置した場合と比べて1mV程度大きいことが確認できる。これは図9で示したアンテナの放射パターンがx軸の正方向に少し傾いていることが影響しているものと考えられる。また、受信信号の相関係数は、式(3)のように表される。

$$\rho = \max_{\tau} \left\{ \frac{\int S_1(t)S_2(t-\tau)dt}{\sqrt{\int S_1^2(t)dt}\sqrt{\int S_2^2(t)dt}} \right\} \quad (3)$$

ここで、S(t)およびτは信号の強度、遅延時間を表している。式(3)より、アンテナを対向させて配置した場合と横並びに配置した場合の送受信信号の相関係数は0.986となり、高い相関があることを確認した。受信信号の到達時間も、それぞれの配置においてはほぼ同時であることが確認された。この結果からUWBシステムにおいて本アンテナを使用した場合、どの方向にある通信機器とも同程度の品質で通信が可能であると考えられる。

3 UWB MIMO アンテナのメタマテリアル構造による素子間結合低減の検討

3-1 UWB MIMO アンテナ構成

2章にて提案したショートスタブを付加したハーフ形状UWBモノポールアンテナを用いたUWB MIMOアンテナ構成を図17に示す。アンテナは、厚さt=1.6mmの誘電体基板上に形成しており、軸対称にハーフ形状UWBモノポールアンテナを2素子構成している。アンテナ素子の各寸法はL=30mm、W=13mmとし、同一基板上に形成している。各々のハーフ形状UWBモノポールアンテナは、マイクロストリップ線路で給電し、UWBモノポールの中央下部からマイクロストリップ線路のグラウンド導体に対してショートスタブを付加している。誘電体基板の裏面には一部円形としたグラウンド導体とショートスタブ線路を形成し、スルーホールを介して表面のUWBモノポールと接続している。なお、アンテナの特性インピーダンスは50Ωである。従来のUWBモノポールアンテナと比較して、アンテナをハーフ形状とすることを実現したことで、素子間隔をより狭くアンテナを配置することが可能である。図18にUWB MIMOアンテナの素子間隔d₁を変化させたときの反射特性および素子間結合の計算結果を示す。素子間隔d₁は、10mm、15mm、20mm、25mmと5mm間隔で変化させた。計算結果より、アンテナ素子間隔が狭くなるにつれてアンテナ素子間の結合が大きくなることを確認できる。

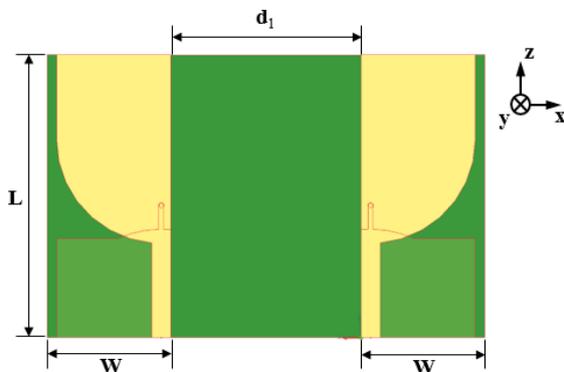


図17 UWB MIMO アンテナ構成

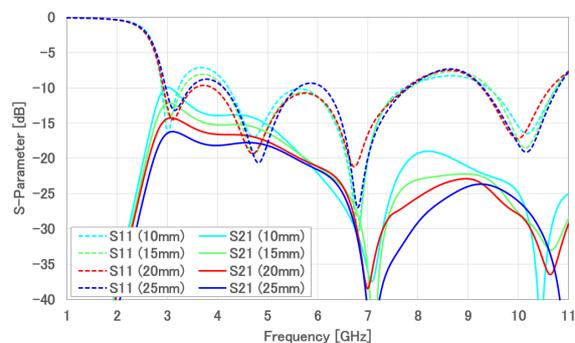


図18 反射特性および素子間結合 (d₁を変化させた場合)

特に低域におけるアンテナ素子間結合は-20dB以上となっている。UWBアンテナは周波数帯域が3.1~10.6GHzと広いため、MIMO構成とした場合、素子間隔を1λとすると、3.1GHzで96.7mm、10.6GHzで28.2mmとなり素子間隔に大きな差がある。例えば、ハーフ形状UWBモノポールアンテナの素子間隔を10.6GHzの1λとすると、3.1GHzでは0.3λとなり、低域における素子間結合が大きくなることが予想できる。ここでは10.6GHzにおける1λ程度(25mm)を素子間隔とした場合について、メタマテリアル構造をハーフ形状UWBモノポールアンテナの素子間に配置することで、低域における素子間結合を低減する構成を検討する。

3-2 メタマテリアルの単位セル構造

UWB MIMO アンテナの素子間結合を低減するためのメタマテリアル構造について検討した。メタマテリアル構造には、マッシュルーム構造を適用する。マッシュルーム構造の単位セルは方形金属セルおよび金属ビアにより構成されている。マッシュルーム構造は単位セルの各パラメータを変化させることで、キャパシタンスおよびインダクタンスを調整することができる。例えば、方形金属セルの寸法を大きくするとキャパシタンス成分は大きくなり、金属ビアの径を小さくするとインダクタンス成分は大きくなる。マッシュルーム構造がバンドギャップ特性を示す周波数はキャパシタンス成分およびインダクタンス成分によって変化する。図19に単位セルの計算モデルを示す。方形金属セルのサイズ W_p は単位セルサイズ W_1 に対して1mm小さくし、金属ビアの径は0.4mmである。本検討では、厚さ $t=1.6$ mmの誘電体基板を用いた。単位セルの側面には周期境界条件を設定し、x軸方向にPEC(完全磁気壁)、y軸方向にPMC(完全磁気壁)を設定する。図20にマッシュルーム構造の入力インピーダンスを示す。(a)は実数成分、(b)は虚数成分である。ここでは単位セルサイズを10mm、12mm、14mmと変化させたときの結果を示す。図21にマッシュルーム構造の分散関係の一例を示す。計算結果より、4~6GHz付近にバンドギャップが生じていることが確認できる。このマッシュルーム構造の各寸法パラメータを調整し、UWB MIMO アンテナの素子間結合を低減する。

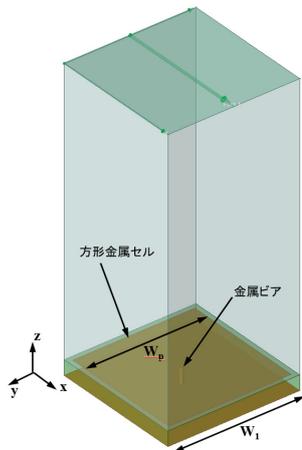
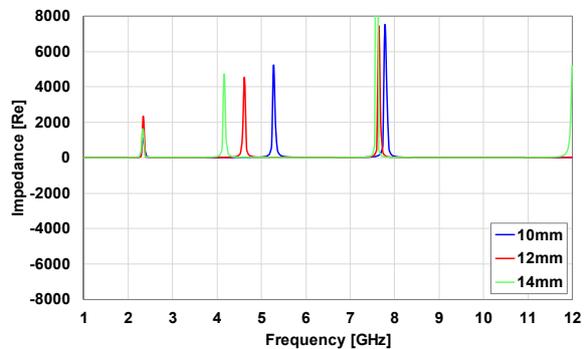


図19 計算モデル(単位セル構造)



(a) 実部

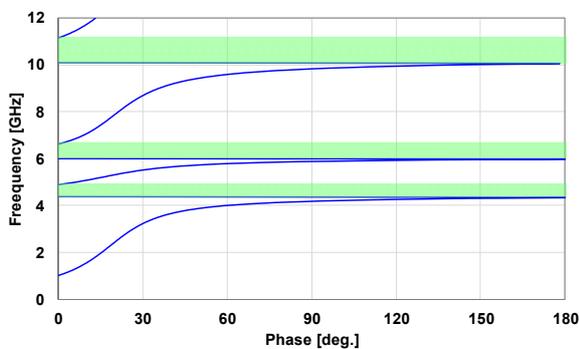
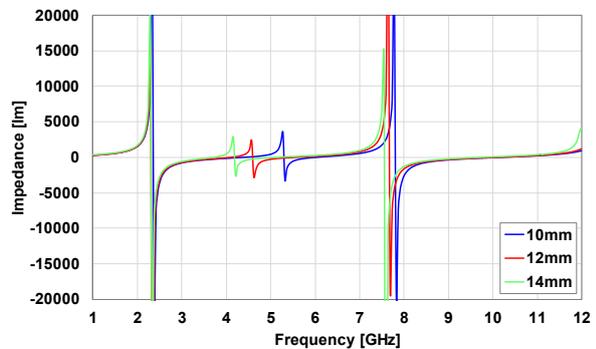


図21 マッシュルーム構造の分散関係の例

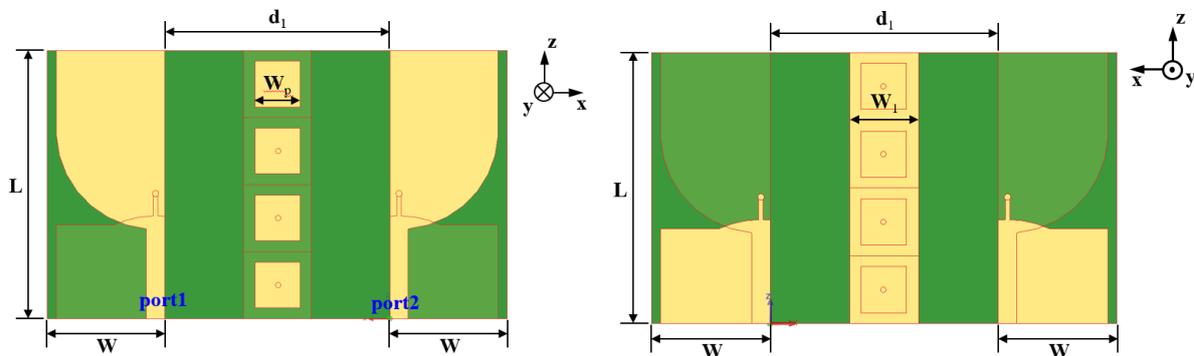


(b) 虚部

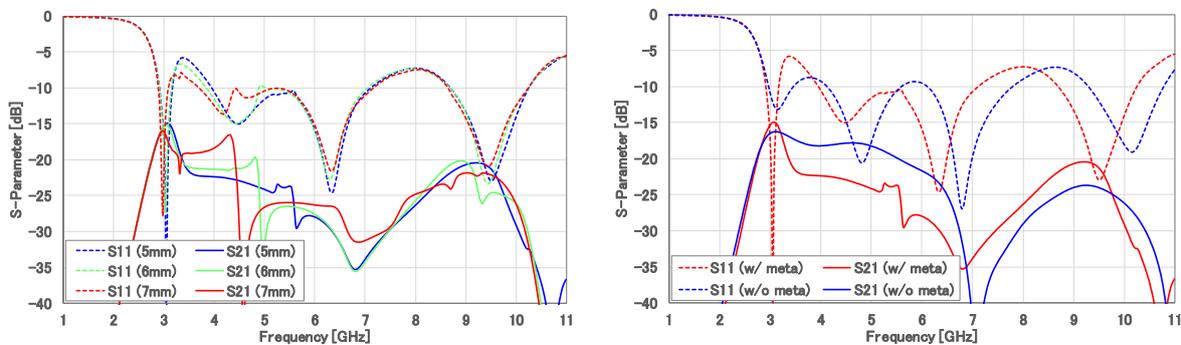
図20 マッシュルーム構造の入力インピーダンス

3-3 UWB MIMO アンテナの素子間結合の低減

ショートスタブを付加したハーフ形状 UWB モノポールアンテナを用いた UWB MIMO アンテナにおいて、素子間にメタマテリアル構造を付加することによる素子間結合の低減について検討した。図 22 にマッシュルーム

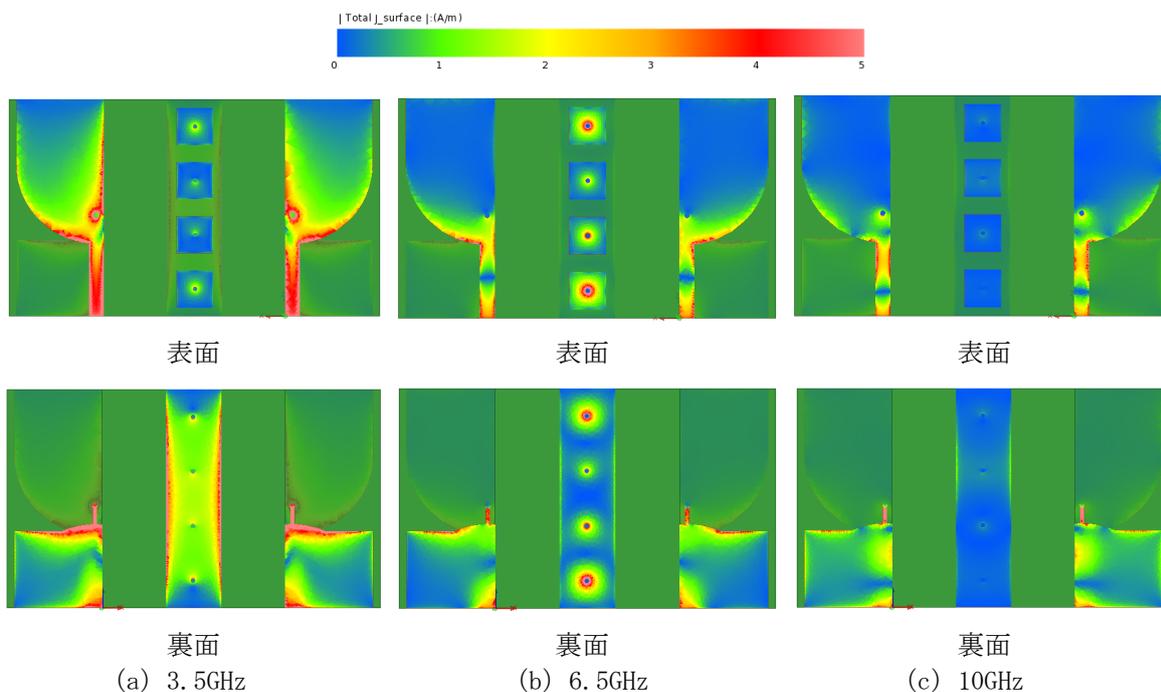


(a) 表面 (b) 裏面
 図 22 メタマテリアル構造を付加した UWB MIMO アンテナ (1 列の場合)



(a) W_p を変化させた場合 (b) メタマテリアル構造の有無の比較

図 23 インピーダンス特性 (1 列の場合)



表面 表面 表面
 裏面 裏面 裏面
 (a) 3.5GHz (b) 6.5GHz (c) 10GHz

図 24 電流分布 (1 列の場合)

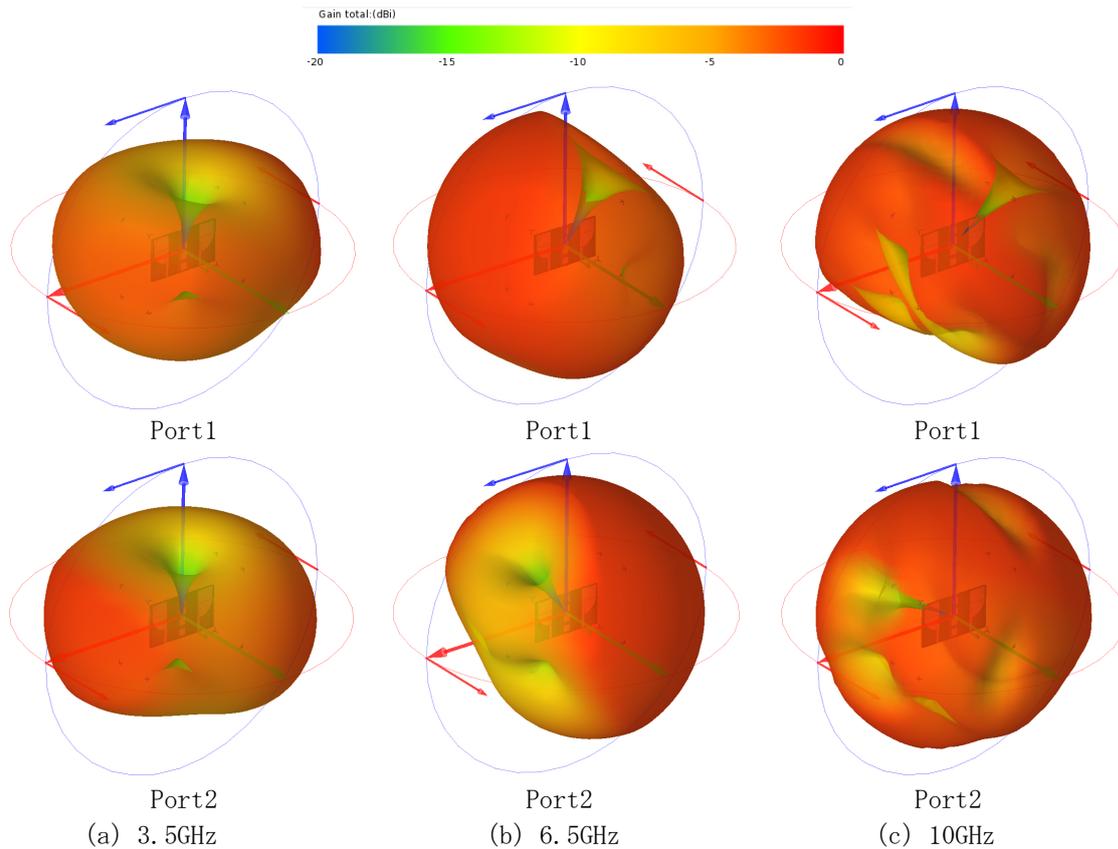
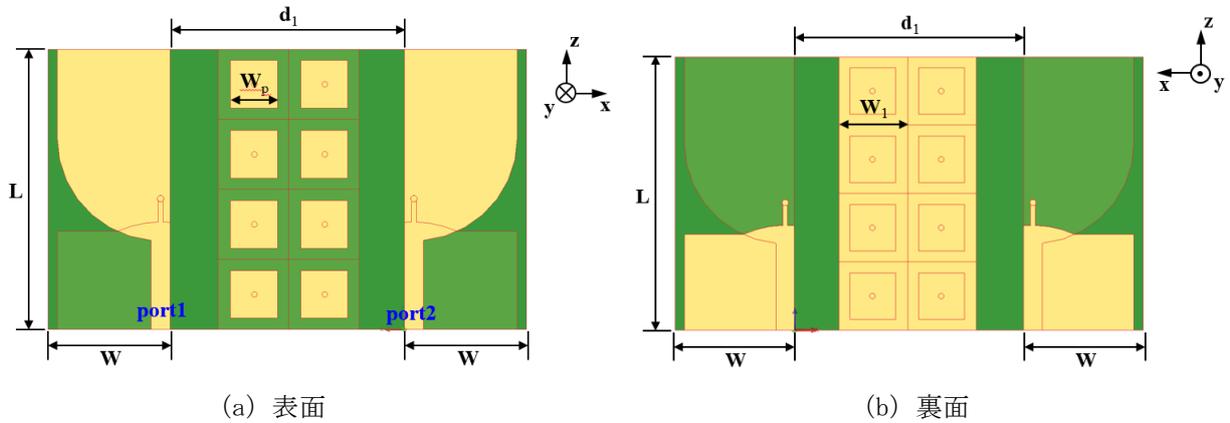


図 25 放射パターン (1 列の場合)

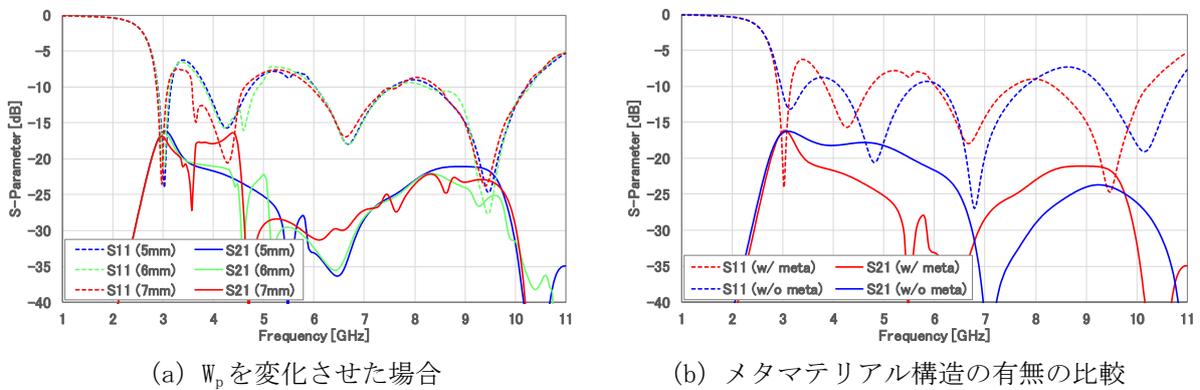
構造のメタ材料構造を付加した UWB MIMO アンテナの構成を示す。UWB MIMO アンテナは、厚さ $t=1.6\text{mm}$ の誘電体基板 ($\epsilon_r=4.4$, $\tan \delta=0.02$) 上に形成しており、軸対称にハーフ形状 UWB モノポールアンテナを素子間隔 $d_1=25\text{mm}$ として 2 素子構成している。アンテナ素子の各寸法は $L=30\text{mm}$, $W=13\text{mm}$ とし、アンテナ素子間にメタ材料構造を付加しており各々同一基板上に形成している。メタ材料構造にはマッシュルーム構造を 4 セル 1 列に並べたものを配置し、マッシュルーム構造の単位セルサイズ W_1 は 7.5mm とした。図 23 にアンテナの入力インピーダンス特性の計算結果を示す。S11 はアンテナの給電 Port1 における反射特性、S21 はアンテナの給電 Port1 と Port2 の間の通過特性を表している。(a) に示される通り、マッシュルーム構造の方形金属セルのサイズ W_p を変化させた場合、UWB MIMO アンテナの素子間結合の低減効果が得られている周波数帯域がシフトしている様子が確認できる。(b) にメタ材料構造の有無による特性の差異について比較した結果を示す。方形金属セルのサイズ W_p を 5mm とした場合について比較している。アンテナ素子間の通過特性の結果から、メタ材料構造を付加することで、付加しない場合と比較して $3\sim 6\text{GHz}$ 付近において 5dB 程度低減しており、周波数帯域全体の素子間結合は -20dB 以下の特性を実現していることが確認できる。メタ材料構造を付加することにより、アンテナ素子間結合の低減効果が得られることを確認した。 3GHz 付近の反射特性および通過特性が若干劣化しているが、この改善については今後の課題である。図 24 に UWB MIMO アンテナ導体上の電流分布計算結果を示す。計算周波数は、 3.5GHz , 6.5GHz , 10GHz である。 3.5GHz および 6.5GHz において、マッシュルーム構造の部分の電流分布が大きくなっていることが確認できる。また、ハーフ形状の UWB モノポールアンテナの検討結果と同様に、 3.5GHz においてショートスタブ上の電流分布が大きくなっていることが確認できる。これは、ショートスタブが低域の周波数帯において動作していると考えられる。図 25 にアンテナの各給電ポート (Port1, Port2) における放射パターン計算結果を示す。計算周波数は、 3.5GHz , 6.5GHz , 10GHz である。各周波数において、概ね全方向へ放射していることを確認した。

続いて、4セル2列のマッシュルーム構造のメタ材料構造を付加した UWB MIMO アンテナについて検討した。図 26 に UWB MIMO アンテナの構成を示す。アンテナ素子の各寸法は $L=30\text{mm}$, $W=13\text{mm}$ とし、厚さ $t=1.6\text{mm}$ の誘電体基板上に形成している。ハーフ形状 UWB モノポールアンテナを素子間隔 $d_1=25\text{mm}$ として軸対称に 2

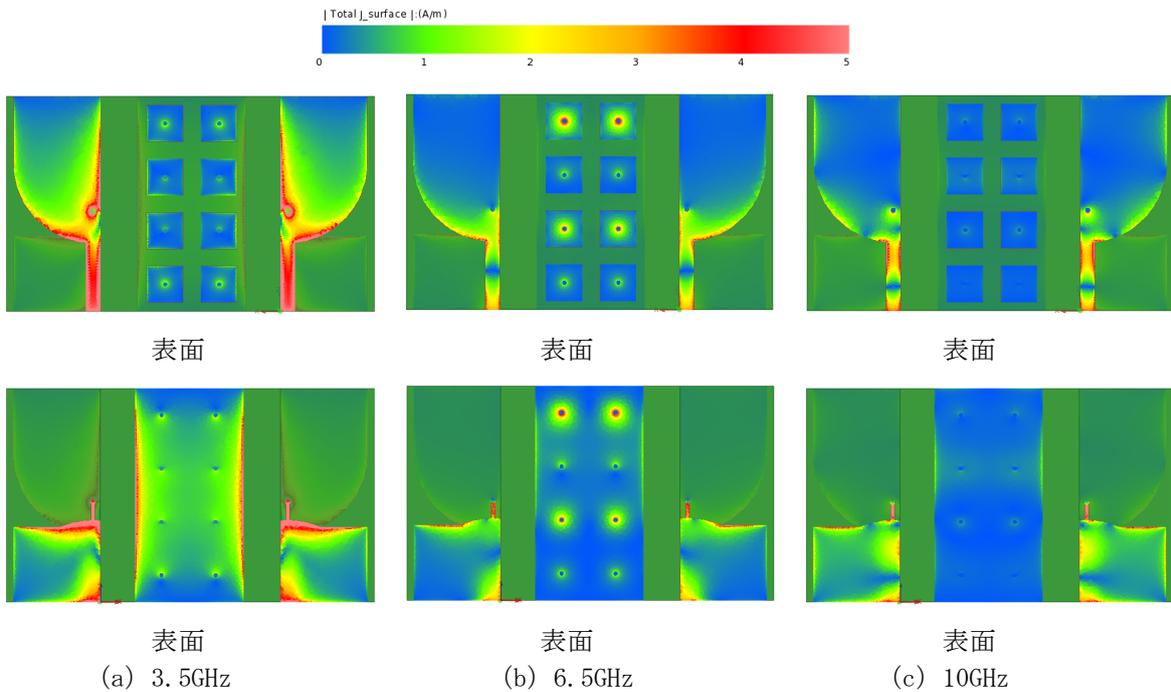
素子構成しており、アンテナ素子間にはメタマテリアル構造を付加して各々同一基板上に形成している。メタマテリアル構造にはマッシュルーム構造を4セル2列に並べたものを配置し、マッシュルーム構造の単位



(a) 表面 (b) 裏面
図 26 メタマテリアル構造を付加した UWB MIMO アンテナ (2 列の場合)



(a) W_p を変化させた場合 (b) メタマテリアル構造の有無の比較
図 27 インピーダンス特性 (2 列の場合)



(a) 3.5GHz (b) 6.5GHz (c) 10GHz
図 28 電流分布 (2 列の場合)

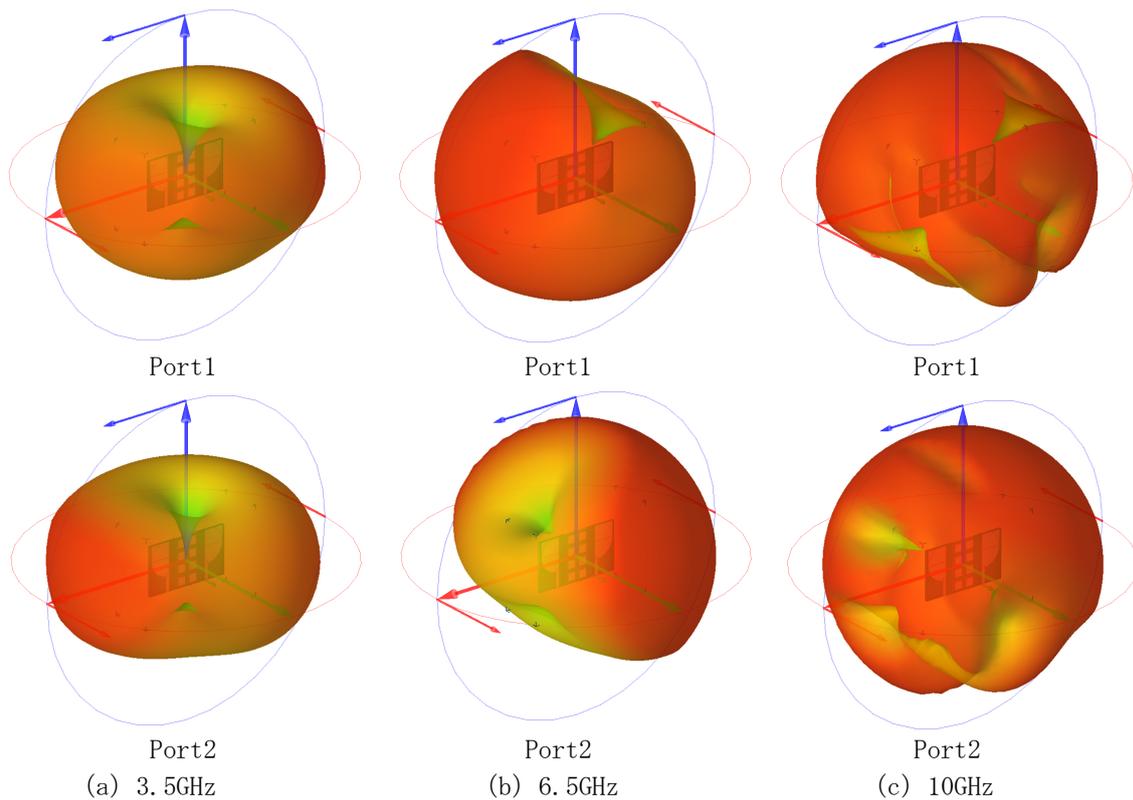


図 29 放射特性 (2 列の場合)

セルサイズ W_1 は 7.5mm とした。図 27 にアンテナの入力インピーダンス特性の計算結果を示す。S11 はアンテナの給電 Port1 における反射特性、S21 はアンテナの給電 Port1 と Port2 の間の通過特性を表している。(a) はマッシュルーム構造の方形金属セルのサイズ W_p を変化させた結果である。方形金属セルのサイズを変化させた場合、UWB MIMO アンテナの素子間結合の低減効果が得られている周波数帯域がシフトしている様子が確認できる。(b) にメタマテリアル構造の有無による比較を示す。方形金属セルのサイズ W_p を 5mm とした場合について比較している。メタマテリアル構造を付加することで付加しない場合と比較して 3~6GHz 付近において 3~8dB 程度低減しており、帯域全体の素子間結合は -20dB 以下の特性を実現していることが確認できる。メタマテリアル構造を付加することにより、アンテナ素子間結合の低減効果が得られることを確認した。3GHz 付近の反射特性および通過特性が若干劣化しているが、この改善については今後の課題である。図 28 に UWB MIMO アンテナ導体上の電流分布計算結果を示す。計算周波数は、3.5GHz、6.5GHz、10GHz である。3.5GHz および 6.5GHz において、マッシュルーム構造の部分の電流分布が大きくなっていることが確認できる。また、ハーフ形状の UWB モノポールアンテナの検討結果と同様に、3.5GHz においてショートスタブ上の電流分布が大きく、ショートスタブが低域の周波数帯において動作していることが確認できる。図 29 にアンテナの各給電ポート (Port1, Port2) における放射パターン計算結果を示す。計算周波数は、3.5GHz、6.5GHz、10GHz である。各周波数において、概ね全方向へ放射していることを確認した。

4 まとめ

本研究では、UWB と MIMO 技術を組み合わせることで伝送容量や測位精度の向上を図るために、あらゆるものへ実装する小型な UWB MIMO アンテナ構成を実現することを目的として、メタマテリアル構造を付加することにより素子間結合を低減するアンテナ構成を提案した。まず、小型な UWB MIMO アンテナ構成を実現するために、ショートスタブを付加した UWB モノポールアンテナの対称構造を利用して、アンテナを半分にカットしたハーフ形状の UWB モノポールアンテナを提案し、従来アンテナの概ね半分のサイズで従来と同等の広帯域な特性が得られることを明らかにした。アンテナサイズは、長さ $L=30\text{mm}$ 、幅 $W=13\text{mm}$ 、厚さ $t=1.6\text{mm}$ の大き

さを実現した。試作したアンテナの実測評価により、提案アンテナ構成の有効性を示した。また、提案アンテナにおける群遅延特性は共振周波数に該当する周波数で若干大きくなっているものの、遅延量は帯域全体で最大でも 0.2ns 程度となることを明らかにした。時間領域解析では、提案アンテナを対向させて配置した場合と横並びに配置した場合の送受信信号の相関係数は 0.986 となり、高い相関が得られることを明らかにした。UWB MIMO アンテナ構成では、メタマテリアル構造にマッシュルーム構造を適用し、メタマテリアル構造をハーフ形状 UWB モノポールアンテナの素子間に配置することで、低域における素子間結合が低減できることを明らかにした。マッシュルーム構造を 4 セル 1 列配置した場合は、3~6GHz 付近において素子結合が 5dB 程度低減し、4 セル 2 列配置した場合は、3~8dB 程度低減することを確認し、帯域全体の素子間結合は -20dB 以下の特性特性が得られることを明らかにした。

今後の課題としては、メタマテリアル構造を付加することにより、UWB の帯域における最下限周波数の 3GHz 付近の反射特性および通過特性が若干劣化するため、その改善が求められる。UWB アンテナを小型化した場合、MIMO 構成としたときにメタマテリアル構造を付加できる領域が小さくなるため、メタマテリアル構造の小型化が必要となる。さらに、検討した UWB MIMO アンテナの特性を使用した電波伝搬シミュレーションによる伝送容量の評価や、屋内の実環境において UWB MIMO アンテナを使用した伝送容量の評価、また、測位精度の評価やアンテナ素子数を増やした場合の効果検証などが今後の課題として挙げられる。

【参考文献】

- [1] FCC, "1st Report and Order on Ultra-Wideband Technology," Feb. 2002.
- [2] H. Xu and L. Yang, "Ultra-wideband technology: Yesterday, today, and tomorrow," IEEE Radio and Wireless Symp, pp.715-718, 2008.
- [3] M. Z. Win, D. Dardari, A. F. Molisch, W. Wiesbeck, and J. Zhang, "History and Applications of UWB," Proceedings of the IEEE, vol.97, no.2, Feb. 2009.
- [4] Nobuyasu Takemura, Syunta Ichikawa, "Broadbanding of Printed Bell-Shaped Monopole Antenna by using Short Stub for UWB Applications," Progress in Electromagnetics Research C, Vol. 78, pp.57-67, Sep. 2017.
- [5] C. Caloz and T.Itoh, "Application of the transmission line theory of left left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH line," IEEE AP AP-S/URSI International Symposium Symposium, Vol.2, pp.412 412-415, June 2002.
- [6] Nobuyasu Takemura, "Tunable Inverted-L Antenna with Split-Ring Resonator Structure for Mobile Phones," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.61, No.4, pp.1891-897, Apr. 2013.
- [7] I. Pele, A. Chousseaud and S. Toutain, "Simultaneous modeling of impedance and radiation pattern antenna for UWB pulse modulation," IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, vol.2, pp.1871-1874, Jun.2004.

〈発表資料〉

| 題 名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|--|-------------|
| 超広帯域システムにおける ショートスタブ構造付き小型アンテナの実測検討 | (社)電子情報通信学会, 2019 年総合大会 | 2019 年 3 月 |
| プリント基板実装 UWB モノポールアンテナの小型化と群遅延特性に関する検討 | (社)エレクトロニクス実装学会, 春季講演大会 | 2019 年 3 月 |
| A Study on Half-shaped Printed UWB Monopole Antenna with Short Stub | ISAP2019, International Symposium on Antenna and Propagation | 2019 年 10 月 |
| A Study on Half-shaped Printed Monopole Antenna with Short Stub for UWB System | IEICE Communications Express (ComEX) | 2020 年 6 月 |