

円偏波超広帯域無線(UWB)のためのアンテナ技術の構築

代表研究者 氏名 福迫 武 熊本大学 大学院先端科学研究部 教授

1 はじめに

超広帯域無線技術は、使用する電波の電力はノイズレベルと小さいものの、マイクロ波帯では数 GHz にわたる広帯域な周波数の電波を使用するため、極めて高速のデータ伝送が可能である。このような通信に対応すべく広帯域アンテナがいくつか知られているが、現状では直線偏波が主流であり、円偏波アンテナは見当たらない。そこで、UWB 通信を念頭に、数 GHz の広い帯域にわたる円偏波発生技術およびアンテナ技術が注目されている[1]-[9]。

円偏波性質として、まず、送受信アンテナ間において電界の振動方向に関するアンテナのアライメント角に気を配らなくてよいことがある。また、入射角がブリュースター角以内である限り、反射前後で旋回方向が反転するために、反射波が交差偏波に近いことが挙げられる。以上の性質は、応用の可能性を広げてくれるが、マルチパスフェージングを減少できる。広帯域にわたって円偏波を発生できるアンテナにスパイラルアンテナがあるが、素子上の進行波を利用しているが、分散性が問題となる。信号処理での対応も可能であるが、高速な通信では難しい。よって、本研究では、進行波とは異なる仕組みによる広帯域な円偏波アンテナの開発を行い、CP-UWB[10]の可能性について検討する。UWB は 5GHz を避けて 7.25-10.25 GHz の UWB ハイバンドと 3.4GHz-4.8GHz のローバンドに分けられるが、まずはハイバンドのカバーをめざし、その後フルバンドカバーを目指す。

2 導波管形広帯域円偏波の開発

2.1 導波管形状の工夫

図 1 に L 型プローブを用いた円形導波管型円偏波アンテナを示す。著者らのこれまで提案してきた構造がもとなるが[11]-[15]、今回は、直径 1.0mm のプローブを給電部から $-y$ 方向 19mm のところで L 形に 90° に曲げ、 $-z$ 方向に 10.5mm の長さで設計している。このような給電方式は[16]-[18]でも検討されているが、導波管についての例はない。給電部では導波管に長さ 5.5mm、直径 7mm の空気層を設けている。この空気層の中心にプローブを通し、誘導性の同軸構造をとっている。空気層の直径が小さくなるほど入力インピーダンスが容量性になり、この手法を用いて整合をとり、S11 特性を最適化している。日本における UWB (Ultra Wide Band) 通信規格の High-Band (7.25GHz-10.25GHz) での放射を実現するため、主要モード (TE₁₁ モード) の遮断周波数が 6.51GHz となるように、導波管半径を 13.5mm としている。TE₁₁ モードの減衰量が多いため、実際には 7GHz 付近からの放射となる。7.25GHz と 10.25GHz の中間にあたる 8.7GHz を中心周波数として設計し、導波管の全体長は中心周波数における管内波長である 52mm となっている。また、プローブの折り曲げ位置と短絡壁の中心との間は、反射を考慮し、管内波長の四分の一である 13mm となっている。

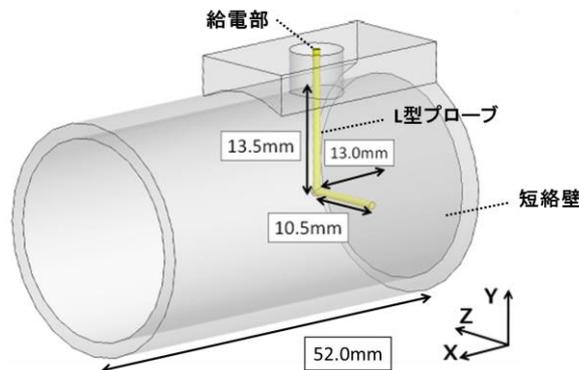


図 1 L 型プローブを用いた円形導波管形円偏波アンテナ

図 2 は、図 1 のモデルの短絡壁に金属リングを設けたモデルを示している。短絡壁部にリングを設けることで、リング部での導波管直径は小さくなっている、これにより高次モードの遮断周波数が高周波ヘシフト

し、高次モードの発生を抑制することができる。なお、導波管長や直径などのリング以外のパラメータは同一である。

図3は、リングを設置する前(No ring)と後(With ring)の軸比特性の比較のグラフを示している。図に示されているように、高次モード(TM01モード)の遮断周波数は8.51GHzである。軸比特性を比べてみると、高次モードの遮断周波数以降で、軸比が改善されていることが確認できる。これは上で述べたように、リングによって高次モードの影響が軽減されているためである。

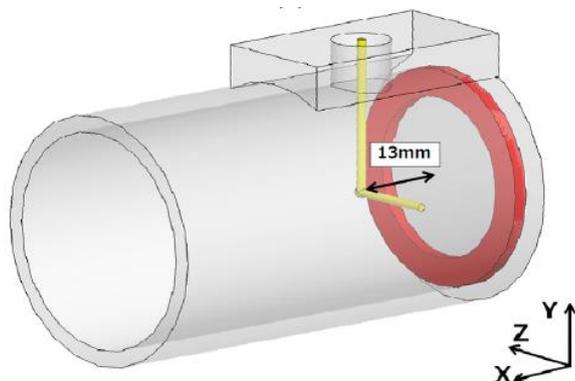


図2 リングを設置したアンテナ

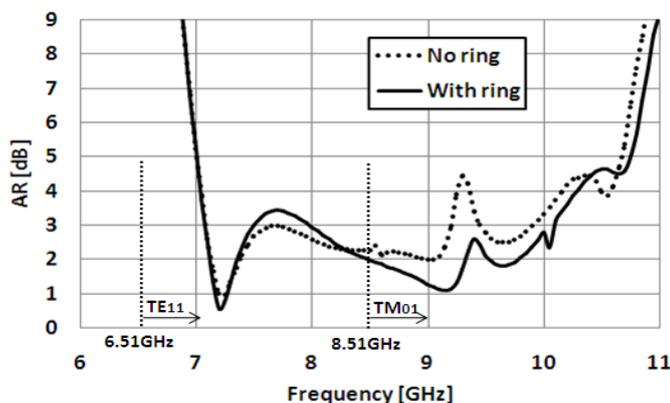


図3 リングの効果

図4は、短絡壁を放物面に変更したモデルを示している。放物面にすることで、プローブの折り曲げ点から短絡壁までの距離が、どの角度でもほぼ等しくなる。そのため、良好な反射波が得られ交差偏波の低減につながる。そこでまずは、図4に示す a を最適化する。

図5は、 a を変更した際の軸比特性を示している。 a を大きくすることで給電構造が改善され S11 特性が改善されるほか、より良好な反射波を実現できる。 a は、軸比が平均的に低い値を示すよう 5.7mm で最適化した。

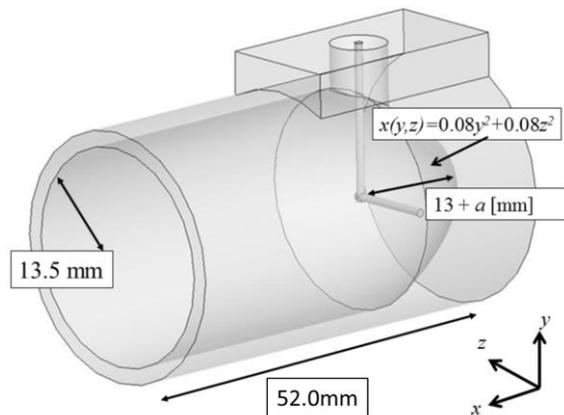


図4 放物面短絡壁

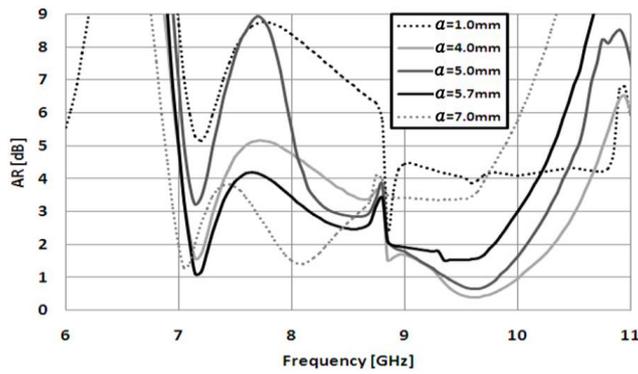


図5 a の最適化(軸比特性)

図6は、図4.1.2に示したリングを設置したアンテナ(With ring)と図4.1.4に示した短絡壁を放物面に変更し a の最適化を行ったアンテナ(With parabolic short wall)の軸比特性を示している。両者を比較すると、わずかにリングを設置したアンテナの方が良い特性を示していることが分かる。しかし、これは放射方向(x軸方向)だけの特性に過ぎない。従って、放射の正面方向以外(オフボアサイト)での円偏波特性を確認する必要がある。

図7は、高次モードが発生する周波数である9.5GHzでの放射パターンを示している。本研究では、右旋円偏波(RHCP)を主偏波、左旋円偏波(LHCP)を交差偏波としている。また、主偏波と交差偏波のゲイン差が15dB以上あるとき軸比が3dBを下回り、円偏波を放射できていることが示される。つまり、交差偏波(LHCP)が低いほど良好な円偏波特性を示す。

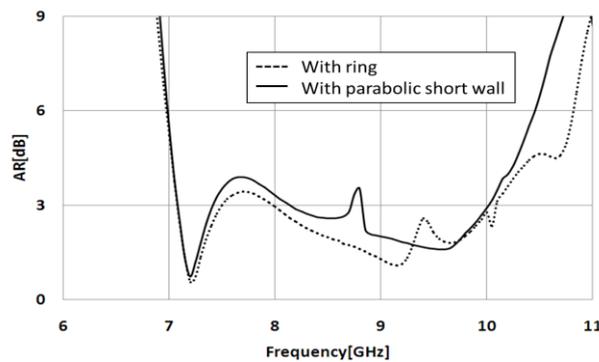


図6 軸比特性の比較

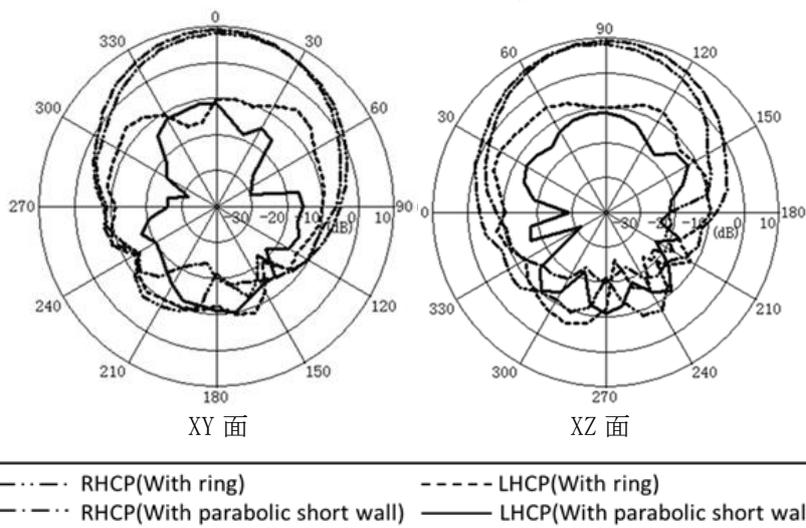


図7 放射パターンの比較(9.5GHz)

放射パターンを比較すると、ボアサイト(上図の上方向)では、どちらも交差偏波の大きさはあまり変わらない。しかしオフボアサイトでは、放物面短絡壁構造の方が、交差偏波が低減されていることが分かる。特にXY面では、大きい所で20dB程度交差偏波が低減されている。これは上でも述べた通り、放物面短絡壁により良好な反射波が得られたためであると考えられる。

交差偏波の低減は確認できたが、ボアサイトでの軸比帯域は狭いため、このオフボアサイトでの交差偏波の低減を維持したまま、軸比帯域を広帯域化させる手法を提案する必要がある。

導波管中央の傾斜について検討を行った。この傾斜は、高次モードによって劣化する導波管中央部での電界ベクトルの向きを改善することができる。これにより、さらなる交差偏波の低減が期待できる。

図8は傾斜を設けたアンテナ構造を示している。傾斜の角度については先行究において 10° で最適化されているため、今回はその 10° の傾斜の位置を図に示すSを変更することで最適化を図った。図9はSを5mm, 6mm, 7mmとしたときの軸比特性を示している。傾斜を設けることで、高次モードが発生する8.51GHz以降で、軸比が改善され1dBを下回っている。しかし、傾斜の位置を変更しても軸比特性にあまり変化は見られなかった。Sは、できるだけ高周波帯まで軸比がカバーできるように、5mmで最適化した。

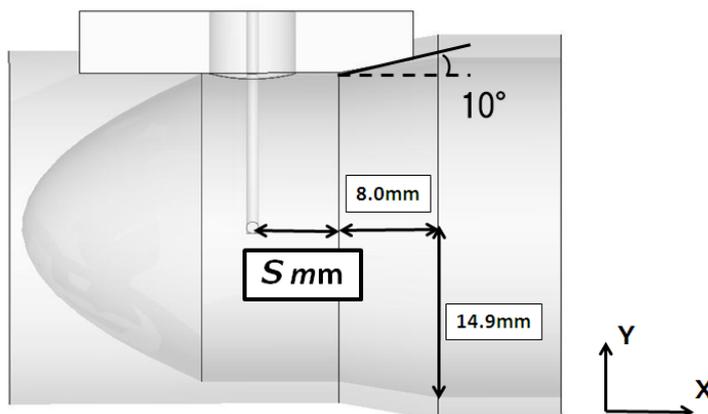


図8 傾斜の検討

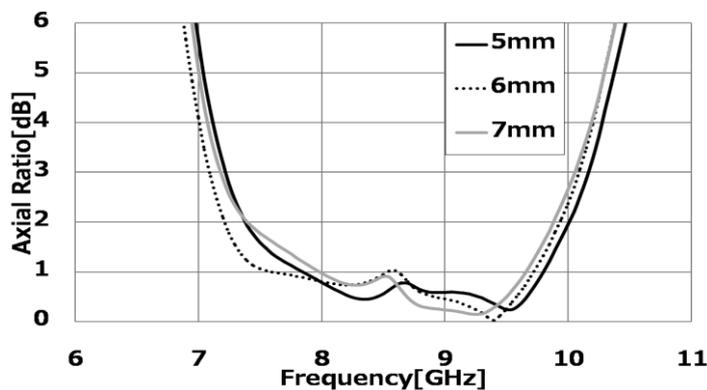


図9 軸比特性

続いて図10に示すように、傾斜を設けたまま導波管開口直径Dの最適化を行った。図11にDを変更した際の軸比特性を示す。図より、Dが28.0mm以下になると、低周波帯で軸比が大きく改善し、特に7.5GHzでは軸比がほぼ0dBとなっていることが確認できる。また、傾斜による高周波帯での軸比の改善効果も損なわれていない。

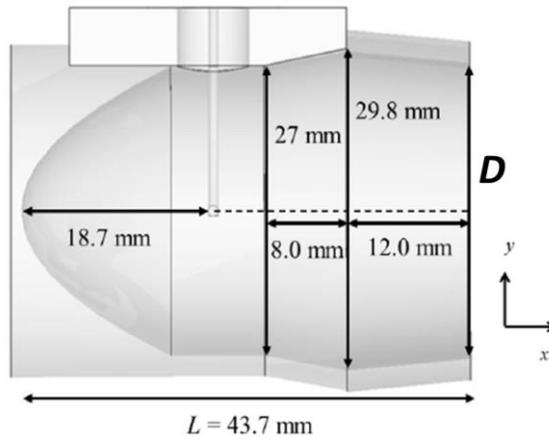


図 10 開口径の最適化

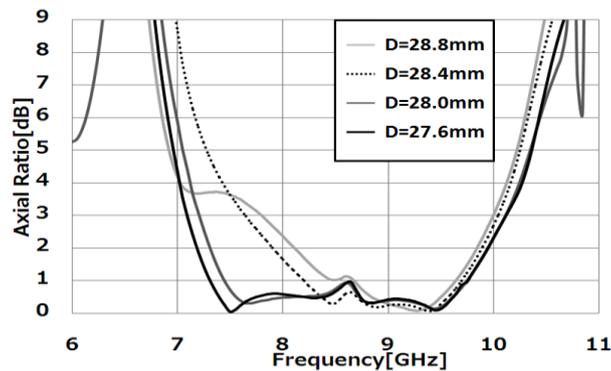


図 11 軸比特性

図 12 は、 $D=29.8\text{mm}$, 27.6mm のときの、 7.5GHz での開口部での電界分布を示している。

$D=29.8\text{mm}$ のとき、位相 $\omega t=0^\circ$ では、電界が開口の中心部に集中している。しかし位相が 90° 進むと ($\omega t=90^\circ$)、開口面中心での電界強度は半分程度まで小さくなっている。一方 $D=27.6\text{mm}$ のとき、位相が変化しても、開口面中心での電界強度はほぼ一定に保たれていることが分かる。開口径を小さくすることで、開口部での電界強度が強められたものと考えられる。

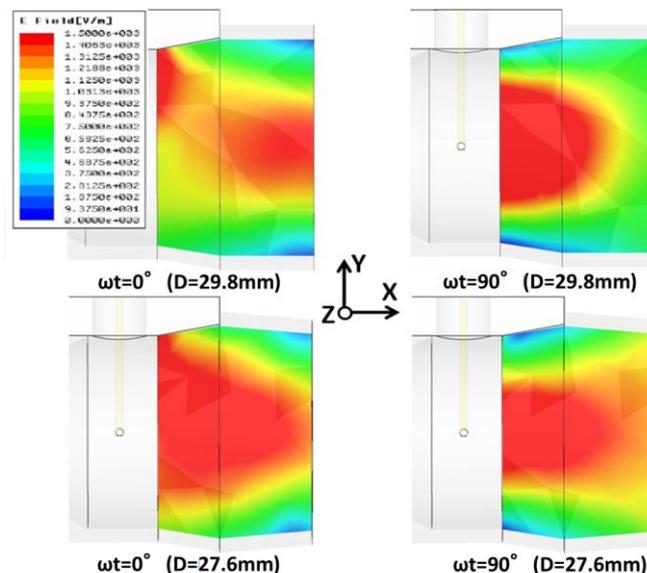


図 12 開口部の電界分布 (7.5GHz)

図 13 は、 $D=29.8\text{mm}$, 27.6mm のときの、 7.5GHz での開口面上での電界分布を示している。

開口面中心部での電界ベクトルは、 D の値に限らず、位相の変化と共に円形に回転している。しかし $D=29.8\text{mm}$ のとき、位相の変化と共に電界強度が変化してしまう。そのため、軸比は大きい値になってしまう。一方 $D=27.6\text{mm}$ のとき、電界強度は開口面中心付近でほぼ一定なため、非常に低い軸比が得られている。従って、開口径を最適化することにより、 7.5GHz において軸比を大きく改善することができた。

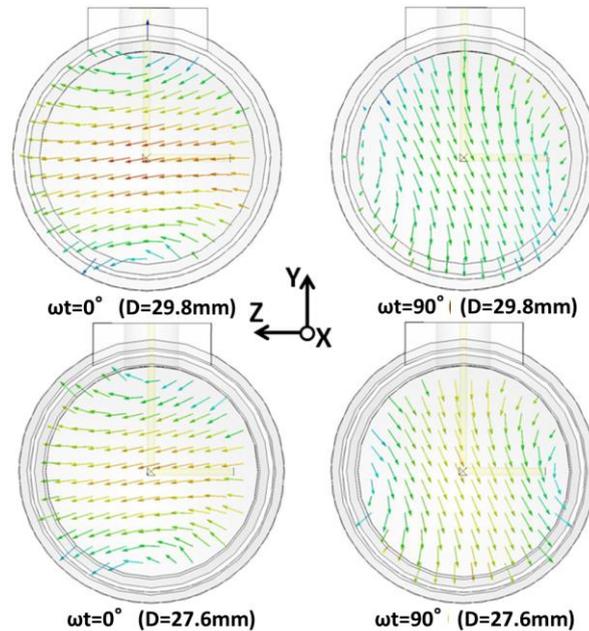


図 13 開口面上の電界分布 (7.5GHz)

2.2 提案構造の動作特性

図 14 に提案アンテナの構造を示している。

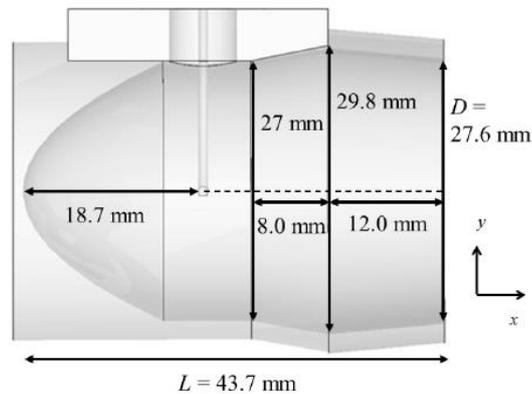


図 14 提案アンテナ

図 15 に、提案アンテナ (proposed) 及び先行研究アンテナ (previous) の S_{11} 特性を示す。先行研究アンテナは比帯域 46.5% ($6.6\sim 10.6\text{GHz}$)、提案アンテナは比帯域 39.5% ($6.85\sim 10.35\text{GHz}$) である。従って、高周波帯において提案アンテナの帯域が若干劣化していることが確認できる。

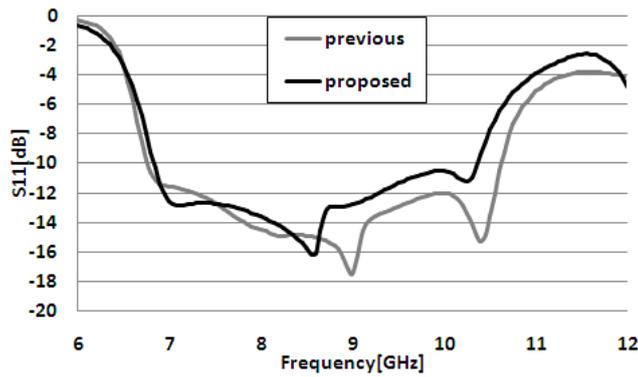


図 15 S11 特性

図 16 に軸比特性を示す．先行研究アンテナは比帯域 41.8 % (7.0～10.7 GHz)，提案アンテナは比帯域 34.9% (7.1～10.1GHz) である．S11 特性と同様，帯域は若干劣化しているが，どちらも高帯域にわたって軸比が 3dB を下回っている．また，提案アンテナの軸比は 7.35～9.75GHz の間では 1dB を下回っており，非常に良質な円偏波が放射されている．この結果から，ボアサイトでは交差偏波が大幅に低減されていることが確認できる．

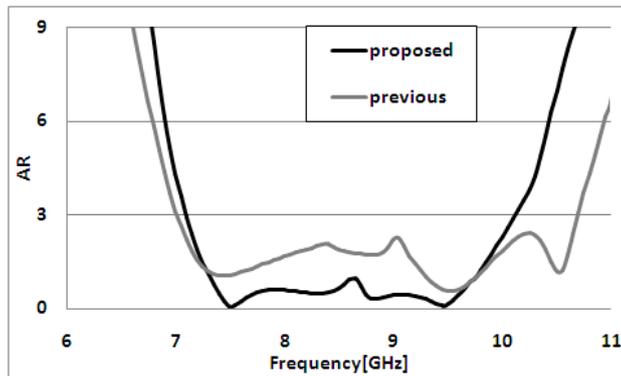


図 16 軸比特性

ボアサイトでの交差偏波低減は確認できたが，オフボアサイトでの交差偏波がどの程度低減され，それによって放射範囲がどの程度拡大したのかが重要である．そこで，図 16 及び表 4.4.1 に放射範囲の比較図を示す．

8GHz では，XY 面・XZ 面どちらにおいても，交差偏波が 10dB ほど低減できている．主偏波と交差偏波の利得差が 15dB 以上となると軸比が 3dB を下回るため，交差偏波の低減に伴い，放射角度も大幅に拡大されている．

9GHz においては，先行研究アンテナは XY 面・XZ 面どちらにおいても放射角度が狭くなってしまっている．一方，提案アンテナはどちらの面においても，広角に円偏波を放射できている．

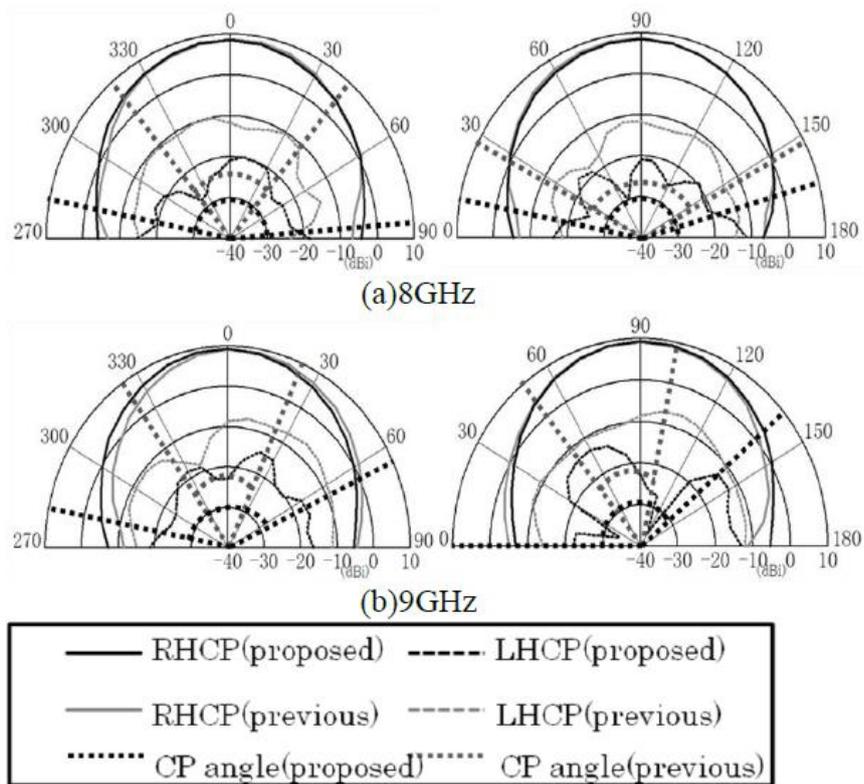


図 16 放射範囲の比較

表 1 放射範囲の比較

Freq. [GHz]	Antenna	xy-plane		zx-plane	
		Angle [deg.]	Range [deg.]	Angle [deg.]	Range [deg.]
7.25	Proposed	-54 - +46	100	+17 - +157	140
	Previous	-61 - +66	127	+49 - +146	97
8.00	Proposed	-82 - +87	169	+9 - +164	155
	Previous	-39 - +40	79	+32 - +150	118
9.00	Proposed	-82 - +64	146	0 - +142	142
	Previous	-37 - +25	62	+51 - +103	52
9.75	Proposed	-24 - +80	104	+25 - 150	125
	Previous	-26 - +61	87	+60 - +140	80

図 17 に、作製した提案アンテナを示す。導波管部はジュラルミン、L型プローブは銅をもちいて作製を行った。



図 17 作製アンテナ

図 18 にシミュレーション(Simulation)と測定(Measurement)の S11 特性比較を示す。シミュレーションに比べ、測定結果は若干高周波側へシフトしているが、実測でも広帯域に整合がとれている。

図 19 に軸比特性の比較を示す。シミュレーションに比べ若干狭帯域になったものの、類似した特性も示すことができおり、7.5GHz から 9.5GHz 付近では 1dB 程度の非常に小さな値を示している。

図 20 に 8GHz における放射パターンの比較を示す。シミュレーション同様、実測においても交差偏波が -20dB 程度まで広角にわたって抑制されており、提案手法の有効性が示された。また、図 21 に 9GHz における放射パターンの比較を示す。XZ 面においてはシミュレーションと同様、交差偏波の抑制を確認することができた。一方 XY 面においては、オフボアサイトで交差偏波が若干大きくなっている。これは、SMA コネクタと導波管間のギャップや測定環境による誤差が原因であると考えられる。

図 22 に測定した群遅延特性を示す。群遅延は広帯域に亘ってほぼ一定の値を示した。

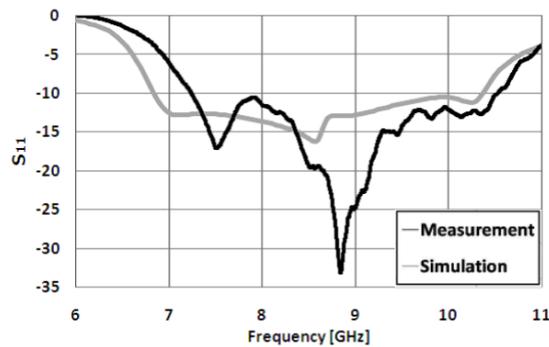


図 18 S11 特性

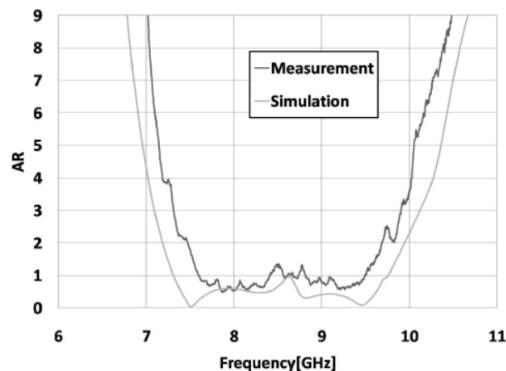
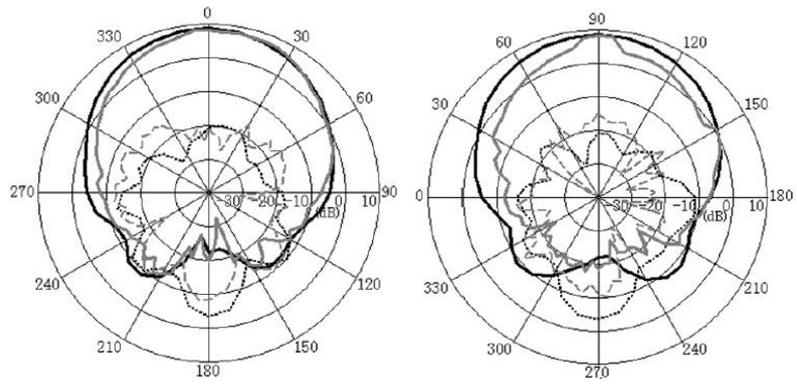


図 19 軸比特性



XY 面

XZ 面

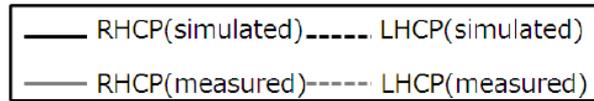
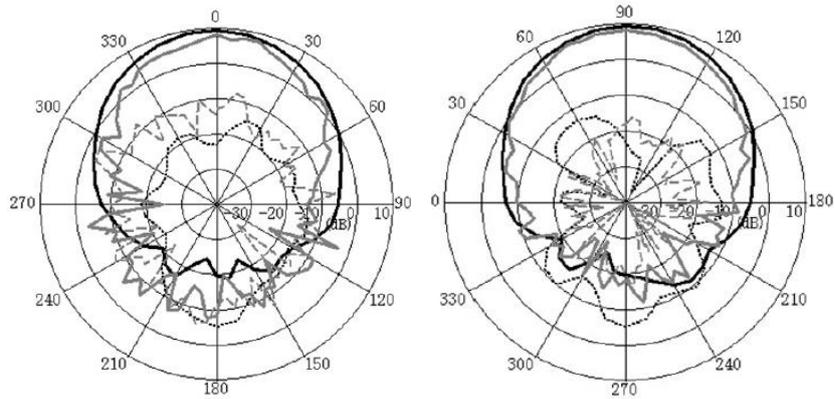


図 20 放射パターン(8GHz)



XY 面

XZ 面

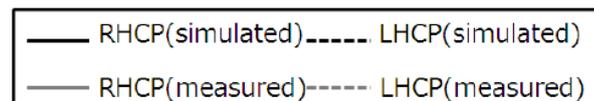


図 21 放射パターン(9GHz)

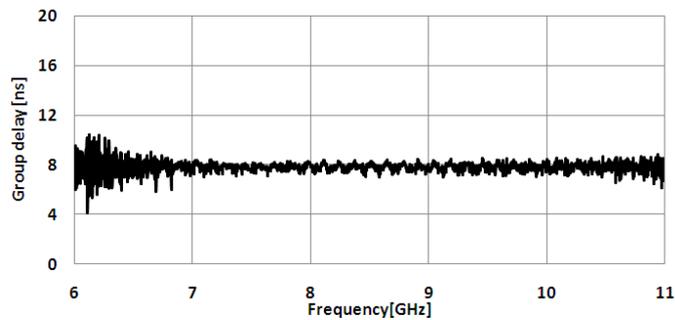


図 22 群遅延

3. 結論

本研究においては、UWB ハイバンドをほぼカバーできる円偏波アンテナを開発した。広い角度にわたって円偏波の送受信が可能であり、かつ群遅延も一定になり分散性を広帯域にわたって抑えることができた。今後は、UWB フルバンド(3.1-10.6 GHz)を円偏波でカバーできるアンテナの開発が必要であるが、現在広帯域なポラライザを開発中であり、本アンテナとの組み合わせにより実現できる可能性がある。

【参考文献】

- [1] J. T. Bangert, R. S. Engelbrecht, E. T. Harkless, R. V. Sperry and E. J. Walsh, "The Spacecraft Antennas", TheBell Sys. Tech. J. Pub., vol. 42, 4, pp.869-897, July 1963.
- [2] J. L. Wong and H. E. King, "A cavity-backed dipole antenna with wide-bandwidth characteristics", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 21, 5, pp. 725-727, Sept. 1973.
- [3] S. Sievenpiper H. P. Hsu and R. M. Riley, "Low-profile cavity-backed crossed-slot antenna with a single-probe feed designed for 2.34-GHz satellite radio applications", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 52, 3, pp. 873-879, March 2004.
- [4] N. S. Seong and S. O. Park, "A Microstrip-fed cavity backed circularly polarized horn antenna", Microwave and Opt. Tech. Lett., vol.48, 12, pp.2454-2456, Dec.2006.
- [5] K. F. Hung, and Y. C. Lin, "Novel Broadband Circularly Polarized Cavity-Backed Aperture Antenna With Traveling Wave Excitation," IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 58, no. 1, pp. 35-42, Jan. 2010.
- [6] J.W. Baik, T. H. Lee, S. M. Pyo, S. M. Han, J. C. Feong, and Y. S. Kim, "Broadband Circularly Polarized Crossed Dipole With Parasitic Loop Resonators and Its Arrays" IEEE Trans. Antennas Propag., vol.59, No.1, pp. 80-88, January.2011
- [7] S. Fu, S. Frang, Z. Wang, and X. Li, "Broadband Circularly Polarized Slot Antenna Array Fed by Asymmetric CPW for L-band Applications" IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol.8 pp. 1014-1016, 2009.
- [8] N. Yoneda, M. Miyazaki, H. Matsumura and M. Yamato, "A Design of Novel Grooved CircularWaveguide Polarizers", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.48, 12, pp. 2446-2452, Dec. 2000.
- [9] G. Bertin, B. Piovano, L. Accatio and M. Mongiard, "Full-wave Design and Optimization of Circular Waveguide Po-larizers with Elliptical Irises", IEEE Trans. MicrowaveTheory Tech., vol. 50, 4, pp.1077-1083, Apr. 2002.
- [10] A. E. Tan, M. Y. Chia, K. Rambabu, "Time Domain Characterization of Circularly Polarized Ultrawideband Array", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, 11, pp. 3524-3531, Nov. 2010.
- [11] T. Fukusako, K. Okuhata, K. Yanagawa, and N. Mita, "Generation of circular polarization using rectangular waveguide with L-type probe" IEICE Trans, Communication, vol. E86-B, No.7, pp. 2246-2249, Jul 2003.
- [12] T. Fukusako, N. Noguchi and S. Yamaura, "Bandwidth enhancement of circular polarization generated from circularwaveguide and L-shaped probe" 2013 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Application and Student Innovation Competition (iWEM2013), pp. 5-8, Hong Kong SAR, China, Aug 2013.
- [13] S. Yamaura and T. Fukusako, "Circularly Polarized Broadband Antenna Using Waveguide and an L-shaped Feed Probe", 2012 IEEE Int'l. Symp. on Antennas Propag. and USNC/URSI National Radio Science Meeting, 460.7 with 4-page electric paper, Chicago, USA, July 2012.
- [14] S. Yamaura and T. Fukusako, "Reduction of Cross Polarization in Higher Frequency for Circularly Polarized Broadband Antenna With L-Shaped Probe and Parabolic Short Wall" IEICE Communication Express, 2013
- [15] T. Fukusako and L. Shafai, "Circularly polarized broadband antenna with L-shaped probe and wide slot", Proc. 12th Int'l. Symp. on Antenna Tech. and Applied Electrogagnetics (ANTEM) and Canadian Radio Sciences [URSI/CNC], pp.445-448, Montreal, Canada, July 2006.
- [16] S. L. S. Yang, A. A. Kishk, K. F. Lee, "Wideband Circularly Polarized Antenna With L-Shaped Slot", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, 6, pp.1780-1783, June 2008.

- [17] J. S. Row and S. W. Wu, "Circularly-Polarized Wide Slot Antenna Loaded With a Parasitic Patch", IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 56, 9, pp. 2826- 2832, Sep. 2008
- [18] L. Y. Tseng and T. Y. Han, "Microstrip-fed circular slot antenna for circular polarization", Microwave and Opt. Tech. Lett., vol. 50, 4, pp.1056-1058, 2008.

発表資料

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Reduction of Cross Polarization for Circularly Polarized Broadband Waveguide Antenna	2015 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Application and Student Innovation Competition (iWEM2015)	2015年11月
(invited) A review of Recent Circularly Polarized Antenna Designs Supported by Electromagnetic Simulation	2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics,	2016年2月
A Broadband Circularly Polarized Waveguide Antenna Design for Low Cross-polarization	IEICE Transactions on Communications	採録決定