

メタマテリアルを使ったスリーブアンテナ

代表研究者

福嶋 崇嗣

防衛大学校理工学研究科後期課程

1 はじめに

近年、電子部品の集積化によって無線機器の回路が小型化されている。アンテナも様々な小型化方法が提案されており、スマートフォンや業務用の小型無線端末などの携帯無線機に应用されている。それらの多くは地板が必要であり、携帯無線機の基板やきょう体などの周囲部品を地板として利用している。しかし、近年の小型な携帯無線機の部品では地板として十分な大きさが得られず、そこに流れる電流がアンテナ特性に影響を与える。そのため、地板として利用する部品もアンテナの一部として設計する必要があり、設計を複雑にしている。また、今後の更なる電子部品の小型化により、地板がより小さくなり、十分なアンテナ特性が得られない恐れがある。

地板を必要としない水平面無指向性のアンテナとしてはダイポールアンテナが代表的であるが、給電する伝送線路が不平衡な場合はバランが必要である[1]。バラン不要な実用的なアンテナとしてはスリーブアンテナがある[2-4]。スリーブアンテナは同軸ケーブルの内部導体を $1/4$ 波長剥き出しにしてモノポールを構成し、外部導体に $1/4$ 波長の円筒状のチョークを取り付けた非常にシンプルな構造であり、その放射パターンはダイポールアンテナと同じ水平面無指向性である。チョークは内部導体と合わせて放射素子として働くだけでなく、漏れ電流を抑制するバランとしても働く。チョークによりアンテナと同軸ケーブルの外部導体（グラウンド）は動作周波数でアイソレーションされているため、グラウンドが繋がるきょう体や基板の影響が少ない。このようにスリーブアンテナは省スペースかつ簡単な構造で水平面無指向性の放射が得られるため、測定用や無線 LAN 用、防災無線用など様々な用途、周波数で広く使われている。しかし、内部導体とチョークを合わせたアンテナ全体の長さは $1/2$ 波長であるため、低い周波数ではアンテナが大型化してしまう問題がある。また、チョークは共振周波数付近でしか漏れ電流を抑制できないため帯域が狭い。

スリーブアンテナの小型化、広帯域化のためにいくつかの方法が提案されている。小型化としては、モノポールをメアングやヘリカル状に曲げる方法、チョークにステップドインピーダンスを利用する方法などが提案されている[5-8]。広帯域化としては寄生素子を取り付ける方法、チョークに装荷した可変容量素子を調整する方法などが提案されている[8-11]。

近年メタマテリアルがアンテナの分野で注目されており、様々な用途で应用されている[12-20]。メタマテリアルは金属や誘電体などの材料片を波長よりも十分小さい間隔で並べた構造体である。メタマテリアルを伝送線路として考えた右手/左手系複合伝送線路(CRLH TL)が提案されている[12]。CRLH TL は直列のインダクタとキャパシタ、並列のインダクタとキャパシタの等価回路で表され、それら回路定数を適当に与えることにより設計することができる。CRLH TL を伝搬する波の位相速度と群速度の符号が異なる周波数帯域は左手系帯域と呼ばれ、自由空間よりも波長を著しく短く設計することができる。この波長短縮を利用した小型なアンテナが提案されている[21-26]。また、CRLH TL の伝搬定数が実数となる周波数帯域は電磁バンドギャップ(EBG)と呼ばれる[27]。EBG では電磁界の振幅が指数関数的に減衰する。また EBG の帯域は CRLH TL の等価回路の定数を適切に与えることにより広帯域に設計することができる。従って、EBG は広帯域なフィルタやアンテナ間の相互結合抑制に利用されている[28-31]。

本研究では CRLH TL を利用したスリーブアンテナの小型化と広帯域化についてそれぞれ提案する。第 2 章では CRLH TL の波長短縮を利用した小型スリーブアンテナを提案する。小型スリーブアンテナの動作原理を説明し、試作および測定し、シミュレーションの妥当性を示す。第 3 章では CRLH TL の EBG を利用して漏れ電流を抑制するチョークを提案する。共振を利用した従来の $1/4$ 波長チョークとは異なり、EBG の帯域を利用した非共振型のチョークであるため、広帯域に設計することができる。最後に第 5 章で本研究をまとめる。

2 小型スリーブアンテナ

2-1 構造と動作原理

小型スリーブアンテナの動作原理を図1に示す。小型スリーブアンテナは小型放射素子と小型チョークにより構成され、中央から同軸線路により給電される。小型放射素子と小型チョークはそれぞれCRLH TLの単位セルを5つ配置して構成しており、それぞれ上端または下端が開放である。各単位セルの位相変化量が18度するとき、給電部から開放端の間に1/4波長の共振が生じる。小型放射素子と小型チョークを構成するそれぞれのCRLH TLの単位セルは、位相変化量が18度とき近い周波数となるように設計することで、スリーブアンテナとして動作する。また、小型化のために左手系帯域の自由空間よりも波長が短い周波数を利用する。

小型スリーブアンテナの構造を図2(a)に示す。小型放射素子は文献[26]の同軸構造のCRLH TLであり、分割された内部導体と外部導体、それらを接続するビアで構成されている。小型チョークは文献[32]の同軸構造のCRLH TLであり、分割された外部導体と内部導体、それらを接続するビアで構成されている。図2(b)に断面図を示す。小型チョークを構成する径 d_{cc} の内部導体は給電用同軸線路の外部導体も兼ねており、小型放射素子と小型チョークの接続部分から給電する。

小型チョークを構成するCRLH TLの単位セルの等価回路を図3に示す。 L_{RC} と C_{RC} は従来の同軸線路の等価回路にもある回路定数であり、それぞれ内部導体のインダクタンスおよび内部導体と外部導体間のキャパシタンスである。 C_{LC} は外部導体に設けたギャップ g_c により作られ、 L_{LC} はビアにより作られる。直列のインピーダンス Z_{sec} は L_{RC} と C_{LC} によって構成され、並列のインピーダンス Z_{shc} は C_{RC} と L_{LC} によって構成される。 Z_{sec} が容量性、 Z_{shc} が誘導性となる周波数範囲が左手系の帯域である。小型放射素子を構成するCRLH TLの等価回路も図3と同等である。ただし、直列のキャパシタンスは内部導体に設けたギャップによる。

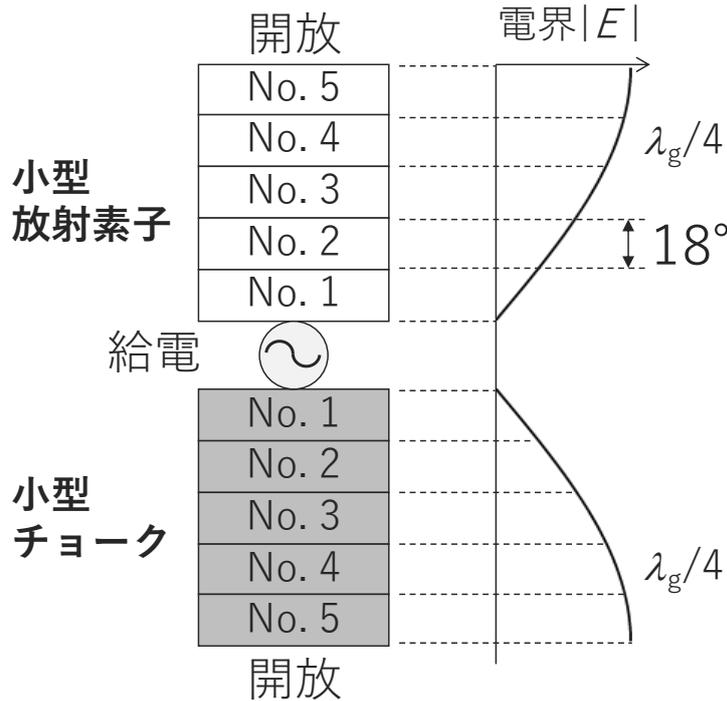
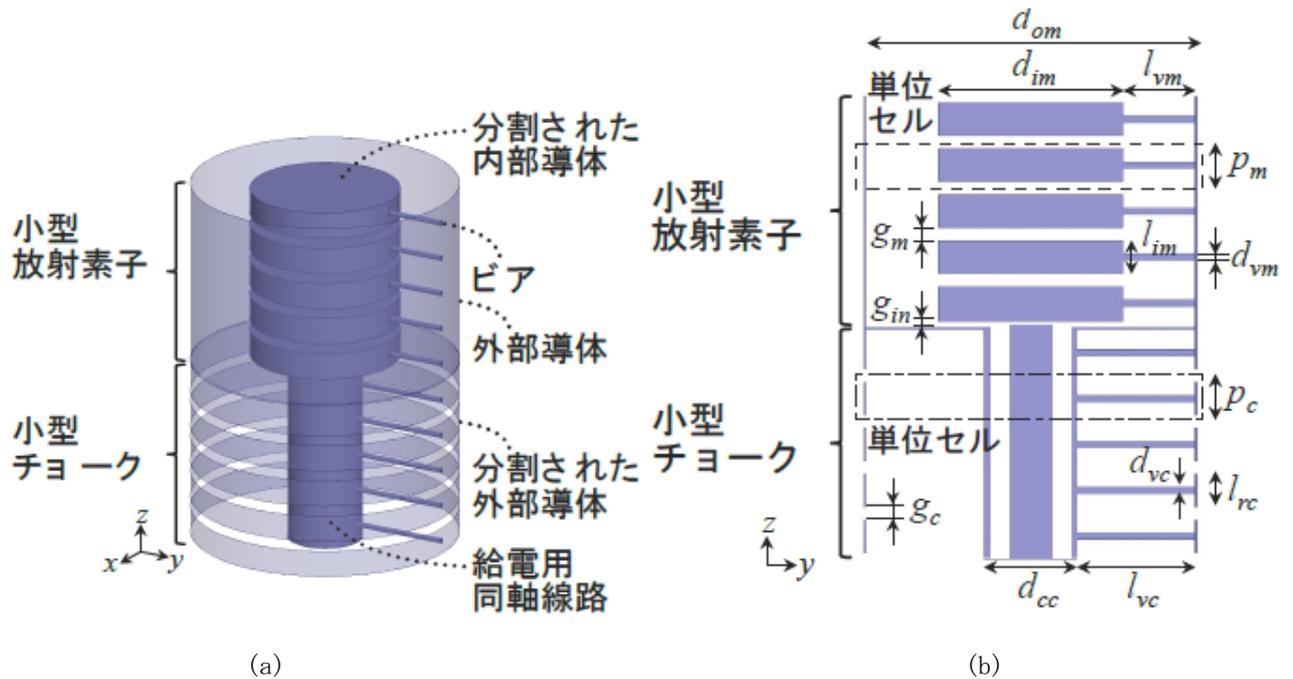


図1 動作原理



(a) (b)
 図2 小型スリーブアンテナの構造. (a)全体図, (b)断面図.

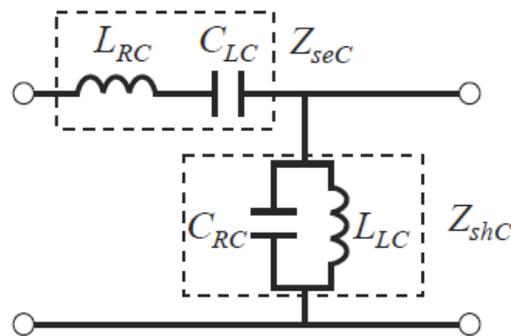


図3 小型チョークをこうする右手/左手系複合伝送線路の単位セルの等価回路.

2-2 測定結果

図4に試作した小型スリーブアンテナの写真を示す. 小型放射素子の構造パラメータは $p_m = 5.0$ mm, $l_{im} = 4.5$ mm, $g_m = 0.5$ mm, $g_{in} = 0.5$ mm, $d_{vm} = 0.5$ mm, $d_{om} = 50.0$ mm, $d_{im} = 28.0$ mm, $l_{vm} = 11.0$ mm である. 小型チョークの構造パラメータは $p_c = 5.0$ mm, $l_{rc} = 3.5$ mm, $g_c = 1.5$ mm, $d_{vc} = 2.0$ mm, $d_{cc} = 14.0$ mm, $l_{vc} = 18.0$ mm である. ギャップ g_m , g_c と g_{in} を保持するために樹脂のスペーサを挿入し, 金属は真鍮である. 給電用同軸線路の特性インピーダンスは 50Ω である.

図5(a)に $|S_{11}|$ 特性を示す. 測定結果と比較するために, スペーサを考慮した試作品相当のシミュレーション結果も示している. シミュレーションでは樹脂の比誘電率は2.8, 誘電正接は0.01とし, 真鍮の導電率は 15000000 S/mに設定した. シミュレーションと測定は共に共振周波数が2つ確認できる. 2つ目の共振周波数はシミュレーションが643 MHz, 測定が650 MHzである. これら共振周波数のずれは製作誤差および設定した樹脂の比誘電率の影響である. 2つ目の共振周波数における zx 面の放射パターンを図5(b)に示す. シミュレーションと測定は共に8の字型であり, よく一致している. 測定の利得がシミュレーションよりもわずかに小さいのは設定した樹脂の誘電正接が試作品よりも大きく, 損失が増加したためと考えられる.

小型スリーブアンテナがアンテナとして動作すること, 小型チョークが従来の1/4波長チョークと同様に漏れ電流を抑制できることを実験的に示すことができた. アンテナとして動作する2つ目の共振周波数650 MHzにおいて, 試作アンテナの小型放射素子と小型チョークを足した長さは0.11波長であり, 従来のスリーブアンテナの1/4以下に小型化されている.

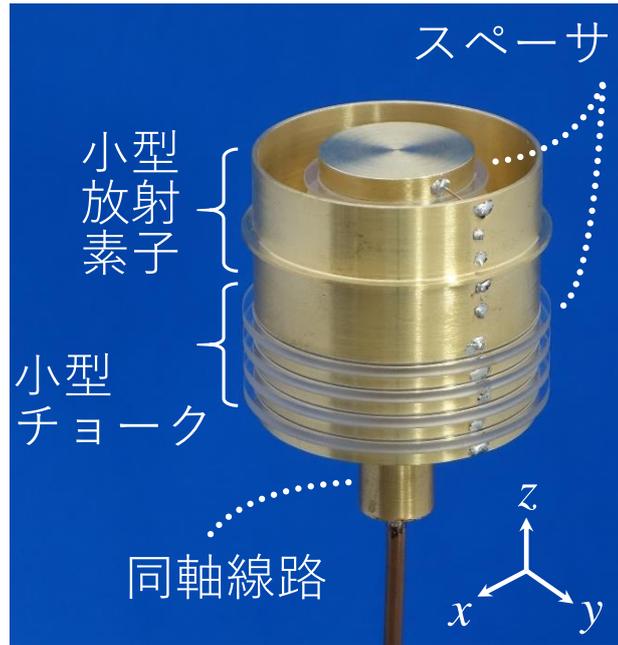


図4 小型スリーブアンテナの試作品

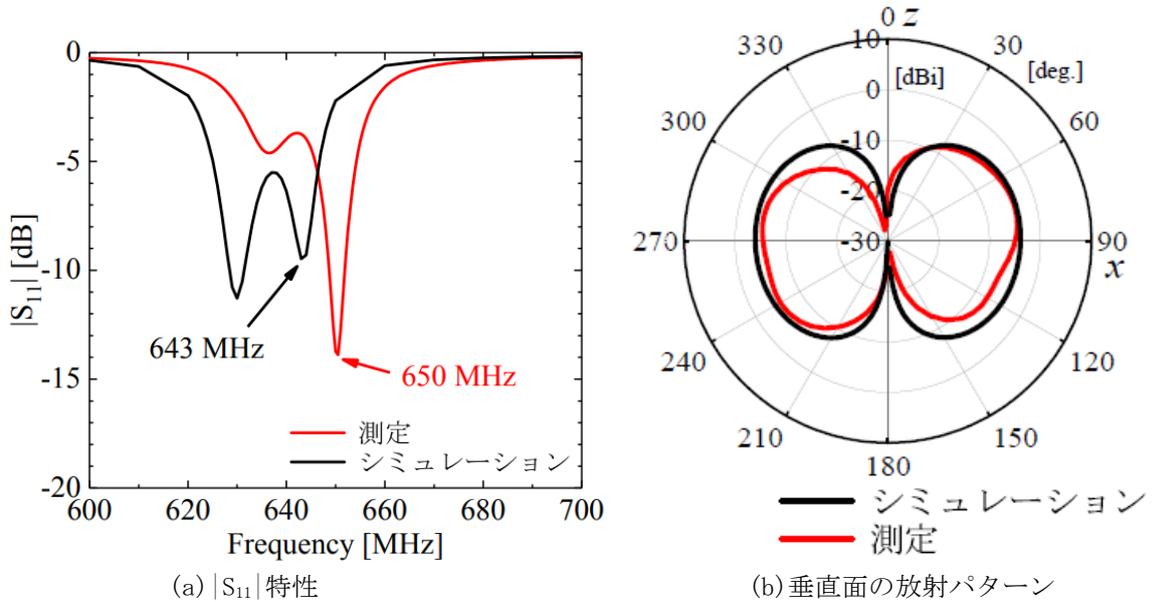


図5 小型スリーブアンテナの測定結果

3 広帯域スリーブアンテナ

3-1 構造と動作原理

図6に広帯域スリーブアンテナの動作原理を示す。広帯域スリーブアンテナはモノポールと広帯域チョークで構成されており、中央から給電する。モノポールは従来のスリーブアンテナと同様にその長さが1/4波長となる周波数で共振し、放射する。広帯域チョークはCRLH TLで構成されており、EBGの帯域を利用する。EBGでは電磁界は指数関数的に減衰するので、漏れ電流を抑制することができる。広帯域チョークの動作原理は従来の1/4波長チョークや2章の小型チョークとは異なり共振を利用していないので、動作帯域を広帯域にすることができる。

3-2 広帯域チョークを構成する EBG 構造

図 7(a), (b)に広帯域な EBG を有する CRLH TL の構造を示す. これらの CRLH TL は 2 章における小型チョークを構成する CRLH TL と基本的に同じ構造であるが, ビアの数を増やしている. 従って, 構造パラメータを与える各変数は図 2(b)のチョークと同じとする. EBG の下限周波数は直列のインピーダンス Z_{sec} の共振周波数によって, 上限周波数は並列のインピーダンス Z_{shc} の共振周波数によって決まる. 並列のインピーダンス Z_{shc} の共振周波数は C_{RC} と L_{LC} の積の平方根に反比例する. L_{LC} はビアによるので, ビアの数を増やして L_{LC} を小さくすることで, 上限周波数を高くし, EBG の帯域を広くすることができる.

図 8 にシミュレーションで求めた分散特性を示す. ビアの本数は 1, 2, 4 本と変化させた. 構造パラメータはそれぞれ $d_{rc} = 50.0$ mm, $d_{cc} = 14.0$ mm, $l_{rc} = 4.5$ mm, $l_{vc} = 18.0$ mm, $p_c = 5.0$ mm, $d_{vc} = 0.5$ mm, $g_c = 0.5$ mm である. ビアの本数が増えることで EBG の上限周波数が高くなり, 比帯域が増加している. 比帯域はビアが 1, 2, 4 本るときそれぞれ 73, 99, 123% である.

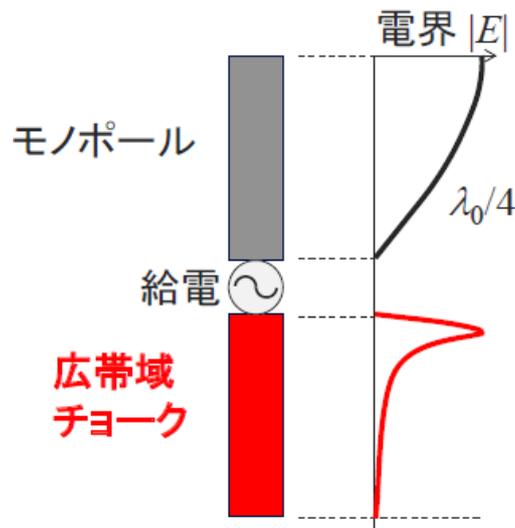


図 6 動作原理

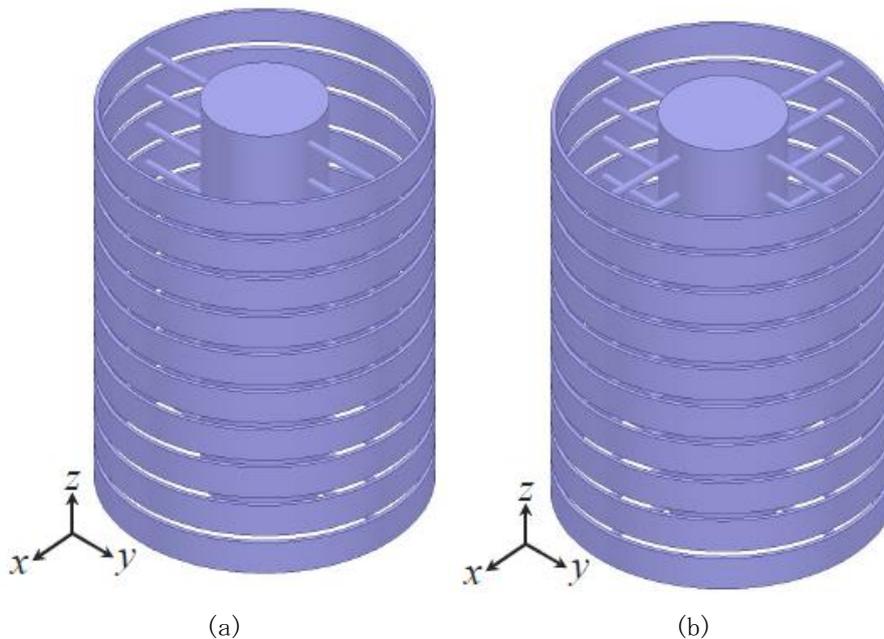


図 7 広帯域な EBG を有する CRLH TL の構造. (a)ビア 2 本, (b)ビア 4 本
特性

3-2 アンテナの特性

図9に広帯域スリーブアンテナの構造を示す。広帯域スリーブアンテナは広帯域チョークとモノポール、給電用の同軸線路で構成されている。広帯域チョークは前節で設計した広帯域なEBGを有するCRLH TLで構成されており、ビアの数は4本でセル数 $n = 20$ である。また同軸線路の長さ $l_{cc} = 200$ mm とする。

広帯域チョークの周波数特性を確認する。図10にモノポールの長さ h_m を変化させたときの $|S_{11}|$ 特性を示す。モノポールの長さを変えることで整合する周波数を変えることができることが確認できる。図10(a)と(b)はそれぞれ2, 3, 4 GHz と5, 6, 7 GHzで整合するように h_m を設計している。

図11(a)と(b)にそれぞれの h_m の長さにおける共振周波数の zx 面の放射パターンを示す。2 GHz では完全に8の字型である。3, 4 GHz では下方向への放射が僅かに乱れており、漏れ電流の影響が考えられる。5, 6, 7 GHz も漏れ電流の影響が僅かにあるが、おおむね8の字型である。2 から5 GHz はEBGの帯域であるが、6, 7 GHz はEBGよりも高い右手系モードの帯域である。

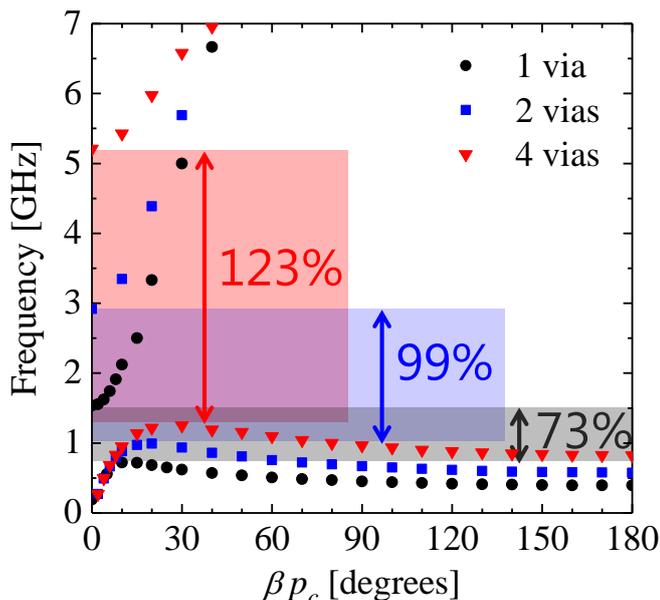


図8 分散

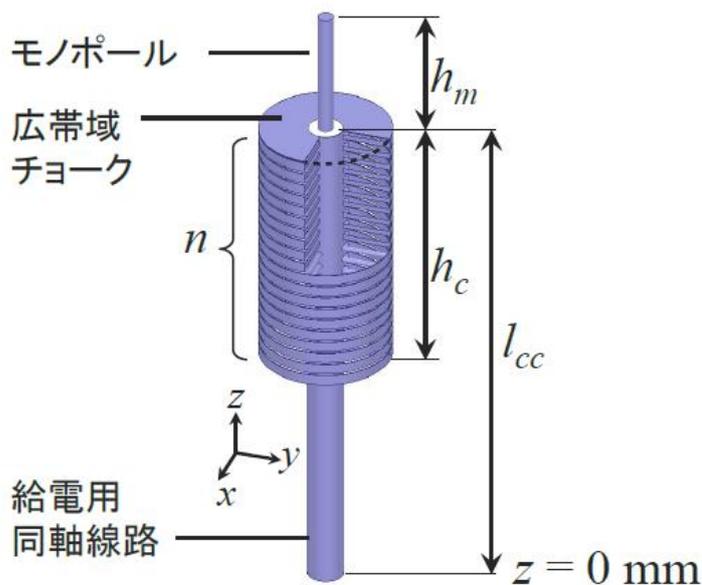


図9 広帯域チョーク付きスリーブアンテナの構造。

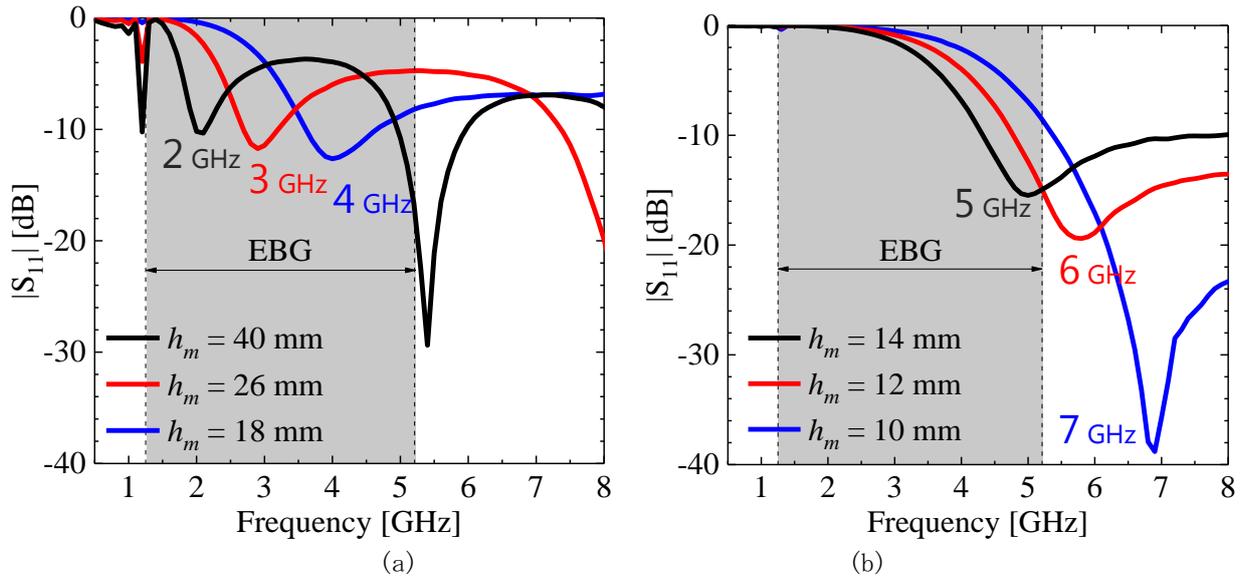


図 10 モノポールの高さ h_m を変化させたときの $|S_{11}|$ 特性. (a) $h_m = 40, 26, 18$ mm, (b) $h_m = 14, 12, 10$ mm.

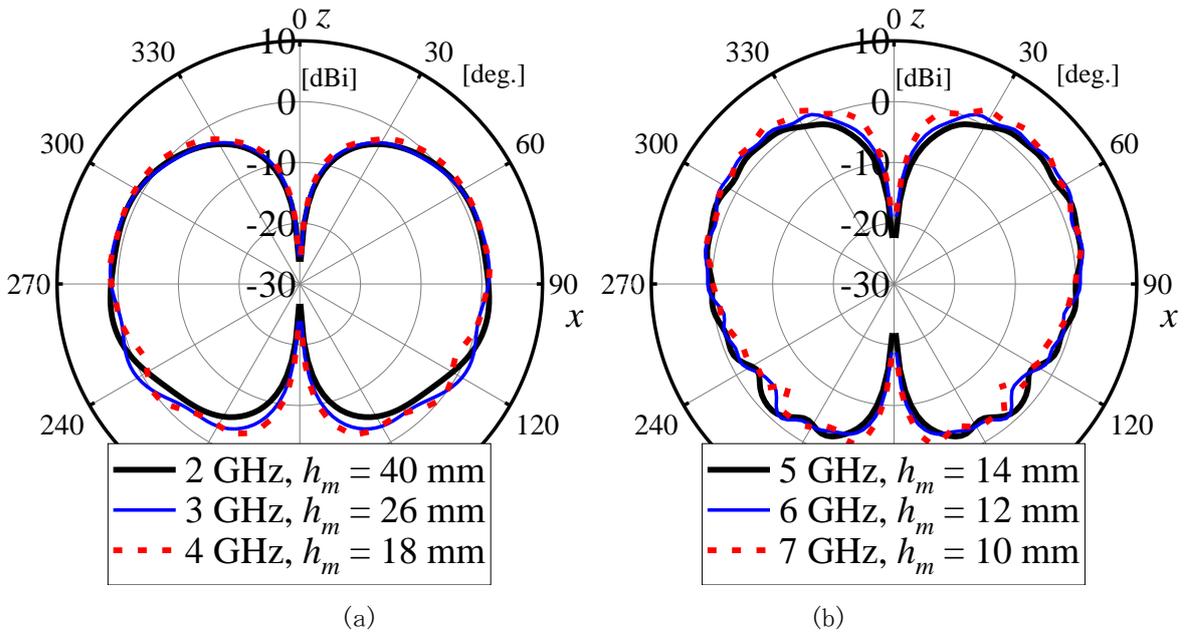


図 11 モノポールの高さ h_m を変化させたときの放射パターン. (a) $h_m = 40, 26, 18$ mm, (b) $h_m = 14, 12, 10$ mm.

4 まとめ

スリーブアンテナはチョークが漏れ電流を抑制するので、新たなバランや地板が不要で同軸線路から直接給電できる実用的なアンテナであるが、一方で、アンテナの大きさが波長に依存すること、帯域が狭いことの2つの課題を持っている。これらの課題を克服するために、本研究ではCRLH TLを利用したスリーブアンテナの小型化と広帯域化についてそれぞれ提案した。

第2章ではCRLH TLの左手系帯域を利用した小型スリーブアンテナを提案した。小型スリーブアンテナの動作原理を説明し、試作および測定し、シミュレーションの妥当性を示した。提案アンテナには2つの共振が存在し、2つ目の共振において放射パターンは従来のスリーブアンテナの様に8の字型となった。これら

がシミュレーションとよく一致することを確認した。小型スリーブアンテナがアンテナとして動作すること、小型チョークが従来の1/4波長チョークと同様に漏れ電流を抑制できることを実験的に示すことができた。アンテナとして動作する2つ目の共振周波数650 MHzにおいて、試作アンテナの小型放射素子と小型チョークを足した長さは0.11波長であり、従来のスリーブアンテナの1/4以下に小型化されていることを示した。

第3章ではCRLH TLのEBGを利用して漏れ電流を抑制するチョークを提案した。共振を利用した従来の1/4波長チョークとは異なり、EBGの帯域を利用した非共振型のチョークであるため、広帯域に設計することができた。チョークに適用するCRLH TLのEBGは、ビアの数を4本にすることで比帯域は123%を得た。広帯域チョークを取り付けたスリーブアンテナのモノポール長さを変化させることで、共振周波数を2 GHzから7 GHzに設計することができ、各共振周波数における放射パターンは僅かに漏れ電流の影響はあるが、ヌルはなく全て8の字型であることを確認した。

【参考文献】

- [1] 電子情報通信学会(編), アンテナ工学ハンドブック 第2版, オーム社, 2008.
- [2] Y. T. Lo and S. W. Lee, *Antenna Handbook: Antenna Theory*, vol. 2. New York, NY, USA: Reinhold, 1993.
- [3] M. Taguchi, S. Egashira, and K. Tanaka, "Sleeve Antenna with Ground Wires," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, no. 1, pp. 1322-1330, Jan. 1991.
- [4] A. J. Poggio and P. E. Mayes, "Pattern Bandwidth Optimization of the Sleeve Monopole Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, pp. 643-645, Sep. 1966.
- [5] S. C. Jung and J. M. Woo, "Design of Sleeve Antenna for Suppressing Leakage Current on a Coaxial Cable," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 459-462, 2014.
- [6] S. C. Jung, Y. S. Choi, and J. M. Woo, "Small Sleeve Dipole Antenna Using Inner Short Stub," *Int. Conf. Microw. Radar Wireless Commn.*, pp. 1-3, 2014.
- [7] 西本研悟, 深沢徹, 牧野滋, 砂原米彦, "携帯端末用板状スリーブアンテナの小型化に関する一検討," *信学ソ大*, B-1-43, p. 49, Sept. 2001.
- [8] 西本研悟, 梅野良輔, 深沢徹, 大塚昌孝, 宮下裕章, 小西善彦, "可変容量を装荷した帯域可変スリーブアンテナ," *信学論(B)*, vol. J93-B, no. 9, pp. 1322-1330, Sept. 2010.
- [9] 北村瑞穂, 作間允力雄, 田中和雅, 田口光雄, "広帯域スリーブアンテナ," *信学技報*, A・P2005-11, pp. 13-16, May 2005.
- [10] 岩田成玄, グェン・トゥワン・ハン, 作間允力雄, 森下久, "広帯域スリーブアンテナの基本特性," *信学ソ大*, B-1-146, p. 147, Sep. 2013.
- [11] 岩田成玄, グェン・トゥワン・ハン, 作間允力雄, 森下久, "広帯域スリーブアンテナの基本特性," *映像情報メディア学会技術報告*, vol. 37, no. 34, BCT2013-75, pp. 33-36, Jul. 2013. 沖貴志, グェン・トゥワン・ハン, 作間允力雄, 森下久, "チョーク付きスリーブアンテナの簡単な広帯域化手法," *信学論(C)*, vol. J98-C, no. 2, pp. 34-35, Feb. 2015.
- [12] C. Caloz and T. Itoh, "Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH transmission line," *IEEE-APS Int. Symp. Dig*, Vol. 2, June 2002, pp. 412-415.
- [13] C. Caloz and T. Itoh, "Transmission Line Approach of Left-Handed (LH) Materials and Microstrip Implementation of an Artificial LH Transmission Line," *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 52, no. 5, pp. 1159-1166, May 2004.
- [14] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2005.
- [15] G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain, *Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications*, New York, John Wiley-IEEE Press, 2005.
- [16] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, New York, John Wiley-IEEE Press, 2006.
- [17] R. Marques, F. Martin, and M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design,*

and Microwave Applications, New York, John Wiley-IEEE Press, 2007.

- [18] F. Martin, *Artificial Transmission Lines for RF and Microwave Applications*, New York, John Wiley-IEEE Press, 2015.
- [19] F. Yang and Y. R. Samii, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, New York, Cambridge University Press, 2009.
- [20] F. Capolino, *Applications of Metamaterials*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [21] H. Iizuka and P. S. Hall, "Left-Handed Dipole Antenna and Their Implementations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 5, pp. 1246-1253, May 2007.
- [22] H. Iizuka and P. S. Hall, "Omnidirectional Left-Handed Loop Antenna," *IEEE AP-S. Int. Symp.*, pp. 27-30, July 2006.
- [23] A. Sanada, M. Kimura, I. Awai, C. Caloz, and T. Itoh, "A Planar Zeroth-Order Resonator Antenna Using a Left-Handed Transmission Line," *34th Eur. Microw. Conf.*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1341-1344, Oct. 2010.
- [24] H. Nakano, J. Miyake, M. Oyama, and J. Yamaguchi, "Metamaterial Spiral Antenna," *IEEE Antenna Propag. Wireless Letters*, vol. 10, pp. 1555-1558, Dec. 2011.
- [25] T. J. Cui, D. R. Smith, and R. Liu, *Metamaterials: Theory, Design, and Applications*, Springer, New York, 2009.
- [26] C. Lin and H. Arai, "A small monopole antenna by left-handed coaxial structure," *Int. Symp. on Electromagnetic Theory*, Ottawa, Canada, July 2007.
- [27] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," *IEEE Trans. Microw. Theory Techniques*, vol. 47, no. 11, Nov. 1999.
- [28] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip antennas integrated with electro-magnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 10, pp. 2936-2946, Oct. 2003.
- [29] 道下尚文, "電波を遮断する EBG 構造," *信学通誌*, no. 15, pp. 18-24, Dec. 2010.
- [30] 伊藤淳, 道下尚文, 森下久, "マッシュルーム構造を用いた逆 F アンテナ間の相互結合抑制," *信学論*, vol. J92-B, no. 6, pp. 930-937, June 2009.
- [31] H. L. Liu, B. Z. Wang, X. S. Yang, and W. Shao, "Elimination of Mutual Couplings In Reflect array Using Electromagnetic Bandgap Structures," *IEEE Antennas Propag. Society Int. Symp.*, Albuquerque, NM., July 2006, pp. 2299-2302.
- [32] T. Fukushima, N. Michishita, H. Morishita, and N. Fujimoto, "Coaxially Fed Antenna With Choke Structure Using Left-Handed Transmission Line," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6856-6863, Dec. 2017.

〈発 表 資 料〉

| 題 名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|-------------|
| Coaxially Fed Antenna Composed of Monopole and Choke Structure Using Two Different Configurations of Composite Right/Left-Handed Coaxial Lines | IEICE Trans. Commun. | 2019 年 2 月 |
| Broadband Choke Structure Using Composite Right/Left-Handed Coaxial Line | IEICE Commun. Express | 未発表 (採録決定) |
| Coaxially Fed Monopole Antenna Composed of Composite Right/Left-Handed Transmission Line | Int. Symp. Antennas Propag. | 2018 年 10 月 |
| Coaxially Fed Antennas Using Composite Right/Left-Handed Coaxial Line Resonators | Int. Workshop Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition | 2018 年 10 月 |
| 0 次共振器で構成したチョーク付き同軸給電モノポールアンテナ | 信学ソ大 | 2018 年 9 月 |