

一款基于容性加载结构的宽带磁电偶极子天线

杨浩楠, 曹祥玉, 高 军, 杨欢欢, 李 桐, 高 坤

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对现代通信系统的日益复杂对天线的带宽提出越来越高的需求,设计并测试了一款结构简单的宽带磁电偶极子天线。在传统 Γ 型馈电结构中加入了一对平行铝板以拓展阻抗带宽并改善阻抗匹配。新加入的平行铝板形成了一组容性加载,可用以弥补传统馈电结构在高频处的感性,从而有效拓展了工作带宽。实测结果表明,提出的天线相对阻抗带宽达 92.5% ($|S_{11}| < -10$ dB),频率覆盖范围为 1.36~3.7 GHz。在整个工作带宽内,天线拥有较为对称的方向图、较低的交叉极化水平、较高的前后比以及最高可达 11 dBi 的增益效果。

关键词 磁电偶极子天线;宽带;容性加载

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.05.014

中图分类号 TN822+.8 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)05-0089-05

A Broadband Magnetolectric Dipole Antenna Using Capacitive Loading Feeding Structure

YANG Haonan, CAO Xiangyu, GAO Jun, YANG Huanhuan, LI Tong, GAO Kun

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077, China)

Abstract A magneto-electric (ME) dipole antenna with broadband characteristics simple in structure is designed, fabricated, and measured in this paper. This antenna being different from the common dipole antenna, two vertical aluminum plates are added in the traditional Γ -shaped feeding structure to improve impedance matching and impedance bandwidth. These plates form a set of capacitive loading to compensate the inductance effect of the original feeding structure at high frequencies, effectively broadening the impedance bandwidth of the antenna. The experimental results show that an impedance bandwidth of 92.5% for $|S_{11}| < -10$ dB, ranging from 1.36 GHz to 3.7 GHz, is achieved. Besides, symmetrical radiation patterns with low cross polarization levels, high front-to-back ratios (FBRs) and gains with maximum value of 11dBi are realized within a range of the entire working band.

Key words magneto-electric dipole antenna; broadband; capacitive loading

现代通信系统的日益复杂对天线的宽带特性、辐射特性如稳定的增益效果、低交叉极化水平及高前后比等都有着非常严苛的要求。文献[1]中由

LUK 教授提出的磁电偶极子天线是一款可满足这些严苛需求的天线。这种类型的天线通常由四分之一波长的片状天线以及二分之一波长的电偶极子天

收稿日期: 2020-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61471389,61671464,61801508,61701523);博士后创新基金(BX20180375)

作者简介: 杨浩楠(1996—),男,山西怀仁人,硕士生,主要从事天线设计研究。E-mail:18220526812@163.com

引用格式: 杨浩楠,曹祥玉,高军,等.一款基于容性加载结构的宽带磁电偶极子天线[J].空军工程大学学报(自然科学版),2020,21(5):89-93. YANG Haonan, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al. A Broadband Magnetolectric Dipole Antenna Using Capacitive Loading Feeding Structure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(5): 89-93.

线组成,在整个工作带宽内都具有优良的电磁辐射特性。该型天线相对阻抗带宽为43.8%,提升空间巨大。

近年来,一些学者也对宽带磁电偶极子天线^[2-13]进行了深入研究,通过改变天线辐射结构的形状来提升天线阻抗带宽。文献[2~3]均采用了短路蝶形贴片结构取代原始天线中的片状结构充当磁偶极子天线;文献[4~5]设计了一款蝶形电偶极子天线。文献[6]采用了E型的片状天线结构以及阶梯状的馈电结构。文献[7]将电偶极子天线及介质集成波导表面的垂直槽组合,设计了一款基于介质集成波导结构的磁电偶极子天线。测试结果表明,这些设计方法均有效提升了天线的阻抗带宽。然而,蝶形的片状结构及多层贴片也提高了加工成本。

另外一个提升天线阻抗带宽的方法是采用不同形式的馈电结构。文献[8]采用了一种差分馈电结构。该馈电结构需要2个射频接头,增加了天线的加工成本。文献[9]设计了一种采用双槽馈电结构的磁电偶极子天线。该天线实现了结构小型化及较高增益的需求。然而,较原始天线而言,这款天线在阻抗带宽方面的提升有限。文献[10]设计了一种利用孔径耦合微带线馈电的天线,大幅拓展了原始天线的阻抗带宽。文献[11]提出了一种差分驱动传输线激励的磁电偶极子天线结构,阻抗带宽提升效果较为显著。比起更改天线辐射结构的形状,通过调整天线的馈电结构来拓展阻抗带宽的方法更为高效且接近阻抗带宽的本质。

缺陷地结构及双频带技术也被用以拓展天线的阻抗带宽。文献[12]提出了一款带有缺陷地结构的磁电偶极子天线。该天线同时实现了较为简单的结构形式以及高达86.9%的阻抗带宽。文献[13]中,较短的电偶极子和较长的电偶极子组合,从而实现了双频带工作特性。然而,在这些设计中,天线的交叉极化水平相对较高,均大于-15 dB。我们期望能够在保持原始天线低交叉极化水平及简单结构的基础上提升天线的阻抗带宽。

基于上述工作,本文提出了一款新型宽带磁电偶极子天线。天线的结构与文献[1]中结构类似。不同之处在于使用了一种基于容性加载的特殊的 Γ 型馈电结构。该馈电结构大幅提高了天线的阻抗带宽,除此之外,原始天线的一些优良辐射特性,例如相对较高的增益、对称的辐射方向图、低交叉极化水平以及低后向辐射得以全部保留。

1 天线结构

图1给出了天线的三维结构图。如图所示,该

天线主要包含3部分:第1部分是2个完全相同的弯折铝板,长度为 L 、宽度为 W 、高度为 H 。第2部分是馈电结构,该结构被放置于整个金属地板的中心。在原始天线 Γ 型馈电结构的基础上增加了2块用以调整阻抗匹配的铝板,两块铝板平行放置,相距 l_2 、长度为 h_2 、宽度为 b 。第3部分是一个用来提升增益及前后比的盒状金属围栏,尺寸为 $G_L \times G_L \times H$ 。表1列出了该天线全部的尺寸数据。

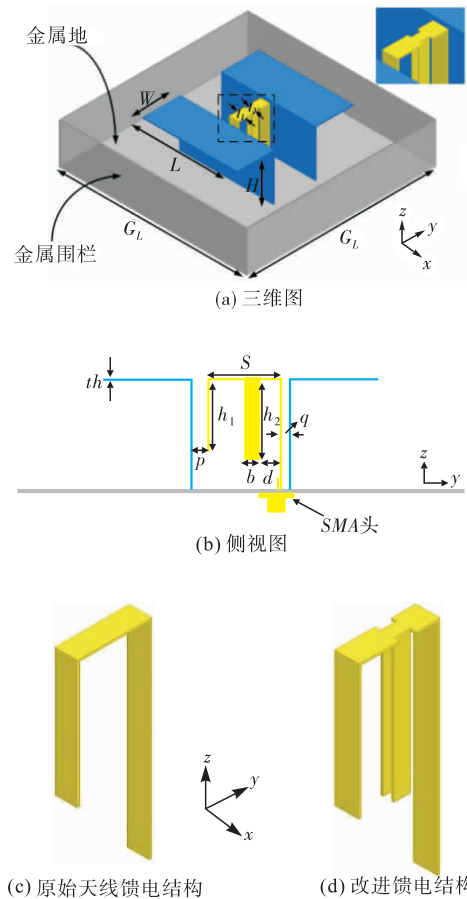


图1 天线结构

表1 天线尺寸数据

参数	G_L	L	W	H	S	l_1	l_2
数值/mm	180	27	55	28	10	3	1
参数	h_1	h_2	p	q	b	d	th
数值/mm	17	18	2	1	2	3	0.3

2 天线带宽拓展机理分析

如图2所示,文献[1]中设计的天线在较高频处(>3.5 GHz)呈现感性,使天线在高频处完全失配。根据文献[1]可知,是由 Γ 型馈电结构的平行铝板造成,可考虑通过降低高频处感性来拓展天线阻抗带宽。基于此,本文在原始天线的馈电结构中金属平板两侧增添了一对平行放置的竖直铝板。

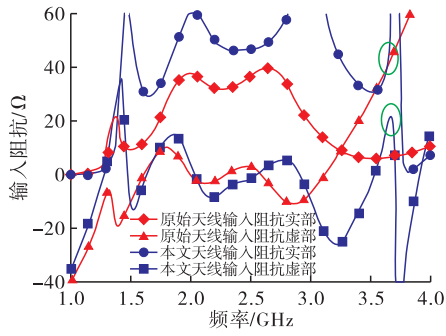


图 2 文献[1]中原始天线及本文改进天线的输入阻抗

由图 2 可以看出,新增加的结构弥补了原始天线在较高频率处(=3.7 GHz)所呈现的感性,使得原始天线输入阻抗的虚部由 15 Ω 降低至 -100 Ω,降低幅度为 115 Ω,并且输入阻抗的实部更接近 50 Ω。同时,新增加结构在 3.7 GHz 的容性数值可由式(1)和式(2)得出,经计算为 133 Ω(S 代表新增加结构的表面积, X_c 代表新增加结构的容性数值)。仿真数值和理论计算结果均验证了本文拓宽天线阻抗带宽方法的有效性。

$$C = \frac{\epsilon S}{l_2} \tag{1}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \tag{2}$$

图 3 给出了原始天线及本文设计天线的相对阻抗带宽。根据图 3 可得,本文设计的天线在高频处出现了一个新的谐振点,且相对阻抗带宽由 45.3% 提升至 89.6%。

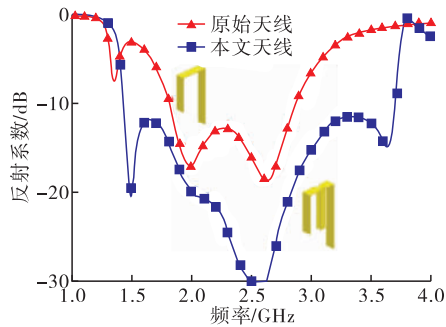


图 3 文献[1]中原始天线及本文改进天线的反射系数

为进一步验证天线阻抗带宽拓展效果,利用电磁仿真软件 CST 中的特征模分析工具对文献[1]中天线及本文设计天线结构进行了模式分析。图 4 与图 5 分别为原始天线及本文设计天线的模式系数。模式系数为 1 时,天线结构在此频点发生谐振。从图 4 与图 5 可以看出,文献[1]中天线谐振频点集中于 3 GHz 以下,而本文设计天线在 3.6 GHz 附近出现了新的谐振点,从而将天线带宽拓展至较高频率。

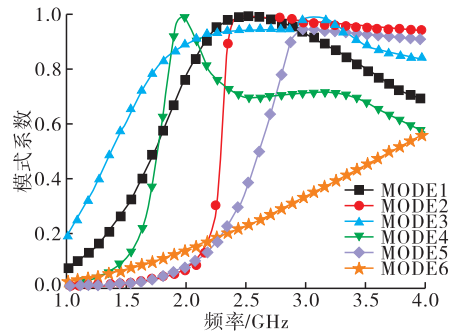


图 4 文献[1]中原始天线模式系数

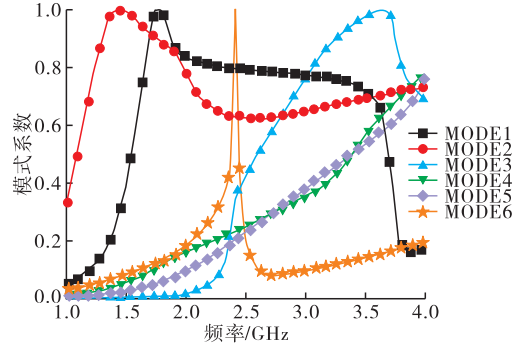


图 5 本文设计天线模式系数

为了证明新加入结构没有影响磁电偶极子天线的工作模式,图 6 给出了 2.5 GHz 处水平铝板表面一个周期内的电流分布及天线中央孔径处一个周期内的电场强度分布。其中,表面电流分布描述了电偶极子天线的工作状态,孔径处电场强度分布则描述了磁偶极子的工作状态。在 $t=0$ 及 $t=T/2$ 处 (T 代表频率为 2.5 GHz 时的一个周期),表面电流强度和孔径电场强度均变得较为微弱;在 $t=T/4$ 及 $t=3T/4$ 处,表面电流强度和孔径电场强度均变得较为强烈。这个现象说明,在一个周期内,磁偶极子及电偶极子被同时激励,符合文献[1]中给出的磁电偶极子天线工作机理。

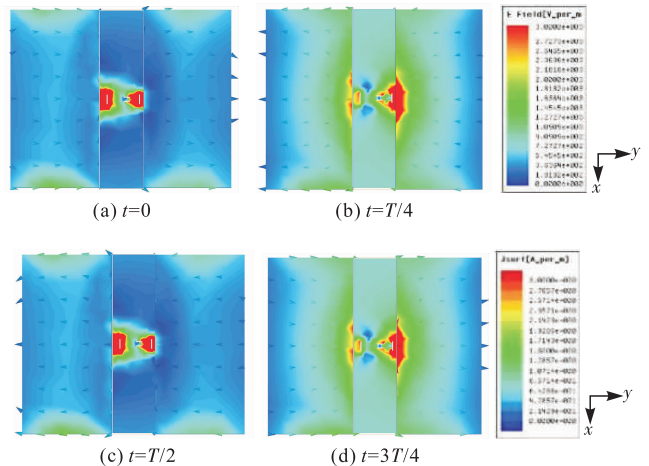


图 6 2.5 GHz 处水平铝板表面一个周期内的电流分布及天线中央孔径处一个周期内的电场强度分布
为进一步了解新加入结构的长度对阻抗带宽拓展效果的影响,本文实施了参数分析。图 7 给出了

反射系数及天线增益随长度 h_2 变化的情况。从参数分析的结果来看,天线增益对于 h_2 的变化不敏感。只有当 $h_2 > 18$ mm 时,天线在工作频段内的增益才变得不稳定。然而,天线在较高频段处的反射系数随着 h_2 的变化而剧烈变化。当 16 mm $< h_2 < 18$ mm 时,可以观测到一个新的谐振点。随着 h_2 继续变大,新出现的谐振点逐渐移向较低频段且天线阻抗带宽逐渐变窄。当 $h_2 = 20$ mm,新增加的谐振频点完全消失。最终,为同时获得较宽的阻抗带宽及稳定的天线增益,选择 18 mm 作为 h_2 的优化值。

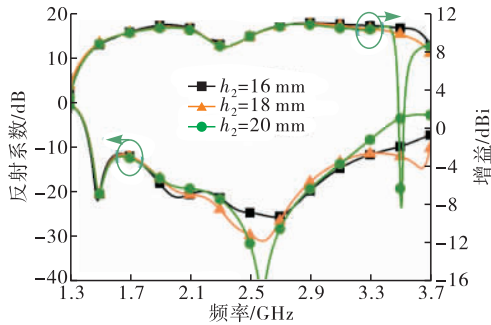


图7 反射系数及增益的仿真数值随 h_2 变化的情况

3 天线加工及测试

如图8所示,本文加工了天线样品以进一步验证所提出方法的有效性。天线增益及辐射方向图由远场测量装置得出。天线反射系数由安捷伦 N5230C 矢量网络分析仪得出。

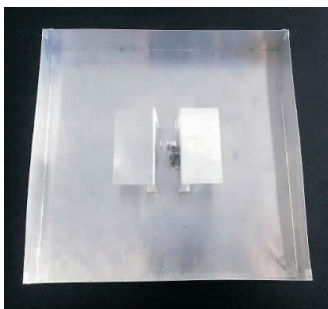


图8 天线样品

图9给出本文天线的反射系数及增益的仿真与实测数值。天线的实测反射系数 ($|S_{11}| < -10$ dB) 为 92.5%,工作频段为 1.36~3.7 GHz。新的谐振点出现在 3.5 GHz 处,验证了容性加载的有效性。天线的实测反射系数在中频处发生恶化,与仿真结果差别较大,是由于加工精度有限造成的。仿真发现,反射系数对于参数 q 的变化十分敏感。在工作频带的中频处, $q = 1$ mm 时,天线的阻抗匹配效果最好。因此, q 的仿真优化值定为 1 mm。然而,受限于加工精度,在实际的加工过程中,很难确保 $q = 1$ mm。天线实测的增益数值在整个工作频带内为

6.68~11 dBi。实测增益结果与仿真结果吻合较好。由图9可得,天线的实测相对 3-dB 增益带宽为 85.71% (1.44~3.6 GHz)。实测发现,天线 E 面方向图在 1.55~3.2 GHz 频带范围内保持较好的稳定性,H 面方向图在 2~3.2 GHz 频带范围内保持较好的稳定性。因此天线的实测相对方向图带宽为 46.15% (2~3.2 GHz)。

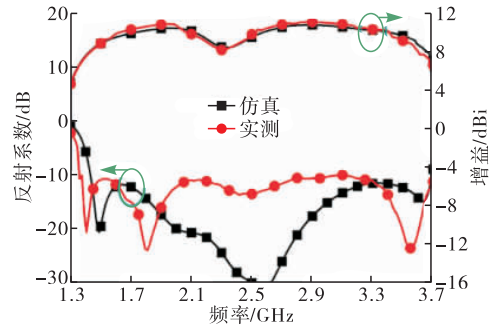


图9 天线增益及反射系数的仿真值及实测值

图10给出了天线在 1.36 GHz、2.5 GHz 及 3.7 GHz 处的仿真及实测辐射方向图。

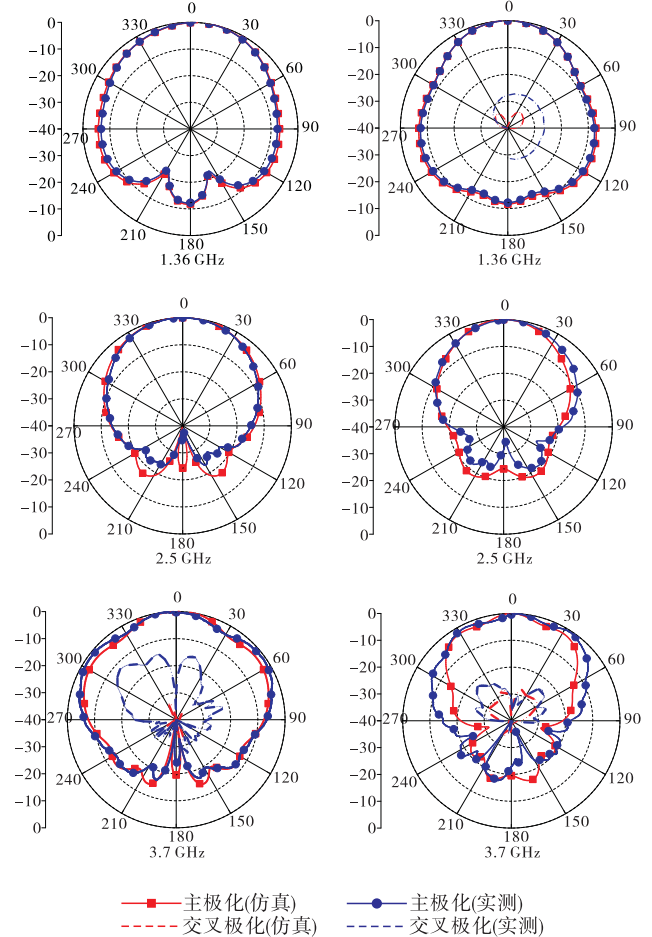


图10 天线仿真及实测辐射方向图

由图10所示,天线的 E 面与 H 面方向图在 3 个频点处保持了很好的一致性,说明本文所提出的改进方法并未影响磁电偶极子天线在辐射方向图上的优良特性。在 1.36 GHz 及 2.5 GHz,E 面与 H

面的交叉极化水平平均低于 -30 dB。在 3.7 GHz处,两个参考面的交叉极化水平平均低于 -20 dB,与实测结果吻合较好。

表 2 给出了本文设计天线与文献[1~12]中有同样宽带特性天线的特性对比。为了拓展天线带宽,学界提出了许多设计方法。从对比结果来看,文献[5]及文献[8]均实现了超过 100% 的相对阻抗带宽,但结构复杂度及加工成本也大大增加。文献[1]、文献[3]以及文献[9]中天线的相对阻抗带宽数值均小于本文所提出天线的相对阻抗带宽数值。综合考量来看,本文所提出的设计方法在保留原始天线对称的辐射方向图基础上大幅提高了天线的相对阻抗带宽,同时结构设计较为简单。

表 2 文献[1~12]中设计与本文中天线的特性对比

文献	结构	阻抗带宽/%	平均增益/dBi
[2]	复杂	60.0	6.00
[3]	复杂	87.0	7.00
[6]	复杂	60.0	8.00
[4]	复杂	95.2	7.90
[8]	复杂	114.0	8.25
[5]	复杂	110.0	8.70
[9]	简单	53.0	10.00
[10]	简单	85.0	8.00
[12]	简单	86.9	7.20
[1]	简单	43.8	7.50
本文	简单	92.5	8.84

4 结语

本文设计了一款新型宽带磁电偶极子天线。通过分析传统磁电偶极子天线的输入阻抗,找到了原始天线在高频处(>3.5 GHz)阻抗失配的原因。基于此,提出了通过容性加载来弥补感性的设计方法,并为验证设计方法的有效性而加工了天线样品。实测结果表明,天线的相对阻抗带宽可达 92.5% ,天线平均增益为 8.84 dBi,最大增益可达 11 dBi,天线在两个参考平面的辐射方向图保持了良好的一致性。同时,天线的交叉极化水平被控制在一个比较低的水平。基于这些优点,本文提出的天线适合于多种无线通讯系统,本文所提出的设计方法为设计宽带天线提供了有益的参考。

参考文献

[1] LUK K M, WONG H. A New Wideband Unidirectional Antenna Element[J]. International Journal of Microwave and Optical Technology, 2006, 1(1):35-44.

- [2] WONG H, MAK K M, LUK K M. Wideband Shorted Bowtie Patch Antenna with Electric Dipole[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(7):2098-2101.
- [3] ZHANG Z Y, FU G, ZUO S L, et al. Wideband Unidirectional Patch Antenna with Γ -shaped Strip Feed[J]. Electronics Letters, 2010, 46(1):24-26.
- [4] GE L, LUK K M. A Wideband Magneto-electric Dipole Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(11):4987-4991.
- [5] GE L, LUK K M. A Magneto-Electric Dipole for Unidirectional UWB Communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(11):5762-5765.
- [6] AN W X, LAU K L, LI S F, et al. Wideband Γ -shaped Dipole Antenna with Staircase-Shaped Feeding Strip[J]. Electronics Letters, 2010, 46(24):1583-1584.
- [7] HAO Z C, YUAN Q, LI B W, et al. Wideband W-Band Substrate-Integrated Waveguide Magnetolectric (ME) Dipole Array Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6):3195-3200.
- [8] LI M J, LUK K M. A Differential-fed Magneto-Electric Dipole Antenna for UWB Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(1):92-99.
- [9] LAI H W, SO K K, WONG H, et al. Magnetolectric Dipole Antennas with Dual Open-Ended Slot Excitation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(8):3338-3346.
- [10] CUI X W, YANG F, GAO M, et al. A Wideband Magnetolectric Dipole Antenna with Microstrip Line Aperture-Coupled Excitation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12):7350-7354.
- [11] RUAN X X, NG K B, CHAN C H. A Differentially Fed Transmission-Line-Excited Magnetolectric Dipole Antenna Array for 5G Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10):5224-5230.
- [12] ZENG J T, LUK K M. A Simple Wideband Magneto-electric Dipole Antenna with a Defected Ground Structure[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2018, 17(8):1497-1500.
- [13] TAO J, FENG Q Y, LIU T. Dual Wideband Magnetolectric Dipole Antenna with Director Loaded[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2018, 17(10):1885-1889.

(编辑:徐敏)