

## 新型电磁带隙结构加载的微带天线阵\*

李有权,张光甫,付云起,袁乃昌

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**研究了以 EBG 结构为衬底的微带天线阵。将 EBG 结构置于微带天线阵的底部取代微带天线阵列的金属底板,不仅能增加天线带宽,还能提高天线阵的增益。测试结果表明,天线单元带宽从 3.81% 提高到 8.86%,在工作频带内天线阵增益都在 10dB 以上,同时天线单元间的耦合系数也得到有效降低。

**关键词:**微带天线阵;电磁带隙结构;耦合系数;带宽;增益

**中图分类号:**TN011 **文献标识码:**A

## Novel EBG Loaded Microstrip Antenna Array

LI You-quan, ZHANG Guang-fu, FU Yun-qi, YUAN Nai-chang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Microstrip antenna array mounted over electromagnetic bandgap (EBG) substrate was studied. The EBG was mounted below the microstrip antenna array to replace the conducting ground plane of antenna array, which can widen the operational bandwidth and promote the gain of antenna array. The measured results show that the operational bandwidth of antenna unit is promoted from 3.81% to 8.86%, and in the operational band the gain of antenna array is over 10dB. Meanwhile the coupling coefficient between units of antenna array is reduced.

**Key words:** microstrip antenna array; electromagnetic bandgap (EBG); coupling coefficient; bandwidth; gain

微带天线在雷达、卫星通讯等方向得到了广泛应用,但是它存在频带窄,效率低等缺点,介质基片受激励会引起表面波,使阵列副瓣增大方向性变差。将电磁带隙结构(EBG, Electromagnetic Bandgap)引入微带天线的设计中,可以有效改善微带天线的特性。最初采用在介质基板上蚀刻出成周期排列的方孔,可抑制有源天线的谐波辐射,交叉极化电平也得到有效降低<sup>[1]</sup>。在微带天线中使用较多的电磁带隙结构是 Sievenpiper 提出的高阻表面结构<sup>[2]</sup>,常见形式是将 EBG 结构环绕在微带贴片周围,利用 EBG 结构的表面波带隙特性,可以减小微带天线的表面波,改善天线的方向图<sup>[3]</sup>,实现微带天线小型化<sup>[4]</sup>及低剖面天线<sup>[5]</sup>。还可以将 EBG 结构放置在天线前部,提高天线增益<sup>[6]</sup>。但是这些方法仅能改善天线的某一种性能,不能全面提高微带天线的整体性能。

本文采用了一种新的 EBG 加载方式,将 EBG 结构放置在微带天线阵底部<sup>[7]</sup>,用 EBG 结构代替微带天线的金属底面。利用 EBG 结构方形贴片产生寄生电容,能改善天线的谐振特性,展宽天线工作频带。由于 EBG 结构的表面波带隙特性,天线阵辐射能量向前集中,使天线阵获得高的增益。同时天线阵单元间的互耦系数也能得到有效降低,有利于改善微带天线阵列的扫描特性<sup>[8]</sup>,可以大大提高天线阵的性能。

## 1 EBG 结构天线阵列设计

## 1.1 EBG 结构设计

本文采用的 EBG 结构为 Sievenpiper 提出的 Mushroom 结构,它是由一组金属贴片在介质基板上排列得到的,金属贴片通过每个贴片中心的垂直导电孔与介质基板下面的金属板地面相连,其结构示意图如图 1 所示,这种结构可由并联 LC 等效电路模型等效,在谐振频率附近并联 LC 电路的阻抗为无穷大,形

\* 收稿日期:2010-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60871069)

作者简介:李有权(1980—),男,博士生。

成表面波的频率带隙。表面波带隙的中心频率即为并联 LC 电路的谐振频率。由估算的等效电容和电感可得到 EBG 结构的谐振频率,单元等效参数为<sup>[2]</sup>:

$$C = \frac{p(\epsilon_1 + 1)\epsilon_0}{\pi} \operatorname{arccosh}\left(\frac{w}{g}\right) \quad (1)$$

$$L = \mu t \quad (2)$$

其谐振频率  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 。式中  $p$  为贴片单元周期长度,  $w$  为方形贴片单元长度,  $g$  为贴片单元间隔,  $t$  为介质板厚度,  $\epsilon_1$  为介质板相对介电常数,  $\mu$  为等效介电常数。

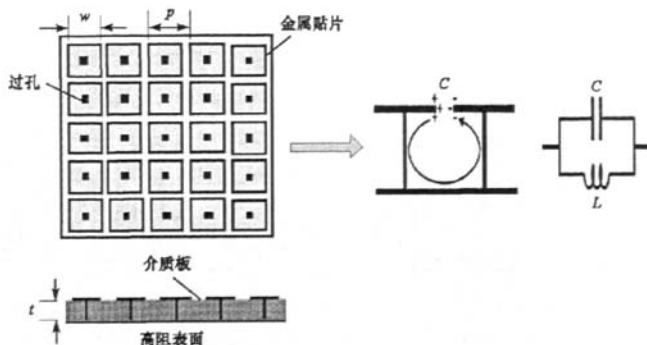


图1 EBG结构示意图及等效电路

Fig.1 Structure and equivalent circuit of EBG

本文所设计的微带天线阵工作频带为(5.92~6.15)GHz,设计出 EBG 结构表面波带隙应覆盖这个频带。根据以上等效公式计算并通过优化,得到所设计 EBG 结构参数为:采用基板相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.65$ ,厚度  $t = 1.5\text{mm}$ ,贴片单元周期  $p = 8\text{mm}$ ,贴片单元长度为  $w = 7\text{mm}$ ,过孔直径为  $0.6\text{mm}$ 。图2所示为采用 HFSS 8 软件对 EBG 结构进行仿真得到的能带图,从中可以看出所设计 EBG 结构在(5.35~6.98)GHz 存在表面波带隙。

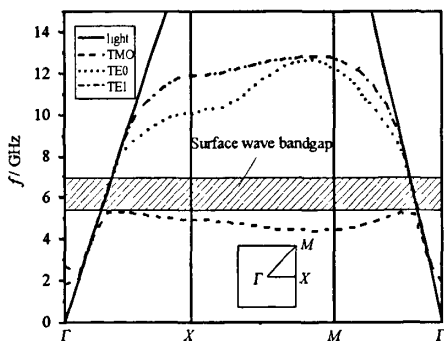


图2 表面波带隙仿真结果

Fig.2 Simulated surface bandgap of EBG

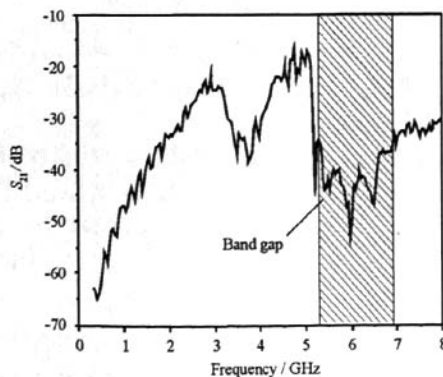


图3 EBG表面波带隙测量结果

Fig.3 Measured surface bandgap of EBG

EBG 结构表面波传输特性的测量系统利用矢量网络分析仪作为核心仪器,采用同轴探针作为表面波的激励和接收装置。测量时将两个同轴探针放置在高阻表面两端,通过测量其传输参数就可以清楚地显示高阻电磁表面的表面波传输状况。制作 EBG 结构样品并采用矢量分析仪对所设计的 EBG 结构表面波带隙进行测量。所设计的 EBG 结构 TM 波传输特性测量结果如图3所示,从图中可以看出,在(5.29~6.91)GHz 存在明显的表面波带隙,与仿真结果基本一致。所设计 EBG 结构满足设计要求。

## 1.2 加载 EBG 结构的微带天线阵

普通天线阵结构如图 4 所示,采用介质板厚度为  $t = 1.5\text{mm}$ ,相对介电常数为 2.65,矩形贴片长度为  $l = 14.4\text{mm}$ ,宽度为  $w = 9.2\text{mm}$ ,两个单元间的间距为 33mm,天线阵列采用同轴馈电方式。采用 HFSS 8 仿真优化,馈电点选择在距离边缘 5mm,微带天线阵整体大小为  $120\text{mm} \times 65\text{mm}$ 。在阵列天线中,天线的辐射特性特别是旁瓣电平将受到阵元间互耦影响,为了验证 EBG 结构对天线阵元间互耦的抑制作用,设计二元阵单元选择如图 4 的放置形式。

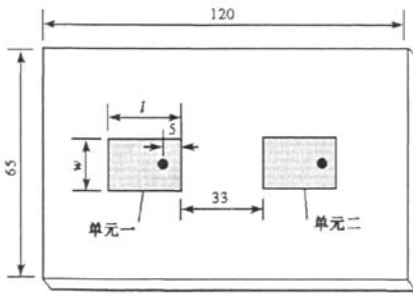


图 4 普通微带天线阵

Fig.4 Common microstrip antenna array

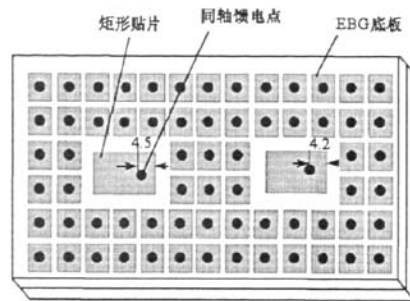


图 5 以 EBG 结构为衬底的微带天线阵

Fig.5 Microstrip antenna array mounted over EBG

加载 EBG 结构的微带天线阵包含两个部分,上层天线介质基片仅有矩形金属贴片,没有金属底板,贴片尺寸与普通天线阵一样,下部分为 EBG 结构,置于微带阵之下替代原阵列的金属底板,其结构如图 5 所示,天线阵整体厚度为 3mm,两块介质基板整体尺寸均为  $120\text{mm} \times 65\text{mm}$ 。两个贴片之间放置了 3 个 EBG 贴片单元。天线阵由一分二功率分配器对天线单元实现馈电,馈电方式为底部同轴馈电。EBG 结构的应用使天线单元的谐振位置发生了改变,通过计算和测试,对两个天线单元的馈电点进行调整。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 天线阵单元驻波特性及耦合系数

天线阵由一分二的功分器对两个单元进行馈电,因为功分器两个功分臂上加载了平衡电阻,测量加载功分器的天线阵并不能真实反应天线阵的驻波,所以这里给出单个天线驻波比较结果,以说明 EBG 结构展宽频带的作用。

采用微波矢量分析仪对普通微带天线阵和加载 EBG 结构的天线阵单元的反射系数分别进行了测量,两种天线阵单元的反射系数及单元间的耦合系数如图 6 所示。从普通天线阵的反射系数曲线  $S_{11}$  可看出,低于  $-10\text{dB}$  的频带为  $(5.92 \sim 6.15)\text{GHz}$ ,天线阵工作带宽为  $230\text{MHz}$ ,为中心频率的  $3.81\%$ 。两个天线单元之间的耦合系数在天线整个工作频带内在  $-29\text{dB}$  以上,在频率为  $6.1\text{GHz}$  时耦合达到最大 ( $-27.9\text{dB}$ )。加载 EBG 结构后,天线驻波  $S_{11}$  低于  $-10\text{dB}$  的频带为  $(6.13 \sim 6.7)\text{GHz}$ ,带宽为中心频率的  $8.86\%$ ,远远高于普通天线单元的带宽。加入 EBG 结构后,天线的中心频率由  $6.02\text{GHz}$  向高频偏移到了  $6.41\text{GHz}$ 。天线工作频段的展宽及谐振中心频率的上移主要是由于 EBG 结构的作用,EBG 结构的表面贴片相当于贴片附近的寄生贴片,有利于电路调谐,从而展宽频带。由于 EBG 结构工作频带在  $(5.29 \sim 6.91)\text{GHz}$ ,能有效降低天线单元间的耦合系数。从图 5 和图 6 中可以看出,尽管天线单元间放置的 EBG 单元数仅为 3 个,但是工作频带内

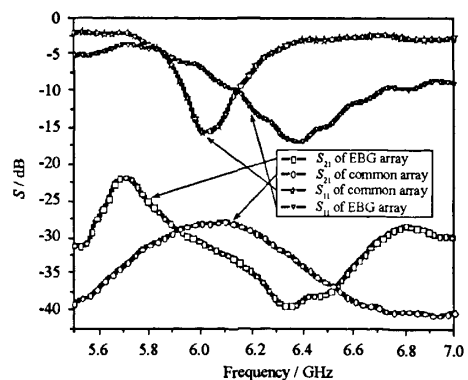


图 6 天线阵单元反射系数及单元间耦合系数

Fig.6 Reflection coefficient of antenna array unit and mutual coupling coefficient

单元间的耦合系数都在一个较低的位置。在天线单元谐振较好的(6.2~6.6)GHz的频带内,耦合系数都低于-35dB,最低的达到了-39.6dB。

## 2.2 天线阵方向图

在微波暗室中分别对普通天线阵和 EBG 结构天线阵的方向图进行了测量,测量频率为 6.15GHz(此时天线单元具有相同的驻波比)。两个天线阵 E 面和 H 面方向图比较如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,加载 EBG 结构后,对 E 面的旁瓣和后瓣抑制效果非常明显,E 面方向图旁瓣及后瓣平均减小 6dB,最大的地方降低了 14dB, H 面方向图比较如图 7(b)所示,天线阵方向波束变窄,天线的旁瓣和后瓣平均减小 5dB,同时天线阵前向增益增加 2.5dB。测量结果说明加载 EBG 结构能有效抑制天线阵的表面波,降低天线旁瓣及后瓣,提高天线阵的增益。

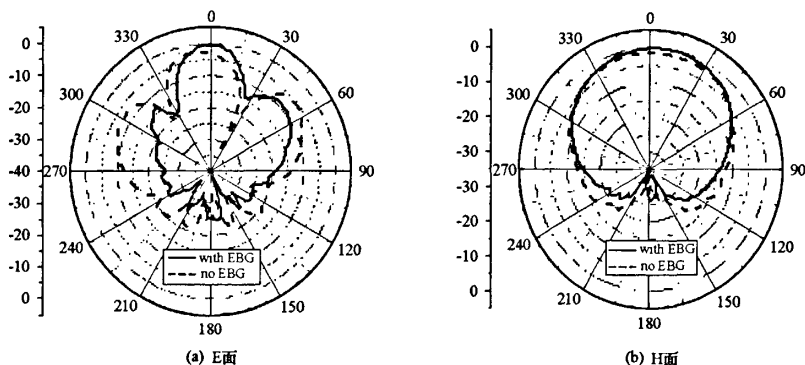


图 7 EBG 天线阵与普通天线阵方向图  
Fig.7 Radiation patterns of EBG and common antenna array

## 2.3 天线阵增益

采用比较法对所设计的两种天线阵增益进行测量,即把待测天线的增益与标准天线的增益进行比较,得出待测天线的增益。普通天线阵与 EBG 结构天线阵的增益曲线如图 8 所示。从图中可以看出,普通天线阵的增益在 6.06GHz 达到最高,为 7.9dB,而在这个频点 EBG 天线阵的增益为 10.4dB,增益提高了 2.5dB。EBG 结构天线阵在 (6.05~6.58)GHz 频带内增益几乎都在 10dB 以上,在 6.41GHz 时 EBG 结构天线阵增益达到了 11.9dB。测试结果表明,采用新的 EBG 结构加载方法,在整个工作频段内有效地提高了天线阵的增益。这主要是由于 EBG 结构的表面波阻带作用,电磁波不能往四周而集中向前辐射,提高了辐射效率。

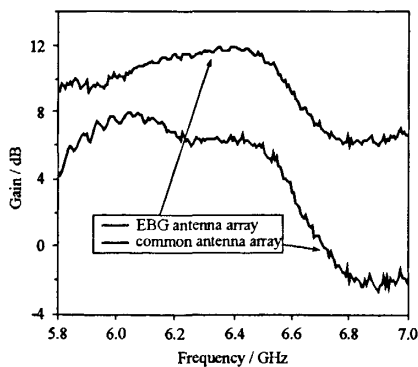


图 8 普通天线阵及 EBG 天线阵的增益曲线  
Fig.8 Gain of common antenna array and EBG array

## 3 结束语

本文研究了新的 EBG 加载方式对微带天线阵性能的影响。所设计微带天线阵由 EBG 结构作为衬底,用以取代替天线的金属底板,有效地提高了微带天线阵的性能。对普通天线阵及 EBG 结构天线阵各种参数进行测量,结果表明以 EBG 结构为衬底的微带天线阵性能远远优于普通天线阵。加载 EBG 结构后,天线阵单元带宽从 3.81% 提高到 8.86%,在整个工作频带内天线阵的增益都得到有效提高,增益最高可达 11.9dB。EBG 结构有效地降低了天线阵单元间的耦合,使天线具有较好的扫描特性。

(下转第 77 页)

出 SCNR 趋于一致,能够进一步改善稀疏导致的角度模糊问题,提高系统的杂波抑制性能。

## 4 结论

针对星载雷达 GMTI 应用,建立了 MIMO 雷达步进频率正交信号的基本参数确定准则,在此基础上,介绍了步进频率 MIMO 雷达的信号模型,并通过空时频联合自适应处理仿真,验证了 MIMO 雷达在杂波抑制和 GMTI 性能上的优势。常规自适应处理方法获得高性能的前提是:必须具有足够的独立同分布的训练样本,但星载雷达所处的杂波环境往往是非均匀的,因此,非均匀环境下的空时频联合处理及其降维方法将是下一步需要深入研究的内容。

## 参考文献:

- [1] Fisker E, Haimovich A, Blum R S, et al. MIMO Radar: An Idea Whose Time Has Come[C]//Proc. IEEE Radar Conference, 2004: 71-78.
- [2] Klemm R. Space-time Adaptive Processing Principles and Applications[M]. The Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [3] Deng Hai. Polyphase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(11): 3126-3135.
- [4] 陆必应. 天基 GMTI 与解模糊方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [5] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 68-71.
- [6] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 159-162.
- [7] Leatherwood D A, Melvin W L, Garnham J. High-fidelity MTI Modeling and Analysis of a Distributed Aperture Spaceborne Concept[C]//AIAA Space 2000 Conference & Exposition, 2000.
- [8] Leatherwood D A, Melvin W L, Berger S. Adaptive Signal Processing for a Spaceborne Distributed Aperture[C]//AIAA Space 2001 Conference & Exposition, 2001.
- [9] Chen Chun-Yang, Vaidyanathan P P. MIMO Radar Space-time Adaptive Processing Using Prolate Spheroidal Wave Functions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 623-635.

(上接第 71 页)

## 参考文献:

- [1] Ramon G, Peter d M, Mario S. Enhanced Patch-antenna Performance by Suppressing Surface Waves Using Photonic-bandgap Substrates [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2131-2138.
- [2] Dan S, Li J Z, Romulo F J B, et al. High-impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden frequency band [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [3] 闫敦豹, 高强, 等. 一种基于改进高阻表面的微带天线[J]. 电子学报, 2004, 33(3): 511-513.
- [4] Jing L, Hung-Yu D Y. Radiation Characteristics of a Microstrip Patch Over an Electromagnetic Bandgap Surface [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2007, 55(6): 1691-1697.
- [5] McKinzie W E, Rogers S D, Fulton M D. Experimental Results of an AMC Antenna Fabricated with a Magnetically-loaded Elastomeric Substrate [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008: 1-4.
- [6] Hajj M, Rodes E, Monediere T. Dual-band EBG Sectoral Antenna Using a Single-layer FSS for UMTS Application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 161-164.
- [7] Dan Q, Lotfollah S F. Improving Microstrip Patch Antenna Performance Using EBG Substrates [J]. IEE Proc. Microw. Antennas Propag, 2006, 153(6): 558-563.
- [8] Fu Y Q, Yuan N C. Elimination of Scan Blindness in Phased Array of Microstrip Patches using Electromagnetic Bandgap Materials [J]. IEEE Antennas Wireless Propag, 2004, 3: 63-65.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>