

线元天线阵列传输特性实验研究

曾刚, 杨宏春, 吴明和, 崔海娟, 孙云卿

(电子科技大学 物理电子学院, 四川成都 610054)

摘要:用脉冲电源产生亚纳秒高斯电脉冲给线元天线馈电, 测试线元天线轴线能量的传输特性。实验结果表明, 在相同轴线距离处, 线元阵列天线轴线能量与单元天线轴线能量之比正比于天线阵列阵元数的平方; 阵列天线轴线能量具有慢衰减传输特性; 对线元阵列天线不同行、列作适当馈电延迟, 可实现辐射电磁波束的空间扫描。所有实验结果在误差范围内与理论计算结果符合。

关键词:线元天线阵列; 亚纳秒电磁脉冲; 慢衰减特性; 波束扫描

中图分类号:TN015; O441.1 文献标识码:A

The Transmission Property Study of Linear Element Antenna Array

ZENG Gang, YANG Hong-chun, WU Ming-he, CUI Hai-juan, SUN Yun-qing

(College of Physical Electronics, University of Electronic Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Fed by sub-nanosecond pulse power, Radial energy of linear element antenna array is offered, the result indicate: The maximum energy of bounded beam is proportional to the square of the number of element of antenna array. The Radial energy curve of linear element antenna array is formed by non-decaying, slow-decaying and fast-decaying distance. Keeping the same line elements of antenna array feeding at same time while each row successive postpone properly, the beam can be restrained within the expected area. within the experimental error. All experimental results are accord with the analytical and numerical results.

Key words: linear element antenna array; sub-nanosecond pulse; slow-decaying property; beam scanning

理论研究表明, 阵列天线对亚纳秒电脉冲将表现出明显的慢衰减特性^[1], 且其轴线能量正比于天线阵列阵元数的平方^[2], 对线元阵列天线不同行、列作适当馈电延迟, 可实现辐射电磁波束的空间扫描。超短电脉冲和超宽带阵列天线的这些性质, 使它们在高功率微波、超宽带通信等许多领域具有重要的应用前景。但这些特性直接的实验证据还很少。本文将报道阵列天线能量传输特性的相关实验结果。

1 理论分析

1.1 物理模型

如图1所示(图中E表示电场方向), 在列方向上, 将各单元蝶形天线作紧密排列, 各列间以间距b作等间距排列, 构成m×m的线元天线阵列。给各单元蝶形天线作相同极性方向馈电, 阵列天线中每一列天线元形成极化方向一致的电磁辐射。这个模型可采用具有均匀电流分布的线元天线阵列辐射器进行理论分析(文献[2]采用的数学模型)。当取b=0时, m×m天线阵列可采用具有均匀电流分布的单元方形辐射器模型进行理论分析(与文献[1]采

用的数学模型类似)。

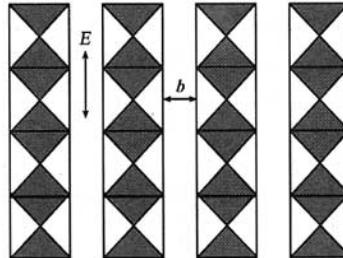


图1 m×m 天线阵列

1.2 理论计算公式

由电磁场理论, 文献[1]中给出了圆形单元辐射器轴线能量传输规律的严格解析解, 它与对应的数值模拟结果表明: 单元圆形辐射器轴线能量G呈不衰减、慢衰减和快衰减3段式传播规律。文献[1]中式(24)给出超短电磁脉冲慢衰减距离区间z为

$$\frac{a^2 - T^2 c^2}{2 T c} \leq z \leq \frac{a^2 - t_1^2 c^2}{2 t_1 c} \quad (1)$$

式中 T、t₁ 分别为超短电脉冲的脉冲宽度和上升沿时间; a 为圆形单元辐射器半径; c 为光在真空中

的传播速度。

对正方形单元辐射器,不能得到轴线能量 G 随慢衰减距离 z 的解析式,但能采用类似方法作数字计算^[3]。计算结果表明,正方形单元辐射器与其内切圆形单元辐射器相比,不衰减、慢衰减距离略长,轴线能量传输曲线相近,方形单元辐射器的不衰减、慢衰减距离近似由式(1)给出。

线元天线阵列轴线能量由文献[2]中式(21)给出,当各列依次作馈电时间延迟 τ 时,阵列波束与轴线夹角 φ 满足

$$\tau = \frac{d}{c} \cos \varphi \quad (2)$$

式中 d 为列中心间距。

2 实验分析

2.1 实验测试电路

如图 2(a)所示。皮秒脉冲由自行研制的四通道 MCPG-I 脉冲电源产生,四通道电脉冲源自于同一种子脉冲信号,各通道脉冲信号参数基本相同(见图 3 中曲线 3,脉冲宽度 363 ps,峰值电压 2 100 V,上升沿 161 ps),且有很好的稳定性与同步性。

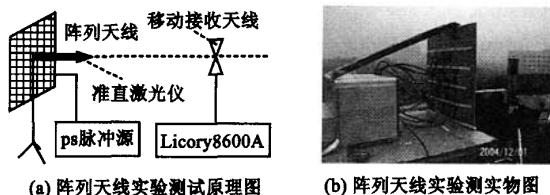


图 2 阵列天线传输特性实验装置图

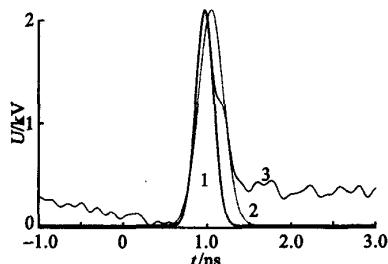


图 3 馈电脉冲波形(馈电电压 U 随时间 t 的变化)

实验时,采用两级 T 型 SMA 接头将脉冲源每一通道分为 4 路电脉冲,同一通道分出的电脉冲给图 1 中同一列天线馈电(见图 2(b)),给各天线馈电的同轴线长度相同。阵列天线中天线元为 8 cm × 8 cm 的对称蝶形天线,移动接收天线尺寸与辐射阵元天线结构参数相同。接收天线接收到的电磁脉冲输入带宽为 6 GHz 的 Licoray8600A 示波器。

在下面各实验测试中,示波器接收到的脉冲波形如图 4 所示(图中波形为同一轴线距离、重复测量 37 次的重叠波形,可见,接收到的电磁脉冲波形具有很好的稳定性),由于接收到的脉冲波形可看作为

三角形脉冲,因此,轴线上不同距离处的能量比等于对应点接收波形的峰值电压平方之比。

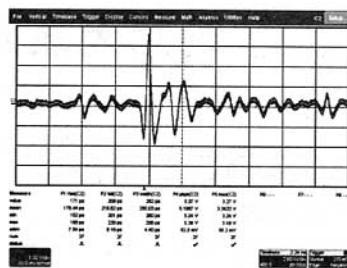


图 4 蝶形天线接收到的电磁脉冲

2.2 阵列天线慢衰减的实验结果与分析

在图 1 中取 $b=0$,称这种布阵方式为稠密布阵, 4×4 稠密布阵轴线能量传播的实验结果如图 5 中曲线 2 所示。由于 MCPG-I 脉冲电源产生的电脉冲不是严格的高斯脉冲(图 3 中曲线 3),与文献[3]的理论分析结果相比,图 3 中采用了两种方法来拟合电脉冲波形。曲线 1 为上升沿与实际脉冲重合,而下降沿是在不重合条件下得到的拟合高斯曲线,其脉冲宽度为 250 ps;曲线 2 为脉冲宽度与实际脉冲相同,当上升沿与下降沿不完全相同的拟合高斯曲线,其脉冲宽度为 360 ps。采用文献[3]的严格模拟计算,图 3 中拟合曲线 1、2 分别对应图 5 中模拟计算结果的曲线 3、1。由图 5 的实验与理论计算结果可知,稠密布阵的阵列天线,其轴线能量传输规律与相同外形尺寸的单元方形天线相似;阵列天线轴线能量传输规律呈不衰减、慢衰减和快衰减的 3 段式传输规律;不衰减、慢衰减段与由式(1)计算的结果相符。

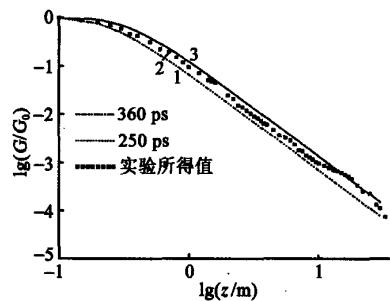
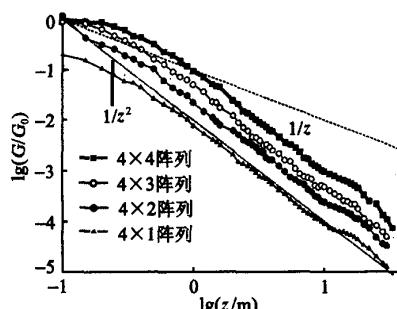


图 5 4×4 天线阵列轴线能量的慢衰减测试

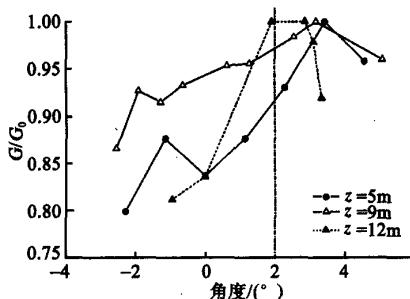
2.3 阵列天线高效传输特性实验结果与分析

文献[2]证明了结论:对轴线上任意 z 点, $m \times m$ 阵列天线与单元天线在该点的能量之比正比于天线阵列阵元数的平方,通常把这个特性称为阵列天线的高效传输特性。在图 1 中取 $b=0$,依次测试 4×1 、 4×2 、 4×3 、 4×4 阵列天线的轴线能量,得到如图 6 所示实验结果。由图可看出,在实验误差范围内,阵列天线高效传输特性得到了很好的实验验证。

图 6 $4 \times M$ 阵列高效传输特性实验验证

2.4 波束扫描的实验结果与分析

在图 1 中, 取 $b=0$, 构成 4×4 线元天线阵列, 然后从第一列到第四列, 依次将馈电的同轴线缩短 2 cm , 同轴线的介质为聚四氟乙烯, 相对介电常数为 2.2。由式(2)易计算出此时波束应该偏离轴线角度为 22° 。在距离阵列天线不同距离处测试到的波束位置如图 7 所示, 图中, 横坐标零位置选择在与中心

图 7 4×4 阵列波束扫描实验验证

轴夹角为 20° 的轴线上。由图可看出, 实验测试到的波束位置介于 $22^\circ \sim 24^\circ$ 之间, 在实验误差范围内, 与理论预期相符。

上述实验结果证明了超短电脉冲的慢衰减特性、阵列天线的高效传输特性与波束扫描特性, 这些基本概念是上世纪 80 年代提出的电磁导弹理论的基本概念^[4-5]。长期以来, 由于技术条件的限制, 没有直接的实验证据, 严重阻碍了高功率、超短电脉冲资源的开发与应用。近 20 年来, 随着高功率、超短电脉冲源研制不断取得突破性进展, 必然开创相关技术开发的新局面。

参考文献:

- [1] 杨宏春, 阮成礼. 脉冲波形对其轴线能量传输特性的影响[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1 430-1 435.
- [2] 杨宏春, 阮成礼. The study of beam scanning for linear element planar antenna array[J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 496-501.
- [3] 杨宏春, 阮成礼. 平面单元电磁导弹辐射器轴线坡印亭矢量时间积分随距离衰减的研究[J]. 四川大学学报, 2001, 38(增刊): 78-86.
- [4] MYERS J M, WU T T. Electromagnetic missiles from currents on fractal sets[C]. Proc SPIE, 1990, 1 226: 314-323.
- [5] ZIOLKOWSKI R W. Localized transmission of electromagnetic energy[J]. Phys Rev A, 1989, 39(4): 2 005-2 033.

《压电与声光》过刊合订本征订通知

应广大读者的要求, 编辑部准备将部分库存期刊装订成合订本, 需订购者请将书款和填好的下表寄到编辑部。

(1) 银行汇款(请随信将汇款凭证复印件和购书详单及寄书详细地址寄给编辑部):

开户单位:中国电子科技集团公司第 26 研究所

帐号:3100027109008801342

开户银行:重庆南岸区工商银行南坪分理处

(2) 邮局汇款地址:重庆市南岸区南坪 2513 信箱《压电与声光》编辑部(邮编:400060)

合订本价格表

年	单价/元	订购数/数	金额/元	年	单价/元	订购数/数	金额/元
1993	25			2000	45		
1994	25			2001	45		
1995	30			2002	65		
1996	30			2003	65		
1997	30			2004	65		
1998	35			2005	65		
1999	25			2006	75		
2007(散本)	60						
合计							
				大写:			小写:

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、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)，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>