宽带透射阵设计及其近场研究



Design of Broadband Transmitarray and Its Near-Field Research

张岩/ZHANG Yan¹,赵超超/ZHAO Chaochao¹, 贾田扬/JIA Tianyang² (1.北京航空航天大学,中国北京100191; 2.中国科学院空天信息创新研究院,中国北京100094)

2. 中国科学阮仝大信息的新研究阮,中国 北京 100094

Beihang University, Beijing 100191, China;
 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202203007 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220606.1715.004.html 网络出版日期: 2022-06-07 收稿日期: 2022-05-24

摘要:提出并设计了一种基于紧耦合偶极子的宽带透射阵天线,该透射阵天线由宽带馈源天线和宽带透射型超表面两部分组成。馈源是经过改进设计的超宽带Vivaldi天线;宽带透射型超表面包括30×15个单元结构,每个单元结构由紧耦合偶极子天线和平行双导线组成。引入等效延迟距离的概念用于设计透射阵,并对其菲涅尔区电场进行研究。

关键词: 电磁超表面; 透射阵天线; 宽带天线; 菲涅尔区

Abstract: A wideband transmitarray antenna based on tightly coupled dipole is proposed in this paper. The transmitarray antenna is composed of a wideband feed antenna and a wideband transmission metasurface. The feed is an improved ultrawide band Vivaldi antenna. The wideband transmission metasurface consists of 30×15 cells, each of which consists of a tightly coupled dipole antenna and parallel metal lines. The concept of equivalent delay distance is introduced to design the transmitarray and its Fresnel zone electric field is investigated.

Keywords: electromagnetic metasurface; transmitarray antenna; wide band antenna; Fresnel zone

(传统设计方案中,电磁波的调控主要通过介质透镜来 实现^{III}。随着科技的发展,无线通信、航空航天等行 业迫切需要具有高增益、宽频带、小重量等特性的天线,同 时基于电磁超表面设计思路的反射阵天线和透射阵天线等概 念被陆续提出。与反射阵不同,透射阵的馈源放置于辐射口 径面的前侧,避免了馈源遮挡问题。1982年,R.MILNE¹²首 次提出透射阵天线,随后透射阵的发展一直比较缓慢。1997 年,香港中文大学的K.W.LAM等¹³通过口径耦合微带贴片 加载传输线的方式实现了360°相移的透射阵单元。2006年, M.R.CHAHARMIR等¹⁴采用多层十字形阵子单元分别设计了 单频和双频的透射阵天线。这些均为透射阵的蓬勃发展奠定 了坚实的基础。

透射阵的代表性设计方法有3种:多层频率选择性表面、接收机-发射机结构、极化转换结构。H. NEMATOLLAHI等^[5]设计了一种3层透射阵单元,可以实现 360°相移。AN W. X.等^[6]使用垂直放置的金属圆柱连接两个 金属层,可以有效增大传输系数幅度和传输相移范围。然 而,由于频率选择表面(FSS)单元的工作带宽具有局限性, 整个透射阵的工作带宽十分狭窄。虽然我们可以通过增加层 数来扩展带宽,但是随着层数的增加,天线的剖面和复杂度 会大大增加。P. PADILLA等¹⁷¹提出了一种包括接收天线、微 带传输线和辐射天线3个部分的透射阵结构,通过调节微带 传输线的长度来实现相位调节。XIAO L.等¹⁸¹设计了一种基于 紧耦合偶极子的宽带平面透射阵天线,该天线可以在9.5~ 16 GHz之间稳定工作。具有接收-发射结构的透射阵天线的 带宽取决于辐射器和移相器的性能,可有效扩大透射阵的带 宽范围。K. MAVRAKAKIS等¹⁹¹提出了一种新的基于极化旋转 的低剖面、宽频带透射阵结构。透射阵单元包括3个金属 层,相邻金属层之间由介质层隔开。

本文的主要研究内容包括:基于紧耦合偶极子结构和时间延迟线技术设计了一种工作于3~9GHz的宽带透射阵单元,然后对其菲涅尔区电场特性进行研究,并对所设计的天线进行加工测试。

1透射阵设计

本节主要针对基于紧耦合偶极子设计的宽带透射阵天线 展开研究,详细介绍了宽带透射阵天线的设计实现过程。

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1807400);国家重点基础研究计划(2019-JCJQ-ZD-067-00);深圳市中央财政引导地方科技发展基金(2021Szvup081)

1.1 宽带透射阵原理分析

透射阵天线的主要作用是将球面波转换为平面波,如图 1所示。

假设产生的定向波束沿 (θ_0,φ_0) 方向传输,出射场的相位记为 ϕ_i , ϕ_i 可以表示为:

$$\phi_i(x_i, y_i) = -k_0 \sin\theta_0 \cos\varphi_0 x_i - k_0 \sin\theta_0 \sin\varphi_0 y_i, \qquad (1)$$

其中, k_0 是自由空间中的传播常数, (x_i,y_i) 是透射阵阵面上 第*i*个单元中心位置的坐标。定义 R_i 为馈源到第*i*个单元的 中心位置的距离, $\Phi_i(x_i,y_i)$ 为第*i*个单元补偿的相位,公式 (1)中等式左右两边分别除以 k_0 ,可以得到:

$$\frac{\Phi_i(x_i, y_i)}{k_0} = -\sin\theta_0 \left(\cos\varphi_0 x_i + \sin\varphi_0 y_i\right) + R_i$$
⁽²⁾

令 $d_i = \Phi_i(x_i, y_i)/k_0, d'_i = d_i - d_1$,则归一化的等效延迟 距离的具体表达式为:

 $d'_{i} = -\sin\theta_{0} [\cos\varphi_{0}(x_{i} - x_{1}) + \sin\varphi_{0}(y_{i} - y_{1})] + (R_{i} - R_{1})_{o} (3)$

可以看出,在一个频率范围内,一个透射阵单元的等效 延迟距离不会随着频率的变化而改变。因此,该透射阵单元 可用于补偿该工作频带内任意频率的空间相位延迟。

1.2 宽带透射阵单元设计

宽带透射阵单元的整体结构示意图、上下层偶极子图案 如图2所示。该透射阵单元由一对紧耦合偶极子、一对平行 双导线和金属接地板3个部分组成。为避免共模谐振的发 生,本文通过基于时间延迟技术的平行双导线来实现超宽带 工作频带内的相移可调。



▲图1透射阵工作原理示意图

其中,两个偶极子天线分别印刷在材料为 Rogers RO4003C的介质板上、下表面上。介质板厚度为0.813 mm, 介电常数为3.55。紧耦合偶极子天线之间的耦合电容是通过 相邻单元末端的横向枝节和位于介质板异侧的寄生贴片引入 的。偶极子天线的接地板由两片金属组成,两个金属片之间 的间距为5 mm。设计的透射阵单元的具体参数如表1所示。



▲图2 设计的宽带透射阵单元结构模型

▼表1 宽带透射阵单元的结构参数

参数	t	d_x	d_y	h_1	w_f
数值/mm	0.813	15	20	10	0.5
d、d.:上下介质板	1	t:上层介质板厚度			

n1:金属接地板距上下介质板的距离 v

 W_{f} :传输线的宽度

宽带透射阵单元的设计可以分为紧耦合偶极子天线单元 设计和传输线设计两个部分。

1.2.1 紧耦合偶极子天线设计

本文所设计的天线在蝶形紧耦合偶极子单元的基础上, 通过在辐射贴片同侧增加横向枝节并在辐射贴片异侧增加寄 生贴片实现了相邻偶极子单元之间的耦合电容强度增强,从 而实现了超宽带的工作特性。

天线模型及其等效电路如图3所示, C₁表示由横向枝节 结构产生的耦合电容, C₂表示由寄生贴片结构产生的耦合 电容。图4为本文设计的紧耦合偶极子天线反射系数与频率 的关系图。由图4可以看出,在3~9 GHz的频率区间里,反 射系数均小于-10 dB。

1.2.2 传输线设计

为了实现良好的阻抗匹配,我们对传输线的直角弯头进



行了切角处理。传输线参数L的取值为1~15 mm内的整数, 仿真得到各取值条件下对应的传输系数幅度曲线如图5所 示。从仿真结果可以看出,当L取值不同时,插入损耗均小 于1.8 dB,传输系数的相位会随着频率和参数L的变化而 改变。





▲图4 紧耦合偶极子天线反射系数

图6给出了透射阵单元在不同频率下的归一化等效延迟 距离。可以看出,在不同频率下的归一化曲线几乎重合,这 说明该透射阵单元的归一化等效延迟距离在3~9 GHz频段 内与频率无关,满足透射阵宽带工作特性的要求。

在 MATLAB 中使用数理统计中的最小二乘法,得到拟合函数如下:

 $d'_i(L) = -0.0213 \times L^2 - 6.2379 \times L + 5.7531_{\circ}$ (4)

拟合的曲线如图6所示。使用拟合曲线能够有效减少阵 面在不同工作频点的误差损耗。

1.2.3 馈源设计

对于本文设计的 Vivaldi 天线,在辐射金属面上进行开 槽,可减小终端反射的电流,改善天线反射系数,提高天线 辐射特性。同时,也可以改变扇形短路端的张角,对馈电部 分的阻抗匹配进行优化。图7给出了相应的天线模型及其反 射系数曲线和方向图。



▲图6 透射阵单元的归一化等效延迟距离

1.3 阵面设计

本文设计的透射阵由 30×15个单元组成, 阵面尺寸为 300 mm×300 mm, 焦径比为0.5。图8为以透射阵中心位置 的单元为参照得到的电磁波在空间传输过程中的等效延迟距 离分布。依据等效延迟距离和单元传输线参数L之间的函数 关系,可实现透射阵的设计。最终的模型图如图9所示。











▲图7 Vivaldi天线模型及其反射系数曲线和方向图

2 宽带透射阵天线的性能分析

基于拟合函数的设计方法,本文实现了宽带透射阵天线 的阵面排布和联合仿真。距离阵面150 mm平面处的电场分 布如图10所示。



▲图10 电场分布图

由仿真结果可以看出,在透射阵的菲涅尔区,中心区域 的相位波动较小,幅度波动较为明显,这是因为透射阵是以 相位为依据进行阵面设计与排布的。经过进一步细化设计 后, 该透射阵有望用于天线测量系统。

3 宽带透射阵天线的加工应用

为了证实设计方法的有效性,我们加工制造了透射阵样 品(如图11所示),并对样品进行了测试。如图12和图13 所示,天线具有稳定的辐射方向图,能够实现较好增益。

4 结束语

本文提出并设计了一种基于紧耦合偶极子的宽带透射阵 天线,可实现3~9GHz的超宽工作带宽。其中,宽带透射 阵单元由紧耦合偶极子结构和平行双导线组成,在较宽工作 频带内具有良好的传输特性和360°的相移特性。此外,本 文还对菲涅尔区电场分布进行了研究,为了证实设计方法的

有效性,对所设计的透射阵天线进行了加工与测试。



▲图 11 透射阵天线测试演示图







▲图13 不同频率下方向图测试结果与仿真结果对比

致谢

本研究得到北京航空航天大学吕善伟教授和全绍辉教授 的帮助,向他们表示感谢! based on polarization- rotating miniaturized-element frequency selective surfaces [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(3): 2128-2137. DOI: 10.1109/TAP.2019.2949694

简 介

参考文献

- [1] WU X, ELEFTHERIADES G V, VAN DEVENTER-PERKINS T E. Design and characterization of single- and multiple-beam mm-wave circularly polarized substrate lens antennas for wireless communications [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2001, 49(3): 431–441. DOI: 10.1109/22.910546
- [2] MILNE R. Dipole array lens antenna [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1982, 30(4): 704–712. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142835
- [3] LAM K W, KWOK S W, HWANG Y, et al. Implementation of transmitarray antenna concept by using aperture-coupled microstrip patches [C]// Proceedings of 1997 Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE, 1997: 433– 436. DOI: 10.1109/APMC.1997.659416
- [4] CHAHARMIR M R, ITTIPIBOON A, SHAKER J. Single-band and dual-band multilayer transmitarray antennas [C]//Proceedings of 2006 12th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and Canadian Radio Sciences Conference. IEEE, 2006: 1–4
- [5] NEMATOLLAHI H, LAURIN J J, PAGE J E, et al. Design of broadband transmitarray unit cells with comparative study of different numbers of layers [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(4): 1473–1481. DOI: 10.1109/TAP.2015.2402285
- [6] AN W X, XU S H, YANG F, et al. A double-layer transmitarray antenna using Malta crosses with vias [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64(3): 1120–1125. DOI: 10.1109/TAP.2015.2513427
- [7] PADILLA P, MUÑOZ-ACEVEDO A, SIERRA-CASTAÑER M. Passive microstrip transmitarray lens for Ku band [C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation: IEEE, 2010: 1–3
- [8] XIAO L, QU S W, YANG S W. Wideband planar tightly coupled dipole transmitarray [C]//Proceedings of 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2019: 1–4
- [9] MAVRAKAKIS K, LUYEN H, BOOSKE J H, et al. Wideband transmitarrays



作 者



赵超超,北京航空航天大学在读硕士研究生,研

贾田扬,中国科学院空天信息创新研究院助理工 程师;主要从事天线设计工作;发表国际会议论 文1篇。