



近场目标自适应聚焦天线

王身云 郑昊予 李阳

Antenna with adaptively focusing on near-field target

Wang Shen-Yun Zheng Hao-Yu Li Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 218402 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201525

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201525>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

物理学报. 2017, 66(6): 064102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064102>

一种新型的低散射微带天线阵设计

Novel design of microstrip antenna array with low scattering performance

物理学报. 2019, 68(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181708>

天线方向系数的一类计算逼近方法

A class of approximate computation method for antenna directivity

物理学报. 2020, 69(2): 028401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191268>

超构天线：原理、器件与应用

Meta-antenna: principle, device and application

物理学报. 2017, 66(14): 147802 <https://doi.org/10.7498/aps.66.147802>

机载极化阵列多输入多输出雷达极化空时自适应处理性能分析

Performance analysis of polarization-space-time adaptive processing for airborne polarization array multiple-input multiple-output radar

物理学报. 2017, 66(4): 048401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.048401>

小型低频发射天线的研究进展

Research progress of small low-frequency transmitting antenna

物理学报. 2020, 69(20): 208401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200792>

近场目标自适应聚焦天线*

王身云^{1)2)†} 郑湜予²⁾ 李阳²⁾

1) (南京信息工程大学应用电磁研究中心, 南京 210044)

2) (南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

(2020年9月13日收到; 2020年10月4日收到修改稿)

为了对位于天线近场区的目标进行定位和能量传递, 提出了一种近场目标自适应聚焦天线的设计原理. 当无源目标位于阵列天线近场区域时, 通过检测发射阵列天线到接收天线之间的电磁散射参数, 建立发射阵列天线到接收天线之间的功率传输方程, 通过特征值方法优化求解功率传输效率的最大值, 即可获得发射阵列天线在目标位置产生聚焦效应的激励分布. 实验过程中, 随机预设了多个不同位置、不同电磁参数和不同形状的近场目标, 均获得了与预设目标位置相符合的电场聚焦分布效果. 该近场目标自适应聚焦天线能够有效地将辐射电场聚集到位于近场区域的随机目标位置, 从而实现目标的定位、跟踪和能量传递, 聚焦效应对近场目标的位置、形状和电磁参数均不敏感.

关键词: 自适应天线, 阵列聚焦天线, 目标定位

PACS: 84.40.Ba, 84.40.Ua, 07.57.Kp

DOI: 10.7498/aps.69.20201525

1 引言

电磁场的聚焦效应在无线能量传输^[1-4]、目标成像^[5-8]、局部靶向加热治疗^[9-13]、近场通信^[14-17]及非接触传感^[18,19]等领域具有广泛应用. 微波频段的电磁场聚焦效应可以采用透镜聚焦天线^[20]、反射面聚焦天线^[16]和相控阵列聚焦天线^[9-15]等形式来实现. 相控阵列聚焦天线可以通过灵活调整阵列天线单元的激励分布, 实现近场聚焦区域的扫描, 因而近年成为研究热点. 实现阵列天线近场聚焦的方法主要有几何光学方法^[21,22]、时间反演法^[9]、全局优化方法^[11]及最大功率传输方法^[23]等. 这些方法具有不同的特点和优势, 但在设计阵列天线近场聚焦的激励分布时, 均需要确定聚焦区域的位置. 例如, 文献^[21]在设计阵列聚焦天线时, 首先需要确定聚焦距离, 再利用几何空间电场相干增强原理, 计算了阵列天线单元所需要的相位分布; 文

献^[12, 13]在设计人体局部靶向加热治疗阵列聚焦天线时, 需要将虚拟接收天线置入到确定的病灶位置, 通过优化发射阵列到接收天线之间的最大功率传输, 实现发射天线在病灶区域的电场聚焦. 然而, 针对某些聚焦位置不确定的场合, 上述阵列聚焦天线的设计原理不再适用. 典型的场合包括工业传送带上的货物射频标签实识 (radio frequency identification devices, RFID)^[16,17]、地下目标探测等. 文献^[17]报道了一种基于子阵天线的多聚焦阵列天线, 每个子阵天线的电场聚焦到传送带横向方向不同的轨道区域, 当传送带上的货物从不同横向轨道区域经过时, RFID系统通过软件自动切换对应的子列聚焦天线工作, 实现货物的自动识别. 这种方式不仅提高了射频能量利用效率和 RFID系统抗干扰的能力, 也增加了单个 RFID系统读卡器的货物识别范围. 然而, 该多聚焦阵列天线仍然需要提前对各个子阵天线的聚焦区域位置进行精确设计.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61971231) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangsy2006@126.com

针对聚焦区域位置不确定的场合, 提出了一种在天线近场目标位置处电场产生自适应聚焦的阵列天线设计原理. 当有无源目标处于阵列天线近场区域时, 通过检测发射阵列天线与设置在发射阵列天线中间的本地接收天线之间的电磁散射参数, 建立对应的功率传输效率特征值方程, 求解最大功率传输效率对应的阵列天线激励分布, 自动实现发射阵列天线在目标位置处产生电场聚焦, 从而实现近场目标的自动定位及定向能量传递. 本文的贡献在于提出了一种新颖的相控阵列天线近场自适应聚焦设计原理, 其物理本质是通过特征值方法优化发射阵列天线到接收天线之间的最大功率传输效率, 促使近场目标的散射效应最大化, 从而使发射阵列天线在近场目标位置处产生自适应聚焦.

2 自适应聚焦原理

2.1 天线结构

设计了中心工作频率为 2.45 GHz 的阵列天线单元, 其结构为双层介质基板结构, 如图 1(a) 所示. 通过商业软件进行天线单元的结构优化设计, 几何尺寸分别为: $a = 42.5$ mm, $b = 41.5$ mm, $w = 13.5$ mm, $g = 5.0$ mm, $d = 13.5$ mm 和 $h = 5.0$ mm.

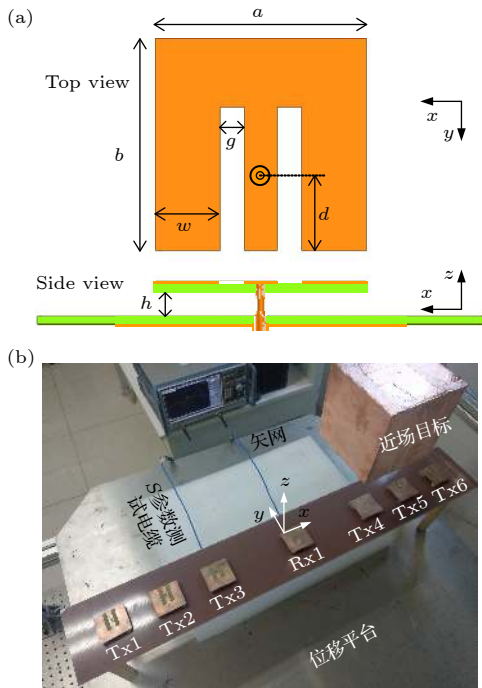


图 1 (a) 阵列天线单元结构; (b) 线形阵列天线实物
Fig. 1. (a) Structure of the array antenna element; (b) photo of the linear array antenna.

两层介质基板均为 FR-4, 厚度为 1.6 mm, 相对介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.02. 在阵列天线单元设计基础上, 选择了 7 个阵列天线单元进行对称线形布阵, 中间天线单元作为接收天线, 记为 Rx1, 其余阵列天线单元为发射天线, 分别记为 Tx1, Tx2, Tx3, Tx4, Tx5 和 Tx6. 为了增加发射天线单元与接收天线单元之间的隔离度, 将 Tx3 与 Rx1, Tx4 与 Rx1 之间的间距设置为 140 mm, 其余相邻发射天线单元间距均为 80 mm, 制备的线形阵列天线实物如图 1(b) 所示.

图 2(a) 和图 2(b) 分别为阵列天线单元的回波损耗和增益方向图, 可以看到, -10 dB 阻抗匹配带宽为 2.34—2.64 GHz, 半功率波束宽度为 $\pm 36^\circ$, 能有效满足线形阵列天线在较大的横向近场区域内实现电场聚焦扫描.

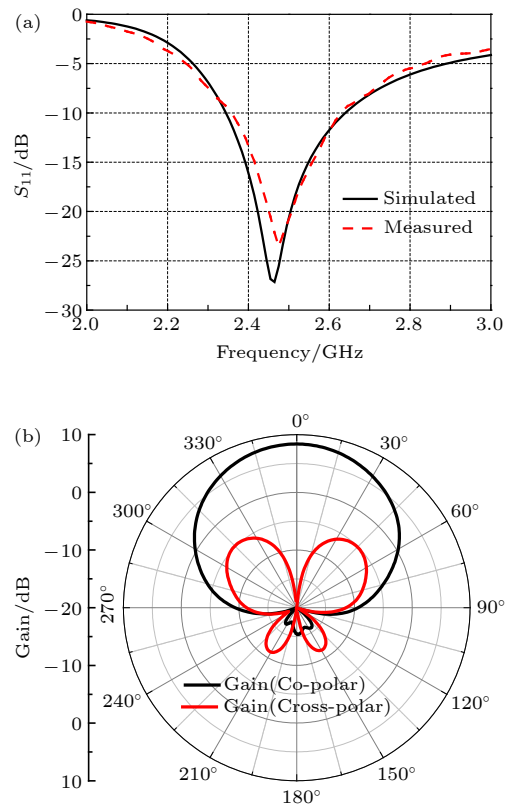


图 2 阵列天线单元的 (a) 回波损耗和 (b) 增益方向图
Fig. 2. (a) Return loss and (b) gain pattern of the array antenna element.

2.2 目标自适应聚焦原理

将边长为 100 mm 的金属方体悬置于线形阵列天线上方某高度的水平面上, 通过测试发射阵列天线与接收天线单元构成的 7 端口网络电磁散射

参数 S , 建立发射天线到接收天线之间的功率传输效率特征值方程, 求解最大功率传输效率对应的特征向量, 从而获得发射阵列天线在无源近场目标位置产生电场自适应聚焦的激励分布. 任意两个阵列天线之间的最大功率传输效率可以通过求解其对应的特征值方程获得 [23]:

$$\mathbf{A}\mathbf{a}_t = T_{\text{array}}\mathbf{a}_t, \quad (1)$$

其中, 功率传输效率 T_{array} 和发射阵列天线激励分布 \mathbf{a}_t 分别对应矩阵 \mathbf{A} 的广义特征值和特征向量, 取 T_{array} 的最大值所对应的特征向量 \mathbf{a}_t 作为发射阵列天线的激励分布, 即为发射阵列天线在目标位置产生电磁聚焦的激励分布; 矩阵 \mathbf{A} 用电磁散射参数表示为 $\mathbf{A} = \overline{\mathbf{S}}_{\text{rt}}^{-1}\mathbf{S}_{\text{rt}}$. 因此, 通过测试本地发射阵列天线与接收天线之间的电磁散射参数 \mathbf{S}_{rt} , 即可以通过求解 (1) 式获得发射阵列天线在近场目标产生电场聚焦的激励分布 \mathbf{a}_t . 当没有近场目标存在时, 收发天线之间具有较高的隔离度, 接收天线直接接收到来自于发射天线单元的功率可以忽略; 而当有近场目标存在时, 接收天线接收的功率主要来源于目标的散射; 当接收天线接收到最大功率时, 则可以判定近场目标在接收天线方向上产生的电磁散射效应达到了最大; 由于目标处于发射阵列天线的近场区域, 只有当发射阵列天线将能量以聚焦形式照射到无源目标上时, 目标才能产生最强的电磁散射. 从上述分析中可以判定, 在近场目标存在条件下, 优化发射阵列天线到接收天线之间的最大功率传输效率, 对应的激励分布会使得发射阵列天线在目标位置处产生电场自适应聚焦现象.

3 结果与分析

为了验证上述发射阵列天线的自适应聚焦工作原理, 采用如图 1(b) 所示的直角坐标系, 将金属方体随机预置于天线上方的某高度的多个坐标位置 (x, y, z) : 位置 1 $(-220 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 480 \text{ mm})$, 位置 2 $(-70 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 480 \text{ mm})$ 和位置 3 $(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 480 \text{ mm})$. 通过矢量网络分析仪检测了金属方体置于不同位置时的 7 端口网络电磁散射参数 \mathbf{S}_{rt} , 分别如图 3(a)、图 3(b) 和图 3(c) 所示. 将 2.45 GHz 的电磁散射参数代入 (1) 式求解, 获得最大功率传输效率 T_{array} 对应的发射阵列天线激励分布 \mathbf{a}_t , 如表 1 所列.

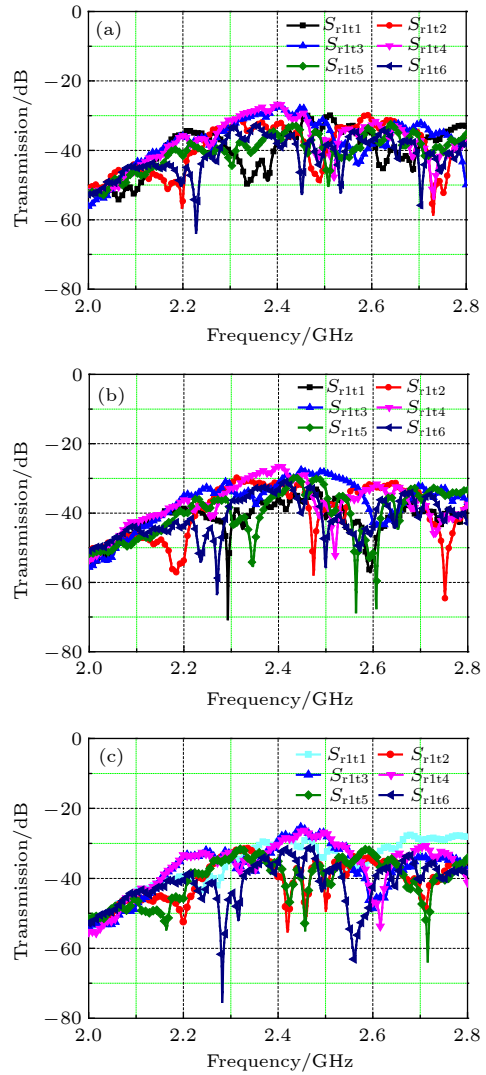


图 3 不同目标位置条件下的测试散射参数 (a) 位置 1; (b) 位置 2; (c) 位置 3

Fig. 3. Measured scattering parameters for target with various positions at (a) position-1, (b) position-2 and (c) position-3.

表 1 不同目标位置条件下的聚焦天线激励分布 (幅值、相位)

Table 1. Excitations (amplitude, phase) of the focusing array antenna for target at various positions.

No.	Position-1	Position-2	Position-3
1	0.385, $\angle 53^\circ$	0.313, $\angle 56^\circ$	0.320, $\angle 16^\circ$
2	0.211, $\angle -72^\circ$	0.276, $\angle -73^\circ$	0.147, $\angle -10^\circ$
3	0.593, $\angle -26^\circ$	0.737, $\angle -45^\circ$	0.657, $\angle -116^\circ$
4	0.583, $\angle -48^\circ$	0.407, $\angle -14^\circ$	0.524, $\angle -111^\circ$
5	0.315, $\angle -147^\circ$	0.326, $\angle -139^\circ$	0.222, $\angle -9^\circ$
6	0.127, $\angle 0^\circ$	0.110, $\angle 0^\circ$	0.346, $\angle 0^\circ$

基于射频相移衰减电路构成的可调谐馈电网络实现了表 1 所列出的发射阵列天线激励分布, 并

在近场测试平台上加载到发射阵列天线上, 测试了预置目标水平面上的归一化电场分布. 测试平台包括了数字可控位移平台、矢量网络分析仪、电场探头和可调馈电网络, 分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示.

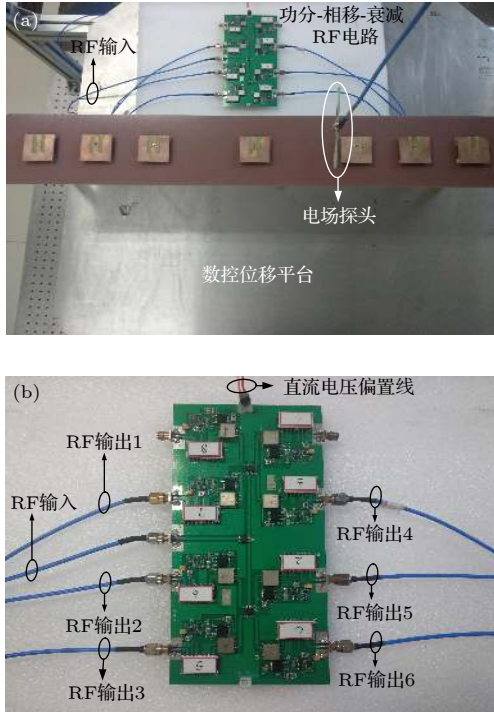


图 4 归一化电场测试 (a) 测试平台; (b) 可调谐射频馈电电路
 Fig. 4. (a) Measurement setup of the normalized electrical field and (b) the corresponding tunable radiofrequency feeding circuit.

目标置于不同位置时所测试的归一化电场分布分别如图 5(a)、图 5(c) 和图 5(e) 所示. 为了对比, 建立了与实验模型相一致的数值仿真模型, 即电磁散射参数和电场分布均由电磁仿真获得, 仿真所得到的归一化电场分布分别如图 5(b)、图 5(d) 和图 5(f) 所示. 图 5 中所标虚线框代表了预置金属方体的形状和在水平面上的位置. 从仿真和实际测试的归一化电场分布图中均可以看到, 归一化电场的聚焦位置与目标预置位置能很好地符合. 实验结果表明, 通过检测本地收发天线单元之间的电磁散射参数, 可以将发射阵列天线辐射的电场自动聚焦到近场区域内的无源目标位置, 从而实现目标的定位和能量传递. 这种阵列天线自适应聚焦的物理本质是利用接收天线感知近场目标的电磁散射信息, 从而作为优化发射阵列天线激励分布的反馈信号.

为了分析近场目标的形状对阵列天线自适应

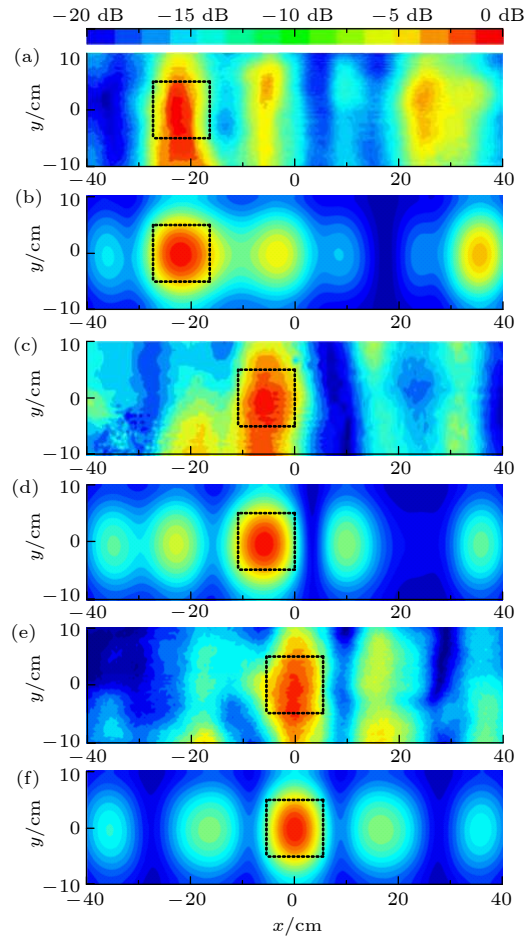


图 5 在 (a) 位置 1、(c) 位置 2、(e) 位置 3 的归一化电场测试分布; 在 (b) 位置 1、(d) 位置 2、(f) 位置 3 的归一化电场仿真分布
 Fig. 5. Tested normalized E -field distributions for the target locating at (a) position-1, (c) position-2 and (e) locations-3. Simulated normalized E -field distributions for the target locating at (b) position-1, (d) position-2 and (f) position-3.

聚焦性能的影响, 将金属方体替换为金属圆柱体 (底面半径为 50 mm, 高为 100 mm) 和金属三棱柱体 (底面边长为 150 mm, 高为 100 mm) 进行研究. 同样将目标预置于线形阵列天线上方某高度水平面上不同的位置 (包括上述 3 个位置以及增加了位置 4 (-140 mm, 0 mm, 480 mm)), 图 6 给出了仿真模型对应的归一化电场聚焦分布. 从图 6 可以看到, 不同形状的金属目标预置在不同位置, 发射阵列天线均能在对应的位置处产生电场聚焦效应, 从而实现多种形状的目标定位和能量传递.

最后, 为了分析目标电磁参数对自适应聚焦性能的影响, 将金属目标替换为介质目标, 选择相对介电常数为 42.2 的甘醇介质, 同样将上述三种形状和尺寸的甘醇目标置于上述的 4 种位置, 对发

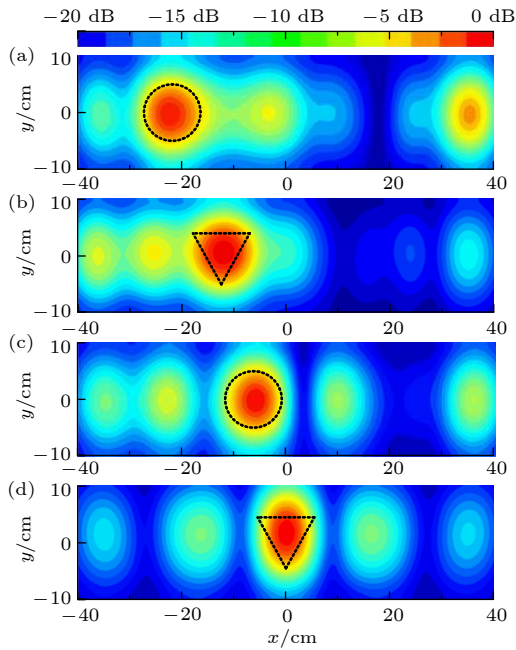


图 6 归一化电场仿真分布 (a) 位置 1 (金属圆柱); (b) 位置 4 (金属三棱柱); (c) 位置 2 (金属圆柱); (d) 位置 3 (金属三棱柱)

Fig. 6. Simulated normalized E -field distributions for various targets locating at (a) position-1 (metal cylinder), (b) position-4 (metal tri-prism), (c) position-2 (metal cylinder) and (d) position-3 (metal tri-prism).

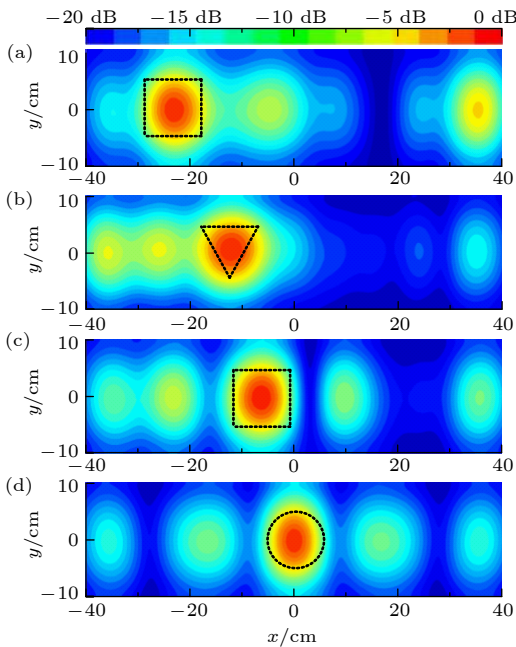


图 7 归一化电场仿真分布 (a) 位置 1 (甘醇方体); (b) 位置 4 (甘醇三棱柱); (c) 位置 2 (甘醇方体); (d) 位置 3 (甘醇圆柱)

Fig. 7. Simulated normalized E -field distributions for various targets locating at (a) position-1 (glycol cube), (b) position-4 (glycol tri-prism), (c) position-2 (glycol cube) and (d) position-3 (glycol cylinder).

射阵列天线进行了自适应电场聚焦仿真实验验证, 归一化电场分布分别如图 7 所示. 可以看到, 当多种形状的甘醇目标置于上述不同的位置时, 发射阵列天线仍然能将辐射电场有效聚焦到预设目标位置处.

根据上述阵列天线的自适应聚焦原理, 当处于阵列天线近场区域的目标能够产生可检测到的电磁散射信号时, 发射阵列天线均能获得在目标位置产生电场聚焦的有效激励分布, 实现未知位置目标的定位和能量传递.

4 结 论

将阵列天线近场目标的电磁散射信号作为反馈信号, 提出了一种实现相控阵列天线在近场目标位置产生电场自适应聚焦的物理方法. 相控阵列天线通过近场目标的自适应聚焦, 可以实现近场目标物体的定位、跟踪和定向能量传递. 该自适应聚焦天线的工作原理不依赖于无源目标所处的具体位置、形状和材料电磁参数, 通过实时检测收发天线之间的电磁散射参数, 计算发射阵列天线的激励分布, 即可获得与目标物体位置相一致的电场聚焦分布. 这种无源目标近场自适应聚焦天线期望被广泛应用于无源标签 RFID 系统、地下目标探测和微波靶向加热治疗等领域.

参考文献

- [1] Yang X D, Geyi W, Sun H C 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 1824
- [2] González Ayestarán R, León G, Pino M R, Nepa P 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 5623
- [3] Chou H T 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 3567
- [4] Cai X, Gu X Z, Geyi W 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 4593
- [5] Vázquez C, García C, Álvarez Y, Ver-Hoeye S, Las-Heras F 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 2874
- [6] Cheng Q, Alomainy A, Hao Y 2017 *IEEE Access* **5** 18975
- [7] Li P F, Qu S W, Yang S W 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 274
- [8] Liu B, Pan Y H, Yan W M 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 204202 (in Chinese) [刘宾, 潘毅华, 闫文敏 2019 *物理学报* **68** 204202]
- [9] Stang J, Haynes M, Carson P, Moghaddam M 2012 *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **59** 2431
- [10] Tofigh F, Nourinia J, Azarmanesh M N, Khazaei K M 2014 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **13** 951
- [11] Nguyen P T, Abbosh A, Crozier S 2017 *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **64** 1335
- [12] He X P, Geyi W, Wang S Y 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 56

- [13] He X P, Geyi W, Wang S Y 2015 *IET Microwaves Antennas Propag.* **9** 1605
- [14] Buffi A, Serra A A, Nepa P, Chou H T, Manara G 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1536
- [15] Siragusa R, Lemaitre-Auger P, Tedjini S 2011 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **10** 33
- [16] Chou H T, Hung T M, Wang N N, Chou H H, Tung C, Nepa P 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 1013
- [17] Chou H T, Lee M Y, Yu C T 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **11** 1746
- [18] Bogosanic M, Williamson A G 2007 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56** 2186
- [19] Stephan K D, Mead J B, Pozar D M, Wang L, Pearce J A 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 1199
- [20] Karimkashi S, Kishk A A 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 1481
- [21] Karimkashi S, Kishk A A 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 3813
- [22] Buffi A, Nepa P, Manara G 2012 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **54** 41
- [23] Shan L, Geyi W 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 5515

Antenna with adaptively focusing on near-field target*

Wang Shen-Yun^{1)2)†} Zheng Hao-Yu²⁾ Li Yang²⁾

1) (*Research Center of Applied Electromagnetics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

2) (*School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

(Received 13 September 2020; revised manuscript received 4 October 2020)

Abstract

To realize near-field target localization and power transfer, an adaptively focusing antenna array is proposed. When a passive target is localized within the near-field zone of an array antenna, the optimal excitation distribution for focusing power onto the object can be obtained by solving an eigenvalue equation, which is established with the tested scattering parameters of the array antenna network. We randomly preset a number of targets with various shapes, materials and positions in the near-field zone, and the corresponding electric field focusing distribution is consistent with the preset target positions. Hence, the proposed near-field adaptively focusing array antenna can automatically focus its radiation onto any target, and such a feature can realize the target localization, tracking and power transfer in the near-field zone of the array antenna.

Keywords: adaptive antenna, focusing array antenna, target localization

PACS: 84.40.Ba, 84.40.Ua, 07.57.Kp

DOI: 10.7498/aps.69.20201525

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61971231).

† Corresponding author. E-mail: wangsy2006@126.com