



一种适用于火灾检测的低旁瓣共形天线

曲元君, 郑文超, 张洪

引用本文:

曲元君, 郑文超, 张洪. 一种适用于火灾检测的低旁瓣共形天线[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2022, 35(1): 128–133. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2022.01.022

QU Yuanjun, ZHENG Wenchao, ZHANG Hong. A Low Sidelobe Conformal Antenna for Fire Detection[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 35(1): 128–133. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2022.01.022

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2022.01.022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高速UART协议的自动化测控系统设计

Automated Instrumentation System Design Based on High-Speed UART Protocol

信阳师范学院学报自然科学版, 2017, 30(3): 422–427. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2017.03.016>

一种可用于压缩态光场弱信号探测的放大电路

An Amplifying Circuit Used for the Detection of Weak Signals with Squeezed State of Light Field

信阳师范学院学报自然科学版, 2017, 30(1): 121–124. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2017.01.027>

一种基于改进SSD的烟雾实时检测模型

Real-time Smoke Detection Model Based on Improved SSD

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(2): 305–311. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2020.02.021>

某型飞机综合气密检测装置的设计

Design of Integrated Airtight Testing Device for Certain Aircraft

信阳师范学院学报自然科学版, 2021, 34(4): 645–649. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.023>

一种NG-DSL系统的低复杂度时频同步算法

Synchronization Algorithm about Time and Frequency with Low Complexity Based on NG-DSL System

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(2): 292–297. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2020.02.019>

一种适用于火灾检测的低旁瓣共形天线

曲元君¹, 郑文超^{1*}, 张洪²

(1. 湖北工业大学 太阳能发电及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

2. 武汉中原电子集团有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘要:设计一种应用于 33 GHz 频段具有金属栅格的天线阵列, 通过泰勒线源激励幅度的设计方法引入栅格结构, 用来减少天线的旁瓣电平, 加强了天线的抗干扰能力。最终的天线阵列由 6 个天线阵元在 y 轴方向上叠加而成, 叠加后天线阵列辐射能力得到了增强。最后通过电小平面对栅格天线进行了共形, 从而减少天线的体积, 并且使天线阵列更好地贴合检测设备。通过 HFSS 电磁仿真结果表明, 在 33 GHz 频段左右, 该天线阵列的增益为 18.69 dB, 旁瓣电平为 -15.04 dB。

关键词:共形天线; 低旁瓣; 高增益; 火灾检测

中图分类号: TN82

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Low Sidelobe Conformal Antenna for Fire Detection

QU Yuanjun¹, ZHENG Wenchao^{1*}, ZHANG Hong²

(1. Hubei Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Storage Operation Control,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Wuhan Zhongyuan Electronic Group Co., Ltd, Wuhan 430205, China)

Abstract: An antenna array with metal grid applied to 33 GHz band is designed, and the grid structure is introduced through the design method of Taylor line source excitation amplitude, which is used to reduce the sidelobe level of the antenna and strengthen the anti-interference ability of the antenna. The final antenna array is composed of six antenna elements superimposed along the Y-axis direction, and the radiation capacity of the antenna array is enhanced after superposition. Finally, the grid antenna is conformed by the electric small plane analysis method, so as to reduce the volume of the antenna and make the antenna array fit the detection equipment better. The results of HFSS electromagnetic simulation show that the gain of the antenna array is 18.69 dB and the sidelobe level is -15.04 dB at about 33 GHz band.

Key words: conformal antenna; low sidelobe; high gain; fire detection

0 引言

红外探测是火灾检测的主要手段,但在能见度不足的情况下,传统的红外探测手段难以有效定位火点。而微波辐射探测由于其可穿透性,能在被植被、浓烟等遮挡情况下,仍能检测出热源,发现火点,因此微波辐射探测是火灾检测手段的重要补充,具备广泛的应用前景。天线作为微波辐射计系

统中的重要组成部分,其性能(增益、旁瓣、效率等)与微波辐射计的探测灵敏度、探测距离密切相关。

微波火灾检测系统的天线常采用喇叭天线。喇叭天线结构简单、频带宽、功率容量大^[1]。但是喇叭天线的体积一般偏大,不适合作为微波辐射计的检测天线。相控天线具有扫描功能^[2],但电路复杂,体积庞大^[3],也不适合。微带天线因为其剖面薄、印制简单,起初是作为导弹和火箭上的共形天

收稿日期: 2021-06-11; 修订日期: 2021-09-23; * 通信联系人, E-mail: wenchaozheng@hbut.edu.cn; 395234876@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601399); 博士科研启动基金(BSQD2020011); 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室开放基金项目(HBSEES202007)

作者简介: 曲元君(1992—),男,湖北襄阳人,助理工程师,硕士,主要从事射频电路、无线通信研究; 郑文超(1986—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要从事电子通信研究。

线使用,目前已被大范围应用在飞行器和便携设备上。微带天线固然也有缺点,比如带宽窄^[4]、效率较低^[5],但是微带天线的优点十分明显:体积小,重量轻,易与载体共形,且阵列化后可与 Wilkinson 功分器相连,通过功分器工作在不同的工作模式^[6]。基于上述分析,针对接收天线小体积、高增益的要求,提出一种共形的微带栅格天线,在继承微带天线体积小、成本低优点的基础上,实现共形结构,保持低旁瓣、高增益的特性。

1 火灾检测应用场景及对共形天线的要求

微波辐射计在火灾检测中的应用场景如图 1 所示,微波辐射计的接收天线负责采集火点发出来的电磁信号,微波辐射计可采用手持式或者头戴式,头戴式需一般采用共形结构。火灾现场由于烟雾浓度大、障碍物多,使得红外信号衰减非常明显,设计的接收天线通过捕捉电磁波信号,能够有效地检测到火灾现场。考虑到信号的频率与可利用频带宽度有紧密的联系,频率越高,频带宽度就越宽,采用 33 GHz 的天线作为接收天线。在保证信息容量的同时也确保信号的穿透能力不至于太弱。



图 1 接收天线在火灾的应用场景

Fig. 1 Application scenario of receiving antenna in fire

1.1 共形天线的优势

共形天线是一种和物体外形保持一致的天线,目的是让天线能够和物体结构相融合,让天线不会给系统带来额外的负担。火灾现场外部条件十分恶劣,对检测天线的体积也有较高的要求,天线共形后可以有效地减少检测天线的体积。

1.2 共形天线的选型

共形天线由其共形的曲面不同可分为单曲面天线、双曲面天线、混合表面天线^[7-8]。单曲面天线(尤其是圆柱面)能够方便地展开和分解平整表面,且关键参数可由二维分析获得^[9],并且共形后可以穿过部分吸波材料^[10],穿透力强。因此圆柱面共形天线的应用非常多。图 2 是基于高频仿真软件 HFSS 所设计的共形天线结构图,由图 2 可知,共形天线由天线阵元、单曲面介质基板和馈电探针组

成,下面会定量地分析天线阵元,使天线在共形的条件下实现低副瓣、高增益的性能。

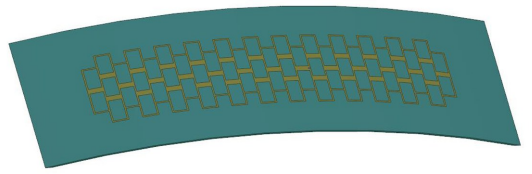


图 2 共形天线结构图

Fig. 2 Conformal antenna structure

2 火灾检测天线的基本结构

2.1 天线阵元的结构设计

基于火灾检测天线的基本要求,选择了栅格微带天线阵列作为检测天线,栅格天线是一种轻薄的辐射元件,主要结构为一个衬底以及若干个金属板组成,衬底称为地平面^[11]。然后用印刷电路技术将薄金属导体沉积在基板上,具体结构如图 3 所示。

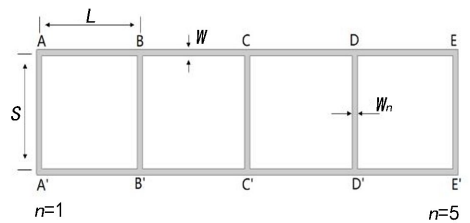


图 3 栅格天线的基本结构

Fig. 3 Basic structure of grid antenna

2.2 天线阵元的参数计算

栅格天线阵的阵元长、宽以及阵元相邻的线宽均与其匹配的频率有关,根据文献^[12],可以得到栅格天线的一般经验公式。其中阵元单元的长 S 与宽 L 可以表示为:

$$S = 8.09 \text{ mm} = 0.447\lambda, \quad (1)$$

$$L = 17.80 \text{ mm} = 0.983\lambda, \quad (2)$$

$$W = 4\alpha = 0.027\lambda. \quad (3)$$

其中: λ 是在 33 GHz 的工作频率下的波长, α 是归一化后的常数。计算得到每个阵元单元的初始值 $S=3.6 \text{ mm}$, $L=7.2 \text{ mm}$,阵列单元之间的线宽 $W=0.36 \text{ mm}$ 。设计完成后,通过高频结构仿真器 HFSS 进行仿真,仿真的模型图如图 4 所示,介质基板采用 Rogers RT5880,介电常数 $\epsilon = 2.2$,厚度 $h = 2 \text{ mm}$ 。 L_n 是第 n 个阵列单元的长度, W_n 是第 n 个阵列单元的宽, r_n 表示阵列单元垂直方向的线宽, R_n 表示阵列单元水平方向的线宽。

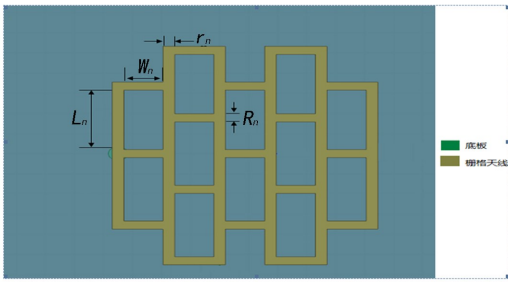


图 4 天线阵元的 3D 模型

Fig. 4 3D model of antenna element

天线阵列采用 50Ω 的同轴线馈电,由式(1)~(3)可以知道, L_n 、 W_n 、 r_n 、 R_n 与天线的工作频率有着密切的关系,仿真后的方向图如图 5,从仿真的结果看,设计的格天线阵列虽然初始增益非常高(12.3 dB 左右),但是它的旁瓣电平也比较高(-3.45 dB)。与预期值相比有一定的距离,所以运用泰勒加权法(Taylor weighting)以及将天线阵元阵列化,来分别降低天线的旁瓣电平以及天线的增益。

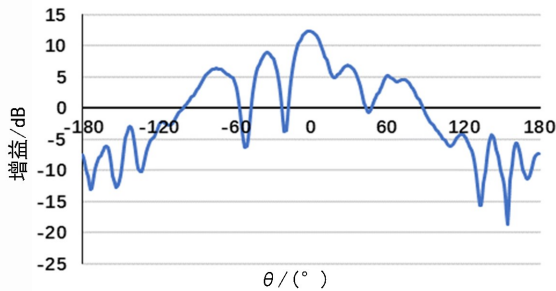


图 5 天线阵元的 E 面方向图

Fig. 5 E-plane patterns of antenna array elements

3 天线阵列优化

阵列天线的单元数目、单元间距、单元线宽等阵列单元的相关参数决定了阵列天线的方向图的主瓣宽度、副瓣电平等特性^[13]。阵列单元的相关参数可以看作阵因子,而阵列天线的方向图可以看作阵列函数,下面运用泰勒加权法来调整阵因子,进而可以得到阵列函数。

3.1 泰勒加权法降低旁瓣电平

泰勒加权综合法是通过切比雪夫多项式,对阵元的激励幅度进行加权^[14],使天线的辐射方向符合所要求的特性,通过文献[15-17]可以总结出泰勒加权的一般步骤:

1)根据给定副瓣电平的要求 $SLL = -15 \text{ dB}$

求得主副瓣电平之比 R_0 ,

$$R_0 = 10^{\left(\frac{SLL}{20}\right)}. \quad (4)$$

2)求出常数 A 值,

$$R_0 = \cosh(\pi A). \quad (5)$$

3)确定常数值:

$$\bar{n} \geq 2A^2 + \frac{1}{2}. \quad (6)$$

\bar{n} 值越大,主瓣越窄,旁瓣电平越低,但 \bar{n} 值过大会导致激励幅度变化剧烈。

4)确定泰勒方向图的各个根 x_n :

$$x_n = \begin{cases} \pm \sqrt{A^2 + \left(n - \frac{1}{2}\right)^2}, & n \leq \bar{n} - 1, \\ \pm n, & n \geq \bar{n} \end{cases}. \quad (7)$$

5)归一化求出 $s(x, A, \bar{n})$

$$s(x, A, \bar{n}) = \frac{[(\bar{n} - 1)!]^2}{(\bar{n} - 1 + x)! (\bar{n} - 1 - x)!} \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} \left(1 - \frac{x^2}{x_n^2}\right), \quad (8)$$

式中 $x = \frac{L}{\lambda} \cos \theta$ 根据阵列函数可求出各个辐射特性参数。之后求出加权系数 I_n ,

$$I_n = I(z_n) = 1 + 2 \sum_{i=1}^{\bar{n}-1} s(i, A, \bar{n}) \cos\left(\frac{2i\pi}{L} Z_n\right). \quad (9)$$

根据泰勒加权的一般步骤,把阵列单元的线宽一一进行赋值,如图 6 所示,可以得到各缝偏离中轴的距离值,见表 1。

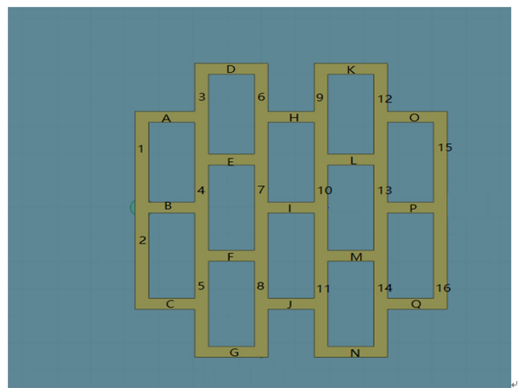


图 6 泰勒加权示意图

Fig. 6 Taylor weighting diagram

优化和微调以后改进模型如图 7。利用 HFSS 软件对优化后的阵元进行仿真,将得到的结果跟优化前的天线进行对比,其中红色曲线是优化后的增益曲线,蓝色曲线是优化前的增益曲线。结果如图 8。

表 1 各缝偏离中轴的距离值

Tab. 1 Distance value of each seam from the central axis

天线缝隙 编号	偏离中轴的 距离	天线缝隙 编号	偏离中轴 距离
1	0.36	A	1.2
2	0.36	B	1.23
3	0.36	C	1.16
4	0.36	D	1.13
5	0.36	E	1.09
6	0.67	F	1.04
7	0.69	G	0.96
8	0.70	H	0.93
9	0.76	I	0.9
10	0.83	J	0.88
11	0.87	K	0.85
12	0.96	L	0.83
13	1.01	M	0.81
14	1.04	N	0.76
15	1.09	O	0.72
16	1.14	P	0.69
		Q	0.72

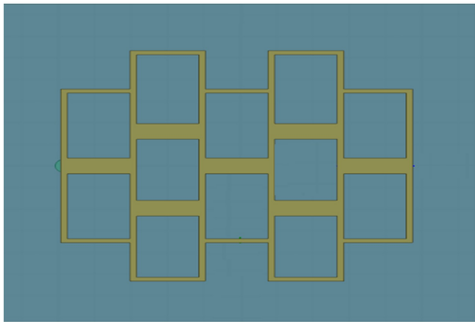


图 7 优化后的阵元模型图

Fig. 7 Optimized element model diagram

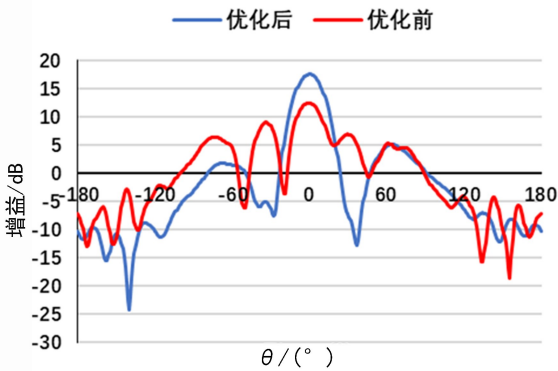


图 8 优化后的 E 面方向图

Fig. 8 Optimized E-plane patterns

通过优化后可以看出,栅格天线阵列的增益从

原来的 12.4 dB 增加到了 17.4 dB,旁瓣电平为 -12.43 dB。改进后的天线性能得到增强。

3.2 天线阵元阵列化及共形

天线阵的工作原理可以看成电磁波的叠加,因此将天线阵元阵列化以后,天线的增益会变得更 高。阵列化后的天线模型如图 9。

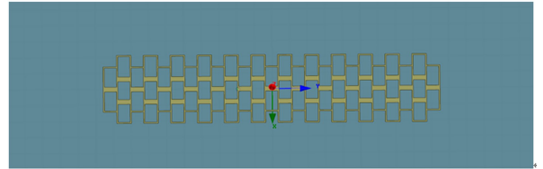


图 9 阵列天线模型图

Fig. 9 Array antenna model

将 6 个阵元天线在 y 轴方向进行叠加,用过 HFSS 仿真后,得到天线阵列的增益曲线,用改进后的天线阵元与图 5 设计的阵列天线单元的方向图进行比较,比较图如图 10。

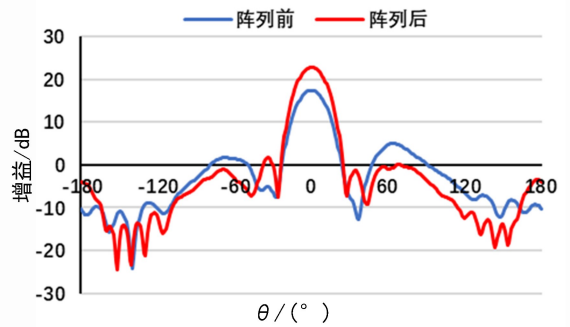


图 10 阵列天线 E 面方向图

Fig. 10 E-plane pattern of array antenna

可以看到天线阵列的增益的确有显著的增强。虽然由于叠加效应的缘故,旁瓣也有所增加。但是由于旁瓣电平本来就处于一个较低的水平,所以叠加以后的值也非常低。设计好六元阵列以后,下面进行天线的共形。

共形天线的分析不同于普通的线阵和平面阵,具有很多复杂的因素,比如共形曲面的曲率等。典型的情况如图 11 所示,为单层基板的探针馈电微带贴片天线,用未知的等效面电流替换无限薄微带贴片,这是一个等效(外部)问题,

共形天线的分析非常困难,但是基于圆柱表面的共形有很多研究人员进行了大量的研究。把共形天线的截面基板半径设为 100 mm,根据文献 [18-19]得到共形后的贴片天线如图 11。

共形前的天线阵列 E 面方向图(红色曲线)与共形后的阵列方向图(蓝色曲线)如图 12 所示。

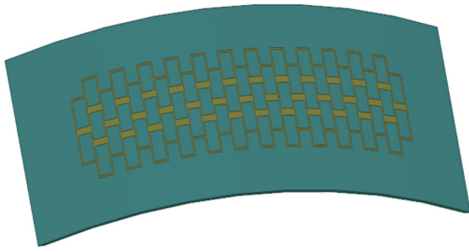


图 11 共形天线模型

Fig. 11 Conformal antenna model

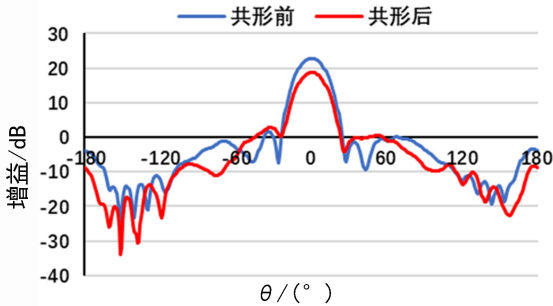


图 12 共形天线 E 方向图

Fig. 12 E-plane pattern of conformal antenna

由于共形的原因,共形后天线的增益有所衰减,但是衰减后的增益依然很高,辐射效率大于50%,符合火灾检测的要求。

4 结论

提出了栅格微带天线的设计以及优化方法,优化的过程中发现微带天线的线宽与天线的旁瓣电平和主瓣电平有十分密切的关系。通过泰勒加权法对微带栅格天线进行合理的优化,使得优化后的天线旁瓣电平降低至 -15.04 dB,增益增加至 18.69 dB,增加了栅格微带天线的定向性。由于共形天线的特点就是与载体外形保持一致,因此共形天线有很强的适应性,在检测领域运用非常广泛。但是共形阵的各天线阵元并不在一个阵面上,因此,一些特殊的共形阵的分析和工程实现难度较大。设计的栅格天线阵列体积小、方向图稳定、易于安装加工且具有强穿透能力。可应用于多数火灾检测辐射设备。

参考文献:

- [1] GHOLIPOUR Z, AHMADI-SHOKOUH J. Substrate integrated waveguide corrugated horn antenna[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 109(3): 1605-1614.
- [2] 李晓今, 郭先松, 李记任, 等. 一种超宽带, 低交叉极化, 低剖面的相控阵天线单元设计[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(21): 5-9.
LI Xiaojin, GUO Xiansong, LI Jiren, et al. Design of an ultra-wideband, low cross polarization, low profile phased array antenna element[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(21): 5-9.
- [3] NAEINI M R, FAKHARZADEH M, FARZANEH F. Ka-band frequency scanning antenna with wide-angle span[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(2): 231-246.
- [4] KHAN T, ROY C. Prediction of slot-position and slot-size of a microstrip antenna using support vector regression[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(3): e21623.
- [5] CHAUHAN E S, KHANDKA S, KUMAR A. Synthesis of goblet shape defected ground slotted microstrip patch antenna[J]. *Journal of Physics(Conference Series)*, 2020, 1644(1): 012045.
- [6] 吴云飞, 张海丰, 朱雪彤, 等. 一种新型多工作模式的 Wilkinson 功分器设计[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2020, 33(3): 443-447.
WU Yunfei, ZHANG Haifeng, ZHU Xuotong, et al. Design of a novel multi-mode Wilkinson power divider[J]. *Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 33(3): 443-447.
- [7] WU M J, HUANG J J, ZHANG X F, et al. Direction finding of coherent non-circular signals for conformal array using geometric algebra[J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2017, 11(10): 1456-1461.
- [8] 王海宝, 王峥, 周娴姊, 等. 基于脉冲转换温度传感方法的电力设备温度监测系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 181-187.
WANG Haibao, WANG Zheng, ZHOU Xianzi, et al. Temperature monitoring system for distribution network equipment using a pulse conversion temperature sensing method[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 181-187.
- [9] 刘肃正. 弹载宽波束双极化天线与双频圆柱共形阵天线设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 3-9.
LIU Suzheng. Design of wide-beam dual-polarized antenna borne on missile and dual-band conformal array for cylinder platform[D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 3-9.

- [10] YAN J, LIU X G, LIU C R, et al. A novel pattern-reconfigurable grid array antenna[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(8): e21794.
- [11] 韩海生, 马佳, 张海丰, 等. 斜入射时网格法在吸波材料吸波机理研究中的应用[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(3): 478-481.
HAN Haisheng, MA Jia, ZHANG Haifeng, et al. Application of the mesh method on the mechanism of absorbing materials at the oblique incidence[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2019, 32(3): 478-481.
- [12] 郑文超, 郎量, 李青侠, 等. 基于遗传算法的栅格天线阵旁瓣电平优化方法[J]. 微波学报, 2011, 27(5): 6-9.
ZHENG Wenchao, LANG Liang, LI Qingxia, et al. An optimization method for sidelobe reduction of wire grid array antenna using genetic algorithm[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(5): 6-9.
- [13] RAM G. Evolutionary optimization for pattern synthesis and reduction of mutual coupling of linear antenna arrays[J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34(1): e4614.
- [14] 薛正辉, 李伟明, 任武. 阵列天线分析与综合[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 63-79.
XUE Zhenghui, LI Weiming, REN Wu. Analysis and synthesis of array antenna[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011: 63-79.
- [15] WANG H, NI J, SUN W Z, et al. A novel frequency scanning monopulse microstrip antenna array[C]//2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Chengdu, China: IEEE, 2010: 1118-1121.
- [16] 吴涛. 频率扫描天线阵设计与仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
WU Tao. Design and simulation of frequency scanning antenna array[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [17] 曹磊, 赵庆生, 王旭平, 等. 基于改进泰勒加权最小二乘法的相量测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 24-30.
CAO Lei, ZHAO Qingsheng, WANG Xuping, et al. A phasor measurement algorithm based on improved Taylor weighted least squares[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 24-30.
- [18] YIN C Y, HU M Z. An efficient analysis method for cylindrical conformal microstrip antenna fed by microstripline [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012, 2012: 1-8.
- [19] JOSEFSSON L, PERSSON P. 共形阵列天线理论与应用[M]. 肖绍球, 刘元柱, 宋银锁, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 57-63.
JOSEFSSON L, PERSSON P. Conformal array antenna theory and design[M]. XIAO Shaoqiu, LIU Yuanzhu, Song Yinsuo, Translation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 57-63.

责任编辑:任长江