

高性能罗兰-C 接收天线设计

高久翔¹, 原艳宁¹, 师振盛², 席晓莉¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安交通大学 信息与通信工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了提高罗兰-C 磁天线的接收能力, 设计了一种顺接串联多层线圈的磁天线。理论推导了顺接串联多层线圈磁天线的信噪比和灵敏度, 最终设计的磁天线大小为 150 mm×150 mm。远场测试接收到了较高信噪比的罗兰-C 信号, 在相同信号调理电路条件下, 与单层单组线圈的磁天线相比, 顺接串联多层线圈的磁天线接收到 3.47 V 的电压信号, 且信噪比高达 30.87 dB, 灵敏度和信噪比分别提高了 82.42% 和 63.20%。顺接串联多层线圈磁天线提高了罗兰-C 磁天线的灵敏度和信噪比, 对罗兰-C 系统在定位方面的应用具有重要意义。

关键词: 罗兰-C; 磁天线; 灵敏度; 信噪比

中图分类号: TN821; TM937

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211820

中文引用格式: 高久翔, 原艳宁, 师振盛, 等. 高性能罗兰-C 接收天线设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 132-136.

英文引用格式: Gao Jiuxiang, Yuan Yanning, Shi Zhensheng, et al. Design of Loran-C receiving antenna with high-performance[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 132-136.

Design of Loran-C receiving antenna with high-performance

Gao Jiuxiang¹, Yuan Yanning¹, Shi Zhensheng², Xi Xiaoli¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Information and Communications Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A kind of magnetic antenna with order series multi-layer coils is made for improving the receiving ability of the Loran-C magnetic antenna. The signal-to-noise ratio and sensitivity of order series multi-layer coil magnetic antenna are derived theoretically. Final designed magnetic antenna size is 150 mm×150 mm. It can receive the completed and clear Loran-C signal in far-field test. Under the same signal conditioning circuit conditions, compared with single layer and single group of coils magnetic antenna, order series multi-layer coils magnetic antenna receives a voltage signal of 3.47 V, and the signal-to-noise ratio is 30.87 dB. The sensitivity and signal-to-noise ratio are improved 82.42% and 63.20% respectively. The proposed method improves the receiving performance of the Loran-C magnetic antenna, which is of great significance to the application of the Loran-C system in positioning.

Key words: Loran-C; magnetic antennas; sensitivity; signal-to-noise ratio

0 引言

罗兰-C 是一种陆基远程无线电导航系统, 工作频段为 90~110 kHz^[1-5]。磁天线相对于电天线具有体积小、灵敏度高、抗干扰能力强^[6]以及便于安装和携带等优点, 常被用来接收罗兰-C 信号。

目前罗兰-C 磁天线的研究主要在方向性优化^[7]、数字移相算法^[8]以及有源接收技术^[9-10]等方面, 这些研究对罗兰-C 磁天线的接收性能提出了更高的要求, 因此需制作灵敏度和信噪比高的磁天线来改善罗兰-C 接收天线的性能。本文研制了一种顺接串联的多层线圈的罗兰-C 磁天线, 能显著提高接收灵敏度又能提升其信噪比, 这极大地提高了罗兰-C 磁天线的稳定性以及扩大了其应用范围, 具有很重要的实际应用价值。

1 磁天线原理

磁天线的本质是加载高性能现代软磁材料的多匝环天线^[11], 在线圈绕组内对电磁波的磁场分量有很强的感应能力, 且软磁材料易被磁化, 可显著增强磁天线的感应能力。

1.1 磁天线的方向图

天线的方向图用来反映天线在各个方向上接收和发送电磁信号的能力。制作天线时, 希望天线在每个方向上均匀辐射, 客观来说, 天线发射的电波是非均匀球面波, 具有一定的方向性。磁天线的方向图和环天线相同, 磁天线的二维方向图形状为一个“8”字形, 三维方向图在空间中呈“苹果”状^[12]。

在电磁仿真软件中建立磁天线模型, 磁芯直径为 10 mm, 长度为 140 mm, 磁导率为 2 300; 线圈被设置为

铜线,表面绕线 100 匝,铜线的直径为 0.3 mm;剖分网格大小为 4 mm×4 mm;激励为 100 kHz 的正弦信号。沿 z 轴放置的磁天线仿真的方向图如图 1 所示。

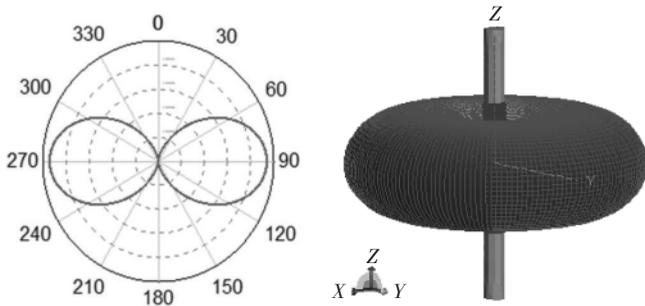


图 1 磁天线的方向图

从图 1 可以看出,磁天线的方向图有两个对立的波瓣,且没有副瓣。仿真表明:磁天线是双向天线。为了优化磁天线的方向性,需要将多根磁天线进行组合,才能获得多方位接收信号的组合天线。

1.2 组合磁天线结构及测向原理

由 1.1 的分析可知,难以通过单一磁天线接收不同角度的罗兰-C 信号,所以在设计罗兰-C 磁天线时采用“十”字交叉环路。两副参数一致的磁天线正交放置,即可实现信号的多方位接收。仿真的三维方向图如图 2 所示,仿真结果表明:“十”字交叉环路磁天线接收模式更为全面。

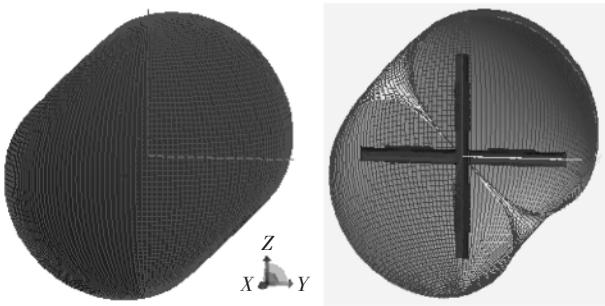


图 2 “十”字交叉环路磁天线方向图

磁天线接收罗兰-C 信号所处的位置为发射台的远场区,此时罗兰-C 信号可视作空间中的均匀平面波。如图 3 所示,环路磁天线接收 A 点发射台的信号产生的两个相互垂直分量 U_{NS} 、 U_{EW} 为:

$$\begin{cases} U_{NS} = KE_0 e^{j\varphi} \cdot \cos\theta + n_1(t) \\ U_{EW} = KE_0 e^{j\varphi} \cdot \sin\theta + n_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:K 为磁天线的电路常数; E_0 为电场强度; φ 为传播中的瞬时相位; θ 为信号的来波方向夹角; $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 分别为两路磁天线的噪声。

由式(1)可以得出来波方向夹角 θ 为:

$$\theta = \arctan \frac{U_{EW} - n_2(t)}{U_{NS} - n_1(t)} \quad (2)$$

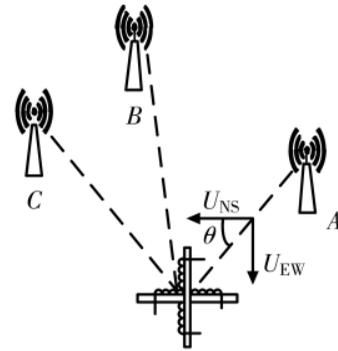


图 3 交叉环路磁天线测向示意图

方位角的测量以及磁天线的放置都会产生不可避免的误差。由式(2)可以看出:为了使误差减至最小,应当尽可能提高磁天线的灵敏度和信噪比。因此,本文设计了一种顺接串联多层线圈的磁天线用以提高灵敏度和信噪比。

2 顺串联多层线圈磁天线

顺串联多层线圈的磁天线设计如图 4 所示,主要由一根磁芯和位于磁芯轴对称两侧的漆包铜线绕制而成,两个天线线圈的结构参数相同,不同层之间径向紧贴,每一匝间轴向密绕。

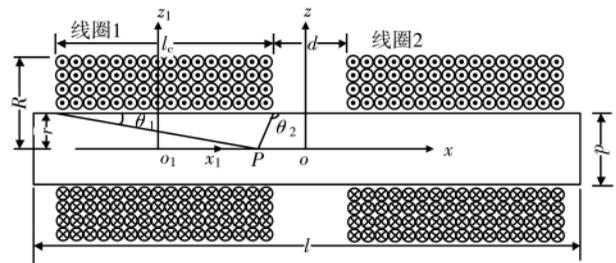


图 4 顺串联多层线圈磁天线

此种方式设计的磁天线将感应电压作为输出信号,磁天线中线圈 1 的输出电压 V 为^[13]:

$$V_i = \sum \left(-n \frac{d}{dr} \cdot \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (3)$$

2.1 灵敏度

单个天线线圈的轴向长度为 l_c ,匝数为 n ,面积为 $S_A = \pi R^2$,磁天线的内、外半径分别为 r 、 R ,线圈 1 和整个磁天线的原点分别为 o_1 、 o 。建立如图 4 所示的坐标系,对于单层线圈,在坐标系 $o_1 x_1 z_1$ 中,输出电压信号的强度为:

$$V_i = \mu_0 \mu_c n S_A \frac{d}{dt} \cdot H (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (4)$$

磁天线的线圈的厚度为 $R - r$,对式(4)沿线圈厚度进行积分,进而得到磁天线线圈 1 考虑厚度的电压信号强度为:

$$V_i = \mu n S_A \frac{d}{dt} \cdot H \cdot \int_r^R (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) dr \quad (5)$$

式中: μ 为真空中磁导率与相对磁导率之积。

将式(5)积分得:

$$V_l = \frac{d}{dt} \cdot H \cdot \left[\begin{aligned} &\left(x_1 + \frac{l_c}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(x_1 + \frac{l_c}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(x_1 + \frac{l_c}{2}\right)^2}} - \\ &\left(x_1 - \frac{l_c}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(x_1 - \frac{l_c}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(x_1 - \frac{l_c}{2}\right)^2}} \end{aligned} \right] \cdot \mu a n S_A \quad (6)$$

其中 a 为单位厚度上线圈的层数。

将 $x_1 = x - \frac{l_c}{2} - \frac{d}{2}$ 代入式(6), 得到磁天线在 oxz 坐标系下的输出电压信号的强度为:

$$V_l = \frac{dH}{dt} \cdot \left[\begin{aligned} &\left(x - \frac{d}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2}} - \\ &\left(x - l_c - \frac{d}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(x - l_c - \frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(x - l_c - \frac{d}{2}\right)^2}} \end{aligned} \right] \cdot \mu a n S_A \quad (7)$$

同理, 得到线圈 2 在坐标系 oxz 下的电压信号强度表达式为:

$$V_r = \frac{dH}{dt} \cdot \left[\begin{aligned} &-\left(x + \frac{d}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2}} + \\ &\left(x + l_c + \frac{d}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(x + l_c + \frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(x + l_c + \frac{d}{2}\right)^2}} \end{aligned} \right] \cdot \mu a n S_A \quad (8)$$

取 $x=0$, 且串联的线圈 1 和线圈 2 的电场强度方向一致, 则磁天线总电压信号强度为 $V = V_l + V_r$ 为:

$$V = \frac{dH}{dt} \cdot \left[\begin{aligned} &\left(l_c + \frac{d}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(l_c + \frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(l_c + \frac{d}{2}\right)^2}} - \\ &\frac{d}{2} \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}} \end{aligned} \right] \cdot 2\mu a n S_A \quad (9)$$

取

$$S_R = \left(l_c + \frac{d}{2}\right) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(l_c + \frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(l_c + \frac{d}{2}\right)^2}} - \frac{d}{2} \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{r + \sqrt{r^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}$$

则磁天线感应到的总电压信号强度为:

$$V = 2\mu a n S_A \frac{dH}{dt} \cdot S_R \quad (10)$$

磁天线接收信号时, 当磁感应强度以正弦形式变化, 即 $H = H_m \cdot \sin(2\pi ft)$, 且磁感线圈是一个半径为 R 的圆环, 则对应的感应电压信号的有效值为:

$$V_e = 4\pi \mu a n f S_A H_m \cdot S_R \quad (11)$$

磁天线的灵敏度为输出电压对磁场强度的传递函数, 故顺接串联多层线圈磁天线的灵敏度为:

$$G = \frac{V_e}{f H_m} = 4\pi \mu a n S_A \cdot S_R \quad (12)$$

由式(3)~式(12)可知, 在制作磁天线时, 随着线圈外半径增大、线圈宽度增加和串联组数的增加, 磁天线的灵敏度均增大, 由此可以说明将磁天线设计为顺串联多层线圈可明显提高磁天线的灵敏度。

2.2 信噪比

依据电阻定义, 磁天线的等效直流阻抗 Z_{DC} 为:

$$Z_{DC} = \frac{4\rho l_c (R-r)(R+r)}{k_T d_0^2 d_{0c}^2} \quad (13)$$

式中: ρ 为线圈导线的电阻率; d_0 、 d_{0c} 分别为导线的直径、去除表面绝缘层导线的直径; k_T 为填充因子, 一般为 0.80~0.95。

由线圈直流阻抗引起的热噪声电压 V_N 为^[14]:

$$V_N = 2\sqrt{k_B T_e Z_{DC} \cdot \Delta f} \quad (14)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数; T_e 为温度; Δf 为带宽。

故顺串联多层线圈磁天线的总信噪比 SNR 为:

$$SNR = \frac{G}{2V_N} = \frac{\pi \mu a n f S_A \cdot S_R}{\sqrt{k_B T_e Z_{DC}} \cdot \sqrt{\Delta f}} \quad (15)$$

由式(13)~式(15)可知, 用顺接串联多层线圈磁天线接收信号时, 随着线圈外半径增大、线圈宽度增加和串联组数的增加, 能显著地提高磁天线的信噪比, 以这种方式制作的磁天线的漆包铜线的直径较小, 绕制多层并串联多个线圈在同一磁芯上不会明显地增大整个磁天线的物理体积和质量, 既满足小型化的要求, 又提升了磁天线的性能。

3 罗兰-C 磁天线设计

磁天线系统的整体结构如图 5 所示, 将磁天线的谐振频率调谐到罗兰-C 信号的中心频率便能接收到功率和效率最高的罗兰-C 信号, 低噪声放大器对磁天线接收到的微弱罗兰-C 信号进行放大, 带通滤波器则对罗兰-C 信号带外的干扰进行抑制。

制作磁天线时, 将漆包铜线绕制成 2 个相同的多匝

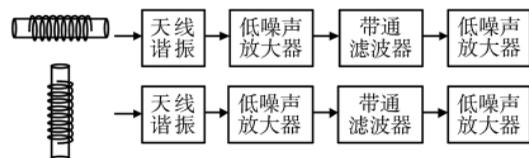


图 5 磁天线系统总体框图

多层小环天线,然后将小环天线串联加载于磁芯上,磁天线制作的相关参数如表1所示。

表1 磁天线的结构参数 (mm)

参数	l	d	l_c	R	r	d_0	n
数值	140	10	34.1	12	6	0.3	300

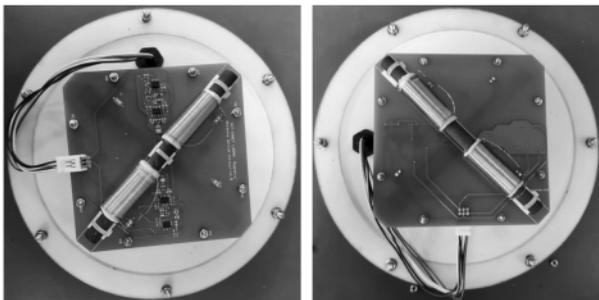
磁天线可等效为电感、电容和电阻元件的串联或并联等多种形式,磁天线的电参数如表2所示,将磁天线与调谐电容并联谐振调谐到100 kHz,接入信号调理电路中观测接收到的罗兰-C信号。

表2 磁天线的电参数

电参数	$Z_0/M\Omega$	f/kHz	L_1/mH	C_1/pF	$R_1/M\Omega$
未调谐	1.302 6	126.75	12.268	127.92	3.191
调谐	2.309 6	100	12.133	208.48	5.821 6

4 罗兰-C 磁天线的实验验证

将磁天线平行架设在距离地面有一定高度的地方,这样能以最佳的方式接收到垂直极化的罗兰-C信号。测试场景如图6所示,天线的底板采用非金属、非磁性板材,磁天线对角放置在150 mm×150 mm的底板上且调理电路不和磁天线接触,用支撑架将磁天线置于室外。



磁天线正面

磁天线背面



封装后的磁天线

图6 磁天线实物

罗兰-C磁天线的测试需要进行远场测试,表3为磁天线测试位置(34°15'18"N, 108°59'23"E)与罗兰-C发射台的距离。

表3 磁天线测试位置与罗兰-C发射台距离

发射台	蒲城	宣城	贺县	荣城	崇左	饶平
距离/km	92.1	992.7	1 170.6	1 245.8	1 309.4	1 397.4

从表3中可以看出,测试位置距离最近的发射台为罗兰-C波长的30.7倍,故测试环境均满足远场测试条件。图7为示波器观察到的磁天线接收到的罗兰-C台站信号,可以看出,每个脉冲组的罗兰-C脉冲完整清晰。

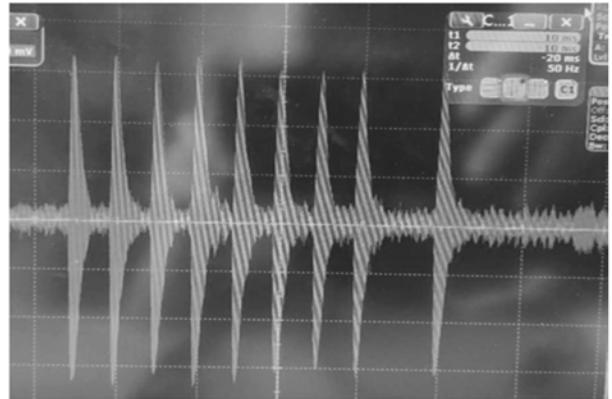


图7 磁天线接收罗兰-C台站信号远场测试结果

将不同类型的磁天线制作并分别进行调谐后接入同一信号调理电路中进行远场接收罗兰-C台站信号的测试。统计结果如表4所示,可以看出,顺接串联多层线圈磁天线提高的灵敏度和信噪比分别为82.42%和63.20%,因此可以认为顺接串联多层线圈能够显著提高接收信号的灵敏度和信噪比。

表4 不同类型磁天线测试结果

天线类型	电压幅度/V	信噪比/dB	灵敏度提升/%	信噪比提升/%
单层线圈	0.61	11.36	--	--
多层线圈	1.78	17.50	65.73	35.08
串联线圈	3.47	30.87	82.42	63.20

5 结论

本文从理论上推导了顺串联多层线圈的方式能显著地提高磁天线的灵敏度和信噪比。设计的顺串联多层线圈的磁天线大小为150 mm×150 mm,接收到的罗兰-C信号脉冲清晰可见,电压幅度为3.47 V。同单层单组线圈的磁天线相比,其灵敏度和信噪比分别提高了82.42%和63.20%。这不仅远小于电天线的体积,还极大地提高和丰富了罗兰-C磁天线的接收性能和应用场景,对罗兰-C系统在定位方面的应用具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 张洪源,徐兵,李海波,等.国家综合PNT体系中的罗兰C导航系统[J].宇航计测技术,2020,40(3):6-11.
- [2] FRANK R L.History of Loran-C[J].Navigation,1982,29(1):

1-6.
 [3] 李靖宇,许江宁,李豹,等.罗兰 C 前端数字带通滤波器设计与实现[J].电子技术应用,2012,38(8):42-45.
 [4] 任席闯,崔洁,刘冰.长河二号导航系统通信潜能分析[J].舰船电子工程,2018,38(12):50-52.
 [5] GRUNIN A P, SAI S V. Imitation of low frequency radio navigation pulses[C]//2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, 2020:407-410.
 [6] 陈雪平,胡东亮,罗斌凤.应用磁天线技术解决长河二号导航系统监测问题[J].舰船电子工程,2009,29(7):77-80.
 [7] 杨林.罗兰 C 接收机用磁天线的研究[J].探测与定位,2004,2(14):84-88.
 [8] 崔国恒,许江宁,曹可劲,等.基于罗兰 C 磁天线的高精度数字移相算法研究[J].计算机工程与设计,2011,32(4):381-384.
 [9] 张绪德,陈波,华宇,等.基于罗兰 C 有源磁天线的研究[J].电子设计工程,2018,26(12):118-121,126.
 [10] DENG D D, CHEN B, LIANG S, et al. A wide-band compact Loran-C active magnetic antenna[C]//2019 International

Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2019:1-3.
 [11] 宋铮.天线与电波传播[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
 [12] 梁西铭,李明.一种长波复合卫星导航接收阵列[C]//中国卫星导航年会,2019:1-5.
 [13] TUMANSKI S. Induction coil sensors—a review[J]. Measurement Science, 2007, 18(7):31-46.
 [14] 樊昌信,曹丽娜.通信原理(第7版)[M].北京:国防工业出版社,2012.
 [15] 郭鸿滨.有源全向磁天线研究与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

(收稿日期:2021-05-31)

作者简介:

高久翔(1993-),男,博士研究生,主要研究方向:长波导航授时、地磁匹配导航。

原艳宁(1982-),女,博士研究生,主要研究方向:天线及射频电路、导航接收机和模拟器。

师振盛(1966-),男,博士,副教授,主要研究方向:信号处理及其实时化研究。



扫码下载电子文档

“雷达信号/数据处理、实现与性能评估”专栏征稿

雷达目标探测一直是雷达信号处理的难点和热点问题,针对应用广泛的导航、监视、搜索等岸基、船载和机载雷达,为及时、集中地反映雷达信号与数据处理技术研究和应用最新进展,《电子技术应用》拟在2022年第8期出版“雷达信号/数据处理、实现与性能评估”专栏,欢迎雷达目标探测领域的专家学者、科研人员踊跃投稿!

1. 征稿范围

征文涉及的领域包括但不限于:

- (1) 雷达杂波特性分析与建模;
- (2) 目标散射特性分析与建模;
- (3) 雷达信号处理方法实现与性能分析评估;
- (4) 雷达数据处理方法实现与性能分析评估;
- (5) 雷达目标分类与识别方法、实现与性能分析评估;
- (6) 雷达数据仿真生成与分析评估;
- (7) 多源数据采集、整编、分析、应用和评估;
- (8) 雷达探测性能分析与评估;
- (9) 雷达智能信息处理方法、实现与性能评估。

2. 稿件要求:文章需具有创新性且未在其他期刊公开发表过。文中图表需清晰,文字规范。详见《电子技术应用》投稿须知(<http://www.chinaaet.com/paper/notice/>)。

3. 截稿日期:2022年6月25日。

4. 投稿方式:请登录《电子技术应用》官网(<http://www.ChinaAET.com/>),投稿页面中选择“雷达信号/数据处理、实现与性能评估”专栏投稿,按要求提交。

5. 专栏特约主编

刘宁波:海军航空大学副教授,中国电子学会青年科学家俱乐部会员。主要研究领域为海上目标探测、非线性信号处理、雷达目标特征检测。先后承担973项目、国家自然科学基金重点项目、军科委基础加强计划重点项目、装备预研等项目20余项,出版学术专著2部,以第一/通讯作者发表学术论文56篇,授权发明专利19项,曾获省部级科技进步一等奖、二等奖等科研奖励5项。

刘维建:空军预警学院副教授,中国电子学会高级会员。主要研究方向为阵列信号处理、雷达目标检测和统计信号处理。主持国家自然科学基金面上等5项省部级以上项目,发表一作/通讯SCI论文79篇(IEEE期刊37篇),以第一发明人获中国发明专利14项。《Signal Processing》《Digital Signal Processing》和《Circuits, Systems, and Signal Processing》编委/副主编,《太赫兹科学与电子信息学报》青年编委。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所