

# 基于双平行马赫曾德调制器的微波光子测向技术研究\*

张业斌<sup>1,2</sup>, 王凯<sup>1,2</sup>, 童阳<sup>1,2</sup>

(1.中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088;

2. 安徽省天线与微波工程实验室, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 针对传统的电域测向方法工作频率低、带宽窄, 很难满足未来电子侦察系统需求的难题, 介绍了一种结构紧凑的基于相位干涉仪原理的微波光子测向方案, 利用双平行马赫曾德调制器来实现超宽频带的高精度测向。仿真和实验结果表明, 所提出的设计方法可以在 5~40 GHz 频率范围内实现 -90°~+90° 的相位差测量, 测量相位误差可达到 ±2° 以内。

**关键词:** 微波光子; 马赫曾德调制器; 测向

中图分类号: TN958

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223067

中文引用格式: 张业斌, 王凯, 童阳. 基于双平行马赫曾德调制器的微波光子测向技术研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 19~23.

英文引用格式: Zhang Yebin, Wang Kai, Tong Yang. Microwave photonic direction finding based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 19~23.

## Microwave photonic direction finding based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator

Zhang Yebin<sup>1,2</sup>, Wang Kai<sup>1,2</sup>, Tong Yang<sup>1,2</sup>

(1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;

2. Anhui Province Engineering Laboratory for Antennas and Microwave, Hefei 230088, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem that the traditional electrical direction finding technology cannot meet the requirements of future electronic reconnaissance systems, a microwave photonic direction finding compact system based on phase interferometer principle is proposed and studied by simulation in this paper, using the double parallel Mach-Zehnder(DP-MZM) modulator to realize direction finding with ultra-wide band and high accuracy. The simulation and experiment results show that the proposed system can achieve the phase difference measurement from -90° to 90° in the frequency range of 5~40 GHz, and the measuring error is within ±2°.

**Key words:** microwave photonic; Mach-Zehnder modulator; direction finding

## 0 引言

现代战争中对战场电磁环境的全面感知至关重要, 是决定这战争成败的关键因素之一。电子侦察<sup>[1-2]</sup>就是获得战场态势继而控制战场主动权的重要手段, 通过接收和分析敌方的雷达等主要电子信息系统的电磁信号, 在空间上精确定位目标、识别敌方目标才能更有针对性地开展干扰、欺骗甚至摧毁等有效的电子对抗。微波信号测向技术是电子侦察技术的重要组成部分, 通过测向可以判定敌方雷达等辐射源的方向, 结合距离探测便可进而定位到敌方目标的精确位置。微波测向系统可以提供敌方辐射源所在的方向或者位置。根据工作的方式测向技术一般分为两个大类, 即主动测向技术和被动测向技术。主动测向技术主要是雷达系统采用, 通过系统本身产生信号并通过天线辐射出去, 再接收反射回来的电

磁波信号, 通过在一定的角度范围内扫描, 并根据信号的大小来判断目标信号的空间位置、敌方所在的位置。该方法由于接收的是己方发射的特定频率和制式的信号, 因此系统的接收带宽要求不高, 但由于其本身也是个辐射源, 从而导致其辐射的电磁信号也容易被敌方捕获进而被打击的风险大大提高。被动测向技术是只通过捕获和接收敌方目标主动辐射的电磁信号, 进行分析从而得出其方向和位置信息, 系统本身并不主动产生和向外辐射电磁射信号。因此, 相对主动测向技术, 被动测向技术具有更强的隐蔽性, 但由于其接收和分析的是未知频率的电磁信号, 故对接收系统的带宽要求一般较高。

随着电子技术水平的不断提高和军事装备的快速发展, 通信、雷达、电子战<sup>[3]</sup>等电子系统对信号处理的要求也越来越高, 其工作带宽越来越大, 工作频率也越来越高, 这也给传统的电学测向方法带来了很大的挑战。在

\* 基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085QF315); 青年人才托举工程(2020QNRC001)

高频段工作时传统的微波电路的瞬时带宽很难做大,同时在工作带宽内的幅频响应也较差,微波传输线的高频损耗也会急剧增加,并且传统电子系统进行超宽带信号处理时往往需要多台设备的堆叠,导致其体积和功耗也较大,并且容易受电磁干扰。受到上述这些“电子瓶颈”的限制,使得其很难满足电子装备发展的需要。微波光子技术<sup>[4]</sup>相对电子技术具有工作带宽大、带内平坦度好、抗电磁干扰等优势,因此得到了广泛的关注。微波光子技术有望突破现有电子技术的瓶颈,一般对于10 GHz以上带宽的超宽带射频信号的测向精度要求在3°以内,一些基于微波光子技术的微波信号测向系统<sup>[5-10]</sup>相继被提出且其测向精度也达到2°甚至更低,但系统对器件、设备量等的要求均较高。

## 1 微波光子测向技术原理

本文所提的基于微波光子的测向方法,主要是利用两路光学调制信号的干涉,构建出相位差与光功率的映射关系,再通过对光功率的测量实现对宽带微波信号的实时相位差测量,继而推导出微波信号的来向。采用双平行马赫曾德调制器(DP-MZM)来实现两路信号的调制

和叠加。双平行马赫曾德调制器的上下两个子调制器均工作在载波抑制双边带模式,并控制两个调制信号的相位差再进行相干叠加和干涉。为了消除直流项对测量信号的干扰,干涉后光信号采用平衡探测的方法来提高系统的测向的精度。基于双平行马赫曾德调制器的微波光子测向的原理框图如图1所示。

激光器输出的光载波信号输入到双平行马赫曾德调制器中。设进入双平行马赫曾德调制器的光载波的表达式为:

$$E(t)=E_0 \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

其中  $E_0$  与  $\omega_0$  分别为信号的幅度和角频率。如图2所示,天线阵面接收回来的两路射频信号分别加载在双平行马赫曾德调制器的两个射频输入口上,设两路射频输入信号的表达式为:

$$E_{1m}(t)=E_m \exp(j\omega_m t) \quad (2)$$

$$E_{2m}(t)=E_m \exp(j\omega_m t + j\varphi) \quad (3)$$

其中  $E_{1m}(t)$ 、 $E_{2m}(t)$  分别表示加载在第一、第二子调制器上的射频信号, $E_m$  表示两个天线阵元接收到的信号幅度, $\varphi$  表示两个阵元接收的微波信号之间的相位差。

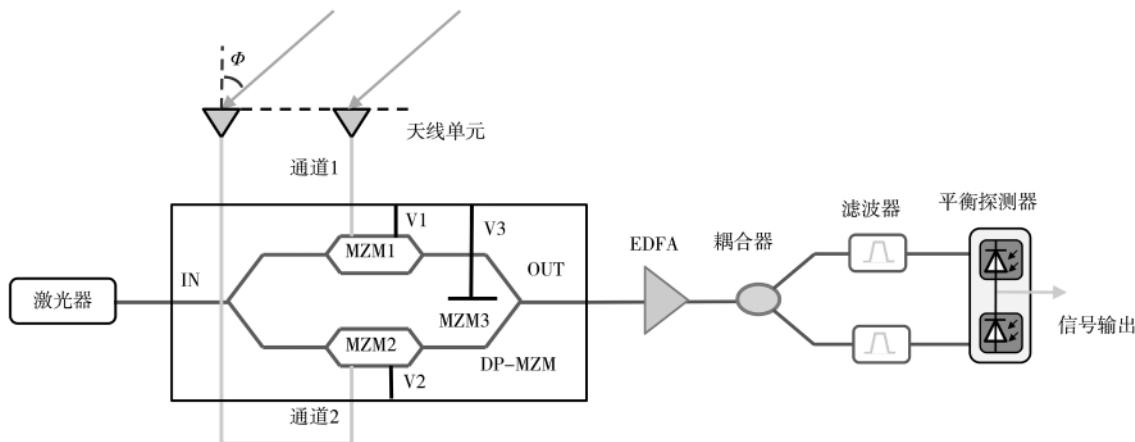


图1 基于双平行马赫曾德调制器的微波光子测向原理图

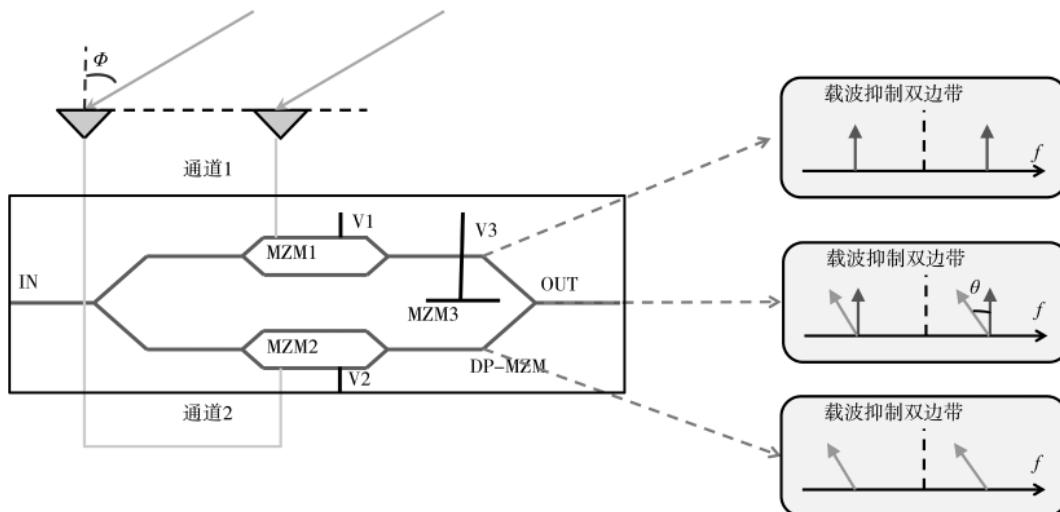


图2 双平行马赫曾德调制器各节点处的输出信号光谱图

通过控制调制器的直流偏压,使得第一子调制器和第二子调制器均工作在载波抑制双边带工作模式,即最小偏置点。由于天线前端接收到的信号一般都比较小,因此忽略高阶(2阶以上)的信号,经过第一子调制和第二子调制后的光信号分别可以表示为:

$$\begin{aligned} E_1(t) = & -\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(j\omega_0t+j\omega_mt) \\ & -\frac{1}{2}E_0J_{-1}(m)\exp(j\omega_0t-j\omega_mt) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_2(t) = & -\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(j\omega_0t+j\omega_mt+j\varphi) \\ & -\frac{1}{2}E_0J_{-1}(m)\exp(j\omega_0t-j\omega_mt-j\varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $m$  表示射频信号的调制深度,如式(6)所示; $J_{\pm 1}(m)$  分别为对应调制深度的±1阶贝塞尔函数的值。

$$m = \frac{\pi E_m}{V_\pi} \quad (6)$$

第一子调制和第二子调制的输出光信号经过第三子调制后合束输出,通过控制双平行马赫曾德调制器的第三个偏置电压,在两路光信号之间额外引入一个相位差,其输出表达式为:

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) = & -\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(j\omega_0t+j\omega_mt)(j\theta+j\varphi) \\ & -\frac{1}{2}E_0J_{-1}(m)\exp(j\omega_0t-j\omega_mt)(j\theta-j\varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\theta$  为第三马赫曾德调制器上加载的直流偏压所引入的相位差。

经过双平行马赫曾德调制器后的光信号经光耦合器后分为上、下两路,两路光信号分别经过光滤波器进行滤波,上路只有上边带光信号输出,光信号的下边带被滤除。同样下路只有下边带光信号输出,光滤波器将其上边带光信号滤除。经过滤波后的上、下两路光信号在进入平衡探测器前其光信号的表达式可以写为:

$$\begin{aligned} E_{\text{up}}(t) = & -\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(j\omega_0t+j\omega_mt)*[\exp(j\theta)+\exp(j\varphi)] \\ & \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{down}}(t) = & -\frac{1}{2}E_0J_{-1}(m)\exp(j\omega_0t-j\omega_mt)*[\exp(j\theta)+\exp(-j\varphi)] \\ & \quad (9) \end{aligned}$$

故而进入上光探测器的光信号的能量表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{up}}(t) = & [-\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(j\omega_0t+j\omega_mt)*[\exp(j\theta)+\exp(j\varphi)] \\ & *[-\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(-j\omega_0t-j\omega_mt) \\ & *[\exp(-j\theta)+\exp(-j\varphi)] \\ & =\frac{1}{4}E_0^2J_{+1}^2(m)[2+\exp(j\theta-j\varphi)+\exp(-j\theta+j\varphi)] \\ & =\frac{1}{4}E_0^2J_{+1}^2(m)[2+2\cos(\theta-\varphi)] \end{aligned} \quad (10)$$

同时进入下光探测器的光信号的能量表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{down}}(t) = & [-\frac{1}{2}E_0J_{-1}(m)\exp(j\omega_0t-j\omega_mt)*[\exp(j\theta)+\exp(-j\varphi)] \\ & *[-\frac{1}{2}E_0J_{+1}(m)\exp(-j\omega_0t+j\omega_mt) \\ & *[\exp(-j\theta)+\exp(j\varphi)] \\ & =\frac{1}{4}E_0^2J_{-1}^2(m)[2+\exp(j\theta+j\varphi)+\exp(-j\theta-j\varphi)] \\ & =\frac{1}{4}E_0^2J_{-1}^2(m)[2+2\cos(\theta+\varphi)] \end{aligned} \quad (11)$$

从上述的分析可以看出,当通过设置第三子调制器的偏置电压引入第一、第二马赫曾德调制器输出光信号之间的相位差 $\theta$  为 90°时:

$$P_{\text{up}}=\frac{1}{4}E_0^2J_{+1}^2(m)[2+2\cos(\varphi-90^\circ)] \quad (12)$$

$$P_{\text{down}}=\frac{1}{4}E_0^2J_{-1}^2(m)[2-2\cos(\varphi+90^\circ)] \quad (13)$$

其中: $J_{-1}^2(m)=J_{+1}^2(m)$ 。

从上式可以看出,进入平衡探测器的上下两路信号含有两路被测信号相位差的余弦项有 180°的相位差,因此经过平衡探测器后的信号输出为:

$$I_{\text{out}}=RE_0^2J_{+1}^2(m)|\cos(\varphi-90^\circ)| \quad (14)$$

其中 $R$  表示探测器的响应度。

通过测量探测器输出信号的大小,就可以直接得出相位差信息,并推算出微波信号的来波方向。从平衡探测器的输出表达式可以看出,通过平衡探测可以将不含相位差信息的直流无关项消除,从而减小其对信号项的干扰,可以提高测量系统对相位差的测量精度。一般用归一化处理后的值来评估方向角 $\Phi$ ,其表达式为:

$$I_n=\frac{I_{\text{out}}}{I_o} \quad (15)$$

$$\varphi=\arcsin I_n \quad (16)$$

$$\Phi=\arcsin\left(\frac{c\varphi}{\omega_md}\right) \quad (17)$$

其中, $I_n$  是归一化后的探测输出信号,而 $I_o$  是来波方向为正向时测量出来的输出信号值。

## 2 系统仿真实现与结果分析

根据上述的基于双平行马赫曾德调制器的微波光子测向技术方案,利用仿真软件对系统进行了仿真分析。仿真中主要模块的性能参数作如下设置:激光器的中心波长为 1 550 nm,光滤波器的带宽均设置为 5 GHz;选择了 5 GHz、20 GHz、40 GHz 三个频点分别进行仿真,在两路微波信号的相位差为 30°时该系统输出的电信号如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在同样的 30°的相位差下,5 GHz、20 GHz、40 GHz 三个不同的微波信号,经过上述测向系统后其输出信号幅度是完全一致的。同样系统也仿真分析了 $\varphi$  分别为 0°、60°、90°情况下,输入不同频点下的信号,系统的输出信号同样也是完全一致,仿真输出结

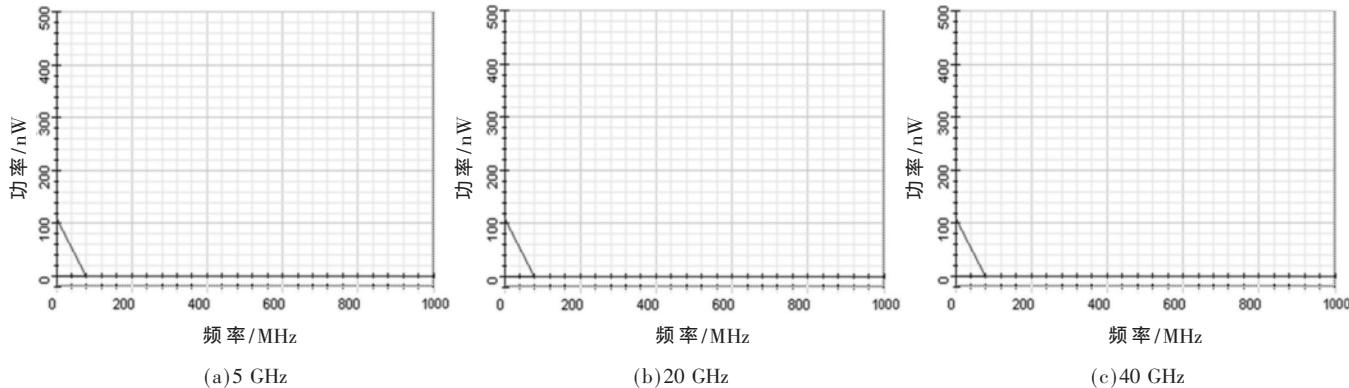


图 3 5 GHz、20 GHz、40 GHz 下平衡探测器的信号

果表明在输入的两路信号相位差不变的情况下，其输出信号的大小与频率无关，说明系统具备超宽带的工作性能，这与理论分析结果一致。

进一步仿真分析了在相位差不同时系统的输出信号的变化。仿真过程中选取 20 GHz 为工作频点,由于上述已经验证了输出信号与频率无关,选取任意工作频点进行分析对结果没有影响。对应天线阵面两个天线单元的相位差,在仿真软件中设置进入双平行马赫曾德干涉仪的两路射频信号的相位差为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时,得到系统的输出结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出，在两路输入信号的相位差为  $0^\circ$ 、

30°、60°、90°等不同的情况下的，系统仿真后输出信号功率随着相位差的变化而变化。对其进行归一化处理和拟合后，可得到在不同的微波信号的相位差与输出信号功率的关系，在进行系统搭建和实验测试后，将仿真、实验结果与理论分析的结果进行对比，其结果如图 5 所示。

图 5 中方块代表仿真结果,圆点表示实测结果,曲线表示理论值,从图中可以清晰地看出仿真结果与理论分析十分一致。在 $\pm 90^\circ$ 的相位差范围内,比较得到实测结果的相位误差为 $\pm 2^\circ$ 。

3 结论

本文提出并理论仿真了一种基于双平行马赫曾德

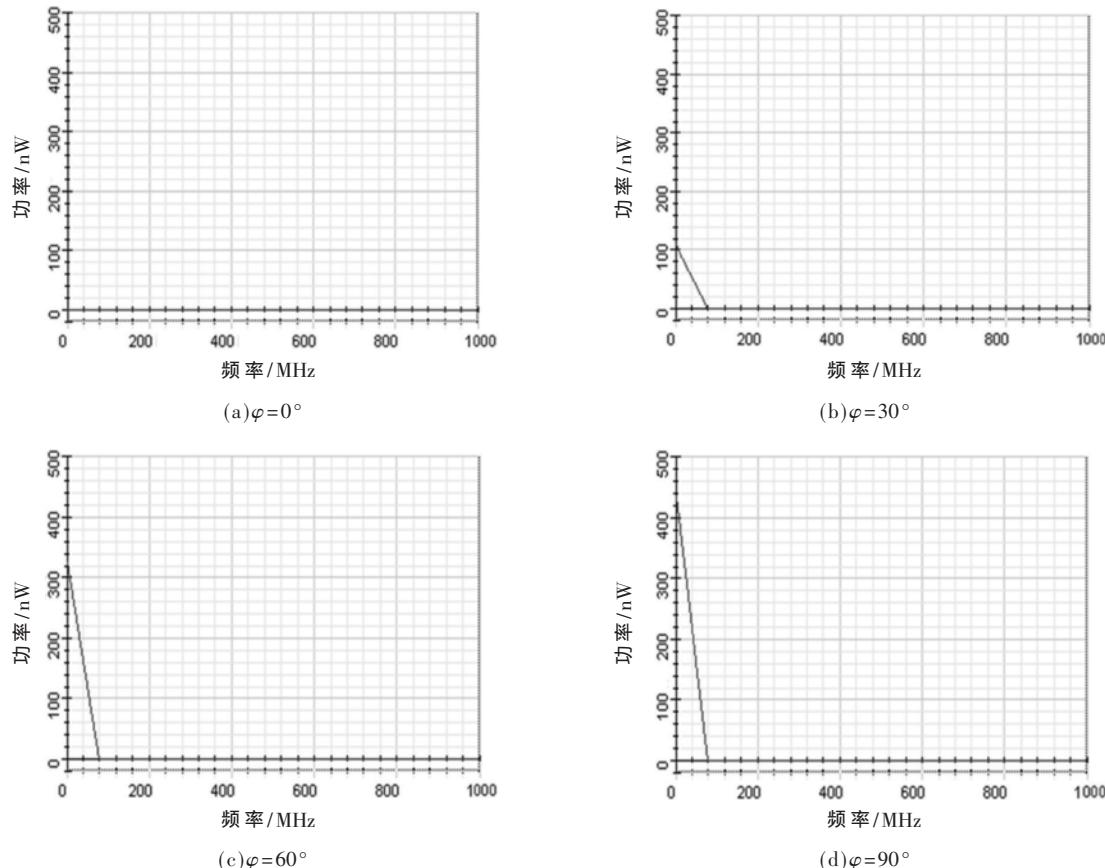


图 4 不同相位差下平衡探测器的信号

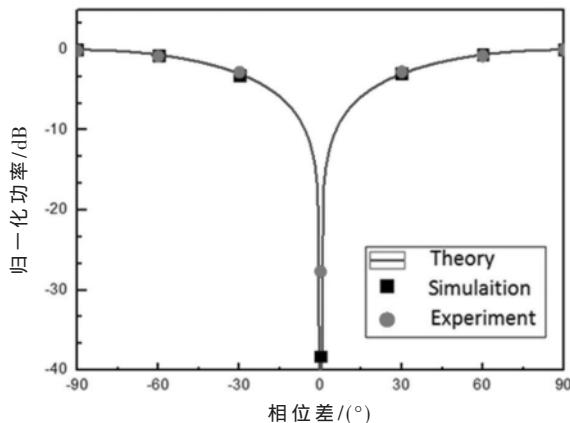


图 5 归一化的探测器输出与相位差的关系图

调制器的微波光子测向系统,借助相位干涉仪测向原理,利用光学方法实现对射频信号相位差测量进而可以得到来波方向角,仿真和实验结果表明在5~40 GHz频率范围内,该系统可以实现-90°~90°的相位差测量,测量相位误差在±2°以内,具有超宽带、抗电磁干扰、结构紧凑简单等优势,适合在未来电子侦察系统中应用。

#### 参考文献

- [1] 周一宇,安纬,郭福成.电子对抗原理与技术[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [2] 田中成,靳学明,朱玉鹏.微波光子电子战技术原理与应用[M].北京:科学出版社,2018.
- [3] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,2006.

(上接第 18 页)

- 抗差关联算法[J].电子学报,2018,46(6):1475~1481.
- [13] 赵翻东,蔡益朝,李浩.基于 GRNN 神经网络的多目标航迹关联[J].信息系统工程,2021(7):135~136,140.
- [14] 熊伟,高峰,王海鹏.系统误差下航迹关联算法[J].火力与指挥控制,2012,37(11):29~32,36.
- [15] 潘攀,邓超,邱煜.经济政策不确定性,银行风险承担与企业投资[J].财经研究,2020(2):67~81.
- [16] CASADIO R,SCARDIGLI F.Generalized uncertainty principle, classical mechanics, and general relativity[J].Physics Letters B, 2020, 807: 135558.
- [17] SHANNON C E.The mathematical theory of communication[J].Bell Labs Technical Journal, 1950, 3(9): 31~32.
- [18] 刘笑佟,任爽.基于不确定理论的铁路货运需求预测[J].运筹与管理,2020,29(3):135~141.
- [19] LIU B.Uncertainty theory(1st edition)[M].Berlin:Springer-Verlag, 2004.

[4] YAO J.Microwave photonics[J].Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314~335.

- [5] CAO Z,BOOM H,LU R, et al.Angle-of-arrival measurement of a microwave signal using parallel optical delay detector[J].IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(19): 1932~1935.
- [6] CAO Z,WANG Q,LU R, et al.Phase modulation parallel optical delay detector for microwave angle-of-arrival measurement with accuracy monitored[J].Optics Letters, 2014, 39(6): 1497~1500.
- [7] TU Z,WEN A,XIU Z, et al.Angle-of-arrival estimation of broadband microwave signals based on microwave photonic filtering[J].IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1~8.

- [8] CHEN H,CHAN E.Simple approach to measure angle of arrival of a microwave signal[J].IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(22): 1795~1798.
- [9] CHEN H,CHAN E.Angle-of-arrival measurement system using double RF modulation technique[J].IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1~10.
- [10] HUANG C,CHEN H,CHAN E.Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement[J].Optics Express, 2020, 28(9): 14028.

(收稿日期:2022-06-06)

#### 作者简介:

张业斌(1988-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:微波光子技术。



扫码下载电子文档

- [20] 李晓娜.不确定环境下城市需水量预测及多水源联合供水调度研究[D].邯郸:河北工程大学,2017.
- [21] 陈重,龙科军,朱飘.境外公路建设项目交通量预测[J].公路,2017(11):192~195.
- [22] 樊相宇,柴晓萌,武小平.基于不确定理论的二级供应链订货量决策[J].西安邮电大学学报,2018,23(2):89~94.

(收稿日期:2022-06-15)

#### 作者简介:

龙威宇(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:航迹关联。

蔡益朝(1976-),男,博士,副教授,主要研究方向:智能决策、态势评估与威胁估计。

李浩(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向:群体智能、无人机集群、智能系统与信号处理。



扫码下载电子文档

## 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