

均匀圆阵下微波光子鉴相相关干涉仪测向算法

张先玉^{1,2}, 梁涛¹, 安康¹, 赵修星²

(1. 国防科技大学第63研究所, 南京 210007; 2. 解放军75841部队, 长沙 410000)

摘要:为实现高频段微波信号的精确测向,提出了一种基于微波光子鉴相器的均匀圆阵相关干涉仪测向算法。为克服传统的电域鉴相器工作频段低、带宽窄的缺点,利用微波光子技术高频段、大带宽、低损耗和抗电磁干扰的优点,基于双偏振调制器设计一种微波光子鉴相器,利用光干涉将相位差信息映射为光信号功率,通过测量功率计算出相位差。该微波光子鉴相器精度高,能实现 $\pm 180^\circ$ 的相位差测定,鉴相精度为 $\pm 2^\circ$ 。利用余弦函数克服了传统相关干涉仪存在的相位模糊问题。同时,为确保算法的实时性,测向算法需选取适当的步进角度。为克服步进角度引入的测向误差,利用二维抛物面进行拟合插值运算,从而提高算法的精确度。最后,通过仿真验证了微波光子鉴相器和相关干涉仪测向算法的有效性。

关键词:微波光子学;相关干涉仪;鉴相器;均匀圆阵;测向

中图分类号: TN98 **文献标志码:** A

Correlative Interferometer-Based Direction Finding Technology with Uniform Circular Array and Microwave Photonic Phase Detector

ZHANG Xianyu^{1,2}, LIANG Tao¹, AN Kang¹, ZHAO Xiuxing²

(1. The 63rd Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China; 2. Unit 75841 of PLA, Changsha 410000, China)

Abstract: In order to realize precise location for microwave wideband signals with high accuracy, this paper investigates the correlative interferometer-based direction finding algorithm with uniform circular array and microwave photonic phase detector. Compared with the low operating frequency and narrow bandwidth of the electronic microwave phase measurement, a photonic microwave phase measurement using dual polarization Mach-Zehnder modulator (DPol-MZM) is presented with the benefits of high frequency band, wide bandwidth, ultralow loss and immunity to electromagnetic interferences. The output optical power is related to the phase shift which can be employed for the phase shift measurement. Owing to the accuracy monitoring, the proposed phase detector can measure the phase shift from -180° to 180° with $\pm 2^\circ$ measurement error. In addition, the cosine function has been chosen to replace the conventional correlation function to solve the phase ambiguity. Meanwhile, an appropriate search algorithm with large angle step should be selected to ensure that the direction finding algorithm can be operated in real time. Besides, the conicoid interpolation fitting has been exploited for compensation the measurement error caused by the large search step. Finally, representative simulations have been presented to demonstrate the

validity of the microwave photonic phase measurement and the direction finding algorithm.

Key words: microwave photonics; correlative interferometer; phase detector; uniform circular array; direction finding

引 言

基于天线阵列实现高精度波达方向估计在电子战和移动通信等领域中至关重要。在电子战领域,波达方向是敌方辐射源唯一难以轻易改变的参数,是实现对敌方目标精确定位的重要依据^[1]。在移动通信领域,波达方向可用于自适应阵列信号处理,可实现波束变换和干扰抑制等功能。经过数十年的研究,已经提出了诸如基于幅度,基于相位,基于复向量等测向法,不同方法在测向精度、工作带宽、角度分辨率等方面有不同侧重。其中,相关干涉仪是基于相位的测向方法之一,具有设备简单、精度高、适应性强、可移植性好等诸多优点,是目前工程实用中的主流测向体制。另外,相关干涉仪测向可根据测向应用背景选取不同的天线阵列,其中均匀圆阵能克服相位模糊问题,且能同时测量方位角和俯仰角,测向性能优越,可满足较为广泛的应用需求。

相关干涉仪是一种基于相位响应的测向体制,其测向算法简单、精度高且实时性好,是工程实用的主流技术,得到了广泛的关注和研究。相关干涉仪算法的测向精度很大程度上取决于鉴相器的精度。目前,已经发展出I/Q正交鉴相、FFT鉴相法、解析信号复相关法等诸多电域鉴相算法,但传统的电域鉴相技术工作频段低,带宽窄,鉴相过程需要进行下变频处理,这样会引入额外的系统噪声,对测向精度造成不利影响^[2]。为克服电域鉴相技术的缺陷,微波光子鉴相技术是一种极具潜力和竞争力的技术方案,其具有工作频段高、带宽大、链路损耗低、抗电磁干扰等优点,非常适合雷达、电子战等应用领域^[3-4]。Cao等^[5]提出了一种并联调制器微波光子鉴相方案,将两路微波信号调制在并联的两个双电极MZM调制器(Dual-electrode Mach-Zehnder modulator, DEMZM)上,均进行抑制载波双边带调制,之后输出两路信号的干涉信号,干涉信号的光功率与相位差存在对应关系,通过查表即可估计出相位差,实验中该方案可实现相位差在 $5^{\circ}\sim 165^{\circ}$ 内12.5 GHz的微波信号的鉴相,测量误差为 $\pm 3.1^{\circ}$,该方案结构简单,但相位测向范围有限。彭铮雪^[2]提出了一种基于双偏振调制器的微波光子鉴相方案,将两路微波信号调制在两个并行的调制器上,分别进行抑制载波双边带调制,通过测量两路信号干涉之后的光功率得到相位差信息,该方案可实现10 GHz信号的相位测量,测向误差为 $\pm 3^{\circ}$,但是该方案在实际应用中存在偏振角度难以精确控制的缺点。Li等^[6]提出了一种基于光相位扫描的测相方案,将一路微波信号调制在相位调制器上,另一路微波信号和一路低频锯齿波信号耦合后调制在另一个相位调制器上,利用锯齿波信号实现了 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的光相位扫描,通过探测拍频之后的电信号实现相位测量。载波信号设置为18 GHz,对于10 GHz的单音信号和带宽为2 GHz的宽带信号,该方案的相位测向误差分别为 $\pm 5.25^{\circ}$ 和 $\pm 7.87^{\circ}$,但是该方案需要使用扫频信号,实际应用受限。Zhuo等^[7]提出了一种能够同时测量多普勒频移和来波方向的技术方案,将待测微波信号和发射信号调制在双平行马赫曾德尔调制器上,通过波分复用器分解出上下支路,通过测量输出光功率测向信号的相位差,该方案能够实现 300° 范围的相位测量,测量误差小于 3.4° ,该方案结构简单,但是测向范围受限。南京航空航天大学张亚梅等^[8]提出了一种串接双偏振双驱动马赫-曾德尔调制器的Sagnac环结构的微波鉴相方案,将频率为光脉冲序列整数倍的两路微波信号相位调制在光脉冲序列的两个正交偏振态上,并令正、反方向传播的调制光信号在Sagnac环结构的输出口形成干涉,利用平衡探测模块对分离出的两路水平和两路垂直偏振态光信号进行平衡探测,即可测得两路微波信号的相位。该方案能够实现高精度相位差测量,结构相对简单,但是该方案使用相位干涉仪测向,容易出现相位模糊问题。

本文提出了一种基于微波光子鉴相技术的相关干涉仪测向技术,利用双偏振调制器,将两路微波信号调制在并行的两个调制器上,输出的干涉信号功率与相位差存在对应关系,通过测量光信号功率即可得到两路信号的相位差。基于测得的相位差信息,通过相关干涉仪算法即可估计信号的方向角和俯仰角,另外,可利用二次曲面差值进一步提高波达方向的测量精度。该方案利用微波光子鉴相器,测量精度高,工作频率高,带宽大,同时避免了下变频等操作。该方案测量精度高,结构灵活,可移植性好,在测量精度、实时性等方面具有较大优势。

1 相关干涉仪测向系统组成

类似于传统的测向体制,相关干涉仪测向系统主要由测向天线阵、射频前端及天线选择开关、测向信道接收机、鉴相器、信号处理模块及显示单元组成^[9],如图1所示。测向系统通过测向天线阵接收来波信号,通过射频前端和天线选择开关实现信号的传输和分发,利用测向信道接收机实现对不同通路信号的接收,利用鉴相器实现对相位信息的提取,通过数据处理单元实现来波信息的提取,最后通过显示单元显示、存储和分发测向结果。其中,鉴相器和信号处理模块是相关干涉仪测向系统的核心组成部分,直接决定了测向性能。因此,本文围绕鉴相器和测向算法进行具体研究。

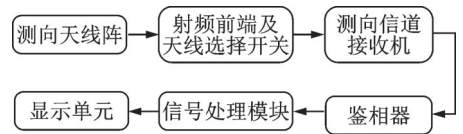


图1 相关干涉仪测向系统基本组成框图

Fig.1 Block diagram of correlative interferometer direction finding system

为克服传统线阵存在相位模糊且仅能测量来波信号方位角的缺陷,本文采用均匀圆阵进行测向。同时,传统的测向技术大多工作在低频段,为实现高频段的微波信号测向,考虑采用微波光子鉴相技术,避免了多次下变频引入的系统噪声影响。相关干涉仪算法需要事先建立样本库,为提高测向精度,样本库需采用尽量小的角度间隔,但过大的数据库会导致计算量激增,实时性较差。因此,在实际应用中需建立适当容量的样本库。为确保较高的测量精度,可考虑利用二维插值算法提高估计精度^[10-11]。

2 相关干涉仪测向技术

天线阵的基线长度决定了测向算法的精度,大的基线可获得高的测向精度。相关干涉仪可适用于具有较大天线孔径的天线阵,该测向体制在测向精度、系统灵敏度、抗干扰等方面具有较大的技术优势,是目前工程常用的测向体制。均匀圆阵可有效克服相位模糊,尤其是天线阵元较多时具备较大的技术优势,本文采用均匀圆阵天线阵进行测向。

2.1 均匀圆阵相位差模型

本文考虑阵元数为 M 的均匀圆阵,如图2所示。为便于分析,假定圆阵天线阵元均处在 xoy 平面上,坐标原点位于天线圆阵的圆心,圆阵阵列的半径为 R ^[12-14]。假设微波信号来波方向与 z 轴夹角为 θ (俯仰角),在 xoy 上的投影与 x 轴的夹角为 φ (方位角)。信号的来波方向可表示为 (θ, φ) ,其中俯仰角 θ 的取值范围为 $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$,方位角 φ 的取值范围为 $\varphi \in [-180^\circ, 180^\circ]$ 。

令坐标原点处的期望接收信号为

$$x_0(t) = a(t)e^{i2\pi f_0 t} \quad (1)$$

式中: f_0 为来波射频信号的频率,对应的信号波长为 $\lambda_0 =$

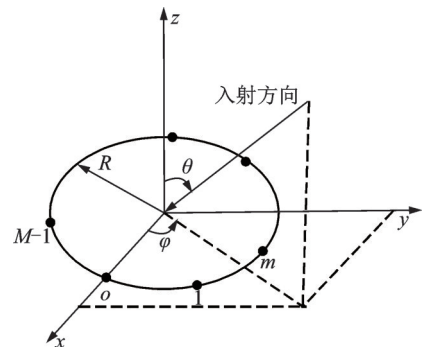


图2 M 元均匀圆阵几何关系示意图

Fig.2 Geometrical relation diagram of M -unit uniform circular array

c/f_0 , c 为波长; $a(t)$ 为调制信号。

根据图 2 中各天线阵元的几何位置, 可知第 m 阵元接收的信号可表示为

$$x_m(t) = a(t)e^{j2\pi f_0(t-\tau_m)} + n_m(t) \quad (2)$$

式中: $n_m(t)$ 为接收的加性噪声分量; τ_m 为信号波程差引入的时间延迟。 τ_m 可表示为

$$\tau_m = \frac{R}{c} \sin \theta \cos \left(\varphi - \frac{2\pi m}{M} \right) \quad (3)$$

由式(3)可见, 时延差仅与天线阵元位置和半径 R 有关。

下一步, 将阵元 m 的接收信号和天线阵元 n 的接收信号进行相关运算可得

$$\begin{aligned} r_{m,n} = x_m(t) x_n^H(t) &= (a(t)e^{j\Phi_m} + n_m(t))(a(t)e^{-j\Phi_n} + n_n^H(t)) = a^2(t)e^{j(\Phi_m - \Phi_n)} + \\ & a(t)e^{j\Phi_m}n_n^H(t) + a(t)e^{-j\Phi_n}n_m(t) + n_m(t)n_n^H(t) \end{aligned} \quad (4)$$

假设天线接收的加性噪声分量为零均值高斯噪声, 且与信号不相关, 则可得到信号相关值为

$$r_{m,n} = a^2(t)e^{j(\Phi_m - \Phi_n)} \quad (5)$$

2.2 相关干涉仪算法

相关干涉仪算法是利用不同天线接收信号之间的相位差建立样本库, 利用接收信号之间的相位差与样本库中数据之间的相关性进行信号测向。信号之间的相位差与来波信号频率、俯仰角、方位角有关, 因此应根据不同的频率和来波方向建立样本库。样本库的准确性和齐备性直接决定了相关干涉仪测向算法的精度^[9-11]。

由式(3)可知, 第 m 阵元相对于圆阵原点的相位差为

$$\phi_m = \frac{2\pi R}{\lambda_0} \sin \theta \cos \left(\varphi - \frac{2\pi m}{M} \right) \quad (6)$$

进一步地, 由式(6)可知第 m 天线阵元和第 n 天线阵元之间的相位差为

$$\begin{aligned} \phi_{mn} = \phi_m - \phi_n &= \frac{2\pi R}{\lambda_0} \sin \theta \left(\cos \left(\varphi - \frac{2\pi m}{M} \right) - \cos \left(\varphi - \frac{2\pi n}{M} \right) \right) = \\ & - \frac{4\pi R}{\lambda_0} \sin \theta \sin \left(\frac{\pi(m-n)}{M} \right) \sin \left(\varphi - \frac{\pi(m+n)}{M} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

通过选取不同基线的天线阵元建立相位差向量, 测向系统评估来波信号相位差与样本库数据之间相关性, 计算相应的相关系数, 相关系数最大值所对应的方位角和俯仰角即为信号方位估计值^[9]。

假定测量得到的相位差响应为 $x(\varphi, \theta)$, 样本库中方向角为 (φ_i, θ_i) 的样本相位差响应为 $v(\varphi_i, \theta_i)$, 则定义相关系数 $\rho(\varphi_i, \theta_i)$ 为

$$\rho(\varphi_i, \theta_i) = \frac{|\mathbf{x}(\varphi, \theta) \mathbf{v}^H(\varphi_i, \theta_i)|}{\|\mathbf{x}(\varphi, \theta)\| \cdot \|\mathbf{v}(\varphi_i, \theta_i)\|} \quad (8)$$

由 Cauchy-Schwartz 不等式知, 相关系数 $\rho(\varphi_i, \theta_i)$ 满足 $-1 \leq \rho(\varphi_i, \theta_i) \leq 1$, $\rho(\varphi_i, \theta_i)$ 最大值所对应样本点的方位角即为信号方位估计值。

另外, 针对方位角相同, 俯仰角不同的两个信号 (φ, θ_i) 和 (φ, θ_j) , 由式(7)可得相位差为

$$\phi_{mn}^{(\varphi, \theta_i)} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_j} \phi_{mn}^{(\varphi, \theta_j)} \quad (9)$$

进一步, 可知

$$x(\varphi, \theta_i) = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_j} x(\varphi, \theta_j) \quad (10)$$

因此,两个信号对应的相关系数存在如下关系

$$\rho(\varphi, \theta_i) = \rho(\varphi, \theta_j) \quad (11)$$

式(11)表明,利用传统的相关系数无法有效分辨俯仰角。为有效分辨俯仰角,可对相关函数进行变换调整。基于三角函数的连续性和周期性,可利用三角函数建立目标函数。

假定选取的相位差向量和样本库向量中均含有 K 个相位,即

$$x(\varphi, \theta) = [\phi_1(\varphi, \theta), \phi_2(\varphi, \theta), \dots, \phi_K(\varphi, \theta)] \quad (12)$$

$$v(\varphi_i, \theta_i) = [\phi_1(\varphi_i, \theta_i), \phi_2(\varphi_i, \theta_i), \dots, \phi_K(\varphi_i, \theta_i)] \quad (13)$$

将该测量向量与样本库向量各元素取差并计算相应的余弦值,用其均值建立目标函数为

$$f(\varphi_i, \theta_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \cos(\phi_k(\varphi, \theta) - \phi_k(\varphi_i, \theta_i)) \quad (14)$$

利用上述定义函数计算测量相位差矢量与样本点的相近程度,将获取最大值的点作为方向角的估计值,该函数可有效解决俯仰角分辨问题,同时三角函数的连续性可纠正相位跳变引起的测向误差。

2.3 插值运算

利用上述的相关干涉仪算法需要事先建立样本数据库,为提高算法的测向精度,可利用较小的角度间距建库,但此时样本点数急剧增大,计算量递增,会严重影响算法的实时性。为提升算法的实时性,需要选取适当的角度间距进行数据采集,但此时会导致测向算法的误差增大。为适当补偿测向误差,可采取插值运算补偿部分测量误差^[9-10]。

本文采用的是方位角和俯仰角联合二维测向,通过2.2节描述的相关法搜索得到最大值所在的位置 $(x_n, y_m, z_{n,m})$,其中, x_n 表示第 n 个方位角, y_m 表示第 m 个俯仰角, $z_{n,m}$ 表示相应的最大相关值。方位角和俯仰角的步进分别为 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 。明显地,该拟合算法是二次曲面拟合。为便于计算,可采用 $(x_n, y_m, z_{n,m})$ 及周边4点 $(x_{n-1}, y_m, z_{n-1,m})$ 、 $(x_{n+1}, y_m, z_{n+1,m})$ 、 $(x_n, y_{m-1}, z_{n,m-1})$ 、 $(x_n, y_{m+1}, z_{n,m+1})$ 进行5点抛物面拟合,进而通过计算出极值点作为方向角的估计值。利用上述5点拟合的二维抛物面方程为

$$z = ax^2 + by^2 + cx + dy + e \quad (15)$$

将上述已知的5点坐标代入方程(15)即可得到如下方程组

$$\begin{cases} z_{n,m} = ax_n^2 + by_m^2 + cx_n + dy_m + e \\ z_{n-1,m} = ax_{n-1}^2 + by_m^2 + cx_{n-1} + dy_m + e \\ z_{n+1,m} = ax_{n+1}^2 + by_m^2 + cx_{n+1} + dy_m + e \\ z_{n,m-1} = ax_n^2 + by_{m-1}^2 + cx_n + dy_{m-1} + e \\ z_{n,m+1} = ax_n^2 + by_{m+1}^2 + cx_n + dy_{m+1} + e \end{cases} \quad (16)$$

通过解方程组(16),即可求得系数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。进而可求得抛物面的顶点坐标(极大值点)为

$$\begin{cases} \hat{x} = x_n + \frac{\Delta\varphi(z_{n-1,m} - z_{n+1,m})}{2(z_{n+1,m} + z_{n-1,m} - 2z_{n,m})} \\ \hat{y} = y_m + \frac{\Delta\theta(z_{n,m-1} - z_{n,m+1})}{2(z_{n,m+1} + z_{n,m-1} - 2z_{n,m})} \end{cases} \quad (17)$$

另外,也可以利用 $(x_n, y_m, z_{n,m})$ 及周边的8个点 $(x_{n-1}, y_{m-1}, z_{n-1,m-1})$ 、 $(x_{n-1}, y_m, z_{n-1,m})$ 、 $(x_{n-1}, y_{m+1}, z_{n-1,m+1})$ 、 $(x_{n+1}, y_m, z_{n+1,m})$ 、 $(x_{n+1}, y_{m-1}, z_{n+1,m-1})$ 、 $(x_{n+1}, y_{m+1}, z_{n+1,m+1})$ 、 $(x_n, y_{m-1}, z_{n,m-1})$ 、 $(x_n, y_{m+1}, z_{n,m+1})$ 拟合二维曲面,进而计算出极值点作为方向角的拟合值。

3 微波光子鉴相器

传统的电域鉴相器工作频段低、带宽窄,且需要进行下变频等操作。微波光子系统具有工作频率高、带宽大、传输损耗小、抗电磁干扰等优点。为克服传统电域鉴相器存在的诸多问题,可采用微波光子鉴相器实现相位差的测量^[15-17]。微波光子鉴相器的设计可考虑利用光信号干涉原理,利用光信号功率和相位差的映射关系测量两路微波信号的相位差。参考借鉴文献[2]中的设计,本文利用基于双偏振调制器(DPol-MZM)的微波光子鉴相器。

微波光子鉴相器方案设计如图3所示,其工作原理为:可调激光器(Tunable laser, TLS)发出的光信号经过Dpol-MZM中的Y分路器分别注入到上下两路并行的X-MZM和Y-MZM调制器中,将两路具有相位差的微波信号分别调制在上下两个MZM调制器中,均进行抑制载波双边带调制(Carrier suppression-double sideband, CS-DSB)^[18-20]。之后,两路信号经过偏振合束器(Polarization beam combiner, PBC)实现偏振复用。设置起偏器,将正交偏振态上的两个光信号合成并发生干涉,之后两个信号合并成为一路线偏振光信号。合成后的光信号一阶边带的光功率与微波信号的相位差相关,利用相位差和一阶边带光功率的映射关系,进而可求得两路微波信号的相位差^[2,7]。

假设天线性能和两路信号的接收通道一致,接收的两路具有相位差的微波信号可分别为

$$E_{RF1}(t) = V_R \sin(j\omega_R t) \quad (18)$$

$$E_{RF2}(t) = V_R \sin(j\omega_R t + j\phi) \quad (19)$$

式中: V_R 和 ω_R 分别表示微波信号的幅度和角频率, ϕ 为两路信号之间的相位差。

TLS输出的光载波信号可表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_c t) \quad (20)$$

式中: E_0 和 ω_c 分别表示光信号的电场幅度和角频率。

将TLS输出的光信号功分两路分别进入X-MZM和Y-MZM中,两路微波信号分别注入上下两路调制器中,假定两路调制器的参数性能一致,均实现CS-DSB调制,则可得到X-MZM输出的调制光信号为

$$E_X(t) = \frac{E_{in}(t)}{2\sqrt{2}} [\exp(jm_R \sin(\omega_R t)) - 1] \approx \frac{E_{in}(t)}{2\sqrt{2}} [J_0(m_R) + J_1(m_R) \exp(j\omega_R t) - J_1(m_R) \exp(-j\omega_R t) - 1] \approx \frac{E_{in}(t)}{2\sqrt{2}} [J_1(m_R) \exp(j\omega_R t) - J_1(m_R) \exp(-j\omega_R t)] \quad (21)$$

式中: $m_R = \frac{\pi V_R}{V_\pi}$ 为X-MZM的调制指数, V_π 为调制器的半波电压。 J_n 为n阶第一类贝塞尔函数,在小信号调制时,函数有如下性质: $J_0(m_R) \approx 1$,另外,高阶贝塞尔函数相对低阶值很小,即 $J_2 \ll J_1$,因此,式(21)中仅考虑一阶光边带,且载波被抑制。

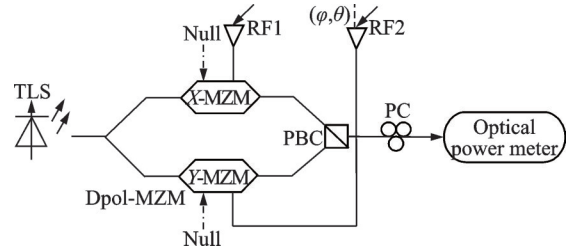


图3 基于DPol-MZM的微波光子鉴相器方案
Fig.3 Scheme of a photonic phase detector based on DPol-MZM

同样地,可知 Y-MZM 输出的调制光信号为

$$E_Y(t) \approx \frac{E_{in}(t)}{2\sqrt{2}} \left[J_1(m_R) \exp(j\omega_R t + j\phi) - J_1(m_R) \exp(-j\omega_R t - j\phi) \right] \quad (22)$$

调制器 X-MZM 和 Y-MZM 输出的两路光信号在偏振合束器合成偏振复用信号,DPol-MZM 输出的光信号为

$$\begin{bmatrix} E_X(t) \\ E_Y(t) \end{bmatrix} \approx \frac{E_{in}(t)}{2\sqrt{2}} J_1(m_R) \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\omega_R t) - \exp(-j\omega_R t) \\ \exp(j\omega_R t + j\phi) - \exp(-j\omega_R t - j\phi) \end{bmatrix} \quad (23)$$

利用偏振控制器(Polarization controller, PC),将起偏器的主轴设定与偏振复用单边带信号的主轴夹角为 45° ,则起偏器输出的线偏振光信号可表示为

$$\begin{aligned} E_{pol}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_X(t) + \frac{1}{\sqrt{2}} E_Y(t) = \frac{E_{in}(t)}{4} J_1(m_R) \cdot \\ &\left[\exp(j\omega_R t) - \exp(-j\omega_R t) + \exp(j\omega_R t + j\phi) - \exp(-j\omega_R t - j\phi) \right] = \\ &\frac{E_{in}(t)}{4} J_1(m_R) \left[\exp(j\omega_R t) (1 + \exp(j\phi)) - \exp(-j\omega_R t) (1 + \exp(-j\phi)) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可知,一阶光边带的功率为

$$P_{\pm 1} = \frac{E_0^2 J_1^2(m_R)}{16} (1 + \exp(j\phi)) (1 + \exp(-j\phi)) = \frac{E_0^2 J_1^2(m_R)}{8} (1 + \cos \phi) \quad (25)$$

可见,一阶光边带的功率与相位差 ϕ 相关,存在固定的函数关系。另外, P_1 中 E_0 和 $J_1(m_R)$ 参数固定,为不考虑这两个参数的具体值,可测量 $\phi = 0$ 的光功率作为参考值 P_0 ,利用相对光功率值进行估计,相对光功率定义为

$$P_{ref} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{1 + \cos \phi}{2} \quad (26)$$

此时,可得到相位差估计值为

$$\hat{\phi} = \arccos(2P_{ref} - 1) \quad (27)$$

此时,利用该微波光子鉴相器即可计算出两路信号的相位差。另外,可利用均方根误差评价算法的估计性能。

$$\text{Re}(\varphi) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (\hat{\varphi}(i) - \varphi(i))^2}{K}} \quad (28)$$

$$\text{Re}(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (\hat{\theta}(i) - \theta(i))^2}{K}} \quad (29)$$

为进一步提升鉴相器的性能,可同时结合电域鉴相器,将得到的结果进行比较融合即可提升相位差的估计精度。之后,在得到各路信号的相位差后,通过相关干涉仪算法即可估计出来波方向角。

4 实验仿真

本文提出的相关干涉仪算法涉及微波光子鉴相器和电域信号处理两个部分,因此在设计实验仿真时可分别针对这两个部分进行仿真验证,利用 VPI 和 MATLAB 软件进行仿真验证。

首先,利用VPI软件仿真微波光子鉴相器的性能,仿真系统图如图4所示。输入的光载波波长为1 550 nm,光功率为0 dBm。光载波信号通过PC,偏振角度设定为45°,之后利用偏振分束器(Polarization beam splitter, PBS)将两路光信号输入上下两路中作为调制器的载波信号。仿真中利用两个DEMZM和PBC构成DPol-MZM调制器,两个DEMZM参数一致,插入损耗均设置为6 dB,半波电压设定为5 V。利用射频源生成两路射频信号,射频信号的参数一致,频率设定为5.8 GHz,利用电移相器设置两路信号不同的相位差。将两路具有相位差的微波信号分别注入上下两个调制器中,实现CS-DSB调制。将电移相器设置为0°,记录一阶边带的功率值为 P_0 。将电移相器的相位设置为任意数据,计算 P_{ref} 值,同时对各个数据进行记录。

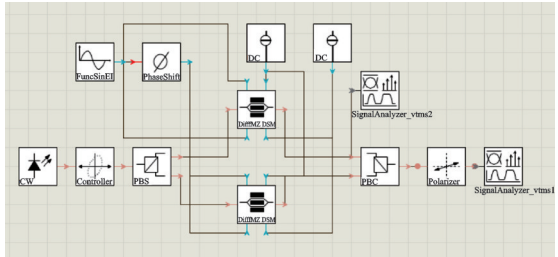


图4 微波光子鉴相器系统仿真示意图

Fig.4 System simulation sketch of the microwave photonic phase measurement

两路信号均进行CS-DSB调制,且两个调制器的参数一致,图5显示了单路调制信号的光谱图,可见载波信号相对一阶光边带抑制了39 dB,是一个比较纯净的抑制载波双边带光信号,这也为该微波光子鉴相器中两路光信号的干涉提供了较好的基础。在实际运行中,为了有效抑制光载波和其他高阶光边带,也可以采用光陷波器或者光滤波器进行处理。

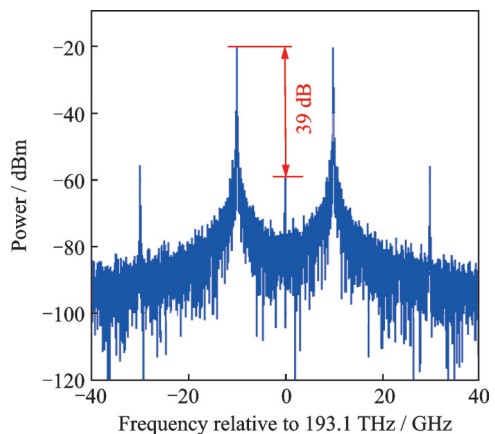


图5 DEMZM输出光信号的光谱图

Fig.5 Optical spectrum of the output signal at the DEMZM

不断改变电移相器的相位,观察一阶光边带的功率,计算出相对功率值并进行记录,测试结果如图6所示,蓝色曲线为理论曲线,红色圆点表示实验观测结果,明显发现,仿真结果与理论值非常吻合。进一步地,利用观测的结果进行反余弦计算即可得到相位差的估计值,结果如图7所示。可见,随着不断调整电移相器的相位值,利用观测值计算出的结果能很好地估计响应的相位差值,估计误差在 $\pm 2^\circ$ 范围内,该微波光子鉴相器的性能较为优异,同时也为相关干涉仪算法提供了准确的观测数据。

为验证相关干涉仪的性能,设置相关参数如下:均匀圆阵的天线数为 $M=8$,射频信号的频率设定与微波光子鉴相器的输入一致,设定为 $f_0=10$ GHz,圆阵半径与信号波长的比值为 $R/\lambda_0=1.2$,数据库的建立基于索引数间隔1的8组相位差,基于理论值建立数据库,相位间隔值可调。

为便于分析比较,设定入射信号的方位角 $\varphi=100.2^\circ$,俯仰角为 $\theta=50.8^\circ$,步进长度选择为: $\Delta\varphi=\Delta\theta=2^\circ$ 。分别利用传统的相关函数和三角函数进行搜索。仿真时,估计的相位误差为加性误差,误差的均方根为 10° (为验证算法性能,此仿真考虑更大的相位误差)。结果分别如图8和图9所示。从图9中可以发现,对于相同的方位角,不同的俯仰角,传统的相关函数值相同,即算法难以分辨出俯仰角。而对于改进的三角函数,可以发现,不同的俯仰角具有不同的取值,完全能分辨出方位角和俯仰角。因此,在以下的仿真中,均采用三角函数进行估计计算。另外,从图8中

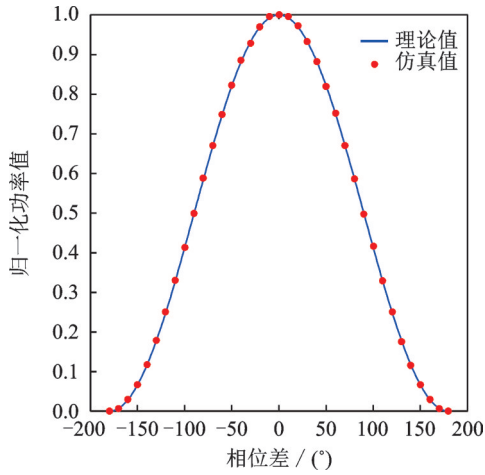


图6 归一化光功率值与相位差的关系图

Fig.6 Relation between the normalized optical power and phase difference

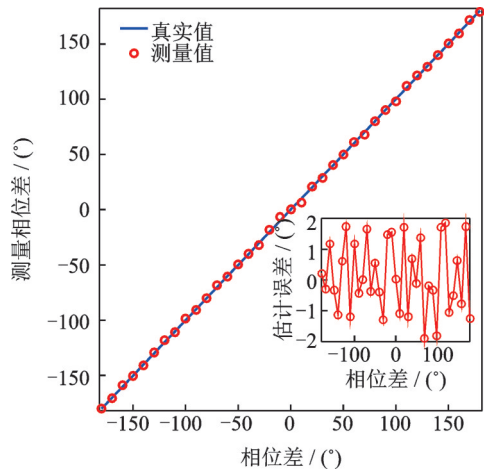


图7 相位差测量结果示意图

Fig.7 Phase difference measurement values of the simulation

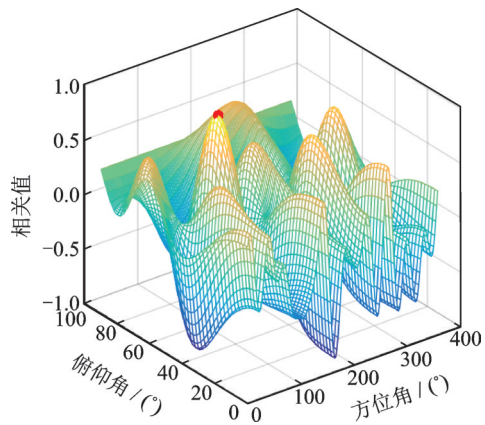


图8 余弦函数相关值曲面图

Fig.8 Curved surface figure of the correlation values by cosine function

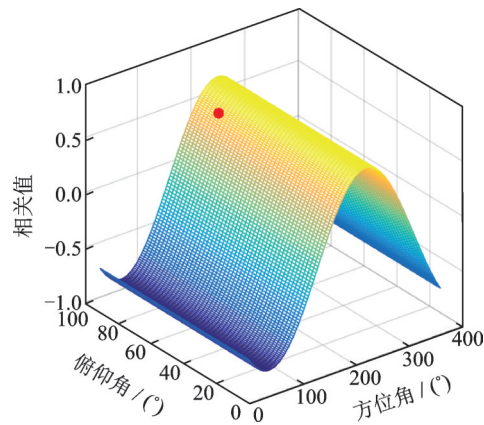


图9 传统相关函数相关值曲面图

Fig.9 Curved surface figure of the correlation values by the conventional correlation function

发现,来波信号的准确方向值与估计的最大值吻合度很高,即该算法能准确估计出信号的来波方向。

为进一步提升算法的准确性,可利用文中的二维插值法。2 000次蒙特卡洛仿真的结果如图10所示,明显可见,经过插值运算后,算法估计误差减小。图10中,蓝色横线表示插值前的均方根误差,绿线表示插值后的算法均方根误差,方位角和俯仰角均方根误差均有所降低。为更直观观察算法插值前后的性能情况,分别针对不同步进长度进行仿真,采取2 000次蒙特卡洛仿真结果的均方根误差,结果如图11所示,明显可见,未插值前均方误差随着步进长度的增加而增大,采用插值计算可以确保测向误差在一定的范围内,这在工程应用中具有重要的意义,采用适当的步长可以减少样点数,提高测向算法的处理速度,确保准确性的同时提升算法的实时性。

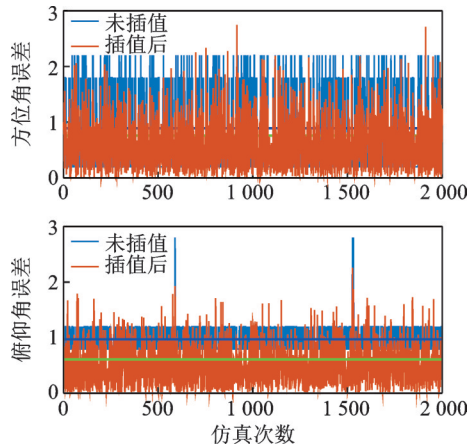


图10 插值前后方向角估计误差

Fig.10 Estimation error of the direction angle with and without interpolation

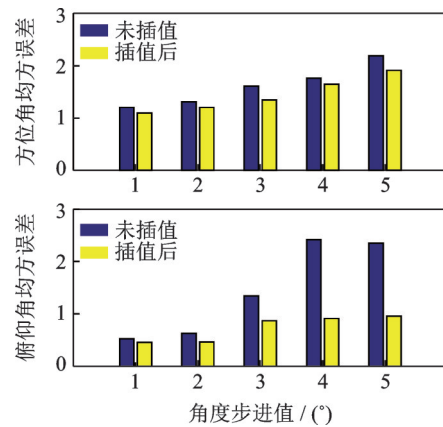


图11 插值前后方向角估计均方根误差对比图

Fig.11 Mean square root of the direction angle estimation error with and without interpolation

5 结束语

传统的相关干涉仪测向算法利用电域鉴相器进行相位差测量,但是电域鉴相器工作频段低、带宽窄,处理高频信号需要进行下变频操作。微波光子鉴相器可有效解决这些问题,基于双偏振调制器设计一种光子微波鉴相器,基于干涉原理将相位差信息映射为光信号的功率,通过测量光功率计算出相应的相位差值。传统相关干涉仪利用的相关函数存在相位模糊的问题,利用余弦函数构建目标函数可有效解决这一问题。适当选取较大的角度步进长度可减少样本库的数据量,确保算法的实时性,但同时会引入较大的测向误差,可利用二维插值拟合算法提高算法的精度。另外,人工智能算法在解决场景复杂的问题方面具有独特的优势,可考虑利用人工智能算法解决更为复杂的侧向问题,同时人工智能算法能够适应更为广泛的应用场景,这可作为下一步算法的改进方向进行考虑和研究。

参考文献:

- [1] KIM J. Direction of arrival estimation using four isotropic receivers[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2021, 24(4): 77-81.
- [2] 彭铮雪. 微波光子测向技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
PENG Zhengxue. Research on microwave photonic direction finding technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [3] ZHUO Hao, WEN Aijun, WANG Yong. Photonic angle-of-arrival measurement without direction ambiguity based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Communications, 2019, 451: 286-289.
- [4] CHEN Hao, HUANG Chongjia, CHAN E H W. Photonic approach for measuring AOA of multiple signals with improved measurement accuracy[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 1-10.
- [5] CAO Zizheng, WANG Qing, LU Rongguo, 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.
- [6] LI Peng, YAN Lianshan, YE Jia, et al. Angle-of-arrival estimation of microwave signals based on optical phase scanning[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(24): 6048-6053.
- [7] ZHUO Hao, WEN Aijun. A photonic approach for Doppler-frequency-shift and angle-of-arrival measurement without direction ambiguity[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(6): 1688-1695.
- [8] 张亚梅, 邵琨麟, 潘时龙, 等. 基于微波光子辅助鉴相的到达角测量装置: 中国, CN 112485758 A[P]. 2021-03-12.
ZHANG Yamei, SHAO Kunlin, PAN Shilong, et al. Angle-of-arrival measurement equipment based on microwave photonic

phase detector: China, CN 112485758 A[P]. 2021-03-12.

- [9] 陆安南, 尤明懿, 江斌, 等. 无线电测向理论与工程实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
LU Annan, YOU Mingyi, JIANG Bin, et al. Radio direction finding theory and engineering practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [10] 王鼎, 吴瑛, 张莉, 等. 无线电测向与定位理论及方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
WANG Ding, WU Ying, ZHANG Li, et al. Theory and method of radio direction finding and location[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [11] GOU Xiaoming, GUO Lantu, WU Zhedong, et al. Modulation-specific angle-of-arrival estimation algorithm for correlative interferometry[C]//Proceeding of 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou:[s.n.], 2018: 1-4.
- [12] WANG Ke, YI Jianxin, CHENG Feng, et al. Array errors and antenna element patterns calibration based on uniform circular array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(6): 1063-1067.
- [13] HU Die, ZHANG Yonghao, HE Lianghua, et al. Low-complexity deep-learning-based DOA estimation for hybrid massive MIMO systems with uniform circular arrays[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(1): 83-86.
- [14] XU Kaijie, QUAN Yinghui, BIE Bowen, et al. Fast direction of arrival estimation for uniform circular arrays with a virtual signal subspace[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(3): 1731-1741.
- [15] YANG Yue, MA Cong, FAN Beichen, et al. Photonics-based simultaneous angle of arrival and frequency measurement system with multiple-target detection capability[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(24): 7656-7663.
- [16] CHEN Hao, CHAN E H W. Photonics-based CW/pulsed microwave signal AOA measurement system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2292-2298.
- [17] CHEN Hao, CHAN E H W. Imple approach to measure angle of arrival of a microwave signal[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(22): 1795-1798.
- [18] KONG Miao, ZHOU Wen, DING Junjie, et al. Simultaneous generation of wired and wireless signals using a DP-MZM in a RoF system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(15): 905-908.
- [19] LIANG Dingding, SHI Taixia, CHEN Yang. Photonic generation of multi-band linearly frequency-modulated signal based on a dual-parallel MZM[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(5): 275-278.
- [20] HASAN M, JAFARI O, GUAN X, et al. Integrated optical SSB modulation/frequency shifting using cascaded silicon MZM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1147-1150.

作者简介:



张先玉(1986-), 通信作者, 男, 工程师, 博士后, 研究方向: 微波光子学及下一代移动通信, E-mail: zhangxy_sat@126.com。



梁涛(1961-), 男, 研究员, 博士, 研究方向: 通信抗干扰技术。



安康(1989-), 男, 高级工程师, 博士后, 研究方向: 卫星通信及通信抗干扰技术。



赵修星(1988-), 男, 助理工程师, 研究方向: 光纤通信。

(编辑: 夏道家)