2024 年 7 月

文章编号: 2095-4980(2024)07-0716-07

微波光子联合时差/相差的高精确度测向技术

唐 龙,朱扬辉,王 斌,颜 健

(桂林长海发展有限责任公司, 广西 桂林 541001)

摘 要: 针对短基线时差测向精确度低、长基线相差测向存在模糊和传统的微波技术难以满 足电子战设备分布式部署的长距离传输需求的问题,结合微波光子学,提出一种基于微波光子联 合时差相差的分布式长距离单基线高精确度测向技术。该技术使用直调模式微波光子传输设备, 克服了微波信号经过长距离传输后引起的时差和相差变化影响,满足长距离微波光子的稳定传输; 并在此基础上采用改进的时差曲面拟合插值方法解决相差模糊问题。仿真和实验测试验证了该技 术实现分布式长距离单基线高精确度测向的可行性。

关键词:微波光子;时差测向;相差测向;实时校正 中**图分类号:**TN971 **文献标志码:**A

doi: 10.11805/TKYDA2022224

High precision direction finding technique of microwave photonics combined time difference and phase difference

TANG Long, ZHU Yanghui, WANG Bin, YAN Jian (Guilin Changhai Development Co., Ltd., Guilin Guangxi 541001, China)

Abstract: Addressing the issues of low precision in short baseline time-difference direction finding, ambiguity in long baseline phase-difference direction finding, and the difficulty of traditional microwave technologies to meet the long-distance transmission requirements for distributed deployment of electronic warfare equipment, a distributed long-distance single-baseline high-precision direction finding technology based on microwave photonics combining time-difference and phase-difference is proposed. This technology employs direct modulation mode microwave photonic transmission equipment, overcoming the impact of time-difference and phase-difference variations caused by long-distance transmission of microwave signals, ensuring stable transmission of microwave photonics over long distances. Furthermore, an improved time-difference surface fitting interpolation method is adopted to resolve the phase-difference ambiguity issue. Simulations and experimental tests have verified the feasibility of this technology for implementing high-precision distributed long-distance single-baseline direction finding.

Keywords: microwave photonics; time difference direction finding; phase difference direction finding; real-time correction

现代战争需要陆、海、空、天、电的一体化协同作战,并呈现出大纵深、跨军种、立体化和跨域作战特点。 特别是在导航、无线电监测和电子战等领域,如何实时准确、高分辨力地测量出目标信号方向,对于无线电侦 察、信号分选、引导电子干扰等都具有非常重要的意义^[1]。

常用的测向方法主要有幅度差法、相差法和时差法。要想获得高的测向精确度,幅度差法需要的波束宽度 窄,波束数量多;相差法需要多基线解相位模糊,长基线实现高精确度测向;时差法需要提高时差测量精确度 或增加基线长度^[2-3]。本文结合微波光子传输技术优势,将光子通信宽带特性应用到微波信号传输和处理上,将 直调模式微波光子传输设备与时差/相差测向两种方法联合起来,并通过一种改进的时差曲面拟合插值法解决相 差模糊问题,实现分布式长距离单基线高精确度时差/相差联合测向,仿真和实验验证了新技术的可行性。

1 微波光子和时差/相差测向技术

1.1 微波光子技术

第7期

受电缆等介质的损耗影响,高频微波信号长距离传输后功率衰减很大。特别当天线与发射机或接收机距离 较远时,系统性能会降低。微波光子技术将光子通信宽带特性应用到微波信号传输和处理中,利用微波信号与 光波信号之间技术原理,把宽带微波信号转换成窄带光波信号,从而解决大动态、宽宽带微波信号长距离传输 与处理难题。微波光子链路能够将系统处理设备与天线在空间上分开,在保证微波信号长距离低损耗传输的同 时,系统可以更灵活地分布式部署,实现更多功能^[4-5]。

1.2 时差/相差测向技术

利用天线阵列对入射电磁信号的不同特性响应,可实现电磁信号的测向。复杂电磁环境中,信号在时域、 空域、频域存在交叠,在某些特定环境或任务条件下,需结合不同测向方法特点实现联合测向^[6]。单基线时差/ 相差测向法原理如图1所示。



Fig.1 Schematic diagram of single baseline time difference/phase difference direction finding 图1 单基线时差/相差法测向原理框图

时差法测向是通过测量不同天线阵元接收同一信号的到达时间差,从而确定入射信号方向。若2个天线阵元间基线长度为*d*,天线阵元法线和入射信号之间夹角为θ,则入射信号到达2个天线的时间差τ为:

$$\tau = \frac{d\sin\theta}{c} \tag{1}$$

式中c为光速。经过角度转换,通过时差r可得入射信号方位角:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c\tau}{d}\right) \tag{2}$$

相差法测向是通过测量不同天线阵元接收信号的到达相位差确定入射信号方向。根据时差/相差关系,由时 差引起的相差为:

$$\phi = 2\pi f \tau = 2\pi \frac{d\sin\theta}{\lambda} \tag{3}$$

式中: f为信号频率; λ为信号波长。再经角度转换,通过相差ø可得入射信号方位角:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\phi\lambda}{2\pi d}\right) \tag{4}$$

当相差法测向基线长度大于1/2时,单基线相位差存在相位模糊,需联合时差进行解相位模糊。

2 微波光子联合时差/相差的高精确度测向技术设计与实现

为降低设备复杂度,高精确度时差/相差联合测向技术以2个分布式部署的天线阵列接收来波信号,通过分 析信号到达2个天线间的相差和时差关系解算出目标信号方位。为获得理想的测向精确度,天线应尽量沿一条直 线分布,其法线方向朝观测区域;采用宽宽带波束天线接收较大的观测频域和空域范围内目标信号;天线接收 的射频信号通过光子传输到多功能一体化处理设备,进行信号检测和处理。

2.1 基于直调模式的微波光子传输工作原理

微波光子传输设备是一种通过光子通信技术实现微波信号稳定传输的设备,主要功能是将2路接收天线输出 的微波信号经过有源放大后,通过光子送到后面多功能一体化处理设备进行侦测处理^[7-8]。微波光子传输设备主 要由激光器、波分复用器、复合光缆、可调光延迟线、光电探测器和稳相控制模块等组成,采用直接调制-强度 解调模式。传输光链路采用外调模拟光传输方式,由成对的微波信号光发射模块和光接收模块共同实现1路微波 信号传输功能,满足系统微波信号的光电转换及传输要求;具备对设备传输时延/相位不一致性实时校正能力和 相位控制功能,经过长距离光子传输后保持信号时延/相位稳定。工作原理如图2所示。



图2 微波光子传输设备工作原理框图

2.2 基于广义互相关法的时差测向技术

假设单基线时差法测向中2个天线阵元接收信号可表示为:

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n) + n_1(n) \\ x_2(n) = s(n-\tau) + n_2(n) \end{cases}$$
(5)

式中: *s*(*n*)为入射信号; τ为入射信号到2个天线阵元间的时差; *n*₁(*n*)和*n*₂(*n*)分别为2个接收通道相互独立的零 均值高斯白噪声,且与入射信号不相关^[9]。

对2个天线接收到的信号分别进行傅里叶变换:

$$\begin{cases} X_1(k) = S(k) + W_1(k) \\ X_2(k) = S(k) e^{-j\frac{2\pi}{N}kD} + W_2(k) \end{cases}$$
(6)

式中:量化时差 $D = \tau/t_s$, t_s 为信号采样时间间隔;S(k)为信号s(n)的傅里叶变换; $W_1(k)$ 和 $W_2(k)$ 分别为噪声信 号 $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 的傅里叶变换。

对X₁(k)、X₂(k)进行共轭相乘处理,构建互相关函数:

$$R(k) = X_1(k) X_2^*(k) = \left| S(k) \right|^2 e^{-j\frac{2\pi}{N}kD} + W(k)$$
(7)

式中W(k)为信号等效噪声。

通过广义互相关法,利用频域加权函数对信号进行平滑滤波,抑制低信噪比或噪声不相互独立的峰值影响,提高互相关函数*R*(*k*)峰值,从而得到正确时差估计值,提高测向精确度。

设广义平滑相干变换加权函数为:

$$\varphi_{x12}(k) = \frac{1}{\sqrt{R_{x_1}(k)R_{x_2}(k)}}$$
(8)

式中: R_{x1} 为信号 $X_1(k)$ 的相关函数; R_{x2} 为信号 $X_2(k)$ 的相关函数。

对互相关函数R(k)加权,并进行逆离散傅里叶变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT):

$$R_{x12}(n) = IDFT\left(\varphi_{x12}(k)R(k)\right) \tag{9}$$

相关函数R_{x12}(n)的峰值所对应的时间为入射信号到2个天线阵元间的时差。

2.3 一种改进的时差解相差模糊的高精确度测向技术

实际中,时间差和相位差的测量结果总存在一定的误差,不能用时差直接进行解相差模糊^[10]。假设模糊相 位差理论值 $\hat{\phi}$ 与测量值 $\hat{\phi}$ 之间存在误差 $\Delta \phi$,时间差理论值 τ 与测量值 $\hat{\tau}$ 之间存在误差 $\Delta \tau$,根据相差/时差关系可得

$$\phi = 2\pi f\tau = 2\pi f(\hat{\tau} + \Delta \tau) = \tilde{\phi} + 2\pi k = \hat{\phi} + \Delta \phi + 2\pi k \tag{10}$$

式中k为相位差模糊值。对k进行正确解模糊,时间差测量误差 Δr 应满足 $\Delta r < T/2$, T为信号周期,工程实现难度很大,需要考虑一种新的时差解相差模糊方法。

首先,根据测量时间 î,利用曲面拟合算法在 î 附近一定时间范围内进行插值运算,取其附近 8 点,即 î₋₄、 î₋₃、 î₋₂、 î₋₁、 î、 î₁、 î₂、 î₃、 î₄,拟合一个开口向上的二次曲面。

其次,根据相差/时差公式,得到对应时差插值的模糊相位差理论值组: $\tilde{\phi}_{-4}$ 、 $\tilde{\phi}_{-3}$ 、 $\tilde{\phi}_{-2}$ 、 $\tilde{\phi}_{-1}$ 、 $\tilde{\phi}_{0}$ 、 $\tilde{\phi}_{1}$ 、 $\tilde{\phi}_{2}$ 、 $\tilde{\phi}_{3}$ 、 $\tilde{\phi}_{4}$:

$$\begin{cases} \vec{\phi}_{-4} = \mod(2\pi f \, \hat{\tau}_{-4}, 2\pi) \\ \vec{\phi}_{-3} = \mod(2\pi f \, \hat{\tau}_{-3}, 2\pi) \\ \vdots \\ \vec{\phi}_{3} = \mod(2\pi f \, \hat{\tau}_{3}, 2\pi) \\ \vec{\phi}_{4} = \mod(2\pi f \, \hat{\tau}_{4}, 2\pi) \end{cases}$$
(11)

由于各个时间差值中仅有一个时间差值是正确的,考虑到各时间差计算出的相位差值是相互独立的,且相 位差模糊多值差异较大,因此各时间差计算出的可能相位差中必然只存在唯一真值。为实现时差解相位差模糊, 构建相似度函数:

$$\gamma_{i} = \left| \hat{\phi} - \tilde{\phi}_{i} \right|^{2}, i = -4, -3, \cdots, 3, 4$$
(12)

经过相关运算,遍历所有模糊相位差理论值的相似度函数 γ_i ,找到相似度函数最小值,对应的时间差值即为目标时间差 $\hat{\tau}_{R}$;代入式(10)可得到真实模糊数 k_{R} ,再按照相差测角公式:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda(\hat{\phi} + 2\pi k_{\rm R})}{2\pi d}\right) \tag{13}$$

将其换算到所求角度,进而提高测向精确度。

仿真条件设置为:基线长度20m,时差测量最大误差2ns,相位差测量最大误差15°,入射角度分别取+30°、-30°,对2种测向算法的测向结果进行100次蒙特卡洛实验,仿真结果如图3所示。时差/相差联合测向方法优于常规时差测向方法。

3 仿真分析与实验验证

3.1 测向误差分析

对时差法测向式(2)求微分可得



Fig.3 Comparison of simulation results of two direction finding algorithms at different incidence angles 图 3 不同入射角度时,2种测向算法仿真结果对比

$$\Delta \tau = \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial \tau}{\partial d} \Delta d = \frac{d \cos \theta}{c} \Delta \theta + \frac{\sin \theta}{c} \Delta d \tag{14}$$

经角度转换可得

$$\Delta \theta = \frac{c}{d\cos\theta} \Delta \tau - \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \times \frac{\Delta d}{d}$$
(15)

影响时差法测向精确度的主要因素包括基线长度*d*、时差测量误差Δr,可通过增加基线长度或减少时差测量 误差提高测向精确度。仿真条件分别设置为: a)时差测量误差为2 ns,基线长度为10~100 m; b)基线长度为 20 m,时差测量误差为1~10 ns。时差测向影响因素仿真结果如图4所示。



图4 时差测向影响因素仿真结果

3.2 仿真结果

采用时差插值解相差模糊的改进型联合测向方法对时差/相差联合测向进行仿真验证。仿真条件设置为:基 线长度 20 m,测向范围±45°,步进 5°,信号信噪比 10 dB,最大相位误差 15°。对两种测向算法的均方根(Root Mean Square, RMS)误差进行 500次蒙特卡洛实验,测向误差仿真结果如图 5 所示。时差/相差联合测向方法优于 常规时差测向方法。

3.3 实验验证

构建分布式单基线测向设备,对时差/相差联合测向算法进行实验验证。通过微波光子传输技术实现2路天

线信号远距离接收,利用变频模块将射频信号转换成中频信号,并经过高速模数转换器采样;然后对采样信号进行时差/相差联合测向处理。分布式单基线测向设备实测数据处理结果如表1所示。



Fig.5 Simulation results of mean square error of direction finding 图 5 测向均方根误差仿真结果

表1 分布式单基线测向设备实测数据处理结果

Table1 The processing results of measured data of distributed single baseline direction finding equipment

No.	<i>f</i> /GHz	incidence angle/(°)				
		-45	-20	0	+20	+45
1	6	-44.3	-19.5	0.3	20.4	45.6
2	12	-45.6	-19.6	-0.6	19.3	44.4
3	18	-44.5	-20.3	0.4	20.1	45.7
RMS of direction finding error /(°)		0.52				

根据表1数据,实验验证测试结果与仿真结果基本一致,改进的时差/相差联合测向方法能够提升设备测向 精确度。

4 结论

微波光子传输是通过光学技术将微波信号变成光子信号,利用光子通信稳定性高、损耗低和抗电磁干扰能力强的特点,解决传统电缆介质不能长距离、低损耗传输的问题,实现微波信号远距离稳定传输。本文根据时差和相差线性关系,分析了单基线时差测向和相差测向存在的问题,通过直调模式微波光子传输和广义互相关时差测量算法,提出一种时差曲面拟合插值法解决相差模糊问题,利用无模糊相差提高测向精确度,使通过长距离分布式部署的2个天线进行高精确度测向成为现实。

参考文献:

- [1] 高晖,邓晔,张金平,等. 微波光子相控阵的技术分析与展望[J]. 雷达学报, 2019,8(2):251-261. (GAO Hui,DENG Ye,ZHANG Jinping, et al. Analysis and prospects of phased array radar based on microwave photonics[J]. Journal of Radars, 2019,8(2):251-261.) doi:10.12000/JR18105.
- [2] 石荣,邓科.干涉仪相位差测量精度的匹配滤波理论解释[J].太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(6):996-1001. (SHI Rong, DENG Ke. Match filtering theory interpretation for the measurement accuracy of interferometer phase difference[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(6):996-1001.) doi:10.11805/TKYDA2020094.
- [3] LIU H Q,ZHAO L M,LI Y,et al. A sparse-based approach for DOA estimation and array calibration in uniform linear array[J]. IEEE Sensors Journal, 2016,16(15):6018-6027. doi:10.1109/JSEN.2016.2577712.
- [4] 张浩,杨海峰,李璇,等.分布式宽带微波光纤传输幅相一致性技术[J]. 雷达科学与技术, 2021,19(2):178-182. (ZHANG Hao, YANG Haifeng, LI Xuan, et al. Amplitude-phase consistency of wideband microwave frequency distribution over multi-access optical fiber links[J]. Radar Science and Technology, 2021,19(2):178-182.) doi:10.3969/j.issn.1672-2337.2021.02.010.
- [5] 张嵩. 微波光子测向技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020. (ZHANG Song. Research on direction finding based on microwave photonics[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2020.) doi:10.27389/d.cnki.gxadu.2020.002142.

[7] MA Jianxin, YU Jianjun, YU Chongxiu. Optical mmwave generation by using external modulator based on optical carrier suppression[J]. Optics Communications, 2006,268(1):51-57. doi:10.1016/j.optcom.2006.07.012.

[8] 杨凤骁. 微波信号光纤传输稳相技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (YANG Fengxiao. Research on phase stabilization technology of microwave transportation over fiber[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)doi:10.7666/d.D00990180.

[9] 杨健,刘渝,狄慧. 基于时差校正的长基线宽带测向算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1):20-28. (YANG Jian, LIU Yu, DI Hui. Long baseline direction finding algorithm of wideband signal based on time-delay correction[J]. System Engineering and Electronics, 2013,35(1):20-28.) doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.04.

亓亮,束坤,李迪. 基于时差解相位干涉仪模糊的测向方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2018,41(6):30-34. (QI Liang,SHU Kun,LI [10] Di. Research into direction finding method based on solving phase interferometer ambiguity by using time difference[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018,41(6):30-34.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2018.06.006.

作者简介:

唐 龙(1984-),男,学士,高级工程师,主要研究 方向为电子战侦察定位、系统总体技术.email:desert 1840@163.com.

朱扬辉(1994-),男,硕士,工程师,主要研究方向 为电子战侦察定位、信号处理技术.

王 斌(1991-),男,学士,工程师,主要研究方向 为电子战侦察定位、信号处理技术.

健(1995-),男,学士,工程师,主要研究方向 颜 为电子战侦察定位、信号处理技术.

(上接第709页)

- [13] 季华益, 唐莽, 王佩. 雷达对抗电子侦察中的大数据应用探析[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(3):1-4, 64. (JI Huayi, TANG Mang, WANG Pei. Big data application in radar countermeasures electronic reconnaissance[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2018, 34(3):1-4,64.) doi:10.16328/j.htdz8511.2018.03.001.
- 李爽,刘海鹏,郭兰图.基于电磁环境数据的信息挖掘与关联分析[J].太赫兹科学与电子信息学报,2022,20(1):8-15. [14] (LI Shuang, LIU Haipeng, GUO Lantu. Information mining and association analysis based on electromagnetic environment data[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(1):8-15.) doi:10.11805/TKYDA2021168.

作者简介:

鲁亚枭(1989-),男,在读硕士研究生,主要研究方 向为电子信息对抗.email:378033213@qq.com.

周长林(1961-),男,硕士,教授,主要研究方向为 电磁兼容与电磁信息安全等.

王海松(1973-),男,博士,高级工程师,主要研究 方向为电子信息对抗.

王怡澄(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方 向为无人机电磁效应.

刘广怡(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为 通信与电子对抗等.

余道杰(1978-),男,博士,教授,主要研究方向为 高功率微波技术与电子对抗.