

基于硅基片上光路由的大规模光载一体化接收机 多天线 GNSS 差分定位系统

徐武¹, 邹喜华¹, 李沛轩^{1*}, 周林杰², 潘炜¹, 闫连山¹, 李阳¹, 郑狄¹, 彭永良¹

¹西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756;

²上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 提出并实验验证了一种基于硅基片上光路由的大规模光载一体化接收机多天线全球导航卫星信号(GNSS)差分定位系统。该系统基于光载无线(RoF)分布式天线架构实现远端多点 GNSS 信号采集, 并利用低损耗、大带宽、抗电磁干扰的 RoF 传输链路实现远端采集 GNSS 信号的本地端集中式接收。在本地端处, 利用互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的高速硅基光开关芯片实现不同监测节点光载 GNSS 信号的定时切换与差分解算, 构建基于片上光路由的时分复用型一体化接收机多天线 GNSS 定位系统。在实验中, 利用自主研发的 1×8 马赫-曾德尔干涉型热光硅基光开关芯片构建了具有 5 个远端监测节点的多天线 GNSS 定位实验系统, GNSS 信号的 RoF 传输距离为 10 km。实验结果表明, 该光开关芯片模块的实时响应时间小于 200 μs, 可在无需额外光放大的条件下稳定支撑 10 km 外 5 个远端监测节点的高精度定位, 其在东(E)、北(N)、高(U)方向的定位精度均达到毫米量级。

关键词 光电子学; 微波光子学; 硅基光开关芯片; 全球导航卫星系统; 一体化接收机多天线; 高精度定位

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2425001

Large-Scale Multi-Antenna and One-Receiver GNSS-over-Fiber Differential Positioning System Using Silicon On-Chip Optical Routing

Xu Wu¹, Zou Xihua¹, Li Peixuan^{1*}, Zhou Linjie², Pan Wei¹, Yan Lianshan¹, Li Yang¹,
Zheng Di¹, Peng Yongliang¹

¹School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

²State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract This paper proposes and experimentally validates a large-scale multi-antenna and one-receiver global navigation satellite system (GNSS)-over-fiber differential positioning system using silicon on-chip optical routing. The radio-over-fiber (RoF) distributed antenna architecture is utilized to facilitate remote multipoint GNSS signal acquisition, and RoF transmission links featuring low loss, large bandwidth, and immunity to electromagnetic interference are reaped to achieve the centralized reception of remotely collected GNSS signals at the local end. At this end, a complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)-process-compatible high-speed silicon optical switch chip is fabricated for the periodic switching and differential calculation of GNSS signals over fiber obtained at different monitoring points. Then, a time-division multiplexing-based multi-antenna and one-receiver GNSS positioning system using on-chip optical routing is built. In the experiments, a self-developed 1×8 thermo-optic silicon optical switch chip based on a Mach-Zehnder interferometer is employed to build an experimental multi-antenna GNSS positioning system with five remote monitoring points. The RoF transmission distance of the GNSS signals is 10 km. According to the experimental results, the real-time response time of the optical switch chip module is less than 200 μs. Stable and high-accuracy positioning at five remote monitoring points (10 km away) is achieved without the aid of additional optical amplification. The obtained positioning accuracy in the east (E), north (N), and up (U) directions is all at the millimeter level.

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-06-12; 录用日期: 2022-06-20

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203204)、国家自然科学基金(61922069, 62001401)、四川省科技计划(2022JDTD0013)、四川省自然科学基金(2022NSFSC0559)、中央高校基本科研业务费项目(2682021CX045)

通信作者: *lpeixuan@swjtu.edu.cn

Key words optoelectronics; microwave photonics; silicon optical switch chip; global navigation satellite system; multiple antenna and one receiver; high-accuracy positioning

1 引言

全球定位系统(GPS)、北斗卫星导航系统等全球导航卫星系统(GNSS)已被广泛应用于大型土建工程形变监测、自然环境监测与灾害预警中,具有精度高、定位稳定、抗干扰能力强和全天候等优点^[1]。基于GNSS定位技术可进行山区滑坡^[2]灾害的自动化监测预警^[3]、高海拔山区机场建设的测量^[4]、沿海台风风暴潮的反演和海洋灾害的监测^[5]等,且均取得了良好的监测效果。然而,在上述监测系统中,每个监测节点需要对应一台GNSS接收机,对于大型结构的多点监测场景,多天线GNSS系统存在实施成本较高的瓶颈。

为解决上述实施成本问题,Chen等^[6]提出了一机多天线GNSS监测系统,即多个GNSS天线共用一个接收机。该方法在大型结构监测系统中,可大幅降低成本,且已被应用于杭州钱塘江三桥动态变形监测^[7]、公路边坡监测^[8]和小湾电站边坡监测^[9]等实际任务中。然而,现有接收机信号切换速度有限,存在卫星信号失锁和周跳时间长等问题。此外,上述系统使用无线链路或同轴电缆进行数据传输,存在远距离传输损耗大和易受恶劣环境影响的问题。

为克服上述远距离传输问题,文献[10-11]提出了一种利用低损耗模拟光载无线(RoF)链路传输GNSS信号的方法,即光载GNSS的方法。光载GNSS可充分利用光纤链路低损耗、大带宽和抗电磁干扰等本征优势,结合光波分复用技术后,可满足大型结构监测所需的分布式GNSS信号采集与集中式处理功能。文献[12]的实验展示了基于直调激光器(DML)的光载GNSS系统,传输距离为150 m。基于上述光载GNSS系统,波尔图大学研究团队探索了光载GPS系统在飞机姿态测量中的应用^[13]。文献[14]提出了一种光载一机多天线的GPS同步差分架构,利用接收机与天线之间的相对硬件延时监测模块将精度提高至毫米量级。文献[15-16]进一步验证了光载GNSS系统的有效性,实际测量精度可达到毫米量级。其中,文献[16]提出了基于光开关的时分复用型一机多天线光载GNSS定位系统,该方案采用光开关定时切换RoF通道,轮流接收远端多个光载GNSS信号用于后续差分解算。该方案所采用的高速微机电系统(MEMS)光开关的光切换响应时间小于10 ms,一定程度上改善了卫星信号的失锁和周跳时间长的问题。然而,通道切换后信号稳定所需时间超过1 min。

为解决上述问题,需进一步提高光开关的切换速度,而传统的MEMS光开关模块的开关切换时间的进一步提升面临成本高、复杂度高等瓶颈^[17],其切换速度通常在毫秒量级。传统的MEMS光开关应用于GNSS系统中时,易造成卫星信号部分丢失。此外,

MEMS光开关体积较大,制备流程不与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,这严重阻碍了该方法在新一代更注重小型化与集成化的低功耗RoF系统中的应用。近些年硅基光子学快速发展为上述问题提供了一种解决方案,相较于传统光开关,CMOS兼容的硅基光开关具有切换速度快、功耗低、带宽大、尺寸小和易于与其他器件单片集成等优点^[18],在下一代小型化、集成化的光系统中具有广阔的应用前景^[19-22]。

目前,鲜有关于硅基光开关应用于实时光载一机多天线GNSS业务传输的报道,故本文提出并实验验证了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型硅基光开关的大规模时分复用型光载一机多天线GNSS差分定位系统。在实验中,搭建了具备5个室外远端监测节点的光载GNSS系统:通过远端光电转换模块实施GNSS信号采集,并利用10 km长的RoF链路将5个节点的GNSS信号传输至室内本地端;在室内本地端处利用自主设计的精密可编程电压源来定时控制光开关芯片,以实现不同节点RoF传输通道的轮流切换;使用同一商用接收机实现不同监测节点的多个GNSS信号的差分解算。实验结果表明,各个节点的定位精度均可达到毫米量级。本系统采用自主研发的硅基光开关芯片实施片上路由,实验结果表明,该芯片可在无需额外光放大的条件下稳定支持5个监测节点的毫米级高精度定位,且切换速度较快(切换间隔约为200 μ s),与MEMS光开关方案^[16]相比,切换后卫星搜索时间缩短了一半,证实硅基光开关芯片在成本、体积、功耗和可拓展性方面具备明显优势。本工作进行了硅基光开关应用于实时光载GNSS业务传输的探索,其可与现有商用接收机有机融合,并结合了RoF技术独有的远距离传输优势,可为桥梁变形、山体滑坡和公路修建等大规模结构监测需求场景提供一种极具性价比的低功耗、高集成度的光子学解决方案。

2 光载一机多天线GNSS差分定位系统

2.1 系统架构

本文所研究的时分复用型光载一机多天线GNSS定位系统架构如图1所示。远端分布多个GNSS监测节点与一个基准节点。监测节点和基准节点天线获取的GNSS射频信号通过直调激光器实施电光调制(E/O)后,经过10 km长RoF链路传输至本地端处。不同监测节点反馈回来的射频调制光信号通过硅基光开关芯片分时轮流切换不同监测节点的RoF传输通道。在光电探测器(PD)实施光电转换后,将恢复出来的各监测节点的GNSS信号与基准GNSS信号送入数据接收机中进行处理与解算,以获取载波相位信息。

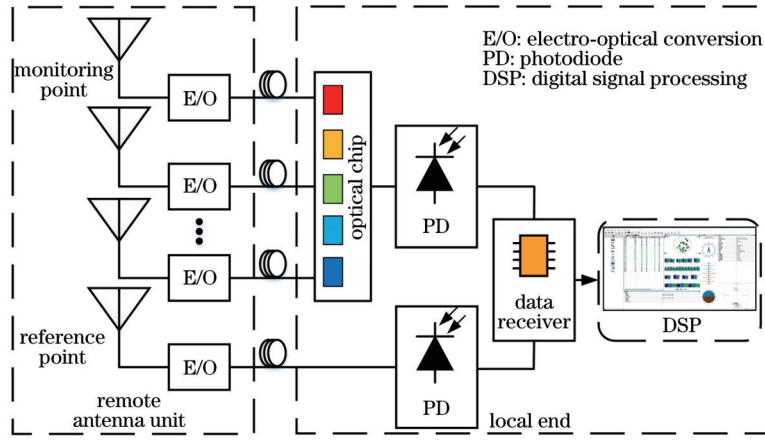


图 1 基于硅基片上光路由的大规模光载一机多天线 GNSS 差分定位系统架构

Fig. 1 Large-scale multi-antenna and one-receiver GNSS-over-fiber differential positioning system using silicon on-chip optical-routing

2.2 双差差分 GNSS 载波相位测量原理

系统基于 GNSS 载波相位测量实现高精度定位。采用应用较为广泛的双差分分模型实现载波相位测量^[23],如图 2 所示。利用两个 GNSS 天线,于同一历元对两颗不同卫星的载波相位测量值进行求差,以消除卫星钟差、卫星星历误差和大气误差等误差,进而提高定位精度。此外,后续理论推导涉及各个参数的定义均汇总于表 1。

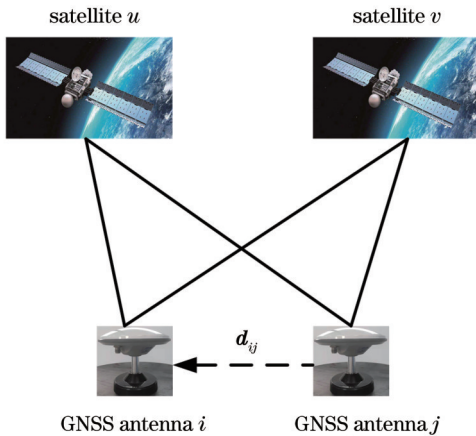


图 2 双差分分模型

Fig. 2 Double differential model

图 2 中 d_{ij} 为天线 i 和天线 j 之间的基线向量(两个同步观测站之间的坐标差)。天线 i 接收到的卫星 u 的单个载波相位观测值为

$$\phi_i^{(u)} = \lambda^{-1} \rho_i^{(u)} + f[\delta_i - \delta^{(u)}] + N_i^{(u)} + \lambda^{-1}[I_i^{(u)} + H_i^{(u)}] + G_i^{(u)} + T_i + E_{p,i}^{(u)}, \quad (1)$$

式中: f 为载波频率。

相同的卫星对不同天线的传输路径相同,故天线 j 接收到的卫星 u 的单个载波相位观测值可表示为

$$\phi_j^{(u)} = \lambda^{-1} \rho_j^{(u)} + f[\delta_j - \delta^{(u)}] + N_j^{(u)} + \lambda^{-1}[I_j^{(u)} + H_j^{(u)}] + G_j^{(u)} + T_j + E_{p,j}^{(u)}, \quad (2)$$

故天线 i 和天线 j 对同一卫星 u 的站间单差载波相位观

表 1 载波相位观测值方程参数定义

Table 1 Parameter definition of carrier phase observation equation

Parameter	Definition
$\phi_i^{(u)}$	Carrier phase observation from antenna i to satellite u
λ	Carrier wavelength with satellite frequency L_1
$\rho_i^{(u)}$	Geometric distance from antenna i to satellite u
δ_i	Clock difference of antenna i received by receiver
$\delta^{(u)}$	Clock difference of satellite u
$E_{p,i}^{(u)}$	Ephemeris error of satellite u
$N_i^{(u)}$	Integer ambiguity of carrier phase in process of satellite u transmitting to antenna i
$I_i^{(u)}$	Ionosphere deviation from satellite u to antenna i
$H_i^{(u)}$	Tropospheric deviation from satellite u to antenna i
$G_i^{(u)}$	Carrier phase observation noise from satellite u to antenna i
T_i	Delay of antenna i after introducing optical fiber

测值可以通过式(1)和式(2)的差值得到,即

$$\phi_{ij}^{(u)} = \lambda^{-1} \rho_{ij}^{(u)} + f(\delta_i - \delta_j) + N_{ij}^{(u)} + \lambda^{-1}[I_{ij}^{(u)} + H_{ij}^{(u)}] + G_{ij}^{(u)} + (T_i - T_j), \quad (3)$$

式(3)所示的单差载波相位观测方程消除了卫星 u 的时钟差 $\delta^{(u)}$ 和星历误差 $E_{p,ij}^{(u)}$ 。同理,天线 i 和天线 j 对卫星 v 的单差载波相位观测值为

$$\phi_{ij}^{(v)} = \lambda^{-1} \rho_{ij}^{(v)} + f(\delta_i - \delta_j) + N_{ij}^{(v)} + \lambda^{-1}[I_{ij}^{(v)} + H_{ij}^{(v)}] + G_{ij}^{(v)} + (T_i - T_j). \quad (4)$$

进一步,通过式(3)与式(4)作差,可得到天线 i 和天线 j 对卫星 u 和卫星 v 的双差差分载波相位观测值,即

$$\phi_{ij}^{(uv)} = \lambda^{-1} \rho_{ij}^{(uv)} + N_{ij}^{(uv)} + \lambda^{-1}[I_{ij}^{(uv)} + H_{ij}^{(uv)}] + G_{ij}^{(uv)}. \quad (5)$$

载波相位双差分模型可有效消除接收天线 i 和天线 j 的时钟差 δ_i 和 δ_j ,引入光纤后天 i 和天线 j 的时延为 T_i 和 T_j 。由于电离层、对流层延时误差具有时间和

空间上的相关性,且天线之间的距离比天线与卫星之间的距离近,故 $I_{ij}^{(u)}$ 和 $H_{ij}^{(u)}$ 近似为 0^[23]。同时,在实际应用中,当天线对 N 个不同的卫星解算载波相位值时,观测值噪声 $G_{ij}^{(uv)}$ 相对于载波相位值较小,可忽略不计^[16],故单个历元载波相位双差差分相位观测值可简化为

$$\phi_{ij}^{(uv)} = \lambda^{-1} \rho_{ij}^{(uv)} + N_{ij}^{(uv)}. \quad (6)$$

在此基础上,考虑多颗卫星、多个历元组合的情况,可得到双差差分载波相位观测值的矩阵,即

$$\lambda \begin{bmatrix} \phi_{ij}^{(21)} \\ \phi_{ij}^{(31)} \\ \vdots \\ \phi_{ij}^{(N1)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [L_j^{(2)} - L_j^{(1)}]^T \\ [L_j^{(3)} - L_j^{(1)}]^T \\ \vdots \\ [L_j^{(N)} - L_j^{(1)}]^T \end{bmatrix} d_{ij} + \lambda \begin{bmatrix} N_{ij}^{(21)} \\ N_{ij}^{(31)} \\ \vdots \\ N_{ij}^{(N1)} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $L_j^{(u)}$ 是基准天线 j 对卫星 u 的观测向量; $[L_j^{(u)} - L_j^{(v)}]^T$ 是天线 j 对卫星 u 和 v 的观测向量之间的差值。式中含有两个未知量,即基线向量 d_{ij} 和双差载波相位整周模糊度 $N_{ij}^{(uv)}$ 。需要先求 $N_{ij}^{(uv)}$,再获得 d_{ij} ,其基本求解过程为:先采用扩展 Kalman 滤波(EKF)进行参数估计,得到精确整周模糊度的浮点解与协方差矩阵,由于实际处理数据时,浮点解与协方差矩阵具有高相关性会引起整周模糊度搜索空间狭小、效率低下等问题^[24],故需要进行模糊度去相关化操作^[25];采用最小二

乘模糊度降相关平差(LAMBDA)法对 $N_{ij}^{(uv)}$ 的浮点值求解^[26],得到整周模糊度的固定解;将 $N_{ij}^{(uv)}$ 代入式(7)中,解出基线向量 d_{ij} ,进而得到精确的相对定位结果。

3 马赫-曾德尔干涉仪型硅基光开关芯片

3.1 马赫-曾德尔干涉仪型硅基光开关芯片的设计与制备

本文使用自主研发的时分复用型硅基光开关芯片实现片上路由选取,设计的硅基光开关芯片拓扑结构如图 3(a)所示,以可调 MZI 为基本开关单元,基于三级二叉树结构实现大小为 1×8 的光开关芯片。图 3(a)中 $E_1 \sim E_7$ 为电压控制的光开关单元, I (左端)、 $O_1 \sim O_8$ (右端)为光纤阵列端口,均可作为输入输出端口,未在图中标出。其中, MZI 开关单元结构如图 3(b)所示,其由两个 MMI 型 3 dB 耦合器和连接两者的等长直臂波导组成。 MZI 开关单元的开关状态由两臂集成的热光效应光移相器控制,热光移相器实现方法为:利用硅材料较大的热光系数,在波导包层之上加一层金属电阻(如 TiN),通过对金属电阻加热将热量传导到波导上来改变波导的温度,从而实现折射率调节。基于热光效应设计的光开关单元结构简单,在相位调节过程中不会影响开关的消光比、串扰和损耗等特性,开关速度可达微秒量级。

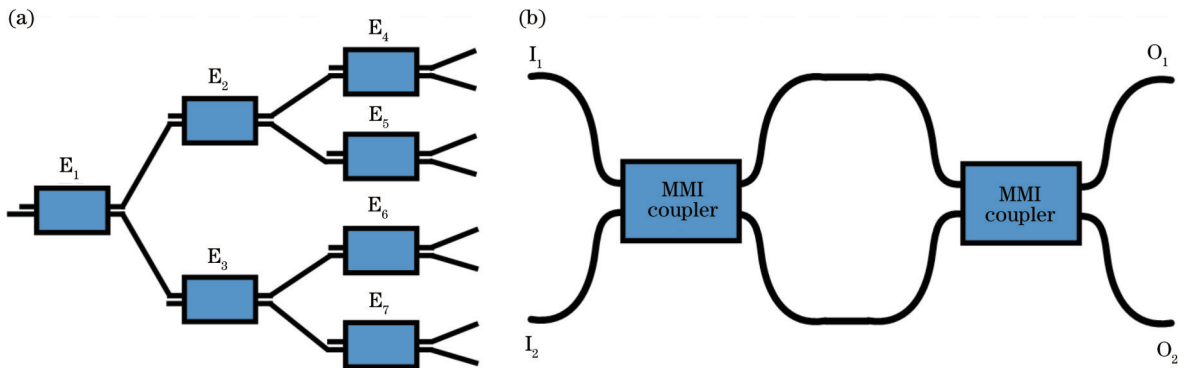


图 3 1×8 硅基光开关芯片结构。(a)拓扑结构;(b) MZI 光开关单元结构

Fig. 3 Structure of 1×8 silicon optical switch chip. (a) Topological structure; (b) unit structure of MZI optical switch

在芯片结构与单元器件设计的基础上,基于 CMOS 兼容的氮化硅(SiO_2)材料工艺完成了开关芯片的制备。芯片实物的光学显微观测图如图 4(a)所示。在此基础上,采用引线键合工艺与光纤阵列垂直耦合工艺完成对芯片的整体封装,获得的光开关芯片封装模块如图 4(b)所示。

3.2 多通道可编程电压源设计

上述 1×8 光开关芯片的开关状态控制需实现三级共 7 个 MZI 光开关单元[对应于图 3(a)所示的 $E_1 \sim E_7$ 电压控制端口]的独立与协同精准可编程控制。将芯片左侧光输入(输出)端口定义为 I ,右侧 8 个输出(输入)端口分别定义为 $O_1 \sim O_8$,表 2 给出了开关芯片在不同光通路状态(如将 I 口至 O_1 口通路记为 $I-O_1$)

下,不同控制端口所需的移相电压。如表 2 所示,某一通路的实现需同时控制至少三个 MZI 开关单元(CH 1、CH 2、CH 3)的移相电压,以保证选定的芯片光输出端口的光功率最大,而其他端口光功率最小。基于此,自主设计了一种 $0 \sim 10 \text{ V}$ 电压范围内 1024 阶高精度多通道可编程电压源。该可编程数控电压源单路设计结构如图 5 所示。采用现场可编程门阵列(FPGA)作为核心控制芯片,通过数/模转换(DAC)和运放,将只读存储器(ROM)中存储的数字电压数据转换成模拟电压信号^[27]。

电压源的硬件实现采用 Xilinx 公司的 Artix7 系列 FPGA 开发板, TI 公司的 TLC5615 数/模转换模块和国产 OP07 两倍运算放大模块。TLC5615 是 10 bit 电

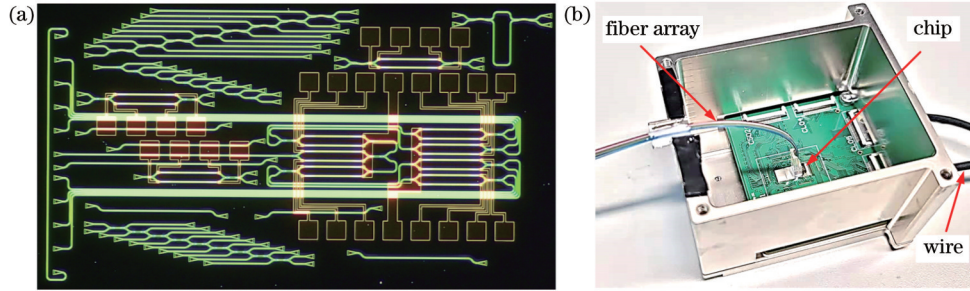


图 4 制备的 1×8 硅基光开关芯片。(a) 光学显微镜观测图；(b) 封装实物图

Fig. 4 Fabricated 1×8 silicon optical switch chip. (a) Optical microscope image; (b) packaged physical drawing

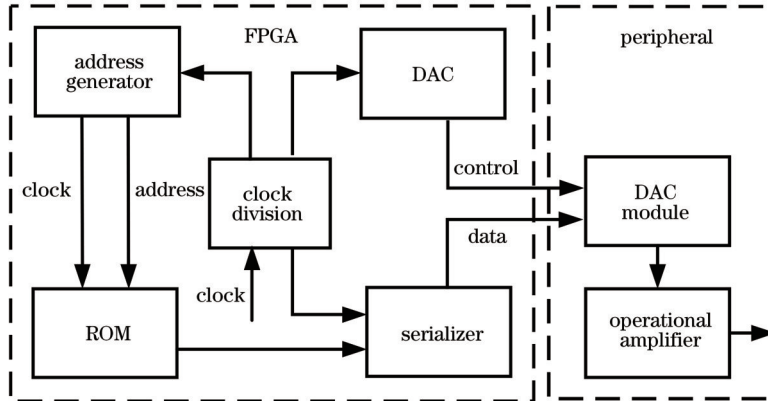


图 5 多通道数控电压源单路设计图

Fig. 5 Design diagram of one channel for multi-channel numerical control voltage source

表 2 芯片通路测试电压

Table 2 Test voltage of chip channel

Channel (port)	CH 1 /V	CH 2 /V	CH 3 /V
E ₁ -E ₂ -E ₄ (I-O ₁)	3.99	5.89	7.80
E ₁ -E ₂ -E ₄ (I-O ₂)	4.29	5.79	4.80
E ₁ -E ₂ -E ₅ (I-O ₃)	3.99	8.29	7.50
E ₁ -E ₂ -E ₅ (I-O ₄)	4.09	8.29	7.50
E ₁ -E ₃ -E ₆ (I-O ₅)	7.39	8.19	7.70
E ₁ -E ₃ -E ₆ (I-O ₆)	7.39	8.19	4.70
E ₁ -E ₃ -E ₇ (I-O ₇)	7.29	5.59	8.00
E ₁ -E ₃ -E ₇ (I-O ₈)	7.69	5.59	5.00

压输出型的数/模转换器,输出电压可表示为

$$V_{out} = 4V_{REFIN} (C_{ROM}/1024), \quad (8)$$

式中: V_{REFIN} 为基准电压,其值为 2.5 V; C_{ROM} 为 FPGA 中 ROM 的电压数据。设置不同的数字电压数据就可实现输出电压 V_{out} 的调节,调节精度为 0.01 V,可满足光开关芯片的高精度控制要求。

3.3 光开关芯片测试结果与分析

在芯片制备、封装和驱动电路设计的基础上,进一步测试制备的硅基光开关芯片模块的插入损耗、消光比和切换速度等核心性能指标。可调激光器输出光信号经偏振控制器后,以合适的偏振态从图 3(a)中的芯片左侧端口输入宽谱光源,利用多通道电压源依次选取 $I-O_k (k=1, \dots, 6)$ 6 条通路,使用光谱仪测量不同通路(开关)状态下芯片模块右侧 $O_k (k=1, \dots, 6)$ 输出端

的传输谱,用于提取插入损耗、消光比等信息,结果如图 6 所示。从测试结果可见,该芯片在 1560~1580 nm 波长之间的插入损耗达到最小,这主要是由光栅耦合器的中心波长决定的,为不失一般性,重点观测了 1570 nm 波长下的测试指标。图 6 中 I 为通道输入光谱,图 6(a)~(f)中 $O_k (k=1, \dots, 6)$ 依次为通道 1 至通道 6 导通状态的输出光谱(插入损耗=输入光功率-输出光功率)。可以得到 $I-O_k (k=1, \dots, 6)$ 链路的光纤插入损耗分别为 15.32 dB、15.33 dB、16.29 dB、14.05 dB、13.99 dB、14.38 dB,其中包含了约 10.70 dB 的耦合损耗。因此,6 条链路的片上插入损耗分别为 4.62 dB、4.63 dB、5.59 dB、3.35 dB、3.29 dB、3.68 dB。同样,从图 6 可以发现, $I-O_k (k=1, \dots, 6)$ 链路的消光比分别为 32.01 dB、34.95 dB、29.02 dB、33.69 dB、34.76 dB、35.04 dB。

进一步测试芯片的开关切换速度。可调激光器输出的光信号经偏振控制后输入至左侧 I 端口,利用可编程电压源选取 $I-O_1$ 通路, O_1 端口输出光信号传输至 PD 中转换为电信号并送入实时示波器中来观测时域波形。利用可编程电压源生成频率为 1 MHz 的矩形方波控制电压。此时,在连续光输入条件下,开关芯片的输出幅值亦随时间呈阶跃方波状。利用 PD 的光电转换将光域幅值特性映射至电域,从而在实时示波器上可观测到开关芯片的切换速度特性,其结果如图 7 所示。可以看到,所制备的光开关芯片的上升沿和下降沿开关时间分别约为 160 μ s 和 220 μ s。

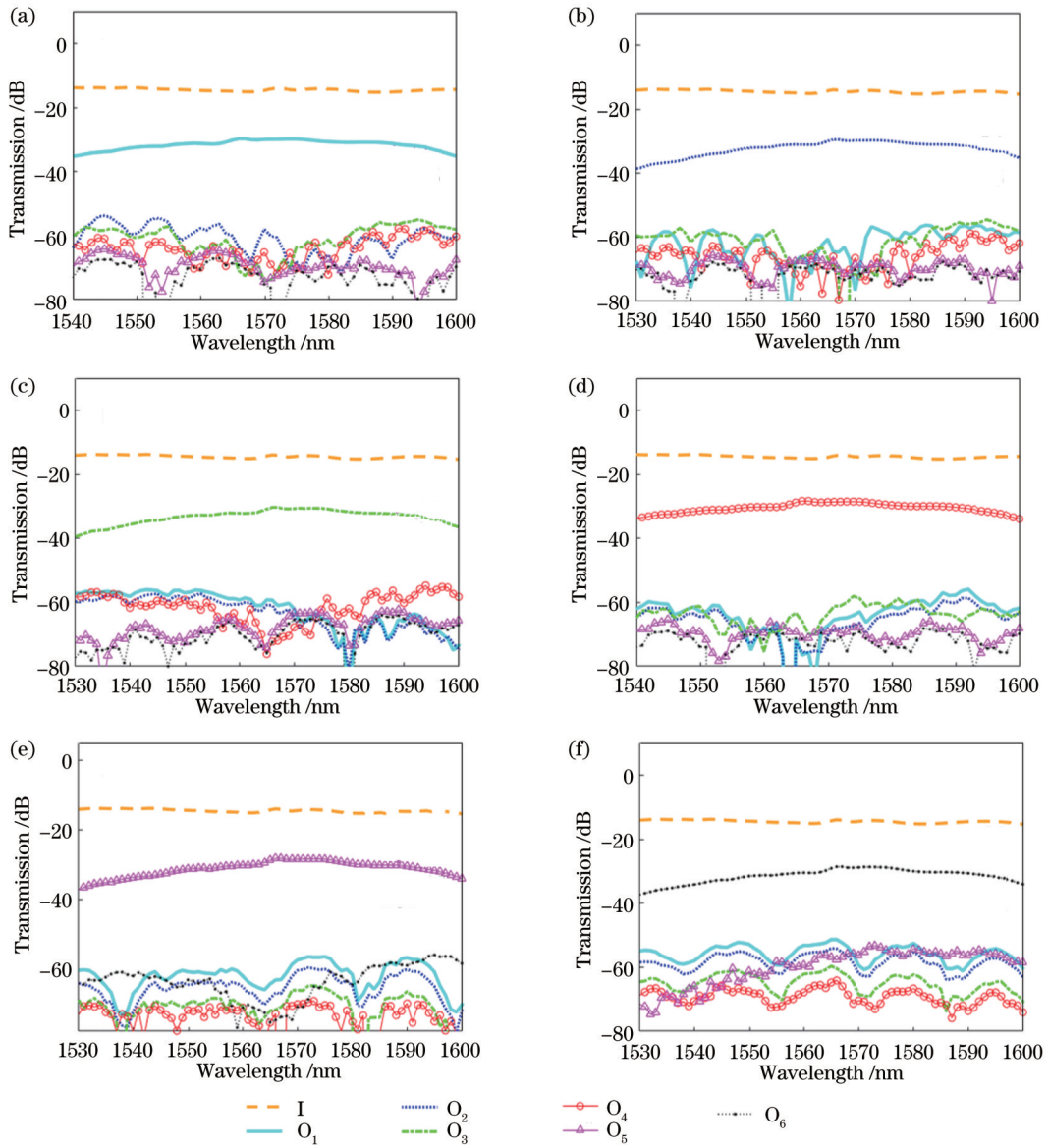


图 6 光开关芯片各通道传输谱测量结果。(a) I-O₁; (b) I-O₂; (c) I-O₃; (d) I-O₄; (e) I-O₅; (f) I-O₆

Fig. 6 Measured transmission spectra of optical switch chip channels. (a) I-O₁; (b) I-O₂; (c) I-O₃; (d) I-O₄; (e) I-O₅; (f) I-O₆

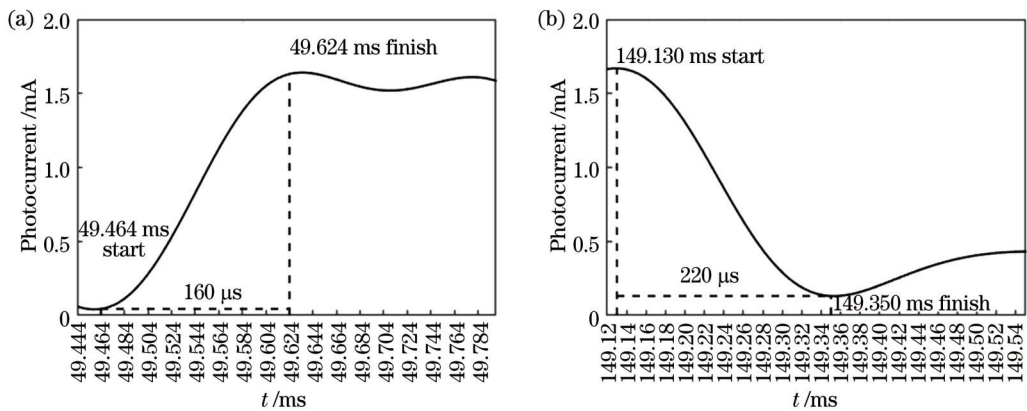


图 7 光开关芯片切换速度测试结果。(a)上升沿; (b)下降沿

Fig. 7 Result of switching speed of optical switching chip. (a) Rising edge; (b) falling edge

4 实验方案与结果分析

4.1 实验方案

在系统架构、原理分析与关键光开关芯片模块制备的基础上,进一步设计与搭建了具有 5 个远端监测节点与一个基准节点的时分复用型光载一机多天线 GNSS 定位实验验证系统,方案如图 8 所示,其中 Bias-T 为 T 型偏置器,SMF 为单模光纤。远端的 GNSS 信号采集节点由 GNSS 天线、直调激光和低噪放大器 (LNA) 组成。直调激光器工作在 1550 nm 处,输出功率约为 10 dBm。天线接收到的微弱 GNSS 信号经 LNA 放大后加载至 DML 上来调制光载波。携带

GNSS 的光载波经 10 km 长 RoF 链路传输至本地端处。在本地端处,监测节点反馈回来的光载波经光开关芯片模块进行定时通路切换。芯片输出接入至 3 dB 带宽为 15 GHz 的 PD。经 PD 光电转换恢复出的 GNSS 信号输入至商用接收机(司南 OEM 板卡)中以解算出导航电文信息、载波相位观测值和载噪比(CNR)等信息。基准节点反馈回来的光载 GNSS 信号则直接利用 PD 进行光电转换,并送入 GNSS 接收机中以解算出卫星导航坐标、载波相位和载噪比等信息。最后,将监测节点和基准节点的解调数据输入数字信号处理单元(DSP)模块(实验中用计算机实现)中,并基于双差分模型获得两点之间的相对距离(基线长度)。

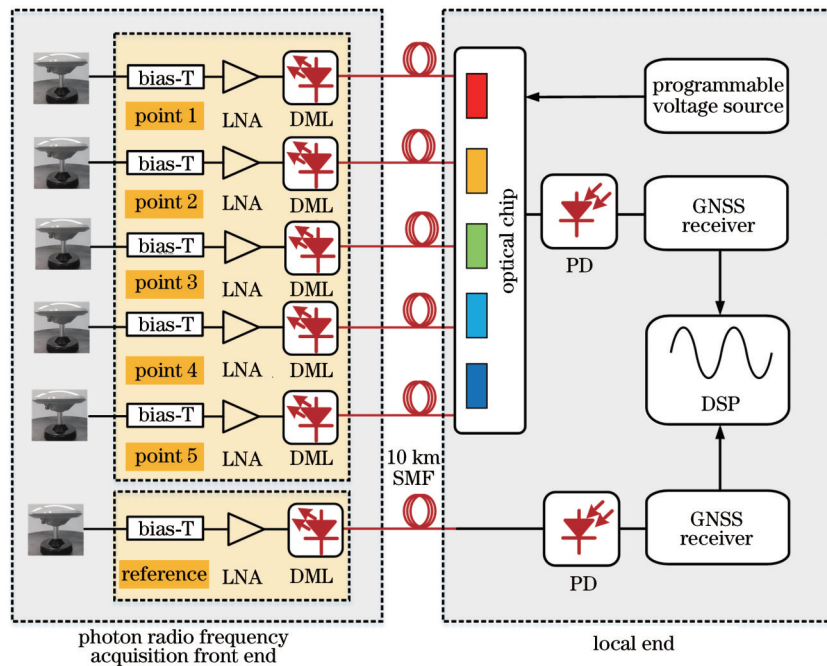


图 8 实验方案

Fig. 8 Experimental scheme

4.2 实验结果分析

实验在西南交通大学犀浦校区现代交通通信与传感网络国家级国际联合研究中心进行,位于楼顶的 5 个远端监测节点与基准节点位置分布情况如图 9(a) 所示。图 9(b) 给出了各个节点处用于 GNSS 信号采集的光子射频前端模块的内部实物图。各个节点采集的 GNSS 信号经光波承载,并通过 10 km 长光纤传输至室内本地端处。本地端实验装置如图 9(c) 所示,基准节点和 5 个监测节点(经光开关芯片后)的光载无线信号分别由两个 PD 接收。

在实验中,事先人工测量了监测节点相较于基准节点的实际距离以用于对比,其结果分别为:29.230(节点一)、34.240(节点二)、17.984(节点三)、11.790(节点四)、35.555 m(节点五)。为了快速观察 5 个监测节点与基准节点的相对距离(基线长度),每个监测节点持续时间设置为 234 个历元(约 4 min)。利用光开关定时轮流测量不同监测节点的基线长度,切换间隔约为 200 μ s,获得的测量结果如图 10(a) 所示。可以

发现,该系统可以利用单个 GNSS 接收机实现远端多个不同监测节点的本地端基线长度定时轮流测量。需要注意的是,不同监测节点之间的切换存在一定时延(体现为测量结果的剧烈波动),时延大小约为 20 s,这是因为切换到新的监测节点后,需要重新运行整周模糊度解算算法(LAMBDA)以获得新节点的稳定基线长度的测量结果。

进一步地,5 个监测节点的每个历元的实时测量结果如图 10(b)~(f) 所示,其中虚线表示在观测时间内基线长度测量结果的平均值。为进一步分析该定位系统的定位精度,表 3 列出了在观测时间段内,监测节点 1~5 的基线长度及其在北(N)、东(E)、高(U)方向分量测量结果的平均值和标准差。可以发现,各个监测节点具有大致相等的定位精度。相较于人工测量结果,该时分复用型一机多天线定位系统的三维坐标分量和基线长度的实时测量精度均达到毫米量级,如监测节点 1 中,基线长度的人工测量结果与定位结果均值误差约为 3 mm。为了更好地分析监测节点的

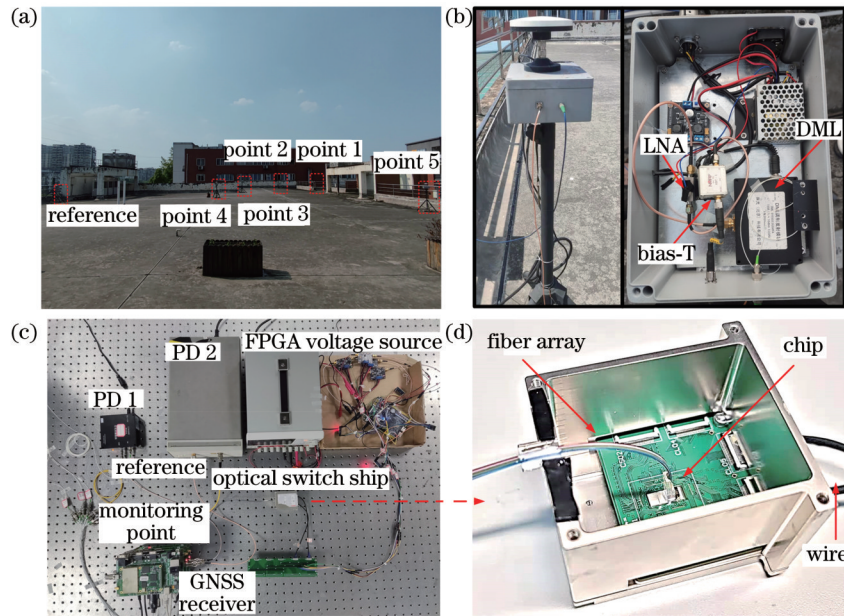


图 9 实验布置图。(a)室外远端 GNSS 节点位置分布图；(b)光子射频前端实物图；(c)室内本地端实验装置图；(d)硅基光开关芯片封装模块内部实物图

Fig. 9 Layout of experiment. (a) Distribution of outdoor remote GNSS points; (b) picture of photonic radio frequency front end; (c) experimental setup of indoor local end; (d) inside view of silicon optical switch chip packaged module

表 3 监测节点 1~5 的 E、N、U 方向的平均值和标准差

Table 3 Mean value and standard deviation in E, N and U directions of monitoring point 1 to 5

Monitoring point No.	Index	E direction	N direction	U direction	Base length
1	Mean value /m	+25.590	+14.133	+0.034	29.233
	Standard deviation /mm	3.5	2.4	3.4	3.1
2	Mean value /m	+34.129	+2.723	-0.037	34.238
	Standard deviation /mm	2.5	1.3	1.8	1.5
3	Mean value /m	+16.910	+6.129	+0.207	17.987
	Standard deviation /mm	2.4	2.1	3.5	2.7
4	Mean value /m	+10.672	+5.721	+0.334	11.790
	Standard deviation /mm	3.0	2.8	1.7	1.9
5	Mean value /m	+35.172	+4.884	-1.195	35.559
	Standard deviation /mm	1.7	2.7	2.4	2.5

GNSS 信号质量,选取 GPS 系统的 G02、G05 和北斗系统的 C10、C13 卫星进行系统接收信号载噪比性能分析。5 个监测节点对应卫星的实时载噪比如图 11 所示(时间轴从左到右依次对应监测节点 1~5)。可以看到,每个节点持续时间为 234 个历元,4 颗卫星的载噪比均保持在 40 dB/Hz~50 dB/Hz 的良好范围。因此,系统具备支持更远光纤传输距离的能力。

5 结 论

设计并实验验证了一种基于硅基片上光路由的大规模光载一机多天线 GNSS 定位系统。实验结果表明,该系统可利用单一接收机实现多个远端 GNSS 监测节点的毫米量级高精度定位。探索了 CMOS 工艺兼容的高速硅基光开关芯片在光载 GNSS 实时业

务传输中的应用,使用自主研发的 MZI 型硅基光开关芯片实现了 5 个 GNSS 监测节点的片上通路快速切换与稳定高精度定位。受实验室条件所限,只展示了 5 个监测节点的定位,实际基于大小为 1×8 的光开关芯片,节点可扩展至 8 个,并且已有更大规模的硅基光开关芯片出现,如大小为 32×32 的硅基光开关芯片^[28]。因此,本系统具有进一步扩展监测节点数的潜力。由于采用时分复用机制进行各个节点定位信息的无串扰轮流解算,故节点数目的增加不会对定位性能造成较大影响。同时,借助于硅基光开关芯片易于与其他器件集成和极好的可拓展性能,该监测方案可为大型土建工程、自然环境等大规模监测需求场景提供极具性价比的高集成度、小型化光子学解决方案。

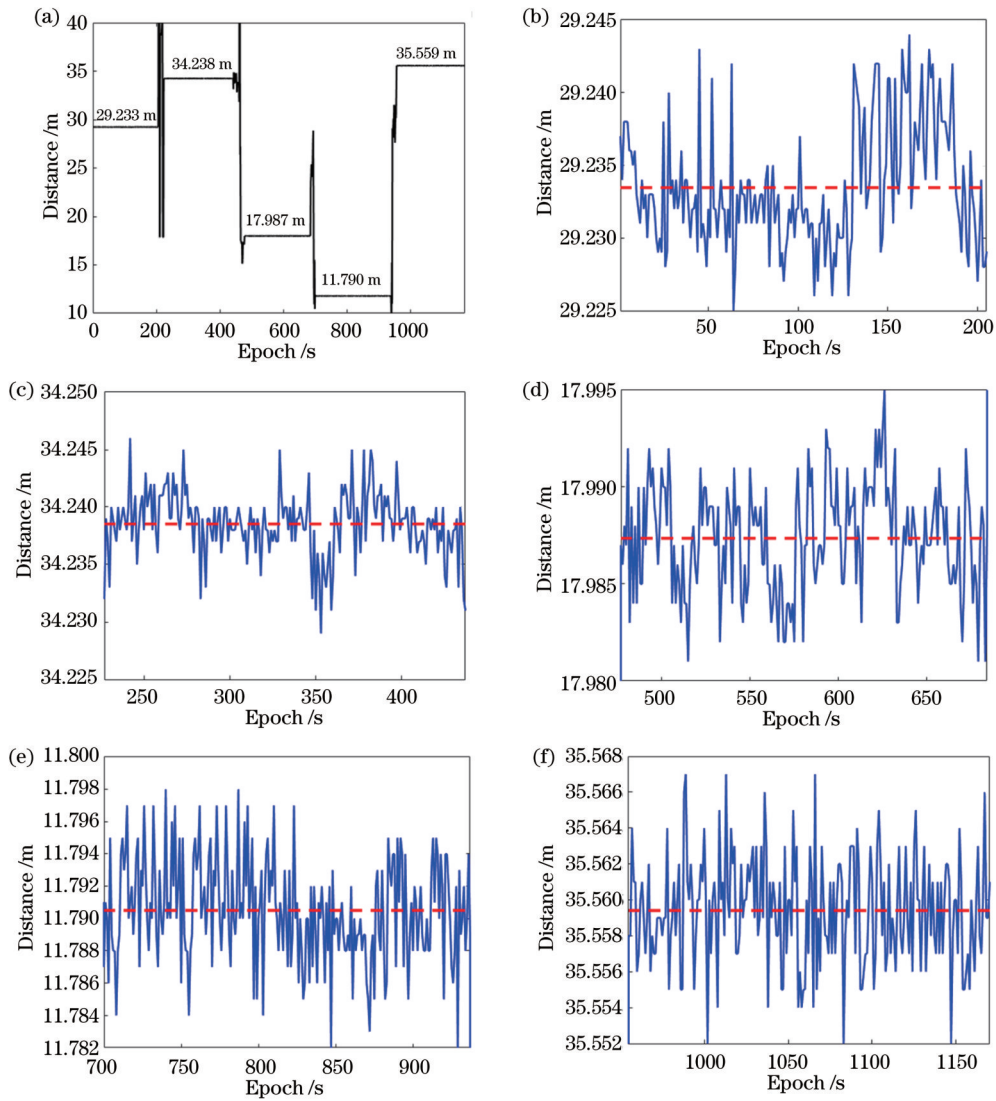


图 10 5 个监测节点的基线长度结果。(a)多天线定时轮流测试基线长度;(b)监测节点 1;(c)监测节点 2;(d)监测节点 3;(e)监测节点 4;(f)监测节点 5

Fig. 10 Baseline lengths of five monitoring points. (a) Measured baseline lengths for five GNSS antennas in chronological order; (b) monitoring point 1; (c) monitoring point 2; (d) monitoring point 3; (e) monitoring point 4; (f) monitoring point 5

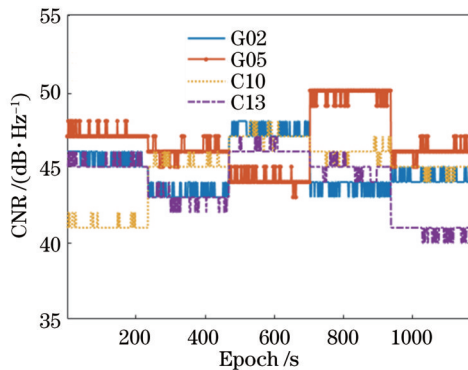


图 11 5 个监测节点对应的 G02、G05、C10、C13 卫星的 CNR
Fig. 11 CNR of G02, G05, C10 and C13 satellites corresponding to five monitoring points

参 考 文 献

[1] 兰孝奇, 黄张裕, 李森. GPS 观测数据处理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 12.
Lan X Q, Huang Z Y, Li S. Processing and application of GPS observation data[M]. Beijing: Science Press, 2012: 12.

[2] 刘彦杰, 付庆伟, 倪自强. GPS 一机多天线滑坡监测系统的建立和应用[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 52-53, 97.
Liu Y J, Fu Q W, Ni Z Q. Establishment and application of landslide monitoring system using GPS of single instrument with multi-antennas[J]. Yangtze River, 2013, 44(15): 52-53, 97.

[3] 吴忠银. 滑坡灾害中 GNSS 自动化监测预警系统技术浅析[J]. 西部资源, 2021(5): 197-200.
Wu Z Y. Analysis of GNSS automatic monitoring and early warning system technology in landslide disaster[J]. Western Resources, 2021(5): 197-200.

- [4] 曹宁. GNSS精密定位技术在高海拔山区机场建设测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(12): 81-83.
Cao N. Application of GNSS precision positioning technology on airport construction survey in high altitude mountainous area[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(12): 81-83.
- [5] 何秀凤, 王杰, 王笑蕾, 等. 利用多模多频 GNSS-IR 信号反演沿海台风风暴潮[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1168-1178.
He X F, Wang J, Wang X L, et al. Retrieval of coastal typhoon storm surge using multi-GNSS-IR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1168-1178.
- [6] Chen Y Q, Ding X L, Huang D F, et al. A multi-antenna GPS system for local area deformation monitoring[J]. Earth, Planets and Space, 2000, 52(10): 873-876.
- [7] 何秀凤, 贾东振, 刘志平. 基于 GPS 一机多天线方法的大型桥梁动态变形监测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 44-48.
He X F, Jia D Z, Liu Z P. Application of GPS multi-antenna method to dynamic deformation monitoring of long-span bridges[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(1): 44-48.
- [8] 赵西安, 樊鹏昊, 樊英姿. GNSS 一机多天线远程监测系统的研发[J]. 测绘通报, 2015(11): 4-7, 101.
Zhao X A, Fan P H, Fan Y Z. Developing the remote monitoring system based on GNSS multi-antenna[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(11): 4-7, 101.
- [9] 许斌, 何秀凤, 桑文刚, 等. GPS 一机多天线技术在小湾电站边坡监测中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005(3): 64-67.
Xu B, He X F, Sang W G, et al. Application of GPS multi-antenna technology to slope deformation monitoring at Xiaowan Hydropower Station[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2005(3): 64-67.
- [10] Zhang Y M, Zhang F Z, Pan S L. Optical single sideband polarization modulation for radio-over-fiber system and microwave photonic signal processing[J]. Photonics Research, 2014, 2(4): B80-B85.
- [11] Karim A M, Stafford S J, Baker R B. Global positioning system over fiber for buoyant cable antennas[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2012, 30(4): 309-320.
- [12] Oliveira J M B, Pessoa L M, Salgado H M, et al. Experimental evaluation of a differential GPS-over-fiber system for aircraft attitude determination[C]//2013 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, October 1-3, 2013, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 75-76.
- [13] Pessoa L M, Oliveira J M B, Coelho D, et al. Transmission of differential GPS signals over fiber for aircraft attitude determination[C]//IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Digest CD, September 11-13, 2012, Cocoa Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2012: 80-81.
- [14] Macias-Valadez D, Santerre R, Larochelle S, et al. Improving vertical GPS precision with a GPS-over-fiber architecture and real-time relative delay calibration[J]. GPS Solutions, 2012, 16(4): 449-462.
- [15] 宋希希, 郭荣辉, 周永刚, 等. 光载 GPS 一机多天线系统的实验验证[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(6): 957-963.
Song X X, Guo R H, Zhou Y G, et al. Experimental demonstration of GPS-over-fiber multi-antenna receiver system[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(6): 957-963.
- [16] 刘璞宇, 邹喜华, 李阳, 等. 光载一机多天线远程 GNSS 差分监测系统[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 197-204.
Liu P Y, Zou X H, Li Y, et al. Multi-antenna remote differential monitoring system based on a single GNSS-over-fiber architecture[J]. Journal of Radars, 2019, 8(2): 197-204.
- [17] 周剑超, 张策. $1 \times N$ MEMS 光开关模块的设计[J]. 轻工科技, 2020, 36(5): 59-62.
Zhou J C, Zhang C. Design of $1 \times N$ MEMS optical switch module[J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(5): 59-62.
- [18] Yoo S J B. Future prospects of silicon photonics in next generation communication and computing systems[J]. Electronics Letters, 2009, 45(12): 584-587.
- [19] 罗佳莹, 邓军勇, 杨博文, 等. LONE: 一种低损耗无阻塞可扩展的 8 端口光路由器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0313001.
Luo J Y, Deng J Y, Yang B W, et al. LONE: a low-loss, non-blocking, and scalable 8-port optical router[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0313001.
- [20] 邱高峰, 吴侃, 曹先益, 等. 基于 FPGA 电控的二维快速光束扫描雷达系统[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1101001.
Qiu G F, Wu K, Cao X Y, et al. Two-dimensional fast beam scanning lidar system based on FPGA control[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1101001.
- [21] 钱伟文, 吴传斌, 林伊, 等. 基于光开关抑制背向散射噪声的谐振式微光学院螺[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1010003.
Qian W W, Wu C B, Lin Y, et al. Resonant micro-optical gyroscope based on optical switch to suppress backscattering noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1010003.
- [22] 孙健, 吴远大, 安俊明, 等. 基于悬浮波导的低功耗聚合物热光开关[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301008.
Sun J, Wu Y D, An J M, et al. Polymer thermo-optic switch with low-power consumption based on suspended waveguide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301008.
- [23] 齐运驰. 多天线 GNSS 差分定位技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Qi Y C. Research on differential GNSS with multiple antennas[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [24] 李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处

- 理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- Li Z H, Zhang X H. New techniques and precise data processing methods of satellite navigation and positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [25] 周金龙, 孙永荣, 吴玲, 等. GPS 移动基准站差分定位算法[J]. 导航与控制, 2020, 19(6): 43, 44-49.
- Zhou J L, Sun Y R, Wu L, et al. Differential positioning algorithm for GPS moving base station[J]. Navigation and Control, 2020, 19(6): 43, 44-49.
- [26] Li Y. A novel ambiguity search algorithm for high accuracy differential GNSS relative positioning[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78: 418-426.
- [27] 黄庆探, 付红桥, 张智海, 等. 基于FPGA的可编程电压源系统设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(24): 192-194, 202.
- Huang Q T, Fu H Q, Zhang Z H, et al. Design of programmable voltage source system based on FPGA[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(24): 192-194, 202.
- [28] Han S, Beguelin J, Ochikubo L, et al. 32×32 silicon photonic MEMS switch with gap-adjustable directional couplers fabricated in commercial CMOS foundry[J]. Journal of Optical Microsystems, 2021, 1(2): 024003.