

基于 STM32 的舰船横摇周期测量与存储系统设计*

郑振宇¹ 王英福² 郑智林¹

(1. 海军大连舰艇学院航海系 大连 116018; 2. 92956 部队 大连 116041)

摘要:针对传统舰船周期测量方法费时、费力、精度低等问题,设计开发了一种舰船摇摆周期自动测量与存储系统。系统以 STM32 系列微处理器为核心,利用 MEMs 惯性器件与磁阻传感器构建姿态敏感单元,应用旋转矢量姿态更新算法实时跟踪舰船摇摆角变化,采用频域周期测量方法并配合 SD 卡存储单元与 FATFS Module 文件系统,可实现舰船摇摆角、摇摆周期的实时测量与连续存储。摇摆台测试实验表明:系统可实时监测摇摆角变化,角度测量精度优于 0.5° ,周期测量精度可达 0.1 s,采用锂电池独立供电可稳定、连续工作 30 天,完全满足舰船海上摇摆数据监测与存储的要求,具有较强的工程应用价值。

关键词:摇摆周期测量;STM32;MEMS 惯性器件

中图分类号: TP9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Design of ship roll period measurement and storage system based on STM32

Zheng Zhenyu¹ Wang Yingfu² Zheng Zhilin¹

(1. Department of navigation, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China; 2. Unit 92956, Dalian 116041, China)

Abstract: Traditional measuring method of ship swing period waste time and energy, and measure accuracy is bad. To solve the problem, an automatic measurement and storage system is developed based on STM32 series MCU. The swing angle measurement unit is built with MEMs inertial component and magnetism sensors. And the rotary vector attitude update arithmetic is applied to track the change of angle. The period of swing is calculated by FFT period measure method on frequency domain. With the using of SD card memory unit and file system of FATFS Module, the system can save the result data including angles and periods continuously. Swing table measurement tests verified that the system realized the real-time measurement of swing angles with the precision of 0.5° and periods with the precision of 0.1 s. The system can work steadily and continuously for about 30 days supplying by lithium battery, and can meet the requirements of ship swing data monitor and logging on the sea. Therefore the system has the strong engineer application values.

Keywords: measurement of ship roll period; STM32; MEMS inertial sensors

1 引言

舰艇的浮性、稳性与不沉性是舰船生命力的重要指标。舰船在货物装载、油水使用过程中都会造成舰船的浮态及稳性指标的偏移,主要体现为舰艇横摇角与摇摆周期的变化,对该变化进行实时监测对于舰船航行安全具有重要意义^[1]。同时,对横摇数据进行统计、频域及时间序列分析,可为开展船舶摇摆运动建模与预报等相关研究提供重要的数据支持^[2-3]。目前,常规的摇摆周期测量方法一般需要利用舰船机械式横摇指示器配合秒表等计时工具,采用人工多次测量取平均值的方式进行,费时费力,精度

不高,测量的数据无法进行后续处理与分析。近年来,基于 MEMS 器件航姿测量方案是捷联航姿测量设备的首选方案,并得到了成熟应用^[4-5]。以 STM32 系列 ARM 单片机为主控制器具有功能接口丰富、集成度高、低功耗等特点,是开发低成本、多功能数据采集与数据存储设备的常用主控芯片^[6-7]。目前现有文献中开发的多数航姿系统仅是一种姿态测量设备,而不具备横摇周期解算与数据记录的功能^[8],同时,系统一般都需要外部稳压电源供电,无法独立工作。基于此,本文采用 MEMS 惯性器件及地磁传感器作为姿态测量元件,以 STM32F103RET6 单片机为主控单元,应用姿态更新算法与频域周期测量算法,设

收稿日期:2015-10

* 基金项目:国家自然科学基金(51309059)项目、海军大连舰艇学院 2110 三期学术课题资助项目

计了一种舰船电子横摇周期测量与存储系统,可对舰船航行姿态、横摇周期、横摇幅度以及其他频率特性数据进行实时测量与存储。

2 系统组成

舰船电子横摇周期测量与存储系统组成如图1所示。系统以低功耗高性能微处理器(MCU)为核心,以三轴MEMS加速度计、陀螺仪惯性测量元件,辅助磁阻传感器作为姿态测量传感器组,采用OLED屏幕外显单元,以高速大存储量SD卡为存储媒介,内嵌FATFS文件系统。存储文件格式选用二进制文件,以提高存储速度与存储效率。考虑到舰船出航对系统提出的续航时间及独立工作要求,采用锂电池独立供电,并专门设计充放电电路,一次充电可连续工作30天。

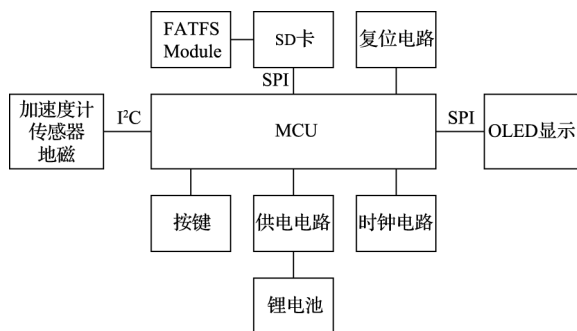


图1 系统组成

其中,MCU采用基于ARM Cortex-M3内核的32位单片机STM32F103RET6。系统的具体工作流程如下:系统初始化后通过陀螺仪、加速度计和地磁传感器进行设备初始对准;初始化完毕,MCU模块通过I²C数字接口采集加速度计、陀螺仪以及地磁传感器数据,基于捷联航姿更新算法对姿态进行实时解算,采用快速傅里叶变换的频域周期测量方法实时计算摇摆周期,计算后的各类数据由SPI总线发送到OLED显示屏显示,并通过FATFS文件系统以SD卡为媒介进行数据存储。通过按键可实现显示界面的切换与参数设置。

3 硬件系统设计

3.1 MCU模块

综合考虑系统总体性能要求与成本要求,处理器选用STM32F103RET6型号芯片,该芯片属于STM32F103系列微控制器,可用于高度集成与低功耗的嵌入式应用场合^[9-10]。芯片具有64个引脚,其中I/O口数目为51个,具有如下特点:

- 1)先进的内核结构:Cortex-M3内核;
- 2)优秀的功耗控制,具有高效率的动态耗电机制,代码在Flash中全速运行频率为72 MHz,如果外部时钟开启,处理器仅消耗27 mA电流,电池供电时,可在2.0~3.6 V间低电压供电;

3)通信接口广泛,包括5个USART,3个SPI,2个I²C,USB,CAN,SDIO各一个;

4)高达512 KB的片内Flash程序存储器;

5)4个通用定时器,2个基本定时器,2个高级控制定时器;

6)高度集成整合,最大程度集成实现,尽量减小对外部器件要求,它内嵌有电源监控器,具有上电复位、掉电检测等诸多功能。

3.2 加速度计传感器

根据实际工作环境,选用具有低功耗、量程可变、高分辨率、抗冲击等良好特性的ADXL345三轴加速度计。该传感器不但可以在倾斜敏感应用中测量静态重力加速度,还可以在运动甚至振动环境中测量动态加速度,目前主要应用于微小型导航设备、手机、硬盘保护、运动健身器材、数码照相机等移动设备。传感器采用MEMS技术,大小相当于小拇指指甲盖的1/3;具有SPI和I²C两种数字信号输出功能,数字输出数据为16位二进制补码格式,在本系统中采用了I²C数字接口进行数据访问。

电源电压范围:2.0~3.6 V,I/O电压范围:1.7 V~VS,待机模式下功耗电流仅为0.1 μ A。抗冲击力可达到10 Kg。此外,还集成了一个32级FIFO缓存器,可将主机处理器负荷降至最低。最大量程可达 ± 16 g,并可根据测量范围在 ± 2 g、 ± 4 g、 ± 8 g量程范围内实现动态切换。分辨率可随带宽自动按比例切换,包括10位固定分辨率、全分辨率, ± 16 g时分辨率高达13位,本系统采用固定的4 g/LSB分辨率模式,在该模式下可测得0.25°的倾角变化。

3.3 陀螺仪传感器

陀螺仪选用MPU-3050数字运动处理™(DMP™: digital motion processor™)硬件加速引擎的三轴陀螺仪。该传感器沿用传统惯性传感器结构,但是内建数字运动处理器(DMP)与FIFO,不仅能减轻主机应用程序处理器之高频运动演算,也能减少中断次数与主机每秒运算指令数,进而改善整体系统效能。MPU-3050电原理如图2所示。

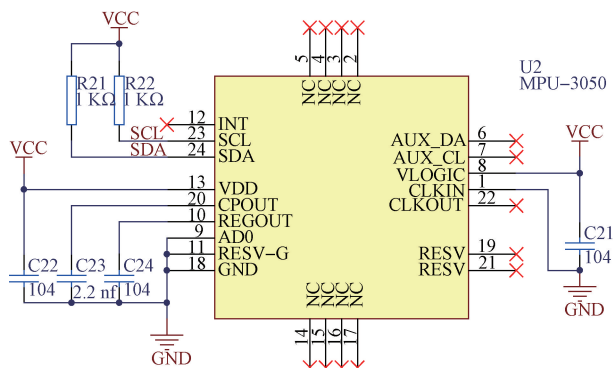


图2 MPU3050电路原理

配合 16-bit 的模拟/数字转换器与可编程的数字滤波器,加之出厂前校准至 1% 的敏感度,使三轴角速率传感器实现了高精度、大动态范围的数字方式输出,具有 $\pm 250 \sim \pm 2\,000^\circ/\text{s}$ 的全格感测范围,同时,内嵌的温度传感器可与陀螺仪数据同步输出温度。内部嵌入多个感测组件融合算法技术,可利用第二个 I²C 接口链接外接加速度器来实现六轴运动处理能力。10 kg 的耐震容忍度及 6.5 mA 的低工作电流可满足船载、长航时的环境需求。

3.4 地磁传感器

地磁传感器选用霍尼韦尔 HMC5883L 磁阻传感器,它是一款具有数字接口的弱磁传感器芯片,采用了霍尼韦尔独有的各向异性磁阻 (AMR) 技术,并附带霍尼韦尔专利的集成电路包括放大器、自动消磁驱动器、偏差校准、高精度的 12 位模数转换器,在低磁场传感器行业中是灵敏度最高和可靠性最好的传感器,主要应用于低成本罗盘和磁场检测领域。12-bit ADC 与低干扰 AMR 传感器,能在 $\pm 8\text{ G}$ 的磁场中实现 5 mG 分辨率,传感器能在强磁场环境中罗盘航向精度达到 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。内置驱动电路,采用 I²C 数字接口,内置自检功能,磁场测量范围广,从 mG 到 8 G,最大输出频率可达 160 Hz。

3.5 供电模块

由于 MCU 以及 OLED 均采用 3.3 V 以下的电压进行供电,而锂电池在充满电的情况下电压为 4.2 V,为了使用 3.7 V 锂电池供电,为系统设计了一个专门的锂电池供电模块,采用 PS7516 同步升压整流芯片将输入的 4.2 V 电压转换为 5 V-1 A 的输出,PS7516 属于一种工作频率固定 550 KHz 频率的 current mode PWM 高效率升压 DC-DC 转换器,它是专用于锂电池升压 5 V-1 A 的高效率产品升压系统,电路原理如图 3 所示。利用该芯片专门设计充放电路,一次充电可保证系统连续工作 30 天,满足海上长航次使用需求。

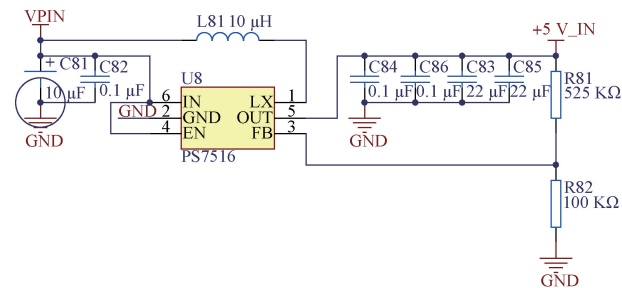


图 3 PS7516 供电模块原理

3.6 存储模块与文件系统

为了实现对姿态与摇摆周期数据的存储功能,系统以 SD 卡为存储媒介设计数据存储单元。SD 卡有 SDIO 和 SPI 两种通信模式。其中 SDIO 方式采用 6 线制,使用 CLK、CMD、DAT0~DAT3 进行数据通信,而 SPI 方式采用 4 线制,使用 CS、CLK、DIN、DOUT 进行数据通信。由

于系统采用的 ARM 芯片自带 SPI 接口,在速度满足要求的前提下,采用 SPI 模式与 SD 卡进行通信。为了减少 SD 卡的读写次数,系统先将实时解算数据存入缓存区,再按照 1 Hz 的频率存入 SD 卡中。SD 卡存储模块电原理如图 4 所示。

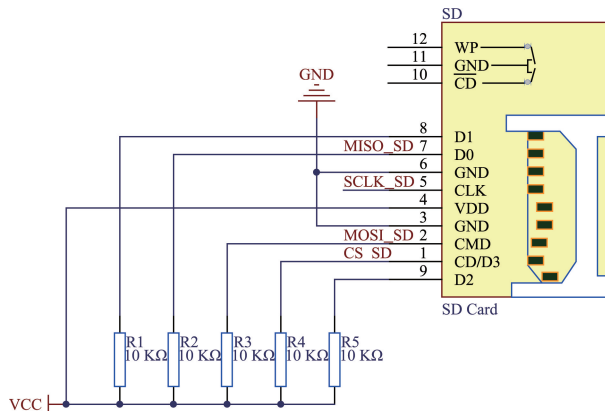


图 4 SD 卡存储模块电原理

系统采用 FATFS Module 文件系统模块,它是一种完全免费开源的 FAT 文件系统模块,专门为小型的嵌入式系统而设计。完全用标准 C 语言编写,且完全独立于 I/O 层,可以移植到 8051、PIC、AVR、SH、Z80、H8 和 ARM 等系列单片机上,支持 FAT12、FAT16 和 FAT32,支持多个存储媒介,有独立的缓冲区,可以对多个文件进行读/写。

4 软件模型

4.1 软件工作流程

系统软件工作流程如图 5 所示。首先,通过对加速度计、陀螺仪以及磁阻传感器输出信息进行同步采集,对输出数据进行低通滤波滤除噪声影响,以磁阻传感器输出横、纵摇角与航向角为姿态解算初始信息,并利用惯性器件输出数据,采用捷联惯性姿态更新算法对该姿态进行更新计算,实时获得舰船横、纵摇姿态信息。由于惯性姿态更新计算得到的姿态信息存在累积误差,因此,需要利用磁阻传感器输出的姿态信息周期性对其进行修正,根据后续姿态更新解算精度,修正周期可设置为 1 h。

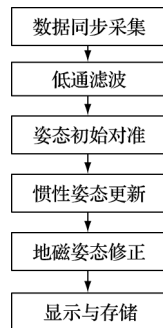


图 5 系统软件工作流程

4.2 姿态更新模型

为了提高姿态初始对准速度,以磁阻传感器输出三轴姿态为初始姿态,并转化为姿态四元数 $Q(t_0)$ 。选用等效旋转矢量姿态更新算法^[4],更新迭代模型为

$$Q_{b(m+1)}^{n(k)} = Q_{b(m)}^{n(k)} \otimes Q_{b(m+1)}^{n(m)}$$

$$Q_{b(m+1)}^{n(k+1)} = Q_{b(m+1)}^{n(k)} \otimes Q_{b(m+1)}^{n(k)}$$

式中: $Q_{b(m+1)}^{n(k+1)} = \left[\cos\left(\frac{1}{2}\zeta_k\right) \quad -\sin\left(\frac{1}{2}\zeta_k\right)\vec{\zeta}_k \right]^T$, $\vec{\zeta}_k = \vec{\omega}_{in}^n \Delta t$ 为导航系在 Δt 时间内相对惯性系的等效旋转矢量, ζ_k 为 $\vec{\zeta}_k$ 的模, $\vec{\omega}_{in}^n$ 可根据地球自转模型计算得到, $Q_{b(k)}^{b(k+1)} = [\cos(0.5\varphi_k) \quad -\sin(0.5\varphi_k)\vec{\varphi}_k]^T$, $\vec{\varphi}_k = \vec{\omega}_{ib}^b \Delta t$ 为载体系在 Δt 时间内相对惯性系的等效旋转矢量, φ_k 为 $\vec{\varphi}_k$ 的模, $\vec{\omega}_{ib}^b$ 为陀螺仪输出数据。

4.3 摇摆周期计算模块

系统检测舰船的横摇周期,周期解算采用频域计算方法。频域方法需要对连续采集的数据进行截取即开设时间窗。不同舰船类型的摇摆周期存在一定差异,水面舰艇的摇摆周期在 6~10 s,客船一般在 8~12 s^[1]。为了更全面的分析有限数据的频域信息,系统选取 20 s 时间数据作为频域解算的时间窗长度。系统解算周期为 0.01,因此,需要一次性存储 2 000 个横摇角数据点作为分析解算的原始数据。数据截取后,采用快速傅里叶算法对数据进行频域转换,转换后利用求极值算法得到主频率值,该值对应的周期即为舰船瞬时横摇周期。

5 系统实验结果分析

5.1 摇摆角精度测试实验

为了检测姿态解算精度,借助三轴摇摆台进行摇摆测试试验,如图 6 所示,以摇摆台输出姿态为基准,重点考察姿态测量精度与动态特性。摇摆试验分两组进行,第一组横摇幅值为 20°,纵摇幅值为 10°,频率均为 0.3 Hz,第二组为横摇幅值为 30°,频率为 0.1 Hz,纵摇幅值为 10°,频率为 0.25 Hz,两组测试系统输出姿态数据曲线如图 7 和图 8 所示。

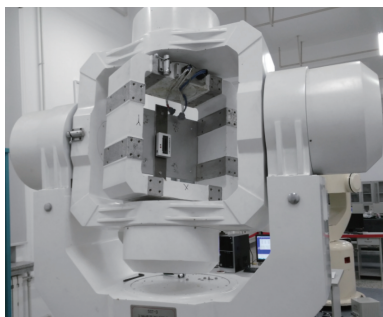


图 6 摇摆台测试实验

两组试验取的数据均为 100 s,第一组数据是在转台还未达到稳态时就开始记录,第二组数据是转台摇摆幅值稳定后开始记录,由曲线可知系统在幅度上能很好的跟随转台,精度在 0.5°以内。

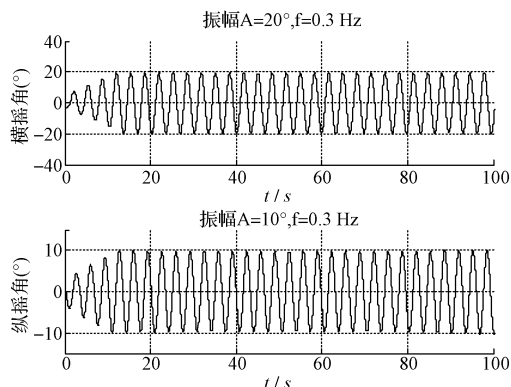


图 7 实验 1 摇摆角测试曲线

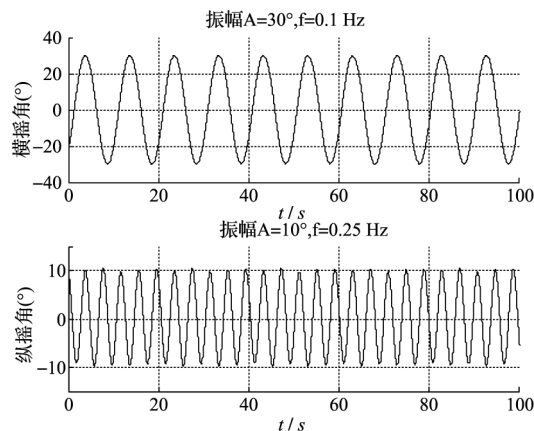


图 8 实验 2 摇摆角测试曲线

5.2 摇摆周期计算模块

为了测试周期测量精度,将摇摆台横摇周期分别设置为 5 s 为起点 5 s 递增的典型周期值,进行正、反向测试,共 15 个测量点,并记录系统测量的摇摆周期,并计算测量误差,测量周期与转台标称周期的比对结果与误差曲线如图 9 所示。从图可以看出,频域周期测量精度较高,15 次测量误差均小于 0.1 s。

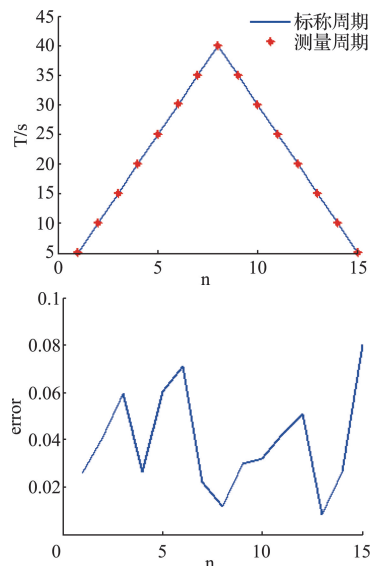


图 9 周期解算误差曲线

6 结 论

本文介绍了一种基于 STM32 单片机的低成本、低功耗横摇周期测量与存储系统。该设备可实时解算舰船横摇角度、横摇周期、摇摆幅度,摇摆角测量精度可达 0.5° , 周期测量精度可达 0.1 s , 系统可为船舶驾驶人员实时掌握船舶浮态与稳性指标提供重要的信息保障, 为科研人员开展基于横摇信息的舰船生命力研究提供可靠的数据采集与记录平台。

参 考 文 献

- [1] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- [2] 王玉珍, 姜礼平, 肖鹏, 等. 舰船运动姿态仿真与多层 AR 预报研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(4): 87-89.
- [3] 马洁, 李国斌. 船舶横摇运动的时间序列预报[J]. 北京机械工业学院学报, 2006, 21(1): 4-7.
- [4] 孙伟, 初倩, 丁伟, 等. 基于 IMU 旋转的 MEMS 器件误差调制技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2): 240-246.

- [5] 梁勇. 基于 MEMS 的航姿系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [6] 张淑梅. 基于 ARM+FPGA 的高精度数据采集系统设计. [J] 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 62-65.
- [7] 王磊, 刘佑民, 李德忠, 等. 基于 ARM 单片机的无线行驶记录仪设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 76-81.
- [8] 杜继永, 黄国荣, 张凤鸣, 等. 基于低成本 MEMS 器件的捷联航姿系统设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(11): 1662-1666.
- [9] 张洪, 秦文虎. 基于 ARM 的汽车行驶记录仪的研究[J]. 仪器仪表用户, 2007, 14(5): 5-7.
- [10] 马蓓排. 基于 ARM 的嵌入式指纹图像采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 51-53, 58.

作 者 简 介

郑振宇, 1979 年出生, 工学, 工程师, 主要研究方向为舰船导航技术与 MEMs 捷联航姿系统开发。
E-mail: navyzzy@163.com

罗德与施瓦茨公司和 Prisma 通信测试公司推出 4×4 MIMO 的三载波聚合(3CC)测试设备

业界领先解决方案供应商罗德与施瓦茨公司和 Prisma 通信测试公司的测试与测量的专家, 已经成功完成了 LTE FDD 下行 3 载波聚合的验证工作, 其中每个单载波为 4×4 MIMO 信号。罗德与施瓦茨首次在巴塞罗那世界移动大会上呈现了该测试设备。

该解决方案由罗德与施瓦茨公司(R&S)的 3 台 CMW500 宽带射频通信测试仪, 一台 CMWC 控制器和 Prisma 的 UeSIM 多终端模拟器组成, 其中每一台 CMW500 产生一个 20 MHz 带宽的单载波 4×4 MIMO 信号。整套设备能够提供 900 Mbit/s 的下行速率, 其中 Prisma UeSIM 包含两个 SDRv3 单元和一个 eLSU 单元用于业务终结。

伴随三载波 4×4 MIMO 验证的成功, 罗德与施瓦茨公

司(R&S)和 Prisma 通信测试公司又实现了 LTE-Advanced 商业进程中的另一个里程碑。在三载波聚合 4×4 MIMO, 协议, RF 和 1 Gbp/s 数据性能验证方面, R&S CMWflexx 系统中的 CMW500 和 Prisma UeSIM 是第一个提供下行载波聚合解决方案的平台。

在世界移动大会上, 罗德与施瓦茨的 3CC 4×4 MIMO CMWflexx 测试设备在 6 号展厅 C40 展台和大家见面。同时在 6 号展厅 C41 展台, Prisma 通信测试公司展示了在 3GPP Rel.12 的 256 QAM 调制方式下的下行四载波聚合测试用例。其中, 256QAM 将 3GPP Rel.10 的最高速率(64QAM 调制方式)由 600 Mbit/s 提升到 800 Mbit/s。