

毫米波开发验证平台 系统方案

Millimeter wave development and verification
platform





➤ 一、背景概述

毫米波开发验证平台系统方案

毫米波频段具有以下优势：

- (1) 可以分配更大的带宽，意味着可以达到更高的数据速率；
- (2) 信道容量随带宽增大而提高，从而极大地降低数据流量的延迟；
- (3) 毫米波段上不同频段的相对距离更近，使得不同的频段更具有同质性；
- (4) 波长更小，可以利用极化和新的空间处理技术，例如大规模MIMO技术和自适应波束赋形技术。

天线阵列

毫米波大规模 MIMO 系统的信道模型具有很强的视距路径分量。

毫米波大规模MIMO波束成形技术可以分成两种：基于透镜天线阵列和基于射频天线阵列的波束成形技术，使得波束选择算法可以在保证一定系统性能的情况下，可以使用更少数量的辐射器，从而大大减少所需的射频链路数。因此，当前基于透镜天线阵列的波束成形技术的主要研究方向是设计合适的波束选择算法，目前已经有大量的算法被提出。

但是透镜天线生产效率低，不易构造，限制了透镜天线的使用。普通的射频天线则没有这种缺点，且由其组成的大规模天线阵列可以拥有较小的旁瓣和后瓣，因此，基于射频天线阵列的波束成形技术引起了研究者的广泛关注。

波束赋形

现有的方法：波束成形（BF, Beam Forming）技术，多天线阵元接收到的各路信号进行加权合成，让信号集中在指定的方向传输，相当于形成了有具体指向的波束，从而提高了信号的抗干扰能力，解决路径损耗较大的问题。

如何将波束快速地对准用户及初始接入，如何设计高效地兼容覆盖与传输质量的同步波束，使得移动用户接入波束训练成为无线通信研究的重点方向。

如何在高效初始波束对准的基础上，研究适应收发机移动环境下的波束追踪对准算法也成为毫米波通信极需要解决的关键技术。

随着毫米波技术的逐步商用，对支持更高频率5G毫米波通信原型验证和开发平台的需求越来越迫切。针对毫米波的科研和创新，威视锐推出毫米波开发验证整体解决方案。此方案大大降低了毫米波仪器的成本，并增加了毫米波应用的灵活性。同时，可以结合已有的YunSDR软件开发资源和环境，方便用户快速升级到5G毫米波的应用上来，减少开发周期、降低开发成本。

➤ 二、方案简介

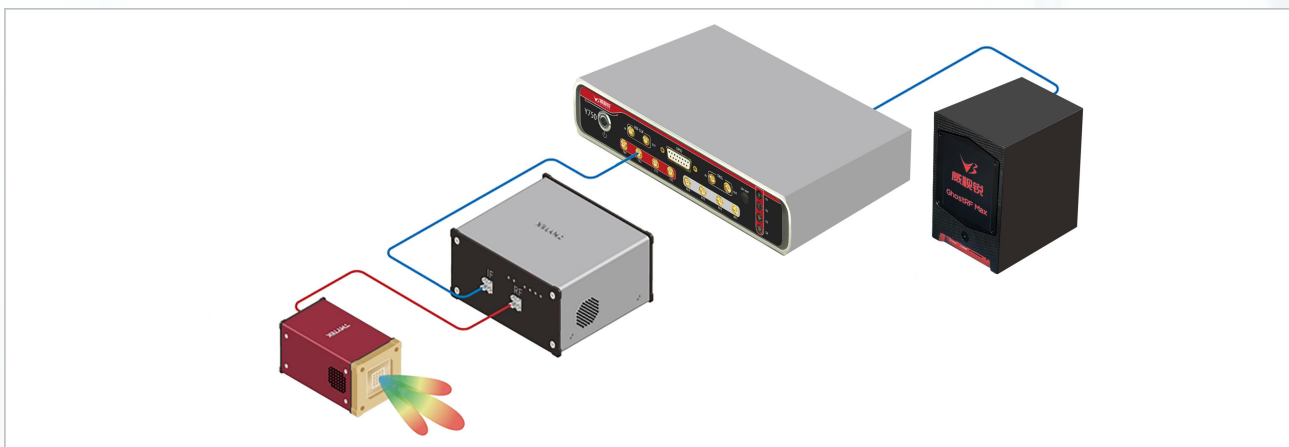


图1：毫米波方案系统组成

如图1所示，一个完整的毫米波开发系统分为四个组成部分，分别是：

- 1. 算法处理单元(GhostRF Max)：实现上层通信协议或复杂天线控制算法，基于x86 + FPGA架构，可二次开发；
- 2. 中频基带单元(YunSDR 750)：大带宽基带信号发射和接收单元，支持FPGA二次开发，可实现中频信号与变频单元的对接；
- 3. 上下变频单元(UDBox)：提供上/下变频功能，将中频信号搬移至毫米波频段（支持24~44GHz频段范围）；
- 4. 波束成型单元(BBBox)：实现毫米波信号的调幅、调相功能，控制相控阵天线的输出波束形状。使用毫米波频段作为通讯频率时，信号在空口传播时会快速衰减，波束成型技术可有效增加信号强度。

算法处理单元（ GhostRF Max ）功能

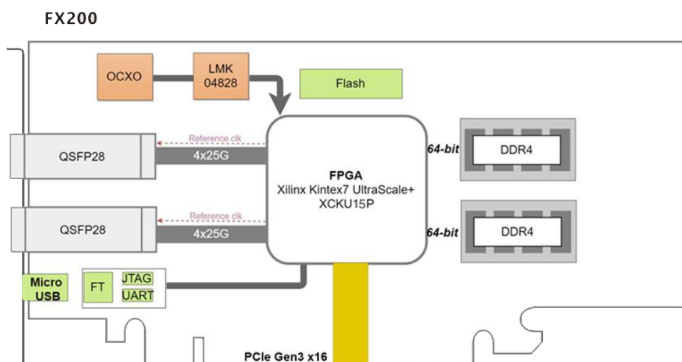


图2：算法处理单元GhostRF Max

GhostRF Max指标规格：

主机性能	GhostRF Max
处理器	11代Intel酷睿i9-11900KB ， 3.3GHz-5.0GHz主频， 8核心， 16线程
USB接口	2个前置USB3.1 Gen2， 6个后置USB3.1 Gen2
内存	16 GB DDR4-3200， 最高支持64GB
硬盘	2TB NVMe SSD + 512 NVMe SSD
雷电接口	2个雷电4接口
显示	HDMI 2.0b
有线网口	1个 2.5G 网口
体积	35.7 cm × 18.9 cm × 12cm， 约8L

内置FPGA加速卡（ FX200 / FX150 ）



FX200 / FX150	
时钟同步	高精度时钟同步
FPGA	Xilinx KU15P/KU11P/KU040
PCIe	PCIe3.0x16 / PCIe3.0x8
内存	2x DDR4 4GB 2600MHz 64-bit SDRAM
光口	2x QSFP+ 100G / 40G

图3：内置FPGA加速卡FX200

中频基带单元（Y750）功能

毫米波的基带信号带宽需求很高，通常需要400MHz或800MHz，甚至更高的带宽。目前市面上现有软件无线电产品实时带宽通常在400MHz以下，无法满足毫米波超大带宽的需求。针对此需求，威视锐推出了YunSDR 750系列产品，带宽高达2GHz，专为大带宽毫米波应用量身定制。

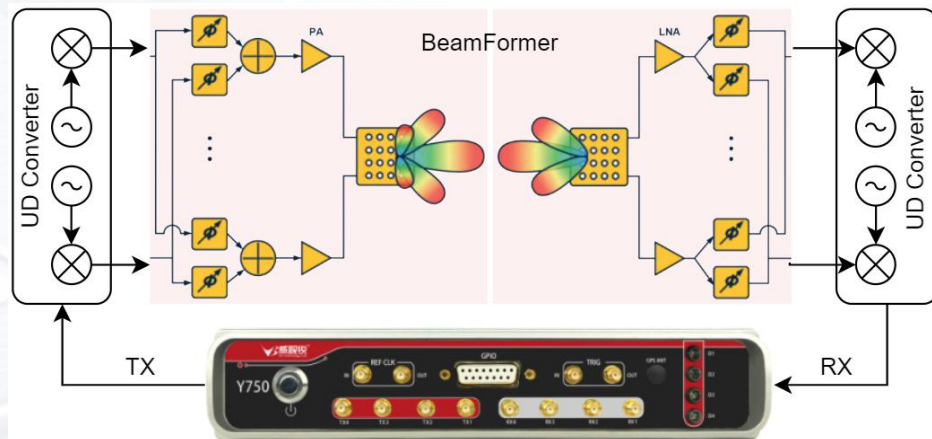


图4：面向毫米波应用的中频基带单元YunSDR Y750

图5为YunSDR 750的系统框图，YunSDR 750通过40G/100G光口与PC端连接，实现数字信号的数据传输和指令控制。Y750基于Xilinx第三代RFSoc系列，采用射频直接采样结构，具备四个独立的发射器和接收器通道，同时具备大带宽和大规模运算处理能力；FPGA的PL端外接8GB DDR4内存，PS端外接4GB DDR4内存，可满足大容量存储和缓存需求。系统内置射频前端模块，可实现增益控制。同时，系统内集成GPS模块和时钟处理模块，采用19.2 MHz恒温晶体振荡器(OCXO)作为参考时钟，提高了频率精度和同步稳定性。

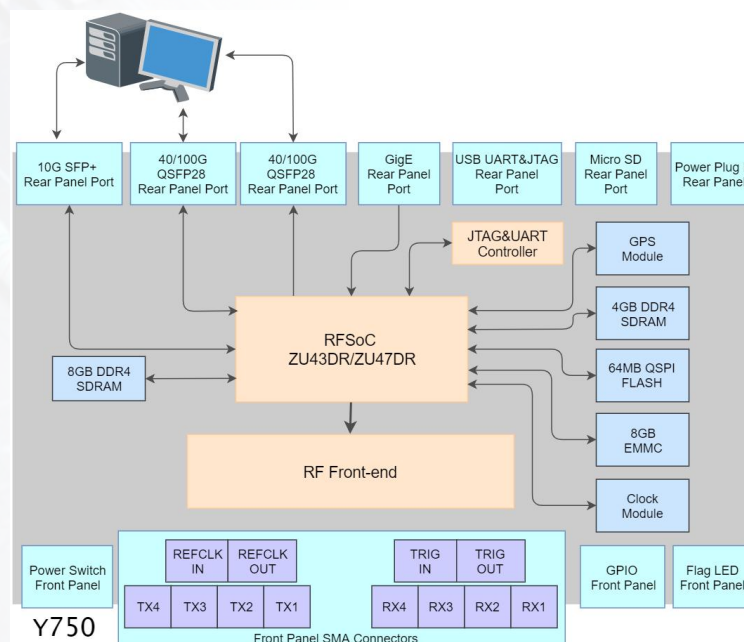


图 5 YunSDR 750系统框图

YunSDR 750通过SMA射频端口(RF port)与毫米波上下变频器的中频端口相连。UDBox作为辅助的升/降频收发机，将中频信号经升频到毫米波频段，再加上波束成形器BBox，最终组成完整的毫米波硬件架构系统。

Y750指标规格:

订货型号	Y750
频段范围	1MHz ~ 6GHz
射频芯片	XILINX 第三代RFSoc
通道	4Tx & 4Rx
带宽	61.44MHz ~ 2GHz
基带芯片	XILINX 第三代RFSoc
硬件参数	930K逻辑单元，4272个DSP单元
	处理器端4GB DDR4 SDRAM，逻辑端4GB DDR4
	8GB TF Card，32MB QSPI Flash*2，4GB eMMC Flash
	支持M.2 SSD接口×1
	千兆以太网，USB UART+JTAG，USB3.0 OTG
	板载GPS模块支持（GPSDO）
	2 x QSFP+ 100G光纤接口，兼容40G模式
	独立供电接口（12V DC）

上下变频单元（UDBox）功能

上下变频器的工作原理如图6所示，主要功能是将中频信号搬移到毫米波频段或将信号从毫米波频段搬移到中频频段。

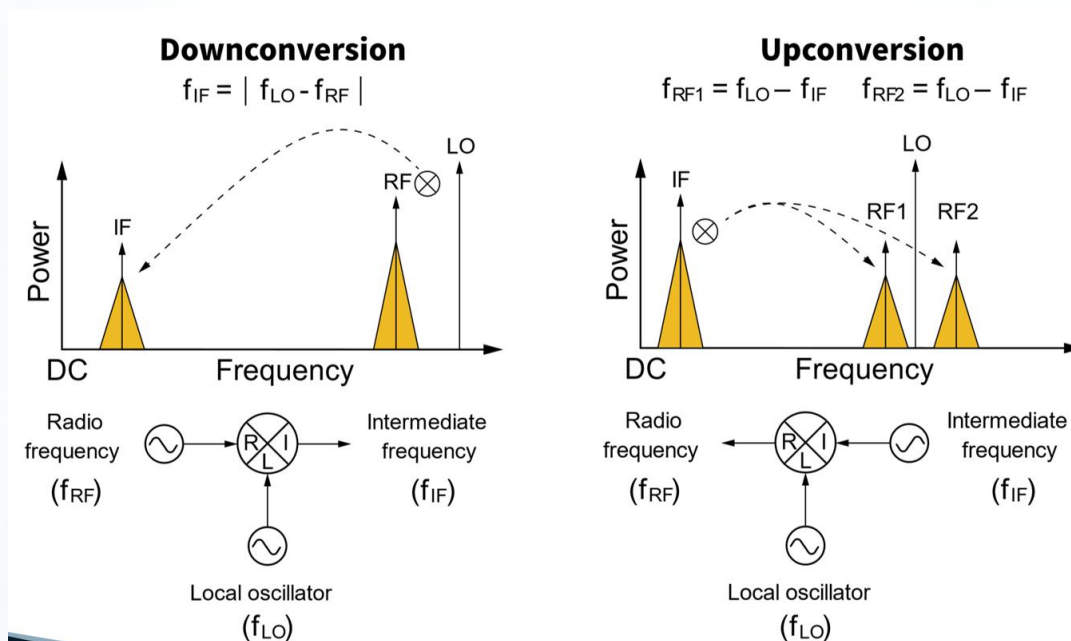


图6：上/下变频器功能示意

上/下变频器设备接口如图7所示:

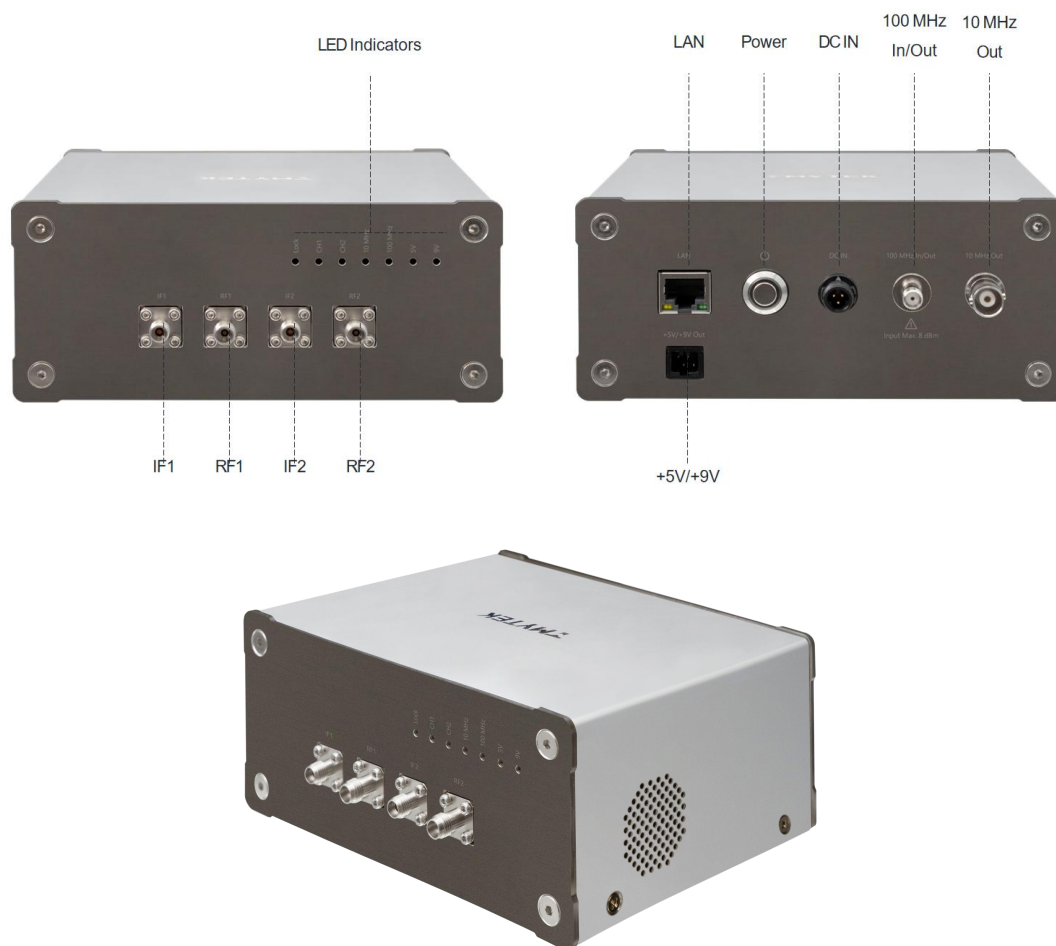
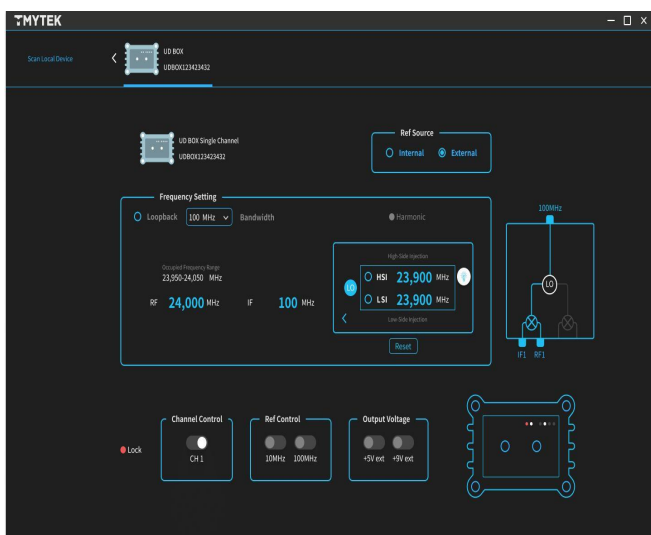


图7：上下变频器设备接口示意

指标规格:



- 中频: 0.01 to 14 GHz
- 可调LO本振范围: 24 to 44 GHz
- 转换损耗: 12 dB (typical)
- 集成了内部本振源头
- 同一个设备集成上变频和下变频功能
- 支持5G FR2全部频段
- 支持软件配置, 提供配置软件

图8：上下变频器指标规格

TMXLAB Kit GUI软件界面

BBox One 5G

毫米波
频率控制

16通道
增益及相位
控制

波束拖动
控制界面

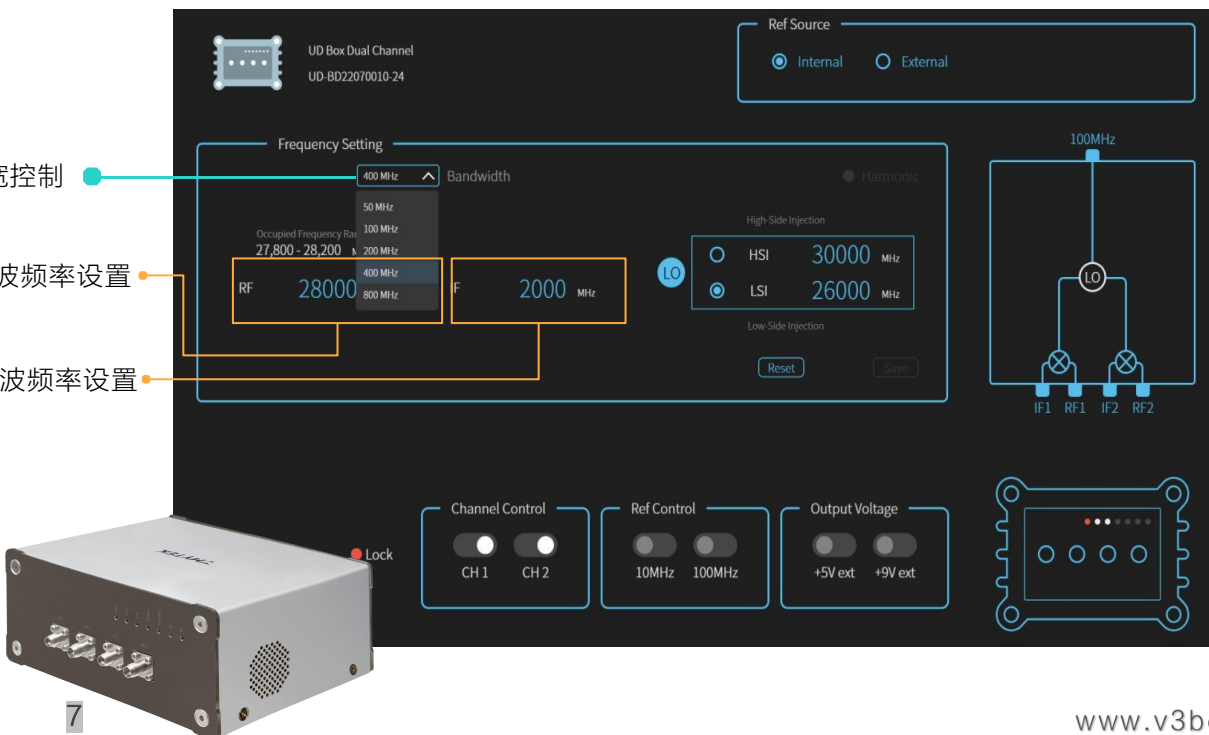


UD Box 5G

带宽控制

毫米波频率设置

基带波频率设置



波束成型单元（BBox）功能

传统的毫米波开发平台通常采用离散器件搭建，需要阵列天线、功放、低噪放、移相器组件等，还需要设计电路板进行组装，同时还需要设计相应的驱动软件来支持上层开发，基本架构如图9所示。

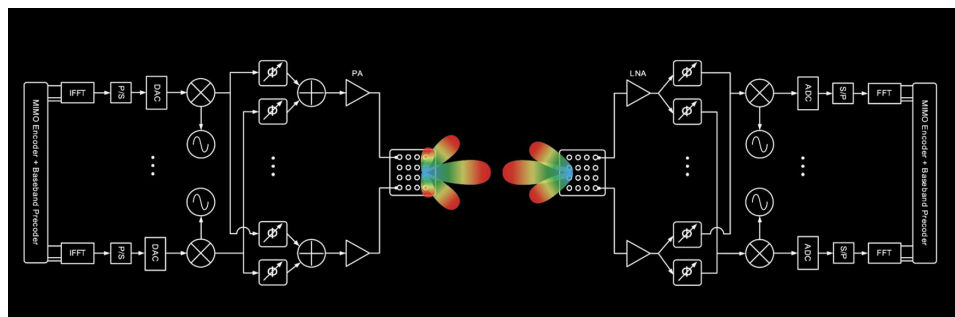


图9：毫米波平台基本单元组成

BBox提供了ready-to-use的5G NR波束成型设备，支持灵活的应用和设计，每个射频通道的增益和相位可以独立控制，软件接口提供二次开发能力，且可通过YunSDR 750的SPI接口实现波束状态快速切换。

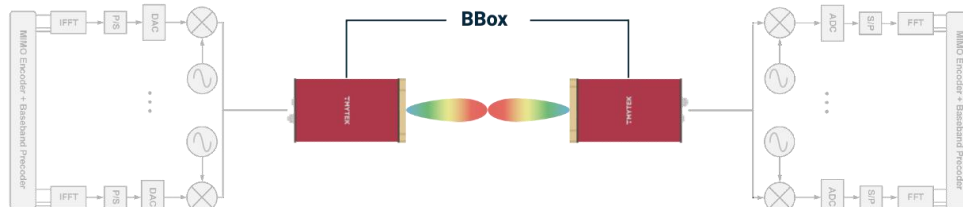
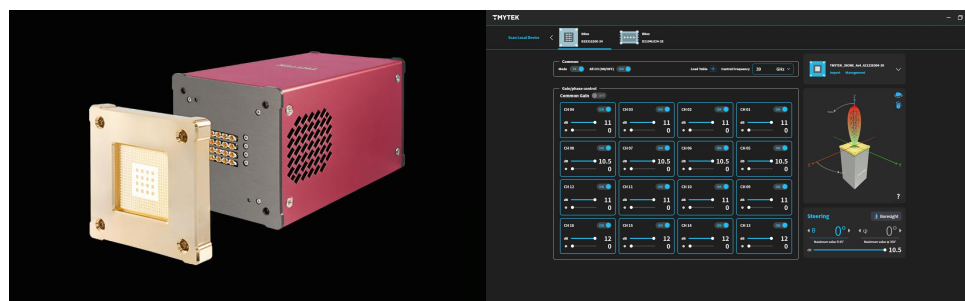


图10：BBox系统位置

指标规格：



- 提供5G波束赋型相控阵天线功能
- 8x8天线面阵
- 模块型号：26.5 to 29.5GHz
- 提供16通道的相位和幅度调制功能
- 支持PC通过RJ-45进行软件控制

图11：BBox指标规格

➤ 三、系统应用案例

案例#1 毫米波波束控制

案例实施

Y750发送和接收100MHz带宽的Sub 6GHz信号，通过UDBox变频器上/下变频至28GHz毫米波频段，通过Y750的SPI接口控制前端BBox阵列天线，查看天线波束情况。设备连接参考图12，可通过1个UDBox或2个UDBox实现上/下变频。

实施结果

通过Y750控制阵列天线，可实现对波束方向的控制。

误差向量幅度 (EVM) 是量化无线电收发器性能的重要测量指标。理论分析中，由理想发射器发送接收器接收的信号点都会落在星座图的理想位置。然而，实际测试环境中的各种因素，包括信号杂散、失真、谐波和时钟相位抖动都可能导致实际信号点偏离理想位置。EVM是衡量信号偏离理想位置的重要指标。为了验证毫米波系统的波束状态及性能品质，此实施案例使用EVM作为所关注的主要性能指标来进行测试。

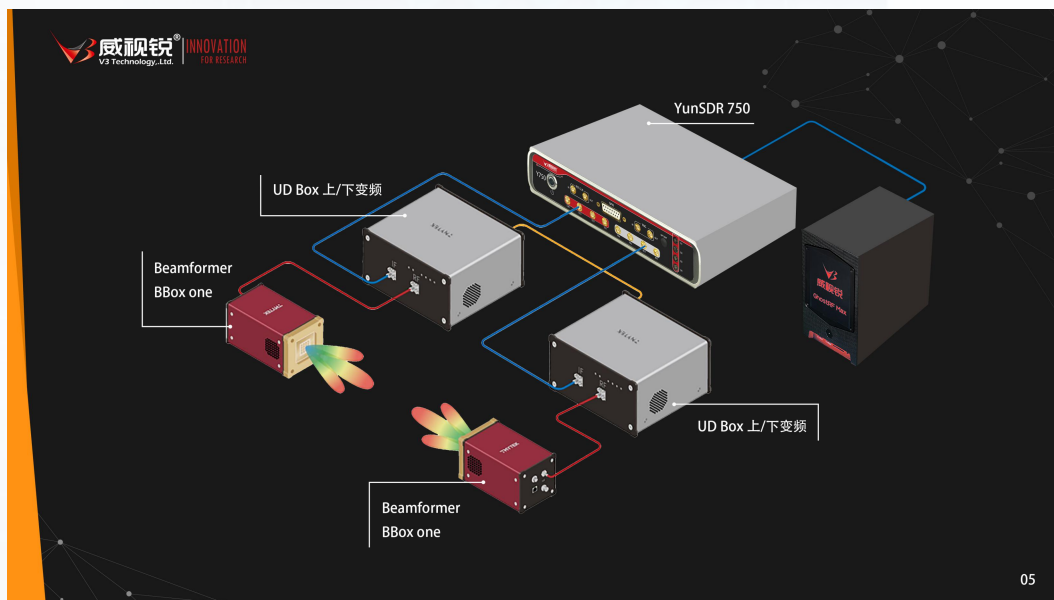
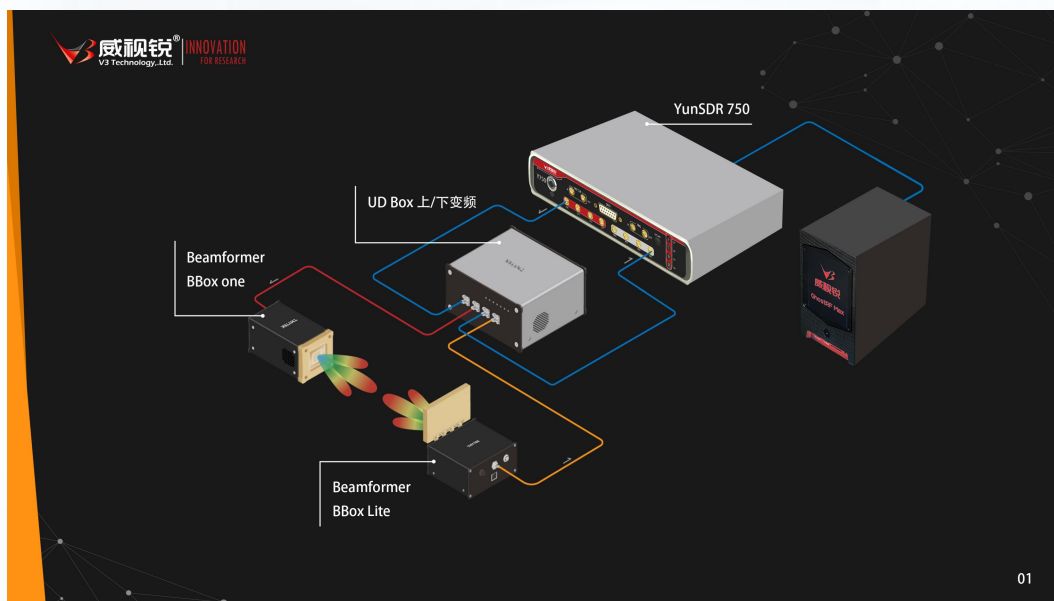
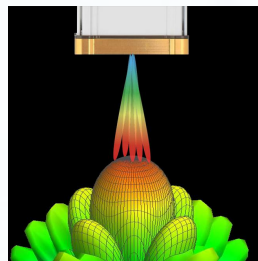
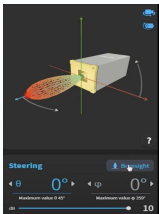
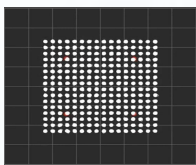
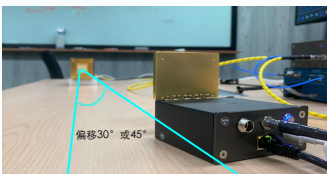
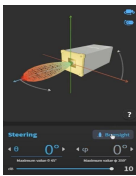
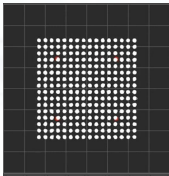


图12：案例#1设备连接示意图

表1：波束控制案例实施

实施	步骤	预期结果	结果示意
硬件搭建	硬件搭建及线缆连接参考	完成硬件连接	
中心视轴	两个阵列天线波束中心视轴对齐	星座图及EVM最优	 
波束错位	通过网口或Y750的SPI接口控制某个阵列天线波束偏移30°或45°	信号功率降低、星座图及EVM变差	 
波束恢复	通过YunSDR 750的SPI接口控制阵列天线波束恢复到0°	信号功率、星座图及EVM恢复	 

Matlab验证:

测试实例中使用Matlab对YunSDR 750进行控制。Sub6G频率设置为2GHz，毫米波频段频率设置为28GHz，Matlab控制发送100MHz/200MHz/400MHz带宽的信号，对接收到的信号进行解调，并计算EVM值，测试BBox不同波束方向下的EVM值，从而验证波束情况。

在初始状态下，将发射天线和接收天线之间的夹角定为0度，BBox的GUI配置界面中偏移角度也设置为0度，测试结果如图13所示。

通过Y750调整发送端波束方向，使得接收端信号强度和EVM值均发生变化，恢复发射端波束方向，然后手动转动发射端天线的物理方向，在功率谱图中发现信号强度变弱，EVM测量值也变差，这是因为发送端天线不指向接收端。通过上述操作证明通过Y750控制天线波束方向与手动调整天线物理角度方向效果一致。修改发射角度后，解调EVM如图14所示。

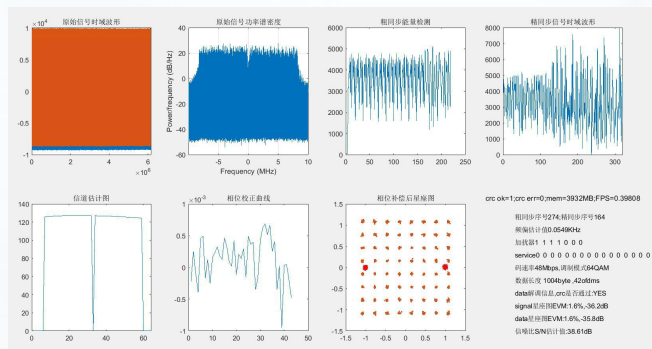


图13：BBox 0度方向EVM测试结果

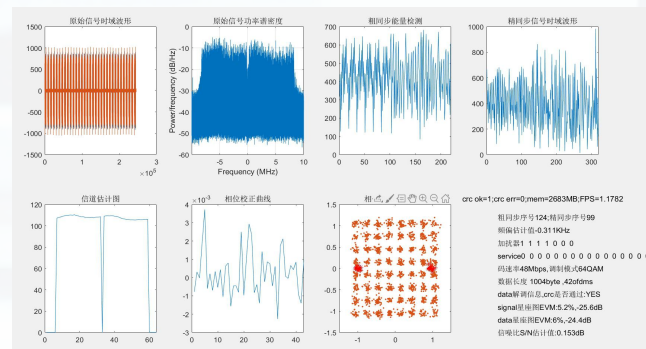


图14：调整BBox波束方向后EVM测试结果

通过案例#1的演示，验证了毫米波方案及波束控制的可行性，从而为在毫米波方面的其它应用提供了参考基础，为后续在毫米波波束管理、波束成形算法、信道检测等方面提供了参考保证。

案例#2 5G NR 毫米波收发及分析

案例实施

YunSDR 750发送和接收400MHz带宽的Sub 6GHz信号，通过UDBox变频器上/下变频至28GHz毫米波频段，实现5G NR FR2毫米波频段的数据收发，并完成数据调制/解调分析。

实施结果

分析得到 $EVM < 3.5\%$ (< -40 dB) @256QAM

案例#2系统搭建分为射频链路搭建和控制链路搭建。

射频链路搭建示意图如图15所示，YunSDR 750作为中频信号的收/发单元，中频信号频率范围为1MHz-6GHz，UDBox作为毫米波频段的上/下变频器单元，支持n257、n258、n260三个band，波束控制单元也可支持n257、n258、n260三个band，从而保证5G NR毫米波的应用。

控制链路搭建示意图如图16所示，YunSDR 750通过光纤线缆与Ghost RF PC主机进行通信，Ghost RF PC内部可集成FX200或FX150的PCIE 3.0加速板卡，将光纤接口转换为PCIE 3.0接口，从而实现IQ数据和控制数据的传输交互，Y750通过SPI接口与BBox one或BBox Lite进行通信，实现天线波束的快速切换，BBox one、BBox Lite和UDBox通过网络交换机与Ghost RF PC主机的网络进行通信，实现基本控制。

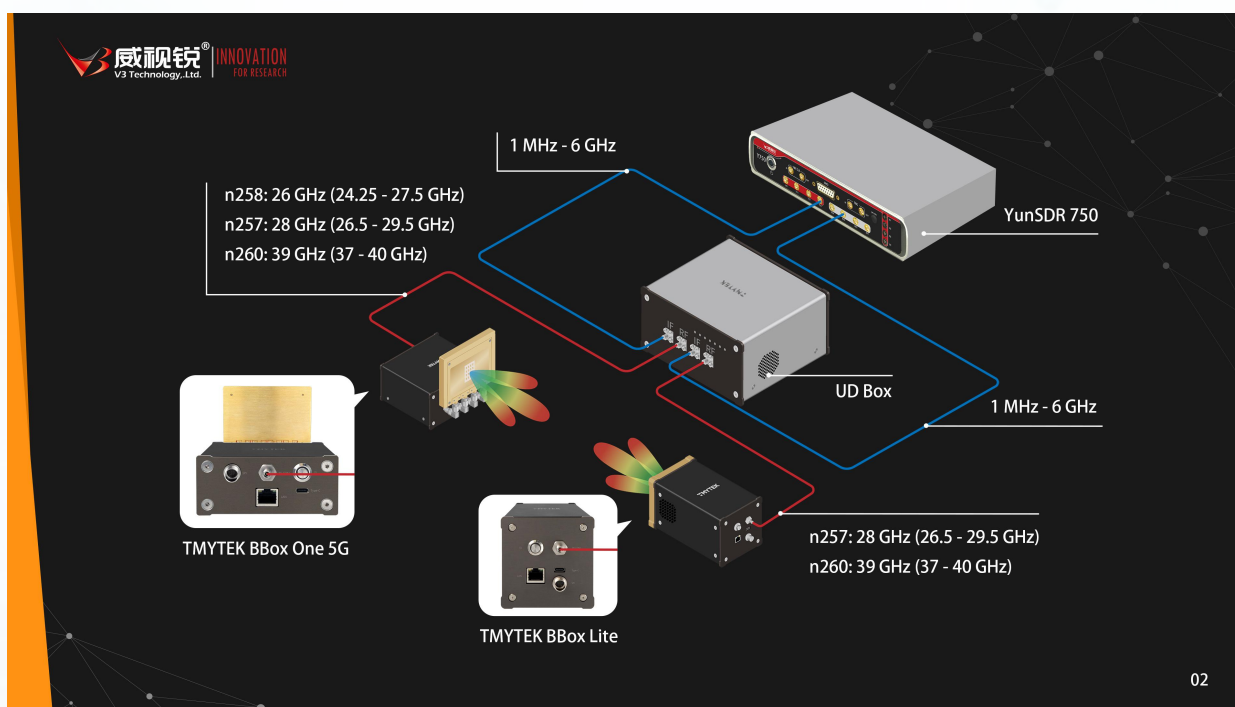


图15：系统射频链路连接示意

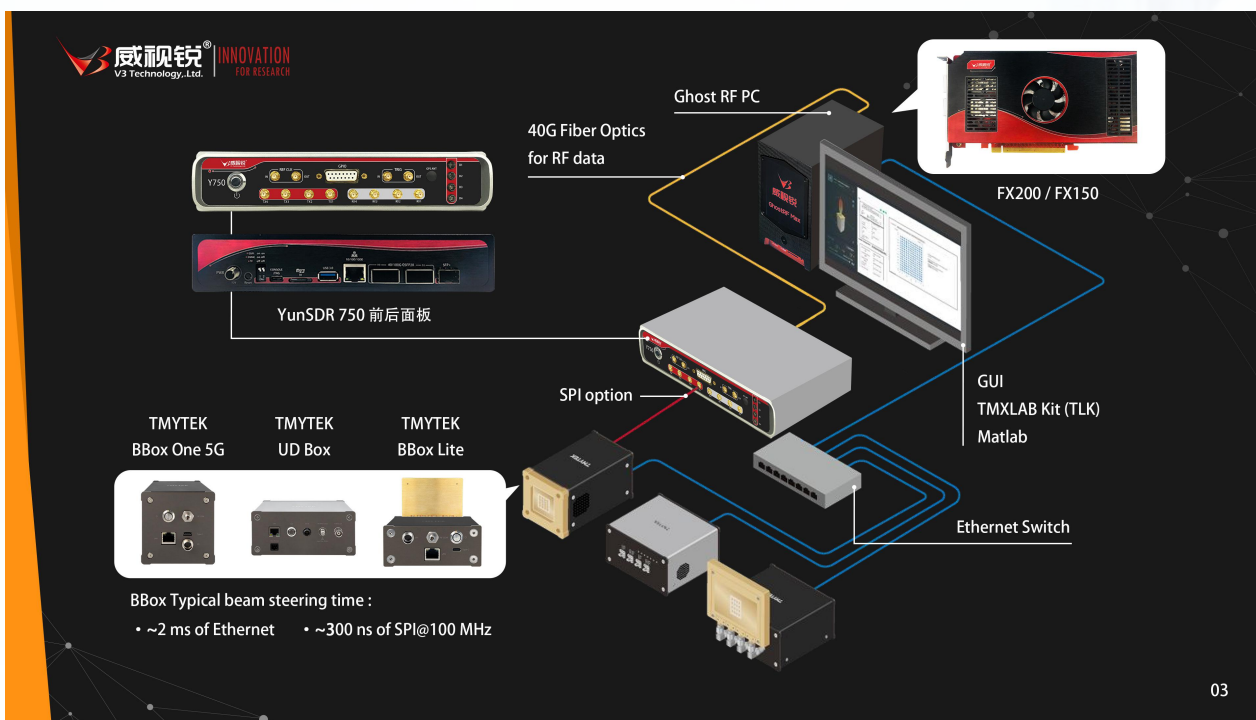


图16：系统控制链路连接示意

表2：5G NR毫米波收发及分析案例

实施	步骤	预期结果	
硬件搭建	- 阵列天线距离 BBox One和BBox Lite/One 间距小于等于 50cm - 线缆连接 按照图示连接YunSDR 750、UD Box、BBox One或者BBox Lite	完成线缆连接	
软件配置	- 配置Y750基带信号频率为2GHz 5G FR2/ 100 MHz/ 256 QAM/ 30K SCS 5G FR2/ 400 MHz/ 256 QAM/ 120K SCS - 在GUI界面配置UD Box IF: 2 GHz, RF: 28 GHz, 使能两个通道 - 在GUI配置 BBox One或BBox Lite 增益和波束方向按照默认设置	完成软件配置	
数据分析	Blockage 在matlab界面使能YunSDR 750数据收发, 得到5G NR信号, 并得到星座图和EVM指标, 改变信道环境, 再次查看星座图及EVM指标	EVM -41 dB @ 100 MHz EVM -35 dB @ 400 MHz	
增益控制	- 阵列天线增益控制 通过GUI界面修改阵列天线增益配置 - 阵列天线相位控制 通过GUI界面修改阵列天线相位配置	频谱功率 随天线增益和相位 变化而变化	

通过案例#2的演示，验证了毫米波方案及在5G NR方面的可行性，从而为5G NR通信应用方面提供了参考基础，为后续在OTA测试、协议栈应用方面提供了参考保证。

案例#3 5G毫米波OTA测试平台

5G NR毫米波OTA测试平台具有5G NSA/SA的网络环境系统仿真功能，支持3GPP R15协议版本及后续版本演进，能够对5G终端和芯片进行协议一致性、SIM卡接口一致性、数据性能吞吐等测试，可广泛应用于运营商认证机构、工信部入网测试、芯片和终端研发测试环节。目前越来越多的5G终端芯片和模组开始支持毫米波频段，如高通等，因此低成本的毫米波5G OTA测试需求变得更加迫切。

系统连接示意如图17和图18所示，其中GhostRF Max主机上运行5G毫米波基站软件，前端可通过喇叭口天线或毫米波阵列天线来实现对待测手机的OTA测试，也可通过Y750模拟UE端进行测试。

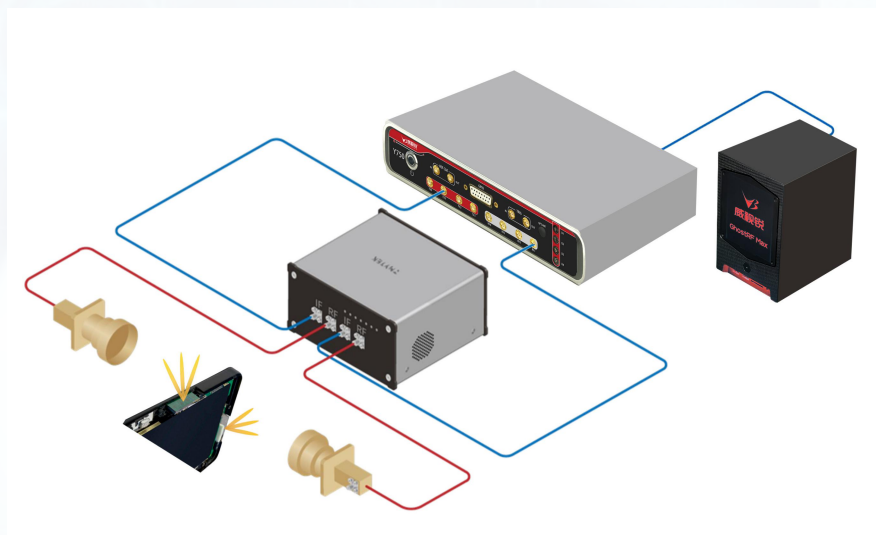


图17：喇叭口天线测试连接示意

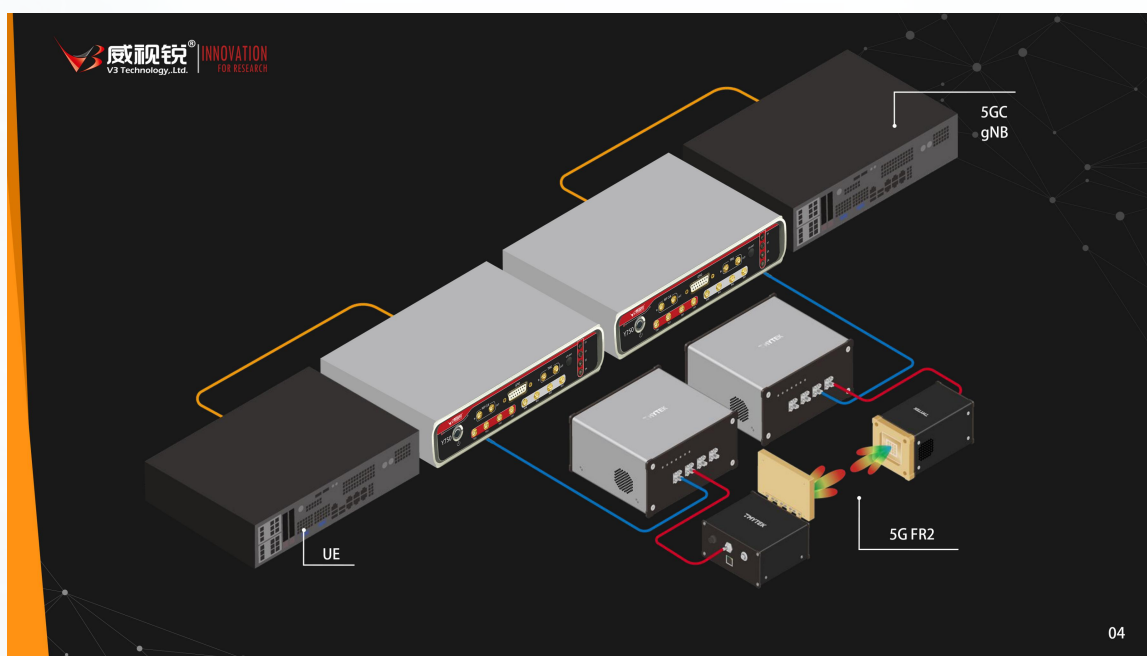
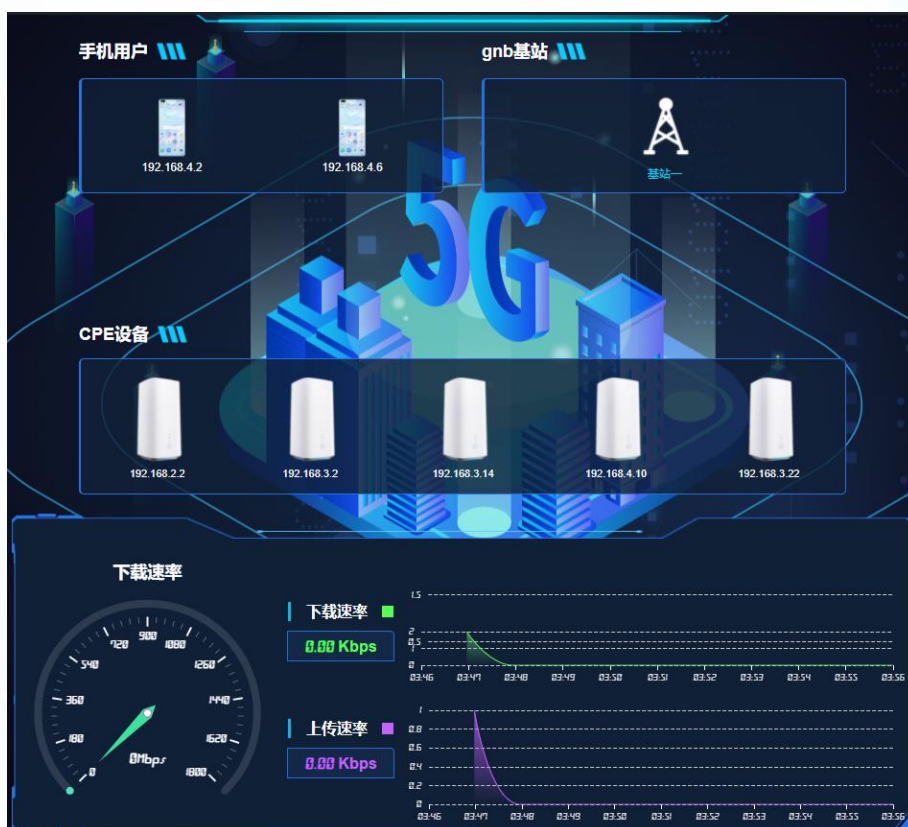
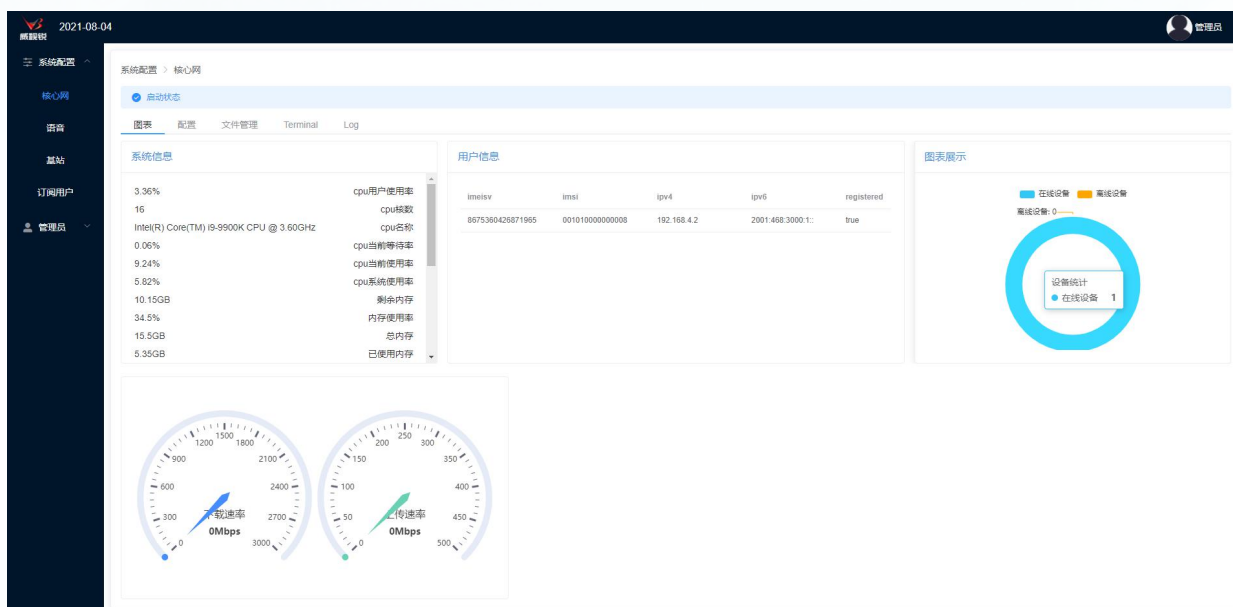


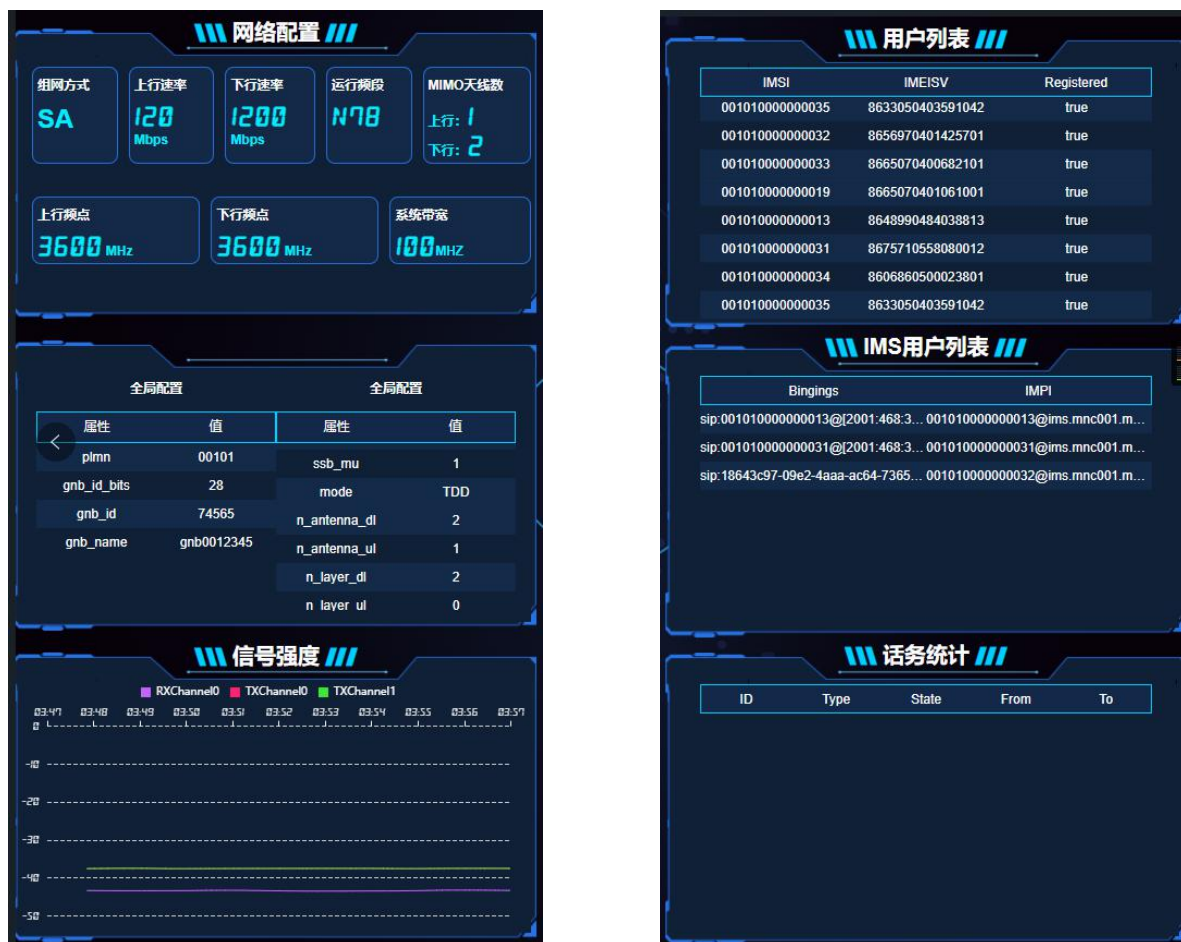
图18：UE模拟测试连接示意

基于Web的跨平台配置管理软件

威视锐科技提供5G NR FR2协议栈软件，可以通过Web页面进行控制

- 1、小区参数图形化配置
- 2、物理层参数图形化配置
- 3、基于配置文件的全局参数配置
- 4、基于测试场景的用例定义及导入功能
- 5、基于演示场景的预定义用例
- 6、基站核心网启停功能、运行监控功能
- 7、小区状态监控功能
- 8、订阅用户数据库增删查改功能
- 9、基站核心网命令终端远程交互功能
- 10、基站核心网运行日志监控
- 11、基站管理多用户控制功能，允许多个用户登录配置管理系统

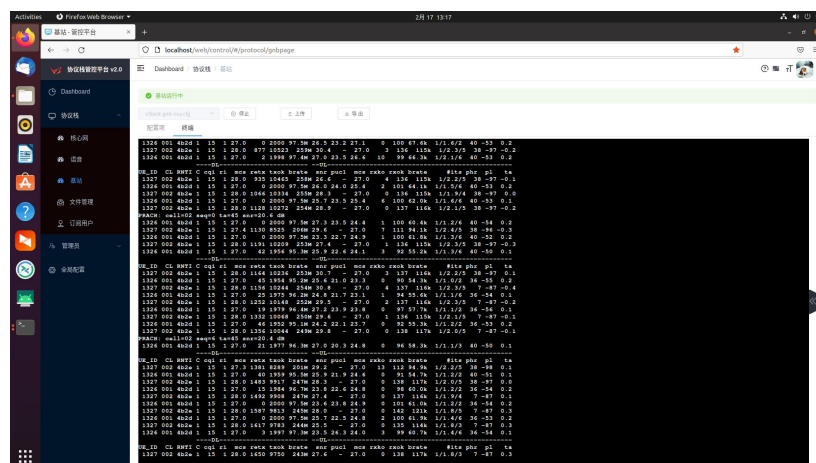




系统建立连接之后，可以在手机端进行相应的测试。



在NSA模式下，采用28GHz频段单天线模式下，可实现2.5~3bit/s/Hz左右的频谱效率。



通过此应用实例的演示，验证了5G毫米波OTA测试方案的可行性，从而为低成本的5G毫米波OTA测试提供了新的选择。