

高性能信道模拟器设计与应用浅析

邵 晖

上海聚星仪器有限公司

引言

随时随地畅通的通信，是人们
的愿望。不论日常生活、科研还是工
业物联网都需要这样的通信条件。然
而，我们常常遇到这样的情况：手机
显示信号强，但是通话掉线；列车上
通话时断时续；在公众场所WiFi信号
强，但是接入Internet失败；高速公路
收费站的ETC闸口速度缓慢；公交卡
放在钱包里刷卡时灵时不灵。这些简
单常见的例子都和信道不理想影响通
信质量有关。

无线通信的抽象过程就是发射端
信源通过编码、调制发射到媒介，经
过信道传播到达接收端，接收端经过
解调、解码到达信宿。无线信号传递

的通道，也就是信道，存在反射、散
射、干扰等不完美情况。信号经过这
样的信道传播会产生畸变，从而影响
通信质量。所以在通信设备、协议研
发过程中，需要采用信道模拟器，用
电缆接入收发端之间，仿真各种可能
的信道情况，验证设备、协议的科学
性，指导响应修订和改进。

信道衰落

无线电波在自由空间传播的功率
衰减公式如下：

$$FSPL = (4\pi df/c)^2$$

其中FSPL是单极子天线自由空
间路径损耗， d 是距离， f 是频率， c 是
光速。如果用对数dB表损耗，距离用
米，频率用MHz表示，那么

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 27.55$$

可见，在固定频率下，对数表
达的路径损耗和距离是线性的，如图
1所示的绿线。但是在特定真实信道
中，存在遮挡、绕射等效应，使得传
输衰减随距离变化偏离线性，如红线
示意。再有媒质当中散射波动、相对
多普勒运动等等动态调节产生衰落现
象，使得在真实环境中实测到的路径
损耗随距离快速随机起伏。这样几种
现象在真实场景中综合起来，如图中
蓝线示意。

信道模拟器就是要针对科研人员
关心的场景，模拟出这样的信道衰落
现象。

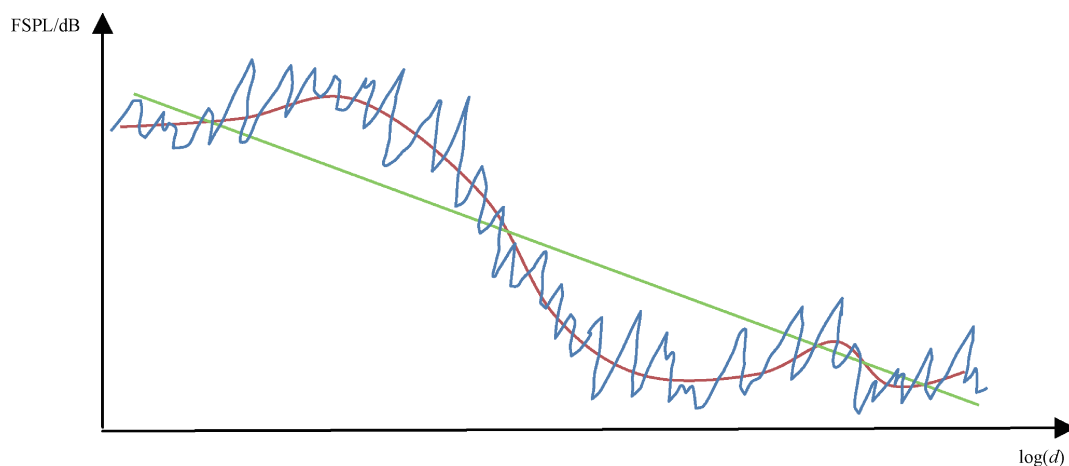


图1 路径损耗和距离关系示意图

信道模拟器架构设计

单入单出结构

单收单发信道模拟可以连接一对射频收发，对单发-单收通信进行信道模拟试验。它的结构如图2所示。模拟器从射频接收模块接受发送端的射频，下变频成为基带信号分别送到多个信道路径模拟。每一个信道路径模拟可以设置不同的模型和参数，用来模拟应用场景中多种型号传输通道的情况。各个路径模拟相加，成为完整的信道模拟基带，送给射频发射。射频发射通过上变频将基带转换为合适的射频信号发送给被试验的接收端

设备。

其中每一个信道路径的基本结构相同，如图3所示。数字基带经过整合素采样延时、小数采样延时，完成信号传播时延的仿真。延时后的信号依次进行衰落、多普勒和加干扰的处理，完成信号多径衰落、运动频移和其他无线电干扰的模拟。最后数字基带输出给射频发射。

这样的信道路径模拟可以针对幅度波动、时间和频率弥散等多维度信道现象进行仿真，充分测试被测系统在各种极端环境下的通信质量和信道技术效果。

例如在建筑密集的中心城区，收发端之间没有直射路径，可以用瑞利衰落模型。这个模型假设信道复数域叠加了均值为0方差为 σ^2 的平稳窄带高斯过程。这个过程的幅度概率分布符合瑞利分布。

$$Z = X + jY, \quad X, Y \sim N(0, \sigma^2)$$
$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
$$PDF(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

其中Z是随机过程，R是幅度函数，PDF是幅度的概率密度函数。

多人多出架构

对于多个发射对应多个接收的情况，如图4所示。每个射频接收对应一

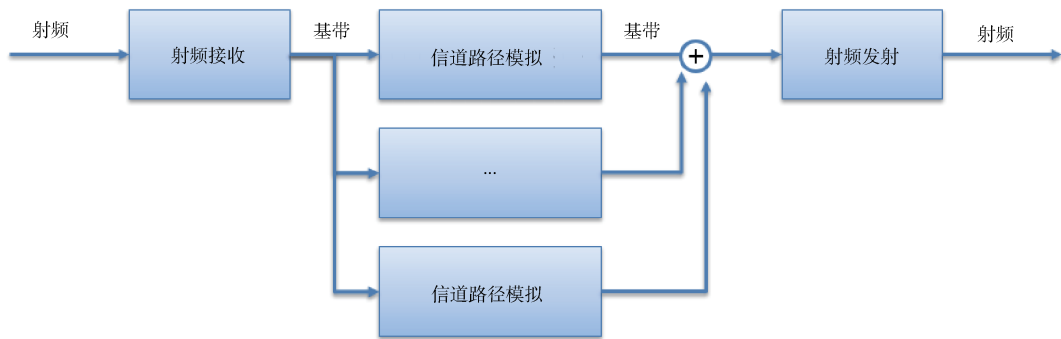


图2 单收单发信道模拟结构

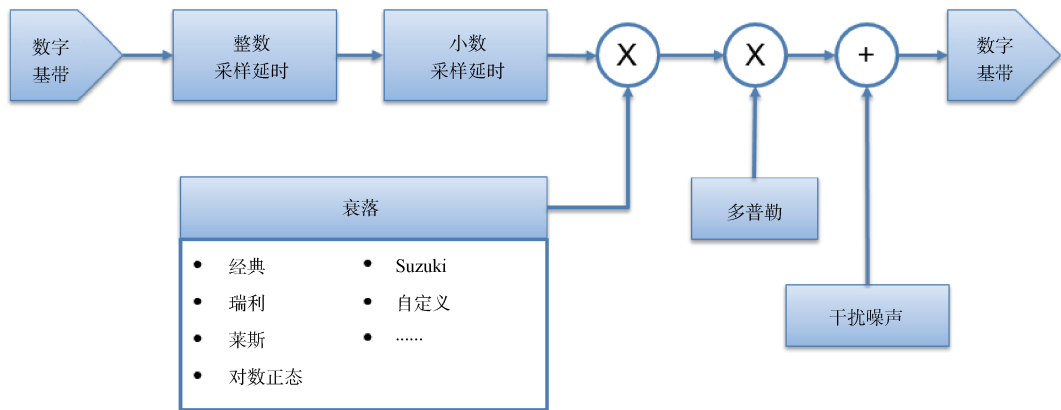


图3 信道路径模拟原理框图

个被测系统的信源射频发射。每个接收到的信号被配置到适当多个信道路径模拟，来自一个射频接收或者多个射频接收的经过信道路径模拟的信号相加送给模拟器的射频发射，输出给被测通信信宿的接收机。这样的结构就可以模拟多发多收(MIMO)系统的信道情况了。

双向通信架构

虽然在很多研究和性能测试当

中，只需要评估收-发单向的通信效果，但是现实的通信设备大多是收发双向的，所以在实物在环仿真的阶段往往会需要双向传输仿真。这时，信道模拟器就会配置为两套MIMO，如图5所示。图中有4个收发单元，可能属于4套通信设备，也可以是两套双天线MIMO收发设备。每个收发器的射频端口和一个环形器相连，环形器将收发双工转换为单方向收发，分别馈

送到两组2x2 MIMO信道模拟。这样就完成了一个完整的双向2x2MIMO信道模拟。

信道模拟器的测试和挑战

信道模拟器的性能分为射频性能和功能两部分。射频性能主要是频率准确度、路径损耗、响应平坦度、时延准确度、信号失真度等等。大多数用传统的矢量调整信号源、频谱分析仪、矢量信号分析仪和网络分析仪就

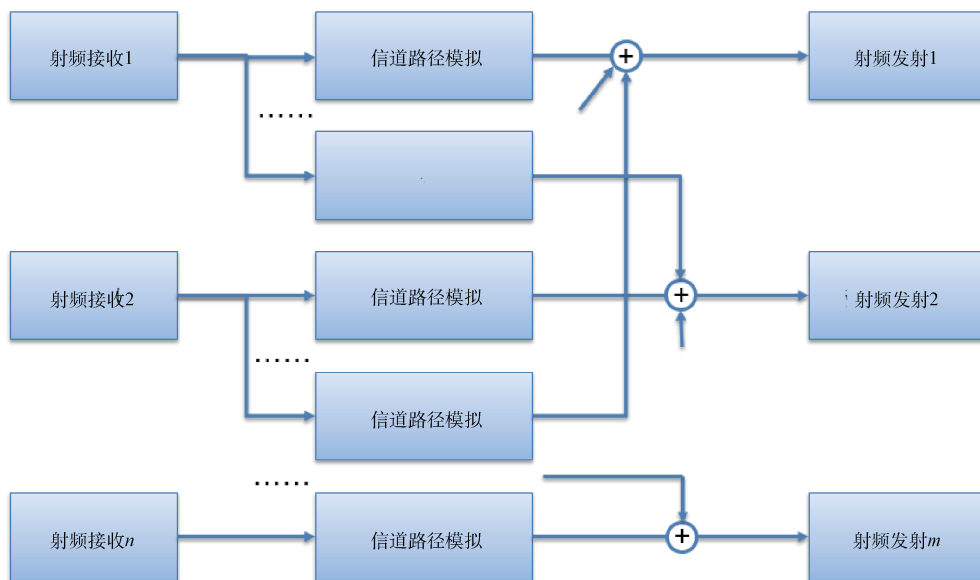


图4 多入多出信道模拟结构



图5 双向多入多出信道模拟原理框图

可以测量。但是对于较复杂的信道模拟特性就需要特别的测试方法。

例如对瑞利衰落的检验，根据国家计量技术规范JJF1286-2011如图6所示。信号发生器发送900 MHz单频连续波信号，经过信道模拟器，设定瑞利衰落路径损耗0 dB，速度100 km/h。然后在频谱分析仪上看频谱和时域特征。其中频谱特征比较定量，直接看带宽就可以。但是时域

特征就比较模糊。规范要求“验证频谱分析仪上的信号波形是否快速波动（范围约为从30 dB到60 dB快衰落信号）”。在频谱分析仪上选择文件保存功能，保存屏幕图形记录”。这种验证没法看出幅度分布是否符合理论的瑞利概率分布。我们把频谱仪换作矢量信号分析仪，并且提取幅度时间曲线，将幅度分布概率和瑞利分布比对，就可以验证信道模拟是否符合瑞

利模型。如图7所示，我们将模拟的曲线幅度概率分布和理论的瑞利分布比对。速度100 km/h的瑞利衰落幅度概率密度函数和 $\sigma=0.7$ 的瑞利分布吻合。

再举另一个挑战，就是通道间的同步性能。多入多出系统要模拟波束成形或者到达时间差测量的信道时，不同通道输入到输出的时间同步性能是一个关键。如图8所示我们采用一个

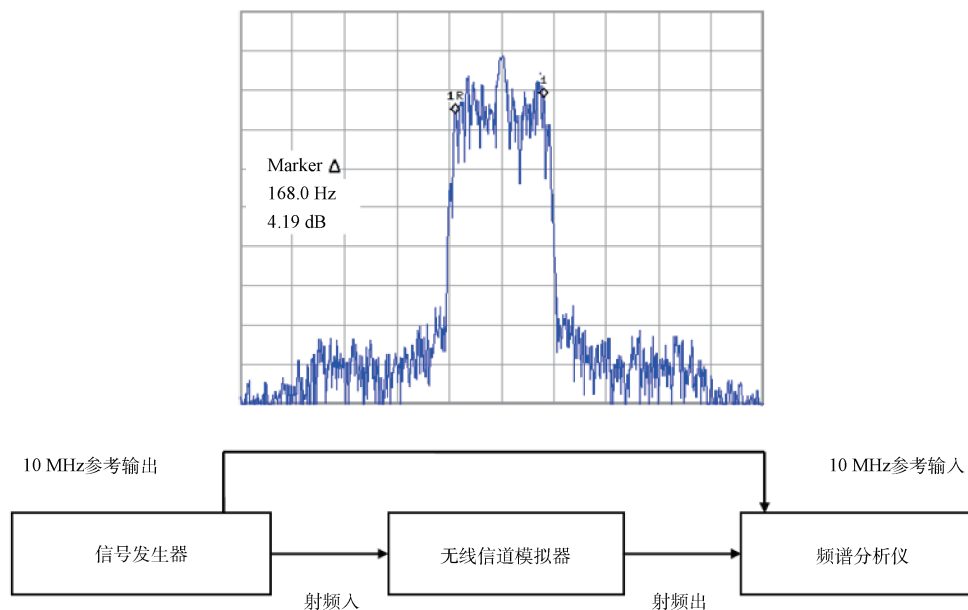


图6 国家计量规范JJF1286-2011瑞利衰落检测原理

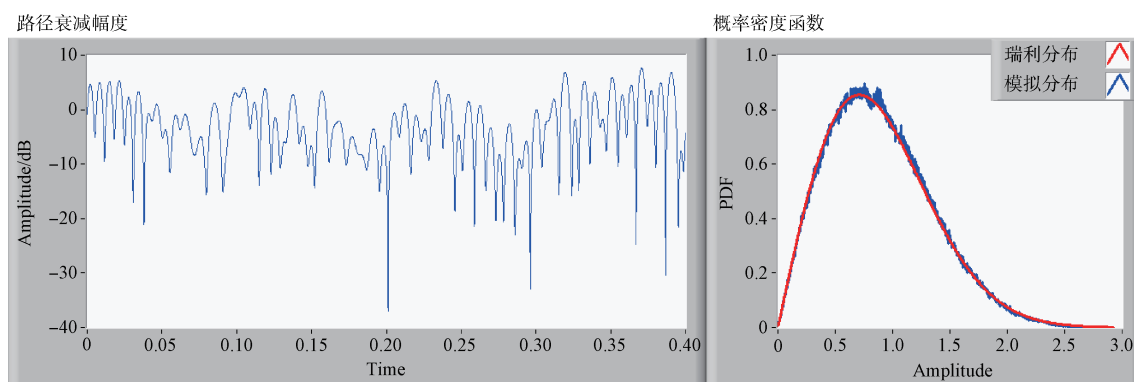


图7 瑞利衰落幅度曲线和概率密度函数比较

信号发生器，发出的射频信号经过功分器分作2个同相位信号，送到双通道同步信号采集分析仪进行电路校准。校准后将信道模拟器接入，使得每一个射频链路通过一个模拟的信道。记录和分析同步信号采集分析仪接收到的信号时间差。这个时间差是通过两路信号求相位差，通过频率反推到时延差别的。图9显示了一个3通道信道的时延测量值。

信道模拟应用

信道模拟的应用非常广泛。只要

你想通过收发技术改善来消减无线信号传输带来的通信性能下降，你就可以用信道模拟来调试验证你的改善效能。

例如卫星导航产品，用于户外运动，经常会经历山区、植被、以及不同地面、水面条件的信道衰落。如图10所示，标准的导航卫星信号模拟器发出卫星信号，并模拟大气衰落，通过信道模拟器，可以增加各种地面环境带来的衰落信道。这样的信号馈送给被测的导航设备，就可以帮助研发

人员改进研制出更可靠，更精确的户外导航产品。

类似地，我们可以从现场实测或者仿真软件导出工业现场的无线网络信道模型。我们可以用信道模拟器和工业物联网通信设备相连接，仿真现场的各种极限条件，从而帮助无线终端和中继设备选型，优化现场通信设备布设，提高工业物联网的可靠性和性价比。

为了适应更多应用的需要，聚星研发的信道模拟器根据不同配置，可

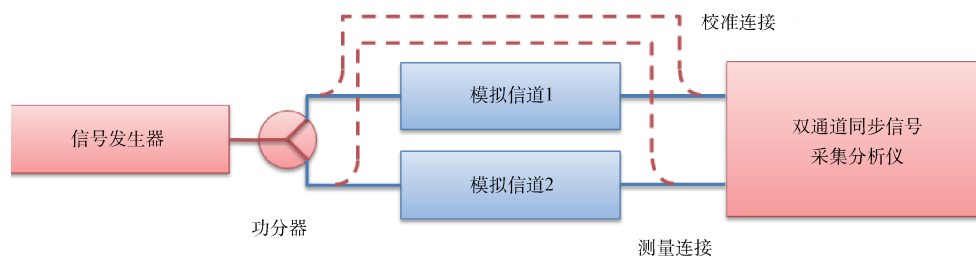


图8 同步性能测试原理框图

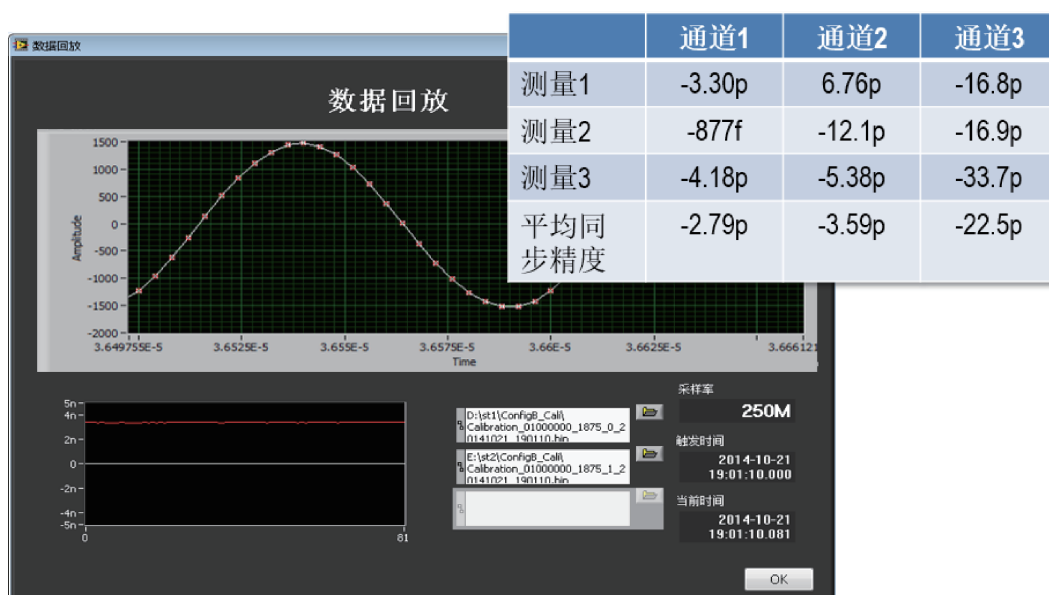


图9 同步性能测试界面和结果示例



图10 卫星导航信号地面信道模拟

以覆盖100~18 GHz的频率范围。在主要的射频频段带宽可达160 MHz,满足新一代宽带通信和跳频通信设备的测试需要。对于不同通信规模,聚星信道模拟器可以配置从2端口到16端口的不同规模,满足各种通信模式的需要。

总结

信道模拟是改善通信设备实用性、提升通信协议环境适应性的有力工具。随着物联网、车联网、穿戴式设备等新兴无线应用的拓展,信道模拟测试和辅助设计会起到越来越重要的作用。聚星信道模拟器是基于高性

能射频和基带电路的软件无线电架构的先进仪器。随着聚星贴近用户贴近应用的精益定制理念,聚星希望和用户一起共同成长,为社会提供更多更好性价比更高的自主可控的无线通信产品。

(上接第3页)

总结

R&S®SZU100A I/Q上变频器和R&S®SMW200A矢量信号发生器,是在60 GHz频段实施WLAN 802.11ad测量的强大二元组合。该装置以卓越

的信号品质和令人印象深刻的动态范围,生成符合标准的物理层信号,用于测试组件、模块和无线设备。由于采用内部实时频率响应校正,信号总是正确的。不再需要在每次测量前使

用额外设备进行专门校准。该装置仅通过信号发生器工作:做必要配置后可立即开始测量。这确保工作流程搭建既快速又简单,使用户能够在最短的时间内成功执行他们的测量任务。