

# Gbps 无线传输试验系统

## 测试与分析报告

清华大学

# 目 录

1	GBPS 传输试验系统自测概况 .....	3
1.1	课题目标和合同要求 .....	3
1.1.1	系统指标 .....	3
1.1.2	业务支持 .....	3
1.1.3	现场试验与测试 .....	4
1.1.4	拟体现的关键技术 .....	4
1.2	Gbps 传输试验系统自测目的 .....	4
2	GBPS 试验系统自测方法 .....	6
2.1	Gbps 传输试验系统概述 .....	6
2.2	信号带宽测试方法 .....	9
2.3	峰值传输速率测试方法 .....	9
2.4	误码率测试方法与步骤 .....	12
2.5	MIMO 检测信噪比测试方法 .....	12
2.6	天线选择性能测试方法描述 .....	13
2.7	系统自测场景描述 .....	15
2.8	自测条目设计说明 .....	20
2.9	自测内容清单 .....	21
2.9.1	系统带宽测试 (BW-BandWidth) .....	21
2.9.2	信道估计性能测试 (CE-ChannelEstimation) .....	22
2.9.3	信干噪比加权系数影响测试 (SI-SInr) .....	22
2.9.4	多径影响测试 (MP-MultiPath) .....	22
2.9.5	传输距离测试 (DT-Distance Test) .....	23
2.9.6	水平位置测试 (HT-HorizontalTest) .....	23
2.9.7	天线选择性能测试 (AS-Antenna Selection) .....	24
2.9.8	天线发射角度影响测试 (AA-Antenna Angle) .....	25
2.9.9	业务速率测试 (SR-Service Rate) .....	25
3	自测结果及分析 .....	26
3.1	系统带宽测试 .....	26
3.2	信道估计性能测试 .....	31
3.3	信干比加权系数影响测试 .....	34
3.4	多径影响测试 .....	36
3.5	传输距离测试 .....	41
3.6	水平位置测试 .....	41
3.7	天线选择性能测试 .....	42
3.8	天线发射角度影响测试 .....	45
3.9	业务速率测试 .....	47
4	试验系统自测结论 .....	49
	CHANGE HISTORY .....	50

# 1 Gbps 传输试验系统自测概况

## 1.1 课题目标和合同要求

本 863 课题“Gbps 无线传输关键技术与试验系统研究开发”的主要研究内容包括：低复杂度 Gbps 无线传输系统链路与 MAC 设计技术、宽带射频与多天线实现技术、高速模数/数模转换与基带处理技术、软件控制技术、IP 网络接口技术与业务应用技术等。探索 Gbps 无线传输技术在第四代（IMT Advanced）移动通信、无线局域网和短距离无线通信等系统中的应用。

具体分解上述内容，可分为两方面：关键技术研究和试验验证系统的开发。其中关键技术的研究包括未来可能应用于 Gbps 无线传输的各种技术，包括前述两种应用场景。而从可实现性、迫切性及经费条件的角度出发，试验系统的研发则主要针对低速移动、准静态传播环境进行。因此，根据课题的任务书要求，本项目的主要研究内容之一就是研制一套体现 Gbps 无线传输关键技术的峰值达到 1Gbps 传输速率的试验系统，并对其进行试验和测试。

而具体要求此试验系统达到的系统指标包括：

### 1.1.1 系统指标

系统工作频率：13-15GHz

峰值数据率：大于 1Gbps

信号带宽：不大于 100MHz

传输距离：大于 50m

最大 RF 通道数：8 个

### 1.1.2 业务支持

研制开发的 Gbps 通信系统可以支持高速数据业务，多画面高清视频，文件高速下载等。

### 1.1.3 现场试验与测试

建立室内和室外两个试验环境，进行现场的室内和室外传输试验，达到峰值速率要求，并进行高速业务演示。

### 1.1.4 拟体现的关键技术

本项目中研究的关键技术部分的大部分研究成果将视成熟先后和程度，在试验系统中依次体现。主要包括宽带 RF、高速 AD/DA、宽带 OFDM、MIMO 检测、高效编码调制、环境自适应等。

而本报告将围绕 Gbps 试验系统的自我测试展开，提供自我测试的环境构建、测试方法以及测试结果，以验证 Gbps 试验系统在准静态的低速移动环境下基本达到课题所设定的目标。具体自测所要达到的目的如下节所述。

## 1.2 Gbps 传输试验系统自测目的

根据 Gbps 传输试验系统的设计原理和最终条件，我们最终拟定系统自测目的如下：

- (1) 验证试验系统是否能够达到系统设计目标，主要包括峰值速率、系统带宽、传输距离等系统基本指标；
- (2) 验证天线选择在 Gbps 传输系统中的作用；
- (3) 验证系统在不同多径时延传播条件下的性能；
- (4) 验证系统的业务传输能力。

为了实现上述自测目标，拟定待测或输出的系统指标主要包括：

- 1) 信号带宽
- 2) 误码率
- 3) MIMO 检测信噪比
- 4) 峰值传输速率
- 5) 频谱效率

根据系统设计原理，我们预期能达到的最终指标如下：

- 1) 收发距离间隔 50 米以上，能实现峰值 1Gbps 以上传输；
- 2) MIMO 检测输出信噪比大于 23dB；
- 3) 误码率低于 10e-6；
- 4) 峰值频谱效率超过 10bps/Hz。

## 2 Gbps 试验系统自测方法

本章，我们将先大致介绍 Gbps 传输试验系统的基本构成，以便于描述系统自测原理与方法。然后阐述各种主要指标的测试方法，包括信号带宽、峰值传输速率、误码率测试等。接着将就试验系统的两种自测场景进行描述说明，最后给出自测条目设计说明以及自测内容清单。

### 2.1 Gbps 传输试验系统概述

Gbps 无线传输试验系统收发两端均包括 PC 机、基带处理机柜、射频模块、天线单元四部分组成，可用如下图 1 来描述收发两端主要单元之间的逻辑连接。其中每个基带处理机柜（共有 14 个槽位）搭配一台基带处理 PC 机，基带处理 PC 机除了具有一块千兆以太网网卡，另外还带有另一块 100M 以太网有线/无线网卡，用以提供反向信道传输反馈信息。基带处理部分系统最多支持 8\*8 的 MIMO 传输通道，而在天线单元部分，则可以通过在天线架上按照一定拓扑布置 12\*12 的 MIMO 天线阵列，用于支持天线选择试验。

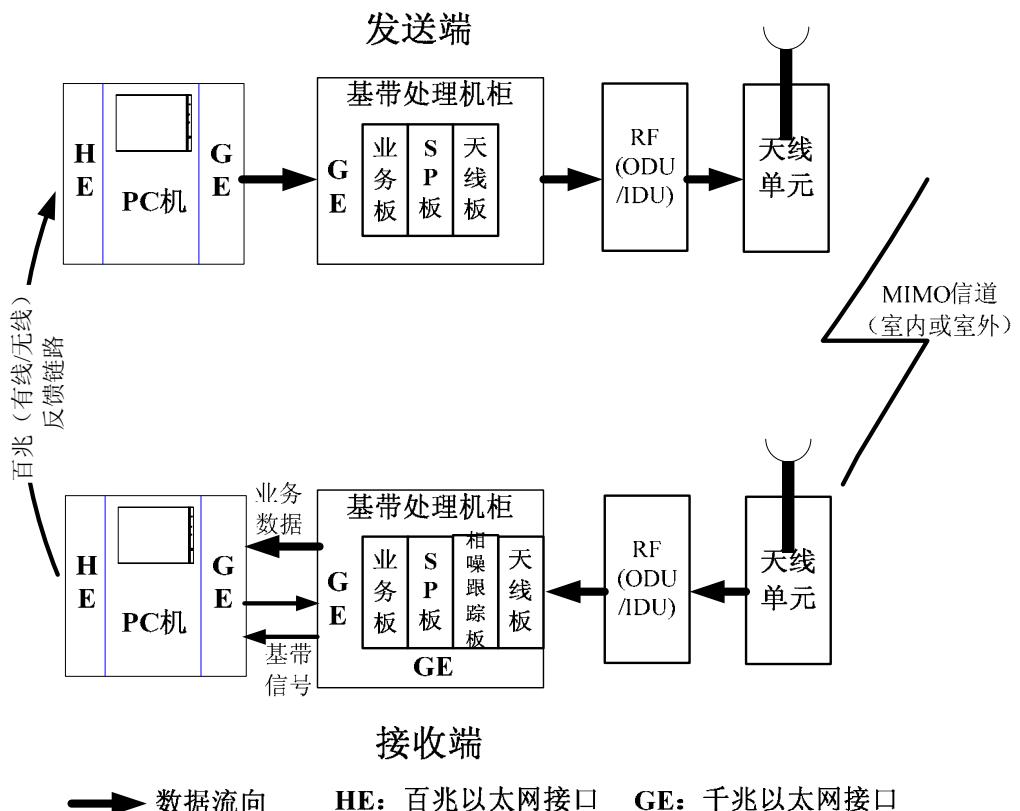


图 1 Gbps 无线传输试验系统组成单元及逻辑连接

在上图中, 收发两端其中每一端通常都包含一个基带处理机柜和一台(或者两台)PC 机。其中, 发端的基带处理机柜通常包括天线板、信号处理 (SP) 板、业务板三种。从功能上来说, 发端天线板主要完成从 SP 板接收编码后数据流, 按照数据传输帧格式进行成帧操作 (包括 IFFT 操作), 完成数字上变频, 然后通过一块扣在上面的 IDU 子板发送给 RF 单元; 发端 SP 板则主要完成从业务板接收数据业务, 完成 LDPC 编码、64QAM 调制等基带信号发送处理功能; 业务板则负责从 PC 机接收业务数据, 分发到相应的 SP 板。发端 PC 主要完成对发端系统参数配置以及业务数据的产生等。所有功能板以及与 PC 机之间都通过千兆以太网交换机相连接, 其中的基带处理机柜上所有子板都对外提供千兆以太网 GE 接口。

接收端的基带处理机柜通常包括天线板、信号处理 (SP) 板、业务板、相噪跟踪板四种。相比于发端, 收端的信号处理功能由 PC 机与基带处理机柜协同完成。其中, 天线板功能为完成从 IDU 接收数据, 进行数字下变频、FFT 变换、拆帧 (包括分离数据和导频) 发送到 PC 机以及相应的 SP 板; PC 机通过前导引到序列(preamble)的方式完成定时频偏的初始估计, 并发送回天线板完成定时、频偏的校正, 同时 PC 机通过截取同步后的 preamble 得到信道估计结果、以及计算得到最小均方误差(MMSE)检测子所需要的检测矩阵发送给 SP 板; SP 板完成 MIMO 检测的矩阵乘法、64QAM 解调和 LDPC 译码, 译码后数据发送到业务板进行汇聚传回 PC 机进行业务演示。相比于发端, 收端的基带处理机柜中多了一块定义为“相噪跟踪板”的子板 (这部分功能也可以在 SP 板资源富余情况下直接在 SP 板上实现), 其目的是用来根据数据帧中预留子载波估计与跟踪相位噪声的实时变化, 然后将共同相噪纠正参数传回 SP 板进行前向的解调星座旋转, 以及同时可以发回天线板进行实时跟踪纠正。

收发两端 PC 机所完成的功能也稍有不同。从发端来说, PC 主要完成发送基本配置的设置 (配置参数给基带信号处理机柜)、业务生成以及发送到业务板等; 而收端 PC 除了完成上述功能对应的收端功能 (包括参数配置、从业务板完成业务接收) 之外, 还需要完成大量的信号处理功能, 包括了定时同步、频偏估计、信道估计、矩阵 SVD 分解、求逆等运算。因此, 当收端 PC 处理能力有限时, 我们考虑将信号处理的功能放在一台 PC 机上完成, 而业务接收则放在另一台 PC 机上处理。

本试验系统的 RF 部分采用了频点在 15GHz 附近的 ODU 设备组成, 其采用二次变频

方式实现载波调制。载波频率可通过更改时钟源设置，从 14.417GHz 到 15.341GHz 灵活可变；而每个频率通道带宽为 33M。为了便于测试，以及时钟源的限制，目前我们主要选取了低于 15GHz 的 100M 带宽作为试验演示系统的试验频段，即 14.400GHz-14.500GHz，对应的载波中心频率最低为  $f_1=14.417\text{GHz}$  以及最高为  $f_2=14.483\text{GHz}$ 。同时由于 RF 前端功率合成等工艺的限制，我们将在两个频道上分别运行一组 4\*4 的 MIMO 系统，从而组成一个最大带宽可以达到 100M、最大子流配置数 8\*8(2 组 4\*4)的系统配置。

本试验系统的天线单元部分对应于 RF 部分的限制，也将采用 2 组 4\*4 的天线阵组成一组 8\*8 的天线阵。具体到每一组 4\*4 的收发天线方式，则根据 LOS-MIMO 信道满秩条件约束下的天线摆放要求，4 根天线要求在一个垂直平面内组成一个正方形，在频率为 15G 左右、收发距离 50 米时，边长大约 0.7 米，如图 2 所示。

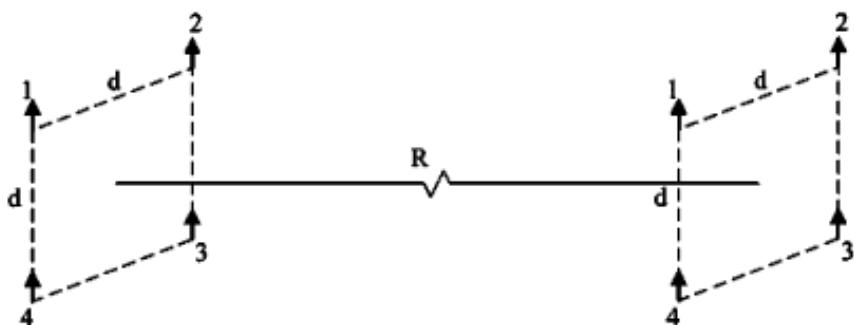


图 2 Gbps 试验演示系统 4\*4 天线放置示意图

对于接收阵列为某平面内  $N_1 \times N_2$  的 lattice 摆放的情况，收发天线阵距离  $L$ ，信号波长  $\lambda$ ，收发天线阵列面积分别为  $S_t = S_r = \frac{(N_1-1)(N_2-1)}{\sqrt{N_1 N_2}} \lambda L$ ，天线间距  $d = \sqrt{\frac{\lambda L}{2}}$ 。

当考虑每两个天线之间的距离时，在射频频率 15GHz 下，天线间距如表 1 所示。

表 1 天线间距与收发距离的对应关系

收发距离(m)	5	10	50	5000
天线间距(m)	0.2236	0.3162	0.707	7.07

在系统自测过程中，我们按照测试距离约 50 米来固定天线间距。

进一步的，为了验证天线选择对系统性能的改变和提升，我们还可以通过在收发两端多配置 4 根天线来实现，这样最多可以构成 12\*12 的收发 MIMO 天线阵列。

接下来，我们将详细描述各种系统指标的测试方法，包括：信号带宽测试方法、峰值传输速率测试方法、MIMO 检测信噪比测试方法、误码率测试方法、天线选择性能测试方法等。

## 2.2 信号带宽测试方法

信号带宽测试主要为了反映本试验演示系统可以支持的最大信号带宽，主要测试手段是利用频谱仪直接观察记录信号频谱，包括发端与收端两端的频谱结果。

一方面用频谱仪直接观察两套 4\*4 系统同时工作时的信号频谱，表明当固定系统的工作频点后系统的工作带宽是不超过 100MHz 的。另一方面通过调整收发射频时钟源的频率使得系统的工作频点在设定的 14.400G~14.500GHz 100M 带宽内滑动，表明 GBPS 系统的射频单元发送信号的带宽是有能力覆盖 100MHz 的。

## 2.3 峰值传输速率测试方法

系统峰值传输速率包括两部分：一部分是物理层传输数据率，一部分是业务传输数据率。其中物理层数据率是收发信机本身的，可为上层提供的基本传输能力；而业务传输数据率则是经过去掉高层协议开销之后的业务体验的数据率。

在本系统中，为了便于实现多种业务的连接与演示，采用灵活的对外接口，接口形式采用通用的千兆以太网接口。由于存在可变包长、异步、延时、各种协议包头和协议本身等的开销，实际的业务数据率将明显低于物理层数据率。

由于物理层数据接口在设备内部，不便直接测量，而实际的传输体验是业务数据。为此，在本测试报告中，对物理层数据率测试采用间接测量的方法，而业务数据率测试则采用直接测量的方法，其中业务数据率一般约占物理层数据率的 70% 到 80%。

物理层数据率的间接测量方法为：根据系统技术方案中的参数，计算出系统带宽效率，根据实测的信号带宽，计算峰值物理层数据率。

业务数据率的测试分为单向无反馈的传输速率测试和利用收发端有握手的传输协议进行的有反馈传输速率测试两部分。其中单向无反馈的传输速率测试是用自行编写的文件传输 C 程序来完成的，而利用传输协议进行的传输速率测试则包括 tcp 协议下的传输速率测试和

ftp 协议下的传输速率测试。在利用带反馈的传输协议进行的传输速率测试时反馈链路是通过百兆网线在发送端的 pc 机和接收端的 pc 机之间建立的，并且为了确保反馈链路的传输速率是不大于百兆的，测试时在反馈链路上加了一级百兆交换机。单向无反馈和利用传输协议的有反馈传输峰值速率测试框图分别如图 3 和图 4 所示。

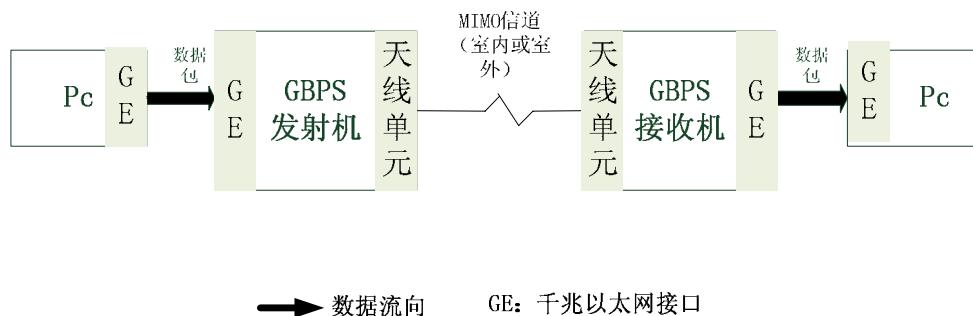


图 3 单向无反馈峰值传输速率测试

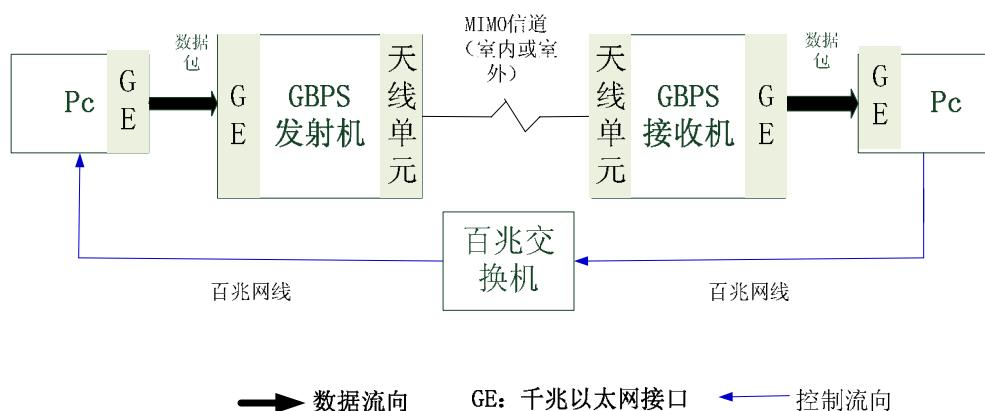


图 4 利用传输协议的有反馈峰值传输速率测试

单向无反馈的传输速率的具体测试流程为，发送端的 pc 机读取硬盘中的数据文件并且将数据文件不断地通过系统发往接收端的 pc 机，传输完毕后由接收端的 pc 机统计平均接收速率并将此速率作为 GBPS 系统单向无反馈传输的峰值速率。

有反馈传输速率的测试中采用的协议包括 tcp 协议和 ftp 协议，利用 tcp 协议的测试又分为通过自行编写的 C 程序进行的传输速率测试和利用 netperf 传输速率测试工具进行的速率测试，利用 ftp 协议进行的传输速率测试则是通过 vsFTPd 工具软件进行的。

自行编写的 tcp 协议下的传输速率测试 C 程序是利用网络编程工具 socket 套接字来实现

的。Socket 套接字采用客户/服务端模型进行收发端之间的互通，有三种类型，分别为流式套接字，数据报套接字和原始套接字，其中流式套接字在传输层使用 tcp 协议，提供可靠的、面向连接的数据流，自行编写的速率测试 C 程序中采用的是流式套接字。同单向无反馈传输速率测试类似，发送端 pc 机读取硬盘中的数据文件并且将数据文件通过系统发往接收端的 pc 机，传输完毕后由接收端 pc 机统计平均接收速率作为峰值传输速率。

Tcp 协议下的速率测试的另一种方式是利用 netperf 传输速率测试工具进行的。Netperf 是一种网络性能的测试工具，以 client/server 方式工作，主要针对基于 tcp 和 udp 的传输。测试时 Server 端是 netserver，用来侦听来自 client 的连接，client 端是 netperf，用来向 server 端发起测试。当 client 向 server 发起测试请求后，在 client 与 server 之间首先建立一个控制连接，传递有关测试配置的信息，然后再建立一个测试连接进行性能测试，测试结束后测试结果由 server 端通过控制连接传回 client 端。Netperf 根据应用的不同可以进行不同模式的网络性能测试，包括批量数据传输模式和请求/应答模式，netperf 测试结果反映的是一个系统能以多快的速度向另一个系统发送数据，以及另一个系统能以多快的速度接收数据。为了进行 tcp 协议下的传输速率的测试我们选用的是 netperf 的 tcp 批量数据传输工作模式。接收端的 pc 机作为 netperf 的 server 端，发送端的 pc 机作为 client，测试时接收端的 pc 开启 netserver 来侦听来自发送端 pc 的连接，然后发送端 pc 向接收端 pc 发起速率测试，最后在发送 pc 查看传输速率的测试结果。此测试结果是发送端 pc 和接收端 pc 之间的传输速率，一定程度上反映了 GBPS 系统能达到的传输速率。

用来进行 ftp 协议下的传输速率测试的是 vsFTPD 工具软件，将发送端的 pc 利用 vsFTPD 配置成 ftp 服务器，测试时接收端的 pc 作为 ftp 客户端从发送端的 pc 上进行文件或文件夹的下载，然后统计平均传输速率。

另外，为了体现 Gbps 试验系统的业务传输能力，我们还设计实现了 3-D 视频流业务的传输、播放试验。节目源来自于天津大学电视与图像信息研究所。立体视频技术是未来多媒体技术的发展方向，它是一种能够提供立体感的新型视频技术。立体视频需要在立体显示器上播放才能达到最佳的视觉效果。

立体显示器是建立在人眼立体视觉机制上的新一代自由立体显示设备，采用显微透镜光栅屏幕或透镜屏技术，通过摩尔纹（moiré）干涉测量法精确对位，利用一组倾斜排列的凸透镜阵列，仅在水平方向上发生的折射来为双眼提供不同的透视图像，在人眼裸视条件下呈

现出具有空间深度信息的逼真立体影像，而不需要借助于任何助视设备（如 3D 眼镜、头盔等）。

与单通道视频相比，立体视频一般有多个视频通道，用来传输多视角的图像信息，数据量要远远大于单通道视频。因此，立体视频的传输和实时播放对链路的传输带宽提出了更高的要求。目前所拿到的节目源最高码率可达 2Gbps 以上，为了适应我们的 Gbps 试验系统传输需求，我们将节目源作了一定的压缩，使得播放的信息速率在 700Mbps 以上，但低于 1Gbps（因为业务还需要通过 GE 业务接口送入业务板）。

## 2.4 误码率测试方法与步骤

为了进行 GBPS 系统的传输误码率测试，发送端的 pc 通过 GBPS 系统向接收端 pc 循环发送同一个数据包，以方便接收端 pc 进行误码率的统计。测试时发送端 pc 将数据包发往 GBPS 系统，在接收端系统将收到的数据包传递给接收端 pc，接收端 pc 中的检测程序将收到的数据包和发送的数据包按 bit 进行比较，算出误比特率。误码率测试流程可以用下面的框图表示，图中收发端 pc 之间的虚线表示接收端的 pc 知道误码率测试时发送端 pc 发送的数据包的内容。

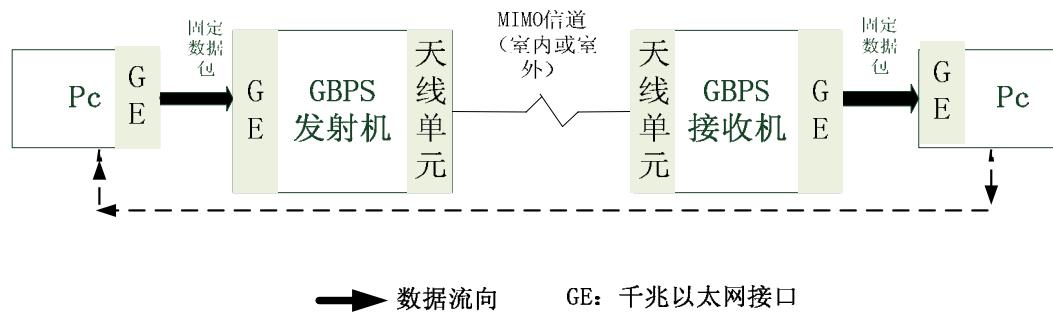


图 5 系统误码率测试

## 2.5 MIMO 检测信噪比测试方法

MIMO 检测的信噪比计算是在收端与基带处理机柜相连接的 pc 上完成的。MIMO 检测

后的数据要送去 sp 板进行译码，MIMO 检测得到的信噪比直接关系到译码的正确性，因此有必要对 MIMO 检测的信噪比进行监测。

由于信道估计时由 pc 来完成的，因此系统接收端的天线板需要不断向 pc 传送接收到的导频 OFDM 符号。为了进行 MIMO 检测信噪比的监测，接收端的天线板在向 pc 机传输信道估计所需要的导频 OFDM 符号的同时也向 pc 机传输若干数据 OFDM 符号，pc 机完成信道估计并将计算的 MIMO 检测矩阵送给接收端 sp 板的同时对 sp 板传输过来的数据 OFDM 符号进行 MIMO 检测和 MIMO 检测后信噪比的计算，以实时监测系统的工作状况。MIMO 检测信噪比的测试流程可以用图 6 表示。

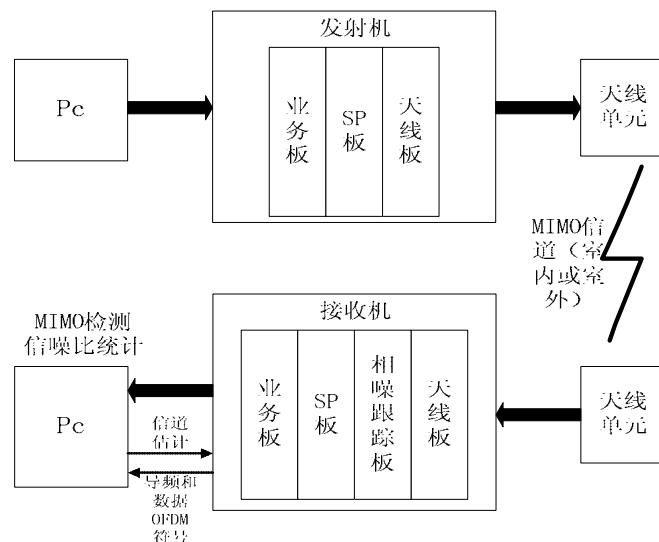


图 6 MIMO 检测输出信噪比监测

## 2.6 天线选择性能测试方法描述

本自测条目目的在于，测试不同收发天线对(组)的选择，对系统性能 (SNR 以及 BER、throughput) 的影响，由此验证天线选择可能带来的系统增益。具体测试方法如下。

由于我们采用了 2 组 4\*4 的收发天线组来实现通过率超过 1Gbps 的系统方案，每一组 4\*4 的天线配置使用各自独立的频点（根据第 2.1 节的描述，这里我们定义为高低两个频点  $f_1=14.417\text{GHz}$  和  $f_2=14.483\text{GHz}$ ），因此我们可以通过遍历任意 4\*4 的收发天线组合来实现对

整个 8\*8 系统天线选择性能的自测。

进一步的，考虑系统实际天线架的构造（如下图所示，此图描述的方向为面对发射机信号发射方向看的图示，即站在接收机一侧天线背后面朝发射机方向的图示），收发两端各自最多可以配置 12 根天线，根据直射径微波 MIMO 系统设计的基本原理（参考系统设计原理说明），原则上要求 4 根发射/接收天线组成一个接近正方形的几何分布，以此来保证各收发天线对之间的传输路径相位差使得 MIMO 信道矩阵基本保持满秩特性。因此，对收发两端，实际上各自只有 3 组可以选择的 4 根天线组成的组合，即如图 7 中所示的①，②，③。

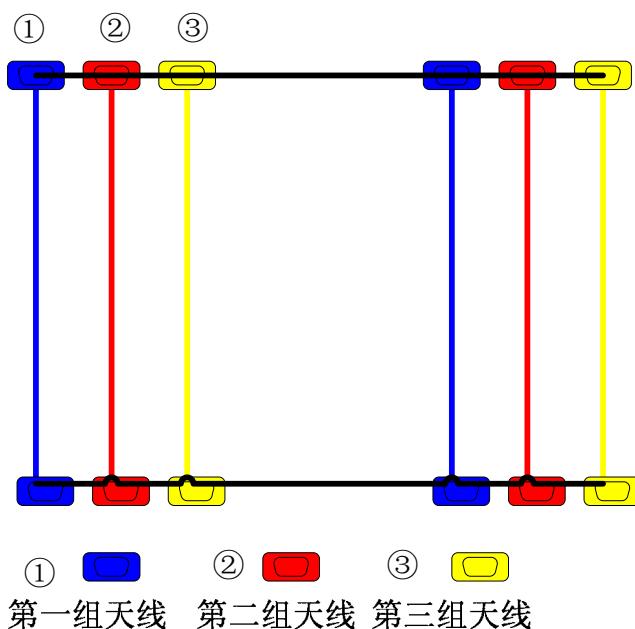


图 7 收/发端天线分组配置图

为了减少测试条目，降低因为天线以及射频连接线因为的反复装卸而损坏的风险，在每个测试地点我们考虑固定发端天线的位置（即从 3 组天线组中选择其中两组，并且固定位置其相对位置），而只对接收天线的位置考虑天线选择的性能测试，这样对每个测试点最多可以产生关于接收天线位置的 3 种选择，即：①和②，①和③，②和③。这一步骤我们可称之为天线位置选择测试。

而对每个相对位置确定后的测试，则可以考虑任何一对分别采用高低两个频点  $f_1$  和  $f_2$  进行传输，这项测试只需要本振的频率设置手动修改即可，这样形成在每个空间固定位置上的 4 个测试点。如下所示：

测试模式	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
------	--------	--------	--------	--------

收发硬件套数	1	2	1	2	1	2	1	2
发端频率选择	f1	f2	f1	f2	f2	f1	f2	f1
收端频率选择	f1	f2	f2	f1	f1	f2	f2	f1

这样做的目的，是充分考虑在天线位置固定情况下的频率（频道）选择结合空间选择的对比效果。这一步骤我们可称之为同道频率选择测试。

综上，在某个地理位置的测试点上，天线位置选择测试结合同道频率选择测试可以形成  $3*4=12$  个测试点。

进一步，考虑不同地理位置不是一般性的假设，我们计划只对其中 1 个地点做上述的 12 项完整测试；另外再做 3 个位置点的测试，每个测试点只做同道频率选择测试，形成 4 个测试点。

综上，形成的测试点共计  $12+3*4=24$  个点。

测试结果输出，原则上应该包括 MIMO 检测解调后信噪比(SNR)和误码率(BER)。但由于我们自身设计系统不足，将主要考虑 SNR 作为天线选择性能测试结果输出，而 BER 只做为参考输出。

进一步，上述测试中的同道频率选择测试，实际上是对同一频率在不同时间下的测试，因为某个频率  $f$  从一个天线组切换到另一个天线组之间需要一定时间。这个时间相对信道小尺度时间特征来说，可能远远超过了信道相干时间，虽然我们认为我们的系统是基于信道准静态来设计的但实际上仍然不可能保证两个时间下的测试能较完全准确地反映同一频率  $f$  在不同选择通道下的性能对比。因此，针对此需求，我们再补充一个如下的测试条目。

保持发端两个频率  $f1$  和  $f2$  都发送信号，接收端将两组天线都采用  $f1$ (或  $f2$ )进行接收，然后对比两组接收天线接收同一频率的性能结果，仍然以 SNR 作为主要指标输出，BER 作为参考指标。

## 2.7 系统自测场景描述

系统自测包括室内和室外两个测试场景。

在室内，发送端和接收端采用移相器相连。系统由两套 4 发 4 收的 MIMO 天线系统组成。如果测试误码率和信道特性，只需要用到 1 套 4\*4 的天线系统。收发之间的连接框图如

图 8 所示。

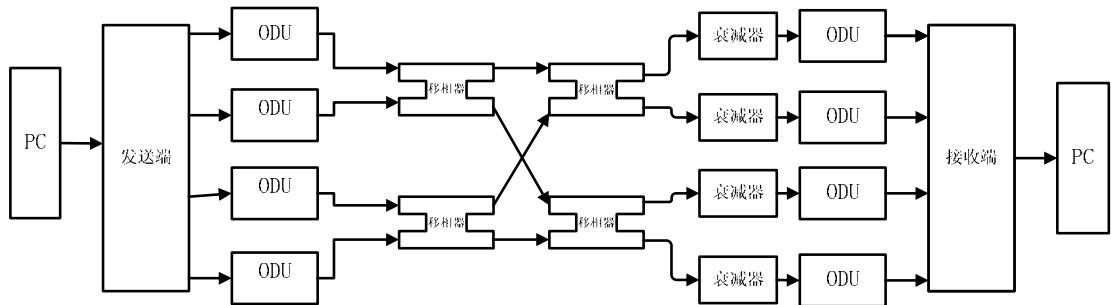


图 8 室内移相器测试连接框图

每个移相器相当于一个能够调整电磁波相位的功率均分器，发送端的每根天线经过 ODU 将射频信号发送出来后，通过第一组移相器，功率降为 1/2，再通过第二组移相器。在第二组每个移相器的每个出口，包括了发送端 4 根天线的数据叠加。这样，使用两组移相器模拟了无线信道。为了使得室内测试环境尽可能的和室外环境一致，发送端的发射功率设为和室外一致。但是相对于室外环境，移相器对信号功率的衰减很小，因此我们在射频信号进入收端 ODU 之前，添加了 30dB 衰减器。

如果要进行业务传输速率的测试，需要两套 4\*4，但是受实验条件所限，实验室中仅有 4 个移相器，因此在进行室内业务测试时采用如图 9 所示的连接方式。

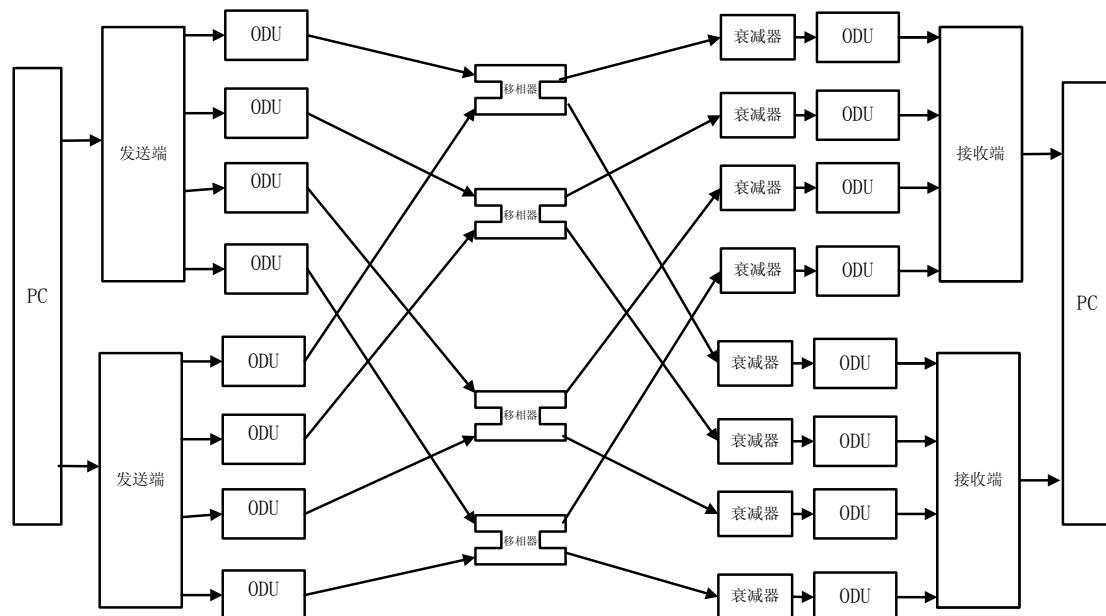


图 9 室内 8\*8 移相器模式连接框图

为了实现接收端每根天线能够收到 4 个发送子流的数据，我们在发送端的 sp 板置的预编码矩阵时进行了修改。在发送端，4 个子流的数据组成一个向量  $X$ ，原来的预编码矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

预编码之后  $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X}$ ，从而  $\mathbf{Y} = \mathbf{X}$ ，相当于没有进行预编码。现在把预编码矩阵改为

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 1 & j & -1 & -j \\ -j & 1 & j & -1 \\ -1 & -j & 1 & j \\ j & -1 & -j & 1 \end{bmatrix}$$

预编码之后  $\hat{\mathbf{Y}} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{X}$ ，从而将 4 个子流混在了一起，且子流之间有一个相位上的旋转。

室外测试在楼道内进行。楼道是一个封闭的测试环境。发端的信号到达楼道的墙壁后，发射回发端，经过发送端的墙壁再次发射，会被接收天线接收。经过测量，此二次反射的信号经过的距离为 130 米左右，相对主径延迟了大约 300-400ns 左右，此多径时延超过了保护间隔，会造成一定的 ISI 干扰。因此，测试系统在存在多径的信道环境下的传输性能是必要的。为了在室内环境中能够模拟室外存在多径的环境，并对系统抵抗多径的能力进行测试，对发送端的天线板进行了修改。在发送端的天线板内，数据经过 DA 转换器之前，将信号延迟 N 个采样点后，乘以一个复数 A(此为第二径相对第一径的复幅度值)，使得多径相对主径有一个幅度和相位上的差异。然后把多径叠加到主径上。其中，多径延迟 N 和幅度加权因子 A 是一个变量，使用控制 PC 可以实时配置。多径产生框图如图 10 所示。

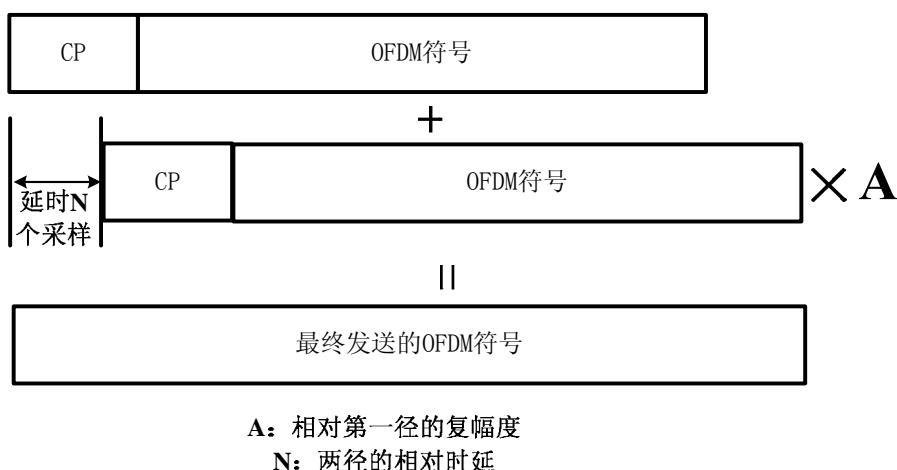


图 10 多径产生原理框图

室外环境在清华大学 FIT 楼 5 楼的楼道内进行。主要根据地砖定位，楼道内每 6 块地砖有一个深色的分界，如图 11 和图 12 所示具体定位方式为：

第一位数字表示在第几个分界线以南，第二位数字表示从北向南在分界线以南的第几块砖，第三位表示从墙开始从东向西第几块砖。

在摆放仪器车时，以从收端面向发端为方向基准，让发端右前轱辘处于地砖的右前角，收端右前轱辘处于地砖的右前角。



图 11 楼道照片及地砖标号图

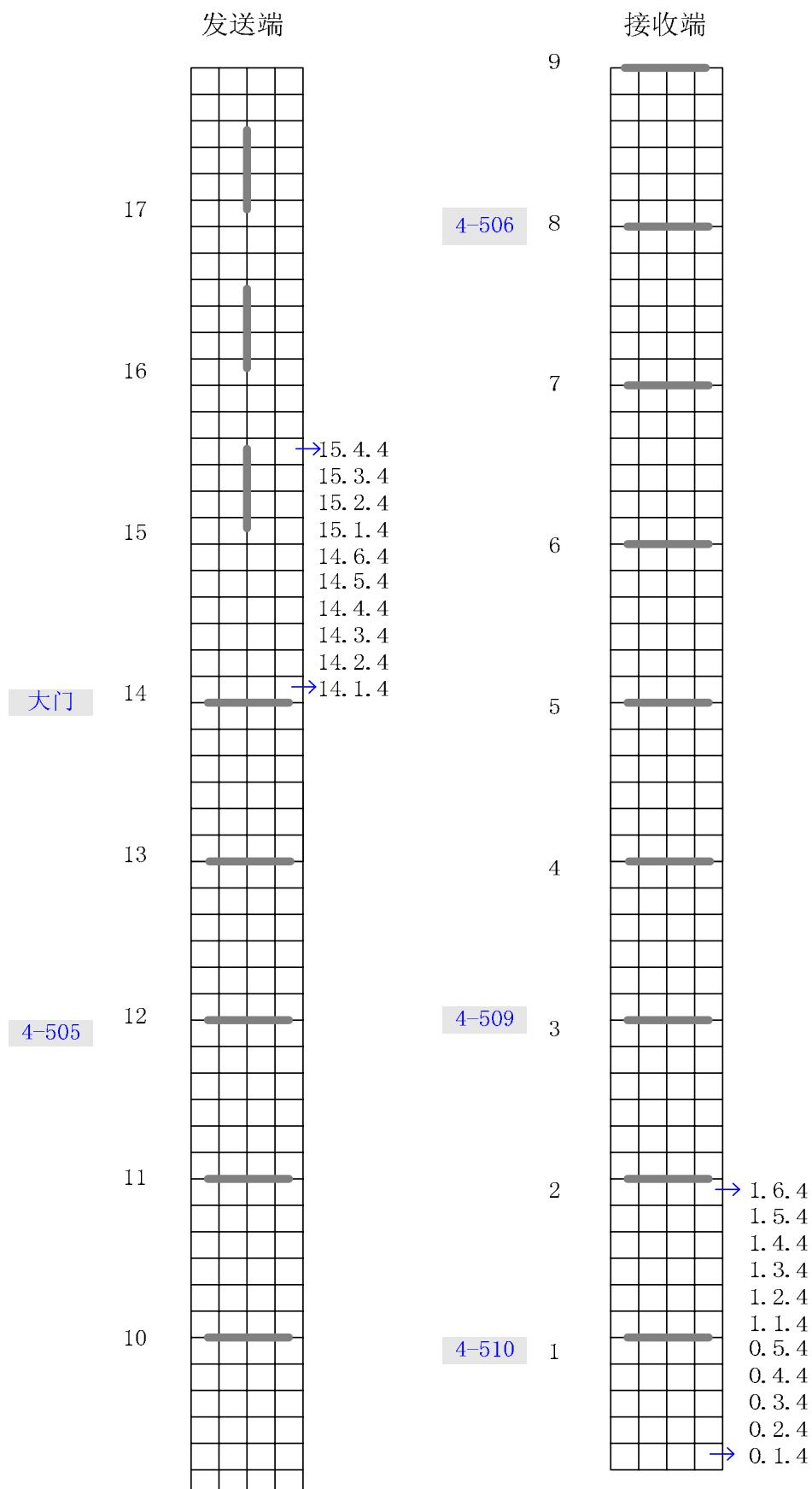


图 12 整个楼道地砖位置

对于室外环境，系统由 2 套 4\*4 的 MIMO 天线组成，两套调制到射频不同的频点上，占用的总带宽小于 100MHz。在一套 4\*4MIMO 系统中，收发的 4 根天线分别摆成边长为 0.7m 的正方形。一套 4\*4 的测试框图如图 13 所示。

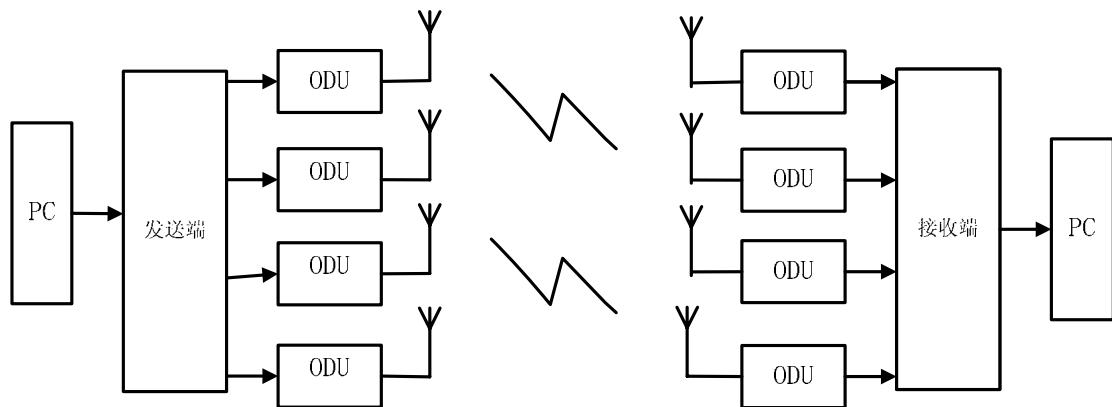


图 13 室外环境测试框图

图 14 是 GBPS 演示系统的照片。

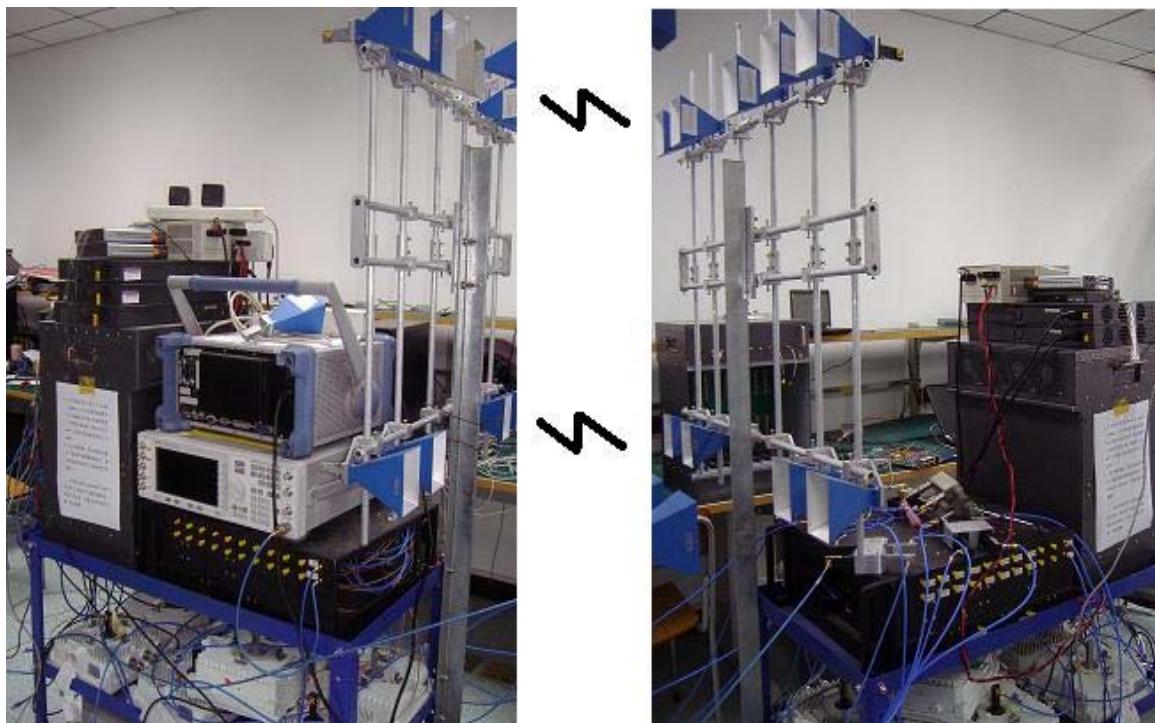


图 14 GBPS 演示系统

## 2.8 自测条目设计说明

为了便于自测的顺利进行以及测试数据的存储，针对不同的测试内容，我们制定如下的

测试条目命名规则。以一个实际条目为例：

CE\_1\_I\_1\_1

首先，测试条目第一个字段定义为测试条目说明，例如：上述命名条目中 CE 表示信道估计(Channel Estimation)算法性能测试，简称为 CE；随后的一个数字 1 表示 CE 测试中的第一种算法；第三个字段 I 表示室内测试，即 Indoor 的简称；随后第四个字段的 1 表示 Indoor 测试的第一种情况（通常为直接连接电桥，无多径）；最后一个字段为此条目下的进一步测试项目编号，比如这里的最后一个字段“1”就是信道估计算法 1 的室内电桥连接单径测试第 1 组结果。

进一步举一个天线选择测试条目的命名例子，如下：

AS\_1\_O\_(15.2.2-1.4.4)\_10

首先，测试条目第一个字段定义为 AS，表示天线选择(Antenna Selection)性能测试；随后的一个数字 1 表示 AS 测试中的第一种模式，即固定发端，遍历收端的 3 组 4 天线组合；第三个字段 O 表示室外测试，即 Outdoor 的简称；随后第四个字段的(15.2.2-1.4.4)表示 Outdoor 测试的收发位置标号；最后一个字段为此条目下的进一步测试项目编号，比如这里的 10 就是第 10 组结果，对应与选择其中一种收天线组合、以及某种频道选择组合下的结果。

上述简单的命名规则，将在后续的自测内容清单拟定以及自测结果一节中使用。

## 2.9 自测内容清单

这一小节，我们大致罗列本试验系统初步自测内容清单如下。

### 2.9.1 系统带宽测试(BW-BandWidth)

BW\_1\_I\_1\_1-5：发送端、室内单径、发送频谱 1-5(1-5 对应于发端单通道中心频率在 14.417-14.483GHz 范围内选取的 5 个频点)(具体中心频率设置见测试数据)；

BW\_2\_I\_1\_1-2：接收端、室内单径、接收频谱 1-2 (1-2 对应发送端的两个 RF 通道中心频率采用两组不同的频点组合)；

BW\_2\_O\_(X.X.X- Y.Y.Y)\_1: 发送端、室外位置(X.X.X- Y.Y.Y)、接收频谱 1;

## 2.9.2 信道估计性能测试(CE-ChannelEstimation)

由于试验系统的信道估计算法在接收端 PC 机内完成, 因此可以非常方便的进行各种不同信道估计与插值算法的性能测试对比。在我们的自测中将针对三种不同的内插算法, 包括: 线性内插的算法(CE\_1)、FFT 内插的算法(CE\_2)、加窗 FFT 内插算法(CE\_3)。拟测试的条目包括:

CE\_1/2/3\_I\_1\_1: 三种信道估计算法室内单径条目 1;

CE\_1/2/3\_O\_( X.X.X- Y.Y.Y)\_1: 三种信道估计算法室外位置( X.X.X- Y.Y.Y)条目 1;

## 2.9.3 信干噪比加权系数影响测试(SI-SInr)

本测试条目实际上是为了测试计算 64QAM 的解调软判决信息时, 各个子载波的信干噪比加权系数对译码性能乃至系统整体性能的影响。测试结果, 将记录在同一测试模式、同一位置下的信道特性及不同加权系数时的 MIMO 检测后信噪比 SNR 和误比特率 BER。解调软判决信干噪比加权系数可以设置为从小到大的几种固定值(分别为 50、75、100、160、400、1000), 也可以根据不同子载波实际不同 SINR 值来实时计算调整加权值。具体测试条目如下:

SI\_1\_I\_1\_1-6: 信干噪比固定加权值室内单径测试条目 1-6 (分别对应固定值 50、75、100、160、400、1000);

SI\_1\_O\_(X.X.X- Y.Y.Y)\_1-6: 信干噪比固定加权值室外位置(X.X.X- Y.Y.Y)测试条目 1-6 (分别对应固定值 50、75、100、160、400、1000);

SI\_2\_I\_1\_1: 信干噪比实时计算加权值室内单径测试条目 1;

SI\_2\_O\_(X.X.X- Y.Y.Y)\_1: 信干噪比实时计算加权值室外位置(X.X.X- Y.Y.Y)测试条目 1。

## 2.9.4 多径影响测试(MP-MultiPath)

本测试条目主要用来测试本试验系统对抗多径的极限性能。此部分测试主要针对室内电

桥连接方式进行，用人造多径的方法（见第 2.7 节对室内测试环境建立方法的描述）来测试系统最终的 MIMO 检测后信噪比 SNR 和误比特率 BER 作为输出。具体测试条目如下：

MP\_1\_I\_2\_1-7: 多径影响测试、第 2 径固定幅度时延变化、室内 2 径测试条目 1-7;

MP\_2\_I\_2\_1.1-1.7: 多径影响测试、第 2 径时延固定 1 幅度变化、室内 2 径测试条目 1-7;

MP\_2\_I\_2\_2.1-2.6: 多径影响测试、第 2 径时延固定 2 幅度变化、室内 2 径测试条目 1-6;

MP\_2\_I\_2\_3.1-3.7: 多径影响测试、第 2 径时延固定 3 幅度变化、室内 2 径测试条目 1-7;

MP\_3\_I\_2\_1.1-2.4: 多径影响测试、第 2 径固定时延 1 改变相位、室内 2 径测试条目 1.1-2.4;

MP\_3\_I\_2\_3.1-4.4: 多径影响测试、第 2 径固定时延 2 改变相位、室内 2 径测试条目 3.1-4.4;

MP\_3\_I\_2\_5.1-6.4: 多径影响测试、第 2 径固定时延 3 改变相位、室内 2 径测试条目 5.1-6.4;

## 2.9.5 传输距离测试(DT-Distance Test)

本测试条目为室外测试，主要为了验证试验系统在不同的传输距离（30m 至 50m 之间）均可实现高性能的 Gbps 业务传输，其中的测试举例有：50m、49.4m、47.6m、45.8m、40m、30m。具体测试条目如下：

DT\_1-6\_O\_(X.X.X.-Y.Y.Y.): 传输距离测试、距离 1-6、室外位置(X.X.X.-Y.Y.Y.)。

## 2.9.6 水平位置测试(HT-HorizontalTest)

本测试条目的目的，在于测试不同水平位置对系统性能的影响。测试位置示意图如下，发送端和接收端固定相距 50m，受楼道侧壁的橱窗遮挡影响，发端靠近实验室的测试点不能使用，所以测试时收端三个水平位置，发端两个水平位置，其中数字标号相同的点是对齐的。我们定义楼道中实验室房间一侧为楼道内侧，楼道中窗户一侧为楼道外侧，

具体测试条目如下：

HT\_10\_O\_(xxx-yyy): 水平位置测试、发收组合 10（还有 11/12/20/21/22，前者为发端水平位置编码号，后者为收端水平位置编号）室外测试位置(xxx-yyy)。

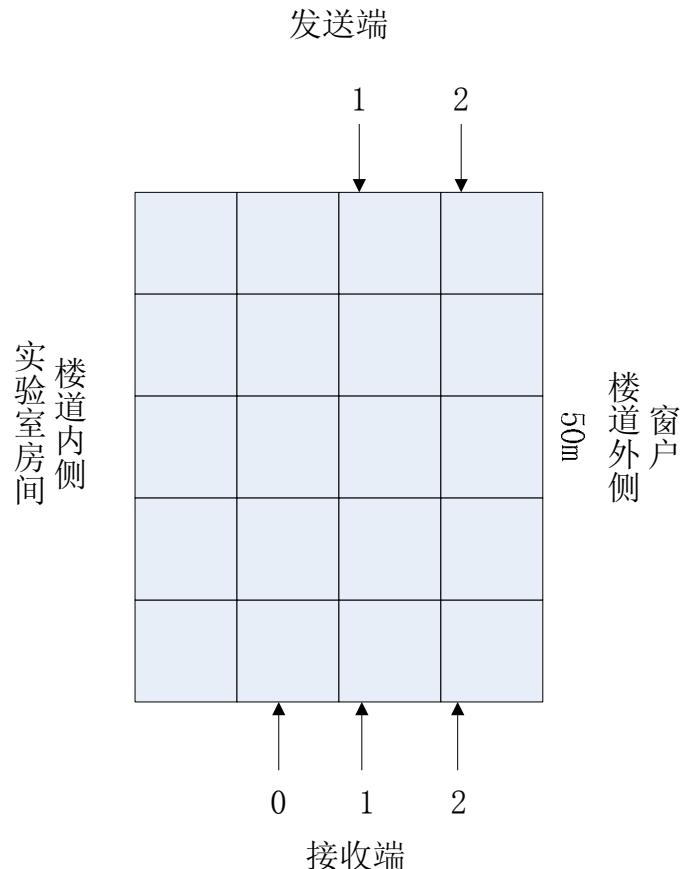


图 15 水平位置测试收发组合示意图

### 2.9.7 天线选择性能测试(AS-Antenna Selection)

本测试条目参考第 2.6 节的描述, 具体的测试条目如下:

- AS\_1\_O\_(xxx-yyy)\_1-12: 天线选择测试、发固定收遍历组合、室外测试位置 1(xxx-yyy)、  
频率通道与天线组合条目共 12 个;
- AS\_2\_O\_(xxx-yyy)\_1-4: 天线选择测试、发固定收遍历组合、室外测试位置 2(xxx-yyy)、  
频率通道组合条目共 4 个;
- AS\_3\_O\_(xxx-yyy)\_1-4: 天线选择测试、发固定收遍历组合、室外测试位置 3(xxx-yyy)、  
频率通道组合条目共 4 个;
- AS\_4\_O\_(xxx-yyy)\_1-4: 天线选择测试、发固定收遍历组合、室外测试位置 4(xxx-yyy)、  
频率通道组合条目共 4 个;

AS\_5\_O\_(xxx-yyy)\_1-4: 天线选择测试、单发 2 收、发天线组合遍历、室外测试位置 5 (xxx-yyy)、组合条目共 2 个。

## 2.9.8 天线发射角度影响测试(AA-Antenna Angle)

AA\_O\_(xxx-yyy) : 天线发射角度测试、固定传输距离, 室外测试, 在正对方向基础上发射天线阵列顺时针旋转 xxx 度, 接收天线阵列顺时针旋转 yyy 度。收发端天线旋转角度的定义如图 16所示。

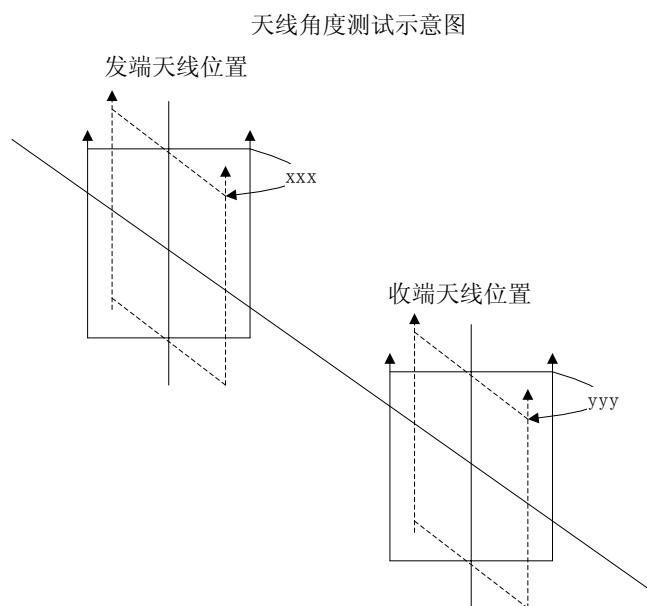


图 16 天线角度测试示意图

## 2.9.9 业务速率测试(SR-Service Rate)

SR\_1\_S: 室内单径、无反馈单向业务最大传输速率

SR\_1\_T: 室内单径、采用 tcp 协议、使用自行编写的传输程序、带反馈业务最大传输速率

SR\_1\_N: 室内单径、采用 tcp 协议、使用通用的网速测试程序 Netperf、带反馈业务最大传输速率。

SR\_1\_F: 室内单径、采用 ftp 协议自行编写的 C 程序、带反馈无失真业务最大传输速率

SR\_2\_T (xxx-yyy) : 室外位置 (xxx-yyy)、采用 tcp 协议、使用自行编写的传输程序、带反馈业务最大传输速率

SR\_2\_N (xxx-yyy) : 室外位置 (xxx-yyy)、采用 tcp 协议、使用通用的网速测试程序 Netperf、带反馈业务最大传输速率。

SR\_2\_F (xxx-yyy): 室外位置 (xxx-yyy)、采用 ftp 协议自行编写的 C 程序、带反馈无失真业务最大传输速率

根据上述拟定的测试条目，下一节将逐一给出相应的测试结果，并对结果进行对比总结分析。

## 3 自测结果及分析

### 3.1 系统带宽测试

#### ● 测试数据

为了便于对比观测，下列的带宽测试数据都是在频谱仪如下设置参数下完成的：

中心频率: 14.45GHz

分辨率: 100kHz

横轴单位格度量: 12MHz

BW\_1\_I\_1\_1

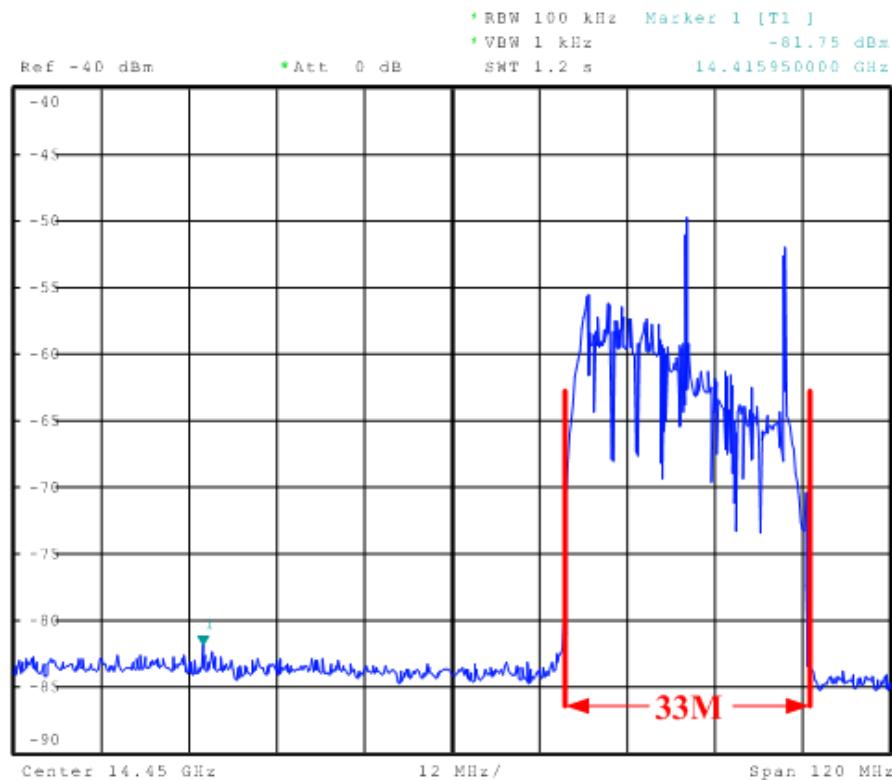


图 17 BW\_1\_I\_1\_1 (通道中心频率: 14.483GHz)

BW\_1\_I\_1\_2

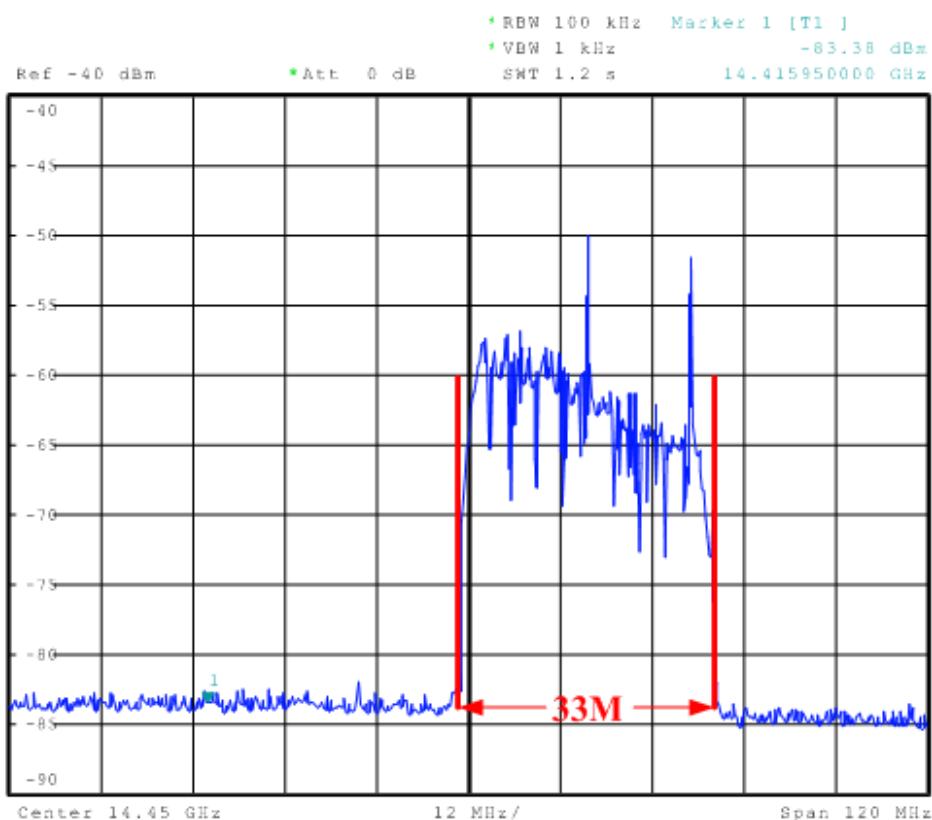


图 18 BW\_1\_I\_1\_2 (通道中心频率: 14.4665GHz)

BW\_1\_I\_1\_3

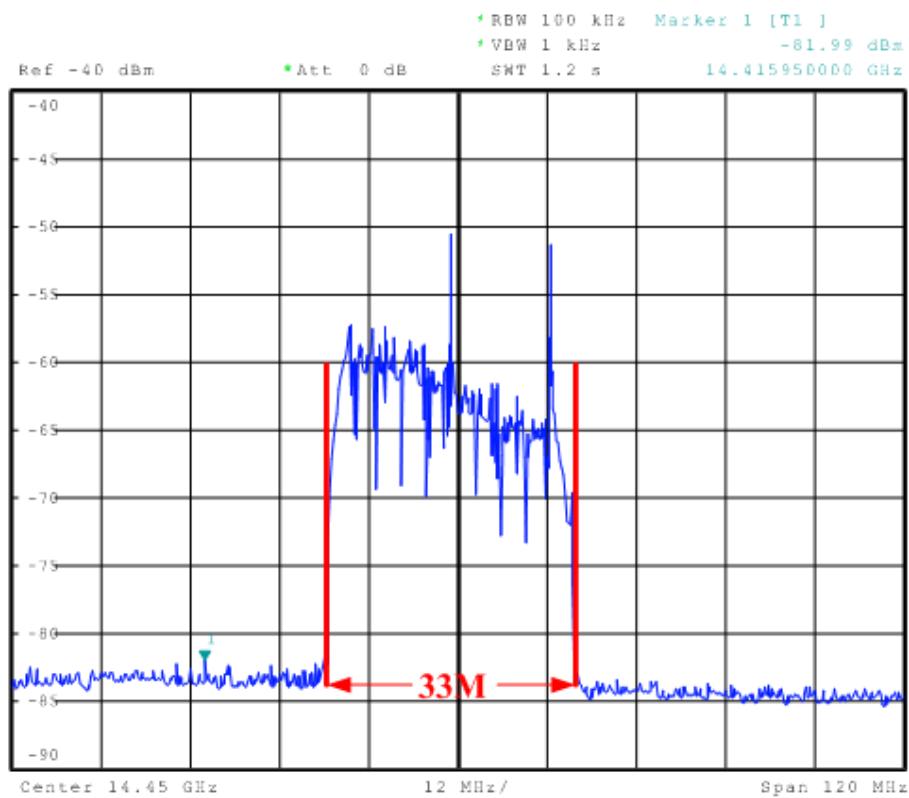


图 19 BW\_1\_I\_1\_3 (通道中心频率: 14.45GHz)

BW\_1\_I\_1\_4

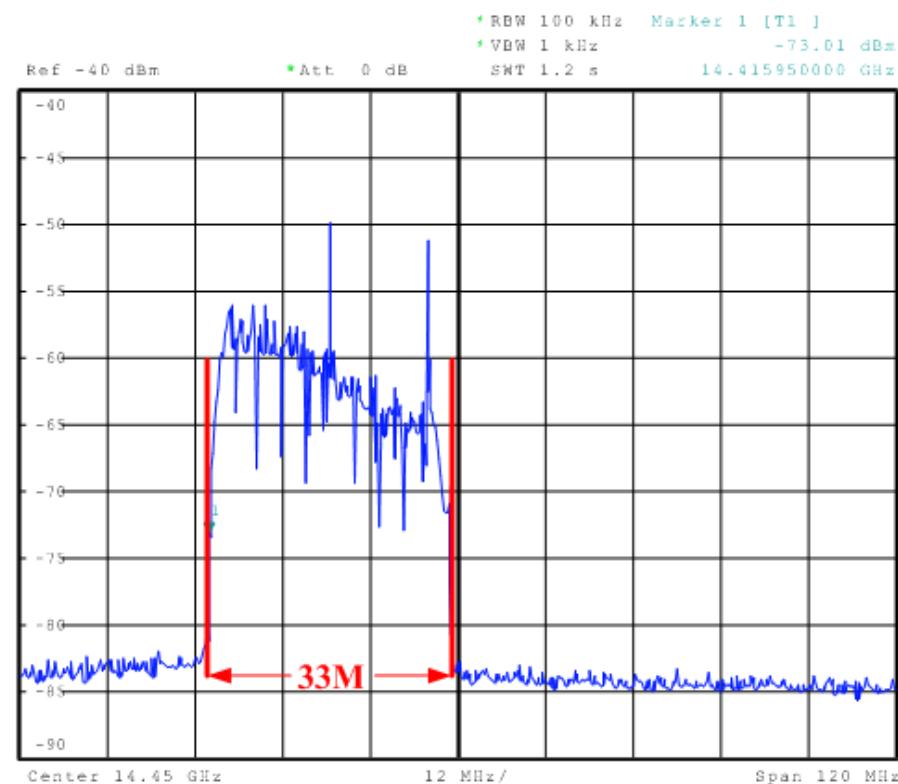


图 20 BW\_1\_I\_1\_4 (通道中心频率: 14.4435GHz)

BW\_1\_I\_1\_5

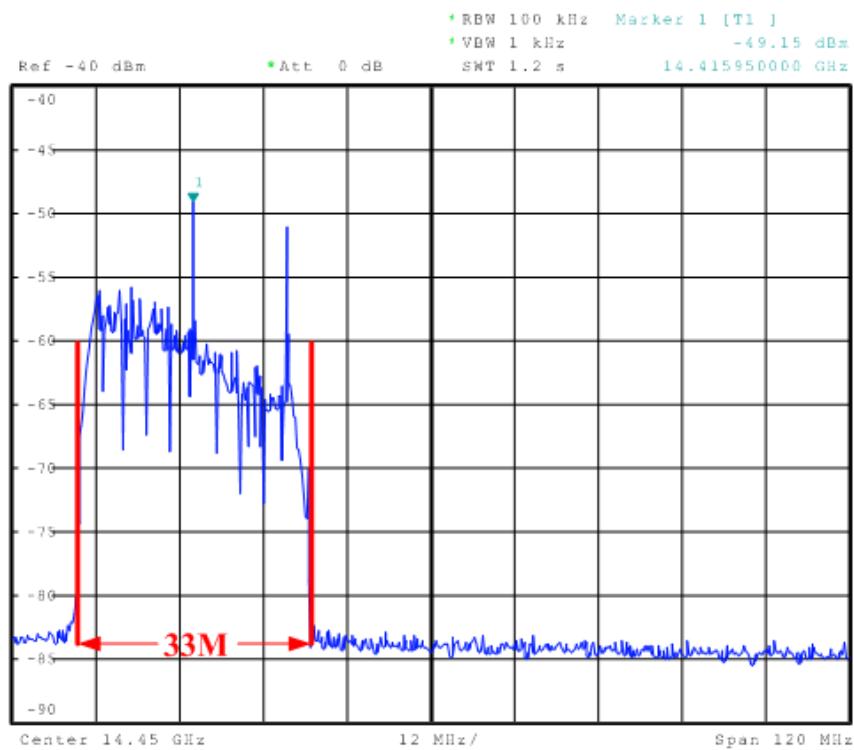


图 21 BW\_1\_I\_1\_5 (通道中心频率: 14.417GHz)

## BW\_2\_I\_1\_1

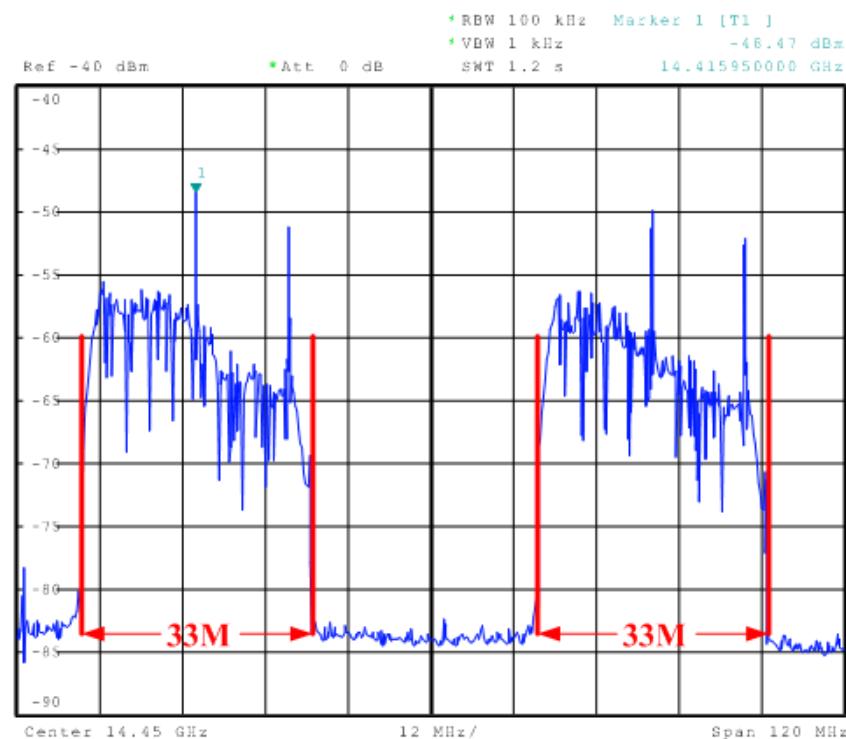


图 22 BW\_2\_I\_1\_1

(两个通道中心频率: 14.417GHz 与 14.483GHz)

## BW\_2\_I\_1\_2

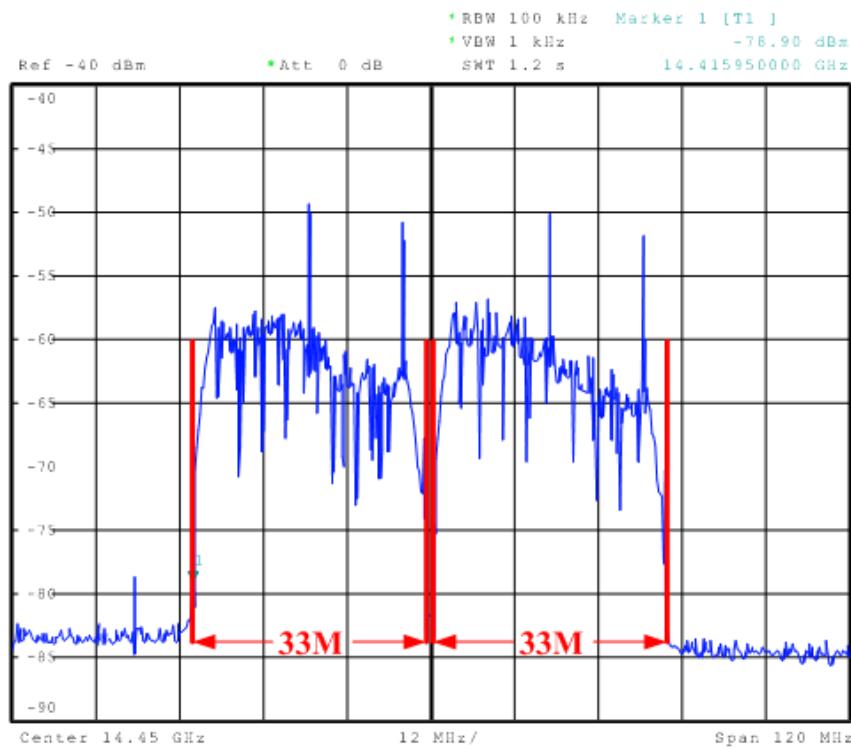


图 23 BW\_2\_I\_1\_2

(两个通道中心频率: 14.4335GHz 与 14.4665GHz)

BW\_2\_O\_(15.0.3\_0.4.3)\_1

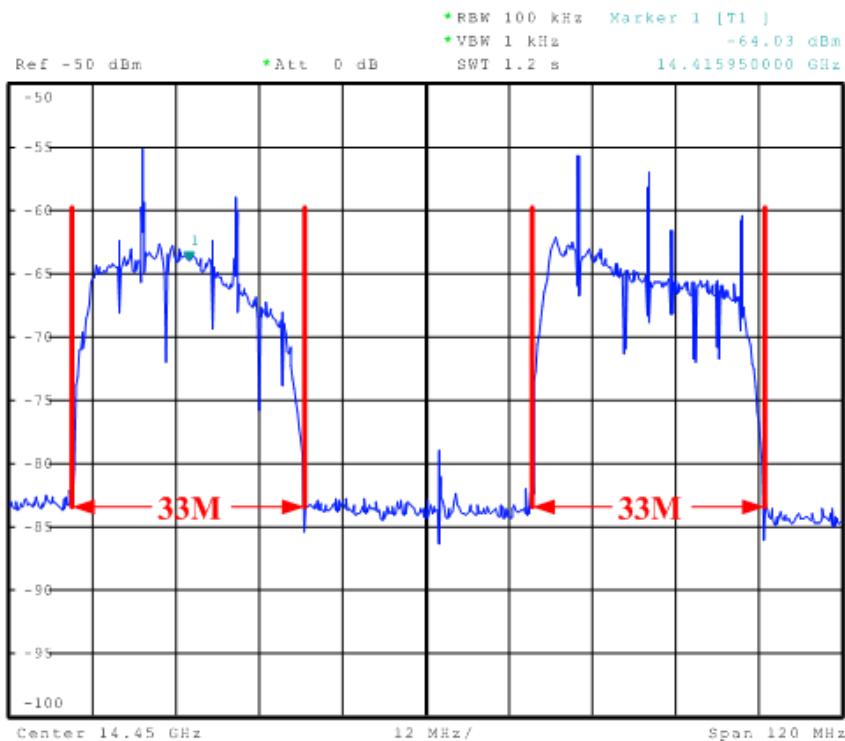


图 24 BW\_2\_O\_(15.0.3\_0.4.3)\_1

(两个通道中心频率: 14.417GHz 与 14.483GHz)

## ● 结果分析

上述所有测量表明单通道带宽为 33MHz。

BW\_1\_I\_1\_1-1~BW\_1\_I\_1\_1-5 表明发端单通道频谱可以在 100M 内移动, 即系统支持总带宽为 100M 的发射频谱。

BW\_2\_I\_1\_1, BW\_2\_I\_1\_2 表明显示了收端两组 4\*4 的频谱, 与发端 2 个发送频谱合成绩一致, 且总带宽落在 100M 以内。

BW\_2\_O\_(15.0.3\_0.4.3)\_1 显示了室外情况下两组 4\*4 的频谱结构。

## 3.2 信道估计性能测试

### ● 测试数据

表 2: 信道估计算法性能测试结果

自测条目	性能列表					备注	室内电桥连接
	多径数目	最大径时延 (ns)	多径幅度比	SNR (dB)	BER		
CE_1_I_1_1	1	0	0	27.96	0	线性内插	
CE_2_I_1_1	1	0	0	27.63	0	FFT 内插	
CE_3_I_1_1	1	0	0	27.40	0	0.1	FFT 加窗内插
CE_3_I_1_2	1	0	0	27.71	0	0.3	
CE_3_I_1_3	1	0	0	27.72	0	0.5	
CE_3_I_1_4	1	0	0	27.69	0	0.7	
CE_3_I_1_5	1	0	0	27.67	0	1.0	
CE_3_I_1_6	1	0	0	27.66	0	2.0	
CE_1_O_(14.5.3-0.5.3)_1	2	439	0.05	21.38	未测	线性内插	收发相距 50m
CE_2_O_(14.5.3-0.5.3)_1	2	439	0.05	26.67	0	FFT 内插	
CE_3_O_(14.5.3-0.5.3)_1	2	439	0.05	26.28	0	0.1	
CE_3_O_(14.5.3-0.5.3)_2	2	439	0.05	26.81	0	0.3	
CE_3_O_(14.5.3-0.5.3)_3	2	439	0.05	26.82	0	0.5	
CE_3_O_(14.5.3-0.5.3)_4	2	439	0.05	26.77	0	0.7	
CE_3_O_(14.5.3-0.5.3)_5	2	439	0.05	26.75	0	1.0	
CE_3_O_(14.5.3-0.5.3)_6	2	439	0.05	26.71	0	2.0	

0.5.3)_6									
CE_1_ O_( 12.1.3-0.5.3)_1	1	0	0	23.85	未测	线性内插		收发相距 40m	
CE_2_ O_( 12.1.3-0.5.3)_1	1	0	0	27.37	0	FFT 内插			
CE_3_ O_( 12.1.3-0.5.3)_1	1	0	0	26.68	0	0.1	FFT 加窗内插		
CE_3_ O_( 12.1.3-0.5.3)_2	1	0	0	27.45	0	0.3			
CE_3_ O_( 12.1.3-0.5.3)_3	1	0	0	27.47	0	0.5			
CE_3_ O_( 12.1.3-0.5.3)_4	1	0	0	27.44	0	0.7			
CE_3_ O_( 12.1.3-0.5.3)_5	1	0	0	27.42	0	1.0			
CE_3_ O_( 12.1.3-0.5.3)_6	1	0	0	27.42	0	2.0			
CE_1_ O_( 9.3.3-0.5.3)_1	2	439	0.2367	21.31	未测	线性内插		收发相距 30m	
CE_2_ O_( 9.3.3-0.5.3)_1	2	439	0.2367	26.63	0	FFT 内插			
CE_3_ O_( 9.3.3-0.5.3)_1	2	439	0.2367	25.84	0	0.1	FFT 加窗内插		
CE_3_ O_( 9.3.3-0.5.3)_2	2	439	0.2367	26.77	0	0.3			
CE_3_ O_( 9.3.3-0.5.3)_3	2	439	0.2367	26.78	0	0.5			
CE_3_ O_( 9.3.3-0.5.3)_4	2	439	0.2367	26.76	0	0.7			
CE_3_ O_( 9.3.3-0.5.3)_5	2	439	0.2367	26.75	0	1.0			
CE_3_ O_( 9.3.3-0.5.3)_6	2	439	0.2367	26.71	0	2.0			

## ● 结果分析

该项测试有两个目的，一是通过测试比较基于线性拟合的信道估计算法和基于 DFT 插值的信道估计算法的性能；二是在使用 DFT 插值的信道估计算法时，为了防止高频段频谱泄露，在进行变换域插值前对信道的频域响应做了加高斯窗的处理。该窗函数如下：

$$Win = \exp \left\{ -\left( k_i - \frac{1}{2} \right)^2 / 256^2 / mask\_sig \right\}, n = 0, \dots, 127$$

$$Win = \exp \left\{ -\left( k_i - 256 - \frac{1}{2} \right)^2 / 256^2 / mask\_sig \right\}, n = 128, \dots, 255$$

其中，参数 `mask_sig` 是可调的。该参数越小，则高频段进行插值时频谱泄露越少，但是高频端数据幅度也变小了，因此寻找一个合适的 `mask_sig` 取值是必要的。

首先看两种算法的性能对比如图 25 所示。

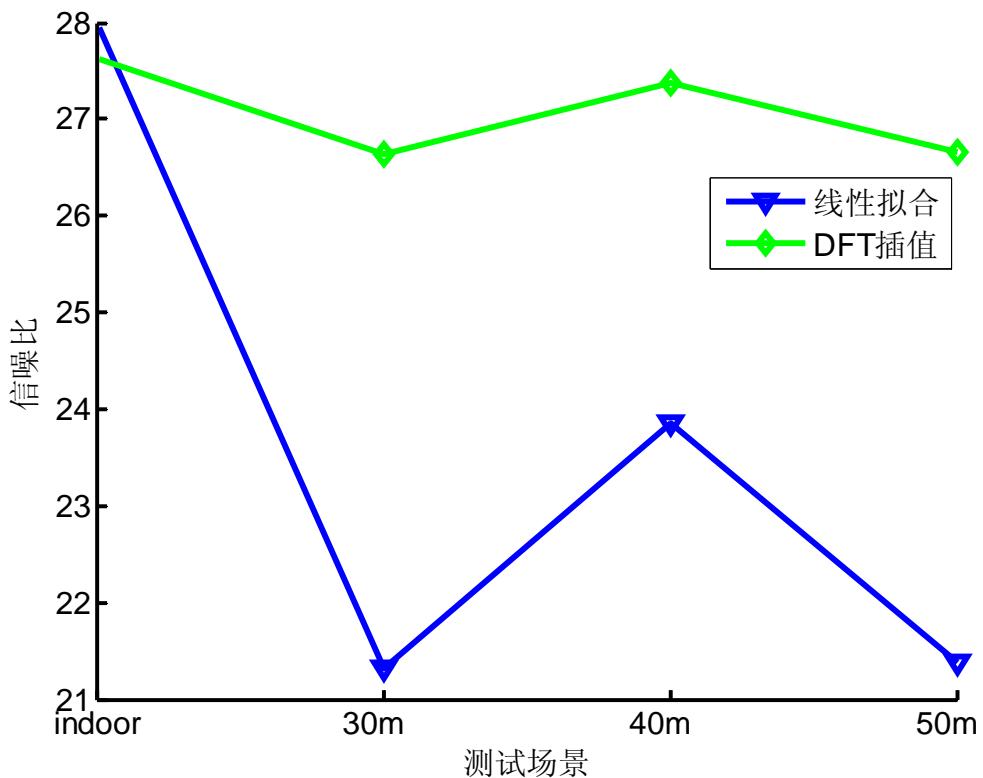


图 25 两种信道估计算法性能的对比

由上图可见，当采用室内电桥连接时，两种算法估计信道的性能接近。在室外，采用基于 DFT 插值的算法性能要明显优于基于线性拟合的算法。原因是基于 DFT 变换域插值的算法相当于 sinc 函数插值。在一个 OFDM 符号中，使用 50 个子载波插值得到所有 168 个数据载波，当信道的时域冲激响应是有限点的，就能够无失真的恢复出整个信道。室内收发之间采用电桥直连，信道比较简单，两种算法性能差别不大。室外由于存在多径，以及墙壁，玻璃，瓷砖对信号的吸收，衰减，发射，信道比较复杂，使用简单的线性拟合已难以反应不同频点信道的变化趋势。虽然实际信道的时域冲激响应不只 50 个采样点，但是主要能量集中在这些点内，使用 sinc 函数插值应该能够较准确的恢复出信道。另外，在基于 DFT 变换域插值的信道估计算法中，信道在经 IFFT 变换到时域后进行了包络滤波，在一定程度上抑制了噪声，这也是基于 DFT 的信道估计算法性能要优于基于线性拟合算法的一个重要原因。

再看对高斯窗函数的参数 `mask_sig` 的选取。

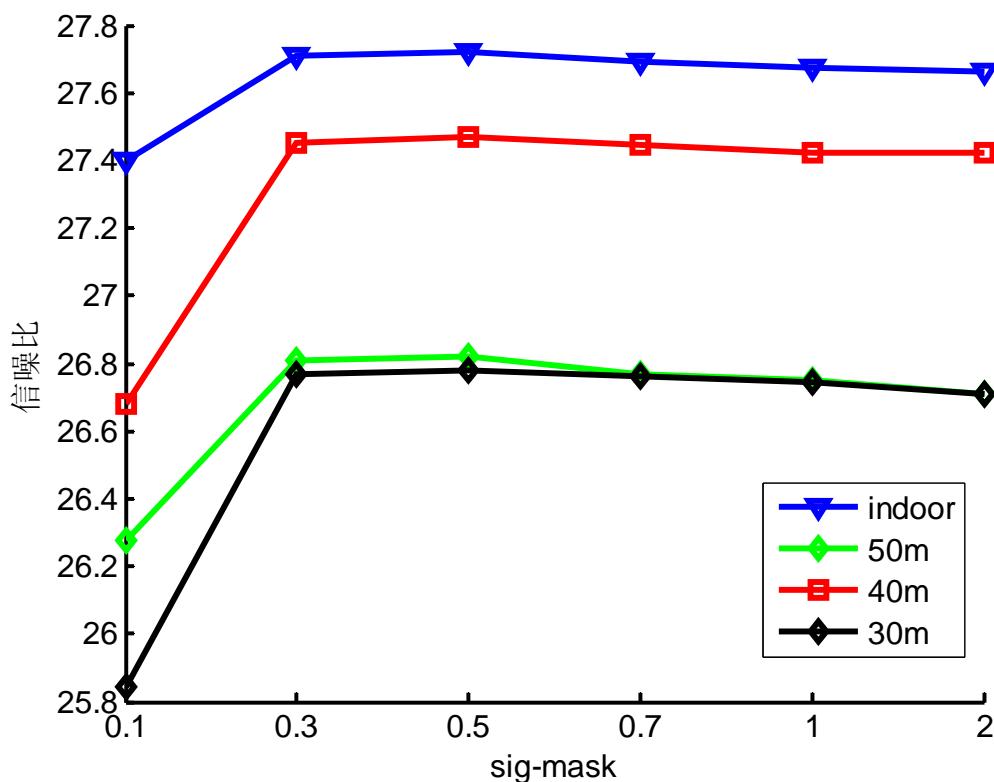


图 26 Sig-mask 的取值对信道估计性能的影响

由上图可见，无论在室内还是室外的各种测试场景，当 sig\_mask 取值为 0.5 时，兼顾了频谱泄露和信号幅度两方面因素，性能表现最好。

### 3.3 信干比加权系数影响测试

#### ● 测试数据

SI\_1\_I\_1\_1-6  
 SI\_1\_O\_(X.X.X- Y.Y.Y)\_1-6  
 0.5.3 14.5.3  
 12.1.3  
 9.3.3

表 3: 信干比加权系数性能测试结果

自测条目	性能列表		备注	
	SNR(dB)	BER	距离	多径情况
SI_1_I_1_1	28	3e-5		单径
SI_1_I_1_2		5e-7		
SI_1_I_1_3		0		
SI_1_I_1_4		0		

SI_1_I_1_5		0		
SI_1_I_1_6		0		
SI_2_I_1_1		0		
SI_1_O_(14.5.3_0.5.3)_1	26	5e-4	50m	两径, 第二径时延 439ns, 相对幅度比 0.05
SI_1_O_(14.5.3_0.5.3)_2		3e-5		
SI_1_O_(14.5.3_0.5.3)_3		6e-6		
SI_1_O_(14.5.3_0.5.3)_4		0		
SI_1_O_(14.5.3_0.5.3)_5		0		
SI_1_O_(14.5.3_0.5.3)_6		0		
SI_2_O_(14.5.3_0.5.3)_1		0		
SI_1_O_(12.1.3_0.5.3)_1	28	1e-4	40m	单径
SI_1_O_(12.1.3_0.5.3)_2		2e-6		
SI_1_O_(12.1.3_0.5.3)_3		0		
SI_1_O_(12.1.3_0.5.3)_4		0		
SI_1_O_(12.1.3_0.5.3)_5		0		
SI_1_O_(12.1.3_0.5.3)_6		0		
SI_2_O_(12.1.3_0.5.3)_1		0		
SI_1_O_(9.3.3_0.5.3)_1	26.5	5e-4	30m	两径, 第二径时延 439ns, 相对幅度比 0.2367
SI_1_O_(9.3.3_0.5.3)_2		1e-5		
SI_1_O_(9.3.3_0.5.3)_3		7e-6		
SI_1_O_(9.3.3_0.5.3)_4		0		
SI_1_O_(9.3.3_0.5.3)_5		0		
SI_1_O_(9.3.3_0.5.3)_6		0		
SI_2_O_(9.3.3_0.5.3)_1		0		

## ● 结果分析

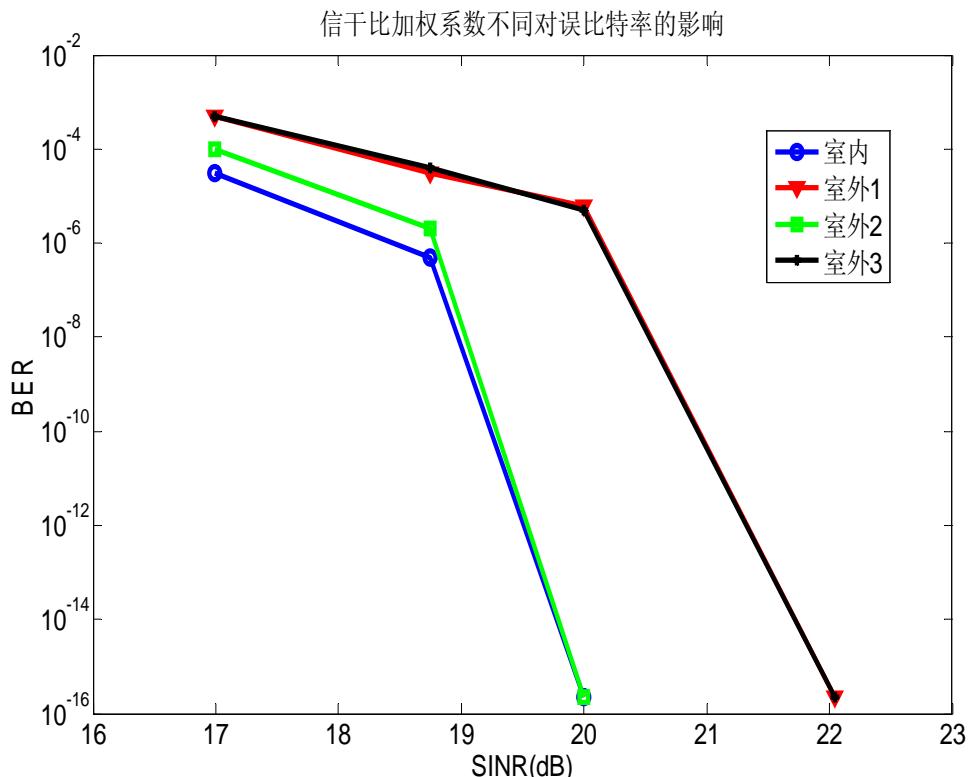


图 27 信干比加权系数对误比特率的影响

测试数据包括四种场景：室内，室外 1 (50m)，室外 2 (40m)，室外 3 (30m)。如上图，信干比加权系数对译码性能有直接影响。在测试的 4 种场景中，加权系数计算参考 SINR 小于 160 时，设置的加权 SINR 越大，误比特率越小，当 SINR 大于一定值时，就基本无误码。分析原因是因为，系统 SNR 都比较高，星座图较清晰，因此对于解调得到的星座点的象限位置要充分信任，这体现为 SINR 加权系数值需要设置得比较高，才能充分发挥 LDPC 译码的性能。

为了适应实际信道的变化情况，区分信噪比不同的子载波，系统其余测试条目均采用了实时计算的方法。

### 3.4 多径影响测试

#### ● 测试数据

表 4：多径影响性能测试结果

自测条目	性能列表		备注	
	SNR(dB)	BER	时延值(ns)	
MP_1_I_2_1	28	0	122	2 径信道， 第 2 径相对幅度 为 0.125， 改变时延值
MP_1_I_2_2	25	0	366	
MP_1_I_2_3	23.6	0	610	
MP_1_I_2_4	21.3	0	684	
MP_1_I_2_5	19.8	3e-8	708	
MP_1_I_2_6	19.5	2e-6	732	
MP_1_I_2_7	16	0.03	757	
			幅度 (主径为 1)	
MP_2_I_2_1.1	24.7	0	0.1871	2 径固定时延为 244ns，在 CP 以 内
MP_2_I_2_1.2	24.3	0	0.2496	
MP_2_I_2_1.3	23	0	0.3122	
MP_2_I_2_1.4	20.9	0	0.3434	
MP_2_I_2_1.5	20.7	3e-8	0.3552	
MP_2_I_2_1.6	20.7	4e-6	0.3669	
MP_2_I_2_1.7	20.3	2e-5	0.3747	
MP_2_I_2_2.1	25	0	0.125	2 径固定时延为 366ns，在 CP 边 缘
MP_2_I_2_2.2	21	0	0.2574	
MP_2_I_2_2.3	20.8	5e-8	0.2614	
MP_2_I_2_2.4	20.5	5e-7	0.2653	
MP_2_I_2_2.5	20.3	1e-4	0.2809	
MP_2_I_2_2.6	19.8	0.004	0.3043	
MP_2_I_2_2.7	19	0.02	0.3122	
MP_2_I_2_3.1	23.6	0	0.125	2 径固定时延为 610ns，在 CP 之 外
MP_2_I_2_3.2	21.7	0	0.1558	
MP_2_I_2_3.3	21	5e-10	1.1715	
MP_2_I_2_3.4	20.8	1e-7	0.1793	

MP_2_I_2_3.5	20.7	1e-4	00.1871	
MP_2_I_2_3.6	18.3	0.05	0.2496	
			旋转角度	
MP_3_I_2_1.1	28.2	0	0	2 径固定时延 122ns, 在 CP 之内, MP_3_I_2_1.* 固定 2 径幅度 0.1, MP_3_I_2_2.* 固定 2 径幅度 0.2
MP_3_I_2_1.2	28.2	0	90	
MP_3_I_2_1.3	28.2	0	180	
MP_3_I_2_1.4	28.4	0	270	
MP_3_I_2_2.1	27.5	0	0	
MP_3_I_2_2.2	28	0	90	
MP_3_I_2_2.3	28	0	180	
MP_3_I_2_2.4	28.3	0	270	
MP_3_I_2_3.1	28.2	0	0	2 径固定时延 244ns, 在 CP 之内, MP_3_I_2_3.* 固定 2 径幅度 0.1, MP_3_I_2_4.* 固定 2 径幅度 0.2
MP_3_I_2_3.2	28.2	0	90	
MP_3_I_2_3.3	28.2	0	180	
MP_3_I_2_3.4	28.4	0	270	
MP_3_I_2_4.1	27.5	0	0	
MP_3_I_2_4.2	28	0	90	
MP_3_I_2_4.3	28	0	180	
MP_3_I_2_4.4	28.3	0	270	
MP_3_I_2_5.1	24.7	0	0	2 径固定时延 488ns, 在 CP 之外, MP_3_I_2_5.* 固定 2 径幅度 0.1, MP_3_I_2_6.* 固定 2 径幅度 0.2
MP_3_I_2_5.2	24.5	0	90	
MP_3_I_2_5.3	24.3	0	180	
MP_3_I_2_5.4	24.6	0	270	
MP_3_I_2_6.1	20.9	2e-8	0	
MP_3_I_2_6.2	20.7	1e-7	90	
MP_3_I_2_6.3	20.5	6e-5	180	
MP_3_I_2_6.4	20.7	2e-8	270	

## ● 结果分析

### 1、多径时延扩展对系统性能的影响

当多径幅度固定为主径的 0.125 时, 多径时延的影响如图 28 所示。

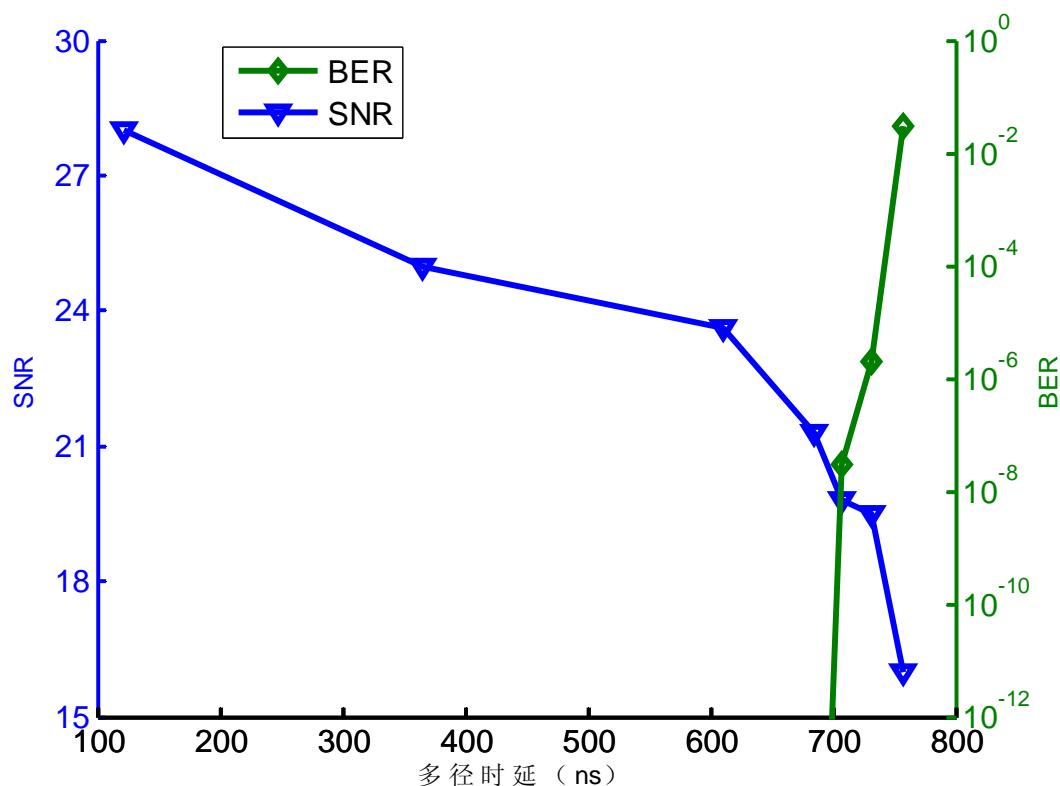


图 28 多径时延对系统性能的影响图示

由上图可以看出，随着多径相对主径延时的增加，数据解调的信噪比会逐渐下降，当多径延时在 CP 以外时，由于 ISI 的逐渐增加，信噪比的下降尤为明显。同时，当信噪比下降到 21dB 以下时，噪声的干扰已经超过了 LDPC 译码器的极限，会出现误码。

## 2、多径幅度对系统性能的影响

考虑到多径在 CP 之内和在 CP 之外可能对系统的影响不同，因此分在 CP 之内、边缘、之外 3 种情况来测试。

当多径相对主径延时为 244ns (在 CP 保护间隔内)，多径影响如图 29 所示。

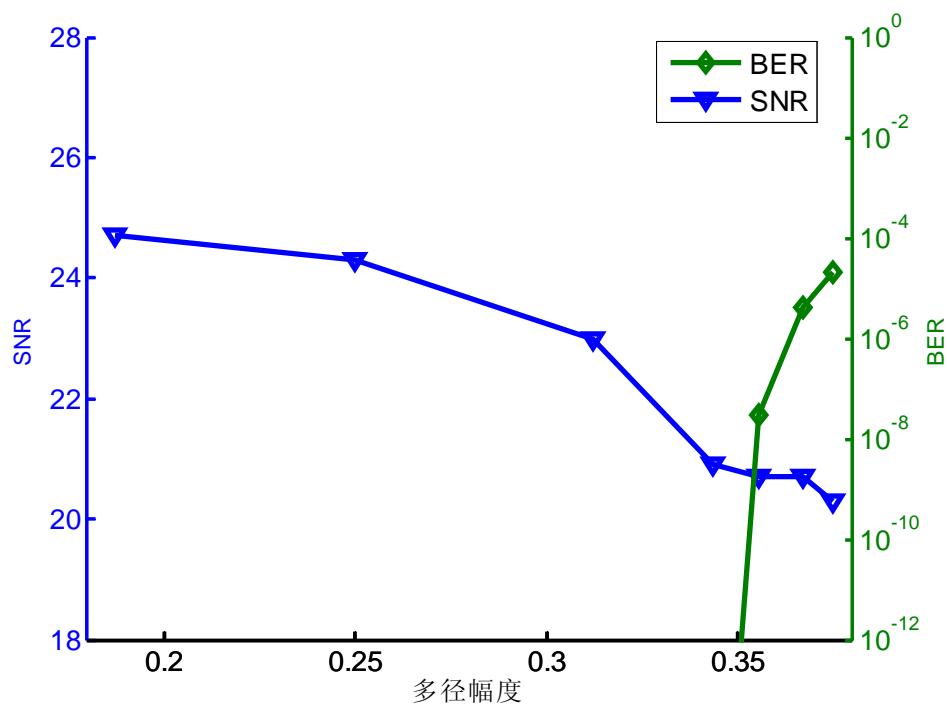


图 29 多径幅度对系统的影响 (延时 244ns)

当多径相对主径延时为 366ns (在 CP 保护间隔边缘), 多径影响如图 30 所示。

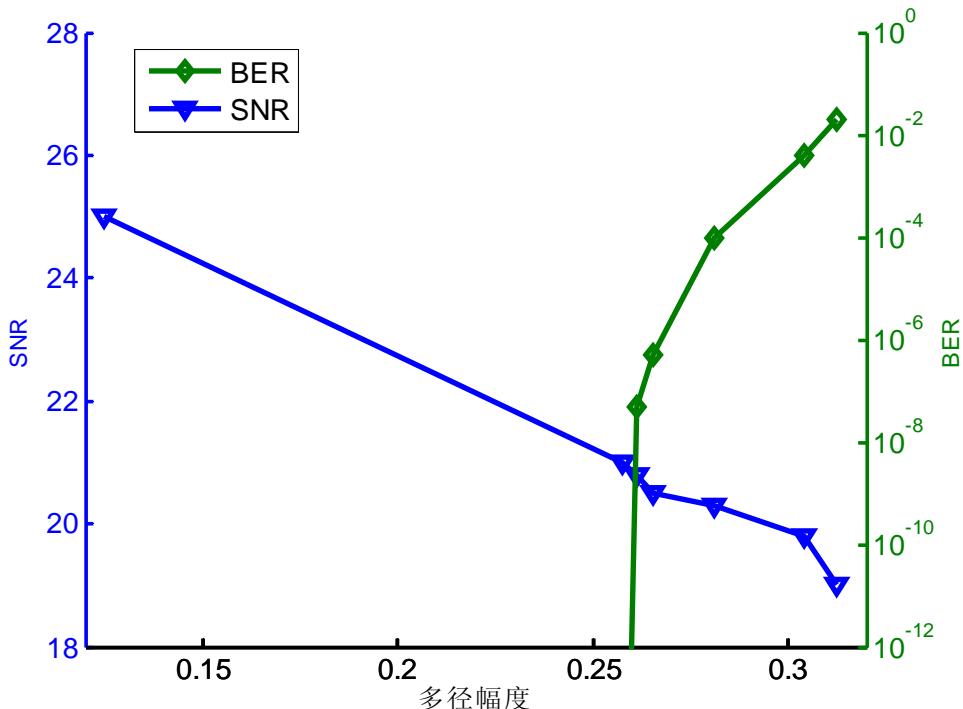


图 30 多径幅度对系统的影响 (延时 366ns)

当多径相对主径延时为 610ns (超过 CP 保护间隔长度), 多径影响如图 31所示。

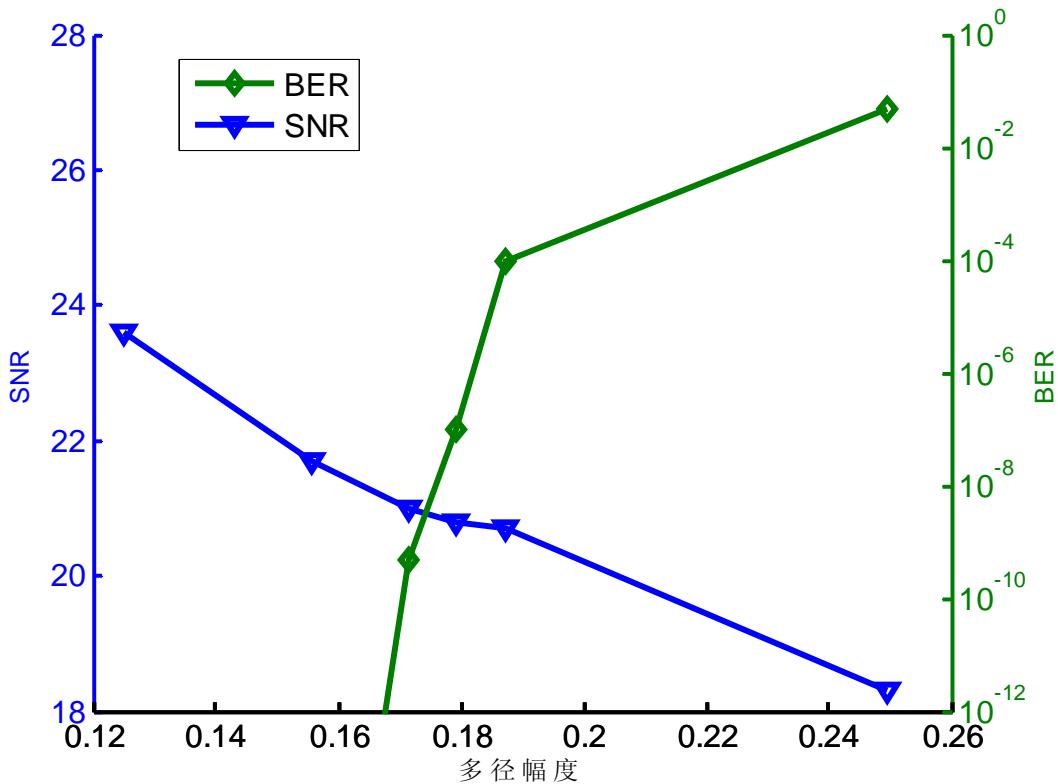


图 31 多径幅度对系统的影响 (延时 610ns)

从以上几幅图上可以看到, 随着多径幅度的增大, 数据解调的信噪比逐渐降低, 当超过 LDPC 译码器的译码极限时, 会出现误码。当多径在 CP 之内时, 之所以会对系统的信噪比产生影响, 是因为存在多径时, 信道在频域会出现选择性衰落, 则在衰落比较大的频点, 信噪比较低, 当多径幅度增大到一定程度, 会使信道的频域响应在某些频点接近零, 这时会出现误码。

### 3、多径相对主径有一个相位旋转对系统的影响。

从测试数据可以看到, 无论多径相对主径的幅度如何, 延时如何, 多径相对主径有一个相位旋转对系统的影响都是比较小的。原因是多径存在相位旋转, 从信道的频响上来看, 相当于衰落的位置不同, 但选择性衰落的幅度和起伏包络的个数是不变的, 因此多径相对主径有一个相位旋转时对系统的影响是很小的。

### 3.5 传输距离测试

#### ● 测试数据

表 5: 传输距离测试结果

自测条目	性能列表					备注
	多径数目	最大径时延 (ns)	幅度比	SNR	BER	
DT_1_O_(14.5.3-0.5.3)	2	439	0.05	26.5	0.	测试数据均用第一套4*4的天线测试得到
DT_1_O_(15.0.3-0.4.3)	1	0	0	26.5	0	
DT_1_O_(15.4.3-0.4.3)	2	415	0.09	26.5	0	
DT_1_O_(15.1.3-1.3.3)	2	391	0.07	23.4	5e-4	
DT_1_O_(15.1.3-1.6.3)	1	0	0	27	0	
DT_1_O_(14.5.3-1.6.3)	2	391	0.05	23	2e-5	
DT_1_O_(12.1.3-0.5.3)	1	0	0	26	0	
DT_1_O_(9.3.3-0.5.3)	2	439	0.2367	26	0	

#### ● 结果分析

由测试数据可以看出, 由于楼道内是一个封闭的测试环境, 在 CP 之外存在多径, 且四周会有突出墙壁、门等遮挡物, 信号在传输过程中存在玻璃、瓷砖、墙壁等不同的反射、吸收介质, 因此在楼道内的不同距离、水平方向上不同位置, 信道的变化很大, 这种变化不仅仅体现在对信号幅度的衰落上, 更体现在对不同频点的信号不同的吸收、反射上。系统收发摆在不同的位置, 传输信道的变化很大。正是这种复杂的信道环境, 我们可以看到无线通信的质量与系统发送端和接收端摆放的位置有关, 但是这种关系不是由简单的距离可以刻画的。

### 3.6 水平位置测试

#### ● 测试数据

表 6: 水平位置测试结果

自测条目	性能列表		备注	
	SNR(dB)	BER	多径时延(ns)	第二径相对幅度比
HT_10_O_(14.5.3_0.5.2)	23.8	5e-6	415	0.0573
HT_11_O_(14.5.3_0.5.3)	26	0	0	0
HT_12_O_(14.5.3_0.5.4)	22	1e-4	342	0.0554
HT_20_O_(14.5.4_0.5.2)	24	0	391	0.0840
HT_21_O_(14.5.4_0.5.3)	26	0	366	0.0552

HT_22_O_(14.5.4_0.5.4)	20	5e-4	415	0.0953
------------------------	----	------	-----	--------

表 7: 水平位置测试子带平均条件数结果

自测条目	各子带平均条件数							
	0	1	2	3	4	5	6	7
HT_10_O_14.5.3_0.5.2	2.143	2.163	2.211	2.160	2.230	2.399	2.707	2.313
HT_11_O_14.5.3_0.5.3	2.942	2.788	2.828	2.902	2.699	3.147	3.325	3.529
HT_12_O_14.5.3_0.5.4	4.524	4.453	4.373	4.820	4.698	4.584	4.690	4.284
HT_20_O_14.5.4_0.5.2	4.457	4.642	4.898	5.854	4.883	4.902	4.935	4.900
HT_21_O_14.5.4_0.5.3	2.673	2.942	3.098	3.245	3.195	3.250	3.288	2.8511
HT_22_O_14.5.4_0.5.4	3.785	3.774	3.843	4.076	5.528	6.047	5.399	4.488

## ● 结果分析

固定发端位置, 水平移动收端位置。即 HT\_10\_O\_(14.5.3\_0.5.2), HT\_11\_O\_(14.5.3\_0.5.3), HT\_12\_O\_(14.5.3\_0.5.4) 一组, HT\_20\_O\_(14.5.4\_0.5.2), HT\_21\_O\_(14.5.4\_0.5.3) , HT\_22\_O\_(14.5.4\_0.5.4) 一组, 可以看到收端在位置 1 即楼道中央处信噪比最高且无误码, 靠楼道内侧信噪比下降 2dB, 出现少量误码。靠楼道外侧信噪比下降 4~6dB, 出现大量误码。这说明收端在楼道中央及楼道内侧时信道状况较好, 在楼道外侧信道状况比较差。

固定收端位置, 水平移动发端位置, SNR 和 BER 并无明显区别, 这说明系统对发端水平位置不敏感。

## 3.7 天线选择性能测试

### ● 测试数据

首先我们再次给出在每个空间固定位置上的 4 个测试点的收发硬件与频率组合方式, 如下所示:

测试模式	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
收发硬件套数	1	2	1	2	1	2	1	2
发端频率选择	f1	f2	f1	f2	f2	f1	f2	f1
收端频率选择	f1	f2	f2	f1	f1	f2	f2	f1

具体测试结果见下列两表。

表 8: 天线选择测试结果 1 (SNR 和 BER)

自测条目	性能列表				备注
	第一套 SNR(dB)	第二套 SNR(dB)	第一套 BER	第二套 BER	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_1	26.5	27	0	0	收端选择第一组与 第二组天线 遍历四种频率组合
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_2	25	24.5	0	1e-5	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_3	24	24	4e-6	7e-7	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_4	27	26	0	0	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_5	26	27	0	0	收端选择第一组与 第三组天线 遍历四种频率组合
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_6	25.5	25	0	6e-7	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_7	23	23	5e-5	2e-5	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_8	27	26	0	0	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_9	26.5	25.5	0	0	收端选择第二组与 第三组天线 遍历四种频率组合
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_10	25.5	26.5	0	0	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_11	23	25.5	1e-4	2e-6	
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_12	24.5	24	0	7e-7	
AS_2_O_(13.2.3-0.4.3)_1	26.5	26	0	2e-6	收端选择第一组与 第二组天线 遍历四种频率组合
AS_2_O_(13.2.3-0.4.3)_2	24	24.5	2e-6	1e-5	
AS_2_O_(13.2.3-0.4.3)_3	25.5	24	0	1e-5	
AS_2_O_(13.2.3-0.4.3)_4	25	26.5	3e-6	0	
AS_3_O_(11.4.3-0.4.3)_1	26.5	26	0	0	收端选择第一组与 第二组天线 遍历四种频率组合
AS_3_O_(11.4.3-0.4.3)_2	24.5	26	6e-6	0	
AS_3_O_(11.4.3-0.4.3)_3	26	25.5	0	6e-6	
AS_3_O_(11.4.3-0.4.3)_4	27	26	0	0	
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_1	26.5	26.5	0	0	收端选择第一组与 第二组天线 遍历四种频率组合
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_2	24.5	26	2e-6	0	
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_3	25.5	25	0	4e-6	
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_4	27	25	0	0	
AS_5_O_(15.0.3-0.4.3)_1	27	27	0	0	单发 2 收 收天线组合遍历
AS_5_O_(15.0.3-0.4.3)_2	25.5	24.5	0	0	

表 9 天线选择测试结果 2 (MIMO 信道条件数)

自测条目		各子带平均条件数							AVG	
		0	1	2	3	4	5	6		
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_1	第一套	3.46 68	3.39 56	3.27 02	3.08 66	4.17 74	4.18 98	4.11 26	3.63 44	3.66 67
	第二套	1.56 33	1.64 14	1.64 49	1.68 12	1.88 31	1.93 28	1.85 72	1.66 59	1.73 37
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_2	第一套	2.82 71	2.61 93	2.66 61	2.73 46	2.65 14	2.31 43	2.42 53	2.50 44	2.59 28
	第二套	5.68 34	5.32 00	5.81 97	5.37 54	7.34 15	6.30 06	6.39 56	6.63 29	6.10 86
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_3	第一套	4.15 12	3.82 49	3.64 60	3.33 08	4.13 71	5.68 26	5.73 93	5.56 38	4.50 94
	第二套	5.03 03	4.01 17	4.39 33	4.12 75	5.06 92	4.75 50	4.84 05	5.92 29	4.76 88
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_4	第一套	2.68 80	2.85 36	2.58 00	2.54 01	3.16 96	3.09 12	2.79 00	2.59 24	2.78 81
	第二套	2.47 54	2.84 94	2.71 41	2.52 61	3.08 15	3.04 58	3.01 14	3.02 17	2.84 07
AS_1_O_(15.0.3-0.4.3)_5	第一套	2.74 61	2.45 59	2.42 54	2.53 42	3.24 05	3.25 33	3.32 94	2.89 33	2.85 98
	第二套	1.68	1.66	1.66	1.64	2.29	2.36	2.13	1.85	1.91

		15	00	65	97	06	48	80	90	38
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_6	第一套	3.90 21	3.53 73	3.51 78	3.25 18	3.59 16	3.95 97	4.18 44	3.84 69	3.72 39
	第二套	5.32 08	5.07 96	5.37 65	5.26 61	6.91 84	6.13 59	6.00 41	6.21 56	5.78 96
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_7	第一套	4.86 24	5.27 27	4.70 17	4.83 38	6.95 30	7.04 15	6.77 31	6.01 88	5.80 71
	第二套	5.36 59	4.21 78	4.60 11	4.27 36	5.30 80	4.93 66	5.00 84	6.19 09	4.98 78
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_8	第一套	1.72 81	1.58 29	1.51 43	1.55 00	2.08 02	2.13 40	1.99 62	1.86 57	1.80 64
	第二套	2.53 78	2.73 39	2.61 35	2.41 38	3.24 94	3.29 34	3.23 88	3.13 05	2.90 14
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_9	第一套	3.17 83	2.68 78	2.30 36	2.57 15	3.28 22	3.65 53	3.81 36	3.26 52	3.09 47
	第二套	2.51 86	2.50 68	2.69 43	3.23 56	2.69 06	2.52 67	2.60 73	2.29 05	2.63 38
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_10	第一套	4.09 45	3.75 58	3.81 57	3.46 04	3.88 80	4.07 19	4.29 00	3.95 57	3.91 65
	第二套	3.57 20	3.52 79	3.44 66	3.22 37	4.85 11	4.57 33	4.32 00	3.72 43	3.90 48
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_11	第一套	5.13 95	5.33 27	4.61 81	4.68 78	7.28 11	7.75 70	7.05 36	6.23 24	6.01 28
	第二套	2.66 63	2.68 90	2.66 15	2.54 51	3.53 44	3.25 94	2.84 01	2.68 30	2.85 99
AS_1_O_(15.0.3 -0.4.3)_12	第一套	1.96 99	1.89 01	1.80 61	1.63 55	2.15 71	2.23 57	2.20 39	2.10 19	2.00 00
	第二套	4.24 23	4.26 92	4.14 55	3.60 26	4.90 95	6.29 14	6.93 57	6.19 85	5.07 43
AS_2_O_(13.2.3 -0.4.3)_1	第一套	2.59 75	2.61 98	2.49 61	2.43 84	3.15 61	2.95 53	2.84 12	2.55 34	2.70 72
	第二套	2.33 38	2.57 58	2.70 14	2.89 86	2.55 90	2.79 09	2.67 36	2.42 82	2.62 02
AS_2_O_(13.2.3 -0.4.3)_2	第一套	5.02 71	4.84 31	4.98 06	6.04 81	4.95 28	6.65 32	5.80 25	5.03 52	5.41 78
	第二套	4.19 68	3.97 68	4.03 61	4.41 35	4.10 18	4.16 46	4.45 52	4.35 22	4.21 21
AS_2_O_(13.2.3 -0.4.3)_3	第一套	3.36 42	3.64 47	3.51 12	3.58 68	3.55 27	3.33 26	3.69 55	3.57 86	3.53 33
	第二套	4.10 52	3.97 43	3.85 48	3.66 98	4.66 83	5.59 48	4.88 07	4.88 51	4.45 41
AS_2_O_(13.2.3 -0.4.3)_4	第一套	3.79 93	3.32 52	3.26 04	3.54 50	3.98 72	3.86 29	3.97 20	3.44 76	3.64 99
	第二套	1.74 20	1.87 72	1.92 59	1.90 84	2.20 78	2.27 67	2.19 82	1.89 35	2.00 37
AS_3_O_(11.4.3 -0.4.3)_1	第一套	2.28 92	2.42 50	2.36 81	2.40 33	2.42 83	2.28 15	2.51 86	2.42 25	2.39 21
	第二套	3.77 39	3.69 34	3.57 41	3.98 00	4.28 62	4.76 28	4.53 46	4.21 54	4.10 25
AS_3_O_(11.4.3 -0.4.3)_2	第一套	5.05 98	5.44 89	4.29 78	4.92 13	4.63 86	5.20 10	4.80 94	4.46 21	4.85 49
	第二套	2.93 92	3.03 29	3.02 25	2.87 86	3.02 68	3.34 03	3.47 46	3.16 64	3.11 02
AS_3_O_(11.4.3 -0.4.3)_3	第一套	3.41 87	3.59 00	3.45 45	3.23 78	3.14 70	3.00 18	3.25 44	3.39 37	3.31 22
	第二套	3.60 3.60	3.38 3.22	3.22 3.26	3.26 3.42	3.42 3.87	3.87 3.85	3.85 3.57	3.57 3.52	3.52

		80	18	74	26	09	73	07	09	49
AS_3_O_(11.4.3-0.4.3)_4	第一套	2.66 73	2.64 73	2.64 82	2.85 73	3.27 00	3.08 22	2.90 24	2.65 97	2.84 18
	第二套	3.24 18	3.36 32	3.87 52	3.54 60	4.30 85	4.56 06	4.55 65	3.89 68	3.91 86
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_1	第一套	2.97 93	2.59 66	2.95 97	2.92 81	3.24 52	3.22 55	3.02 47	2.98 95	2.99 36
	第二套	2.39 06	2.47 83	2.35 17	2.36 72	2.41 47	2.56 29	2.54 79	2.49 45	2.45 10
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_2	第一套	4.25 81	4.28 56	4.18 13	4.00 56	3.23 76	3.36 28	3.34 07	3.68 97	3.79 52
	第二套	4.16 38	4.12 89	3.99 77	4.48 85	4.57 87	4.76 09	4.54 75	4.48 65	4.39 41
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_3	第一套	2.96 36	2.86 13	2.77 55	2.85 79	3.16 99	3.44 04	3.40 74	3.26 64	3.09 28
	第二套	5.37 15	5.47 93	5.73 66	5.47 36	5.41 66	5.30 00	5.48 10	5.35 95	5.45 23
AS_4_O_(15.4.3-0.4.3)_4	第一套	2.71 89	2.69 17	2.81 09	2.78 79	3.00 00	2.89 70	2.85 68	2.81 23	2.82 19
	第二套	2.88 89	2.78 68	2.70 77	2.75 42	3.56 09	3.60 31	3.58 22	3.32 51	3.15 11
AS_5_O_(15.0.3-0.4.3)_1	第一套	2.24 96	2.20 79	2.16 64	2.09 62	2.64 28	2.38 56	2.33 93	2.21 81	2.28 82
	第二套	1.56 33	1.64 14	1.64 49	1.68 12	1.88 31	1.93 28	1.85 72	1.66 59	1.73 37
AS_5_O_(15.0.3-0.4.3)_2	第一套	4.22 27	4.25 01	4.11 60	3.96 58	3.21 83	3.36 46	3.36 14	3.63 52	3.76 68
	第二套	4.13 40	4.18 95	4.04 56	4.49 20	4.60 64	4.71 19	4.49 47	4.50 41	4.39 73

注：AVG 是指对所有子带条件数的平均。

## ● 结果分析

通过分析 AS\_1\_O\_(15.0.3-0.4.3)\_1, AS\_1\_O\_(15.0.3-0.4.3)\_2 两组实验数据，可以发现改变天线和频率组合会影响系统性能。

## 3.8 天线发射角度影响测试

### ● 测试数据

表 10：天线发射角度影响测试结果

自测条目	性能列表		备注
	SNR(dB)	BER	
AA_O_(0-0)	27	0	AA_O_(0-0)在位置 14.5.3_0.5.3 处，其余测试条目都在此位置附近做角度旋转
AA_O_(0-30)	27	0	
AA_O_(0-60)	26	0	
AA_O_(0-90)	<15	>1e-2	

AA_O_(0-120)	<15	>1e-2
AA_O_(0-180)	24	0
AA_O_(0-300)	26	0
AA_O_(0-330)	27	0
AA_O_(30-0)	23	3e-6
AA_O_(30-30)	23	1e-6
AA_O_(30-60)	<15	>1e-2
AA_O_(30-330)	22	1e-3
AA_O_(180-0)	23.5	2e-4
AA_O_(300-0)	23.4	5e-4
AA_O_(330-0)	23	8e-4

## ● 结果分析

由结果可见，收发天线夹角对系统信噪比的影响显著，收发天线夹角的改变直接影响视距信道的信道条件，因此，当收发天线夹角为 180 度，即收发天线正对时，系统信噪比最高。随着收发天线夹角的减小，系统的信噪比逐渐下降，当收发天线夹角为 90 度时，收天线方向与主径方向垂直，此时系统信噪比最小。

当收发天线夹角小于 90 度，此时对于收天线，主径为反射径，当收天线的方向正对反射径时，即天线夹角为 0 度时，系统获得最高的信噪比。

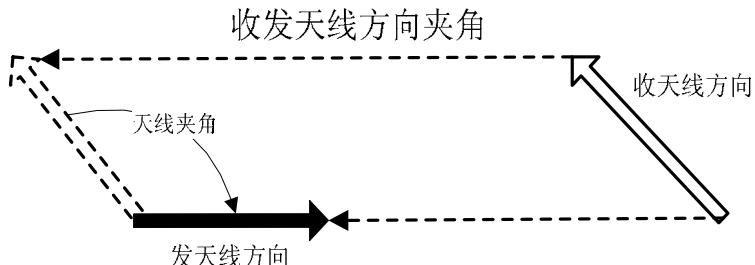


图 32 收发天线方向夹角示意图

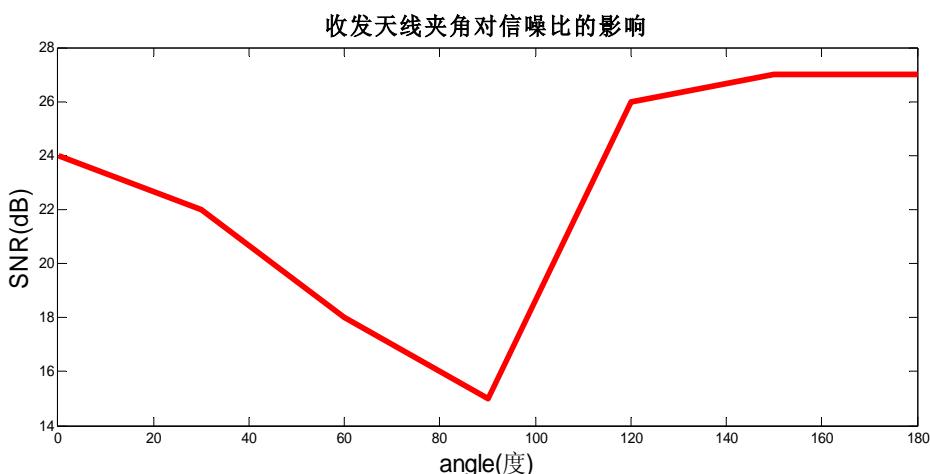


图 33 收发天线夹角对信噪比的影响

## 3.9 业务速率测试

### ● 测试数据

表 11: 业务速率测试结果

自测条目	性能列表				备注
	第一套 SNR(db)	第二套 SNR(db)	Rate (Mbps)	对应的物理 层速率	
SR_1_S	28	28	890	1.11-1.27G	室内移相器相连, 测 试各种业务最高传 输速率
SR_1_T			800	1-1.14G	
SR_1_N			865	1.08-1.23G	
SR_1_F			670	0.84-0.96G	
SR_2_T (15.0.3-0.4.3)	26	27	780	0.98-1.11G	室外视距 51 米, 测 试各种业务最高传 输速率
SR_2_N (15.0.3-0.4.3)			850	1.06-1.21G	
SR_3_F (15.0.3-0.4.3)			580	0.73-0.83G	

实时视频流传输演示效果如图 34所示。

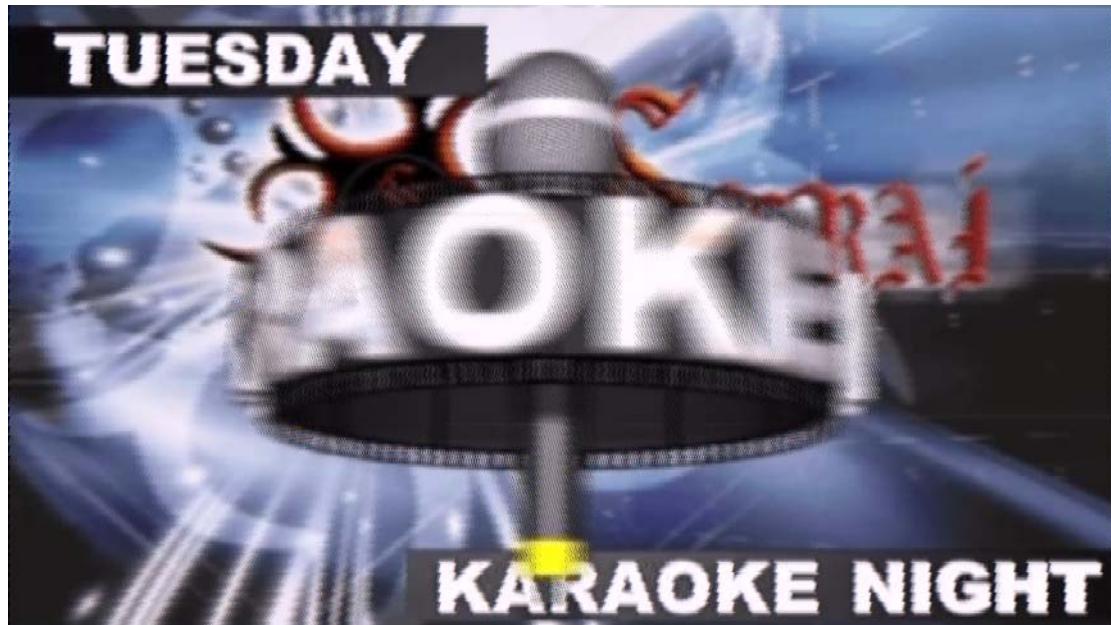


图 34 实时视频流传输

左侧屏幕为业务传输发送端, 右侧屏幕为业务传输接收端, 视频流存在一定的传输延迟, 这与系统传输延时以及视频流播放软件的缓冲策略有关。

3-D 视频业务传输试验结果则如下所述。我们的 Gbps 系统的传输带宽可以完美支持

3D 视频的远程实时播放。作为验证，我们基于 Gbps 试验系统实现了播放速率达到 600Mbits 的 8 视角立体视频的实时播放。在实验中，传输层采用 tcp 协议，链路层向下采用 Gbit 系统实现，平均传输速率可以达到 700Mbits，可以保证立体视频流畅稳定的实时播放。下图是立体视频实时播放的演示效果：





## ● 结果分析

由于采用 pc 作为业务源, pc 文件读写的速度限制很大程度上会影响业务的传输速率。另外, pc 以太网口的业务数据具有突发性, 而 Gbps 系统在 FPGA 上的缓冲区是有限的, 当数据突发速度较快时, 有可能无法进入缓冲区, 这也限制了 pc 业务速率无法达到理论上的极值。

无反馈的单向业务传输有相对更高的传输速率, 但无法保证无差错传输。相对的, 各种有反馈的双向业务能保证无差错传输, 但当传输出现误码或传输延迟较大时, 需要业务发送端重传, 因此传输速率相对较低, 且室外传输速率略低于室内传输速率。

比较几种双向传输业务, netperf 用随机数据测试系统通路的极限传输速率, 不涉及文件的读写操作, 因此具有相对最高的传输速率; 通用 ftp 软件的业务传输中有文件读写操作, 因此传输速率受到限制; 而自己编写的 tcp 传输程序虽然也涉及文件读写, 但是优化了文件读写策略, 获得比通用 ftp 软件更高的业务传输速率。

[\[返回\]](#)

## 4 试验系统自测结论

通过本测试与分析报告所设计的试验, 充分验证了该 Gbps 试验系统达到了以下技术指标:

- 1) 信号带宽: 33MHz\*2=66MHz, 小于 100MHz;
- 2) 传输距离: >=51.6m;
- 3) 峰值传输数据率: 最高业务数据率值不低于 850Mbps, 相当于物理层数据率 1.06-1.21Gbps, 大于 1Gbps;
- 4) RF 通道数: 8 个;

以上指标完全达到了《课题任务合同书》所要求的主要技术指标, 并且对天线选择、载波聚合、Gbps 宽带业务演示等关键技术进行了充分验证。

[\[返回\]](#)

## Change History

Version	Date	Mender	Content
V0	2009-7-14	Xiang Chen	Created
V1	2009-7-14	Xiang Chen Xiuju Zhang	Modified
V2	2009-7-15	Xiang Chen	Modified
V2009-12-12	2009-12-12	Xiang Chen Chuan Liu	Finalized