

# WLAN MIMO 技术 技术白皮书

文档版本 01  
发布日期 2012-09-15

华为技术有限公司





**版权所有 © 华为技术有限公司 2012。 保留一切权利。**

非经本公司书面许可，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本文档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

**商标声明**

HUAWEI 和其他华为商标均为华为技术有限公司的商标。

本文档提及的其他所有商标或注册商标，由各自的所有人拥有。

**注意**

您购买的产品、服务或特性等应受华为公司商业合同和条款的约束，本文档中描述的全部或部分产品、服务或特性可能不在您的购买或使用范围之内。除非合同另有约定，华为公司对本文档内容不做任何明示或默示的声明或保证。

由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。除非另有约定，本文档仅作为使用指导，本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何明示或暗示的担保。

**华为技术有限公司**

地址：                  深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼                  邮编：518129

网址：                  <http://www.huawei.com>

客户服务邮箱：      [support@huawei.com](mailto:support@huawei.com)

客户服务电话：      4008302118



---

# 目 录

---

<b>1 介绍</b> .....	<b>1</b>
1.1 定义(Definition).....	1
1.2 目的(Purpose).....	1
<b>2 原理描述</b> .....	<b>2</b>
2.1 MIMO 技术.....	2
2.1.1 历史.....	2
2.1.2 MIMO 技术原理.....	2
2.2 空间分集.....	4
2.2.1 接收分集.....	4
2.2.2 发射分集.....	4
2.2.3 MISO 与 SIMO 增益分析.....	6
2.3 TxBF.....	6
2.3.2 TxBF 基本原理.....	7
<b>3 总结</b> .....	<b>9</b>

# 1 介绍

## 1.1 定义(Definition)

随着 MIMO（多输入多输出）技术的引入，802.11n 将 WLAN 带入了全面的多天线时代。

MIMO（多输入多输出）技术是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线，信号通过发射端和接收端，从而改善每个用户的服务质量（误码率或数据速率）。

## 1.2 目的(Purpose)

传统的 WLAN 系统中，AP 和无线用户通常只是各用一根天线，采用 802.11a/b/g 协议传输，在信号的传输速率上最多达到 54Mb/s，很难再提高其速率。而随着 WLAN 技术的普及和广泛应用，用户要求大幅度提高无线通信速率的愿望越来越强烈。

802.11n 协议中采用了 MIMO（多输入多输出）多天线技术，WLAN 的信号传输可以很容易的突破单天线所造成的速率瓶颈，满足用户对带宽和信号质量的要求。

# 2 原理描述

## 2.1 MIMO 技术

### 2.1.1 历史

MIMO（多入多出）技术是无线移动通信领域智能天线技术的重大突破。该技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率，是新一代移动通信系统必须采用的关键技术。

那么 MIMO 技术究竟是怎样的？

实际上多进多出（MIMO）技术由来已久，早在 1908 年马可尼就提出用它来抗衰落。在上世纪 70 年代有人提出将多入多出技术用于通信系统，但是对无线移动通信系统多入多出技术产生巨大推动的奠基工作则是 90 年代由 AT&TBell 实验室学者完成的。1995 年 Teladar 给出了在衰落情况下的 MIMO 容量；1996 年 Foshinia 给出了一种多入多出处理算法——对角-贝尔实验室分层空时(D-BLAST)算法；1998 年 Tarokh 等讨论了用于多入多出的空时码；1998 年 Wolniansky 等人采用垂直-贝尔实验室分层空时(V-BLAST)算法建立了一个 MIMO 实验系统，在室内试验中达到了 20bit/s/Hz 以上的频谱利用率，这一频谱利用率在普通系统中极难实现。这些工作受到各国学者的极大注意，并使得多入多出的研究工作得到了迅速发展。

### 2.1.2 MIMO 技术原理

在传统的 WLAN 通信系统中，AP 端和用户端各采用一根天线，这种天线系统也称为单输入和单输出（SISO, Single Input Single Output）系统。对于这样的系统，C.E.Shannon 提出了一个信道容量计算的公式：

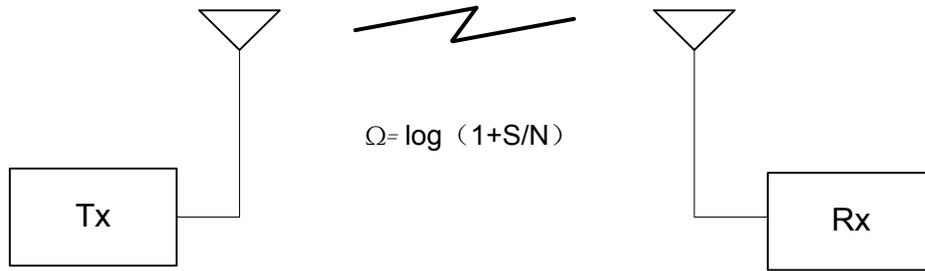
$$C=B*\log_2 (1+S/N)$$

其中，B 代表信道带宽，S/N 代表接收端的信噪比，用 B 归一化后，得到带宽利用率：

$$\Omega=\log_2 (1+S/N)$$

它确定了在有噪声的信道中，进行可靠通信的上限速率。以后的技术无论使用怎样的调制方法和信道编码方法，只能一点点地接近它，却无法超越它。

图2-1 SISO 无线信道系统图

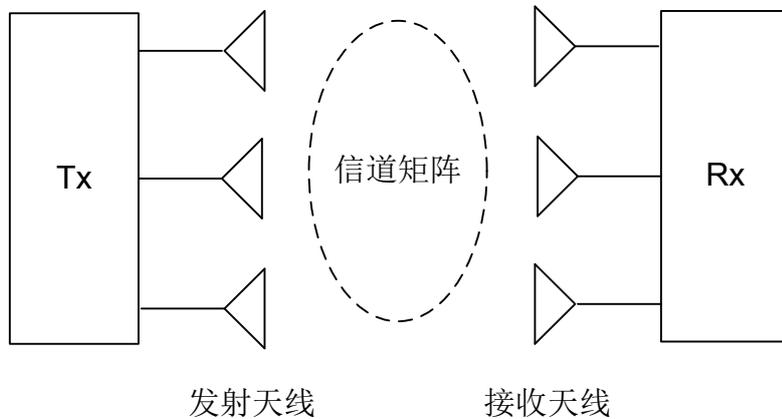


在发射端和接收端安置多个天线，如果天线之间相隔足够远，那么可以认为各天线是互不相关的，从而在发射端或接收端之间构造了多条相互独立的通道。而信息论证明：如果用于描述具有  $N$  副发射天线与  $M$  副接收天线的无线链路的  $M \times N$  信道矩阵的元素是完全独立衰落的，则该系统的容量随最小天线数目线性增长，即：

$$C \approx \min(M, N) * \log_2 (1 + S/N)$$

式中表明，对于理想的随机信道，如果天线的空口成本不受限制，MIMO 系统就能提供无限大的容量。

图2-2 MIMO 无线信道系统图



具有  $N$  副发射天线和  $M$  副接收天线的 MIMO 系统，如上图，发射数据流被分离为  $N$  路子数据流，在调制与射频前端处理以后以相同的频率分别从  $N$  副天线同时发射出去。经无线信道的散射传播，这些并行子流从不同路径到达接收机，由  $M$  副接收天线接收，接收机对各接收信号联合处理，恢复出原始的数据流。

相比于传统天线系统，MIMO 无线通信系统借助于多径传播，并建立空间并行传输通道，采用空时编码方案实现发射分集与接收分集，获得相对常规无线通信系统明显的复用增益与分集增益，其有效的并行数据通道显著提升了信道容量。这使 MIMO 技术成为不断涌现出的无线通信技术中最具有潜力的技术，开辟了实现无线通信系统高速传输的重要途径。

对于 MIMO 无线通信技术，需要说明的是：

发送端并行的  $N$  条子数据流同时发送，各发射信号占用同一频带，因而并没有占用额外带宽，但提高了有效带宽；可以保持发送端总功率恒定，实现最优功率分配，而不增大系统的发射功率。

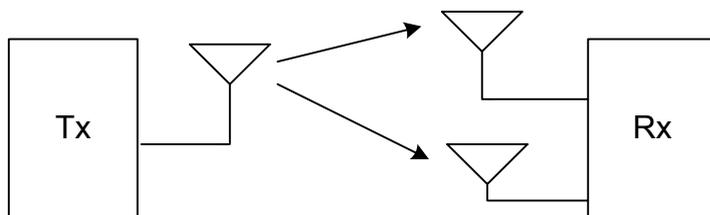
## 2.2 空间分集

MIMO 无线信道中有两个主流技术，分别为接收分集技术和发射分集技术。

### 2.2.1 接收分集

接收分集是指在接收端使用比发射端更多的天线，即  $M > N$ 。当  $N=1$  时，可看成是 SIMO 技术。最简单的接收分集如下图，包含 2 个接收天线和 1 个发射天线（SIMO,  $1 \times 2$ ）。

图2-3 SIMO 天线配置

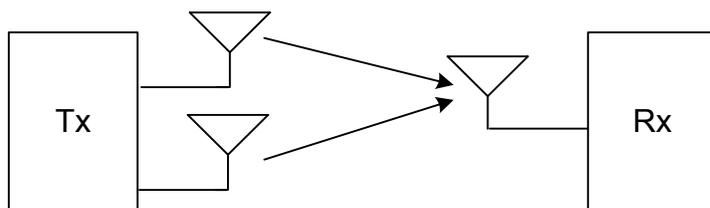


因为不需要特殊的编码方式，因此比较容易实现。在接收端只需 2 个射频通路。同时由于存在不同的传输路径，接收端可以观察到两个不同的衰落信号。在接收端使用适当的方法，可以增加接收端的信噪比。常用的方法包括开关选择分集和最大比例合并。选择开关分集总是使用较强的信号，而最大比例合并，是使用两个信号之和。

### 2.2.2 发射分集

如果发射天线数目比接收数目多，即  $M < N$ ，称之为发射分集。当  $M=1$  时，可看成 MISO 技术。最简单的发射分集形式是用 2 个发射天线和 1 个接收天线（MISO,  $2 \times 1$ ），具体如下图。

图2-4 MISO 天线配置



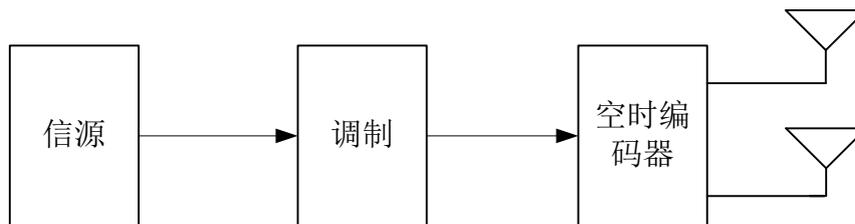
在上图所示的 MISO 系统中，两个天线发送相应的数据内容。为了增强信号的抗衰落能力和提高信道容量，这种系统通常采用空时编码技术。

空时编码综合考虑分集、编码和调制，它的最大特点是将编码技术和天线阵技术结合在一起，实现了空分多址，提高了系统的抗衰落性能，且能通过发射分集和接收分集提供高速率、高质量的数据传输。与不使用空时编码的编码系统相比，空时编码可以在不牺牲带宽的情况下获得较高的编码增益，进而提高了抗干扰和抗噪声的能力。其中，WLAN 802.11n 中采用的空时编码为 STBC 技术。

STBC（空时块码）是 802.11n 中一个简单的、可选的发送分集机制，它提供的分集增益相当于最大比接收机合并，但考虑总发射功率一样的时候，STBC 就明显处于劣势，因为它只能获得很少的增益，不能获得明显的功率增益。但优点是可以使用低成本、小功率以及不要求高数据速率的设备通过充分利用分配给它的无线信道获得强健的链路性能。

在上图中，STBC 编码采用 Alamouti 算法，S 本质是将信号经过正交编码后由两根天线发送，由于经过正交编码后的信号相互独立，所以在接收端可以很容易的将两路信号区别开来。在接收端只需进行简单的线性合并即可获得发送信号。

图2-5 STBC 编码的基本原理



STBC 编码的基本原理如上图所示，信源发出的数据首先经过调制，将二进制比特信息调制为  $M=2^m$  进制的符号，然后进行 STBC 编码器选取连续的两个符号，根据下式映射为发送信号矩阵。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$

这样，信号  $[x_1, -x_2^*]$  与信号  $[x_2, x_1^*]$  相互正交。在第一个给定的字符间隔内，每组中的两个字符被同时发射：从天线 1 发射的信号为  $x_1$ ，从天线 2 发射的信号为  $x_2$ 。在下一个字符间隔内，信号  $-x_2^*$  从天线 1 发射，信号  $x_1^*$  从天线 2 发射。

目前采用 Alamouti 算法的 STBC 编码已经扩展到多天线系统。采用 STBC 编码之后，发送端必须告知接收端它进行了 STBC 编码，这样接收端接收到信号之后可以进行相应的逆处理译码。

### 2.2.3 MISO 与 SIMO 增益分析

不管是 MISO 天线系统还是 SIMO 天线系统，都是属于 MIMO 天线系统。根据 MIMO 天线系统公式

$$C \approx \min(M, N) * \log_2 (1 + S/N)$$

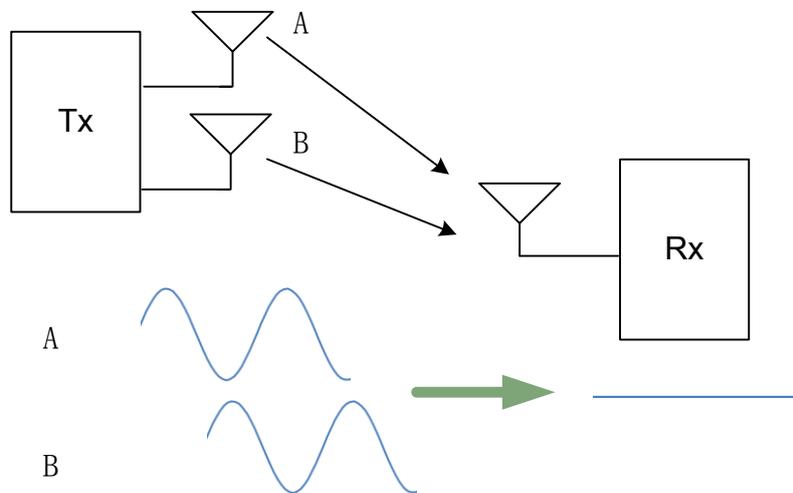
可知，信道容量的增加与 M 和 N 的最小值有关。因此，对于 SIMO 技术或 MISO 技术，对于信道容量的增加是不多的。

实际上，它们只能提供稍高于 SISO 技术的信道容量。

## 2.3 TxBF

前面所讨论的都是多天线中，同样的信号同时传输。这样会带来人们不希望的空间空洞。这是因为数据的每一个副本均由不同的天线发射，并在横穿其路径到达接收天线时受到不同墙体和设备的反射，如果到达某一位置存在两条衰减相等的路径，但是其中一条路径与另外一条路径的相位相反，那么这两条路径会相互抵消，这就是空间空洞。

相位相反形成空间空洞



如果这个 TxBF (波束成形, transmit beamforming) 是有益的，那情形就完全不一样了。这是因为如果每个天线流的相位，可通过预先补偿发射天线的相位，是数据的多个副本在到达接收天线时具有相同的相位。与相互抵消的情形相反，这两条路径会建设性的互相结合，进行叠加以实现最高效果。802.11n 标准提供的自适应传输波束成形 TxBF 指的就是这种有益的波束成形，它能显著提高接收端获得的信号质量。

### 2.3.1 TxBF 基本原理

TxBF 通过对传输信号进行加权来改善接收情况，加权系数是从对传播环境或者信道状态信息（CSI）的了解得出的。按如何获得发射机的加权矩阵的方式划分，TxBF 可分为两种：显式波束成形和隐式波束成形。

#### 显式波束成形

显式波束成形是 802.11n 定义的一种可选模式，需要客户端（接收机）的支持。当使用显式反馈机制时，进行 TxBF 的设备就是发送探测分组的设备。设备 A 向设备 B 发送一个探测分组，设备 B 将 CSI 或者波束成形权重值发给设备 A。设备 A 使用这一反馈信息来使用 TxBF 发送一个分组给设备 B。

802.11n 中指定了 3 中显式反馈的格式：CSI、非压缩波束成形权重值以及压缩波束成形权重值。而且 CSI 矩阵和权重值矩阵的行数与列数分别对应于接收探测分组的接收天线数目以及探测分组的 HT-LTF 数目。这也就是说，当 TxBF 发送端为 4 天线时，不仅仅发送硬件需要支持发送 4 空间流数，客户端（接收端）也需要支持 4Tx 的天线探测才行，但目前主流芯片最多也只是支持 3 天线。

同时由于显式反馈会降低系统效率，协议还提供了量化与子载波分组技术尽量减少系统开销。

但是，相对来说，显式波束成形提供了有关整个信道的最为准确的信息，因此如果可用（需要终端支持），此技术也是最能提高吞吐量，提供链路稳定性。理论上，在平坦信道下能获得的最大理想 BF 增益为：

$$G_{TxBF} = 10 * \lg(Tx)$$

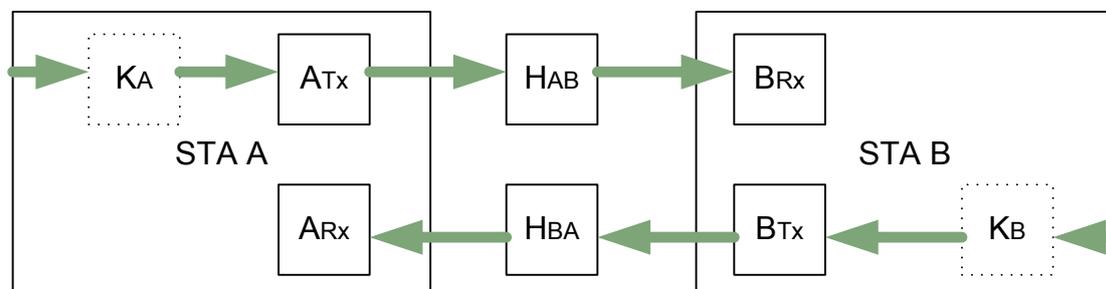
也就是说，3Tx 时，能获得的最大理想 BF 增益为 4.77dB，4Tx 时为 6.02dB，增加了 1.25dB。但在实际情况下能获得的增益远远没有这么多，量化、子载波分组以及压缩等用来减少反馈中的系统开销的措施会造成增益减少，同时实际信道是频选非平坦的，波束汇聚效果有限，且信道情况随着时间变动，反馈的延迟或者从量度 CSI 到应用波束的延迟也会造成性能下降。也就是说，在实际情况下，4Tx 相比于 3Tx，实际获得的增益不会超过 0.75dB。

#### 隐式波束成形

隐式波束成形，也就是 Cisco 广泛宣传的客户端无关式波束成形 ClientLink 或 ClientLink2.0。无线接入点 AP 在客户端发射信号的任意时刻测量无线信道，然后使用该信道信息最大限度地增强返回到客户端的数据。表面看来，确实脱离了客户端的限制，但事实并不完全这样。

隐式反馈的原理是基于 H.A.Lorentz 在 1986 年提出的电磁对等关系，即一个天线的远场波束模式在发送与接收上相等。既然 802.11n 中同样的频率载波被用在两个链路方向上，从一个设备到另一个设备的传播环境是对等的，在理想情况下，在任意一端量度到的信道状态都应该相等。但需要指出的是干扰并不是对等的，此外，一个设备的数字基带与另一个设备的数字基带之间的信道还包括有滤波器 Filter、功放 PA、低噪放 LNA，这些 RF 失真也不是对等的。

为了解决设备的发射硬件和接收硬件相匹配的问题，业界思考了许多方法。对于高端的无线设备，例如 LTE-TDD 和 WiMAX 基站，推出了射频通道内部校准的方案。该方案需要在原来的射频单元上增加耦合器、功分器，还需要增加控制逻辑。对于 WiFi 来说，不经成本上接受不了，体积大小也远远超出了可接受范围。802.11n 标准根据 WiFi 的成本低，体积小特点，推出了利用客户端协助校准的方案。



两个设备的校准系数可以按以下步骤算出。要计算  $K_A$ ，设备 A 向设备 B 发送一个探测分组。这使得设备 B 可以计算出信道估计  $H_{AB}$ 。接下来，设备 B 向设备 A 发送一个探测分组。这使得设备 A 可以计算出信道估计  $H_{BA}$ 。校准分组交换序列中的最后一步是由设备 B 将信道估计  $H_{AB}$ （也就是 CSI）发送给设备 A，这之后设备 A 同时拥有信道估计  $H_{AB}$  和  $H_{BA}$ ，就可以计算出校准系数  $K_A$ 。

也就是说，要想客户端协助校准，客户端不仅仅需要能够支持校准流程，还需要能够支持响应的 CSI 波束成形天线数目。这也就是说，当 TxBF 发送端为 4 天线时，不仅仅发送硬件需要支持发送 4 空间流数，客户端（接收端）也需要支持 4Tx 的天线探测才行，但目前主流芯片最多也只是支持 3 天线。

有些 WiFi 厂商宣称通过充分的设计，能够避免依赖客户端协助校准，这实际上是认识不够，因为由于 WiFi 的特点，不可能在 WiFi 射频板上增加射频校正通道，只能寄希望于整个收发器集成在一个芯片上，芯片设计时尽量保证 Tx 链和 Rx 链一致，但外接的射频前端的 PA、LNA 如何考虑，这些射频器件都是各通道分立的，无法保证一致性。而且，有源器件随之电路中温度变化、载波的频率变化以及增益变化，RF 失真/损伤也是会变化的，变化的一致性无法保证。

因此不进行内部或外部协助校准，是无法保证射频通道的一致性的，从而无法保证波束成形的有益性。无益的波束成形不仅仅不能提供希望的波束成形增益，还可能带来不希望的空洞。

种种因素结合起来，隐式波束成形比较适合于 BSS 网络中的无线接入点 AP，且 BSS 网络中必须至少要有个客户端 STA 具有协助校准功能，这个 STA 周期的协助 AP 进行校准，随后校准后的 AP 就可以发送波束成形给本 BSS 网络中所有的客户端，包括支持与不支持波束成形的 802.11n 客户端，以及仅仅支持单空间流的 802.11a/g 的客户端，但即使在这种情况下，能带来的增益还有待实际的考验。

# 3 总结

本文在 Shannon 的信道容量理论上，对 WLAN 中的多天线技术做了分析，可以得到 WLAN 的多天线技术对于信道容量的提升有着巨大的作用，增加收发天线数对于系统系能及降低系统的误码率也很有帮助。

但是只有单发射天线或者只有单接收天线对于系统增益的提升还是有限，而且在 TxBF 的信道估计方面，主要是信道状态信息（CSI）获取和有效利用的问题还值得深入地研究。

因此在实际利用上，我们要在系统复杂度与系统性能之间多一个很好的选择，以便达到一个平衡。