Wi-Fi 体制在远距离通信应用中存在以下限制：

信号衰减：Wi-Fi 信号在传播过程中会受到物理障碍（如墙壁、树木等）的影响，导致信号强度衰减，尤其是在长距离传输时。

频率限制：Wi-Fi 通常使用 2.4GHz 和 5GHz 频段。高频信号（如 5GHz）的传输距离较短，穿透能力较弱，而低频信号（如 2.4GHz）则干扰较多。

带宽限制：Wi-Fi 的带宽在远距离传输时可能会受到限制，导致数据传输速率下降，影响通信质量。

环境干扰：周围的无线设备、电子设备和其他信号源可能会造成干扰，进一步影响远距离通信的稳定性。

设备能力：使用的路由器和接收设备的性能也会影响信号的覆盖范围和连接质量，低功率设备在长距离下连接不稳定。

网络拥塞：在用户密集的区域，Wi-Fi 网络可能会变得拥塞，影响远距离连接的可靠性。

为了改善这些限制，可以考虑使用定向天线、增加中继器和使用更先进的通信技术（如 LTE、5G 等）来实现更好的远距离通信效果。

将WiFi通信系统的通信距离扩展到远距离（如100公里）是一个复杂的挑战，因为WiFi原本是为短距离、高速的数据通信而设计的，其物理层、协议栈、硬件设计以及频谱分配等都决定了它的适用范围有限。要实现如此远距离的通信，需要克服技术、物理、法律等多方面的限制。以下从各个方面详细分析 WiFi 系统扩展至 100 公里通信所面临的问题和可能的解决方案。

**一、WiFi通信概述**

WiFi（Wireless Fidelity）属于 IEEE 802.11 标准家族，主要工作在 **2.4 GHz** 和 **5 GHz** 频段。它的设计目标是提供短距离、高速的数据通信（通常在几十米范围内）。WiFi 的通信范围主要受到以下因素的限制：

1. **发射功率**（Transmit Power）；
2. **接收灵敏度**（Receiver Sensitivity）；
3. **频率和带宽**（Frequency and Bandwidth）；
4. **信道干扰**（Channel Interference）；
5. **天线设计**（Antenna Design）；
6. **传播环境**（Propagation Environment）。

在扩展 WiFi 的通信距离时，这些因素都会对系统性能产生显著影响。

**二、WiFi通信扩展至100公里的主要限制**

**1. 发射功率的限制**

**（1）问题分析：**  
WiFi 通信的信号强度随着距离的增加显著衰减。根据自由空间路径损耗公式（FSPL）：

L=20log⁡10(d)+20log⁡10(f)+20log⁡10(4πc)L = 20\log\_{10}(d) + 20\log\_{10}(f) + 20\log\_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right)L=20log10​(d)+20log10​(f)+20log10​(c4π​)

其中：

* ddd 是距离（米）；
* fff 是频率（赫兹）；
* ccc 是光速（约 3×1083 \times 10^83×108 m/s）。

在 2.4 GHz 频段，100 公里距离的自由空间路径损耗约为 **140 dB**。为了克服这样的损耗，发射功率需要足够高。然而，WiFi 系统的发射功率通常受到法律法规的限制：

* **2.4 GHz** 和 **5 GHz** 是开放频段，全球范围内对发射功率的限制通常在 **100 mW**（20 dBm）到 **1 W**（30 dBm）之间。
* 在这些限制下，即使使用高增益天线，发射信号覆盖 100 公里也非常困难。

**（2）解决方案：**

* **提高发射功率：**
  + 在非民用场景（如工业、科研或军事用途），发射功率限制可能会放宽。例如，军用通信设备可以使用更高的功率，但这需要得到相关频谱管理部门的批准。
  + 将发射功率提高到几十瓦甚至更高（例如 10 W 到 100 W），可以显著延长通信距离。
* **采用定向天线：**
  + 通过使用高增益定向天线（如抛物面天线或 Yagi 天线），可以将信号集中到一个方向，从而有效提升信号强度。
* **优化功率放大器：**
  + 采用高效的功率放大器（PA）设计，提高发射器的输出功率，同时降低功耗。

**2. 接收灵敏度的限制**

**（1）问题分析：**  
接收机的灵敏度决定了能够接收到的最小信号强度。现代 WiFi 接收器的灵敏度通常在 **-90 dBm** 到 **-100 dBm** 之间。如果信号经过 100 公里的传播后衰减到低于接收机灵敏度的阈值，则接收机将无法解调信号。

**（2）解决方案：**

* **提高接收灵敏度：**
  + 通过优化接收机电路设计（如低噪声放大器、滤波器等），可以进一步降低接收机的噪声水平，从而提高接收灵敏度。
* **使用低速率调制方式：**
  + 使用更低速率、更鲁棒的调制方式（如 BPSK 或 QPSK），以降低对信号强度的需求。
* **增加信号处理增益：**
  + 通过使用信道编码技术（如卷积码、LDPC 码）和纠错算法，可以提高系统对弱信号的容忍能力。

**3. 频率和带宽的限制**

**（1）问题分析：**  
WiFi 工作在高频段（2.4 GHz 和 5 GHz），高频信号在传播过程中衰减速度更快，且更容易被障碍物阻挡。此外，WiFi 的带宽通常较宽（如 20 MHz 或 40 MHz），带宽越大，噪声功率密度越高，信号对噪声的抗性越弱。

**（2）解决方案：**

* **使用更低频率：**
  + 采用 433 MHz 或更低的频段（如 150 MHz），由于低频信号具有更好的绕射和穿透能力，可以显著增加通信距离。
  + 例如，LoRa 等技术使用 433 MHz 或 868 MHz 频段，专为远距离通信设计。
* **减少带宽：**
  + 减少 WiFi 的信号带宽（例如限制到 1 MHz 或更低），可以降低噪声功率密度，从而提高信噪比（SNR）。

**4. 信道干扰**

**（1）问题分析：**  
2.4 GHz 和 5 GHz 频段是开放频段，广泛用于 WiFi、蓝牙、微波炉等设备。特别是在 2.4 GHz 频段，信道干扰非常严重。在远距离通信中，干扰会进一步降低信号质量。

**（2）解决方案：**

* **选择干扰较少的频段：**
  + 在 5 GHz 频段中选择较高的子频段（如 5.8 GHz），此频段的干扰通常较少。
* **采用频谱跳频技术：**
  + 使用频谱跳频（Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS）或扩频技术（如 DSSS），可以有效降低对干扰的敏感性。
* **定向传输：**
  + 高增益定向天线不仅可以增强信号强度，还可以减少来自其他方向的干扰。

**5. 传播环境限制**

**（1）问题分析：**  
在实际环境中，信号传播不仅受到自由空间路径损耗的影响，还会受到多径效应、地形阻挡、大气衰减等因素的限制：

* **多径效应**：信号通过不同路径传播，会造成干扰和失真。
* **地形阻挡**：地球曲率、建筑物、树木等都会阻挡信号传播。
* **大气衰减**：高频信号在大气中传播时会因水蒸气、氧气等分子的吸收而衰减。
* **地球曲率**：100 公里的距离已经超出地球曲率的影响范围，信号可能无法直线传播。

**（2）解决方案：**

* **建立中继站：**
  + 在通信路径中设置中继站，分段传输信号，从而绕过地球曲率的问题。
* **使用高增益天线和高塔：**
  + 将天线架设在高塔上，可以减少地形阻挡和地球曲率的影响。
* **采用跳频和波束成形技术：**
  + 使用智能波束成形技术（Beamforming），以最大化信号在目标路径上的强度。

**6. 协议限制**

**（1）问题分析：**  
WiFi 的 MAC 层协议（802.11 标准）是为短距离通信设计的，采用随机接入机制（如 CSMA/CA）。在远距离通信中，这种机制的效率会大大降低：

* **延迟问题**：100 公里距离的信号往返延迟接近 1 毫秒，会影响 ACK 确认和重传机制。
* **冲突问题**：远距离通信中的信号传播时间较长，可能导致更多的冲突。

**（2）解决方案：**

* **优化协议：**
  + 修改 MAC 层协议，例如增加帧窗口大小、调整重传机制等。
* **采用其他协议：**
  + 使用更适合远距离通信的协议，如 LoRaWAN、NB-IoT 或专用的定制协议。

**三、总结**

将 WiFi 系统的通信距离扩展到 100 公里，需要综合考虑发射功率、接收灵敏度、频率选择、信道干扰、传播环境和协议设计等诸多因素。以下是实现这一目标的关键点：

1. 使用低频段（如 433 MHz）替代 2.4 GHz 或 5 GHz；
2. 提高发射功率并结合高增益定向天线；
3. 优化接收机灵敏度和信号处理算法；
4. 建立中继站或采用卫星通信技术；
5. 修改或替换 WiFi 的 MAC 层协议，适配远距离通信需求。

即使技术上可以实现，100 公里的 WiFi 通信仍然可能面临法规和经济成本的制约。因此，这种远距离通信方案更适合特定的工业、军事或科研领域，而不适用于常规的民用网络场景。

graph TD

A[开始] --> B[参数初始化与提取]

B --> B1[提取MAC头部]

B1 --> B2[获取速率/重试参数]

B2 --> B3[映射Linux优先级到硬件队列]

B3 --> C{检查硬件队列状态}

C -->|队列未满| D[处理数据包]

C -->|队列已满| E[停止队列<br/>ieee80211\_stop\_queue]

E --> J[错误处理]

D --> D1{是否为HT聚合帧?}

D1 -->|是| D2[插入MPDU分隔符]

D2 --> D3[计算CRC并填充对齐]

D1 -->|否| D4[直接填充DMA缓冲区]

D3 --> F[DMA配置与提交]

D4 --> F

F --> F1[映射虚拟地址到物理地址]

F1 --> F2[配置速率/重试寄存器]

F2 --> F3[提交DMA传输请求]

F3 --> G[更新环形缓冲区]

G --> G1[标记BD为已占用]

G1 --> G2[移动写指针bd\_wr\_idx]

G2 --> H[结束]

F1 -->|DMA映射失败| J

F3 -->|DMA提交错误| J

J --> J1[释放skb资源]

J1 --> J2[通知上层丢包]

J2 --> H

**​​流程图说明​​**

1. ​**​参数初始化​**​：
   * 提取 MAC 地址、速率、优先级等参数，并映射到硬件队列索引。
2. ​**​队列状态检查​**​：
   * 若队列已满，直接触发错误处理；否则继续处理数据包。
3. ​**​数据包分支处理​**​：
   * ​**​HT 聚合帧​**​：插入分隔符、计算 CRC、填充对齐字节。
   * ​**​传统帧​**​：直接填充 DMA 缓冲区。
4. ​**​DMA 传输​**​：
   * 地址映射、寄存器配置、提交 DMA 请求。
5. ​**​错误处理​**​：
   * 覆盖 DMA 映射失败、队列溢出等异常场景。

**​​关键节点注解​​**

* 检查硬件队列状态：通过 FPGA 寄存器判断队列是否可写入。
* 插入MPDU分隔符：仅针对 HT 聚合帧，添加 4 字节分隔符（Delimiter）。
* 映射虚拟地址到物理地址：调用 dma\_map\_single 生成 DMA 可访问地址。
* 标记BD为已占用：更新环形缓冲区描述符（BD）状态，记录当前包信息。

**​​扩展建议​​**

1. ​**​子流程细化​**​：可将 处理数据包 或 DMA配置 展开为子流程图。
2. ​**​颜色标注​**​：用红色表示错误路径，绿色表示正常路径。
3. ​**​寄存器细节​**​：在节点旁注释关键寄存器（如 TX\_INTF\_REG\_TX\_CONFIG）。

graph TD

    A[接收输入信号] --> B[捕获第一个LTS]

    B --> C[捕获第二个LTS]

    C --> D{是否启用平滑?}

    D -->|是| E[时域信道平滑]

    D -->|否| F[计算信道响应]

    E --> F

    F --> G[导频极性初始化]

    G --> H[估计公共相位误差CPE]

    H --> I[估计线性相位误差LVPE]

    I --> J[子载波相位校正]

    J --> K[输出均衡数据]

    K --> L{是否为HT模式?}

    L -->|是| M[HT-LTS处理]

    L -->|否| G