

# Designing a short-range RF link into a consumer-electronics product

设计一个连接到消费电子产品的短距无线  
(RF)设备



**TuneView**

原文内容:

<http://www.edn.com/article/CA6576137.html?spacedesc=features&text=nordic>

## 案例研究:

从一个开发小组遭遇的失误和困难中吸取教训,从草图开始,直到最后完成一个集成到 iPod 附件中的短距 RF 产品.

作者: 埃里克·威尔奇

Keyspan 公司

2008 年 7 月 8 日

尽管我们从不认为这是件容易的事,但当我们开始规划一个连接到 iPod 控制器和基座的短距双向 RF 产品时,头脑中仍然萦绕着那句让设计师头疼的俗语:"这种事要多难就有多难!"

Tuneview 配备一个 1.5 英寸的 LCD 屏,拥有类似 iPod 的菜单导航功能,可以显示"Playlists(播放清单)"和"Artists",实际操作距离大于 50 米. 我们很快紧跟 iPod 的步伐推出了一款升级产品,通过遥控器和连接到 USB 口的 RF 收发器,可以去控制在 Mac 或 PC 上运行的 iTunes. 我们的设计团队应该有理由为该产品而感到自豪.

可惜,由于这些产品面市的时间延迟了一年,这种自豪感也打了折扣.

为什么会这样呢?因为当我们开始该项目的时候,大家都缺少射频方面的经验. 而且,我们当时甚至还没有决定使用哪一种 RF 模块,购买哪一种商业软件,或是 IP,选择哪种通信协议,而不是从新设计这些东西,我们只有边做边学. 我们发现 RF 是一个非常复杂和困难的领域,因为它所涉及的知识实在是博大精深. 如果你和我们一样,工作经验仅限于数字系统的软硬件方面,那么模拟系统的工作将会是巨大的挑战.

比如, Tuneview 项目要求我们必须成功地集成三个独立的模拟子系统(射频,功率放大和天线). 而用来连接这些子系统的无源器件(电容,电阻和电感)在微波频段(如 2.4 GHz)将会表现出完全不同的特性,寄生效应将变的非常重要. PCB 的布板也要遵循全新的规则,而一旦出现问题,解决起来也将非常复杂.我们是从痛苦中获得经验和教训.

甚至 RF 方案的选择也并非一帆风顺. 我们首先想到的技术有 Wi-Fi, Bluetooth(蓝牙), 和 ZigBee, 但是综合考虑了诸如工作距离,功能,功耗,延迟,以及干扰和安全性等问题的后,我们还是放弃了在本项目中使用这些技术.

在排除了以上的选择之后, 我们开始注意到一些专有的 2.4-GHz 解决方案,终于发现了一种能够满足我们要求的技术.

在产品面市之后,我们有时间回过头来反思这个项目,我们认为我们的经验对于那些准备设计连接到消费电子产品或外设的短距无线产品的工程师们是有帮助的. 因此我们决定在本文中分享这些经验.

## RF 遥控器的优点

Keyspan 公司的开发团队已经注意到, RF 遥控器可以极大地提高传统单向遥控器的功能, 为用户提供直接的反馈, 让用户随时了解他们正在进行的操作. 我们的直觉得到了证实, 在一个 MacWorld 展览会上, 一位用户走过来对我说: "我喜欢你们的遥控器, 但是我真正需要的是你们正在开发的带有 LCD 的那款, 这样我在手里就能够看到播放的音乐清单了."

我们的设计目标是, 遥控器可以与 PC 或 Mac 上运行的音乐播放器(比如苹果的 iTunes)互动, 也可以与插在基座上的 MP3 播放器(如 iPod)互动. 我们不做大块头的高档遥控器, 而是倾向于开发一款小巧的, 用拇指控制的遥控器, 并且在环境光线很暗的情况下也能正常使用. 我们很快否决了那些直接传送音视频的想法, 因为那样会造成产品的成本太高. 最后, 我们还希望该产品在全世界都能够通过认证. 产品最终被命名为 Tuneview, 该项目在 2004 年 12 月初开始启动.

虽然我们确认了 RF 双向遥控器作为我们的产品, 但是要设计它却是另一码事. RF 领域并非 Keyspan 公司的特长. 到 2004 为止, 该公司的工程师已经开发过 USB 转接器, 智能电缆, 简单的红外遥控器, 和一系列网络 USB 服务器. 我们的专长在于嵌入式系统, 快速通信设备, 以及便于量产的低成本设计. 我们没有设计过 RF 产品; 而且对手持式产品的经验也很有限.

尽管 RF 开发看起来令人畏惧, 我们发现大多数现代数字射频方案都已集成在了单个封装当中, 而且已经一边提供了数字 CMOS 接口, 在另一边是天线接口. 我们的第一反应就是 "这有什么难的?" 并且由于我们在手持 RF 设备, 尤其是带 LCD 屏的那种设备上有些经验, 这更使得我们跃跃欲试.

一位高级硬件工程师抱着务实的态度, 建议聘请一个顾问来弥补我们的缺陷. 然而事实上根本找不到愿意帮你做底层设计的顾问. 终于我们找到了一位拥有实验室的 RF 顾问, 虽然不能做 RF 设计, 但他可以在设计阶段对我们的产品进行测试和提供重要的反馈.

## 选择一种射频方案

咨询了市场部门的意见后, 开发小组为 Tuneview 的射频方案定出了以下的初步规格:

- l 少于 5 美元的器件成本;
- l 工作在 2.4-GHz ISM(工业, 科学和医疗 全球通用频段);
- l ITU 规定的 DSSS 或 FHSS 工作方式, 以防止 Wi-Fi, Bluetooth 和 Tuneview 设备之间相互干扰;
- l 在现场工作环境下, 达到 30 到 50 米的穿墙距离;
- l 使用标准 AA 电池, 电池寿命最少为 3 个月(最好能达到 6 个月);
- l 100 至 300-kbps 的有效传输速率;
- l 快速启动(从深度睡眠模式下);

- I 便于用户使用的遥控器与被遥控设备的配对查找方式.

我们下面列出了一些成熟的短距,低功耗无线技术:

- I ZigBee: ZigBee 联盟声称"能让无线控制变的简单", 基于 IEEE 802.15.4 标准,该技术适合于低速率和低功耗的应用.
- I 蓝牙: 基于 IEEE 802.15.1 标准.工作在 2.4-GHz 频段, 已经在移动电话和 PC 市场上取得了成功. Bluetooth SIG 推出的各种版本已经应用在多种外设上,比如无线耳机.
- I Wi-Fi: Wi-Fi 是基于 IEEE 802.11 标准的第三代无线技术. 它作为无线局域网技术已被广泛应用于"hotspots", 家庭和办公室. Wi-Fi 主要被用作 TCP/IP 网络的传输层.
- I Cypress 公司的 WirelessUSB: Cypress 公司的专利产品 -- 和名为 "Certified Wireless USB"的产品无关, 那是由基于 WiMedia 联盟 UWB 平台的无线 USB 促进组织开发的. WirelessUSB 是一种专利产品,半双工,工作在 2.4GHz 频段. 它使用 DSSS 方式以满足 ITU 的规定, 避免与现有的其它工作在 2.4GHz 频段的标准产生干扰.
- I Nordic 半导体公司的 nRF2401: Nordic 的方案是有专利的, 无线半双工的调制解调器, 工作在 2.4GHz 频段. 它使用 FHSS 方式和一个数字化的分段, 可以发送最大 256-bit 的数据包. 接收方将会丢弃错误的数据包.

我们一开始就否决了 ZigBee,因为当时该方案还未成熟,然而就算现在重新选择,我们也不会选择 ZigBee.

开始, 蓝牙技术在 PC 和 Mac 上的普及性看起来很有优势. 不幸的是, 仔细研究之后发现,实际上所有计算机配备的都是低功率的蓝牙 Class 2 或 Class 3,工作距离不超过 10 米. 能够满足我们需求的蓝牙 Class 1 的成本太高,而且功耗太大. 如果你告诉用户要再去买一个蓝牙接收器, 因为电脑里原配的那个不够好,估计用户会很难接受. 除了成本的因素,蓝牙 Class 1(工作在 20dBm)消耗的电量使 AA 电池无法提供足够的工作时间. 此外,用户使用 PC 或 Mac 进行蓝牙配对也会碰到麻烦.

随着电池技术的发展,越来越多的移动设备比如 PDA 和手机集成了 Wi-Fi, 在"热点"附近 Wi-Fi 主要被用来浏览网页和收发 email, Wi-Fi 的功耗会使电池电量快速下降(尤其对低容量的 AA 电池来说). 使用 Wi-Fi 将无法满足我们要求的 3 到 6 个月的电池寿命. 第二,开发小组对 Wi-Fi 从睡眠模式中唤醒的时间也表示担心,虽然并没有做过严格的测试. 最后,我们还担心 Wi-Fi 芯片的供应商是否会给我们这样的小公司供货. 没有可靠的供应商,我们将不得不去采购昂贵和体积庞大的模块来做为替代.

除了技术上的原因, 这些基于标准的技术也不太适合 Tuneview 的要求. 采用基于标准的技术非常适合于在不同厂家生产的设备之间的进行交互操作,尤其是在 PAN(个人小规模网络)中的多个设备同时地进行通信时就非常必要. 然而,为了确保交互操作和 PAN 的功能,将导致一种性能上的折衷, 这会衍生出非常复杂的协议, 增加电源的负担以及降低工作效率.

相反,Tuneview 需要的是一个简单的,点对点的,可以错误校正的协议,并且能够为特定的数据流量和功耗进行优化. 这款遥控器不需要与其它厂家的产品进行交互操作, Keyspan 会提供所有的设备. 使用基于标准的技术将会加入多余的功能和增加复杂性, 需要添置专业的开发工具因而增加了成本. 此外,还需要一个昂贵的处理器来进行对基带信息的处理.

总的来说, 寻找一种专有的 RF 硬件, 并且开发出一个定制的, 以应用为主的协议是我们的当务之急. 而 Keyspan 的团队有着十多年的通讯协议的开发经验.

我们测试的第一种专有 RF 技术是 Cypress 公司的 WirelessUSB.由于缺少合适的开发板,开发小组一开始就遇到了障碍,他们自己做了一个 USB 无线模块. 不幸的是,有效的数据速率远低于广告中声称的 62.5kbps,因此该技术被放弃了.(后来 Cypress 又推出了带宽更高的该系列的芯片.)

经过初步测试之后,我们最终选择了 Nordic 半导体公司的 nRF2401A, 作为我们的 Tuneview RF 项目的专有技术. 按照规格书,nRF2401A 是一种 GFSK 单芯片收发器,最大的数据速率为 1 Mbps. 它包括一个完整的频率合成器,一个功率放大器,一个晶体振荡器和一个调制器.

通过一个三线的串行接口,可以由程序来调整输出功率和通频率通道. 在发射(TX)功率为 -5 dBm 时电流低至 10.5 mA,在接收(RX)状态下电流为 18 mA,供电电压为 1.9 到 3.6 V. 该收发器提供一个专有的工作在接收和发射模式下的 ShockBurst 功能, 简化了协议和软件设计, 使功率消耗最小化, 并且对微控制器的要求也不高.

Nordic 的产品展示了在成本,接收灵敏度,传输速率,上电时间和功率消耗之间的很好的平衡. 除了这些承诺的性能之外,该产品还满足了开发小组对成本要求. 而且,既然开发者能够建立他们自己的通讯协议,以固件的方式实现基带控制器,他们就能利用该无线产品的优点,而尽量避免它的缺点. 比如,该 Nordic 产品有个缺点,就是将数据包输入它的缓存然后开始发射之后, 发射器不会提供任何方法去告诉处理器操作已经结束. 开发小组克服这个问题的方法就是在固件中仔细调整延迟的时间.

虽然技术上的选择可能是最重要的决定,但也不要低估了选择一个好的供应商的重要性.

任何 RF 项目都会非常复杂,供应商提供的帮助越多,项目的进展就会越顺利. 比如,我们发现 Nordic 的技术支持做的非常好 -- 当经验很少的人设计 RF 产品时这就显得非常重要 -- 和其他供应商对比之后你就会更加明白这个的重要性. 再如,所有从 Nordic 原厂来的现场工程师和专家都会检查 PCB 的布板情况. 当工程师无法确认布板的问题时,他们会对好的产品设计的重点提出建议,强力支持我们去 RF 实验室做专业的网络分析测试,帮助调整器件的阻抗匹配.

## 反复测试

虽然我们已经确定了一个合适的技术,聘请了一个有帮助的顾问,找到了一个有能力的供应商,但是,我们的挑战才刚刚开始. 和其他的数字电路的专家第一次进行模拟 RF 设计一样,我们遇到的第一个教训就是, 将所有的电路元件安放和连接好,仅仅才是工作的第一步. 在 2.4 GHz 的工作环境下,PCB 上的走线已经不单是元件间的连接线了;事实上他们已经变成了微波传输线.

一开始,工程师将电路连接好后,他们发现电路可以工作,但是还有些问题. 发射距离只有几米而且信号质量非常差,BER(误码率)高的惊人. 我们得到了三个重要的教训:

- 1 首先,在 2.4 GHz 的工作环境下,相互连接的元件之间,都需要进行阻抗匹配;
- 1 第二,每一个无源元件(电容,电感,电阻和 PCB 走线)都会产生寄生效应,此时必须把它作为电容加电感再加电阻来对待;
- 1 第三,元件的摆放方向也很重要,因为这会影响它的寄生效应.

这时, RF 顾问和他的实验室的作用就体现出来了. 他的设备可以测量出每个器件的特性阻抗,帮助我们得到匹配与该电路网络的器件的参数值. 一个关键的设备就是频谱分析仪(如图 1 所示).它可以测量出发射和传导的 RF 功率,不仅是在 2.4-GHz 频段,而且可以测量出所有重要的谐波频率,为了减小干扰,谐波频率的能量要尽可能的小. 另一个有用的设备就是网络分析仪,它能够通过相应的传输线"看到"电路内部,测量出它们的特性阻抗.



图 1. Spectrum Analyzer

当涉及到 RF 元件阻抗匹配的细节问题时, 芯片的供应商(包括 Nordic)就帮不了你了. 我们要清楚地了解自己的产品的特性阻抗, 最好搭建一套仿真电路网络. 然而,我们发现这样做对实际电路的帮助不大, 因为元件的阻抗匹配必须考虑到周围的所有因素,包括 PCB 的材料, 接地层的实际位置, 和电路中其它很多看起来似乎不太重要因素. 如果想让你的 2.4-GHz 产品工作正常, 就必须准备耗费大量的时间在测试和调整电路的阻抗匹配上. 没有其它的捷径可寻.

## 确认工作距离

工作距离是我们产品的关键因素.开发小组也一直认为这是吸引客户的重要原因. 开发小组很早就决定要在真实的工作环境中来确认是否能达到要求的工作距离. 在这项指标上,工程师们想让产品的性能比市场部门宣传的还要好. 他们认为如果产品在工作距离上表现的不错, 就有助于真实环境中的测试,这对整个产品都会有所帮助.

我们从开发板(图 2)开始测试,它包括 nRF2401A 芯片和一个鞭装天线,发射功率是 1 mW (0 dBm). 我们计划使用一个片装天线或用 PCB 上导线作为天线,这将会产生衰减,我们认为开发板的工作距离将会超过 30 到 50 米. 不幸的是,我们最多只测得 20 到 25 米的工作距离.想要加大工作距离,就必须加一个功率放大器. 这个复杂的电路大大地加剧了阻抗匹配的难度.

因为 nRF2401A 使用了单个的 RF I/O 线路,除了被天线使用之外,连接射频,功率放大器和天线需要两条通道.我们使用了两个 RF T/R(发射/接收)开关来解决这个问题. 接收通道直接将信号从天线送给芯片,而发射通道将信号送到功率放大器. 我们现在有四个匹配的网络(图 3),而原来只有一个(nRF2401A 到天线).

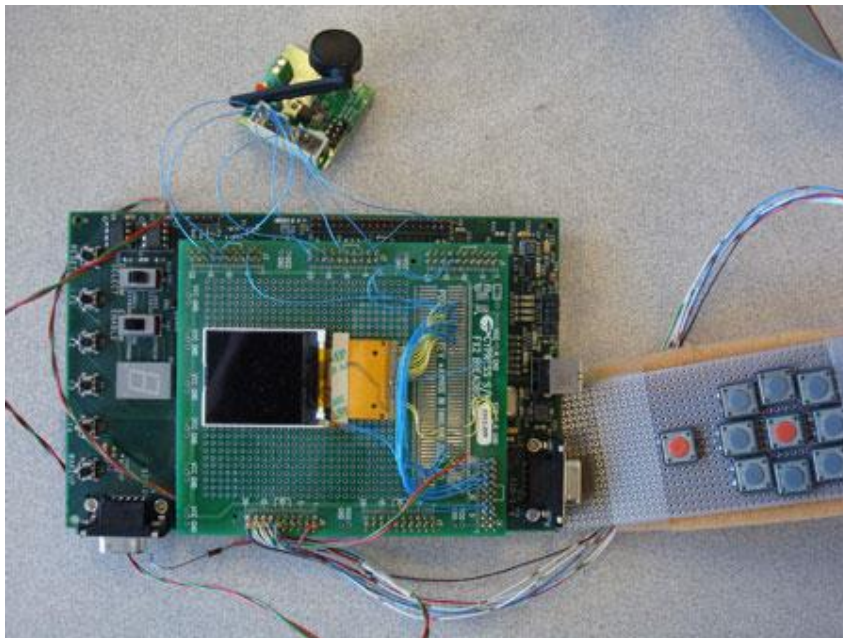


图 2.

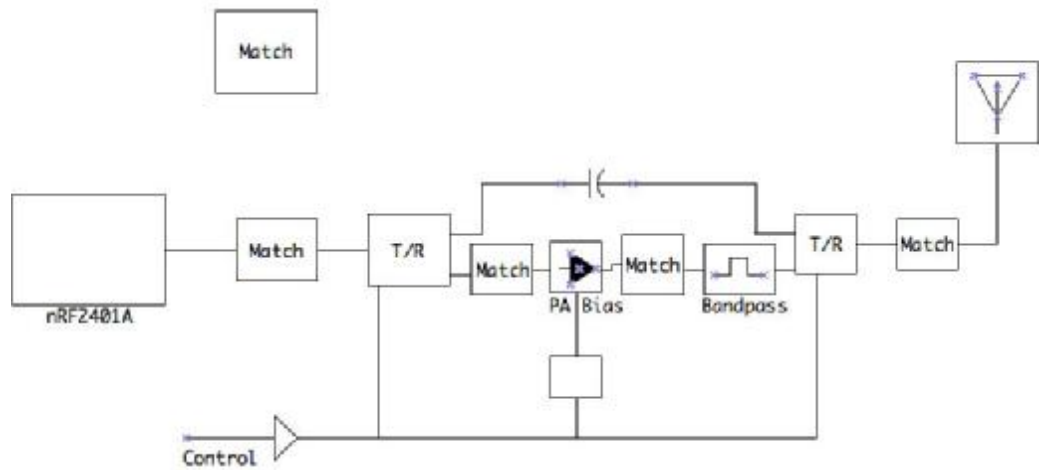


Figure 3: The receive path fed the antenna signal directly into the radio, while the transmit path routed the signal through the power amplifier. Consequently, rather than having one matching network (nRF2401A to antenna), the Tuneview had four.

图 3

在无线通讯领域,无论是模拟还是数字,信号的质量都可用 SNR(信噪比)来衡量. 如果是数字信号,还可用 BER(误码率)来衡量. 这就表示在一个给定的距离,SNR 要求达到一定的"用户的接收率",在双向,半双工的通讯模式下的要求要远高于单向通讯的模式. 我们可以这样来理解,单向连接可以发送多个相同的数据包,假定至少有一个包能够被完整地接收到. 而在双向通讯时,发送一个数据包后,发射方就会开始等待,直到对方应答或是超时,然后就重发或者发送下一个数据包. 无论是单向或双向通讯,都会因为信噪比的降低而使性能变差,但双向通讯受到的影响更大.

Tuneview 项目要求使用双向通讯,因为遥控器上的 LCD 要显示出音乐播放器上的数据. 因为我们要求遥控器在一定的距离上有很好的性能,因此我们需要一个高信噪比的很强的信号. 我们增加了一个功率放大器来增强信号,并且艰难地调整出最好的阻抗匹配和尽可能好地放置元件以减少噪音.

## 增加电池寿命

对 Tuneview 这样的产品来说,电池寿命至关重要. 就算用户能够理解多增加了一个显示屏,他们也会习惯于老式的红外遥控器的电池寿命,可以工作几个月甚至是几年. 我们要求 Tuneview 用两节 AA 电池至少要能工作三个月.

我们选择 Nordic 的 nRF2401A,很大程度上就是因为它的超低功耗的特性. 对比其它基于标准的方案,比如蓝牙甚至是 ZigBee, nRF2401 在发射或接收时的能量消耗都低的多. 各家供应商的规格都不相同,但一个典型的蓝牙芯片在发射



和接收模式下的电流为 35 到 45mA, ZigBee 芯片是 25 到 30mA, 而 nRF2401A 是 11 到 18mA, 当所有芯片都工作在 0 dBm 模式时.

除了芯片以外, 通讯协议也会严重影响功率消耗. 如果芯片长时间工作在发射或是接收状态, 电池的电量将会很快被用完. 诀窍就在于使"工作"的时间最小化, 然后尽可能快地切换到低功耗的"睡眠"模式.

开发小组设计通信协议是这样的, 基于电池工作的遥控器正常情况下收发器都处于睡眠模式, 而基于外接电源的基座的接收器永远都处于开启状态(随时准备接收遥控器的信号), 遥控器开始发射之前会有大约 200 微秒的延时, 当用户按下一个按键, 发射器将会立刻启动, 发送信号, 然后切换到接收状态, 接收到应答信号后, 再返回到低功耗的睡眠模式. 我们的协议会尽量减少工作状态的持续时间, 以减少遥控器电池的消耗.

遥控器有三种状态(工作, 睡眠和深度睡眠). 在深度睡眠时, 处理器会断电 -- 重新启动需要 1.5 秒的时间.

遥控器有如下特性:

- | 发射/接收的工作电流: 大约 73mA;
- | 睡眠模式的电流: 大约 330  $\mu$  A;
- | 深度睡眠模式的电流: 大约 10  $\mu$  A;
- | 睡眠模式 90 分钟后进入遥控器进入深度睡眠模式.

在典型的工作状态下(假设遥控器每天工作两次, 每次工作 90 分钟):

- | 一天当中收发器工作(有按键被按下)10 分钟, 每次电流为 73 mA, 总功率为 12 mAhr
- | 2  $\times$  90 分钟处于睡眠模式, 总功率为 1 mAhr
- | 21 小时处于深度睡眠模式, 总功率为 0.2 mAhr
- | 假设两节 AA 电池能提供 3V, 2200 mAhr 的电量.
- | 电池寿命 = (2200 mAhr)/13.2 mAhr = 167 天 或者 5.5 个月

我们得出了这样的结论. 假设遥控器的微控制器在正常模式下的工作电流为 50 mA, 那么就必须要使它进入某种睡眠模式, 否则电池的电量将在两天内用完. (2200 mAhr/50 mA = 44 小时) 这些问题并不容易判断, 我们选择的某些型号的微控制器就算工作在低功耗模式下, 消耗的电流也会很大而使电池寿命根本无法达到三个月. 当我们不得不对电源电路做出某些改进之后, 电池寿命问题有了好的改善(我们发现一些单元电源总线上出现了一些轻微的干扰, 比我们以前遇到的情况要严重) 我们加入了一个能够使微控制器完全断电的功能.(这样系统就进入了 10- $\mu$  A 的工作模式). 当设备从这种模式中被唤醒, 需要大约 1.5 秒的"重新启动"时间.

## 一些更加深入的技术细节

### 避免干扰

ITU 制定规则来管理 2.4-GHz ISM 频段,以确保在该频段上工作的设备相互之间不会造成严重的干扰.ITU 建议 DSSS 或者 FHSS. 后来又规定,在单个频道上,发射时间不能超过 400 毫秒. Tuneview 项目使用的 Nordic 半导体公司的 nRF2401A 选择了 FHSS 方式. 这就意味着,当我们设计自己的通信协议时就要加入一个跳频算法. 首先,建立一个基本频道,和基于 Tuneview 的唯一序列号的跳转表. 接收方有一个默认的配对频道,这样双方一开始就可以建立连接.

一旦配对完成之后,双方就会设立一个伪随机"同步频道",以后一旦连接失败,就可以回到这个"同步频道"再次连接. 正常情况下,遥控器发送信号时每秒钟变换两到三次频率通道. 这样做可以记录下那些误码率很高的频道,然后就能暂时避免使用这些频道. 这种自适应算法避免了与附近的 Wi-Fi 和蓝牙设备相互间的干扰,而且也能在小范围内同时使用多个 Tuneview 设备.

从某种意义上来说,我们觉得通信协议是整个项目中"最有趣"的部分. 就算是信噪比最好的无线通信的效果,也仅仅相当于最原始的电话 modem,根本无法和现代的有线通信相比. 因为设备的工作方式是基本的无线半双工 modem,我们使用了众所周知的通信原理,这就是基本的误差校正传输机制.

由于 Nordic 的芯片没有提供发射完毕的提示信号,我们就特别注意了定时间长度的要求,然后反复调整,直到得到一种能很好地使用有效带宽的传输机制. 最后我们完成了一种适当的应变和恢复机制,以应付一个良好的连接工作一段时间后性能开始下降的情况,比如用户拿着遥控器远离了接收基座的情况.

接着,我们加入了支持连接层频道的跳频机制. 这样做的关键在于建立一个非常精确的超时时间和双方都知道的"基本"频道,一旦连接失败,双方就能立刻返回该基本频道. 最后,我们建立了设备的配对机制,并且基于产品的唯一序列号而生成了"跳频查找表".

我们发现该协议一个有趣的方面在于,这有利于这种有跳频功能的设备,当严格遵循 ITU 和 FCC 的优化通道的规定,去选择一定的跳频时间,会使得性能上有所改善. 在 Tuneview 项目中,我们是在完成当前的信息发送之后才进行跳频,这仍然没有超过规定的 400 毫秒的时间.

当开发小组的工作进展到了一定阶段,产品的工作距离已达到要求(在穿过几堵墙的情况下超过 50 米),并且信噪比(或误码率)也可以接受时,就要开始考虑产品的认证问题了. 不幸的是,美国的 FCC 和欧洲的 CE 测试(FCC Section 15.247 和 CE EN 300 328)都认为我们的产品的二次和三次谐波的辐射功率(如 4.8 GHz 和 9.6 GHz)严重超标(见表 1), (15.247 标准要求主频段对外辐射的功率必须低于 20 dB).这样我们决定要对产品的射频部分进行屏蔽.

接下来的工作是这个小组在该项目中最痛苦的经历, 如果你们也打算进行 RF 设计的话, 就要特别留意了.

我们花了几个月的时间重新设计了产品的组装和 PCB, 然后设计并初步测试了一个新的"大面积接地", 连接到比 2.4 GHz 的波长(大约 20 毫米)(图 4)更窄的芯片的"条形地线". 我们做的最初的两个样品工作的很正常, 都通过了认证测试(并且还有很大的裕量). 接下来就是开始设计屏蔽部分, 我们很快找到了合适的方案, 但是如果每个设备上都要用的话成本就会很高.

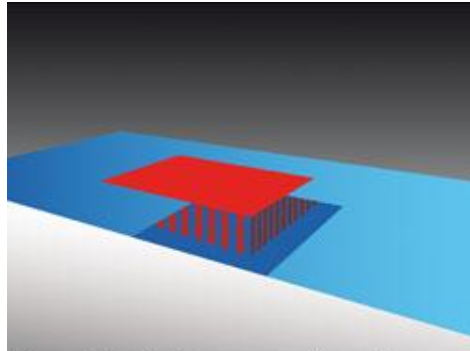


Figure 4: Stylized representation of the ground bucket, placed under the radio chip and connecting signal layer to ground. The "bars" are vias, and are somewhat more widely spaced than in this representation.

[Click to enlarge](#)

图 4

我们然后开始对第三个单元进行工程化工作(用相同的射频电路和布板). (前两个单元分别组成了遥控器和 iPod 基座. 第三个单元是接在 PC 或 MAC 上的 USB 模块.) 然而, 当我们测试这个单元的时候, 我们发现了一个令人沮丧的问题, 认证实验室错误地坚持让我们的前两个单元使用恒定载波进行测试, 而不是使用调制载波. 有效的测试标准是测量一定时间内的平均功率. 调制载波情况下(比如 ShockBurst 模式)并不会一直处于发射模式, 这样平均发射功率就会降低. 而规定是要求在尽可能接近真实射频工作环境下进行测试 -- 这就是说应该使用调制载波进行测试.

这给我们的教训就是 -- 不要只依赖于测试实验室的测试结果. 自己也要去考虑哪些项目需要测试.

另一个重要的教训和供应商有关. 有时候尽管直觉告诉我们不该这样做, 但我们还是想去依赖他们. Nordic 半导体公司告诉我们, 没必要给我们的产品增加屏蔽, 虽然我们用了 12-dB 的功率放大器去增加工作距离. 开发小组不情愿的接受了建议, 因为 Nordic 自己的开发板并不是成熟的消费类产品, 它不带功率放大器, 并且工作在单向通信模式. 最初的测试结果证实了我们的预感, 我们开始怀疑 Nordic 半导体公司的建议, 并且花了几个月的时间去设计屏蔽装置.

然而，当正确的测试结果出来后，Nordic 的建议被证明是对的。我怀疑他们有其他客户从前有过和我们类似的经历，最后他们也没用到屏蔽，但是 Nordic 没有告诉我们。

## RF 设计的要点

我们从 RF 新手转变为熟练工程师的过程是艰苦而有趣的，但也是极富教育意义的。在这个项目中，我们犯的几乎所有错误都要靠我们自己去解决。我们经历了最初的每一个选择，经历了每一种可能出错的选择，并且看到了选择后的每一种结果。对这个项目来说，这是件坏事，因为浪费了时间和金钱，但却是一个极好的教学材料。

- l 总的说来，直接测量关键电路的特性是最重要的。在我们的项目中，我们必须和那位拥有实验室和适当设备的顾问密切地配合。
- l 我们也体会到数字射频通信象一条走向过去的怀旧小路，至少对那些经历过 1970 年代的电话 modem 的人来说是这样的。
- l 大多数情况下，微控制器都处于睡眠模式是电池寿命的关键。
- l 干净的电源也非常重要，对 RF 电路来说，这就代表了一个更好的模拟环境。
- l 如果通信协议写的好的话，FHSS 可能是一种比 DSSS 更好的避免干扰的方案 -- 特别是对突发式发射模式来说。
- l 各种标准也有它们各自的用途：你不得不去遵守这些规定的要求，基于标准的协议对于确保不同厂家的设备能够相互谐调工作是非常重要的。

在本项目的最后，我们开发了一个通用的双向射频产品，它有着很好的工作距离(50 到 70 米的穿墙距离)，不会和 Wi-Fi 与蓝牙冲突(因为我们设计了一个适应性更强的调频方式)。该方案可以用于两条不同的流行的产品线，它设计的很好并且可以为将来很多的 OEM 项目提供很好的 IP。对于 Keyspan 公司的工程资产来说，本项目得到的最大好处可能并不在于做出了实际的产品 -- 虽然它们卖的也不错 -- 而是获得了重要的 RF 技能和经验。

如果 Keyspan 的开发小组在该项目上能够重新来过，我们会在一开始就提出以下的问题：

1. 该产品的预期产量和利润能否支持开发 RF 设备的成本？
2. 该产品是否对成本十分敏感，而要使用一个离散的 RF 电路？

如果所有的答案都是否定的，我们将会选择去购买现成的模块。