

蓝牙技术基础

蓝牙的技术特点

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信的开放性标准，它以低成本的近距离无线连接为基础，为固定与移动设备通信环境建立一个特别连接。如果把蓝牙技术引入到移动电话和便携型电脑中，就可以去掉移动电话与便携型电脑之间令人讨厌的连接电缆而通过无线使其建立通信。打印机、PDA、桌上型电脑、传真机、键盘、游戏操纵杆及所有其它的数字设备都可以成为“蓝牙”技术系统的一部分。除此之外，蓝牙无线技术还为已存在的数字网络和外设提供通用接口以组建一个远离固定网络的个人特别连接设备群。

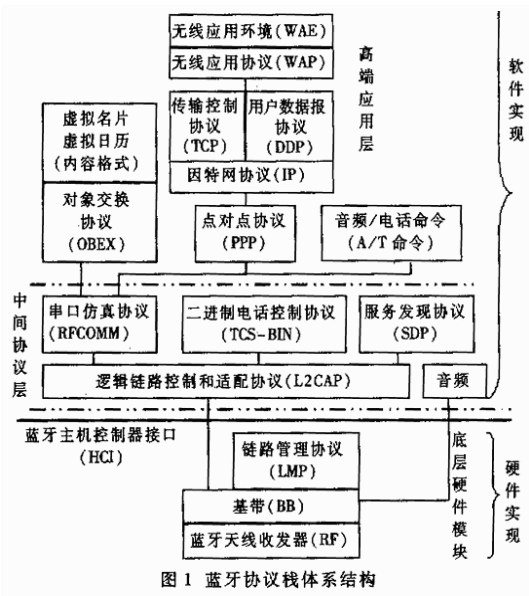
蓝牙技术在全球通用的 2.4GHz ISM（工业、科学、医学）频段，蓝牙的数据速率为 1 Mb/s。从理论上讲，以 2.45GHz ISM 波段运行的技术能够使相距 30m 以内的设备互相连接，传输速率可达到 2Mbps，但实际上很难达到。应用了蓝牙技术 link and play 的概念，有点类似“即插即用”的概念，任意蓝牙技术设备一旦搜寻到另一个蓝牙技术设备，马上就可以建立联系，而无须用户进行任何设置，可以解释成“即连即用”。这在无线电环境非常嘈杂的环境下，它的优势就更加明显了。

蓝牙技术的另一大优势是它应用了全球统一的频率设定，这就消除了“国界”的障碍，而在蜂窝式移动电话领域，这个障碍已经困扰用户多年。

另外，ISM 频段是对所有无线电系统都开放的频段，因此使用其中的某个频段都会遇到不可预测的干扰源。例如某些家电、无绳电话、汽车房开门器、微波炉等，都可能是干扰。为此，蓝牙技术特别设计了快速确认和跳频方案以确保链路稳定。跳频技术是把频带分成若干个跳频信道（Hop Channel），在一次连接中，无线电收发器按一定的码序列不断地从一个信道跳到另一个信道，只有收发双方是按这个规律进行通信的，而其它的干扰不可能按同样的规律进行干扰；跳频的瞬时带宽是很窄的，但通过扩展频谱技术使这个窄带或成倍地扩展成宽频带，使干扰可能的影响变成很小。与其它工作在相同频段的系统相比，蓝牙跳频更快，数据包更短，这使蓝牙技术比其它系统都更稳定。

蓝牙的结构体系

蓝牙协议栈的体系结构如图 1 所示。它是由底层硬件模块，中间层和高端应用层三大部分组成。



1. 蓝牙的底层模块

底层模块是蓝牙技术的核心模块，所有嵌入蓝牙技术的设备都必须包括底层模块。它主要由链路管理层 LMP (Link Manager Protocol)、基带层 BB (Base Band) 和射频 RF (Radio Frequency) 组成。其功能是：无线连接层 (RF) 通过 2.4GHz 无需申请的 ISM 频段，实现数据流的过滤和传输；它主要定义了工作在此频段的蓝牙接收机应满足的需求；其带层 (BB) 提供了两种不同的物理链路 (同步面向连接链路 SCO Synchronous Connection Oriented 和异步无连接链路 ACL Asynchronous Connection Less)，负责跳频和蓝牙数据及信息帧的传输，且对所有类型的数据包提供了不同层次的前向纠错码 FEC (Forward Error Correction) 或循环冗余度差错校验 CRC (Cyclic Redundancy Check)；LMP 层负责两个或多个设备链路的建立和拆除及链路的安全和控制，如鉴权和加密、控制和协商基带包的大小等，它为上层软件模块提供了不同的访问入口；蓝牙主机控制器接口 HCI (Host Controller Interface) 由基带控制器、连接管理器、控制和事件寄存器等组成。它是蓝牙协议中软硬件之间的接口，提供了一个调用

下层 BB、LM、状态和控制寄存器等硬件的统一命令，上、下两个模块接口之间的消息和数据的传递必须通过 HCI 的解释才能进行。HCI 层以上的协议软件实体运行在主机上，而 HCI 以下的功能由蓝牙设备来完成，二者之间通过传输层进行交互。

2. 中间协议层

中间协议层由逻辑链路控制与适配协议 L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol)、服务发现协议 SDP (Service Discovery Protocol)、串口仿真协议或称线缆替换协议(RFCOM)和二进制电话控制协议 TCS(Telephony Control protocol Specification) 组成。L2CAP 是蓝牙协议栈的核心组成部分，也是其它协议实现的基础。它位于基带之上，向上层提供面向连接和无连接的数据服务。它主要完成数据的拆装、服务质量控制、协议的复用、分组的分割和重组 (Segmentation And Reassembly) 及组提取等功能。L2CAP 允许高达 64KB 的数据分组。SDP 是一个基于客户/服务器结构的协议。它工作在 L2CAP 层之上，为上层应用程序提供一种机制来发现可用的服务及其属性，而服务属性包括服务的类型及该服务所需的机制或协议信息。RFCOMM 是一个仿真有线链路的无线数据仿真协议，符合 ETSI 标准的 TS 07.10 串口仿真协议。它在蓝牙基带上仿真 RS-232 的控制和数据信号，为原先使用串行连接的上层业务提供传送能力。TCS 是一个基于 ITU-T Q.931 建议的采用面向比特的协议，它定义了用于蓝牙设备之间建立语音和数据呼叫的控制信令 (Call Control Signalling)，并负责处理蓝牙设备组的移动管理过程。

3. 高端应用层

高端应用层位于蓝牙协议栈的最上部分。一个完整的蓝牙协议栈按其功能又可划分为四层：核心协议层 (BB、LMP、LCAP、SDP)、线缆替换协议层 (RFCOMM)、电话控制协议层 (TCS-BIN)、选用协议层 (PPP、TCP、TP、UDP、OBEX、IrMC、WAP、WAE)。而高端应用层是由选用协议层组成。选用协议层中的 PPP(Point-to-Point Protocol) 是点到点协议，由封装、链路控制协议、网络控制协议组成，定义了串行点到点链路应当如何传输因特网协议数据，它要用于 LAN 接入、拨号网络及

传真等应用规范；TCP/IP（传输控制协议/网络层协议）、UDP（User Datagram Protocol 用户数据报协议）是三种已有的协议，它定义了因特网与网络相关的通信及其他类型计算机设备和外围设备之间的通信。蓝牙采用或共享这些已有的协议去实现与连接因特网的设备通信，这样，既可提高效率，又可在一定程度上保证蓝牙技术和其它通信技术的互操作性；OBEX（Object Exchange Protocol）是对象交换协议，它支持设备间的数据交换，采用客户/服务器模式提供与 HTTP（超文本传输协议）相同的基本功能。该协议作为一个开放性标准还定义了可用于交换的电子商务卡、个人日程表、消息和便条等格式；WAP（Wireless Application Protocol）是无线应用协议，它的目的是要在数字蜂窝电话和其它小型无线设备上实现因特网业务。它支持移动电话浏览网页、收取电子邮件和其它基于因特网的协议。WAE（Wireless Application Environment）是无线应用环境，它提供用于 WAP 电话和个人数字助理 PDA 所需的各种应用软件。

蓝牙设备的 RF 测试

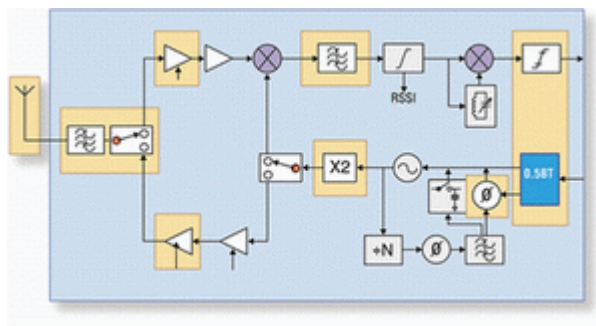
蓝牙设备工作于 ISM 频段，通过高斯频移键控(GFSK)数字频率调制技术实现彼此间的通信，设备间采用时分复用(TDD)方式，并使用一种极快的跳频方案以便在拥挤波段中提高链路可靠性。

对蓝牙设备来说，RF 部分是主要测试内容之一。

蓝牙射频设计采用了多种系统体系结构，既有传统模拟调制基于中频的系统，也有基于数字 IQ 调制器/解调器配置的系统，但无论采用哪种设计配置，在产品开发过程中都必须解决下面的问题：

- 全球各地法规要求
- 蓝牙认证
- 简单高效制造测试
- 与其它厂商产品的良好兼容性

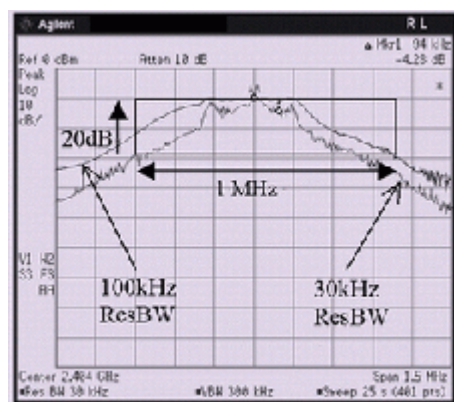
蓝牙射频技术



蓝牙设备工作于 ISM 频段,通常是在 2.402GHz 至 2.48GHz 之间的 79 个信道上运行。它使用称为 0.5BT 高斯频移键控 (GFSK) 的数字频率调制技术实现彼此间的通信。也就是说把载波上移 157kHz 代表“1”，下移 157kHz 代表“0”，速率为 100 万符号(或比特)/秒，然后用“0.5”将数据滤波器的-3dB 带宽设定在 500kHz，这样可以限制射频占用的频谱。

两个设备间通过时分复用(TDD)方式通信，发送器和接收器在相隔时段中交替传送，即一个挨着另一个传送，此外还采用了一种极快的跳频方案(1,600 跳/秒)，以便在拥挤波段中提高链路可靠性。美国联邦通信委员会预计波段利用率将不断增加，因此可靠性是最基本的要求。

在图 1 所示的蓝牙结构中，接收器仅采用一次下转换，这类设计使用一个简单的本地振荡器，输出经过倍频，并在接收器和发送器间切换。FSK 允许直接 VCO 调制，基带数据通过一个固定时间延迟且无过冲高斯滤波器，而脉冲整形仅用于发送器中，锁相环(PLL)可用采样-保持电路或相位调制器解除基带内的相位调制。通常中频相当高，以限制滤波器元件的物理尺寸，使中频远离 L0 频率，确保足够的镜像抑制。如果电平过高造成接收器输入过载，则应使用天线开关。



测试项目

下面介绍一些适用于蓝牙设备 RF 部分的测试。

功率——输出放大器是一个选件，有这种选件无疑可提升 I 类(+20dBm) 输出放大器的输出功率。虽然对电平精度指标不作要求，但应避免过大的功率输出，以免造成不必要的电池耗电。

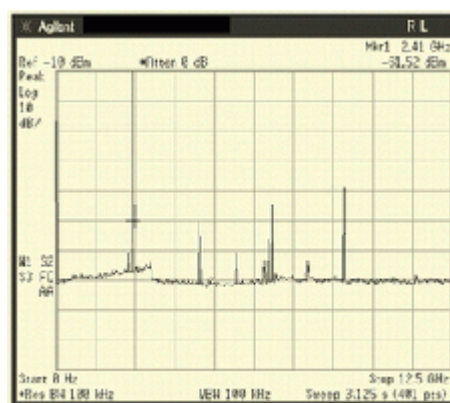
无论设计提供的功率是+20dBm 还是更低，接收器都需要有接收信号强度指示，RSSI 信息允许不同功率设备间互相联系，这类设计中的功率斜率可由控制放大器的偏置电流实现。

与其它 TDMA 系统如 DECT 或 GSM 不同，蓝牙频谱测试并不限于单独的功率控制和调制误差测试，它的测量间隔时间必须足够长，以采集到斜率和调制造成的影响。在实际中这不会影响认证，时间选通测量由于能迅速确定缺陷，具有很高的价值。有些设计在调制开始前使用未经指定的周期，这通常用于接收器的准备。

频率误差——蓝牙规范中所有频率测量选取较短的 4 微秒或 10 微秒选通周期，这样会造成测量结果的不定性，可从不同的角度进行理解。首先，窄的时间开口意味着测量带宽截止频率较高，会把各类噪声引入测量；其次应考虑误差机制，如在短间隔测量中，来自测量设备的量化噪声或振荡器边带噪声将占较大百分比，而较长测量间隔中这些噪声影响会被平均掉。因此设计范围要考虑这一因素，它应超过参考晶振产生的静态误差。

频率漂移——漂移测量将短的 10 位相邻数据组和跨越脉冲的较长漂移结果结合在一起。如果在发送器设计中用了采样-保持设计，就可能出现这一误差。对其它类型设计，在波形图上可观察到像纹波一样的有害 4kHz 至 100kHz 调制成分或噪声，表明了它可作为另一个方法确保很好地将电源去耦合。

调制——在发送路径中，图 1 中的 VCO 被直接调制，为避免 PLL 剥离带宽内调制成分，可让传输器件开路或使用相位误差校正(两点调制)。采样-保持技术应该是有效的，但需注意避免频率漂移。除非使用数字技术调整合成器的分频比，否则应校准相位调制器，以免出现不同数据码型调制的响应平坦度低的问题。



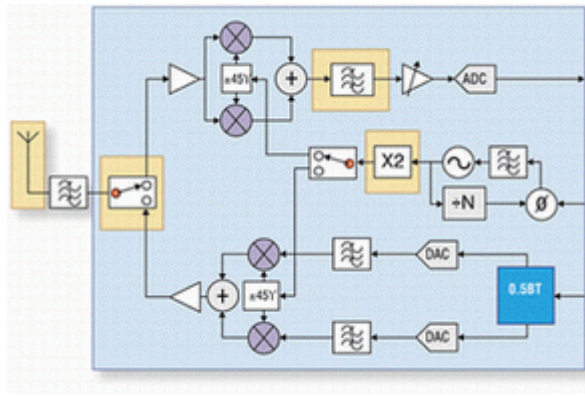
蓝牙 RF 规范要检查 11110000 和 10101010 两种不同码型的峰值频率偏移，GMSK 调制滤波器的输出在 2.5bit 后达到最大值，第一个码可检查这一点，GMSK 滤波器的截止点和形状则由第二个码检查。在理想情况下，1010 码峰值偏移为 11110000 的 88%，某些设计的发送未施加 0.5BT 高斯滤波而会显示更高比值。最高基本调制频率为 500kHz，此时的比特率为 100 万符号/秒。

带内频谱——20dB 测试可确认调制和脉冲信号的确在 1MHz 宽的波段中，图 2 的方框可以看作是极限范围，通过设置 10kHz 分辨率带宽可实现这一要求，因幅值具有脉冲特性而使用峰值保持法进行测量。通过频率宽度测试而不仅仅是固定模板测试，该方法能使波形偏离精确的中心频率，效果与信号模板内对中非常类似，图中隆起部分由数据包报头的非数据白化零造成。

邻近信道测量作为系列点频测量中的一项是规定要做的，非选通扫描是快速容易的检查方法。选通有时仍被使用，尽管它是一种组合测量，这与 GSM、DECT 和 PDC 之类其它 TDMA 系统测量有所不同。

带外频谱——倍频是通常用来防止 RF 通过耦合返回 VCO 从而拉动中心频率的一项技术，需要在 RF 输出路径中消除次级谐波，特别当它们可能危及相关站点时，如 L2 频率为 1,222.7MHz 的 GPS 接收器或蜂窝无线设备功能。

图 3 显示了设备的一个信号，它不存在次级谐波，但会产生超过 9GHz 的谐波，这正是标准频谱分析仪能进行的测量。对于研究工作来说，虽然可使用更快的扫描时间，但仍要好几秒。如果选择长扫描时间，则需要用具有深数据捕获缓冲器的新型频谱分析仪，这类仪器能对特定感兴趣的点作扫描后的放大。



有些设计转而在发送和接收路径都有 IQ 混频，这种方法可提高电路集成度，将信号处理转成数字信号处理，而去除模拟电路。图 4 显示了一些混合电路方法，某些设计可在前端增添镜像抑制混合，目前硅片技术更高的集成度也使这种做法更为经济。

所有这些的 IQ 级校准都需要仔细考虑，已发表很多关于雷达和蜂窝应用的技术文章介绍了所使用的序列和信号。RF 输出直接应用 IQ 调制可能会对信号造成重大影响，但调制器未对准频率误差则不会造成影响，因为频率仅仅是相位改变率，不过也许难以在频谱上鉴别出误差。

IQ 调制误差意味着存在幅度调制，可用功率-时间显示进行检测，或用矢量分析仪做详细调查。IQ 调制器也可用来整形功率斜坡，这再次说明了选通测量的价值。在接收链所有测量进行之前，还有些数字处理需要测量误码。另外可能出现零中频系统，可由查找接收器混频器输出和 ADC 输入之间的 DC 块识别。像 LO-RF 反馈这类非理想情况会产生随输入频率改变的直流成分，需要认真予以处理。另外边带抑制也是一个问题，这里有个速算公式，即 0.1dB 增益误差或 1 度相位误差将使边带降低约 40dB。

分析 IQ 波形——矢量分析仪本身就能解调各种各样信号，尽管直接应用 FSK 也许不能涵盖更复杂的情况，但在 IQ 设计过程中可能要考虑其它制式，如蓝牙 2、蜂窝技术或 LAN。

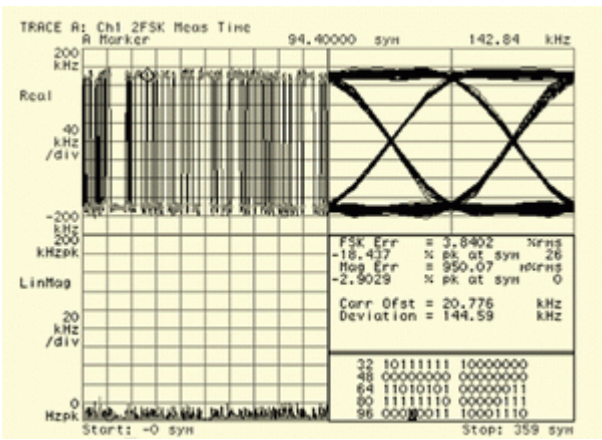
为了解设备的性能，具备多角度分析能力十分重要，图 5 显示了以四种方法观察相同数据的结果。偏差观察为正确码型调制提供快速直观确认，眼图和 FSK 误差可显示调制质量，而解调数据观察则使用户能检查前同步码、报头、同步字和有效载荷数据的存在。

设计模拟——更高级的集成关注于模拟工具，这些工具不仅能迅速评估不同电路的拓扑结构，更有先进的工具把各种有效和受损信号注入接收器。

最近有两种非常有利于产品开发的进展，第一是数字信号发生器和矢量信号分析块的集成，它提供了模拟和实际测试间的相互交换，软件产品与物理仪器链接能在原型交付时立即比较结果。第二是可以使工具设置自动化的设计指南，让用户能更好地用设计软件评估实际电路，而不必在基本配置信息中根据特定无线技术编写程序。

接收器测试——图 1 中的鉴别器是一个混频器/调谐电路，它是一个直通器件，但也需要进行校准。在设计特性描述过程中，一定要注意某些结果的非正态(高斯)分布。

由于调谐电路/混频器的相位/频率特性，这种电路的价值是很有限的。延迟线鉴别器是另一种可能的选择，但也需要经过校准。



前端放大器设计和测试关注的是干扰，而不是最好的噪声系数，或 1dB 压缩特性。已公开的很多技术能通过接收器链动态改变增益，优化对有害信号的抑制。也可对信号发生器使用同步脉冲幅度调制，这种测试对 AGC 系统特别是当系统由软件控制时的脉冲间响应很有用。

测试接收器跳频——如前所述，所有蓝牙设计中都会采用的元件是简单的本地振荡器，其边带效应会在全部调谐范围造成小于 300 微秒的时滞，当设备工作于蓝牙测试模式时也必然产生这一效应。

在发送期间，必须在 ISM 频段的接收测试频率或以其它任意点为中心的另一端选择一个频率，VCO 每次都使转换跳回到接收器频率。每一脉冲都可用于数据传输，因此可使用连续序列，从而在使用跳频源时无需进行跳频 BER 测试。虽然可以这样做，但在使用链路信号之前用户必须安排好对信号发生器和被测设备的同时控制。一旦比特转换成数字格式就可进行 BER 测试，表 1 列出了几种可行的测试方法。

蓝牙收发器 IC 测试

Nelson Lee T K

蓝牙规范的第一个正式版本 1.0 版已于 1999 年 7 月发布，之后许多厂商都推出了支持蓝牙产品的高性价比集成电路芯片。随着蓝牙产品越来越普及，制造商需要以较低的成本完成大量测试工作。本文针对蓝牙射频前端收发器，着重介绍蓝牙技术规范中定义的各类测试参数。

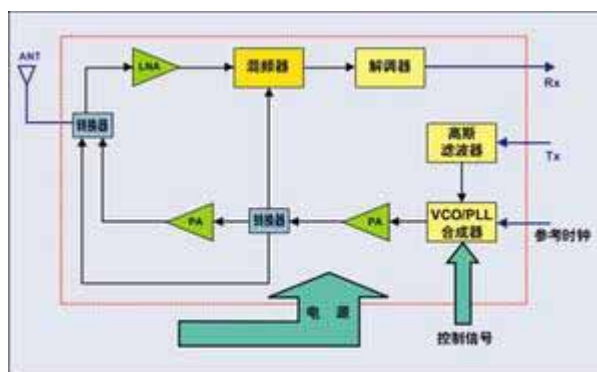
今天的电子工程师几乎没有人没听说过“蓝牙”的概念，这个词出自公元 10 世纪丹麦国王 Harald Blaatand，他为了联系他的臣民曾在挪威和丹麦建立了一个通信系统。开发蓝牙技术是为了使个人数字助理(PDA)、移动电话外设及其它移动计算设备不必使用昂贵的专用线缆就可以进行通信，正因为此，蓝牙又被称作“个人区域网络(PAN)”。对蓝牙产品来说，最基本的要求是低价格、高可靠性、低能耗和有限工作范围。

最初蓝牙定义为采用全球适用的 2.4GHz ISM 频段进行短距离通信(10 至 15 米)，不过最近芯片制造商的不断提高使蓝牙技术远远超出当初的设计水平，一些 OEM 制造商希望能在 20 到 30 米办公室环境和 100 米开放环境下使用蓝牙技术，他们期待将蓝牙作为网络连接技术，使笔记本电脑用户通过无线接入点进入到局域网中。

蓝牙技术由 4 个主要部分组成，分别是应用软件、蓝牙栈、硬件和天线，本文针对硬件和射频前端收发器，重点介绍蓝牙技术规范中定义的各类测试参数。

蓝牙收发器

对集成 RF 收发器的测试要求可以典型的 RF 蓝牙原理框图(图 1)来说明。

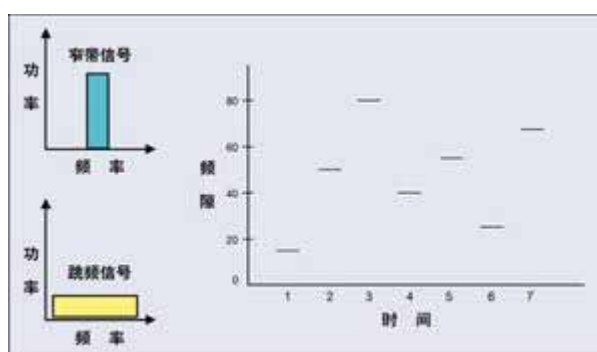


◆蓝牙发射器 蓝牙无线信号采用高斯频移键控 (GFSK) 方式调制，发射数据 (Tx) 通过高斯滤波器滤波后，用滤波器的输出对 VCO 频率进行调制。根据串行输入数据流逻辑电平，VCO 频率会从其中心频率向正负两端偏离，偏移量决定了发射器的调制指数，调制的信号经放大后由天线发射出去。

蓝牙无线信号在半双工模式下工作，用一个 RF 多路复用开关(位于天线前)将天线连接到发射或接收模式。

◆蓝牙接收器 与设备接收部分相似，从另一个蓝牙设备发射来的 GFSK 信号也是由天线接收的。在这期间，开关与低噪声放大器 (LNA) 相连，对接收到的信号 (Rx) 进行放大。下一级混频器将接收信号下变换到 IF 频率(一般为几 MHz)，进行该步骤时用于发射的 PLL/VCO 部分作为接收器下变频本机振荡器使用，将 IF 信号解调并恢复出数据。

扩展频谱



蓝牙无线通信的一个独特之处就是它使用了扩频技术，该技术原来是为军事应用开发的，因为军事应用中无线数据传送必须安全可靠。传统意义上的窄带应用要消耗更多功率，在一个频率上停留的时间很长，因此频谱很容易被检测到；而将发射器功率分配(扩展)到更大的带宽上之后，此时信号看起来更像随机噪声，这相当于牺牲带宽效率来换取可靠性和安全性。由于功率密度较低，这些系统对其

它信号接收器干扰小,而且即便存在信号丢失频段,数据也可以在其它频率恢复,从而增强了对干扰和噪声的抵抗能力。两种最主要的扩频形式是跳频(FHSS)和直接序列(DSSS),用原始数据对载波进行调制并使用与每个链路端点跳频代码一致的频率范围发射时(图 2)使用 FHSS 系统。采用这种方式后,由于某个频率干扰而丢失的数据可以通过另一个频率发射,FHSS 中的扩展代码生成器直接用 GFSK 调制技术对载波频率进行调制。

GFSK 调制

GFSK 是一项调制技术,它在一个比特持续时间内由数据线性修改载波周期部分载波频率,频率变换速率是数据率的函数,频率变换大小是数据幅值的函数,它们之间的相互关系以调制指数 β 来表示。

FSK 信号调制指数 β 由下面公式计算:

$$\beta = 2 \Delta f / f_i$$

此处 f_i 是以赫兹表示的数据频率(对蓝牙来说典型值为 1MHz), Δf 是载波的频偏。

如果选择 140kHz 作为蓝牙载波频偏,那么:

$$\beta = 2 \Delta f / f_i = 280 \text{ kHz} / 1 \text{ MHz} = 0.28 \text{ 且}$$

$$\text{FFSK} = A \cos(2 \pi f_c(t) + 0.28 \pi \int m(t) dt)$$

这里 A 是数字数据的振幅, $m(t)$ 是持续一个比特时间且直流电平为 ± 1 的数字数据。

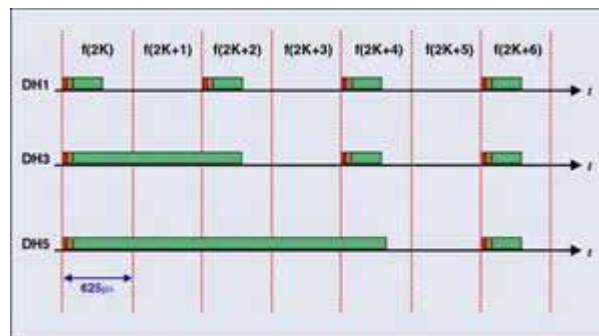
可以用灵敏度为 140kHz/V 的压控振荡器作为 FSK 调制器,其 $\beta = 0.28$,通常要让输入数据流经过限制器以确保电路频差为 140kHz。

载波频偏(发射模式)取决于输入数据流的振幅,反过来也一样成立,解调后载波的数据振幅是载波偏差(接收模式)的函数,这一点对系统误码率(BER)是很重要的。

BER 是每个发射比特相对于每比特所包含噪声功率的函数,它们之间关系用 E_b/N_o 表示,即每个比特的功率噪声比。可通过减少接收器噪声或提高发射功率来改善 E_b/N_o ,也可提高每个发射比特的功率改善 E_b/N_o 。提高载波频偏能增加每个发射比特的功率,从而提高 E_b/N_o 并降低比特出错率;但其负面影响是提高频偏会导致增加频宽,降低系统的信道数量。

有效的通信要求有一个最小误码率，蓝牙技术指标规定为在 -72dBm 时 BER 为 0.1%，即每 1,000 比特的数据流中有 1 个错误。一致性规范要求测得的灵敏度(作为 BER)在三个频率上超过 160 万比特，由于该项测试使用标准单隙(DH1)数据包进行，至少需要 25 秒，所以为节约时间，实际应用中即使频率数量减少，也只测量较少比特数。

蓝牙收发器测试规范



蓝牙标准对 RF 载波调制数据要求规定如下：

- 调制方式： 高斯频移键控 (GFSK)
- 高斯滤波器： 0.5
- 输出功率： 0dBm 和 +20dBm
- 数据速率： 1Mb/s
- 信道带宽： 1MHz
- 频偏 (Δf)： 140kHz ~ 175kHz (调制指数 0.28 ~ 0.35)
- 误码率 (BER) 灵敏度： 0.1% @ -72dBm

蓝牙定义将 1mW 或 0dBm 作为标称系统，发射功率峰值不超过 20dBm，这样设计是为了进行短程操作且不会干扰其它无线系统，在 1MHz 带宽(载波间隔为 1MHz)使用高斯滤波频移键控 (GFSK) 调制。美国和欧洲(法国与西班牙除外)有 79 个 1MHz 信道，法国、西班牙和日本在 2.4GHz 范围仅有 23 个 1MHz 信道。

图 3 显示了 7 个连续时间间隔使用 DH1、DH2 和 DH5 包的包时序协议，由于发射和接收包长度都相同，所以 DH1 有一个对称链接，收发器在偶数时间间隔发射数据而在奇数时间间隔接收数据。DH3 使用 3 个时间间隔，DH5 用 5 个，DH3 和 DH5 包的有效载荷比较长，由于协议的开销是固定的(存取编码+报头)，所以可提供更高数据流量。

对于发射器来说，以下是一些比较重要的测试参数：

- 调制载波功率
- -20dB 带宽
- 载波频率容差
- 发射器频率偏移
- 调制指数
- 发射器设置时间
- 发射器邻信道泄漏功率

工序，能满足要求且最经济的方法就是在非常短的时间内完成各种测试，自动测试设备 (ATE) 是提供经济测试方案的最佳选择。测试仪器必须具备高质量前端设计并具有足够的灵活性以满足各种测试要求，测试仪的 RF 信号源设置时间应比被测设备的更短，数字子系统则必须先进以适应混合信号 RF 设备严格的数字性能要求。另外测试仪器还应有高速、高分辨率 DSP 器件，以便从蓝牙器件和功能强大的 DSP 引擎获取信号，满足每次测试的处理需求。