

2.4GHz无线收发器IC及其应用

黄一鸣 贾波 徐群山
博通集成电路（上海）有限公司

概述

随着信息技术的飞速发展和人们对高速率无线通讯的需求，无线应用产品的工作频率已经从低频段跨入高频段。作为全球均无需授权即可使用的 2.4 GHz ISM 频段成为众多无线高端产品首选频段，譬如蓝牙，WLAN，ZigBee 等。博通集成电路公司的 2.4GHz 无线收发器 BK2421 采用高达 2Mbps 的通讯速率和独特的通讯协议，不但保持了 2.4 GHz 频段其他通讯协议优良的射频性能，而且简化了产品设计，节省了产品开发成本，降低了产品功耗，是国内唯一一颗达到世界先进水平的 2.4GHz 无线收发器。本文详细介绍了这一收发器产品性能和特点并在最后给出了基于 BK2421 所完成的 PC 周边设备方案（包括无线鼠标键盘、无线遥控等），汽车无线防盗和马达自动起动方案和移动支付 RFID 子系统方案。

BK2421 性能和特点

BK2421 基本性能和特点

BK2421 是一颗工作在全球开放 2.4GHz ISM 频段的单芯片无线收发器，集成了无线射频收发前端、频率综合器、数字调制解调器、1 对 6 星形通信协议以及电源管理。相比其他 2.4GHz 短距离无线通信技术（如蓝牙，WiFi 等），它以非常低的功耗实现高速率无线传输（最高可以达到 2Mbps），接收器正常工作电流为 17mA，发射器输出功率 0dBm 的电流为 14mA，关机状态电流为 3uA。

BK2421 集成两种调制方式，分别为CPGFSK调制（Continuous Phase Gaussian Frequency Shift Key，相位连续高斯频移键控）和CPFSK调制（Continuous Phase Frequency Shift Key，相位连续频移键控）。其频谱如图 1所示，其中BT为 3dB 带宽和 传输速率的乘积（3-dB bandwidth-symbol time）。

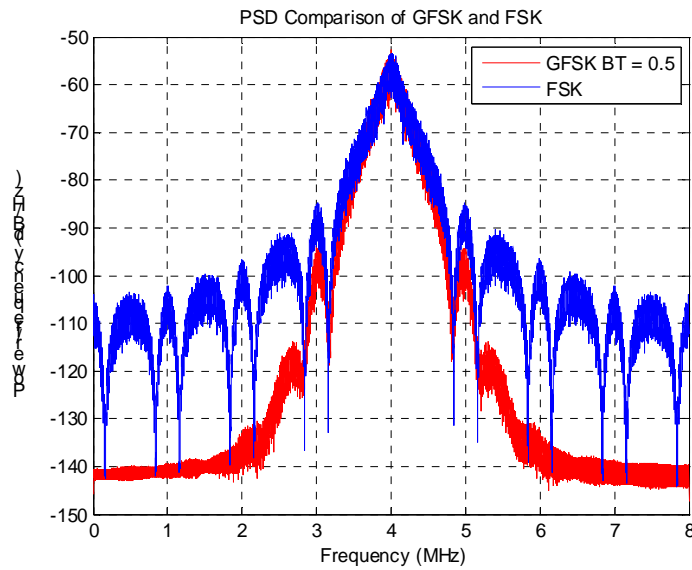


图 1 : CPFSK 和 CPGFSK 调制频谱

CPFSK 调制方式可以显著提高芯片灵敏度。另外 BK2421 还支持调制频偏可调节，从而便于用户根据具体情况调节这些参数来提高通信距离。下面通过模型仿真和测试结果验证这种功能。

模型和测试条件: BT=0.5, fb=1Mbps, 两种调制频偏分别为 160KHz 和 300KHz, 接收器中频带宽 1.1MHz。

仿真了两种不同调制频偏下各自的BER（Bit Error Rate，误码率）与SNR（Signal Noise Rate，接收器输入信噪比）关系，如图 2所示：

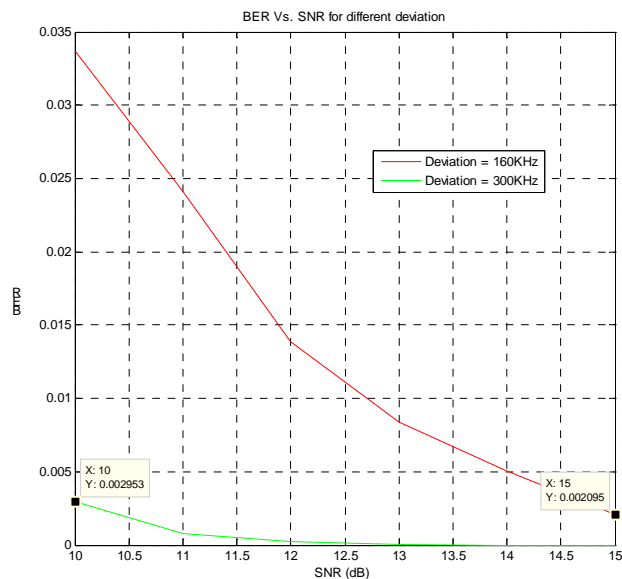


图 2：两种调制频偏下的BER和SNR关系

从上图我们可以得出，输出几乎相同BER（0.0025），频偏300KHz所需要的SNR比频偏160KHz小5dB，也就是说接收器接收频偏300KHz的调制信号时的灵敏度比接收频偏160KHz的调制信号好5dB。

测试了BK2421在两种不同调制频偏下的灵敏度（对应BER=1e-3），如表格1所示。表格1 BK2421在两种不同调制频偏下的灵敏度

BT	频偏(KHz)	fb (Mbps)	灵敏度(dBm)
1	300	1	-88.7
1	160	1	-82.8

从上表我们可以看出，测试结果跟仿真结果基本一致。

由于FCC 15.247、249和ETSI 300 328规范了2.4GHz的频谱要求，我们不能无限增加调制频偏。BK2421根据一般应用情况优化调制方式和频偏，达到最佳灵敏度，同时满足上述两个规范要求。

BK2421 抗干扰性能

2.4 GHz 频段上存在众多的无线应用产品，如何确保信息发送接收在干扰状态下保持连续性就很重要。我们以常用无线鼠标为例，假定每个包长度为 150bits，鼠标按键响应时间为 10ms，通讯速率为 1Mbps。每个包传输时间为 150us。

为了详细分析 BK2421 如何在干扰下仍然保持通讯连续性，我们按照干扰特点将干扰源分为如下四种：

采用直序列扩频技术的产品（如 WLAN）

采用跳频技术的产品（如 Bluetooth）

采用低速率的产品

采用 BK2421 1 对 6 星形通信协议的产品（如采用 BK2421 组网系统）

抗 WLAN 干扰

由于 WLAN 采用直序列扩频技术，根据 FCC 规范其在偏离载波 22MHz 以外的发射功率小于 -30dBm，考虑到 BK2421 一般发射功率为 0dBm，偏离载波 22MHz 以外的 WLAN 不影响 BK2421 的通讯，这样我们至少有 $125 - 2 \times 22 = 81\text{MHz}$ 不受 WLAN 干扰影响。BK2421 内部集成干扰检测功能可以在 81 个信道选择一个信道正常通讯。

抗 Bluetooth 干扰

Bluetooth 工作频率范围为 2.4~2.4835MHz，采用跳频技术，每次在一个信道占用时间为 625us。BK2421 内部集成自动重发丢失的数据包的功能，用户可以设置重发等待时间，为了避开 Bluetooth 干扰，我们可以设置重发时间大于 625us，如图 3 所示，可以避开 Bluetooth 的干扰，保证数据传输连续性。

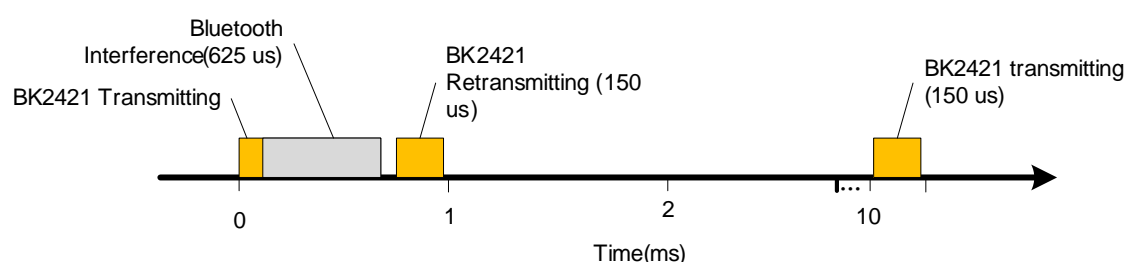


图 3: BK2421 抗 Bluetooth 干扰数据传输图

抗低速率无线产品干扰

由于低速率无线产品占用信道时间很长，BK2421 内部集成干扰检测功能从而可以切换到没有干扰的信道上继续通讯。另外 BK2421 每个包传输时间为 125us，远低于 10ms 鼠标切换时间，受到低速率干扰的概率变得非常小。

抗 BK2421 组网系统中的干扰

BK2421 支持 1 对 6 星形通信协议，可以同时接收六路无线设备数据，这样的典型应用是个人 PC 配有无线键盘、无线鼠标、无线遥控器、无线耳机、无线游戏手柄和无线音箱。PC 和无线鼠标的通讯会受到其他 5 个设备的干扰，考虑一次重发，受到干扰的概率为 $5 \times 2 \times 150\text{us} / 10\text{ms} = 15\%$ 。如果通讯速率提高到 2Mbps，受到干扰的概率降低一半（7.5%），显然受干扰概率远低于传统低速率的无线方案（如采用 9.6Kbps）。另外 BK2421 内部集成异步搜索频率，即当检测到干扰后，组网内不同设备重新选择频率的步长不一样，保证各个设备之间都能够找到没有干扰的频率进行通讯。

抗干扰性能总结

从上面分析我们可以得出，BK2421 的高速率通讯大大降低受到干扰的概率，同时内部集成干扰检测功能和异步搜索频率等算法进一步降低干扰的概率。一般情况下，采用 BK2421 的无线产品能够不受干扰的影响，完全保持通讯连续性。BK2421 与采用另外三种 2.4 GHz 通讯协议的产品性能比较

BK2421 内部集成 1 对 6 星形通信协议，简化了协议和软件设计，它与采用另外三种通讯协议的产品基本性能对比如下表所示：

表格 2 BK2421 与采用另外三种通讯协议的产品基本性能比较

	BK2421	Bluetooth	WLAN(2.4GHz)	ZigBee	Units
Frequency	2.4	2.4	2.4	2.4	GHz
Modulation	FSK/GFSK	GFSK/DQPSK	FSK/DQPSK	QPSK	NA
Data Rate	1/2	1	1/2/11	0.25	Mbps
Channel Number	125	79	11/13	16	NA
Supported Network Types	Star Pear-to-Pear	Pear-to-Pear	Star Pear-to-Pear	Star Pear-to-Pear	NA
Communication Range	10~100	10~100	10~100	10~50	m
MCU resources	0	250	>250	28	Kb

从上表我们可以看出，BK2421 无线通讯性能如通讯速率，通讯距离等跟采用另外三种通讯协议的产品性能不相上下，甚至某些性能更优。由于 BK2421 采用自己独特的通讯协议，无须为了满足特定的协议而增加额外的设计，所以它根据实际需求而优化了整个芯片设计，降低了产品复杂度，另外高达 2Mbps 的通讯速率大大减小了每个数据包的发射时间，从而降低了功耗，同时 BK2421 采用低中频接收架构和锁相环发射架构，进一步降低产品功耗。相比采用另外三种协议的产品，基于 BK2421 所完成的短距离无线产品实现简单，成本低廉，功耗极低。

图 4 给出了BK2421 与采用另外三种协议的产品功耗和复杂度比较，显然 BK2421 在功耗和复杂度都具有明显的优势，更加符合短距离无线产品市场对功耗和实现复杂度越来越低的要求。

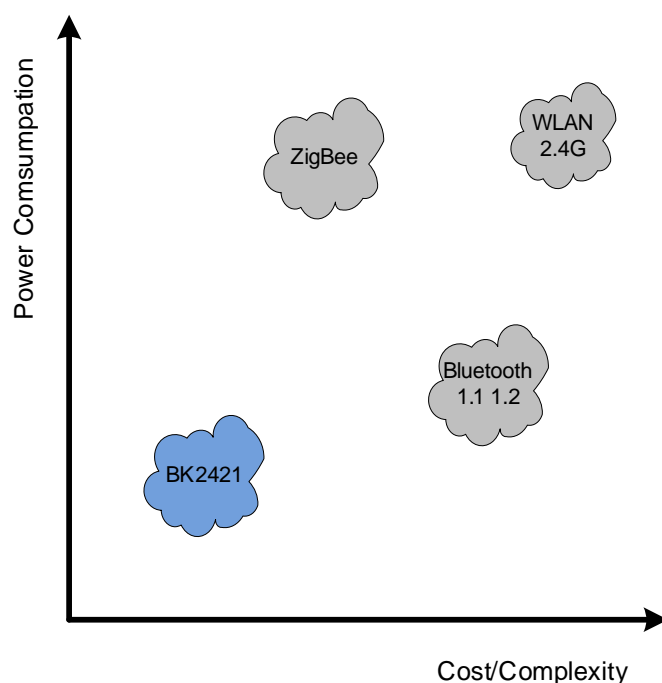


图 4： BK2421 与采用另外三种协议的产品功耗和复杂度比较图

BK2421 在无线短距离产品中的应用

PC 周边设备方案

PC 周边设备的丰富，满足了人们的休闲需求，连接线的繁杂和 PC 的插口过多被占用却成了美中不足，使用 BK2421 就可以解决这些问题。

由于每一块BK2421 都可以设置 6 个接收地址，使其具有 6 发 1 收的能力，图 5 中，在PC上连接BK2421 接收设备可以收到带有BK2421 发射器的外设键盘、鼠标、写字板、遥控器等的数据。

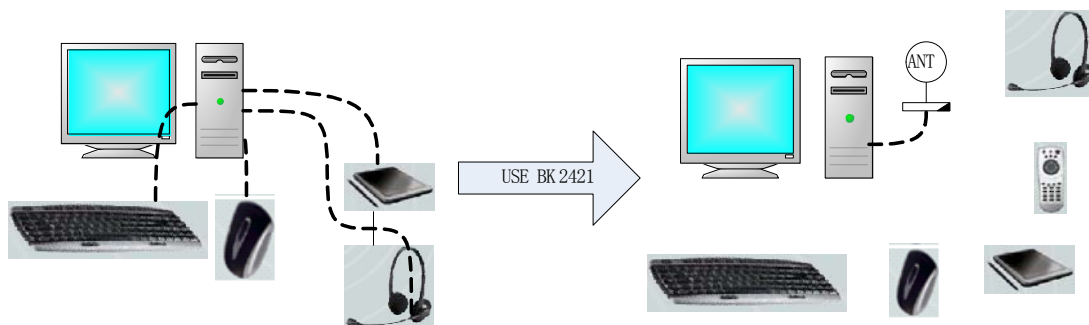


图 5: PC 周边设备从有线到无线

PC周边设备的无线化实现框图如图 6(TX端)、图 7 (RX端) 所示。

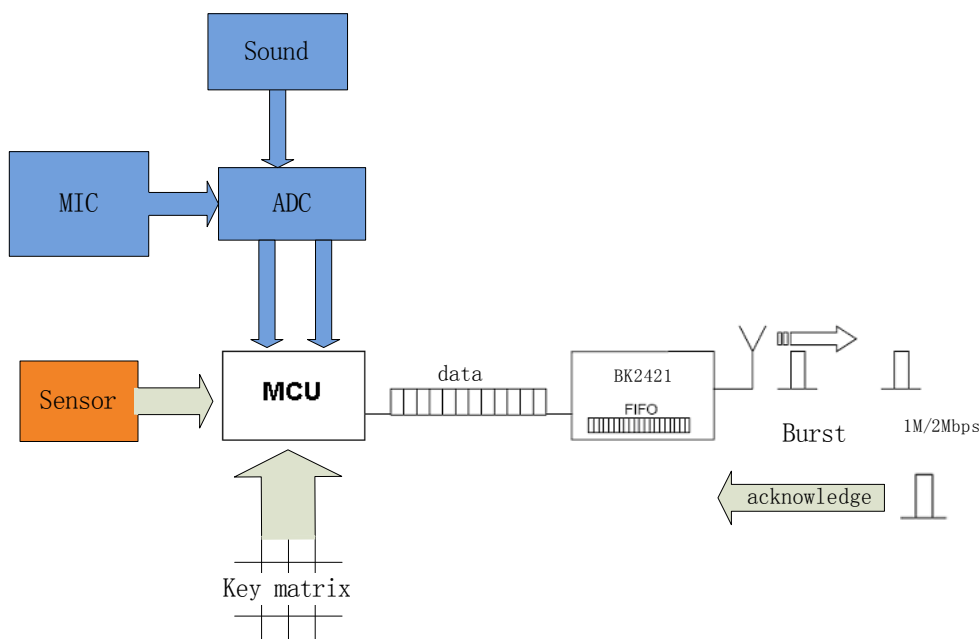


图 6: PC 周边设备TX 端（鼠标、键盘、遥控器手写板、MIC、音源.....）

PC 周边设备 TX 端包括鼠标、键盘、手写板、遥控器，其主要数据为光电感应、按键矩阵、触摸板矩阵，MCU 将收到的数据填入 BK2421 FIFO，BK2421 将数据通过 FSK 调制到 2.4G，以 Burst 的形式发出。接收机收到数据后，会对发射机进行反馈（Acknowledge），当发射机没有收到 Acknowledge 时，对前面所发的数据进行重发。

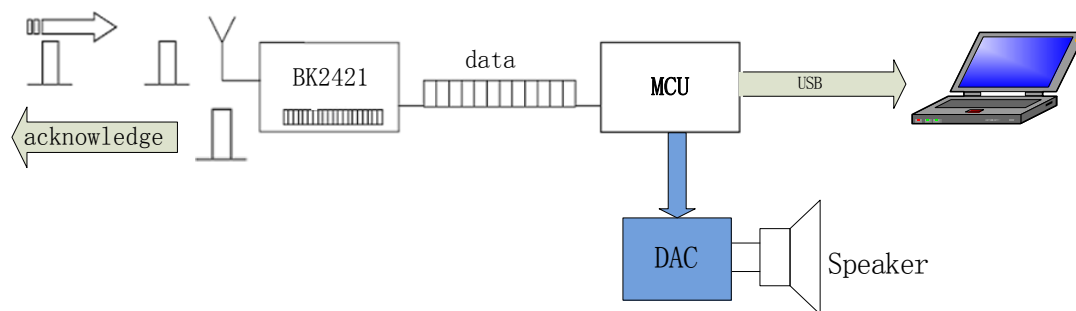


图 7: PC 周边设备RX 端 (USB Dongle、Speaker)

PC周边设备RX端为USB Dongle，BK2421 将收到的不同地址TX端的数据解调，发送给MCU，并同时发送Acknowledge给TX端，MCU在通过USB来控制PC做出响应。图 6、图 7中蓝色通路为音频通路，TX端需要将音源（PC、音响、CD机、MP3、收音机.....）通过ADC转化为数字信号传输给BK2421，而RX端BK2421接收到的数据通过DAC将模拟信号发送给Speaker、earphone来发声。

BK2421 在 PC 周边设备的应用中，电流消耗相比传统协议要低数百倍，因此电池寿命可以提高 15 到 200 倍。

汽车无线防盗和自动马达启动方案

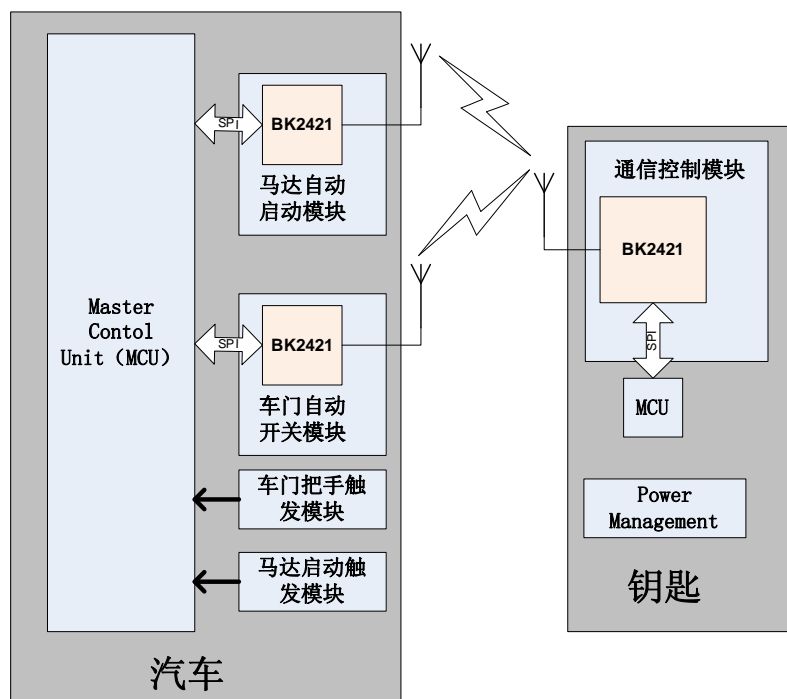


图 8: 汽车无线防盗和自动马达启动框图

如图 8所示，左侧为汽车框图，包括主控制器(Master Control Unit) 、马达自动启动模块、车门自动开关模块、车门把手触发模块和马达启动触发模块。右侧为钥匙框图，包括通信控制模块、MCU和电源控制模块等。当车主进入汽车有效范围并启动车门开启按键时，钥匙上MCU通过SPI控制通信控制模块中BK2421来检测车门自动开关模块中BK2421 发出的射频信号大小，一旦其大小满足系统通讯要求，通信控制模块和车门自动开关模块通过各自的BK2421 互相传输数据以进行身份认证，如果身份认证成功，汽车上的主控制器就启动车门把手触发模块，打开车门。同样车主启动马达自动启动按键后，钥匙上MCU通过SPI控制通信控制模块中BK2421 来检测马达自动启动模块中BK2421 发出的射频信号大小，一旦其大小满足系统通讯要求，通信控制模块和马达自动启动模块通过各自的BK2421 互相传输数据以进行身份认证，如果身份认证成功，汽车上的主控制器就启动马达启动触发模块，开动汽车。

由于 BK2421 高速率通讯和抗干扰特性保证车主能够在非常短时间内顺利完成无钥匙开门或点火的过程。另外，BK2421 低功耗可以最大程度地降低整个系统功耗，一般装有一颗 3.6V，容量 300mA 纽扣锂电池的钥匙可以工作长达五年。

移动支付 RFID 子系统方案

移动支付和 RFID 子系统

当前物联网正在全球尤其是中国掀起一股产业化的热潮，其中的移动支付业务更是被中国三大电信运营商视为杀手级业务。移动支付是消费者使用手机、PDA 等移动终端对所消费的产品进行账务支付的一种服务方式，它包含支付开始、支付认证和支付确认等相关流程。由于无线技术的飞速发展，现在移动支付都采用非接触式移动支付方案。它是由接入系统、认证中心、移动支付平台、应用服务提供商和无线通信网络，共五部分组成。图 9是移动支付系统框图。

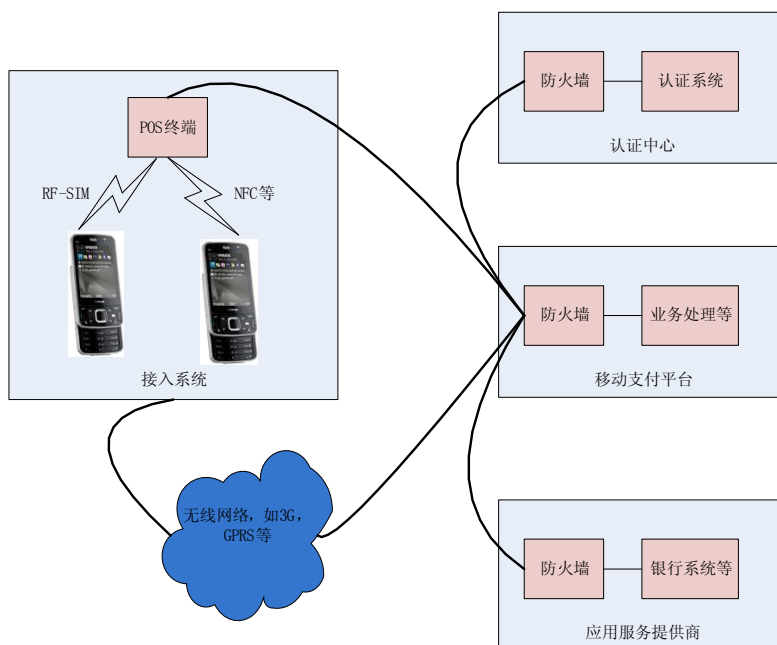


图 9：移动支付系统框图

本文从 RFID 设备产商的关注点出发主要研究移动支付中 RFID 系统，所以下面只详细介绍接入系统及其 RFID 子系统。接入系统包括 RFID 标签、可运行移动支付软件的手机以及可读取 RFID 的 POS 终端机。其中 RFID 卡和 RFID POS 机属于 RFID 子系统。RFID POS 机通过 RFID 技术来读取用户信息，并利用 PSTN、GPRS 等方式与移动支付平台相联接。手机用户利用手机移动支付软件通过 GPRS 网络与移动支付平台进行信息通信，完成支付。

RFID 子系统由 RFID 标签、RFID 阅读器和 RFID 应用支撑软件系统组成。RFID 标签和 RFID 阅读器之间的无线通信技术主要有 NFC(Near Field Communication, 近场通信)、SIMpass 和 RF-SIM。其中 RF-SIM 技术是将包括天线在内的 RFID 射频模块与传统 SIM 卡功能集成在一张 SIM 卡上，在实现普通 SIM 卡功能的同时也能通过射频模块完成各种移动支付。

由于 RF-SIM 采用 2.4GHz 频段完成移动支付的空中通信，具有如下优点：
传输速率高（具体速率取决 2.4GHz 收发芯片），频道多（125 个），抗干扰能力强等
通信距离远
同时支持主、被动感应
安全数据传输
与蓝牙、WiFi 无冲突

图 10 : BK2421 典型应用电路图

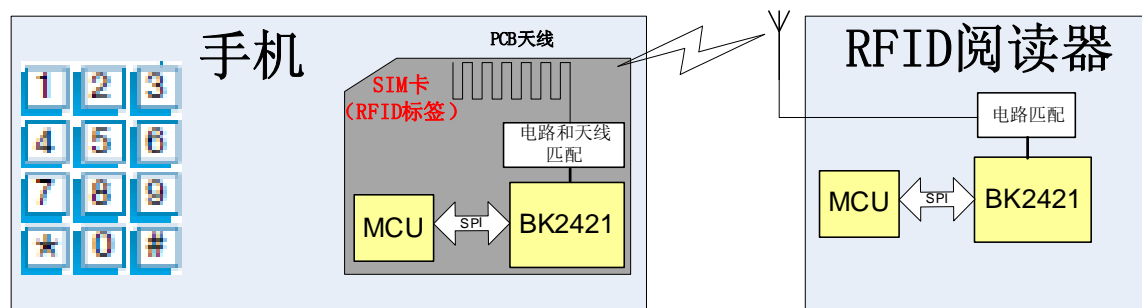


图 11：基于BK2421 的RF-SIM 硬件系统示意图

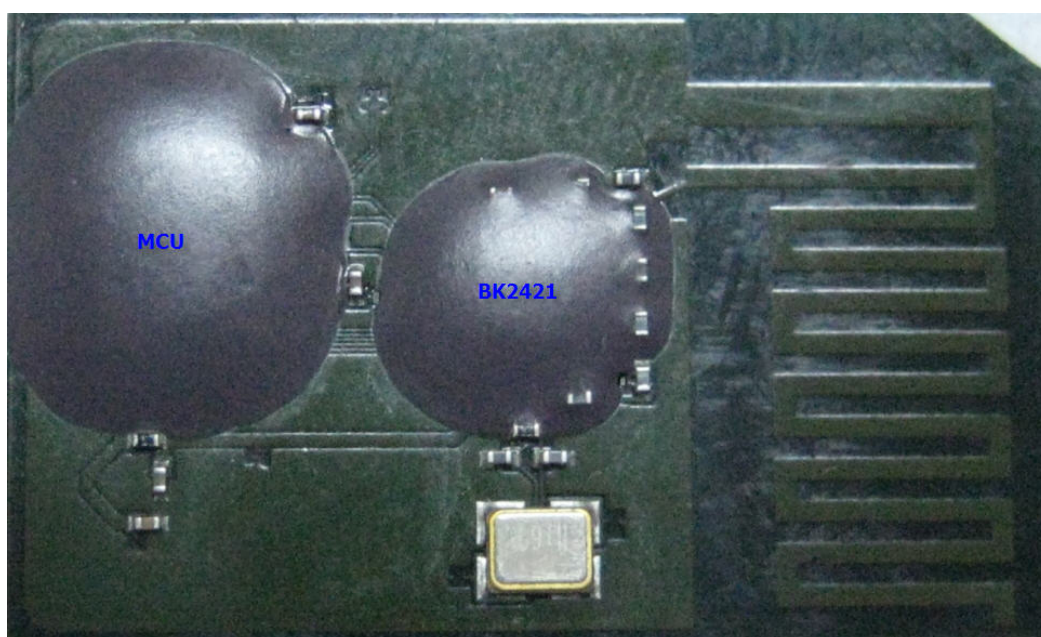


图 12：基于BK2421 的RF-SIM 卡

BK2421 同时集成 1 对 6 星形通信协议，简化了协议和软件设计，用户可以发挥其软件优势，根据需求开发自己的通信协议，以固件的方式实现基带控制器。该系统基本能够满足移动支付对 RFID 子系统的各种要求，如高传输速率、超低功耗、抗干扰能力强等。但是由于实际通信时，SIM 卡要求放置在各种类型手机中，不同手机型号对应不同无线环境，SIM 卡与读卡器互联通信距离会随着环境不同而变化。如果设计前没有考虑该因素，可能导致 SIM 卡与读卡器互联通信距离急剧缩短甚至不能满足产品要求。下面给出提高 SIM 卡在手机内与读卡器互联通信距离的三种方法。

优化 PCB 天线设计

-

由于 BK2421 内嵌在 SIM 卡中，所以其天线只能用 PCB 走线实现。一般 SIM 卡放置在手机中间，如果其上下存在金属片或者大面积走线，会导致 PCB 天线的辐射效率急剧恶化并会改变天线谐振频率。如果设计天线时没有考虑上述因素，设计出的系统通信距离会显著缩短，甚至无法通信。所以 PCB 天线设计要注意以下三点：

做到尺寸与波长相关，在相同的外围环境下使其谐振在工作频率 2.4GHz 内（外围环境不同，如有外壳等物品，其谐振条件不同）

端口易于匹配

减少损耗，即将天线尽量孤立与其它金属以外

预留天线匹配器件

由于实际天线工作环境和设计环境不一样，实际天线谐振频率可能会偏离设计目标，显然工作频点不在谐振点上会导致 BK2421 与天线之间存在比较大反射而降低传输效率，从而缩短通信距离。这时需要通过调整天线匹配器件使谐振频率重新回到设计目标 2.4GHz，具体调整可以在网络分析仪上的 Smith 图通过测试并优化输入反射系数（S11）来达到。如图 10 所示，其中 L4 和 C10 即为天线匹配器件。

优化 BK2421 调制频偏

如前文所述，增大调制频偏可以提高 BK2421 的灵敏度。BK2421 已经根据一般应用情况优化调制方式和频偏，达到最佳灵敏度，同时满足 FCC 15.247、249 和 ETSI 300 328 对 2.4GHz 频谱的规范要求。考虑到特殊情况下需要更高的灵敏度，可以通过调整调制频偏来优化灵敏度，进一步提高 SIM 卡与读卡器互联通信距离。

总结

随着信息和通讯技术的发展，无线短距离产品进入超低功耗、高通讯速率的时代。博通集成电路公司的 2.4GHz 无线收发器 BK2421 具有高传输速率、超低功耗、抗干扰能力强等性能，特别符合迅速发展起来的超低功耗无线市场需求。

当前物联网经济越来越引起世界各国的极大重视，响应温总理提出的“感知中国”的号召，物联网的投入和开发也成为我国经济发展中一个至关重要的环节。

BK2421 是目前国内唯一一款适合于 RF-SIM 并可用于手机付费的芯片。中国移动大力推动这一技术，结合 SIM Card 的方案，不依赖于手机设计和外形，从而极大地方便了手机付费业务的快速大范围推广，可以为消费者在购物，加油，

餐饮和乘坐公共交通工具等提供极大的便利，对于提高效率，节约资源，节能减排，都有极为重要的现实意义。