

为智能移动设备应用选择正确的射频开关

摘要：现代智能手机和平板电脑通常都集成了使用不同频带（从 FM 无线电到 LTE）的多项无线服务。同时，为了提高敏感性和避免串音，多天线设计越来越流行。这两种趋势使微型射频固态开关在智能移动设备的射频前端设计中扮演越来越重要的角色。本白皮书概述了在常见移动设备设计中的不同电路位置使用的高掷数和低掷数射频开关，并探讨了各项性能规格和设计功能对系统整体性能的影响。此外，本白皮书还对各射频开关模块进行了深入剖析，并揭示了射频开关核心技术的当前和未来发展趋势。

简介

当几大主流手机制造商纷纷在小小的手机中集成多项无线通讯技术，率先引领移动上网风潮之后，以数据为中心的智能移动设备在全球迅速受到追捧。此后，智能手机、平板电脑和电子书用户不约而同地追求高速数据传输和多功能性，进一步推动整个行业朝着两个方向发展：一方面，更先进的无线标准 / 技术（例如，演进的高速分组接入 [HSPA+] 和长期演进 [LTE] 技术）正在不断发展并被大型服务运营商采用；另一方面，更多的无线服务（例如，GPS、手机电视和 RFID）逐渐集成到各种智能移动设备中。这两个趋势对移动设备的射频前端设计产生了相同的影响：即需要更多频带和更强的信号质量（图 1）。在不久的将来，智能移动设备不仅能够轻松地在 12 个或更多蜂窝式频带中工作，并且可以提供 WiFi、WiMAX、GPS、蓝牙、手机 FM/电视、RFID 和其他非蜂窝式服务。由于需要集成大量的并行路径，射频前端工程师面临着前所未有的挑战。他们不仅要应付急剧增加的射频元件数量和功耗，同时还要保持各频带（频率范围）内的信号质量。

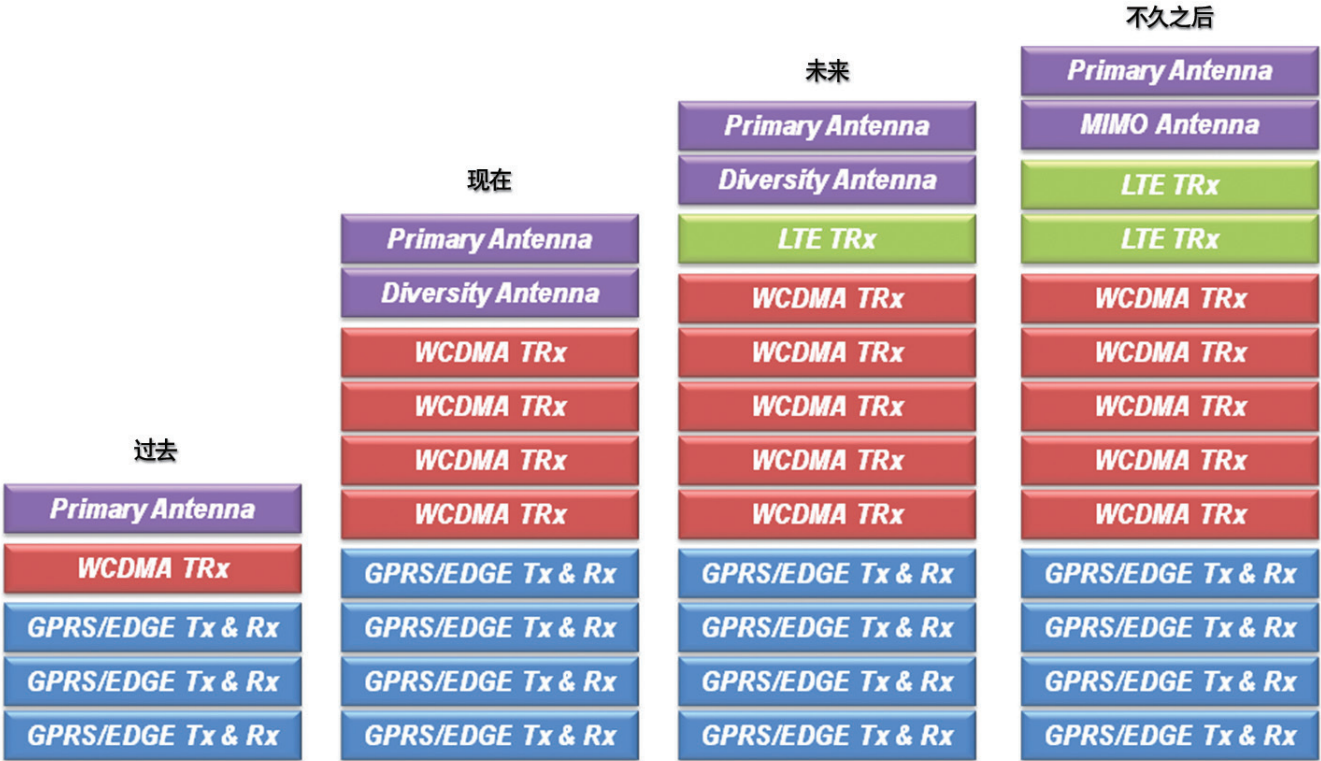


图 1. 射频前端（蜂窝式）的演进

在所有的多频带前端设计中，开关技术起着关键的作用。在蜂窝式天线中通常会放置一个高掷射频开关，用于连接双工器和单边带放大器之间的射频路径。然而，随着前端设计中需要容纳越来越多的频带，分路开关能够实现多模和多频带功率放大器的使用，从而降低设计的复杂性并减少成本和功耗（图 2）。此外，通过增加分集式天线和分集式天线开关，不仅能提高数据接收质量，还能在主天线被语音通信占用的同时下载数据。

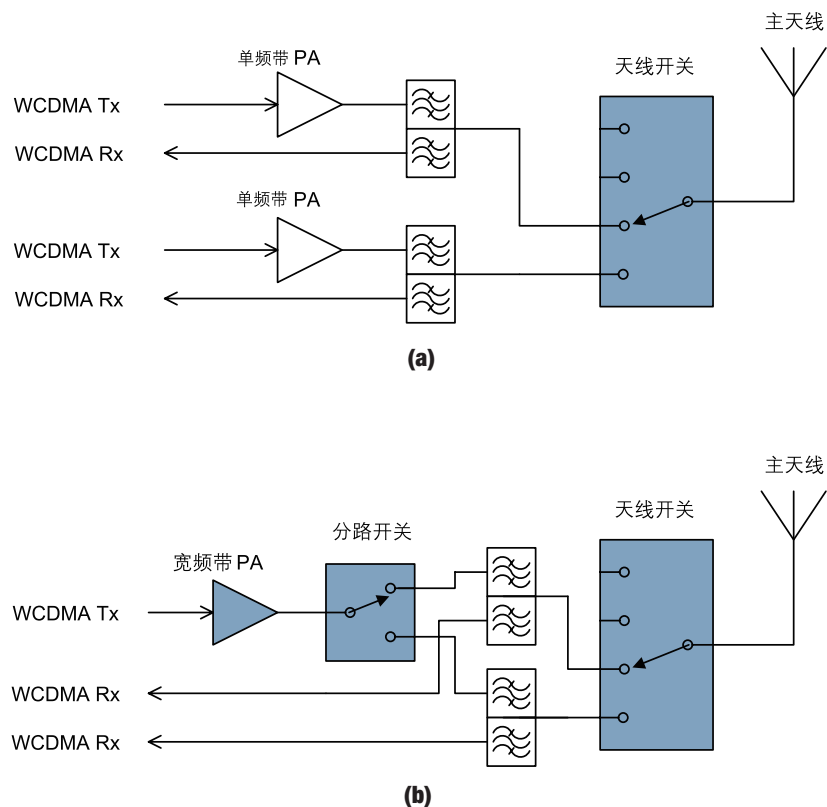


图 2. WCDMA 前端设计示例：使用单频带 PA (a) 和使用带分路开关的宽频带 PA (b)

即使是非蜂窝模式，诸如 WiFi 和蓝牙等模块同样可依靠射频开关在传输和接收信号之间切换，但是对这些开关的功率要求要低于蜂窝模式下使用的同类开关。

在下面的部分中，我们将详细讨论用于各项功能的重要开关规格，以及在为常见智能移动设备的射频前端设计选择开关时需要关注的因素。最后，我们将讨论射频开关行业的一些重要技术趋势。如果您对技术感兴趣，请查看“附录”，此部分提供了有关固态射频开关技术的简单教程、常见开关的工作方式以及如何权衡各种开关规格的说明。“附录”部分的表 2 列出了与射频开关有关的重要规格的简单定义。

在智能移动设备中使用的开关

图3显示了一个模拟的智能移动设备射频前端架构，其中包括6个GSM端口（2个Tx和4个Rx）、4个CDMA/WCDMA Tx/Rx 频带、4个分集式频带，同时支持 WiFi、蓝牙和 GPS。所有开关均已突出显示，并根据各自的应用标注了相应型号。

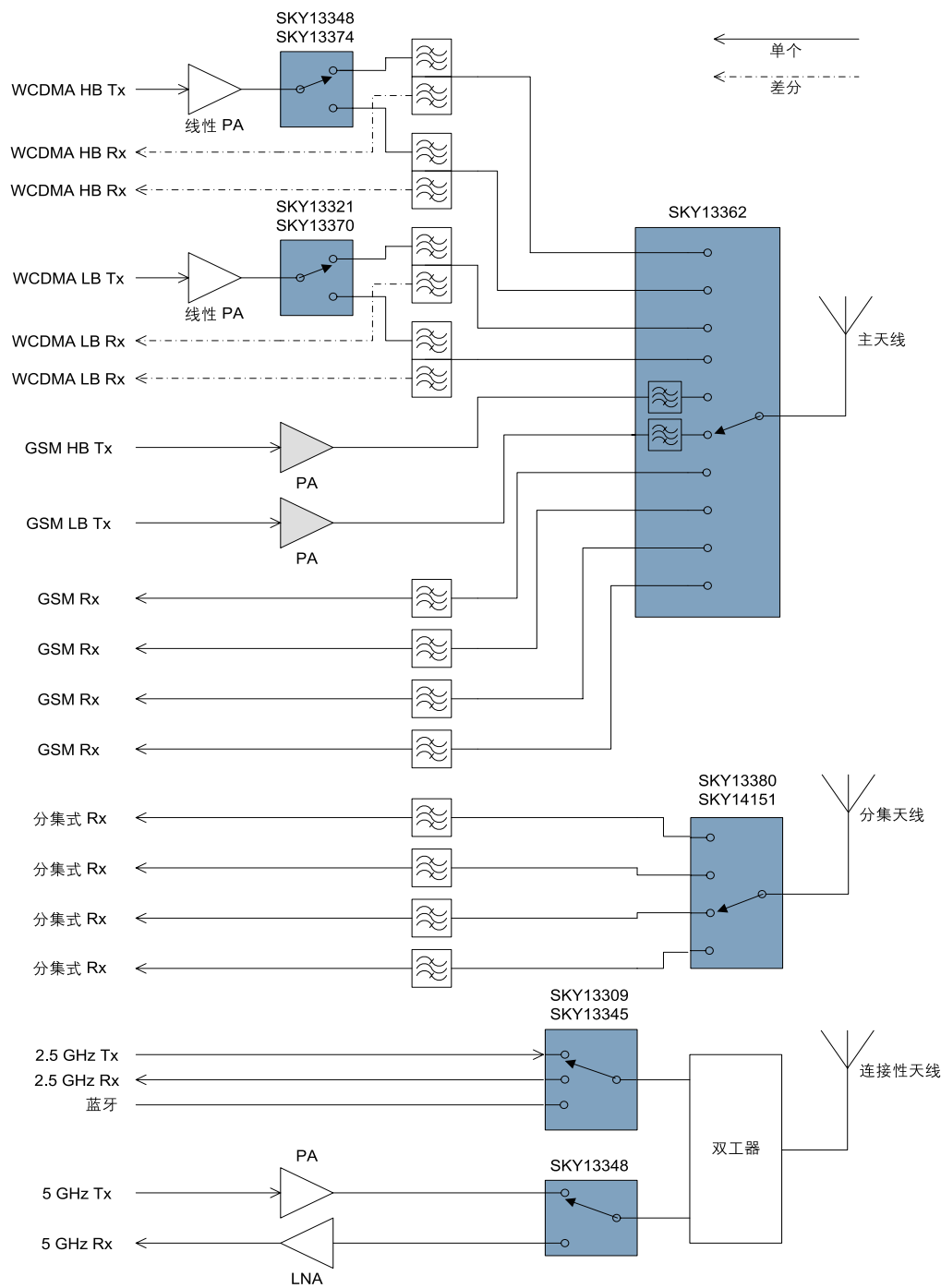


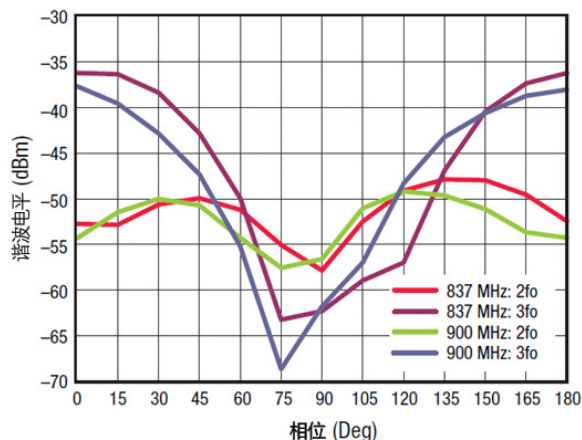
图 3. 智能移动设备前端

单刀 10 掷 (SP10T) 主天线开关的尺寸最大, 复杂性最高, 功率容量也最强。主天线开关应至少具备 +36 dBm GSM Tx 功率容量, 再加上电路损耗和天线失配, 其 1 dB 输入增益饱和点 (IP_{1dB}) 应接近 +40 dBm (10 W)。

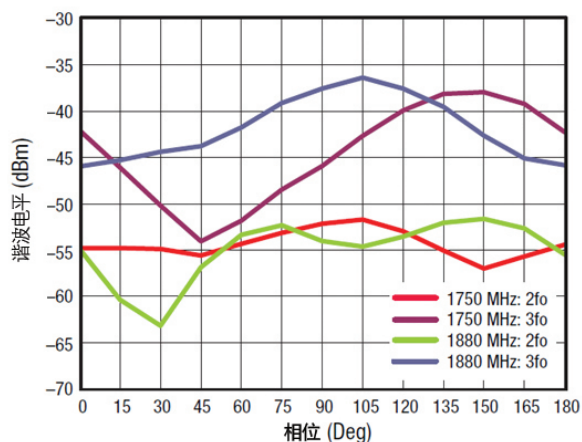
除了高功率容量之外, 在考虑主天线开关时, 低插入损耗也是一个重要的规格。降低接收端口的损耗将减少后续低噪声放大器 (LNA) 的负载, 从而增加接收器的灵敏度。此外, GSM Tx 和 Rx 端口之间的隔离度必须要大于 25 dB, 以避免高功率的 Tx 信号泄露到 Rx 路径中并因此对接收器造成损坏。

为了消除干扰, 主天线开关还需要在 GSM Tx 频带具有出色的谐波抑制度 (低于 -30 dBm)。例如, 阻止设备的 GSM 低频带 (LB) 信号 (850/900 MHz) 干扰 GSM 高频带 (HB) 信号 (1800/1900 MHz)。GSM Tx 端的谐波抑制度通常可通过在两个 GSM Tx 端口 (LB 和 HB) 分别集成两个低通滤波器 (LPF) 来实现。对于因外部环境导致的天线匹配不佳, 主天线开关应能在天线失配的情况下保持出色的谐波性能, 即使天线端口的电压驻波比 (VSWR) 高达 5:1 (图 4)。

除了确保 GSM 端的谐波性能之外, 它还需要在 CDMA/WCDMA 频带中提供出色的线性度。这一规格可通过频带外阻隔测试以互调失真 (IMD) 的形式进行测量。[3] 请见以下示例 (图 5): 设备正在收发一系列的 WCDMA 信号, Tx 为 1.95 GHz, Rx 为 2.14 GHz。当附近有人打电话时, 设备天线将收到 1.76 GHz 的 GSM Tx 信号。如果天线开关的线性度较差, 接收的 GSM HB Tx 信号和本地的 WCDMA HB Tx 信号会在开关中混合, 并在 2.14 GHz 的 WCDMA Rx 频带产生 3 阶互调峰值。为了避免在 WCDMA 接收器端发生任何干扰, 互调峰值必须要低于系统的最低灵敏度。因此在这类应用中, 最好使用在整个相位范围内 IMD 低于 -100 dBm 的开关。

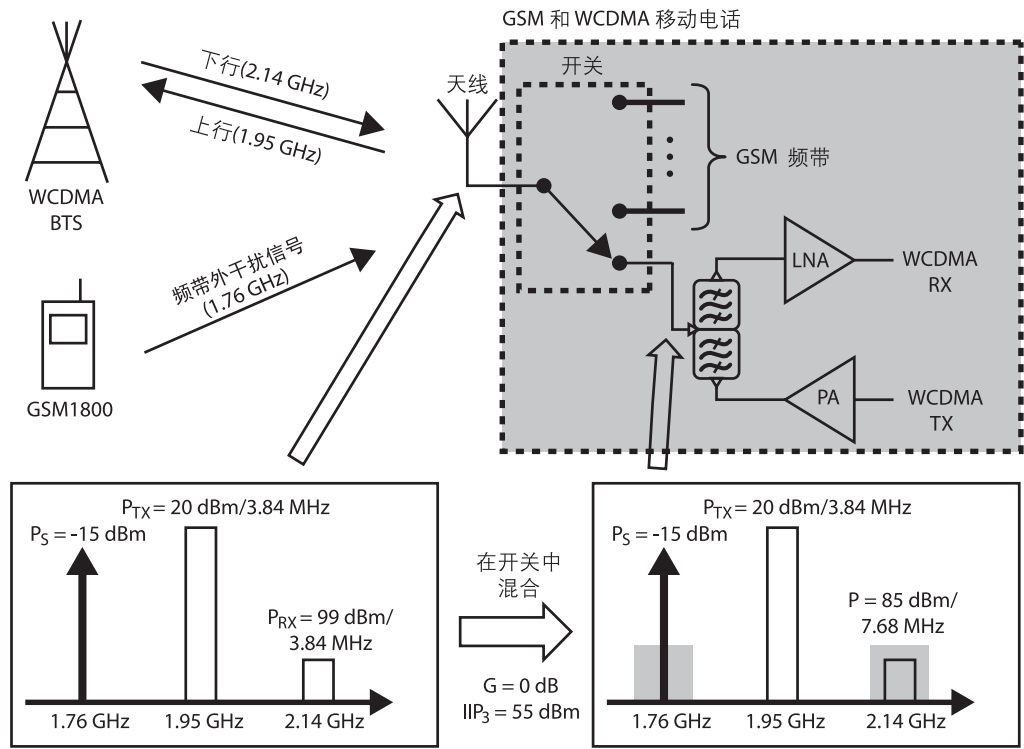


(a) GSM Tx 低频带

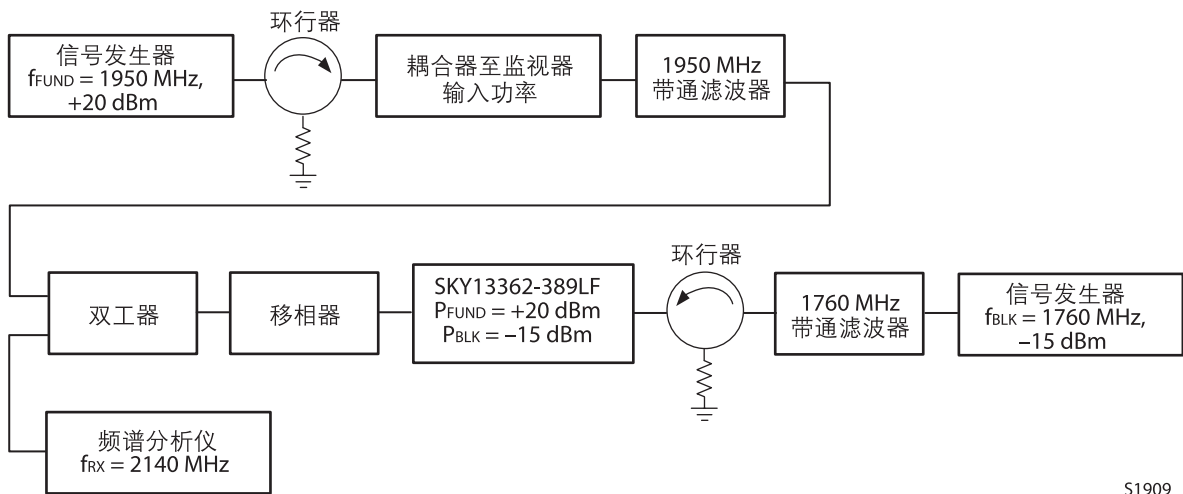


(b) GSM Tx 高频带

图 4. 主天线开关 (SKY13362) 谐波与相位的关系 (5:1 失配)



(a) IMD 机制的解释 [3]



(b) IMD 测试设置

S1909

图 5. WCDMA 频带中的互调失真 (IMD)

在 DC 端，无论是通话、下载网页，还是待机和接听来电，主天线开关将始终处于活动状态，因此会不断消耗电池中的电流。减小开关控制器消耗的电流则可降低电池消耗，从而延长电池的使用时间。通常而言，该供电电流不应超过 1 mA，一般需低于 0.5 mA。

CDMA/WCDMA 分路开关和分集开关均为中等功率容量的低掷数和中掷数开关，可提供 CDMA/WCDMA 信号峰值功率（低于 GSM 的信号峰值功率）。由于在多频带平台中添加或混合多个频带，前置 PA 和后置 PA 均使用了分路开关以不同路径传送信号。分集开关则用来连接分集式天线，它在数据卡应用中非常普遍，并且越来越多地应用于智能移动设备。分集接收技术可提高数据速率，因此用在接收器端的分集开关通常具有较低的功率容量。除了无需高功率容量之外，CDMA/WCDMA 应用同样需要非常出色的 IMD 性能。

用于 WiFi/蓝牙的低掷数开关属于低功率开关，P1_{dB} 约为 +30 dBm。这些类型的开关通常尺寸较小 (1x1 mm)、控制电压较低 (1.8 V)。由于嵌入式 WiFi/蓝牙收发器模块已经高度标准化，标准的误差矢量幅度 (EVM) 与输入功率测试是 WiFi/蓝牙开关的常见性能指标（图 6），它能同时测量被测开关的功率和线性度性能。对于 WiMAX 操作，射频开关的功率容量和线性度必须高于 WiFi 版本，才能避免信号失真。

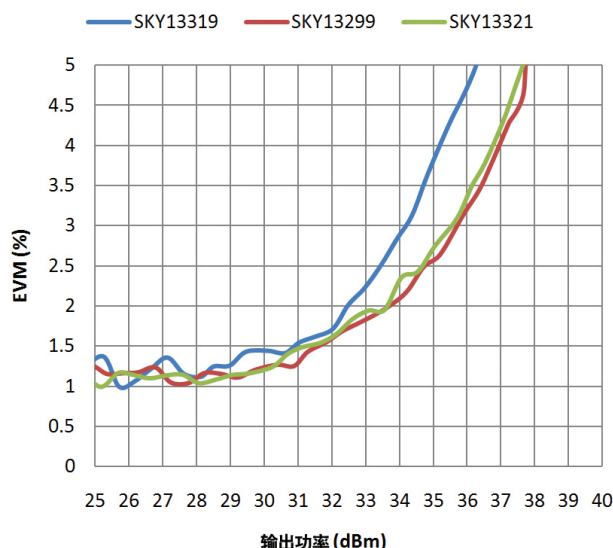


图 6. 高功率 WLAN 开关在 2.45 GHz 时的误差矢量幅度 (EVM) 结果

开关技术趋势

由于基频 CMOS 芯片的应用越来越广泛，而总功耗持续降低，基频控制器的控制电压逐渐从 +2.8 V 降至 +1.8 V。在某些领域，可能会继续降至 +1.3 V。鉴于这类电压逐渐接近 GaAs pHEMT 的阈值电压，必须使用集成的 CMOS 电荷泵才能满足不断提升的开关线性度和电源要求，这引发了人们对 GaAs pHEMT 技术与 SOI MOSFET 技术相对优势的比较（表 1）。

表 1. GaAs pHEMT 与 SOI MOSFET

参数	GaAs pHEMT	SOI MOSFET
制造工艺	GaAs 工艺	标准硅 CMOS 工艺
通道传导性	高	中
单 FET 功率密度	中	低
典型偏置电压	正 (E 模式) 或负 (D 模式)	正和负 (需要集成驱动器部分)
芯片面积	较小	较大
逻辑集成支持	低 (仅限 E/D 模式)	标准
每晶片面积的制造成本	中	低

在低掷数开关中，GaAs pHEMT 技术提供良好的功率和线性度性能，同时占用较少的芯片面积，这意味着封装尺寸更小。而对于 SOI MOSFET 开关，由于集成正负电压发生器的要求以及较低的功率容量和较高的 FET 损耗，因此通常会占用较大的芯片面积。但是，由于能够在低于 +1.8 V 的电压下工作，并且能够灵活地在芯片上集成 CMOS 逻辑电路，使得 SOI MOSFET 开关在低控制电压和高掷数开关应用中具有一定的优势。

除了控制电压之外，控制信号协议也在不断演进（图 7）。通常，开关是通过一种比较宽泛的并行模式：通用输入 / 输出 (GPIO) 来控制的，它包括一组已预定义“高”和“低”逻辑的并行控制引脚。越来越多的设计从这种并行控制过渡到串行控制，例如串行外围接口 (SPI)。SPI 协议可能需要时钟引脚、串行控制输入引脚以及锁存引脚，后者可根据存储的串行控制位触发开关操作。2003 年，几家主要的移动芯片组公司组建了移动行业处理器接口 (MIPI) 联盟，旨在利用结构化的串行命令来规范移动设备中所有主要元件之间的通信。[4] 如今，越来越多的公司采用 MIPI，并要求在其移动设备中使用的射频开关兼容 MIPI。

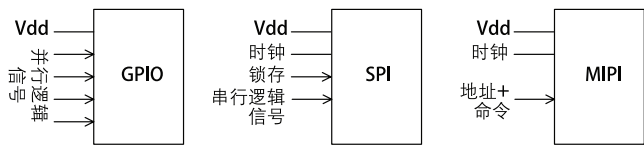


图 7. 开关控制接口的演进

另一方面，由于 FET 的基本物理限制，导致射频开关的线性度要求愈加难以实现，因此，开关封装中越来越多地采用大量的滤波器技术。以原生 GaAs 或 SiO₂ 晶片为基材制造的集成无源器件 (IPD) 滤波器可提供良好的谐波抑制度和高功率容量，常常用于 GSM Tx 端口。声表面波 (SAW) 滤波器 [5] 可提供近乎完美的频带选择，目前用于 GSM Rx 端。与 SAW 滤波器类似，声体波 (BAW) 滤波器 [6] 能够在提供相同滤波特性的同时更加稳定，因此近期逐渐获得广泛认可。

此外，4G 长期演进 (LTE) 标准提出了使用两个天线来实现多输入多输出 (MIMO) 操作，该技术可使用双刀双掷 (DPDT) 双天线开关，让基带处理器能够动态选择较强的接收信号，或者同时将两个独立的数据流与基站进行通信（图 8）。

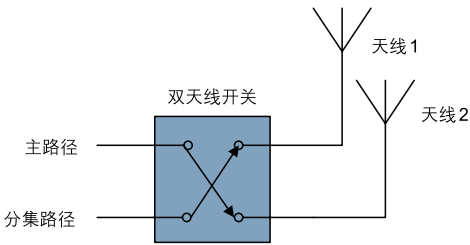


图 8. 双天线多输入多输出 (MIMO)

最后，采用固态开关技术的主动天线调谐也受到许多制造商的青睐（图 9）。此项技术能够改进宽频范围中单天线的阻抗匹配，因此可降低发射器上的功率要求，并提高接收器的灵敏度。然而，高功率能力和超低损耗（高 Q 系数）等要求对此类设备的发展提出了挑战。

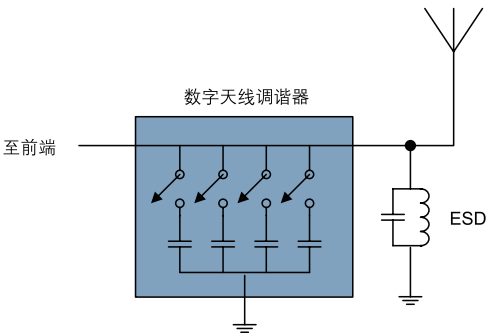


图 9. 使用并联切换电容器组的数字天线调谐器示例

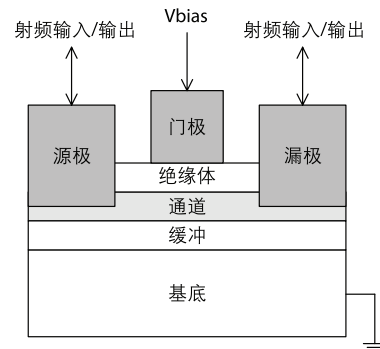
总结

由于移动设备行业不断追求更快的数据速率、更多的无线服务和更低的功耗，固态射频开关在射频前端设计中变得至关重要。GaAs pHEMT 和 SOI MOSFET 技术带来了各种具有出色功率和线性度性能的射频开关，它们为当前和下一代智能移动设备的通用架构提供理想选择。

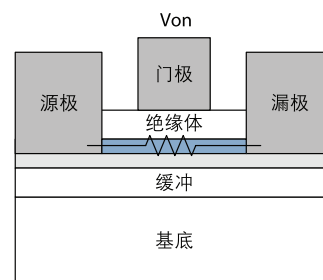
附录：固态射频开关的简要教程

制造尺寸小于几平方毫米的常规射频开关时，适合采用以下三种技术：p-i-n 二极管、微电子机械系统 (MEMS) 和固态场效应晶体管 (FET)。P-i-n 二极管通常用于高功率应用中，但此技术需要较大的偏置电流并且切换速度相对较低，使其不适合移动设备的应用。尽管多年来 MEMS 的前景始终被看好，但只有为数不多的 MEMS 设备面市，包括微型陀螺仪和加速计。MEMS 射频开关具有超低的插入损耗和高隔离度，因此十分具有吸引力。但另一方面，高驱动电压要求、特殊封装和可靠性问题是研究人员必须投入多年努力才能解决的问题。而固态 FET 包括多种基于不同材料的不同的结构，但所有这些结构都具有高速、可靠、可高度集成和功耗低等重要特点，因此该技术非常适合制造微型射频开关。

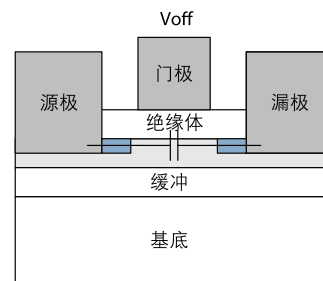
FET 技术在几十年前就已经问世，并且在几乎所有知名的半导体材料系统中得到改进。[2] 在射频开关行业中使用最广泛的两种 FET 是砷化镓 (GaAs) 假晶高电子迁移率晶体管 (pHEMT) 和硅绝缘 (SOI) 金属氧化物场效应晶体管 (MOSFET)。GaAs pHEMT 和 SOI MOSFET 以及其它 FET 具有相同的基本结构：两个电极（“漏级”和“源极”）之间形成平面“通道”，通道上方放置一个金属“门级”。当偏置电压引起门级电位发生变化时，通道中的自由电荷进进出出，导致漏极和源极之间的电阻发生变化。在极端情况下，FET 可能偏置为完全关断（无限 / 最大电阻）或完全导通（最小电阻），从而形成一个简单的开关（图 10）。



(a) 通用 FET 结构



(b) 导通状态（相当于电阻器）



(c) 关断状态（相当于电容器）

图 10. GaAs pHEMT 和 SOI MOSFET 结构

对于仅包含一个串联 FET 的射频开关，当开关导通时，FET 相当于串联电阻器。当射频信号通过时，在其上发生的任何损耗被称为“插入损耗”，该损耗定义为输出和输入射频功率之比。因此，开关的导通状态也称为“插入损耗状态”。另一方面，当开关关断时，由于 FET 的门级、漏极和源极之间存在寄生电容，使其相当于串联电容器。在高频率时，一些射频信号仍然能够通过这一电容性从输入耦合到输出。开关关断时的输出和输入射频功率之比被称为“隔离度”，开关的关断状态也称为“隔离状态”（表 2）。

当增大串联 FET 的尺寸时，会降低电阻，从而改善插入损耗，但是隔离度会成比例降低；当连接多个串联 FET 时，隔离度会改善，但插入损耗会成比例增加。在很多时候，仅串联的 FET 开关设计可能无法满足对插入损耗和隔离度的要求，尤其是在高频率时，因此添加了并联 FET，这类 FET 在开关处于隔离状态时通常是导通状态。如图 11 中所示，在高频率范围时添加并联 FET 将大大提高隔离度，代价是增加了一些插入损耗。图 12 还显示了真实的 SPDT 开关设计，串联和并联 FET 均已标注。

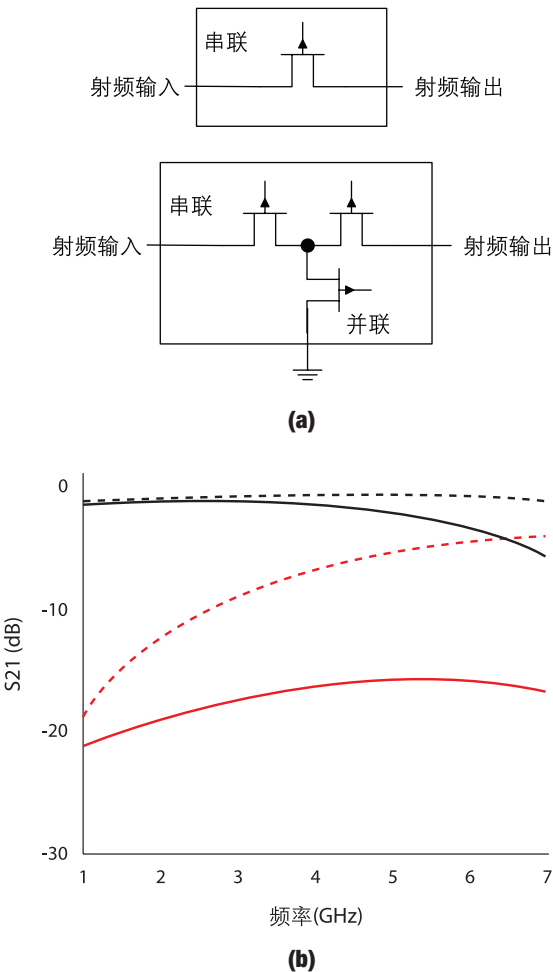


图 11. 仅串联（虚线）和仅并联（实线）开关架构之间的性能比较

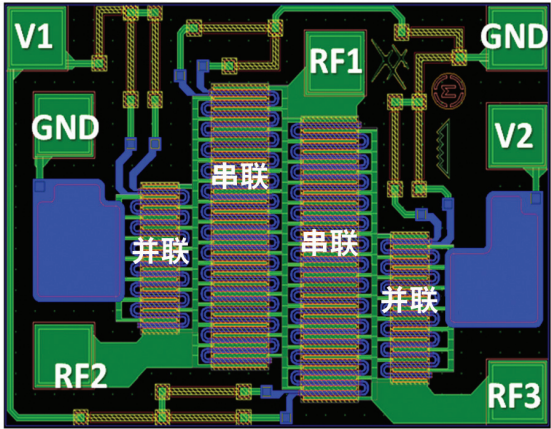
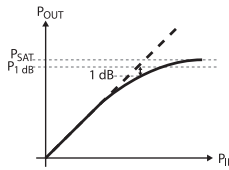
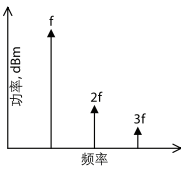
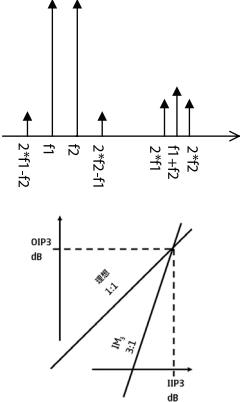
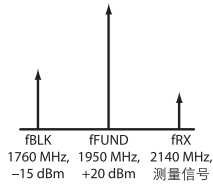
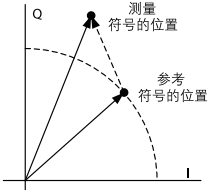


图 12. 带串联和并联 FET 的常见 SPDT 开关

另一方面，在大信号条件下，当射频信号的峰至峰幅度与施加到门级上的偏置电压相当时，将处于导通状态的单 FET 近似成串联电阻器并不完全准确。在此条件下，FET 的非线性度可能造成第二和第三谐波的产生，而射频功率过高将导致开关饱和，并且使插入损耗和隔离度指标快速下降。尽管可以通过测量射频开关的 1 dB 功率压缩点 (P_{1dB}) 来有效地定义其功率容量，但我们还可以通过其他方法测量开关的线性度，具体取决于应用和所需的关注点。这些方法包括测量第 2 和第 3 谐波 (H_2 , H_3)、第 2 和第 3 阶输入截取点 (IIP_2 , IIP_3)、第 2 和第 3 互调失真 (IMD_2 , IMD_3) 以及误差矢量幅度 (EVM) (表 2)。

表 2. 重要的射频开关规格参数

规格	符号	定义	图示	常用单位
插入损耗	IL	在传输线路中由于插入开关（导通状态）而导致的信号功率损失。	$IL = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out,on}}$	dB
隔离度	ISO	与插入损耗相同，但处于关断状态。	$ISOL = 10 \log_{10} \frac{P_{out,off}}{P_{in}}$	dB
1dB 功率压缩点	P1dB	插入损耗增加 1 dB 时的输入功率水平。		dBm
第 2 和第 3 谐波	H2, H3	在 2 倍和 3 倍基波信号频率时的信号功率水平，这些谐波是由于开关的非线性所产生		dBm, dBc
第 2 和第 3 阶输入功率截取点	IIP2, IIP3	由于开关的非线性，两个相似的信号可能会混合，并生成接近基波信号及其第二谐波的第二和第三个互调分量。当外推第二和第三互调分量功率等于基波信号功率时，IIP2 和 IIP3 用于确定输入功率的外推截取点。		dBm
第 2 和第 3 阶互调失真	IMD2, IMD3	类似 IIP2 和 IIP3，但可针对非对称信号。		dBm
误差矢量幅度	EVM	它用于测量解调器性能，包括开关和其他元件。将测量符号的位置与参考符号的位置相比较，所得到的误差矢量距离用于计算 EVM。		%, dB

参考

- [1] Skyworks, 射频开关产品目录,
www.skyworksinc.com/products_switches.aspx
- [2] 维基百科对场效应晶体管的描述,
http://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect_transistor
- [3] T. Ranta, J. Ella and H. Pohjonen, “Antenna switch linearity requirements for GSM/WCDMA mobile phone front-ends” ,
IEEE Euro. Conf. on Wireless Tech., 2005
- [4] MIPI 联盟网站, <http://www.mipi.org>
- [5] C. Campbell, “Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications” , Academic Press, 1998
- [6] R. Aigner, et. al., “Bulk-acoustic-wave filters: performance optimization and volume manufacturing” , IEEE MTT-S International, 2003

版权所有 © 2011, Skyworks Solutions, Inc.。保留所有权利。

本文档中的信息与 Skyworks Solutions, Inc. (“Skyworks”) 产品或服务有关。Skyworks 将这些材料, 包括此处所包含的信息, 作为一项服务提供其客户, 仅供客户参考。Skyworks 对这些材料或此处所包含的信息中的错误或遗漏之处概不负责。Skyworks 可能会随时更改其文档、产品、服务、规格和产品介绍, 恕不另行通知。Skyworks 对更新材料或信息不作任何承诺, 对因以后的更改引起的冲突、不兼容或其它问题概不负责。

本文档不会授予对任何知识产权的任何明示或暗示的许可, 无论是通过禁止还是其它方式。除非在 Skyworks 销售条款和条件中规定, Skyworks 对此处提供的任何材料、产品或信息 — 包括销售、分销、复制或使用 Skyworks 产品、信息或材料的行为 — 概不负责。

所有材料、产品和信息均“按原样”提供, 不附带任何类型的明示、暗示、法定或其它形式的担保, 包括特定用途或使用的适用性、适销性、性能、质量或任何知识产权的侵权; 所有此类担保在此均以明示方式负责。SKYWORKS 也不保证这些材料中包含的信息、文字、图形或其它内容的准确性或完整性。SKYWORKS 不应应对任何损害承担责任, 包括但不限于任何特殊的、间接的、偶发的、法定的或随发的损害, 包括但不限于由于使用这些材料或信息导致的收入损失或利润损失, 不论材料接收人是否已被告知发生此类损害的可能性。

Skyworks 产品不适用于医疗、救护或生命维持方面的应用, 或 Skyworks 产品故障可能导致人身伤害、死亡、机械损坏或环境破坏的其它设备。使用或销售 Skyworks 产品的客户如果在此类应用中使用 Skywork 产品, 相关风险应自行承担, 并且同意对于任何因此类不当的使用或销售造成的损失, Skyworks 完全负责。

设计缺陷、错误或产品操作超出发布参数或设计规格范围可导致 Skyworks 产品偏离其发布规格, 客户应对此类使用 Skyworks 产品的产品和应用负责。客户应采取设计和操作保障措施, 以降低这类风险以及其它风险。Skyworks 对应用辅助、客户产品设计或由于超出发布规格或参数使用 Skyworks 产品导致的损害概不负责。

Skyworks、Skyworks 符号和 “Breakthrough Simplicity” 是 Skyworks Solutions, Inc. 在美国和其它国家 / 地区的商标或注册商标。第三方品牌和名称仅用于标识用途, 归各自所有者所有。www.skyworksinc.com 上张贴的附加信息, 包括相关条款和条件, 均通过引用的形式提供。