

利用 SuPA (LM32XX) 给手持设备射频功率放大器供电

秦小虎 Xiaohu Qin/刘先锋 Seasat Liu

North China OEM Team

摘 要

在手持设备中给射频功放供电一直是一个比较难做的设计，因为一方面需要提高射频功放的工作效率用来延长电池的工作时间，另一方面又不能在提高工作效率的同时降低功放的工作性能，所以必须为其提供一个满足要求的高效直流电源。常规的方式是将功放的电源端与电池直接连接供电，但是这种工作模式会使得功放的工作效率很低，不能满足高效低功耗要求。德州仪器公司推出的 SuPA (Supply for Power Amplifier) 系列的 DC-DC 产品从工作机理上做了创新，采用平均功率跟踪 (Average Power Track) 技术和包络跟踪技术 (Envelop Tracking) 优化了射频功放工作时功率消耗，从而提高了功放的工作效率，延长了电池的工作时间。本文着重阐述平均功率跟踪技术的工作原理和 SuPA 的应用设计，从而方便设计工程师能够快速的理解和应用此项技术，实现高效的功放电源设计。

目 录

1	简介	2
2	什么是包络跟踪技术 (Envelop Tracking)	2
3	什么是平均功率跟踪技术 (Average Power Track)	3
4	射频功放的发展趋势和特点	4
5	SuPA 在射频单元中的位置	4
6	给射频功放供电的电源特点	5
7	SuPA 的工作机理	6
8	SuPA 的电路原理设计	7
9	SuPA 的关键功率器件设计，器件尺寸和工作特性	8
10	SuPA 的 PCB 设计和 PCB 板叠层设计	10
11	结论和主流射频功放电源产品	13
12	参考文献	13

图 表

图 1.	包络信号系统简图	2
图 2.	被包络跟踪电源 (ETPS) 放大后的信号图 PA_{GAIN}	3
图 3.	包络跟踪电源 (ETPS) 输出的电压信号与射频信号包络跟踪图	3
图 4.	平均功率跟踪 (APT) 模式，能量消耗区域，红色部分为消耗区	3
图 5.	直接电池供电模式，能量消耗区域，红色部分为消耗区	3
图 6.	4 种带宽的功放可以共同使用一个射频电源单元，输出电压可以由 0.5V 到 3.4V 自动调节 ..	4
图 7.	SuPA 在系统中位于电池和 PA 之间承担电压转换功能	4
图 8.	SuPA 直流电压转换器功能简化框图， $I_o = I_{o1} + I_{o2}$ ， $V_{in} - V_o > 0.2V$ ， $I_o > 1.45A$	5
图 9.	SuPA 直流电压转换器功能简化框图， $I_o = I_{o1}$ ， $V_{in} - V_o < 0.2V$	6
图 10.	在不同射频输出功率状态下使用 SuPA 和不使用 SuPA 时电池电流消耗比较图，节省了约 150mA 左右的电流	6
图 11.	轻载模式下 ($I_o < 150mA$ ， $V_{in} = 3.8V$) SuPA 在不同输出电压下 (0.5V~3.2V) 效率曲线	7

图 12.	重载模式下 ($I_o > 150\text{mA}$, $V_{in} = 3.8\text{V}$) SuPA 在不同输出电压下 ($1.1\text{V} \sim 3.5\text{V}$) 效率曲线.....7
图 13.	LM3242 内部简化功能框图, V1 和 V2 承担电压变化器功能, V3 承担 ACB 旁路功能8
图 14.	LM3242 典型应用原理图8
图 15.	电容阻抗和频率关系图9
图 16.	LM3242 布局示意图.....10
图 17.	LM3242 布局表层连线示意图11
图 18.	LM3242 布局第二层连线示意图.....11
图 19.	LM3242 布局第三层连线示意图.....12
图 20.	LM3242 布局第四层连线示意图.....12

1 简介

当前越来越多的手持设备要求满足尽可能长的工作时间，常用的方式是：一方面，优化系统软件，将不用的软件关掉以节省更多的电能，用来延长电池的工作时间，这在优化应用处理器的功率消耗非常有效；另一方面，优化系统的硬件设计，采用低功耗、高效率的电源管理单元，这在优化射频单元和应用处理器单元的功率消耗非常有效，SuPA 是专业用于射频单元里驱动功放的电源，除了继承 DC-DC 的高的工作效率的优点以外，它还采取了平均功率跟踪技术 (APT) 用以配合射频功放工作时不同功率对电压的需求，动态调整输出电压给功放供电，从而满足高效的工作效率。

2 什么是包络跟踪技术 (Envelop Tracking)

简而言之，就是在功放的工作电压与输入的射频信号之间建立联系使之实时互相跟随，从而提高功放的工作效率的技术，按照理论计算，相对直接使用电池的供电方式，它可以帮助系统节省 65% 的功耗，SuPA 的新一代产品将会支持此模式。它的基本原理是：射频处理单元和基带处理单元根据射频信号、功率等级和功放的自身特性参数（可以使用功放的查询表 Look Up Table 或者又被称为调谐表 Shaping Table）计算出包络信号 (Envelop signal)，同时射频、基带单元中的差分 DAC 会提供一个模拟参考信号，ET 电源 (ETPS) 会将包络信号放大，然后送往 PA，于此同时 PA 会将 RF 信号放大，使得 RF 信号和 PA 的工作电压跟随，最后功放将放大后的信号送给双工器，双工器会把带宽以外的信号衰减掉，同时将有用的信号凸显出来。图 1、图 2、图 3 描述这个过程中的信号调理过程。

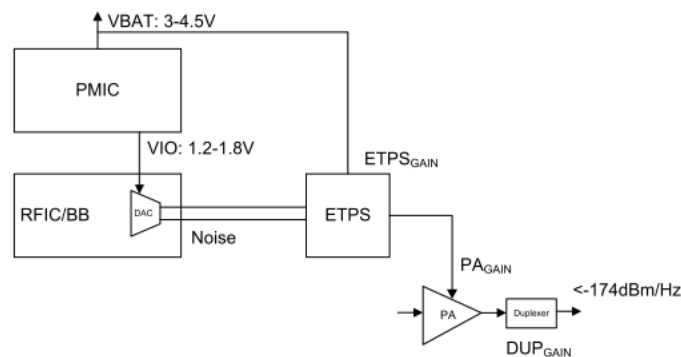


图 1. 包络信号系统简图

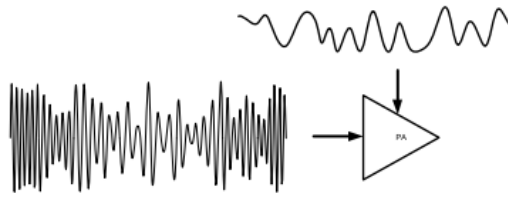


图 2. 被包络跟踪电源（ETPS）放大后的信号图 PA_{GAIN}

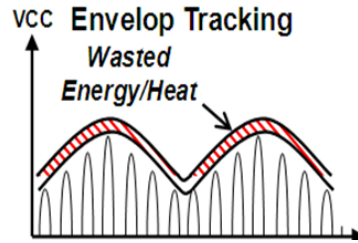


图 3. 包络跟踪电源（ETPS）输出的电压信号与射频信号包络跟踪图

3 什么是平均功率跟踪技术（Average Power Track）

这种方式又称为自适应电压调节方式（Adaptive Supply），它是根据功放的预先输出功率、结合功放的自身参数（可以使用功放的参数查询表 Look-Up-Table）来自动调整功放的工作电压的技术，按照理论计算，相对于电池直接供电模式，它可以帮助系统节省 40% 的电能。相对 ET 方式，APT 使用和设计起来更加简单和方便，SuPA 当前产品主要支持这种模式。

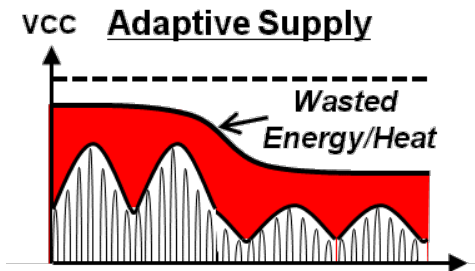


图 4. 平均功率跟踪（APT）模式，能量消耗区域，红色部分为消耗区

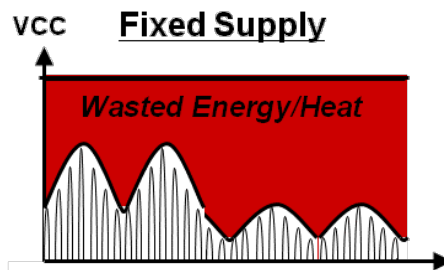


图 5. 直接电池供电模式，能量消耗区域，红色部分为消耗区

4 射频功放的发展趋势和特点

随着数据业务的不断增加，目前已经由 2G 向 3G 和 4G 转移，所以要求功放承担更多的任务，因此要求功放具有更多工作模式和频率带宽满足不同地区的制式，同时还要满足更高的工作效率从而保持电池的长时间续航能力，因此为了满足这种要求，使用 ET 模式或者 APT 模式的射频电源就逐步成为趋势，以下图图示为例，它的射频电源单元可以支持 4 种带宽的 GSM/EDGE 模式。

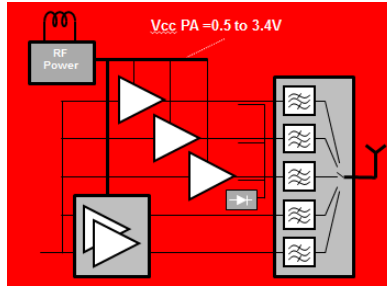


图 6. 4 种带宽的功放可以共同使用一个射频电源单元，输出电压可以由 0.5V 到 3.4V 自动调节

5 SuPA 在射频单元中的位置

SuPA 是位于系统中的 RF 单元中给功放供电的位置，它在电池和功放之间，将电池电压根据基带单元和射频单元提供的功率信号以及配合功放的自身特性信号转换成功放的可以处于最优工作模式的工作电压，驱动功放工作在高效模式，达到节省电能的目的。

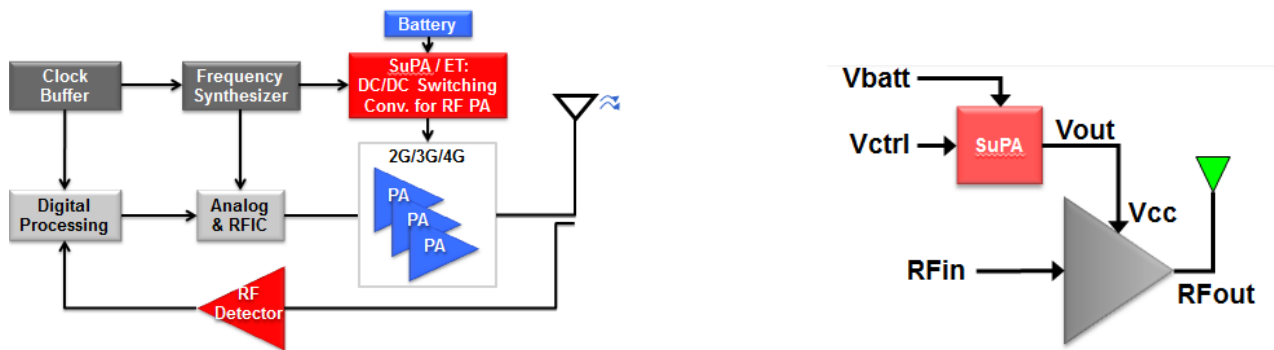


图 7. SuPA 在系统中位于电池和 PA 之间承担电压转换功能

6 APT 模式的 SuPA 工作机理

SuPA 电源变换器与传统的同步整流降压型直流变换器的内部拓扑是一致的，没有很大的不同，但是它的负载动态响应和主动负载电流辅助旁路控制（**Active Current assist and Bypass**）是做过优化的，因此它可以满足当负载电压和电流发生变化时可以快速响应，主动电流辅助旁路功能可以满足当入口电压瞬间下降或者负载电流瞬间增加时，可以将变换器迅速切换成类似负载开关模式，这样做有两个好处：第一，可以将电池能量快速提供给负载，满足负载需求；第二，可以使用小尺寸、小电流电感，当负载电流超过电感的电流极限时，那么 ACB 功能开关 V3 就会进入工作模式，将额外的负载电流承担过来提供给负载，无需再经过电感，所以可以使用小尺寸的电感，满足超紧凑设计要求，这在实际应用设计中是非常重要的。它的工作过程是：首先当开关管 V2 导通时，V1 是断开的，入口电源会给电感充电，此时电感两端的电动势是左边为“正”，右边为“负”，当电感充电完成后，V2 会断开，V1 会导通，此时电感上的两端电压会反向，变为左边为“负”，右边为“正”，于是电感中储存的能量会经过负载、V1 然后回流到电感的负极，此时的电感更像是一颗电池给负载供电。电感的充电和放电过程会周而复始的进行，于是就会源源不断的向负载提供连续的电流，它的数学表达式是： $V_o = D \cdot V_{in}$ ，其中 D 是占空比，即 V2 导通的时间在整个开关周期内所占的比例。VCON 是用来接收来自射频处理芯片组或者基带芯片组的控制信号，这个信号会送进 SuPA 直流变换器控制单元，将输出电压和 VCON 电压信号按照 A 倍的系数进行转换，于是输出电压和 VCON 信号就会按照 A 倍的比率进行转换，即： $V_o = A \cdot V_{CON}$ ；当入口电压跌落或者负载电流意外增加时，造成变换器瞬间过流，于是就会开启主动电流辅助旁路功能（ACB）模式，V3 会将电池电压或者入口电源的电压调整后再接入系统，满足瞬间大负载电流需求，但是当入口电压进一步跌落到与输出电压一致或者压差在 200mV 以内时，V3 就会立刻完全导通，进入真正的旁路模式，这是 SuPA 的独到的控制模式，比如 2G 的 PA 瞬态电流往往会超过 2A，于是旁路功能就会显得非常重要；在 3G 或者 4G 时，电流需求量不会很大，于是 SuPA 就工作在单一的 DC-DC 转换模式，满足高效率要求。

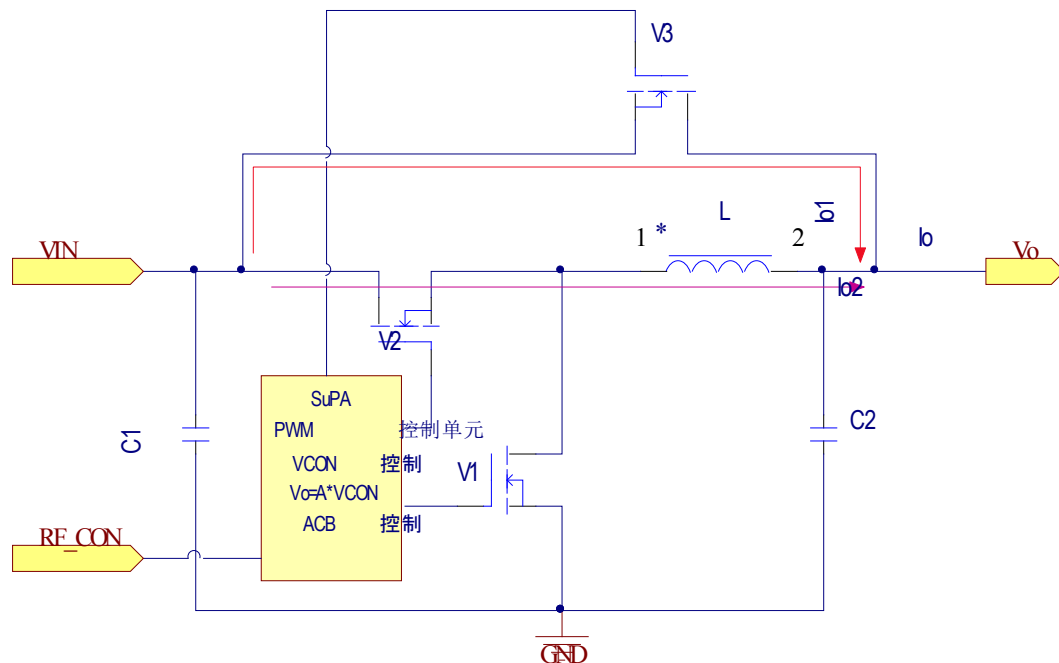


图 8. SuPA 直流电压转换器功能简化框图， $I_o = I_{o1} + I_{o2}$ ， $V_{in} - V_o > 0.2V$ ， $I_o > 1.45A$

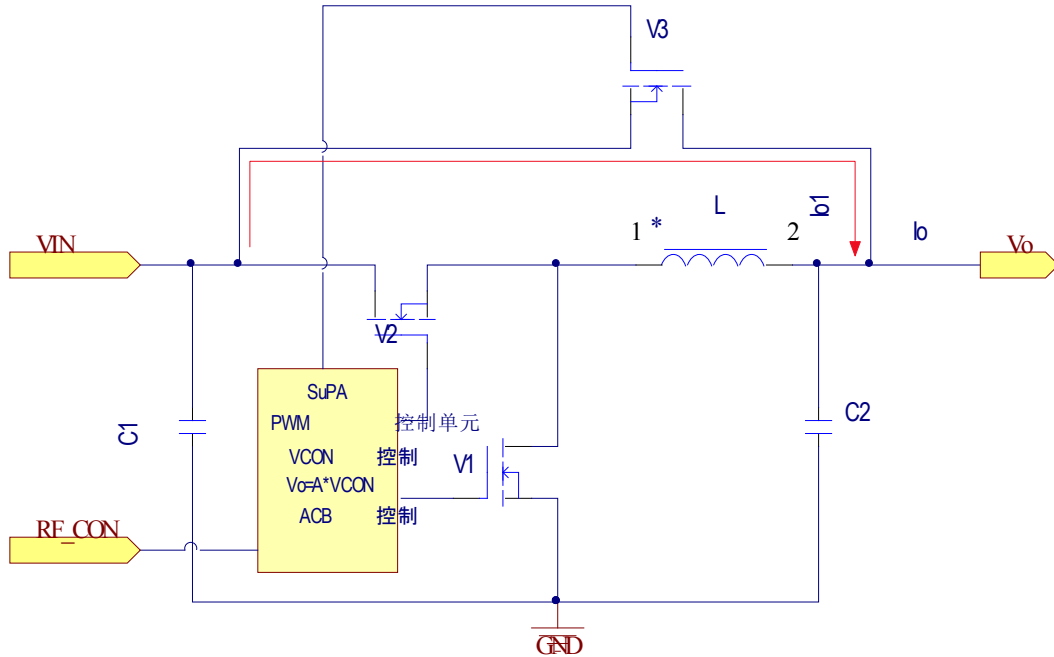


图 9. SuPA 直流电压转换器功能简化框图， $I_o=I_{o1}$ ， $V_{in}-V_o < 0.2V$

7 SuPA 变换器高效率工作机理和效率曲线

SuPA 可以工作在高效省电和低噪音两种模式，这两种模式是自动转换的，当负载电流低于 100mA 时，它工作在省电模式（PFM/ECO，开关频率会自动降低，减少开关损耗）；当负载电流超过 100mA 时，它工作在低噪音模式（PWM，开关频率恒定不变，满足大负载电流输出），这样做可以保证 SuPA 在宽范围内的负载条件下，依然可以保持高效的工作状态，达到节省电能的目的，延长手持设备的的工作时间。

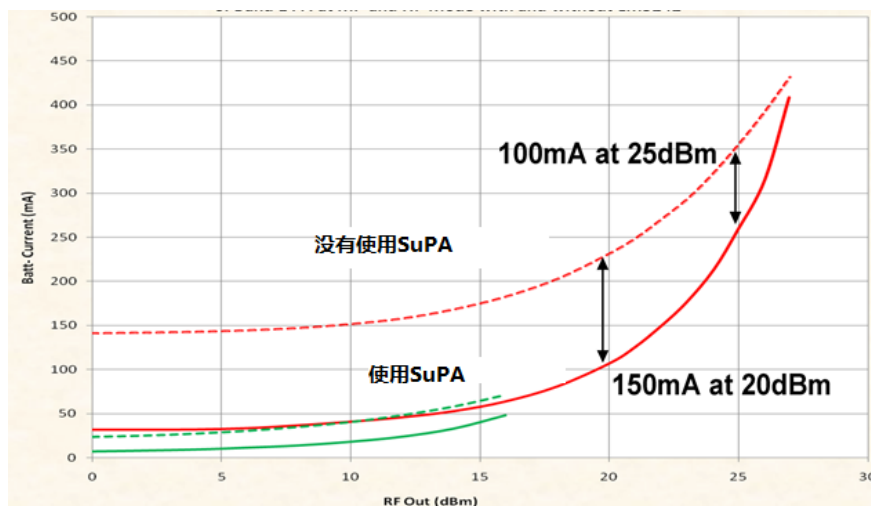


图 10. 在不同射频输出功率状态下使用 SuPA 和不使用 SuPA 时电池电流消耗比较图，节省了约 150mA 左右的电流

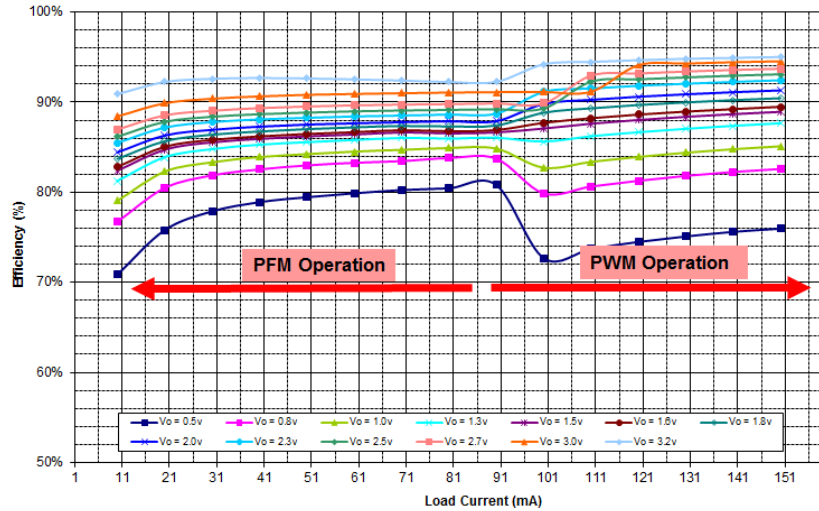


图 11. 轻载模式下 ($I_o < 150\text{mA}$, $V_{in} = 3.8\text{V}$) SuPA 在不同输出电压下 (0.5V~3.2V) 效率曲线

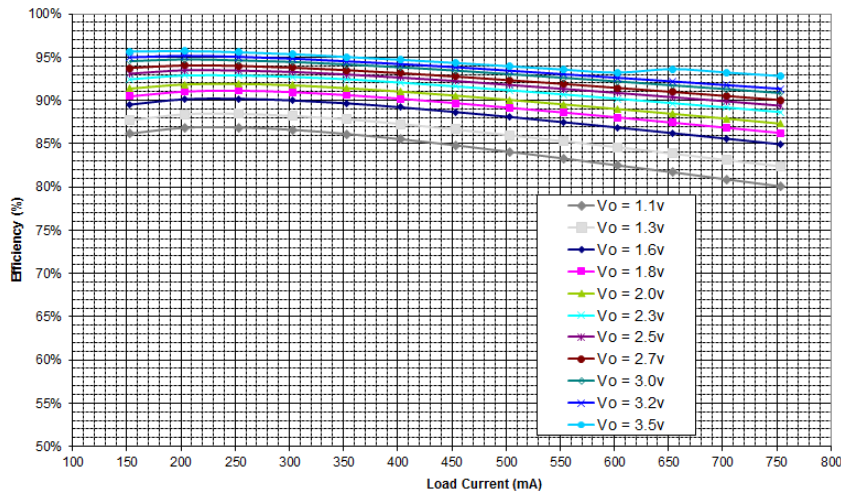


图 12. 重载模式下 ($I_o > 150\text{mA}$, $V_{in} = 3.8\text{V}$) SuPA 在不同输出电压下 (1.1V~3.5V) 效率曲线

8 APT 模式的 SuPA 的内部电路框图剖析

以 LM3242 为例做一个详细设计说明，LM3242 是开关频率为 6MHz 的面向 3G 和 4G 功放的驱动电源，输出电压从 0.4V 到 3.6V 连续可调，带有 ACB 模式（FB 管脚和 VIN 管脚之间的 MOSFET 承担此功能，复用 FB 管脚功能），最大输出电流可以支持到 750mA（DC-DC 模式）和 1A（ACB 模式），支持自动省电和低噪音模式；它的下一代产品 LM3243 可以支持高达 2.5A 的输出电流，带有单独的 ACB 管脚实现主动式辅助电流旁路模式，因此 LM3243 可以支持到 2G/3G/4G 模式，功能更加丰富，适用范围更宽。

从它的内部功能框图中可以看到，主开关管 V1 和 V2，承担降压变换功能，符合 $V_o = D \cdot V_{in}$ ，而开关管 V3，承担 ACB 功能，FB 管脚被复用，承担电压反馈和 ACB 能量输出作用；VCON 管脚是用来接收来自射频单元或者基带单元给出的模拟电压信号，这个信号是由基带单元和射频单元的处理芯片将射频信号信息以及射频功放的特征信息经过计算转换成的可变电压信号，这个可变电压信号被送入 LM3242，使得输出电压跟随这个可变输入电压信号，它们可以用数学公式描述： $V_o = A \cdot V_{CON}$ ， $A = 2.5$ ， $V_{CON} = 0.16\text{V} \sim 1.44\text{V}$ 。

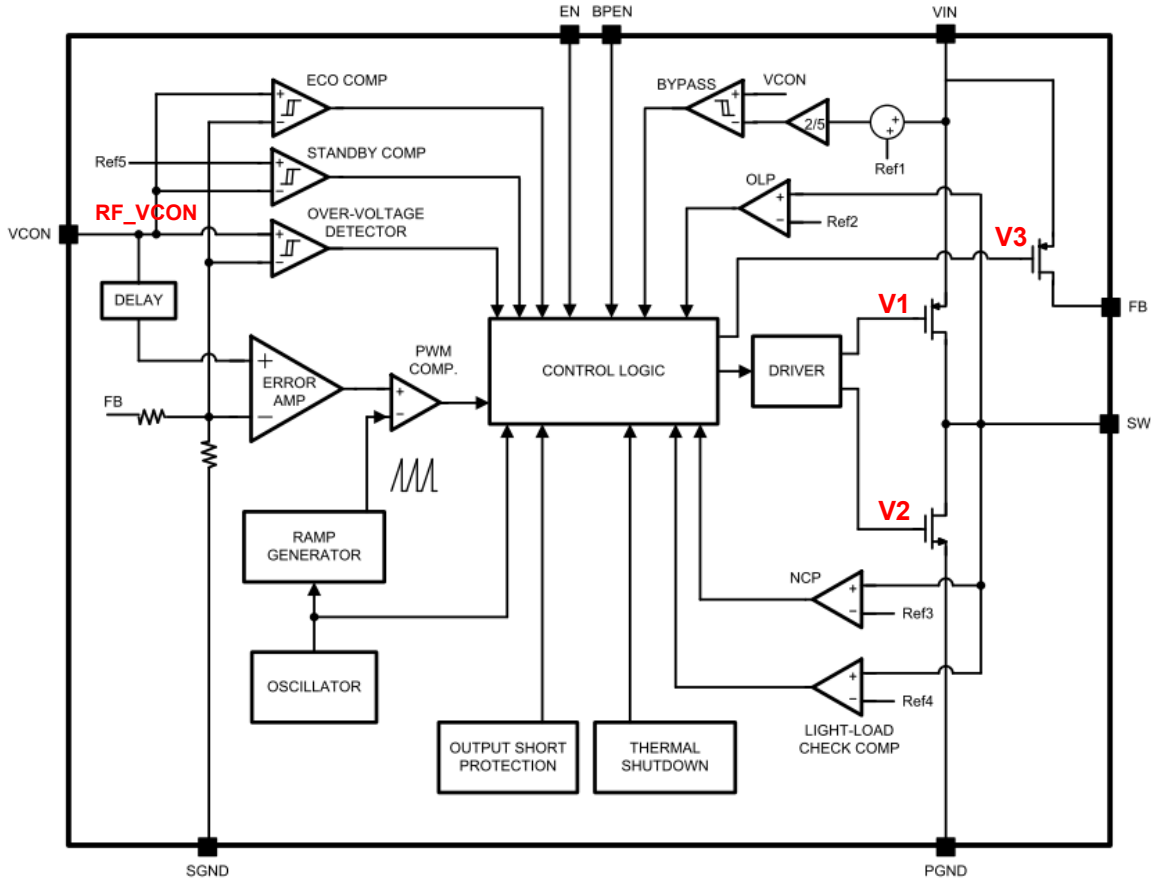


图 13. LM3242 内部简化功能框图，V1 和 V2 承担电压变化器功能，V3 承担 ACB 旁路功能

9 APT 模式下 SuPA 的原理图设计和关键功率器件设计:

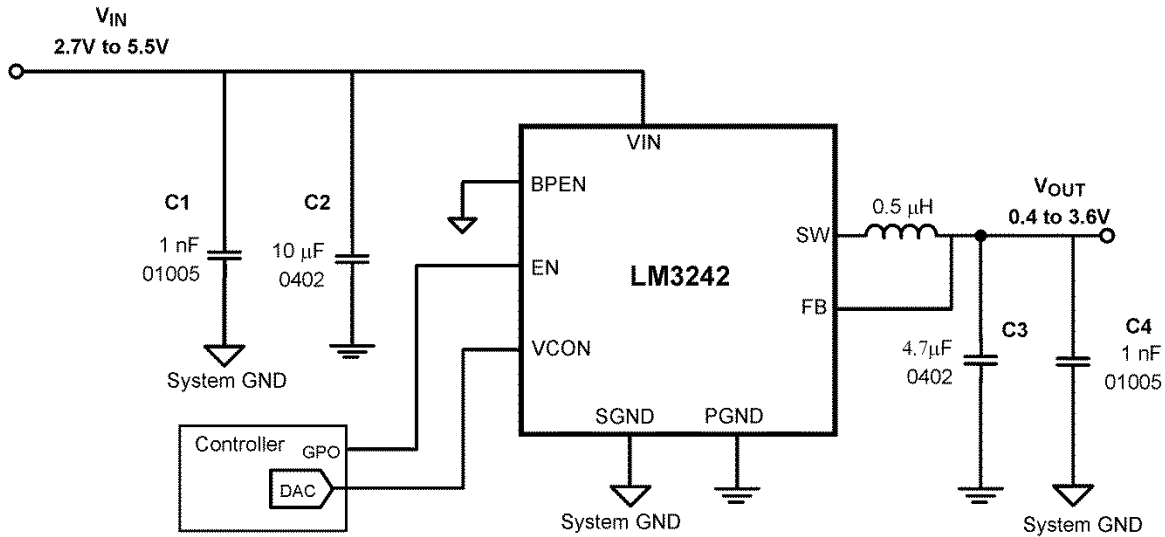


图 14. LM3242 典型应用原理图

图 14 是 LM3242 的典型原理图，为了清楚阐述功率器件设计过程，下面将分为两大部分进行说明。

输入、输出电容设计考虑：

从图 14 中可以看到输入电容为 1nF 和 10uF 组合，这样做的原因是可以滤除不同频率的噪音，输入端噪音可以来自两个部分：第一，来自于输入端电源总线上的噪音，比如总线还给其他负载供电，而这些负载的电源也是来自于 DC-DC 变换器，因此在电源总线就会叠加非常丰富的噪音；第二，来自于 LM3242 的自身开关噪音，它的开关噪音同样会叠加在输入端，因此可能会干扰总线上的其它负载芯片，所以实际设计时，入口还会需要更多不同容值的电容才可以满足滤除不同噪音频率的要求，比如 10pF 或者 100pF 的电容也会用到，不同容值的电容所针对的最佳滤除频率也是不一样的，对于大容量的电容来说它可以滤除的频率范围相对来说窄一些，因为它的拐点频率比较低，在拐点频率之内，电容的阻抗是呈下降趋势，也就是表现的是容性特质，但是拐点频率之上，阻抗是呈上升特性，则表现的是电感特性，因此不再具有滤波作用，这也就是需要搭配不同容值电容的原因所在，因为噪音频率非常丰富，一种容值的电容是不可能把宽频带的噪音全部滤除掉，另外还要注意同等容值、同等耐压的小尺寸的电容表现出来的容性带宽更宽一些，这主要是小尺寸的电容它的内部寄生电感量更小一些、同时它的有效容量更低一些，因此表现出来的特性就是滤除噪音的带宽更宽一些，从图中可以看出小容量但是尺寸更小的 01005 封装的电容，它可以滤除的噪音频带更宽。

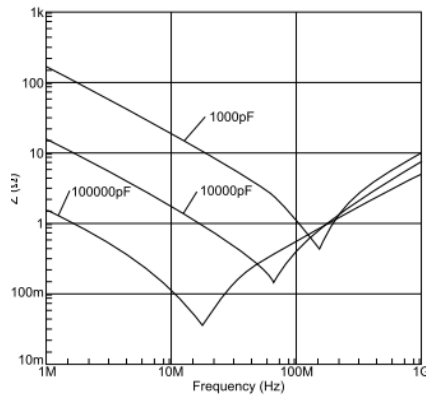


图 15. 电容阻抗和频率关系图

输出电感设计考虑：

功率电感的计算，一般可以参照下面公式进行计算

$$L = \frac{(V_{in} - V_o) \times D}{F_{sw} \times \Delta I_o}$$

Vo.....输出电压

D.....Vo/Vin

Fsw.....开关频率，比如 LM3242，开关频率是 6MHz

ΔIo.....电感内部的纹波电流，可以取 (0.2~0.5) Io

设计范例：

$V_{in}=4.2V$, $V_o=3.4V$, $I_o=0.75A$, $\Delta I_o=0.3 \times I_o$, $F_{sw}=6MHz$, $D=3.4/4.2=0.81$

则：

$$L = \frac{(V_{in} - V_o) \times D}{F_{sw} \times \Delta I_o} = \frac{(4.2 - 3.4) \times 0.81}{6 \times 10^6 \times 0.3 \times 0.75} = 0.48 \mu H, \text{ 取 } 0.5 \mu H$$

从公式中可以看出，纹波电流越小则电感量就会越大，越小的纹波电流则在输出电容上产生的纹波电压就会越小（纹波电压=输出电容的ESR*纹波电流），但是电感的尺寸会变大，不利于小尺寸设计，因此在实际设计时，需要平衡电感量、纹波电流、电感尺寸之间的关系。在选择电感时，除了要满足电感量参数外，还要考虑电感的可以承受的最大电流，即 I_{RMS} 电流值，同时还要考虑电感的饱和电流值，即 I_{SAT} ，如果流过电感的总电流 $I_{TOTAL}=I_{DC}+I_{RIPPLE}$ 超过了 I_{SAT} ，那就会使得电感饱和而失去了电感特性，即由电感变成了导线，从而造成变换器失效而损坏，通常来说，工程上快速评估可以采取 1.5 倍的 I_o 做为一个合适的选取标准，比如输出负载电流为 1A，那么选择电感的有效电流 I_{RMS} 为 1.5A 为宜；还要注意的，尽量选取带有屏蔽功能的电感，这样可以减少 DC-DC 变换器工作时对外部环境造成的干扰。

10 SuPA 的 PCB 设计和 PCB 板叠层设计

1. 功率器件的位置（输入、输出电容和电感）

如下图所示，

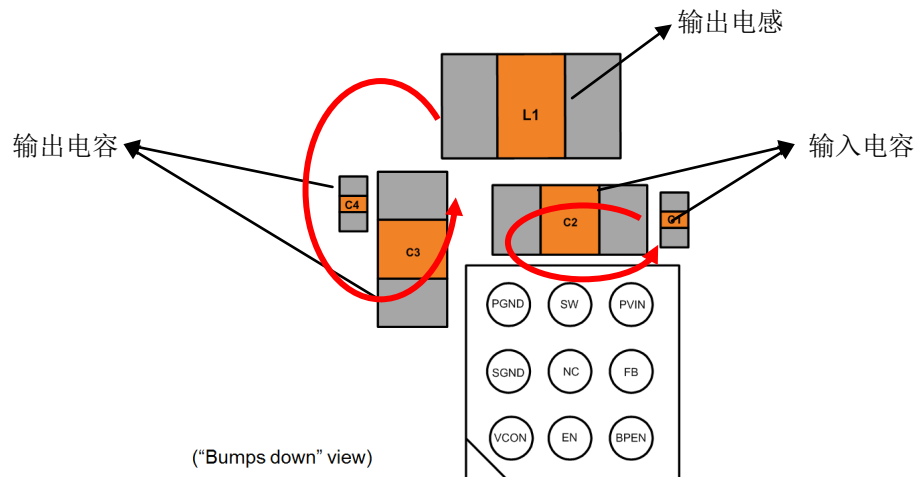


图 16. LM3242 布局示意图

从图中可以看出入口电容C1和C2是放置在芯片PVIN管脚最近的位置，输出电容是放在距离电感输出端最近的位置，这样做的原因是保持输入端功率回路包含面积（芯片，C1和C2、地线组成的环路）以及输出端功率回路面积（输出电感、C3、C4、地线）最小，这样可以有效减小开关电源噪声对外部环境的干扰，这是在射频电路设计中需要仔细考虑的要点。

2. 功率器件与芯片间的连线和PCB板叠层定义

PCB 板叠层设计举例:

表层: 用于连接流过大电流的连线, 比如输入、输出电容、电感的电源线。

第二层: 连接信号用的连线可以放置在此层, 注意的是 **FB** 管脚是被复用的 (做为 **ACB** 使用) 会承载比较大的电流, 因此需要使用 **10mil** 以上的线宽连接。

第三层: 连接 **SW** 的连线可以放置此层, **SW** 是用来承载大于 **1A** 以上的峰值电流, 因此线宽需要大于 **15mil**, 在某些应用时甚至需要分配两层同时放置 **SW** 铜线 (两层叠加), 用于减小寄生电感, 尽可能降低在此铜线上的 **dv/dt**, 即 **SW** 上的开关噪音振铃幅值。

第四层: 系统地层, 它需要一层完整的铜箔作为地层, 它可以作为芯片 **SGND/PGND** 的公共连接地层。

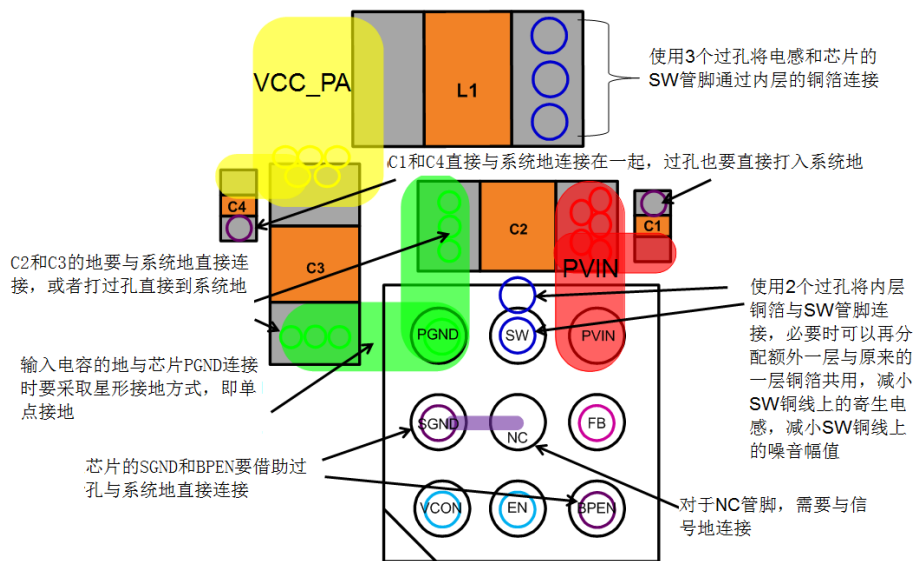


图 17. LM3242 布局表层连线示意图

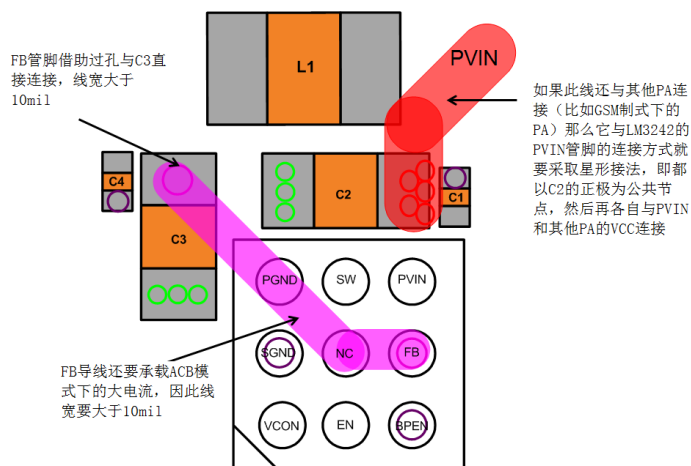


图 18. LM3242 布局第二层连线示意图

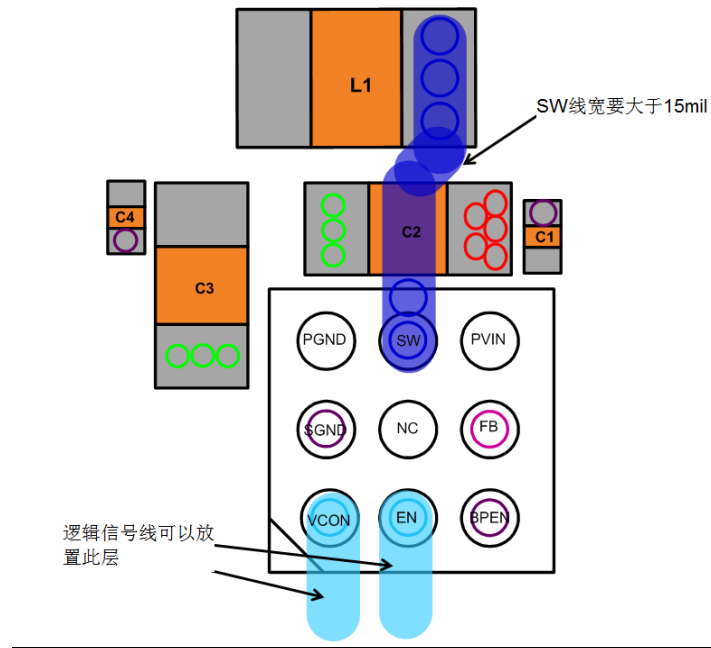


图 19. LM3242 布局第三层连线示意图

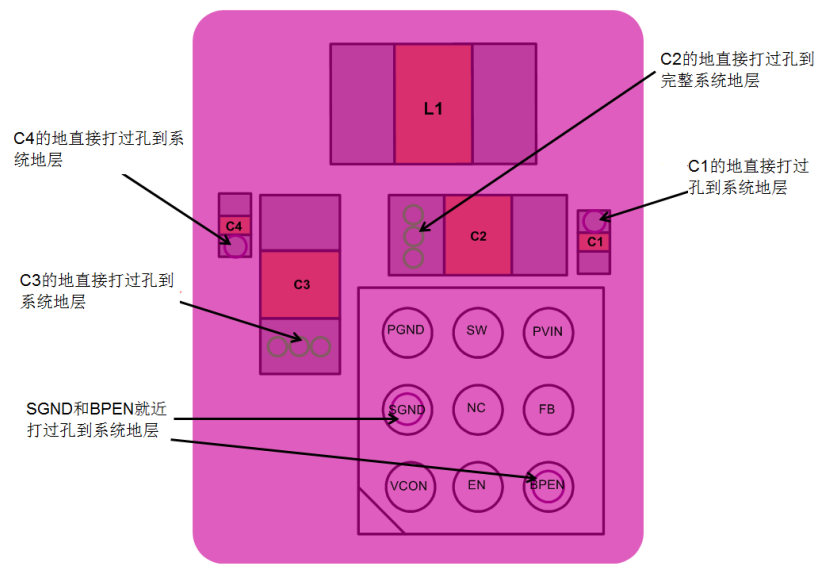


图 20. LM3242 布局第四层连线示意图

11 结论和主流射频功放电源产品

当今的手持设备功能越来越丰富，因此对于手持设备的电源系统设计来说挑战性越来越高，在满足高性能的同时尽可能延长续航时间是电源设计的终极目标，本文所讨论的 SuPA 产品可以有效节省射频单元的耗电量，尽可能把宝贵的能量留给其他应用处理器，有效提高设备的工作时间，目前德州仪器公司出品了一系列产品去满足不同射频功放的要求，比如 LM3242，LM3243，LM3262，LM3263 以及支持既可以升压又可以降压的产品满足未来的 4G 应用。

12 参考文献

1. LM3242 技术手册，德州仪器公司
2. TI AN LM3242 PCB Layout，德州仪器公司
3. 2G-3G-4G RF System Overview，德州仪器公司

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122
Copyright © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司