

## 引言

最先进的NFC器件提供高输出功率和各种比特率、以及通信协议。更高的比特率和输出功率会受到NFC天线失谐的影响。电感、自谐振频率、Q值等天线参数可能会降低输出功率或引起失真和不符合标准的信号。

本文档描述如何使用ST25R3916器件上可用的测量功能实现自定义调谐算法。

本文档旨在与ST25R天线匹配工具软件（STSW-ST25R004）一起使用，该软件支持匹配元件的计算，并将调谐迭代工作量降至最低。除了该工具外，还提供了一个开源仿真工具，通过仿真进行基本系统验证。

## 目录

|    |                               |    |
|----|-------------------------------|----|
| 1  | 失谐效应 .....                    | 5  |
| 2  | 压控电容器 .....                   | 6  |
| 3  | 二次谐波和三次谐波 .....               | 8  |
| 4  | 谐波比较 .....                    | 10 |
| 5  | 通过可变电容实现AAT .....             | 11 |
| 6  | VCC调谐范围 .....                 | 14 |
| 7  | 测量匹配阻抗 .....                  | 20 |
| 8  | 在ST25R3916 PC GUI中启用AAT ..... | 21 |
|    | 8.1 天线选项卡 .....               | 21 |
|    | 8.2 模拟配置 .....                | 23 |
|    | 8.3 轮询选项卡 .....               | 24 |
| 9  | 调谐算法 .....                    | 25 |
| 10 | 结论 .....                      | 26 |
| 11 | 版本历史 .....                    | 27 |

表格索引

表1. 测量数据谐波 (dBμV) vs. 驱动供电电压 (V) ..... 9

表2. 调谐范围对比 ..... 19

表3. 电压分布 ..... 19

表4. 文档版本历史 ..... 27

表5. 中文文档版本历史 ..... 27

# 图片目录

|      |                             |    |
|------|-----------------------------|----|
| 图1.  | 失谐效应 .....                  | 5  |
| 图2.  | STPTIC-0N200方案 .....        | 6  |
| 图3.  | 电容vs.控制电压 .....             | 7  |
| 图4.  | 三次谐波 vs. 并联VCC控制电压 .....    | 8  |
| 图5.  | 谐波 vs. 驱动供电电压 .....         | 9  |
| 图6.  | STPTIC-0N vs. LXRW0YV ..... | 10 |
| 图7.  | 计算示例（不包含可变电容） .....         | 11 |
| 图8.  | 三个VCC的电路 .....              | 12 |
| 图9.  | 默认匹配电路（改进了AAT调谐范围） .....    | 13 |
| 图10. | AAT原理图示例 .....              | 14 |
| 图11. | 最大调谐电容 .....                | 15 |
| 图12. | 最低调谐电容 .....                | 16 |
| 图13. | 三个VCC原理图 .....              | 17 |
| 图14. | 四个VCC原理图 .....              | 18 |
| 图15. | 天线调谐 .....                  | 21 |
| 图16. | 天线调谐 - 专业模式 .....           | 22 |
| 图17. | 轮询（POLL_COMMON） .....       | 23 |
| 图18. | 卡模拟（LISTEN_ON） .....        | 24 |



## 1 失谐效应

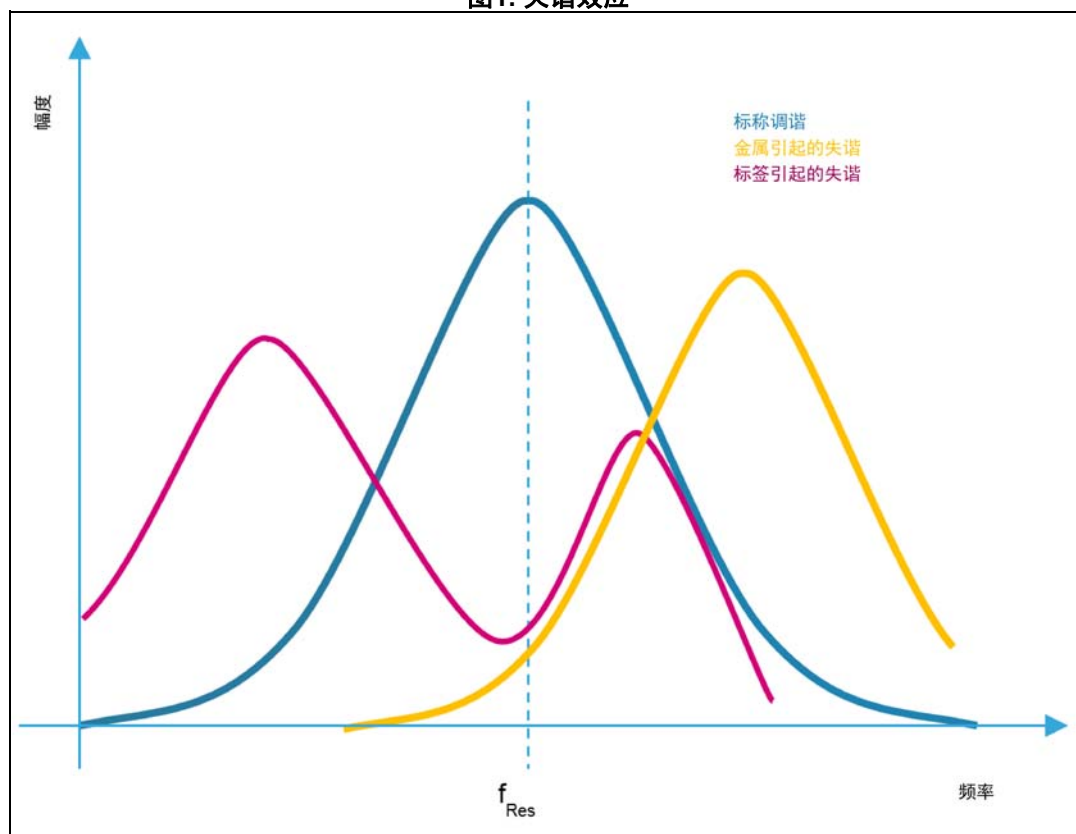
近场通信（NFC）设备的设计目的是与特定天线配合工作。天线匹配网络将天线的电感转化为NFC读卡器IC所见的实际电阻负载。NFC设备配有一根天线（调到13.56 MHz）和一个期望的系统品质因数（Q），其目的是支持高输出功率和高比特率。NFC读卡器IC所见的匹配阻抗是调节功耗时的主要因素。

失谐效应影响该参数。

例如，靠近的金属物体会增加天线的自谐振频率（SRF）。由于涡电流和随之而来的金属损耗，Q值下降，读卡器的读取距离减小。如果将天线谐振移到更高频率，读卡器仍然发送13.56 MHz频率的信号。把天线调到更高的频率会引起过冲和震荡。信号可能被其他NFC设备或卡错误解析，可能不符合NFC标准。

卡谐振频率（ $f_{\text{Res}}$ ）在图1中可见，显示了标称调谐读卡器的失谐效应。靠近读卡器的金属物体将把标称调谐推向更高的频率。调谐后频率高于13.56 MHz的卡将使标称调谐下降。

图1. 失谐效应



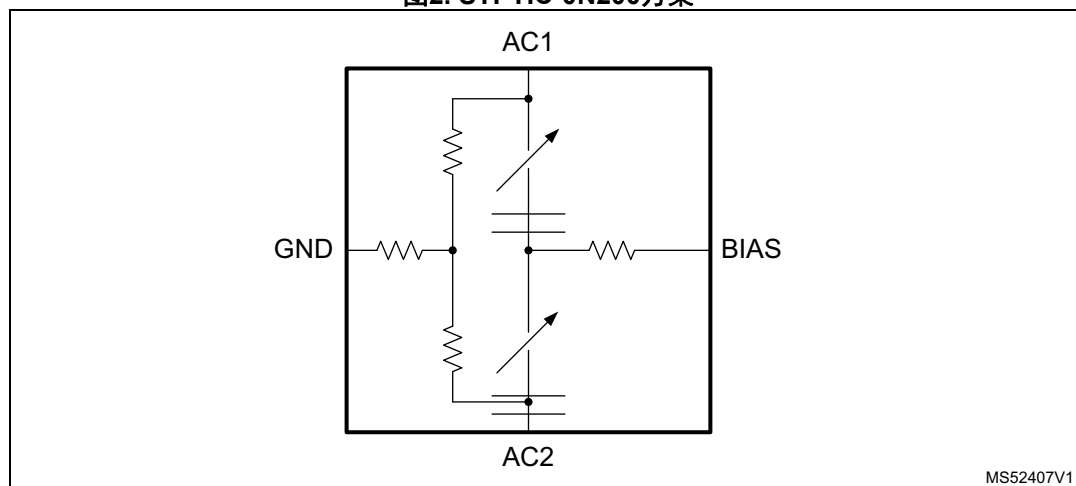
## 2 压控电容器

压控电容器（VCC）是一种四引脚器件，其电容随控制电压的变化而变化。

调谐范围取决于制造商和制造工艺。本文档中涉及两种VCC，最大调谐电容均为200 pF：

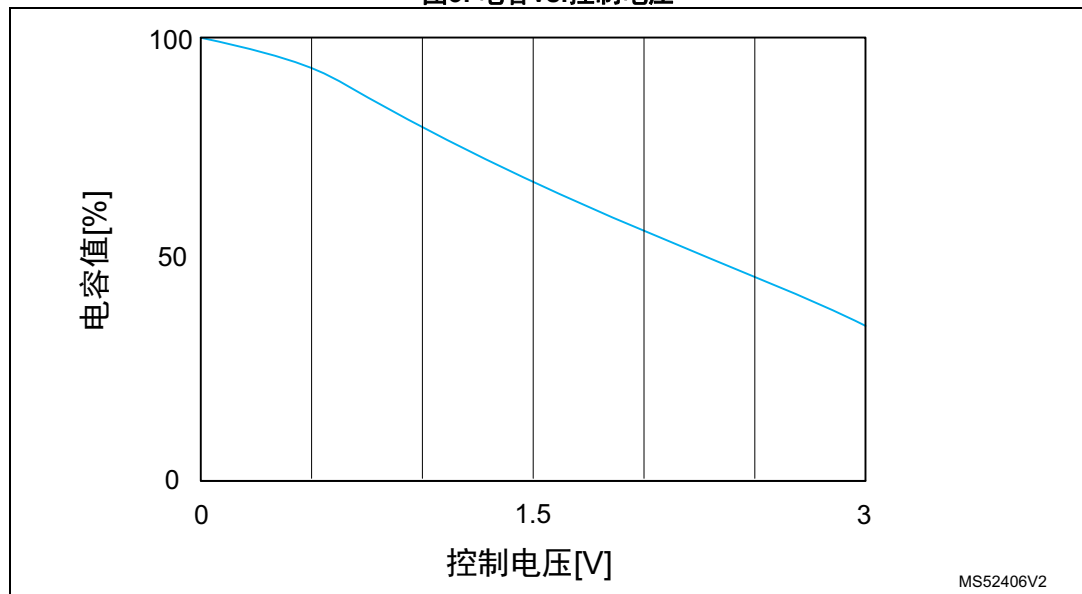
- Murata LXRW0YV201（选为ST25R3916-DISCO的默认配置）
- 意法半导体的STPTIC-0N200，其方案见于图 2。

图2. STPTIC-0N200方案



调谐范围通常在电容值的100%到50%或者35%之间（分别对应于0V和3V控制电压）。调谐电压和电容之间的关系可以估计为线性，但仔细观察VCC数据表就会发现它更复杂。图 3 显示了该意法半导体器件的电容与控制电压的关系。

图3. 电容vs.控制电压



由于VCC器件内部电路的原因，控制电压的变化会导致电容值延迟变化。延迟与器件有关，通常在1-10 ms之间。在通过软件动态控制VCC时，必须考虑这种行为。

### 3 二次谐波和三次谐波

VCC器件内部结构的另一个副作用是产生三次谐波。三次谐波的大小取决于两个因素，即电容引脚之间的交流电压和施加到VCC器件上的控制电压。

图 4显示辐射的三次谐波与并联VCC控制电压之间的相关性。测量时使用的是图 10中所示的默认配置。一步一步地添加与VCC器件并联的固定电容器。为了保持相同的匹配阻抗，增加了VCC的控制电压，因此匹配电路的整体并联电容保持不变。

图4. 三次谐波 vs. 并联VCC控制电压

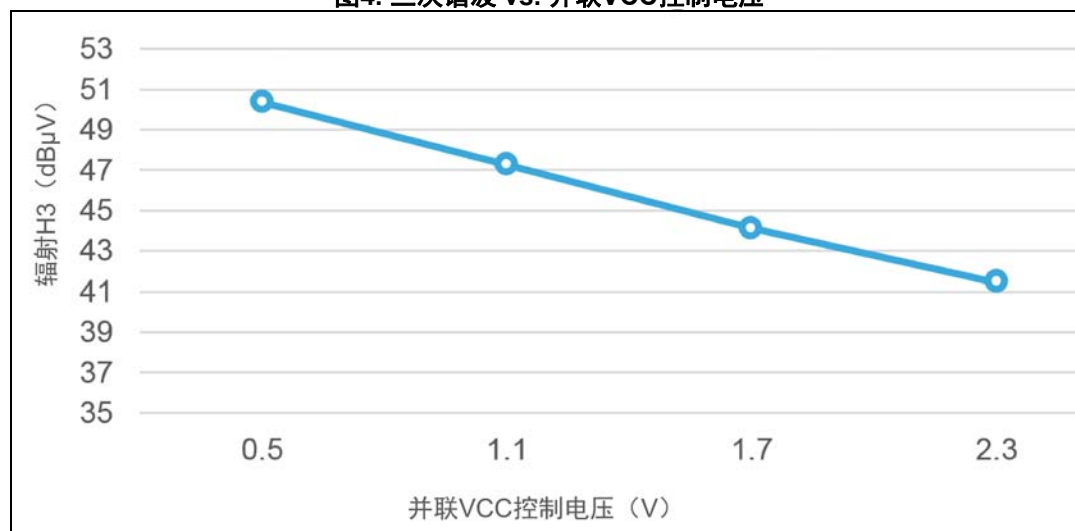




图 5显示了驱动器电源电压 ( $V_{DD\_RF}$ ) 与基本谐波、二次谐波和三次谐波的产生之间的关系。在该测量中, VCC控制电压保持恒定。驱动电源电压由4.5 V变为3.6 V。在降低电源电压的同时, 基波略有降低, 在使用VCC器件的DUT (虚线) 上可以看到二次和三次谐波有显著下降。

图5. 谐波 vs. 驱动器电源电压

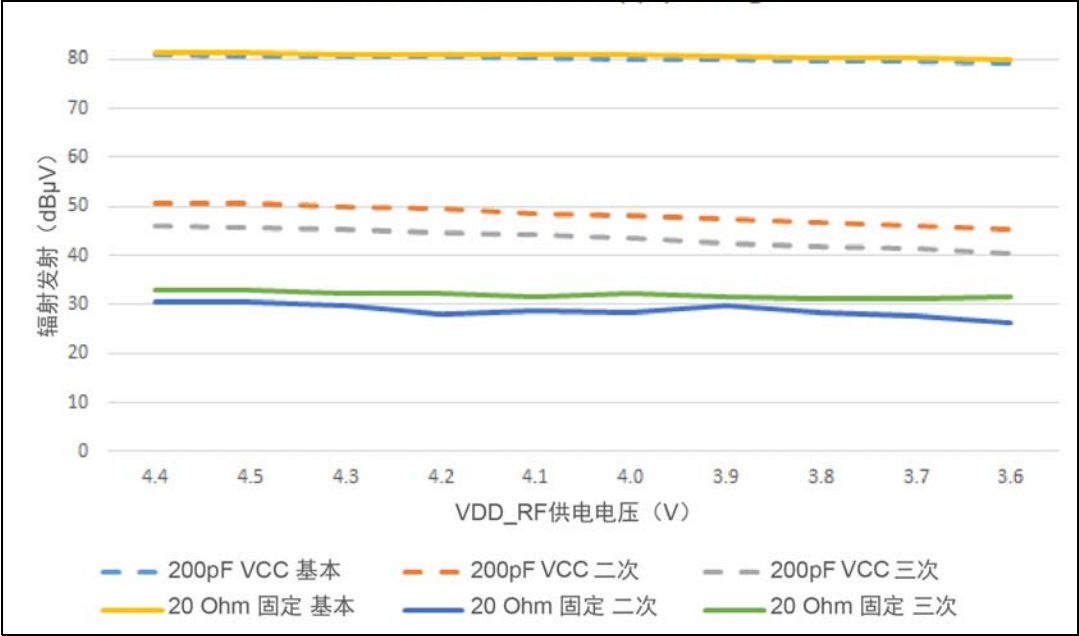


表 1详细介绍了图 5中显示的一些结果。采用200 pF VCC电容器 (蓝色虚线) 的原理图显示了 $V_{DD\_RF}$ 变化引起的-1.6 dBμV基波值下降。不采用VCC器件且固定匹配为20  $\Omega$ 的原理图显示相似的基波值下降。使用VCC时, 二次谐波和三次谐波的降值明显变大。

表1. 测量数据谐波 (dBμV) vs. 驱动供电电压 (V)

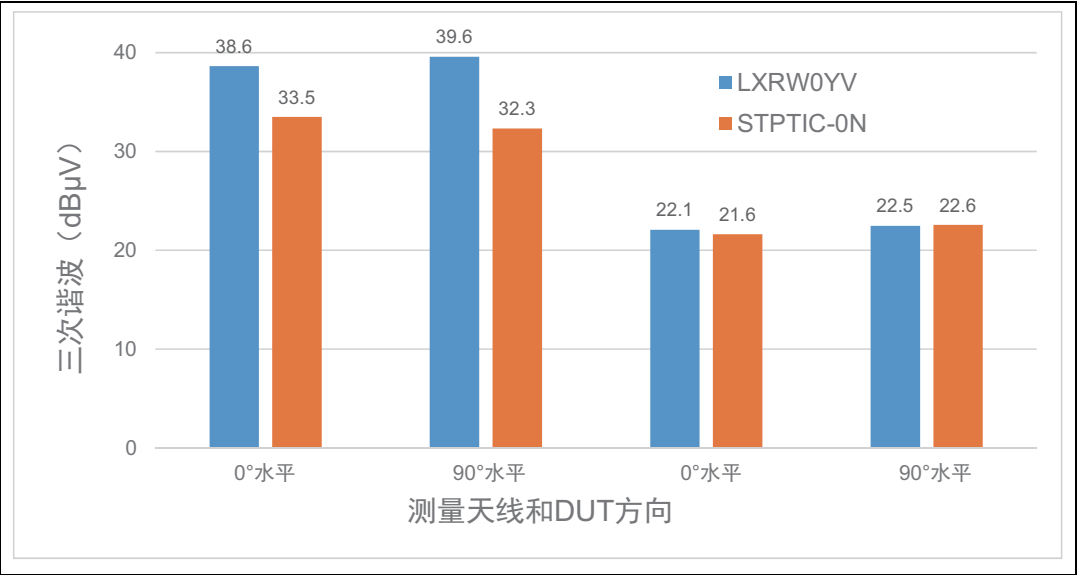
| $V_{DD\_RF}$ | 200 pF VCC |      |      | 20 $\Omega$ 固定 |      |      |
|--------------|------------|------|------|----------------|------|------|
|              | 基本         | 秒    | 三次   | 基本             | 秒    | 三次   |
| 4.5          | 80.8       | 50.6 | 45.9 | 81.2           | 30.5 | 32.9 |
| 4.0          | 80.0       | 48.2 | 43.4 | 80.8           | 28.5 | 32.3 |
| 3.6          | 79.2       | 45.4 | 40.4 | 79.9           | 26.3 | 31.4 |

表 1和图 5中显示的数据表明, 使用VCC器件时, 二次谐波和三次谐波明显变大。在设计过程中必须考虑这一事实。VCC器件产生的二次和三次谐波的总额可向制造商提出要求。

4 谐波比较

图 6显示了Murata LXRW0YV和意法半导体的 STPTIC-0N之间的对比，采用默认原理图（图 10）。添加固定MLCC电容器与四个VCC并联，让STPTIC-0N和LXRW0YV器件均拥有18Ω的相同目标匹配阻抗。

图6. STPTIC-0N vs. LXRW0YV



这两种受测的配置中，施加于串联电容器和并联电容器的控制电压相同。并联电容器的控制电压设为大约2.25 V。当测量天线与DUT天线并联时，测得的差值约为6 dbμV。

## 5 通过可变电容实现AAT

典型值 ( $C_{\text{Max}} - C_{\text{Min}}$ ) 范围是200 - 75 pF、100 - 35 pF、以及50 - 20 pF。

理想的调谐范围取决于所选的天线SFR和应用。为了将天线调至13.56MHz，天线的SFR越高，需要的并联电容越大。

可以使用ST25R天线匹配工具（STSW-ST25R004，可在[www.st.com](http://www.st.com)上获得），根据测量到的天线参数计算出匹配的元件值。如需使用该工具匹配NFC天线的流程，请参见可从[www.st.com](http://www.st.com)上获得的AN5276“ST25R3916的天线设计”。匹配工具的最新版本还支持包括AAT在内的拓扑。

在图7中，计算匹配网络时不考虑可变电容，而在图8中，一些静态电容已被可变电容所取代。

图7. 计算示例（不包含可变电容）

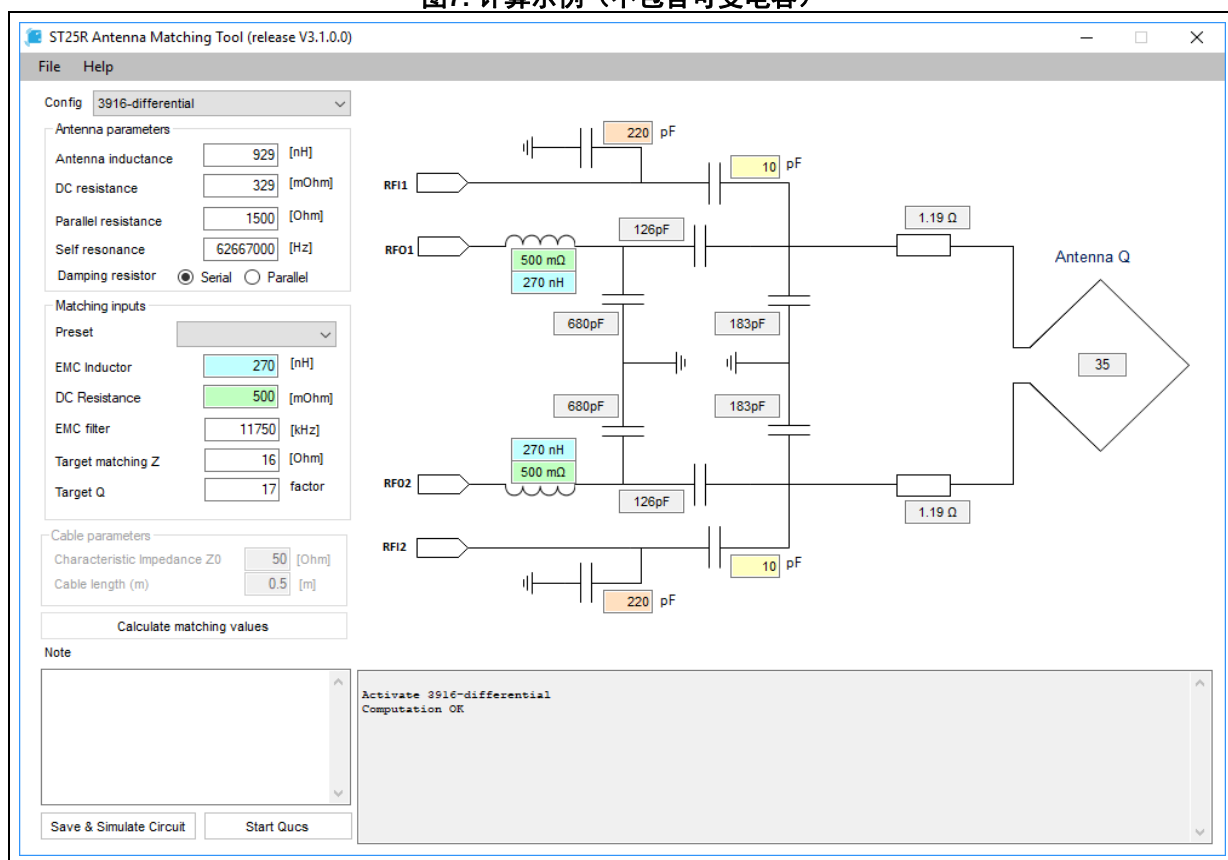
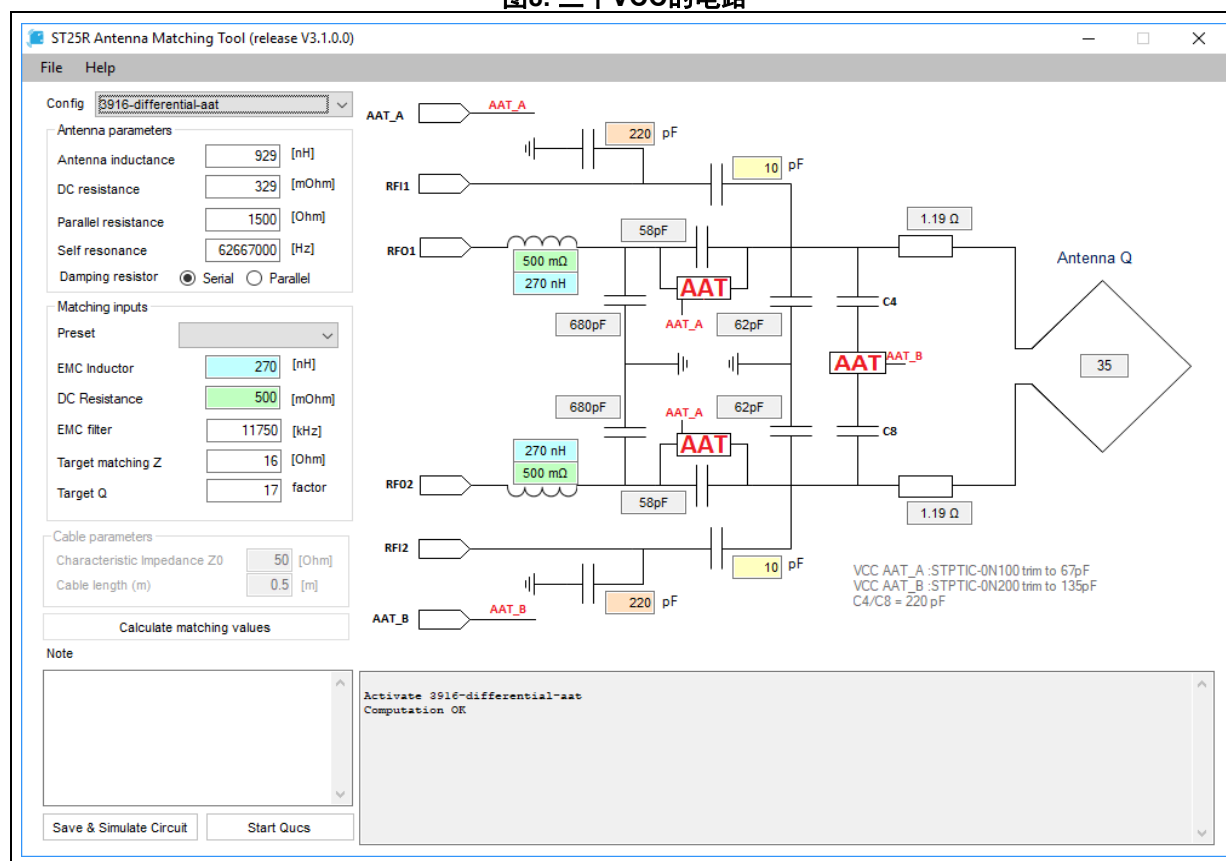


图8. 三个VCC的电路



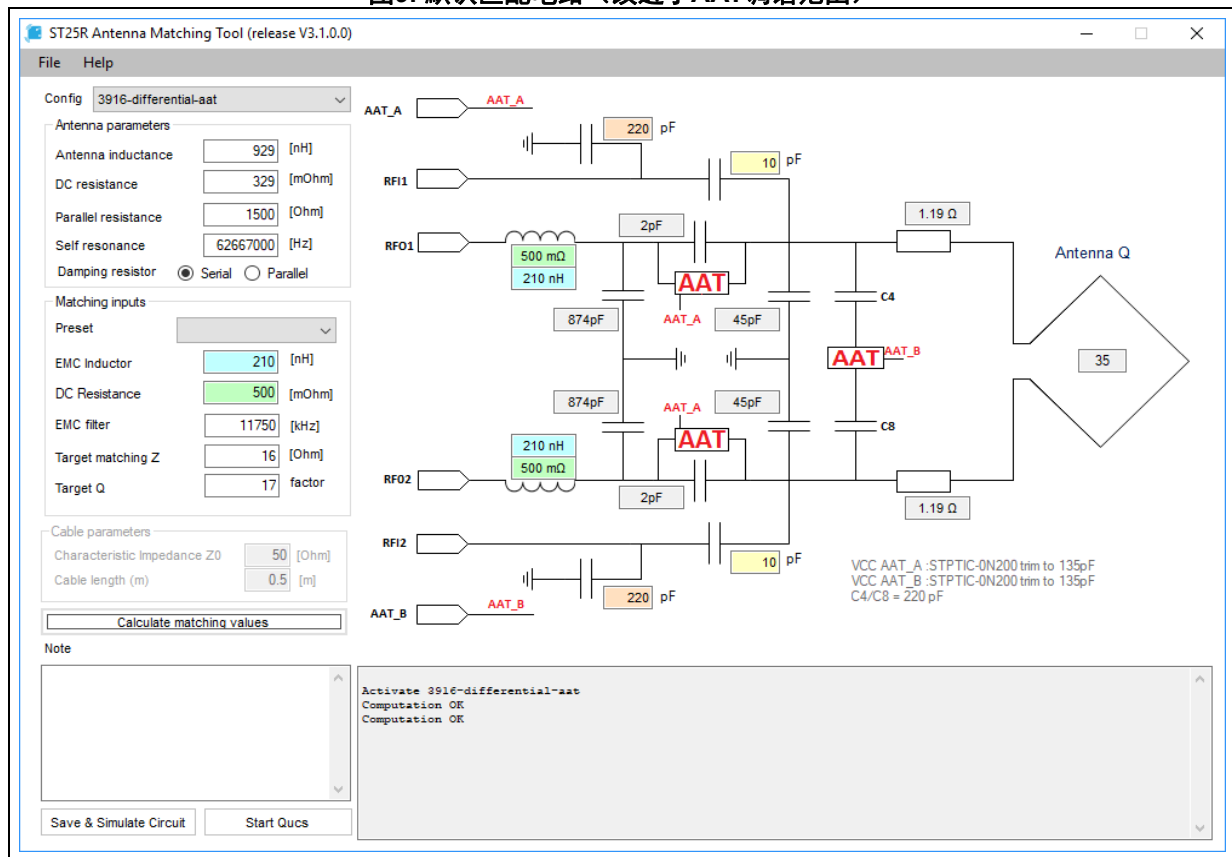
该工具自动选择一个典型的变容二极管，假设使用其在1.5 V DAC控制电压下取得的中值（135、67.5或34 pF）。

在图 8中，它选择STPTIC-0N200作为并联电容（中值大约为135 pF），并添加了Cp1（62 pF）以实现183 pF的总并联电容。C4和C8已被认为是220 pF MLCC电容器。

在不改变EMC截止频率的情况下，改变EMC电感值，可以将所需的串联电容值移到更合适的区域。

对于图 6中的示例，可以通过将EMC电感从270 nH更改为210 nH的方式将目标匹配阻抗移动到VCC调谐范围的中心。

图9. 默认匹配电路（改进了AAT调谐范围）



计算出的串联电容值接近135 pF，正好位于200 pF VCC调谐范围的中心。该工具计算Cs1的理论值为2 pF，可以忽略。

## 6

## VCC调谐范围

VCC的调谐范围或类型由应用选择。环境变化越大，所需的调谐范围也越大；如果仅需微调，较小的调谐范围就正好。图 10显示 200 pF 并联 VCC 的调谐范围（并联 VCC 的控制电压分别设置为 0V / 3V，以获得最大/最小电容）。

图10. AAT原理图示例

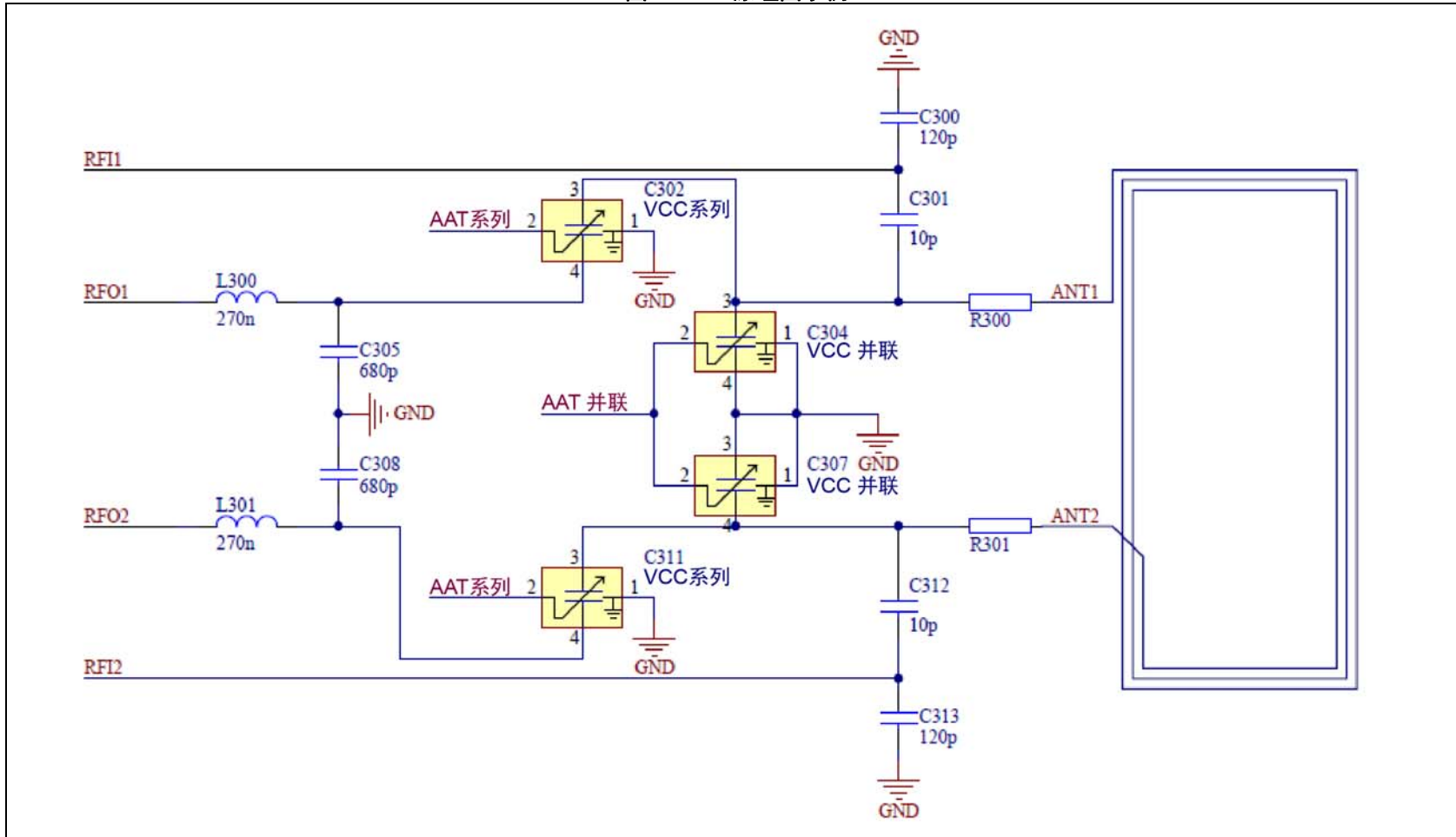


图 11和图 12分别显示最大和最小VCC电容；天线的谐振频率分别在13.56 MHz以下和以上。

图11. 最大调谐电容

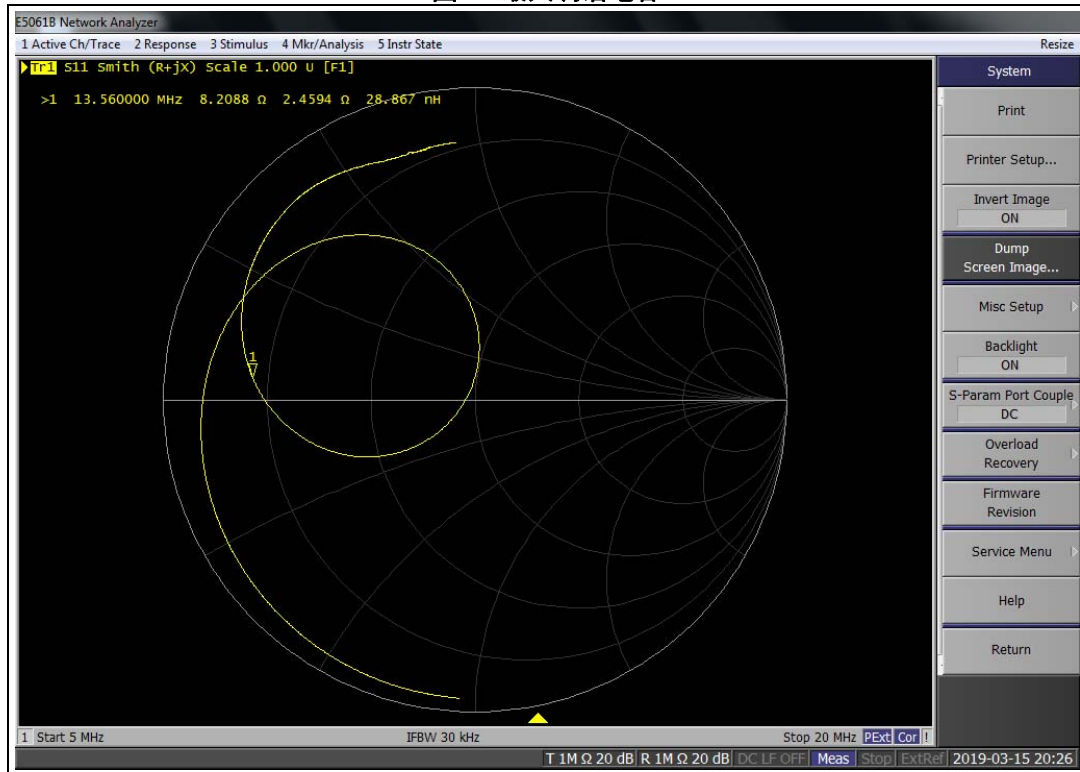
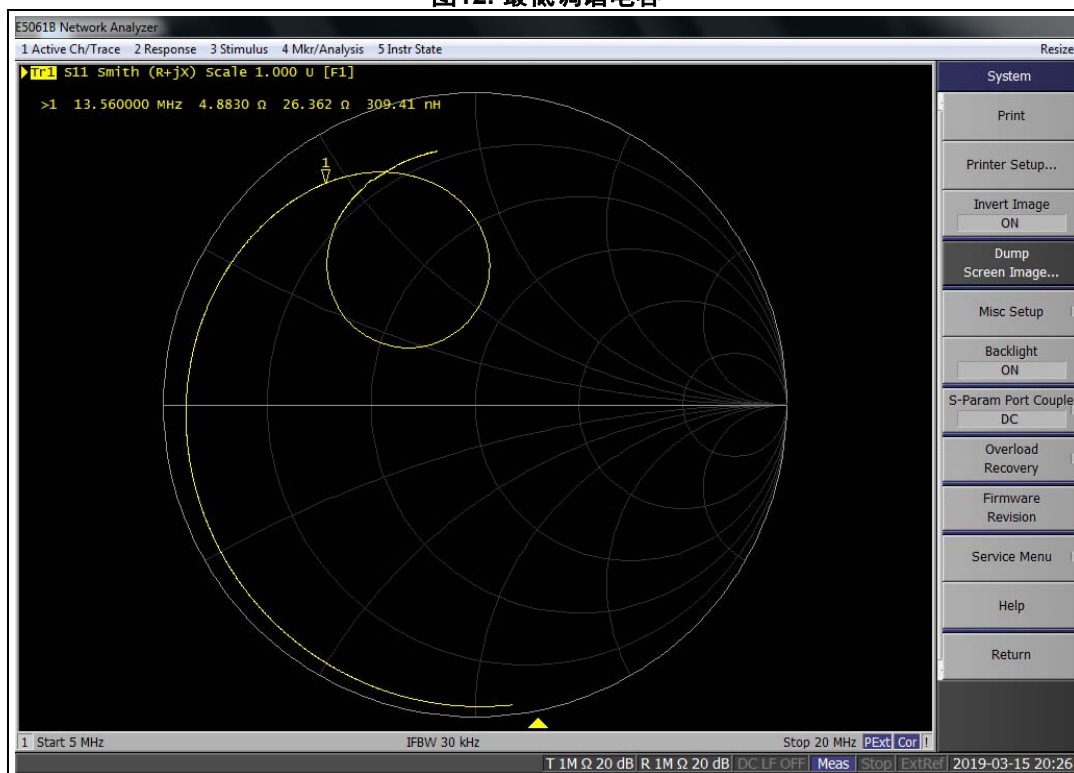


图12. 最低调谐电容



串联VCC和并联VCC都已经改变。串联VCC改变谐振圆的直径，可以用来补偿损耗和阻尼。并联VCC改变天线谐振，它可以用来调整NFC天线的谐振频率，从而补偿导电物体引起的失谐。

为了限制上述二次谐波和三次谐波的产生，默认控制电压不得超过VCC控制电压的上限范围1.5 - 3 V。额外的MLCC电容器（C4，C8）用于限制施加到电容器上的交流天线电压，从而降低三次谐波。

图 13和图 14中的原理图旨在降低通过VCC的电压。



图13. 三个VCC原理图

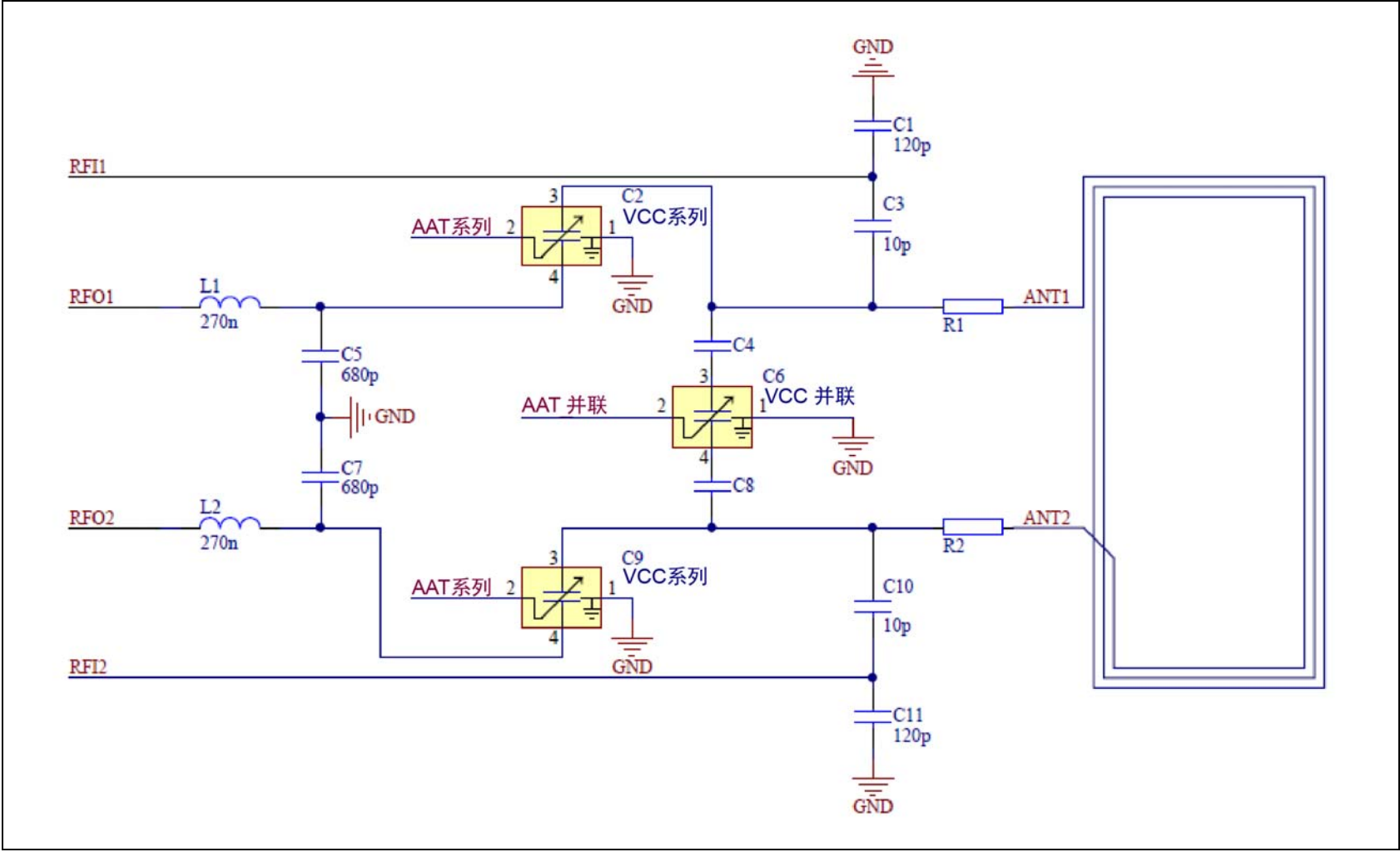
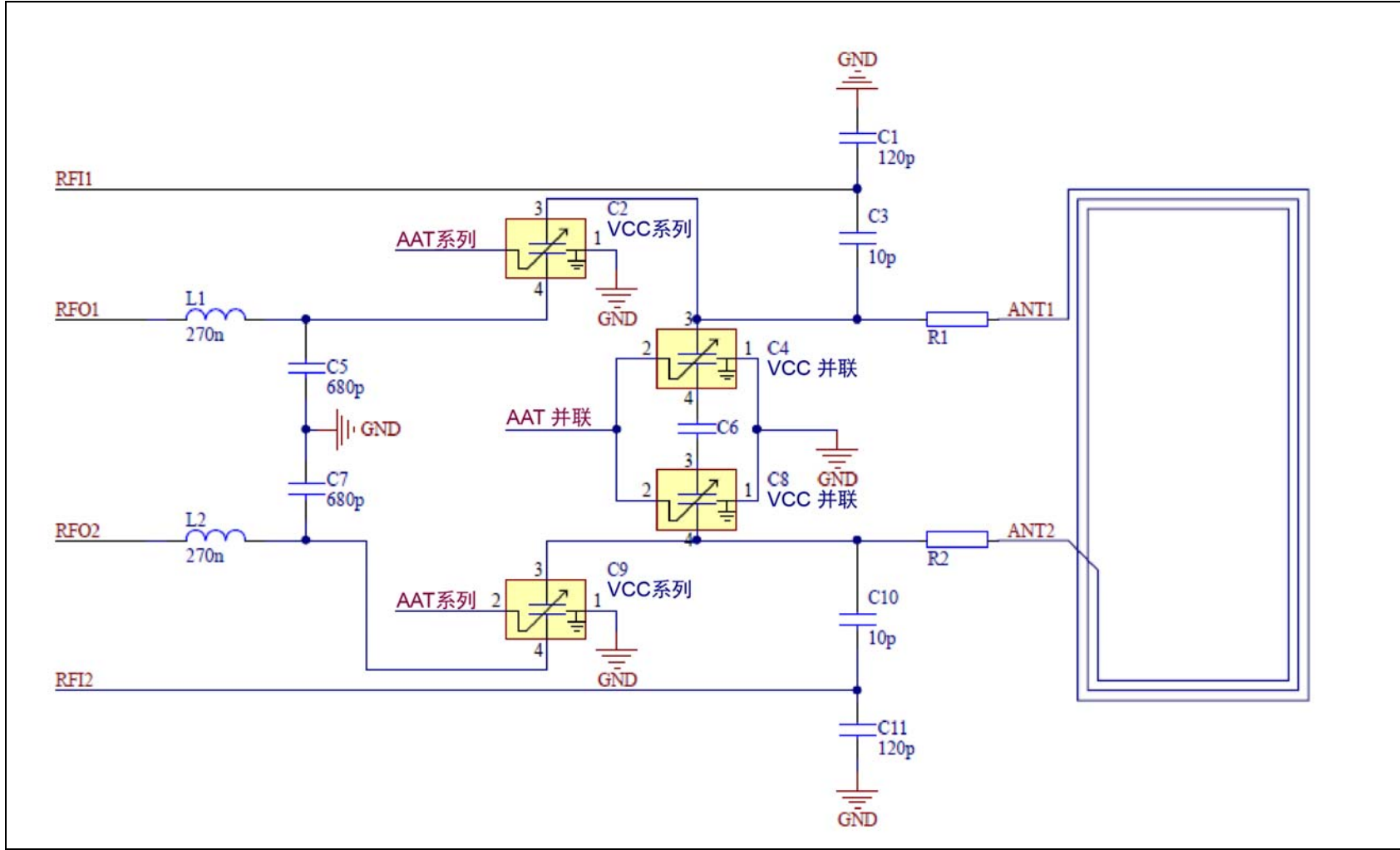


图14. 四个VCC原理图



这些原理图各有优点：

- 默认的原理图提供最大的调谐范围，但通过VCC器件的交流电压最高。
- 使用三个VCC器件的原理图更注重成本，但减少了调谐范围。
- 使用4个VCC器件的原理图提供更大的调谐范围，天线上的交流电压更好地分布在两个VCC器件和MLCC电容器上。

调谐范围可计算为并联电容器的串联连接， $C_{Min}$ 和 $C_{Max}$ 值汇总在表 2中。

表2. 调谐范围对比

| 原理图                |                           | $C_{max_{Max}}$ (pF) | $C_{Min}$ (pF) | Delta (pF) |
|--------------------|---------------------------|----------------------|----------------|------------|
| 四个VCC，无附加MLC (图 9) |                           | 100                  | 37.5           | 62.5       |
| 三个VCC (图 13)       | $C4 = C8 = 220\text{ pF}$ | 71.0                 | 44.6           | 26.4       |
| 四个VCC (图 14)       | $C6 = 220\text{ pF}$      | 68.8                 | 32.0           | 36.8       |

60  $V_{pp}$ 天线的电压分布如表 3所示。

表3. 电压分布

| 原理图                |                           | $V_{cmin}$ ( $V_{pp}$ ) | $V_{cmax}$ ( $V_{pp}$ ) |
|--------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 四个VCC，无附加MLC (图 9) |                           | 30                      | 30                      |
| 三个VCC (图 13)       | $C4 = C8 = 220\text{ pF}$ | 35.7                    | 21.3                    |
| 四个VCC (图 14)       | $C6 = 220\text{ pF}$      | 25.5                    | 20.6                    |

## 7 测量匹配阻抗

为了测量板件通电时的匹配阻抗，需要关闭驱动级。

注：：如果读卡器已通电，请确保寄存器0x28设置为0x0F、且tr\_am位设为“1”，以避免向VNA端口传输功率（从而导致损坏）。

在关闭驱动级后，可以将VNA与RFO引脚并联。现在可以安全地使用0x26和0x27寄存器更改匹配阻抗（使用VCC器件）。

## 8 在ST25R3916 PC GUI中启用AAT

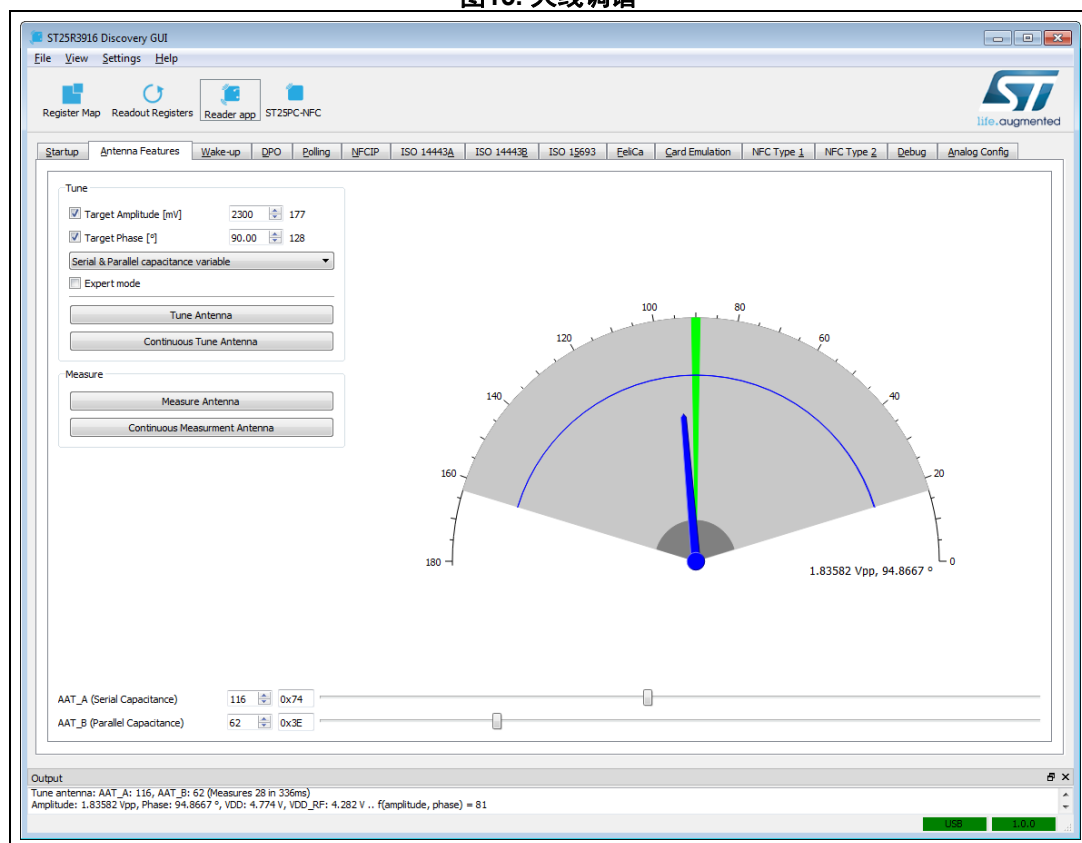
### 8.1 天线选项卡

图 15显示天线特性选项卡的非专业模式。在该选项卡中，可以手动处理ST25R3916的AAT\_A和AAT\_B引脚的值并观察得到的振幅和相位，或者执行算法以调谐天线。

最重要的GUI元素是：

- 串联和并联电容变量：允许用户限制调谐算法，以便仅使用串联或并联电容就达到调谐目标。
- 调谐天线：在固件中运行基于软件的算法。通过调整两个电容滑块，并根据测量的振幅和相位调整量具上的指针，可以得到所需结果。
- 连续调谐天线：重复执行天线调谐步骤并显示结果。
- 测量天线：使用当前配置的AAT\_A和AAT\_B执行单次测量并调整指针。
- 连续测量天线：处理AAT\_A和AAT\_B时很有用，可以看到对振幅和相位的影响。

图15. 天线调谐



注：禁用DPO（动态功率输出），因为AAT将影响DPO的判定标准。用户可能会陷入高功率或低功率DPO模式。更多详细信息请参照[www.st.com](http://www.st.com)上的UM2517“ST25R3916-DISCO参考图形用户界面”。

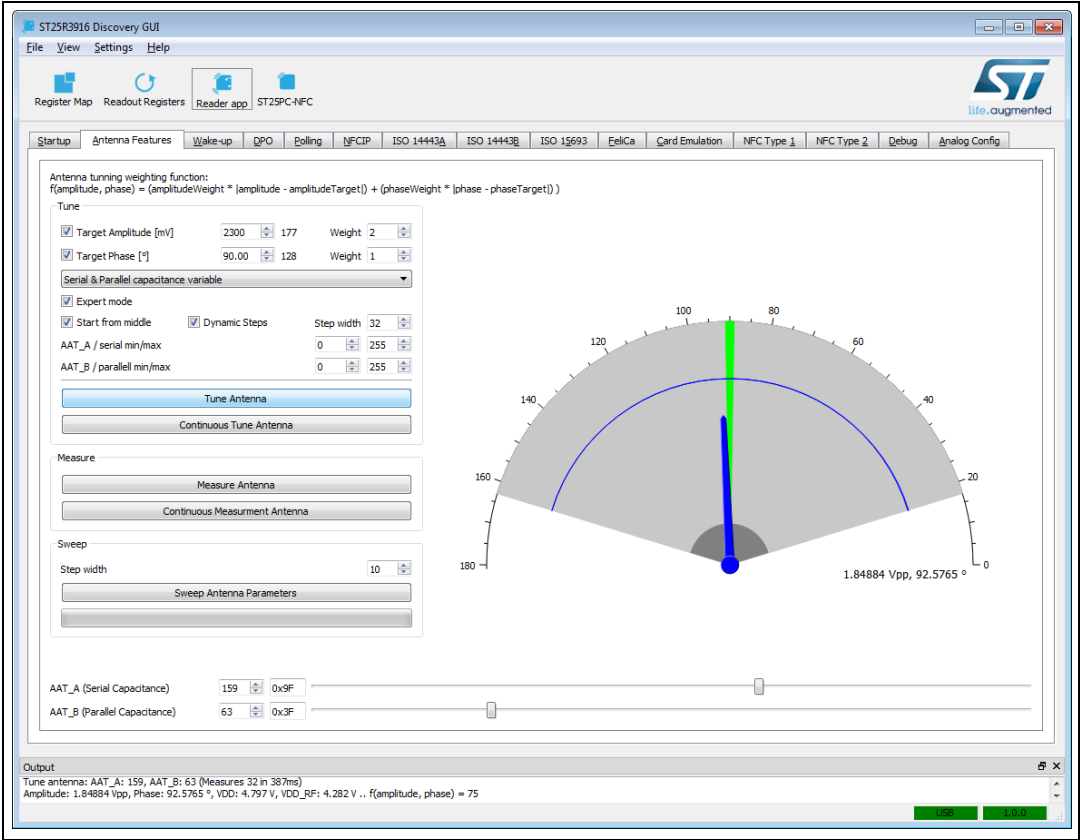
对于所有这些操作，日志区域将显示关于所需测量和调谐步骤的附加信息。调谐点的性能是通过一个线性函数来评估的，该函数指定了与目标值的加权距离：值越低，达到的目标越好。

选择“专业模式”时，可以调整其他设置（参见图 16）。

- “Start from middle（从中间开始）”让算法从AAT\_A、AAT\_B范围的中间（而不是当前的AAT\_A、AAT\_B值）开始。
- “Dynamic Steps（动态步长）”定义如果不能找到更好的点，调谐算法是否应该随后减小步长。
- “Step width（步长）”定义要使用的步长；如果是“动态步长（动态步长）”，则定义的是起始步长

调谐算法可以搜索的范围是有限的。

图16. 天线调谐 - 专业模式



所有这些设置都直接转换为第 9 节中描述的基于固件的实现的参数。

8.2 模拟配置

正常的模拟配置导致AAT\_A和AAT\_B在轮询(POLL\_COMMON)和进行卡模拟（LISTEN\_ON）时被设置为不同的静态值，如 图 17和 图 18（寄存器0x26和 0x27）中分别所示。

图17. 轮询（POLL\_COMMON）

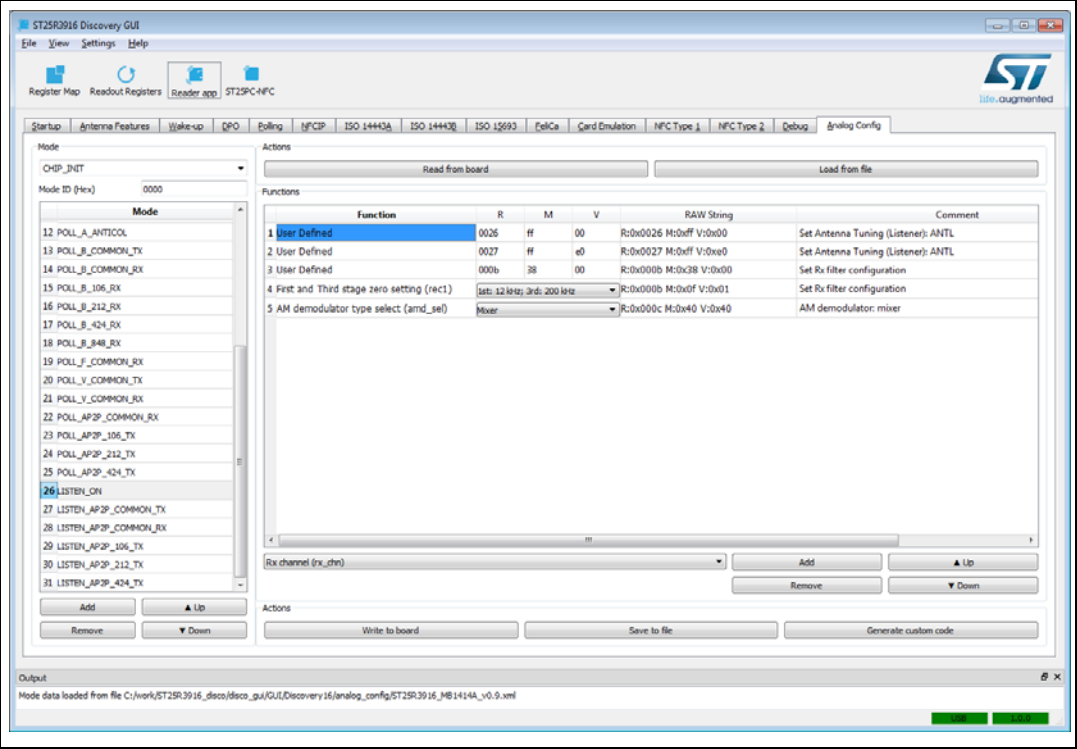
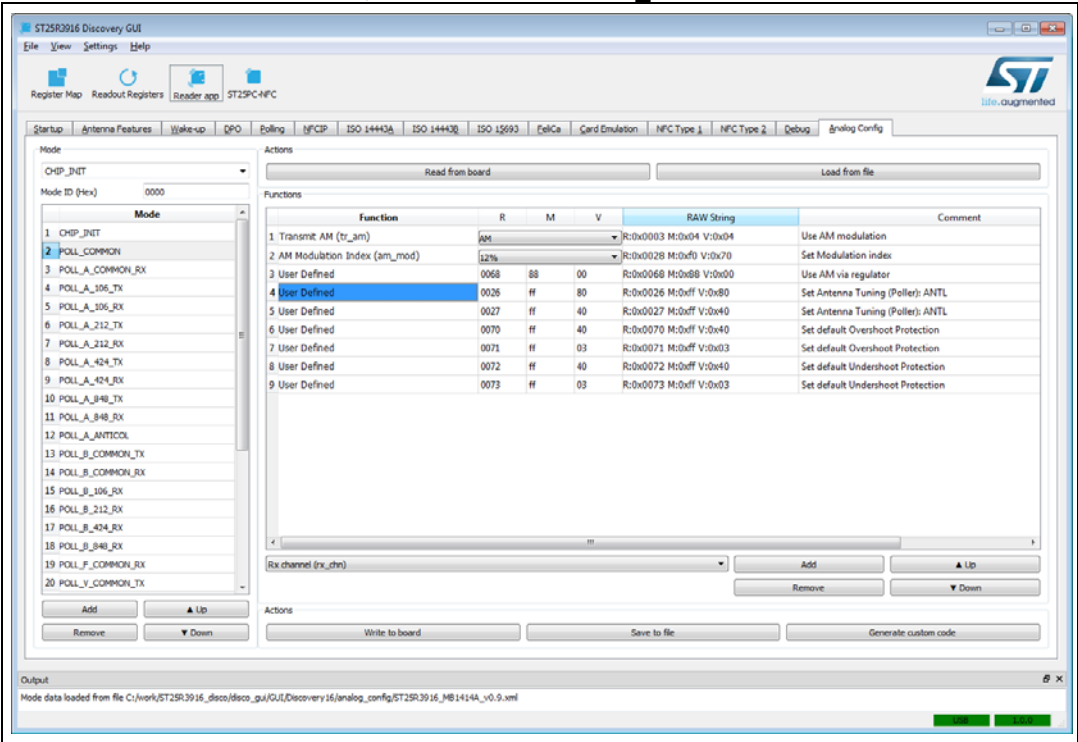


图18. 卡模拟 (LISTEN\_ON)



如要查看在卡通信期间天线重新调谐的效果，需要删除这些设置，或者使用“Load from file（从文件加载）”加载预建的配置文件“MB1414...\_for\_aat.xml”。

8.3 轮询选项卡

使用“没有标签时调谐天线”可以观察重新调谐的效果。为此，使用了“天线特性”选项卡中配置的大多数值。

例外如下：

- 步长固定为4
- 无动态步长
- 从当前电容开始。

GUI将在输出日志中显示结果振幅、相位和加权距离函数的值。





## 9 调谐算法

调谐算法在st25r3916\_aat.c文件中的固件中实现。实现的算法就像降陡坡/爬坡。由于变容二极管的稳定时间（一般为2 ~ 3ms），进行所需测量时的效率非常重要。

最陡斜坡经过了优化，以避免冗余测量，并在不评估整个环境的情况下循序渐进地进行测量。

该算法的参数如下：

```
struct st25r3916AatTuneParams{
    uint8_t aat_a_min;           /*<!电容器A的最小值 */
    uint8_t aat_a_max;           /*<!电容器A的最大值 */
    uint8_t aat_a_start;         /*<!电容器A的起始值 */
    uint8_t aat_a_stepWidth;     /*<!电容器A的步长增量 */
    uint8_t aat_b_min;           /*<!电容器B的最小值 */
    uint8_t aat_b_max;           /*<!电容器B的最大值 */
    uint8_t aat_b_start;         /*<!电容器B的起始值 */
    uint8_t aat_b_stepWidth;     /*<!电容器B的步长增量 */

    uint8_t phaTarget;           /*<!目标相位 */
    uint8_t phaWeight;           /*<!目标相位权值 */
    uint8_t ampTarget;           /*<!目标幅度 */
    uint8_t ampWeight;           /*<!目标幅度权值 */

    bool doDynamicSteps;         /*<!动态减小步长 */
    uint8_t measureLimit;        /*<!允许的最大步数/测量次数 */
};
```

## 10 结论

通过VCC器件实现AAT提供了一种可能性 - 可以调整NFC天线匹配，以优化输出功率。不同的用例（比如谐振频率的生成校准或轮询周期之间的连续重调）都适用这种方法。

轮询周期之间的连续重调可以极大地改善与近距离电话之间的通信。ST25R3916器件上的测量功能以及提供的软件示例为实现自定义调谐算法提供了很大的灵活性和可能性。

## 11 版本历史

表4. 文档版本历史

| 日期             | 版本 | 变更                                                                                                                                                                            |
|----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2019年4月<br>29日 | 1  | 初始版本。                                                                                                                                                                         |
| 2020年4月<br>24日 | 2  | 更新了第 2 节：压控电容器、第 5 节：通过可变电容实现AAT和第 6 节：VCC调谐范围。<br>更新了图 3：电容vs.控制电压、图 8：三个VCC电路和图 9：默认匹配电路（改进了AAT调谐范围）。<br>增加了图 7：计算（不考虑可变电容）示例。<br>更新了表 2：调谐范围对比和表 3：电压分布。<br>对整个文档进行少量文字修订。 |

表5. 中文文档版本历史

| 日期             | 版本 | 变更      |
|----------------|----|---------|
| 2020年11月<br>3日 | 1  | 中文初始版本。 |

**重要通知 - 请仔细阅读**

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。若需 ST 商标的更多信息，请参考 [www.st.com/trademarks](http://www.st.com/trademarks)。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2020 STMicroelectronics - 保留所有权利