

参考資料



life.augmented

AN5322

アプリケーション・ノート

ST25R3916の自動アンテナチューニング (AAT)

はじめに

最先端のNFCデバイスは、高出力電力とともに、さまざまなビット・レートおよび通信プロトコルを提供します。NFCアンテナの離調は、高ビット・レートや高出力電力に悪影響を与える可能性があります。インダクタンス、自己共振周波数、Q値などのアンテナ・パラメータの変動によって、出力電力の減少や、ひずみが大きくなることで規格に適合しない信号の発生などが見られることがあります。

本稿では、ST25R3916デバイスに搭載された測定機能を使用して、カスタムのチューニングアルゴリズムを実装する方法を解説します。

本稿は、ST25R antenna matching tool ソフトウェア (STSW-ST25R004) の使用を前提としています。このソフトウェアは、整合用部品の計算に対応し、チューニング作業の繰り返しを最小限にします。このツールとともに、オープン・ソースのシミュレータも用意されており、シミュレーションによる基本的なシステム検証が可能です。

目次

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 1 | 離調による影響 | 5 |
| 2 | 電圧制御コンデンサ | 6 |
| 3 | 2次高調波と3次高調波 | 8 |
| 4 | 高調波の比較 | 10 |
| 5 | 可変容量コンデンサによるAATの実装 | 11 |
| 6 | VCCの調整可能範囲 | 13 |
| 7 | 整合インピーダンスの測定 | 19 |
| 8 | ST25R3916のPC GUIでAATを有効にする方法 | 20 |
| 8.1 | "Antenna Features"タブ | 20 |
| 8.2 | アナログ設定 ("Analog Config") | 22 |
| 8.3 | "Polling"タブ | 23 |
| 9 | チューニングアルゴリズム | 24 |
| 10 | 結論 | 25 |
| 11 | 改版履歴 | 26 |

参考資料

AN5322

表の一覧

表の一覧

| | | |
|------|--|----|
| 表 1. | ドライバ電源電圧 (V) に対する高調波測定値 (dB μ V) の変化 | 9 |
| 表 2. | 調整可能範囲の比較 | 18 |
| 表 3. | 電圧配分 | 18 |
| 表 4. | 文書改版履歴 | 26 |
| 表 5. | 日本語版文書改版履歴 | 26 |

図の一覧

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 図 1. | 離調による影響 | 5 |
| 図 2. | STPTIC-0N200 の回路図 | 6 |
| 図 3. | 制御電圧に対する静電容量の変化 | 7 |
| 図 4. | 並列 VCC の制御電圧に対する 3 次高調波の変化 | 8 |
| 図 5. | ドライバ電源電圧に対する高調波の変化 | 9 |
| 図 6. | STPTIC-0N と LXRW0YV の比較 | 10 |
| 図 7. | 標準の整合回路 | 11 |
| 図 8. | AAT による同調範囲を改善した標準の整合回路 | 12 |
| 図 9. | AAT 回路の例 | 13 |
| 図 10. | 調整可能範囲での最大静電容量 | 14 |
| 図 11. | 調整可能範囲での最小静電容量 | 15 |
| 図 12. | VCC を 3 個使用した回路 | 16 |
| 図 13. | VCC を 4 個使用した回路 | 17 |
| 図 14. | アンテナチューニング | 20 |
| 図 15. | アンテナチューニング - エキスパート・モード | 21 |
| 図 16. | ポーリング (POLL_COMMON) | 22 |
| 図 17. | カード・エミュレーション (LISTEN_ON) | 23 |

1 離調による影響

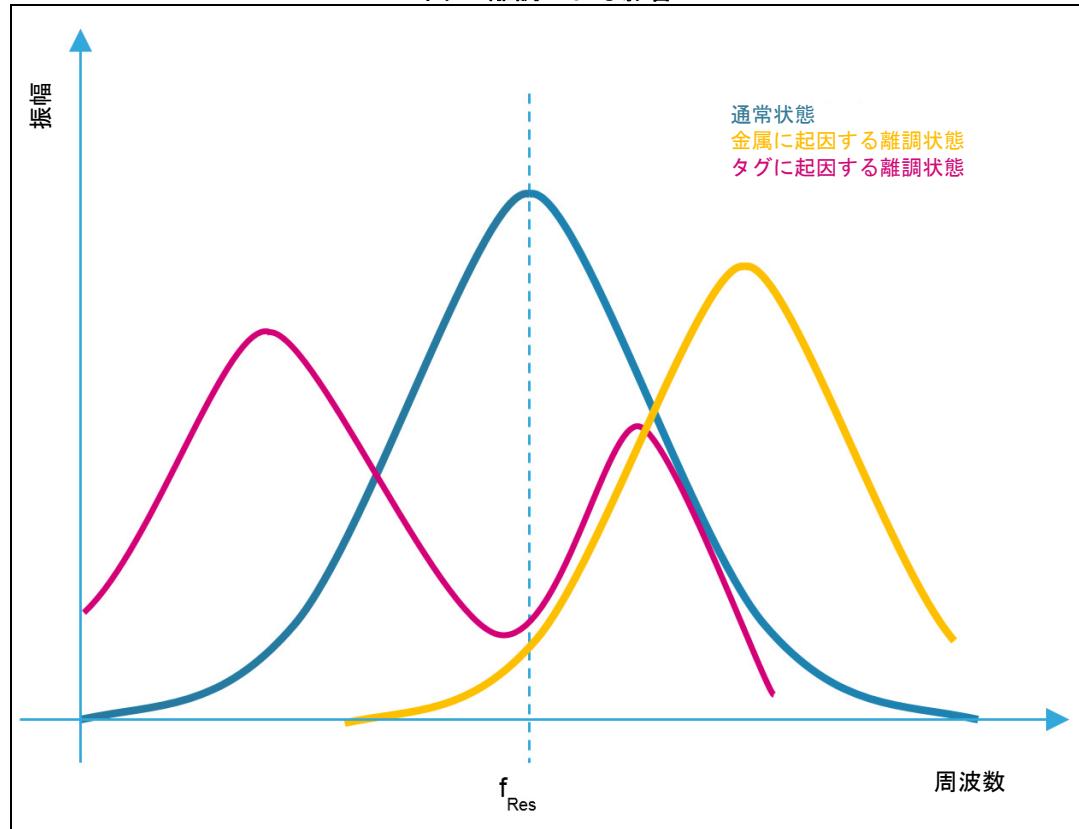
近距離無線通信（NFC）デバイスは、特定のアンテナで動作するように設計されています。アンテナ整合回路は、アンテナのインダクタンスを変換して、NFCリーダICで実数の抵抗負荷として認識できるようにします。NFCデバイスで本質的に必要な特性は、アンテナを13.56 MHzに同調すること、および高出力かつ高ビット・レートに対応可能なクオリティファクタ（Q値）を実現することです。消費電力の調整では、NFCリーダICで認識できる整合インピーダンスが主な検討要素になります。

この要素は離調による影響を受けます。

たとえば、金属物体がリーダの近傍に存在すると、アンテナの自己共振周波数（SRF）が高くなります。金属に渦電流が発生して金属内部での損失が増加すると、アンテナのQ値が低下してリーダの読み取り範囲が減少します。アンテナの共振周波数が高周波側に変動しても、リーダは13.56 MHzの信号を送信し続けます。アンテナが目的の周波数よりも高い周波数に同調すると、オーバーシュートやリシギングが発生する原因になります。その結果、この信号が他のNFCデバイスやNFCカードで誤って解釈され、NFC規格に適合しない状況になる可能性があります。

図 1は、使用する周波数（ f_{Res} ）に同調されたリーダが離調する様子を示しています。リーダに金属物体が近づくと、その同調周波数は高周波側に変動します。13.56 MHzよりも高い周波数のカードが近づくと、その同調周波数は低周波側に変動します。

図 1. 離調による影響



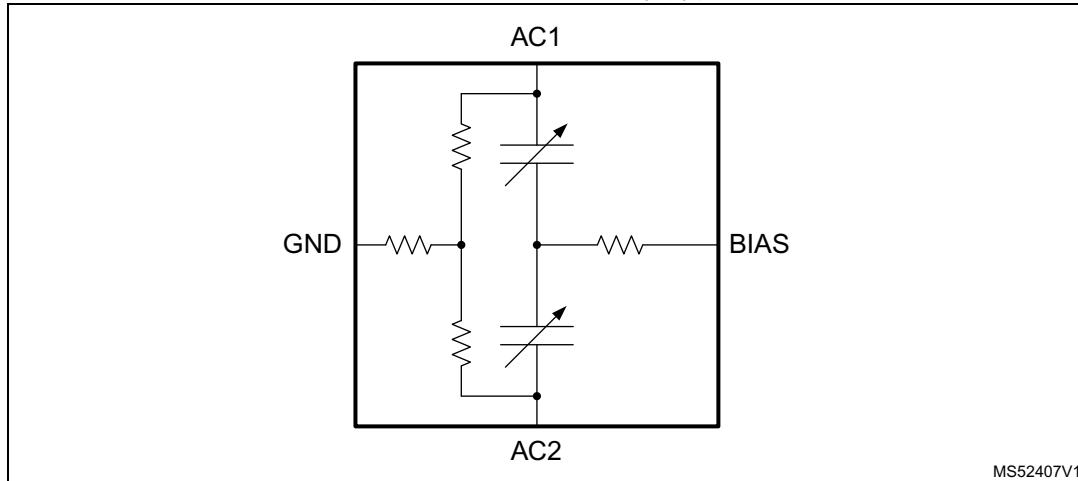
2 電圧制御コンデンサ

電圧制御コンデンサ (VCC) は、制御電圧に応じて静電容量が変化する4ピンのデバイスです。

同調可能範囲は、製造元や製造工程によって異なります。本稿では、次の2つのVCCを取り上げます。いずれも最大の可変静電容量は200 pFです。

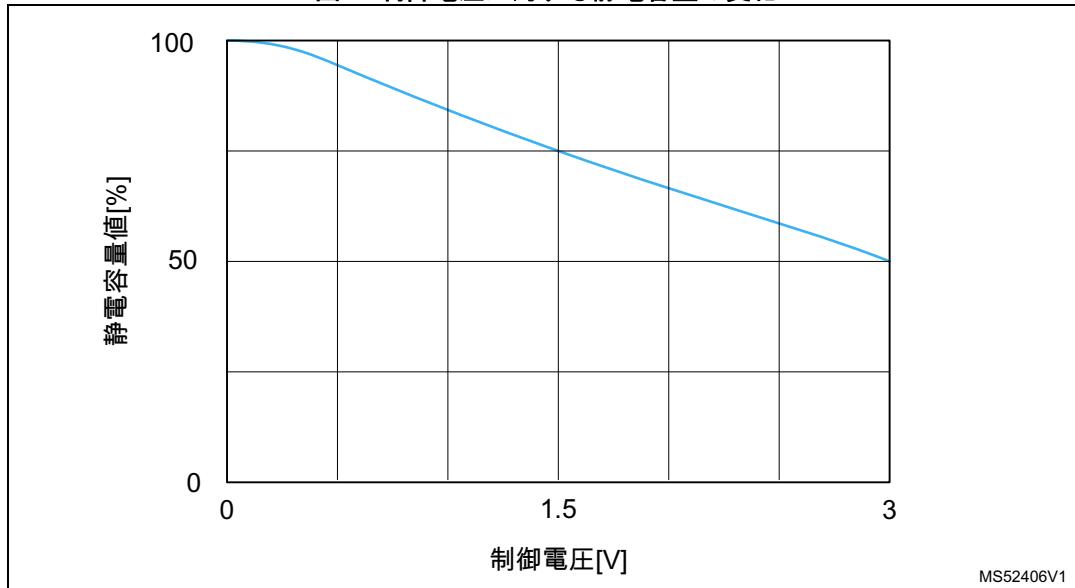
- 村田製作所LXRW0YV201 (ST25R3916-DISCOの標準構成として使用されています)
- STマイクロエレクトロニクスSTPTIC-0N200 (回路図を図 2に示します)

図 2. STPTIC-0N200の回路図



通常、同調のための調整範囲は静電容量値の100% ~ 50%です (対応する制御電圧は0 V ~ 3 V)。電圧と可変静電容量との関係は線形と見なされがちですが、VCCのデータシートを詳細に調べると、より複雑な関係であることがわかります。図 3に、STマイクロエレクトロニクスのデバイスの静電容量と制御電圧との関係を示します。

図 3. 制御電圧に対する静電容量の変化



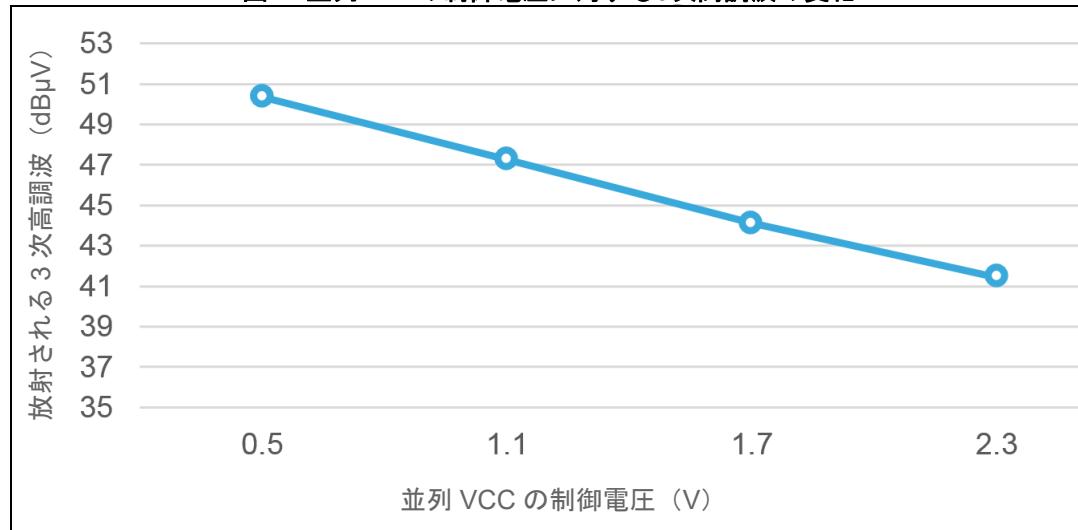
VCCデバイスの内部回路に起因して、制御電圧の変化は、ある程度の遅延を伴って静電容量の変化として表れます。ソフトウェアでVCCを動的に制御する場合は、このような挙動を考慮する必要があります。この静電容量の遷移時間は、 C_{Max} から C_{Min} への変化またはその逆方向への変化で1 ms ~ 2 msです。

3 2次高調波と3次高調波

VCCデバイスの内部構造に起因する他の副作用として、3次高調波の発生があります。3次高調波の振幅は、静電容量ピン両端のAC電圧とVCCデバイスの制御電圧の2つの要因で決まります。

図 4に、3次高調波の放射レベルと並列VCCの制御電圧との関係を示します。この測定には、図 9に示す標準の構成を使用しています。VCCデバイスと並列に、固定容量のコンデンサを適宜追加します。整合インピーダンスを一定値に維持するために、VCCの制御電圧を順次高くしています。これによって、整合回路の総合並列静電容量が一定値に維持されます。

図 4. 並列VCCの制御電圧に対する3次高調波の変化



参考資料

図 5に、ドライバ電源電圧 (V_{DD_RF}) と基本波、2次高調波、3次高調波の発生との関係を示します。この測定では、VCCの制御電圧を一定に維持します。ドライバ電源電圧を4.5 V ~ 3.6 Vの範囲で変更します。電源電圧が低下すると、基本波がわずかに減少する一方で、VCCデバイスを使用しているDUT（破線）で2次高調波と3次高調波が明らかに減少しています。

図 5. ドライバ電源電圧に対する高調波の変化

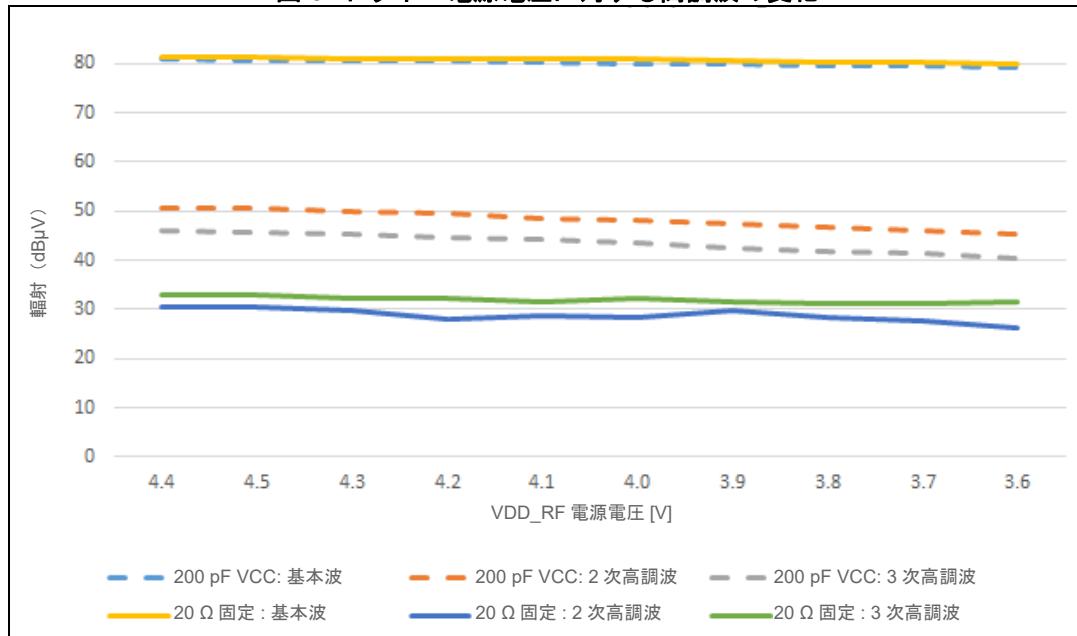


図 5に示した結果の一部を具体的な値で表 1に示します。200 pFのVCCを使用した回路では（青の点線）、 V_{DD_RF} の変化に伴い、基本波は1.6 dB μ V減少しています。VCCデバイスがなく、20 Ωによる固定整合とした回路でも、基本波は同様の減少傾向を示します。しかし、VCCを使用した場合は、2次高調波と3次高調波の減少が顕著になります。

表 1. ドライバ電源電圧 (V) に対する高調波測定値 (dB μ V) の変化

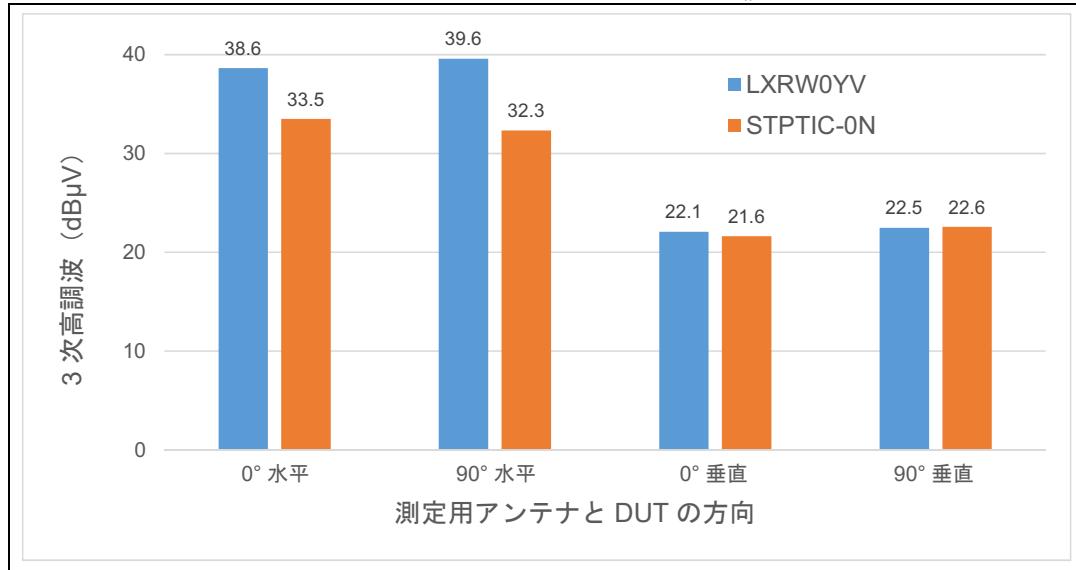
| V_{DD_RF} | 200 pFのVCC | | | 20 Ω固定 | | |
|--------------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 基本波 | 2次高調波 | 3次高調波 | 基本波 | 2次高調波 | 3次高調波 |
| 4.5 | 80.8 | 50.6 | 45.9 | 81.2 | 30.5 | 32.9 |
| 4.0 | 80.0 | 48.2 | 43.4 | 80.8 | 28.5 | 32.3 |
| 3.6 | 79.2 | 45.4 | 40.4 | 79.9 | 26.3 | 31.4 |

表 1と図 5から、VCCデバイスを使用すると2次高調波と3次高調波が増加することがわかります。設計プロセスでは、この点を考慮する必要があります。VCCデバイスを使用した場合に発生する2次高調波と3次高調波の量を要求できることがあります。

4 高調波の比較

図 6に、標準の回路（図 9）で村田製作所LXRW0YVとSTマイクロエレクトロニクスSTPTIC-0Nを比較した結果を示します。STPTIC-0NとLXRW0YVの両デバイスで同じ整合インピーダンス（18 Ω）になるように、4個のVCCと並列に対して固定静電容量のMLCCコンデンサを追加しています。

図 6. STPTIC-0NとLXRW0YVの比較



どちらの試験構成でも、直列コンデンサと並列コンデンサには同電圧の制御電圧を印加しています。並列コンデンサの制御電圧は約2.25 Vです。測定用アンテナをDUTのアンテナと平行に置いた場合、高調波のレベルにおよそ6 dBμVの差が観測されています。

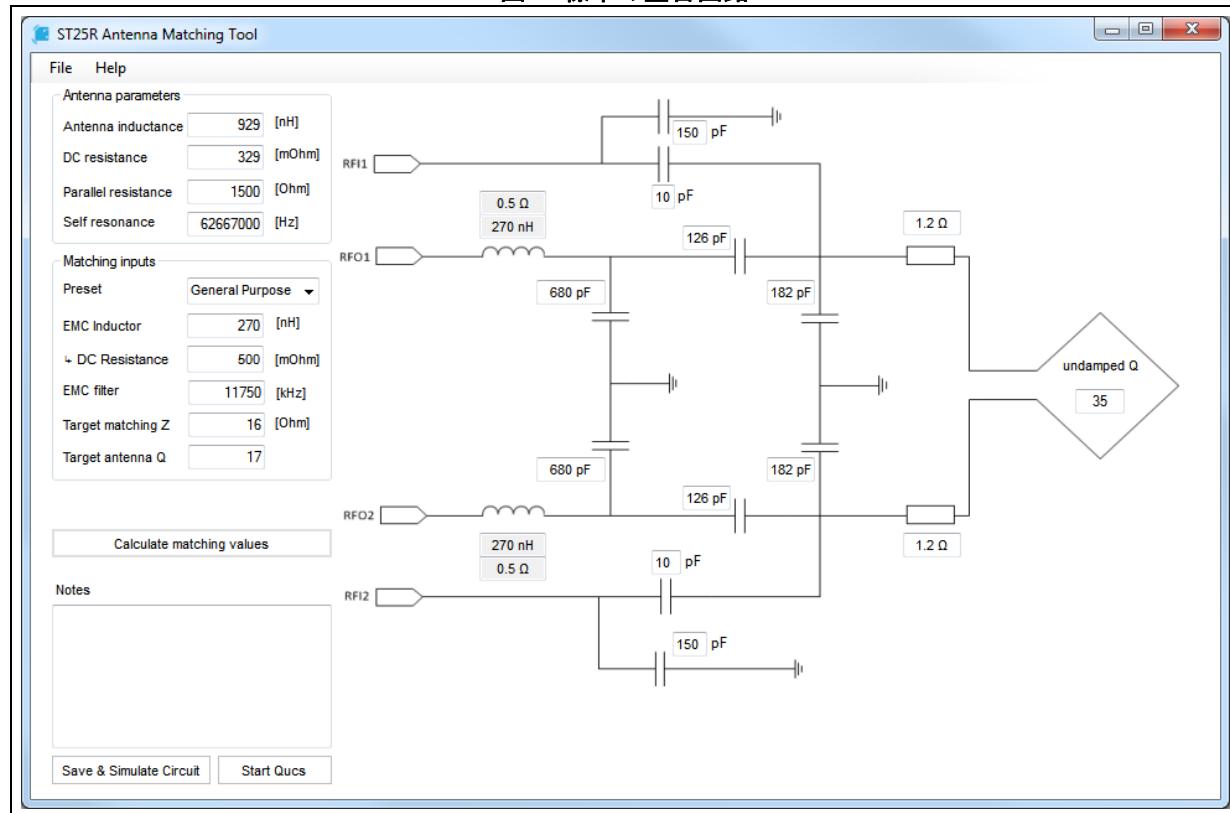
5 可変容量コンデンサによるAATの実装

可変容量コンデンサの一般的な値 (C_{Max} から C_{Min}) は、200 pF ~ 100 pF、100 pF ~ 50 pF、50 ~ 25 pF の範囲です。

理想的な同調範囲は、選択したアンテナのSRFとアプリケーションによって決まります。SRFが高いアンテナほど、13.56 MHzに同調するには、調整用並列コンデンサの静電容量を大きくする必要があります。

アンテナ・パラメータの測定値に基づいて整合回路の回路定数を計算するには、ST25R antenna matching tool (STSW-ST25R004、www.st.comからダウンロード可能) を使用できます。このツールを使用してNFCアンテナを整合する手順は、AN5276 『Antenna design for ST25R3916』で解説しています (www.st.comからダウンロード可能)。デフォルトのST25R3911B-DISCOのアンテナでは、整合回路の回路定数として図 7に示す値が算出されます。

図 7. 標準の整合回路



200 pFの電圧制御コンデンサを使用すれば、MLCCコンデンサの追加は不要ですが、高い柔軟性と微調整を実現するためにボードのレイアウトには設置場所があらかじめ用意されています。図 3を見ると、約2.5 VのDAC制御電圧を使用すれば126 pFの直列静電容量値が得られます。DAC制御電圧を約0.6 Vにすれば、182 pFの並列静電容量値が得られます。

算出した静電容量値がVCCの調整可能範囲を上回る場合は、VCCと並列にMLCCコンデンサを接続することにより、調整可能範囲を静電容量が大きい方向へシフトできます。EMC遮断周波数を変えずにEMCインダクタの値を変更することで、並列静電容量と直列静電容量の値を、より適切な範囲へ移動できます。

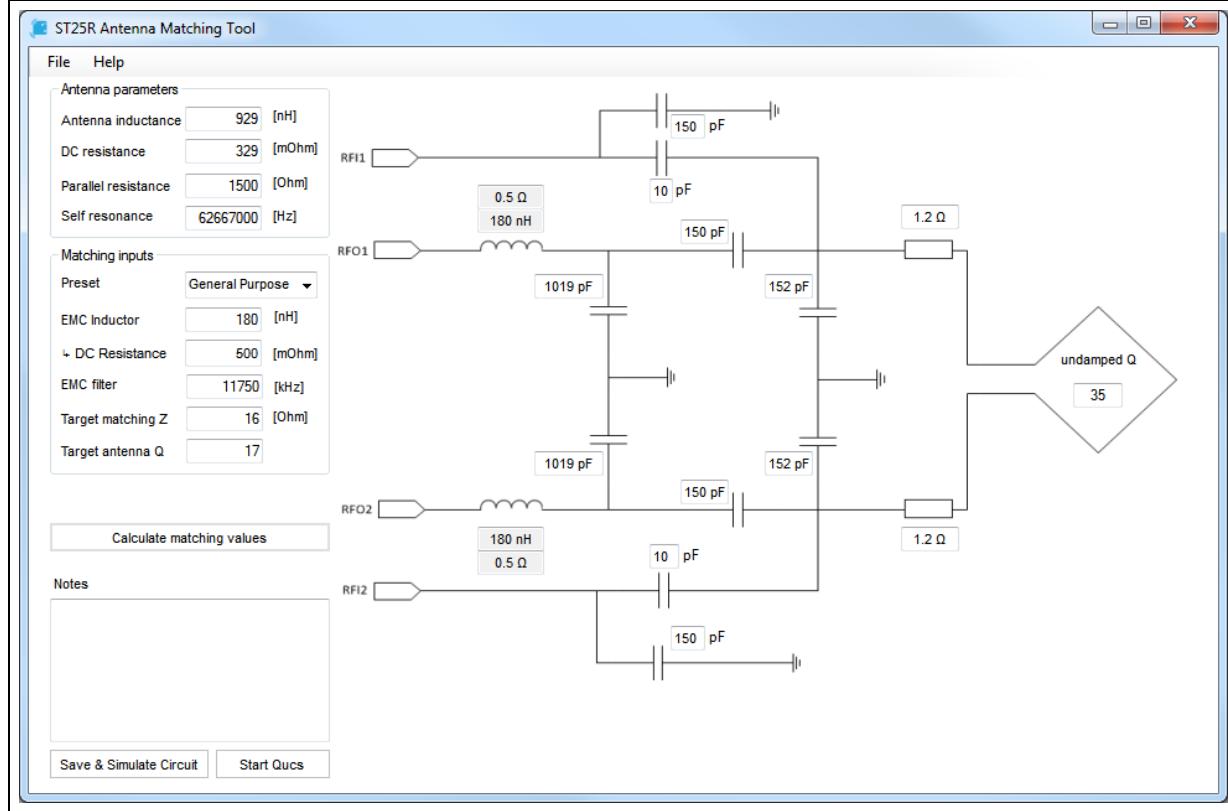
参考資料

可変容量コンデンサによるAATの実装

AN5322

図 6に示した例の場合、EMCインダクタを270 nHから180 nHに変更すれば、VCCの調整可能範囲の中央に目標整合インピーダンスを移動できます。

図 8. AATによる同調範囲を改善した標準の整合回路



計算では、直列コンデンサと並列コンデンサの静電容量値として、150 pFに近い値が得られています。これは、200 pFのVCCによる調整可能範囲の中央に該当する値です。直列VCCおよび並列VCCの制御電圧は約1.5 Vになります。

6

VCCの調整可能範囲

VCCの調整可能範囲（調整タイプ）は、アプリケーション側で選択します。環境の変化が大きい場合は、広い調整可能範囲が必要になり、微調整には小幅の調整可能範囲のみが適しています。図 9に、200 pFの並列VCCによる調整可能範囲を示します（並列VCCの制御電圧は、最大静電容量に対して0 V、最小静電容量に対して3 Vに設定されています）。

図 9. AAT回路の例

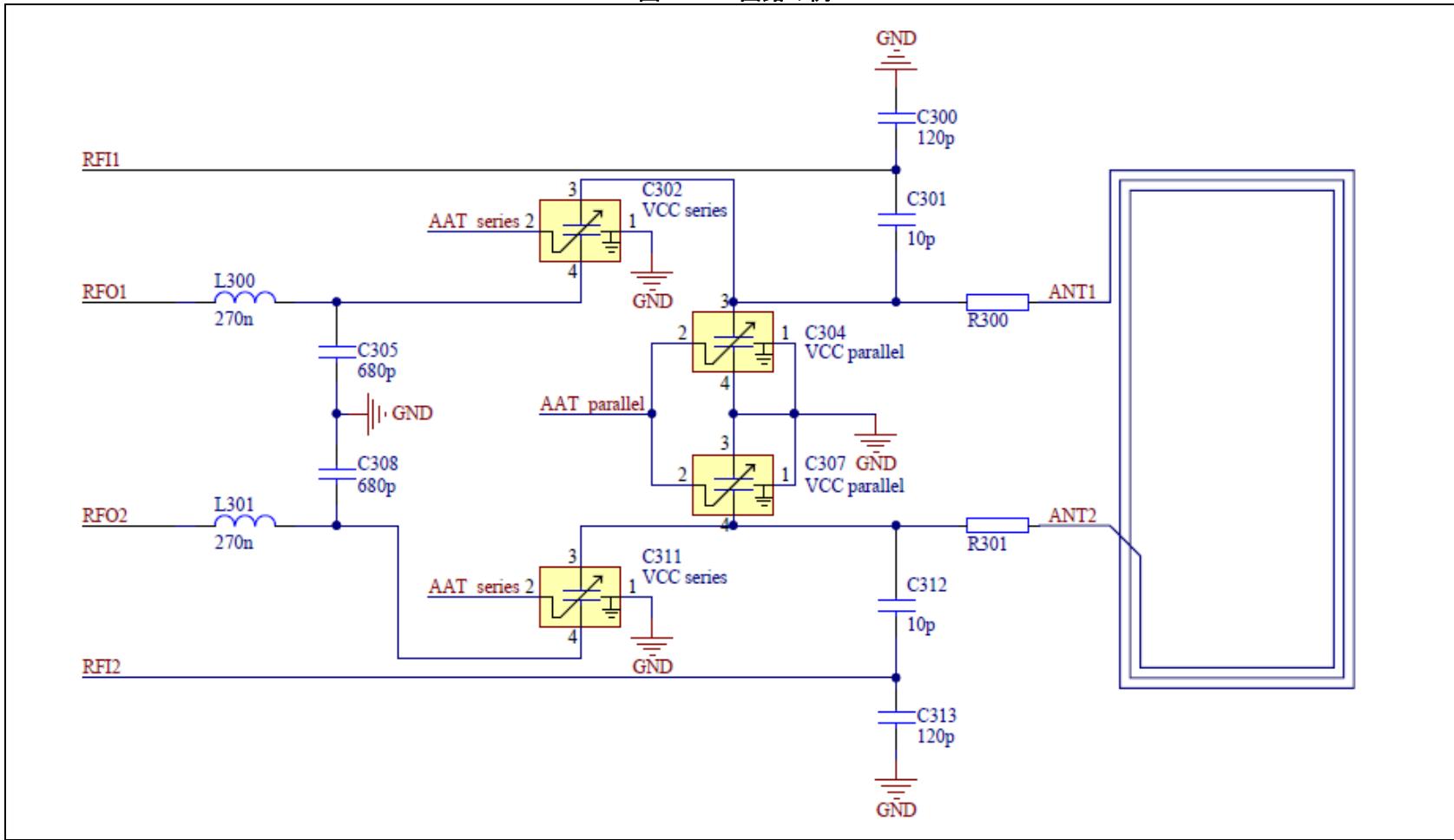


図 10と図 11は、VCCの静電容量をそれぞれ最大および最小に設定した場合のスミス・チャートです。アンテナは、13.56 MHzよりもそれぞれ低い周波数および高い周波数で共振しています。

図 10. 調整可能範囲での最大静電容量

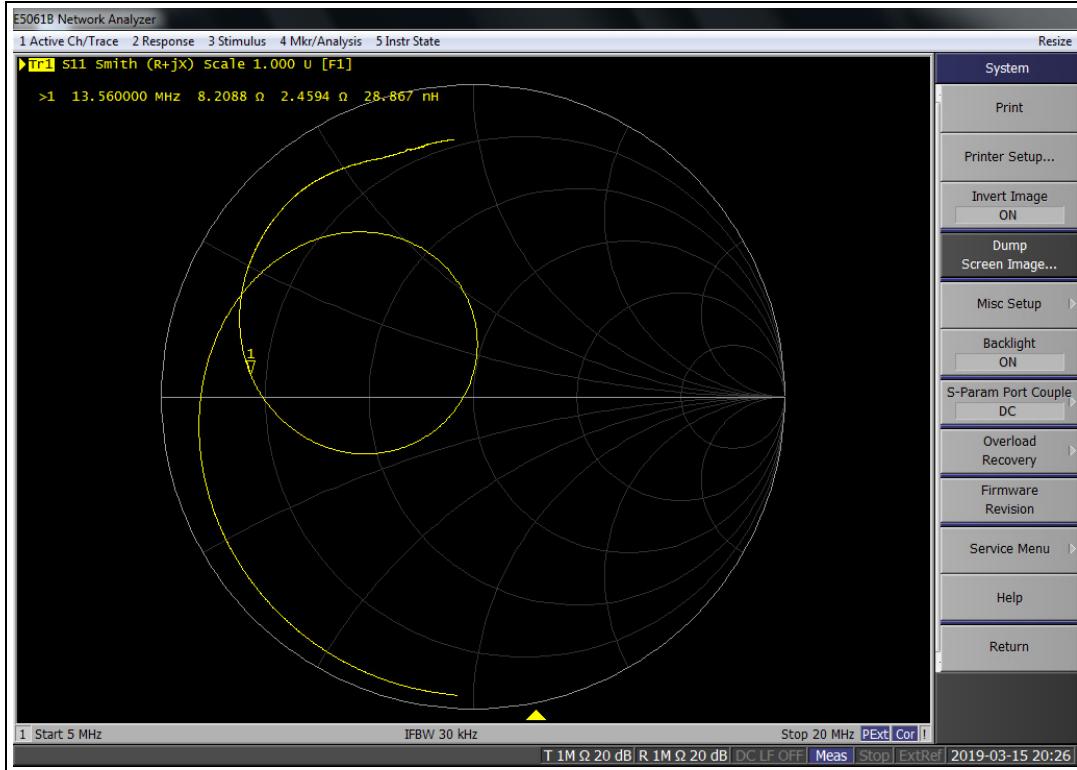
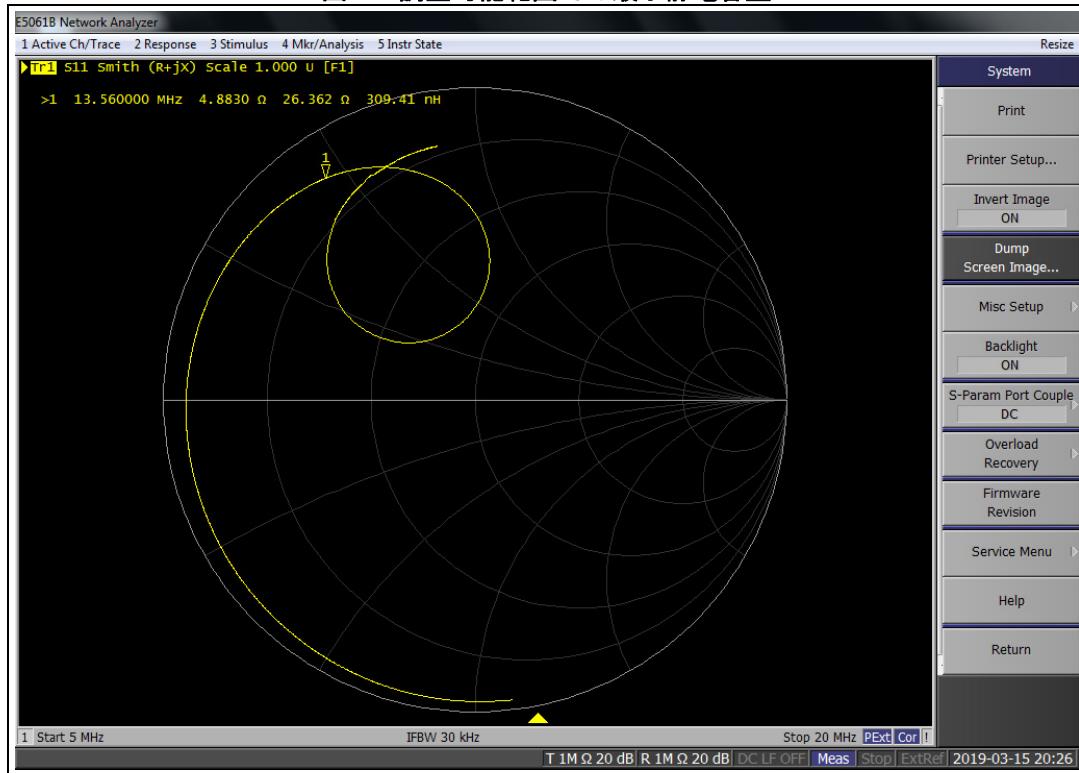


図 11. 調整可能範囲での最小静電容量



直列VCCと並列VCCの両方で静電容量を変更しています。直列VCCを調整すると、共振円の直径が変化します。この調整は、損失や減衰の補償に使用できます。並列VCCを調整するとアンテナの共振周波数が変化します。この調整により、NFCアンテナの共振周波数を調整できるので、導電性物体による離調を補償できます。

前述の2次高調波と3次高調波の生成を抑制するために、通常時の制御電圧は、VCC制御電圧の高圧側1.5 V ~ 3 Vの範囲に設定する必要があります。また、コンデンサに印加されるACアンテナ電圧を制限して3次高調波を抑制するために、MLCCコンデンサ（C4、C8）を追加します。

VCCの両端に印加される電圧を低減する回路として図 12と図 13が提案されています。

図 12. VCCを3個使用した回路

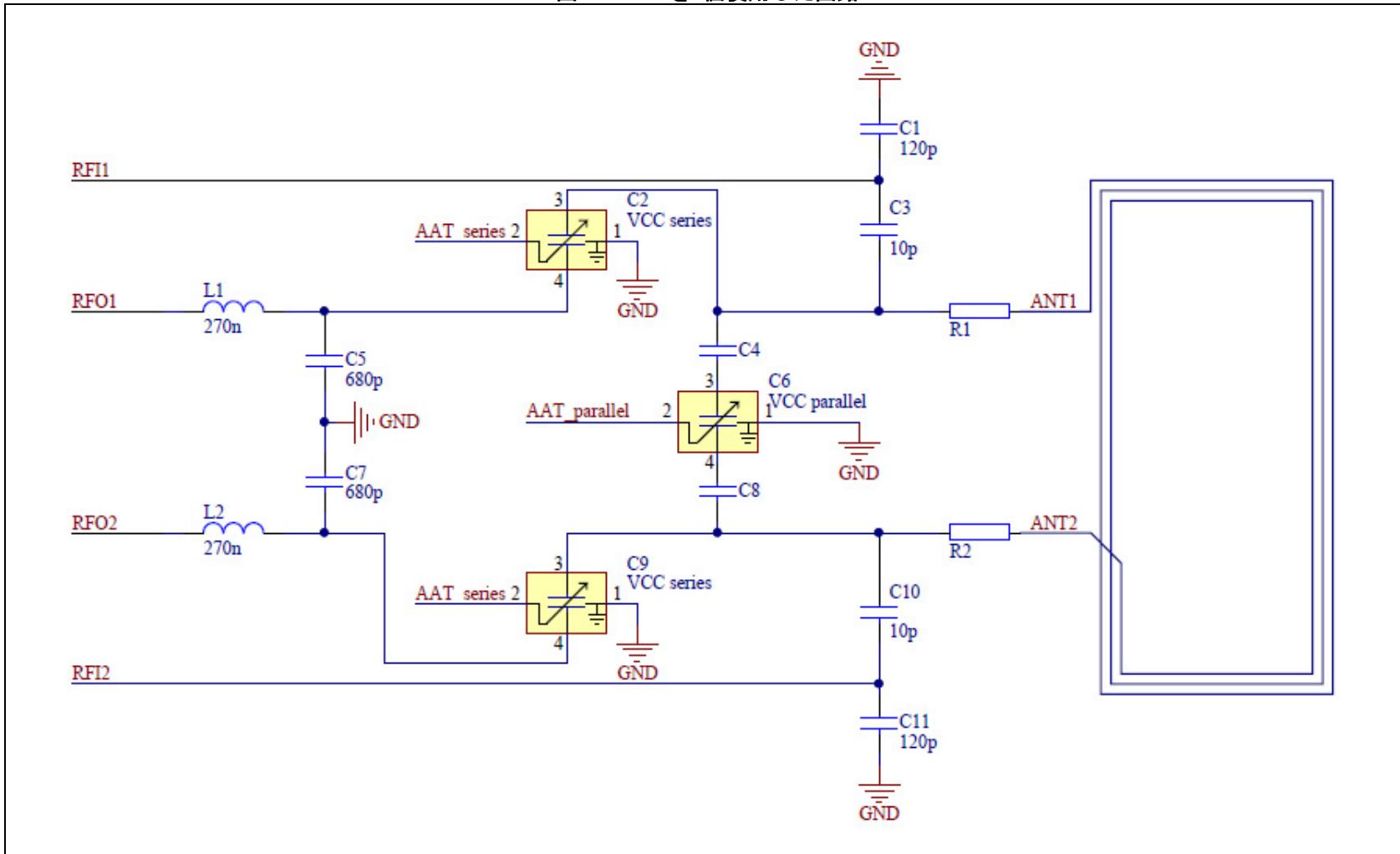
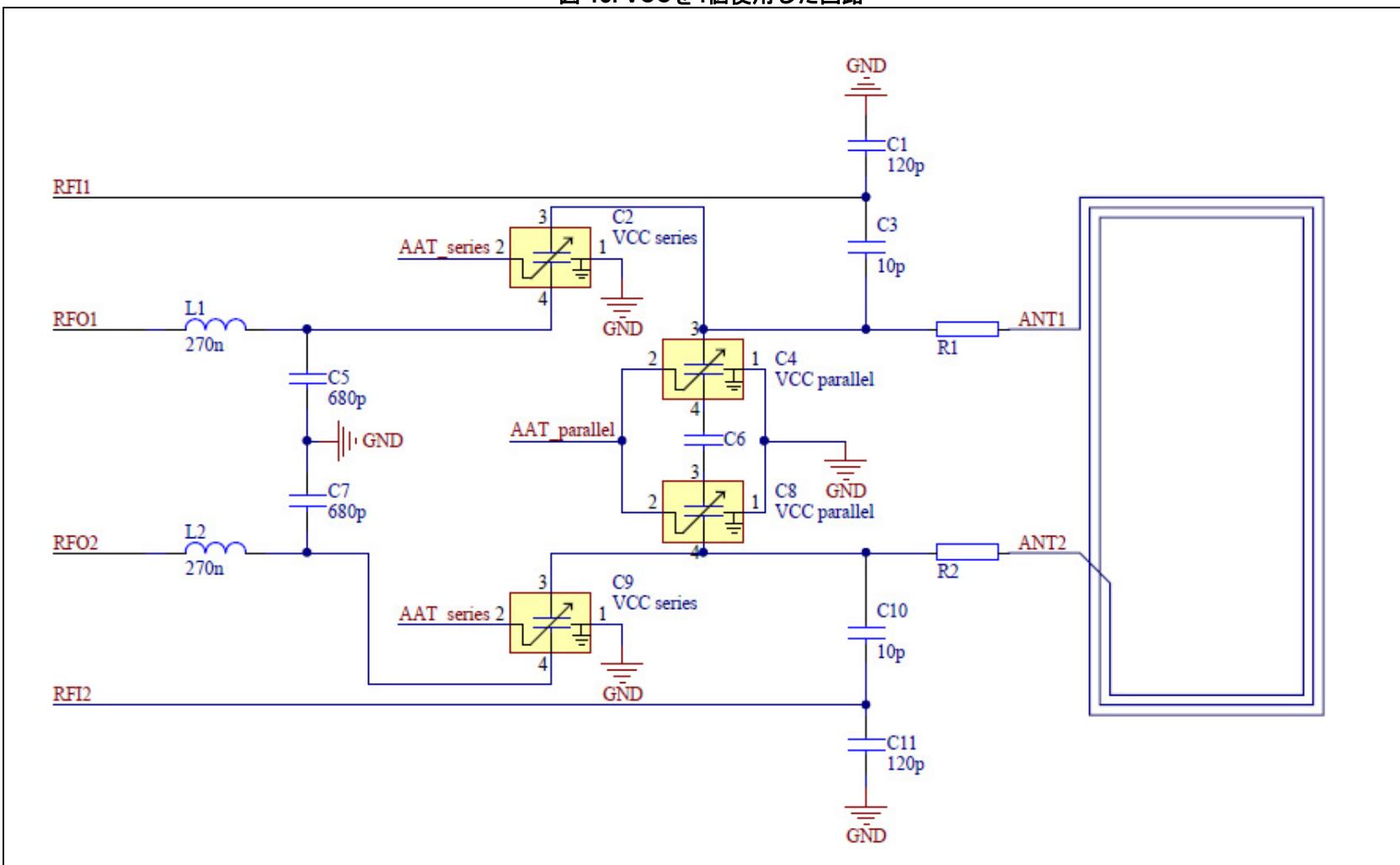


図 13. VCCを4個使用した回路



参考資料

これらの回路は、それぞれに利点があります。標準の回路は、調整可能範囲が最大になりますが、VCCデバイスの両端に印加されるAC電圧も最大になります。VCCデバイスを3個使用する回路は、コスト面では優れていますが、調整可能範囲が狭くなります。VCCデバイスを4個使用する回路では、調整可能範囲が広がり、アンテナの両端に発生するAC電圧も、2つのVCCデバイスとMLCCコンデンサに適切に分散されます。

この場合の調整可能範囲は、並列コンデンサの直列接続として計算できます。各回路の C_{Max} と C_{Min} の値を表2にまとめて示します。

表2. 調整可能範囲の比較

| 回路 | C_{Max} (pF) | C_{Min} (pF) | 差分 (pF) |
|-------------------------------------|----------------|----------------|---------|
| 標準 (図8) | 200 | 100 | 100 |
| VCCデバイス3個 (図12) C6 = 220 pF | 71 | 52.4 | 18.6 |
| VCCデバイス4個 (図13) C4 = C8 = 220 pF | 68.8 | 40.7 | 28 |

アンテナ電圧60 V_{pp}の配分を表3に示します。

表3. 電圧配分

| 回路 | V_{Min} (V _{pp}) | V_{Max} (V _{pp}) |
|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| デフォルト (図8) | 30 | 30 |
| VCCデバイス3個 (図12) C6 = 220 pF | 31.43 | 11.15 |
| VCCデバイス4個 (図13) C4 = C8 = 220 pF | 24.44 | 8.40 |

7 整合インピーダンスの測定

ボードに通電した状態で整合インピーダンスを測定する場合は、ドライバ段への通電をオフする必要があります。

注：リーダに通電している場合、VNAのポートに大きな電力が伝送されてVNAが損傷しないように、レジスタ0x28を0x0F、tr_amビットを"1"に設定していることを確認してください。

ドライバ段への通電をオフにすると、2本のRFOピンと並列にVNAを接続できます。この状態であれば、0x26レジスタと0x27レジスタを使用してVCCデバイスを制御し、整合インピーダンスを変更できます。

8 ST25R3916のPC GUIでAATを有効にする方法

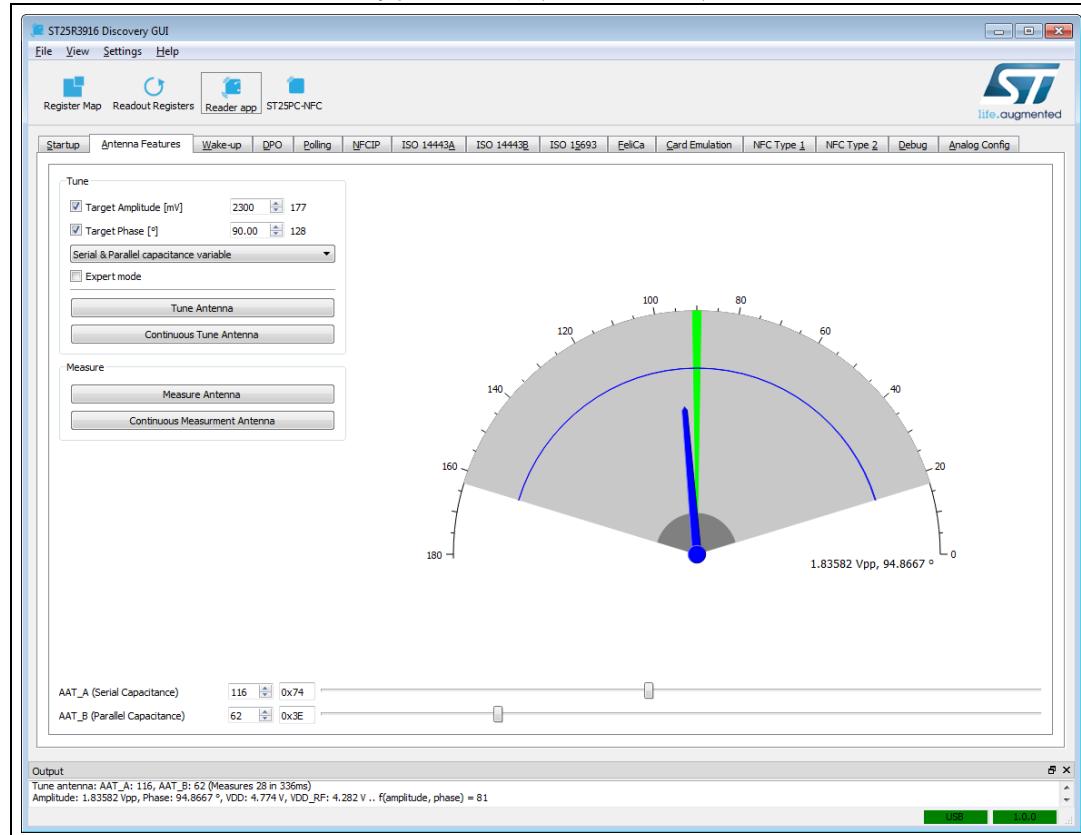
8.1 "Antenna Features"タブ

図 14に、"Antenna Features"タブを示します ("Expert mode"を選択していない場合)。このタブでは、ST25R3916のAAT_AピンとAAT_Bピンのさまざまな値を手動で試して、振幅や位相の変化を確認するか、アンテナチューニングのアルゴリズムを実行できます。

最も重要なGUI項目は、次のとおりです。

- "Serial & Parallel capacitance variable": 使用するチューニングアルゴリズムの制限や、目標のチューニングに対して、直列コンデンサのみまたは並列コンデンサのみを使用する指定などが可能です。
- "Tune Antenna": フームウェアでソフトウェアベースのアルゴリズムを実行します。測定された振幅と位相に従って、2つの静電容量のスライダやゲージの指針を調整することで結果が表示されます。
- "Continuous Tune Antenna": "Tune Antenna"の手順を繰り返し実行して、結果を表示します。
- "Measure Antenna": 現在設定されているAAT_AとAAT_Bを使用して測定を1回だけ実行し、その結果に針を合わせます。
- "Continuous Measurement Antenna": AAT_AとAAT_Bのさまざまな設定を試して、振幅や位相の変化を確認する場合に便利な機能です。

図 14. アンテナチューニング



参考資料

AN5322

ST25R3916のPC GUIでAATを有効にする方法

注： AATはDPO（ダイナミック・パワー出力）の判断基準に影響するので、DPOは無効にします。大電力または小電力のDPOモードでリーダの動作が停止する可能性があります。詳細は、UM2517『ST25R3916-DISCO reference graphical user interface (ST25R3916-DISCOリファレンス・ボードのグラフィカル・ユーザ・インターフェース)』を参照してください（www.st.comよりダウンロード可能）。

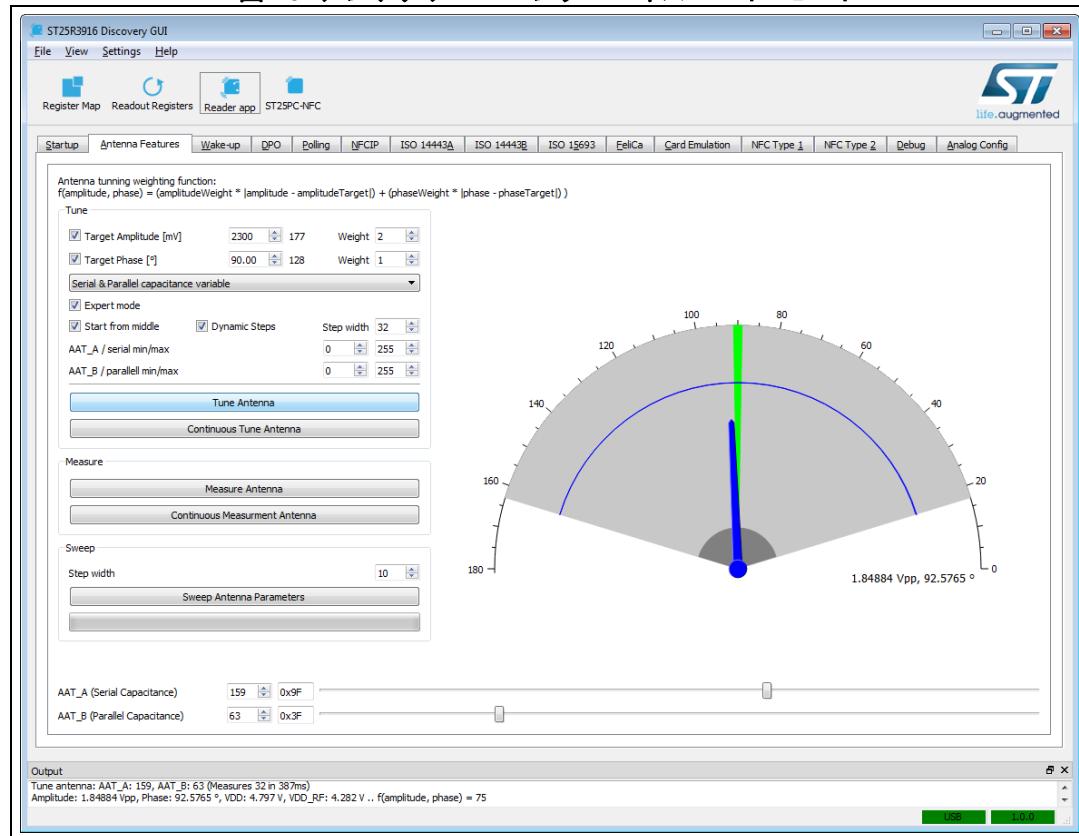
これらのすべての操作で、測定結果および必要な調整手順の追加情報がログ領域に表示されます。調整点における性能は、目標値からの偏差を重み付けして規定する線形関数で評価されます。この偏差の値が小さいほど、目標値に近い結果が得られています。

"Expert mode"を選択すると、上記以外の設定も可能になります（図 15参照）。

- "Start from middle"を選択すると、アルゴリズムの実行開始値が、現在のAAT_AとAAT_Bの値ではなく、必ずそれぞれの中間値になります。
- "Dynamic Steps"は、より良好な調整点が調整アルゴリズムで見つからない場合に、以降の計算で調整ステップ・サイズを小さくするかどうかを指定します。
- "Step width"では、調整で使用するステップ・サイズを指定します。"Dynamic Steps"を指定した場合は、調整開始時の調整ステップ・サイズを指定します。

調整アルゴリズムで探索できる範囲には制限があります。

図 15. アンテナチューニング - エキスパート・モード



これらの設定はすべて、セクション 9で説明するファームウェアベースの実装プログラムのパラメータに変換されます。

8.2 アナログ設定 ("Analog Config")

通常のアナログ設定の場合、ポーリング中 (POLL_COMMON) とカード・エミュレーション中 (LISTEN_ON) とでは、AAT_AとAAT_B (レジスタ 0x26 と 0x27) が互いに異なる静的な値に設定されます。ポーリング中の画面を図 16、カード・エミュレーション中の画面を図 17に示します。

図 16. ポーリング (POLL_COMMON)

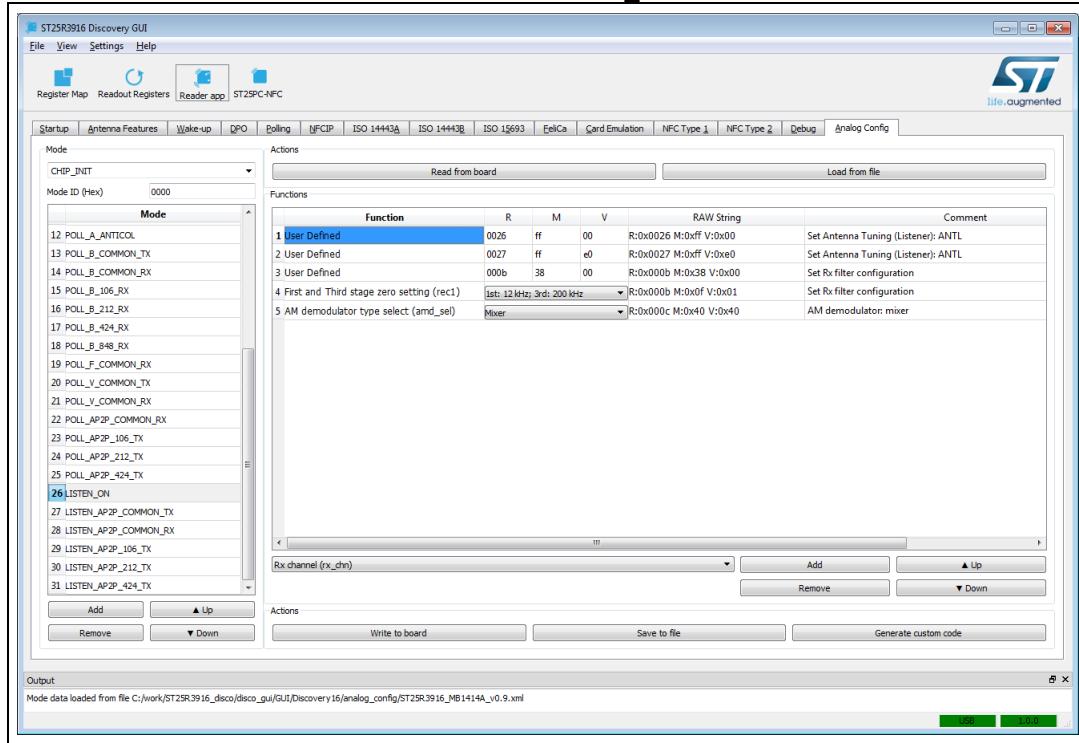
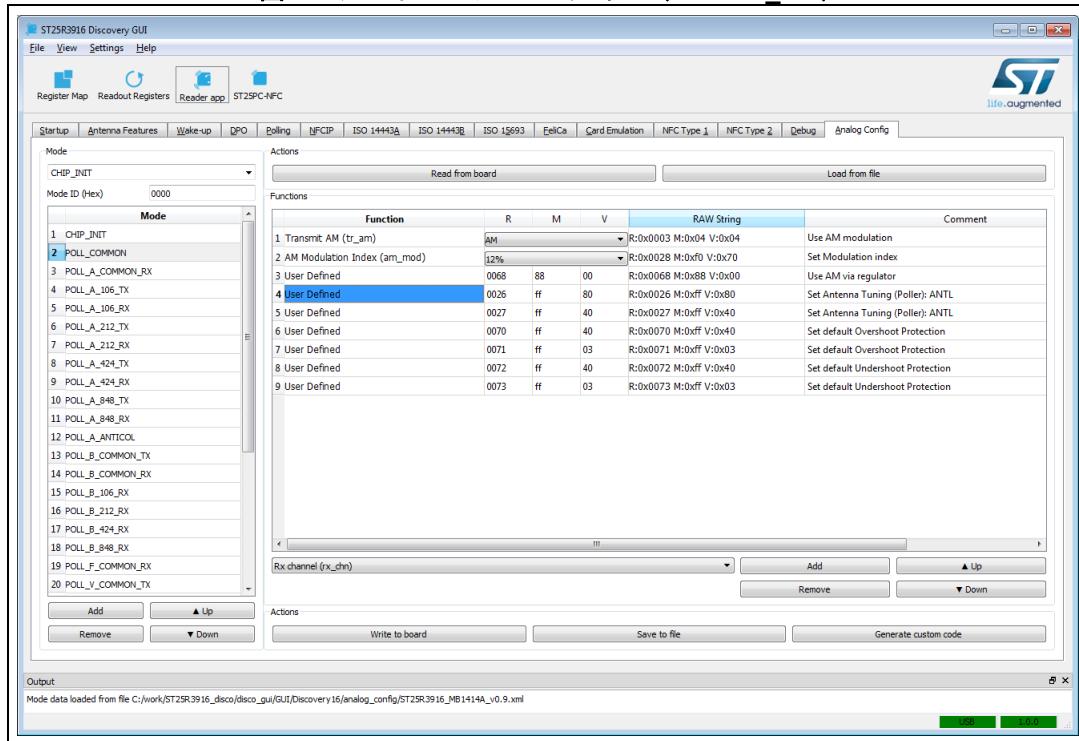


図 17. カード・エミュレーション (LISTEN_ON)



カード通信中にアンテナの再チューニングの効果を確認するには、これらの設定を削除するか、"Load from file"を使用して事前設定ファイル"MB1414..._for_aat.xml"を読み込む必要があります。

8.3 "Polling"タブ

"Tune antenna when there are no tags"を使用すると、再チューニングの効果を確認できます。そのために、"Antenna Features"タブで指定したほとんどの値が使用されます。

ただし、以下の例外があります。

- 調整ステップ・サイズは4に固定されます。
- "Dynamic Steps"は使用できません。
- 現在の静電容量から再チューニングが開始されます。

得られた振幅、位相、および目標値からの偏差を重み付けした関数の値がログ出力としてGUIに表示されます。

9 チューニングアルゴリズム

ファイルst25r3916_aat.cに記述されたチューニングアルゴリズムがファームウェアに実装されています。実装されたアルゴリズムは、最急降下法と山登り法に基づいています。可変静電容量に遷移時間（通常、2 ms ~ 3 ms）が存在することから、必要な測定回数という観点から見ると、アルゴリズムの効率がきわめて重要です。

最急勾配を利用することで、冗長な測定を避けつつ、すべてのパラメータではなく段階的なパラメータで最適化を実行します。

このアルゴリズムの主なパラメータは次のとおりです。

```
struct st25r3916AatTuneParams{
    uint8_t aat_a_min;           /*<! min value of A cap */
    uint8_t aat_a_max;           /*<! max value of A cap */
    uint8_t aat_a_start;         /*<! start value of A cap */
    uint8_t aat_a_stepWidth;     /*<! increment stepWidth for A cap */
    uint8_t aat_b_min;           /*<! min value of B cap */
    uint8_t aat_b_max;           /*<! max value of B cap */
    uint8_t aat_b_start;         /*<! start value of B cap */
    uint8_t aat_b_stepWidth;     /*<! increment stepWidth for B cap */

    uint8_t phaTarget;           /*<! target phase */
    uint8_t phaWeight;           /*<! weight of target phase */
    uint8_t ampTarget;           /*<! target amplitude */
    uint8_t ampWeight;           /*<! weight of target amplitude */

    bool doDynamicSteps;         /*<! dynamically reduce step size */
    uint8_t measureLimit;        /*<! max number of allowed
steps/measurements */
};
```

10 結論

VCCデバイスによるAATを使用することで、NFCアンテナの整合を調整して出力電力を最適化できます。この手法は、さまざまな使用例（共振周波数の製造時較正やポーリング・サイクル間での連続的な再チューニングなど）への応用が可能です。

ポーリング・サイクル間での連続的な再チューニングによって、近接距離にある携帯電話との通信を大幅に改善できます。ST25R3916デバイスに搭載された測定機能を、付属のサンプル・ソフトウェアと併用することで、優れた柔軟性が得られると同時に、カスタムのチューニングアルゴリズムの実装も可能になります。

11 改版履歴

表 4. 文書改版履歴

| 日付 | 版 | 変更内容 |
|------------|---|------|
| 2019年4月29日 | 1 | 初版発行 |

表 5. 日本語版文書改版履歴

| 日付 | 版 | 変更内容 |
|---------|---|-----------|
| 2019年9月 | 1 | 日本語版 初版発行 |

重要なお知らせ（よくお読み下さい）

STMicroelectronics NV およびその子会社（以下、ST）は、ST製品及び本書の内容をいつでも予告なく変更、修正、改善、改定及び改良する権利を留保します。購入される方は、発注前にST製品に関する最新の関連情報を必ず入手してください。ST 製品は、注文請求書発行時点での有効なST の販売条件に従って販売されます。

ST製品の選択並びに使用については購入される方が全ての責任を負うものとします。購入される方の製品上の操作や設計に関してST は一切の責任を負いません。

明示又は默示を問わず、STは本書においていかなる知的財産権の実施権も許諾致しません。

本書で説明されている情報とは異なる条件でST 製品が再販された場合、その製品についてSTが与えたいかなる保証も無効となります。

ST およびST ロゴはSTMicroelectronics の商標です。その他の製品またはサービスの名称は、それぞれの所有者に帰属します。

本書の情報は本書の以前のバージョンで提供された全ての情報に優先し、これに代わるものです。

この資料は、STMicroelectronics NV 並びにその子会社(以下ST)が英文で記述した資料（以下、「正規英語版資料」）を、皆様のご理解の一部として頂くためにSTマイクロエレクトロニクス(株)が英文から和文へ翻訳して作成したものです。この資料は現行の正規英語版資料の近時の更新に対応していない場合があります。この資料は、あくまでも正規英語版資料をご理解頂くための補助的参考資料のみにご利用下さい。この資料で説明される製品のご検討及びご採用にあたりましては、必ず最新の正規英語版資料を事前にご確認下さい。ST及びSTマイクロエレクトロニクス(株)は、現行の正規英語版資料の更新により製品に関する最新の情報を提供しているにも関わらず、当該英語版資料に対応した更新がなされていないこの資料の情報に基づいて発生した問題や障害などにつきましては如何なる責任も負いません。

© 2019 STMicroelectronics - All rights reserved