



EMI削減のための スペクトラム拡散

蜷川顕二

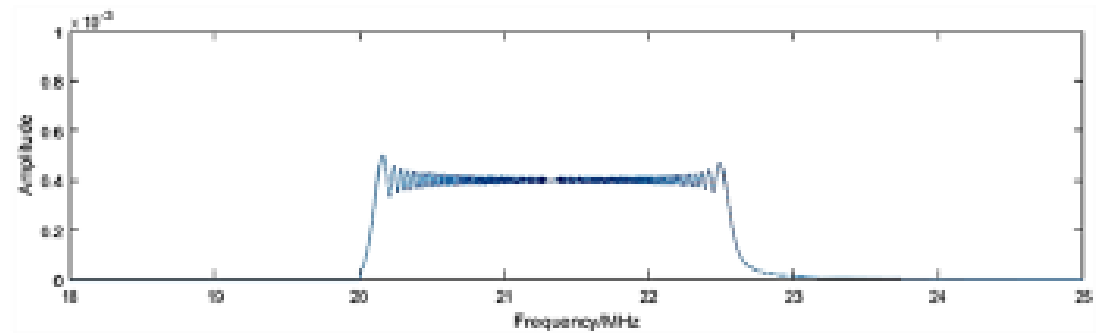
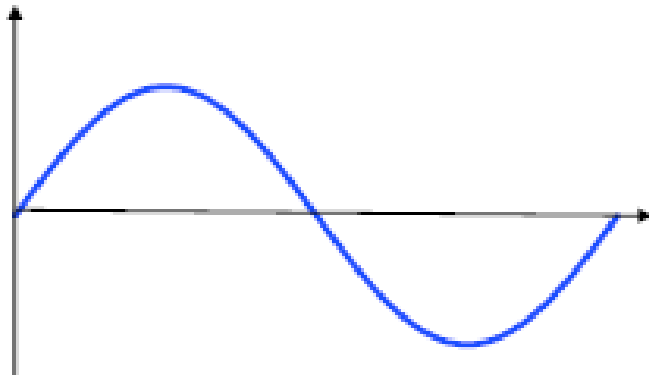
MPSジャパン合同会社 シニアFAE

2026年4月



- 従来のスイッチング電源 (SMPS) のスペクトラム
- 周波数スペクトラム拡散 (FSS) の理論
- 実ボードでの利点に関する実践計測
- EMIレシーバを使用した実践的な測定
- 周波数スペクトラム拡散の限界
- 結論
- Q&A

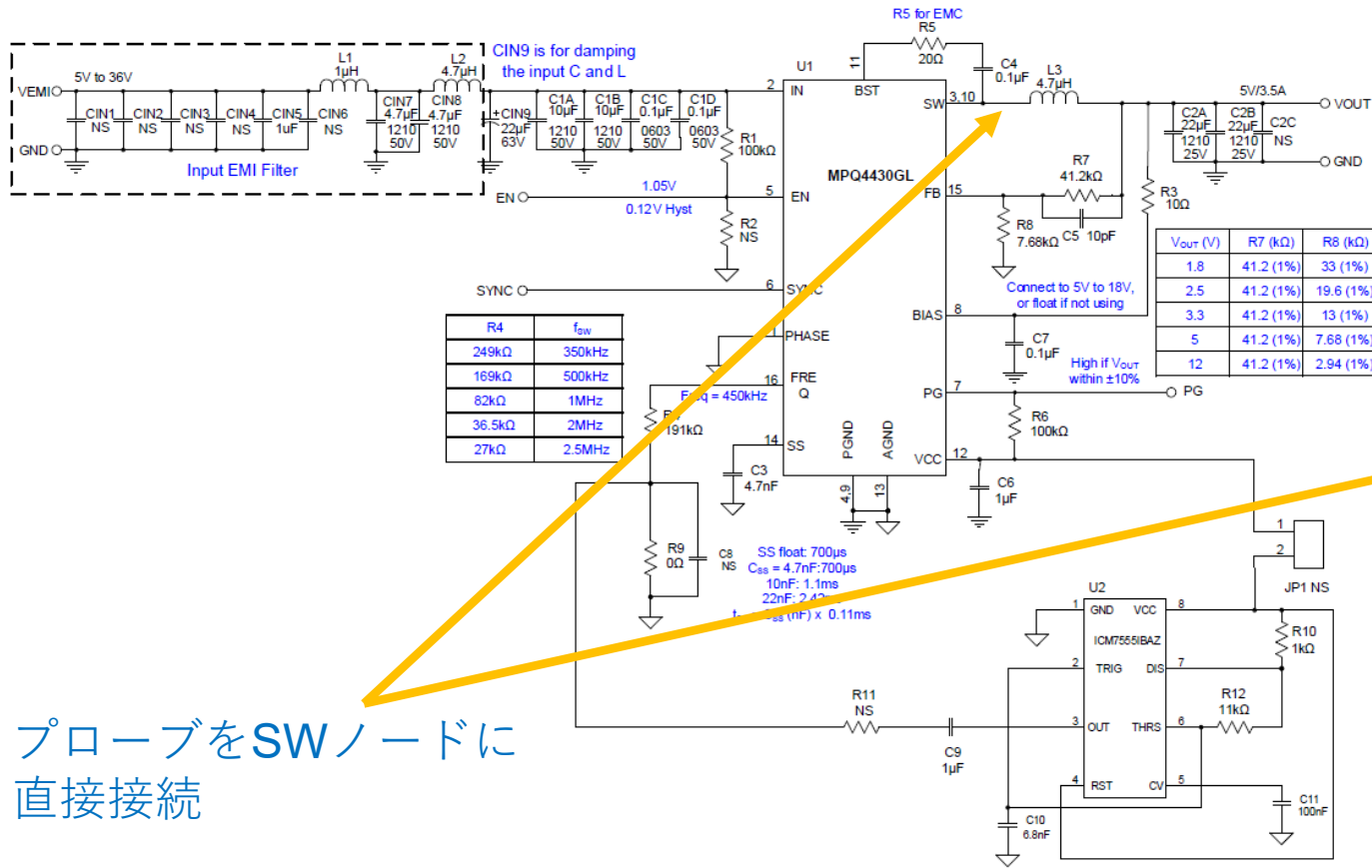
従来のスイッチング電源 (SMPS) の スペクトラム



従来のSMPSのスペクトラム

EVQ4430-L-00A

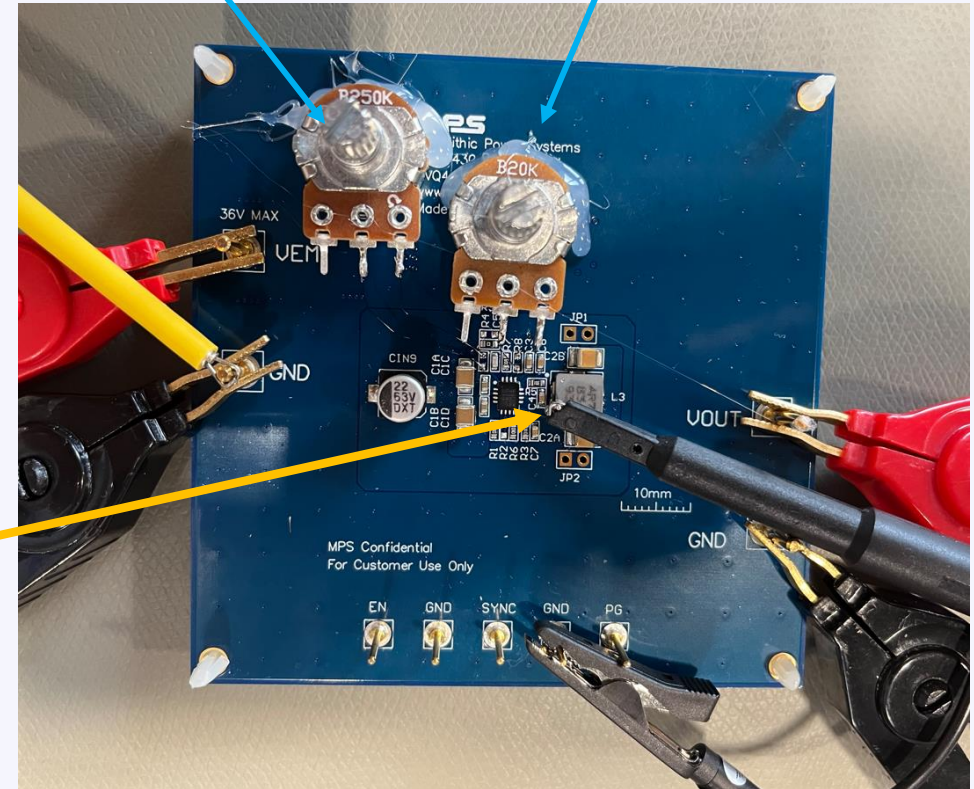
EVALUATION BOARD SCHEMATIC



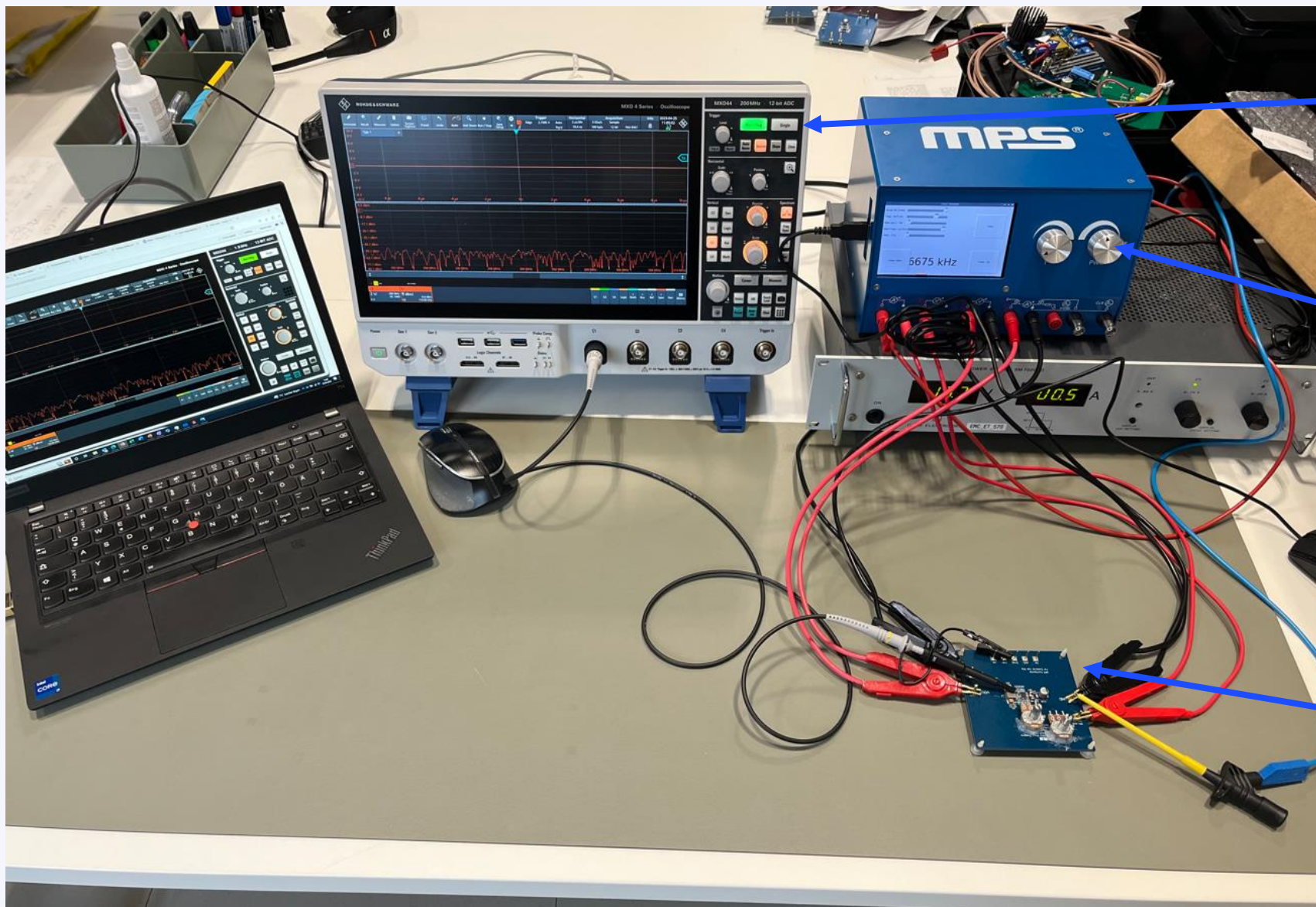
プローブをSWノードに
直接接続

トリム周波数

トリムデューティー
サイクル



従来のSMPSのスペクトラム



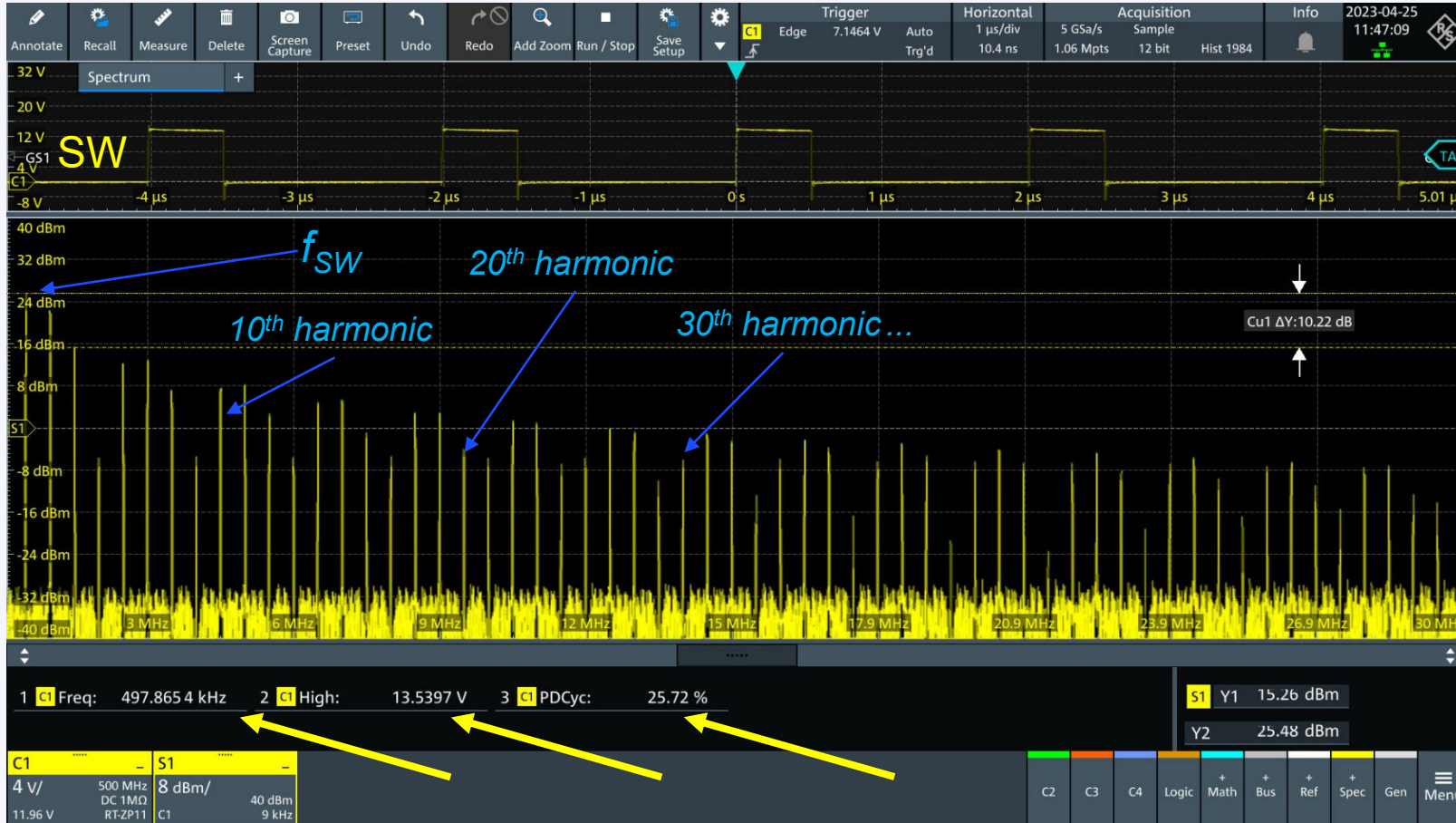
R&S MXO 4 オシロスコープ
リアルタイムFFT搭載

MPS効率計
(負荷として使用)

EVQ4430-L-00A
評価ボード

従来のSMPSのスペクトラム

一般に、スイッチングモード電源 (SMPS) のスペクトラムには、スイッチング周波数 (f_{SW}) とすべての高調波が表示されます。



$$V_{IN} = 13.5V$$

$$V_{OUT} = 5V$$

$$f_{SW} = 500kHz$$

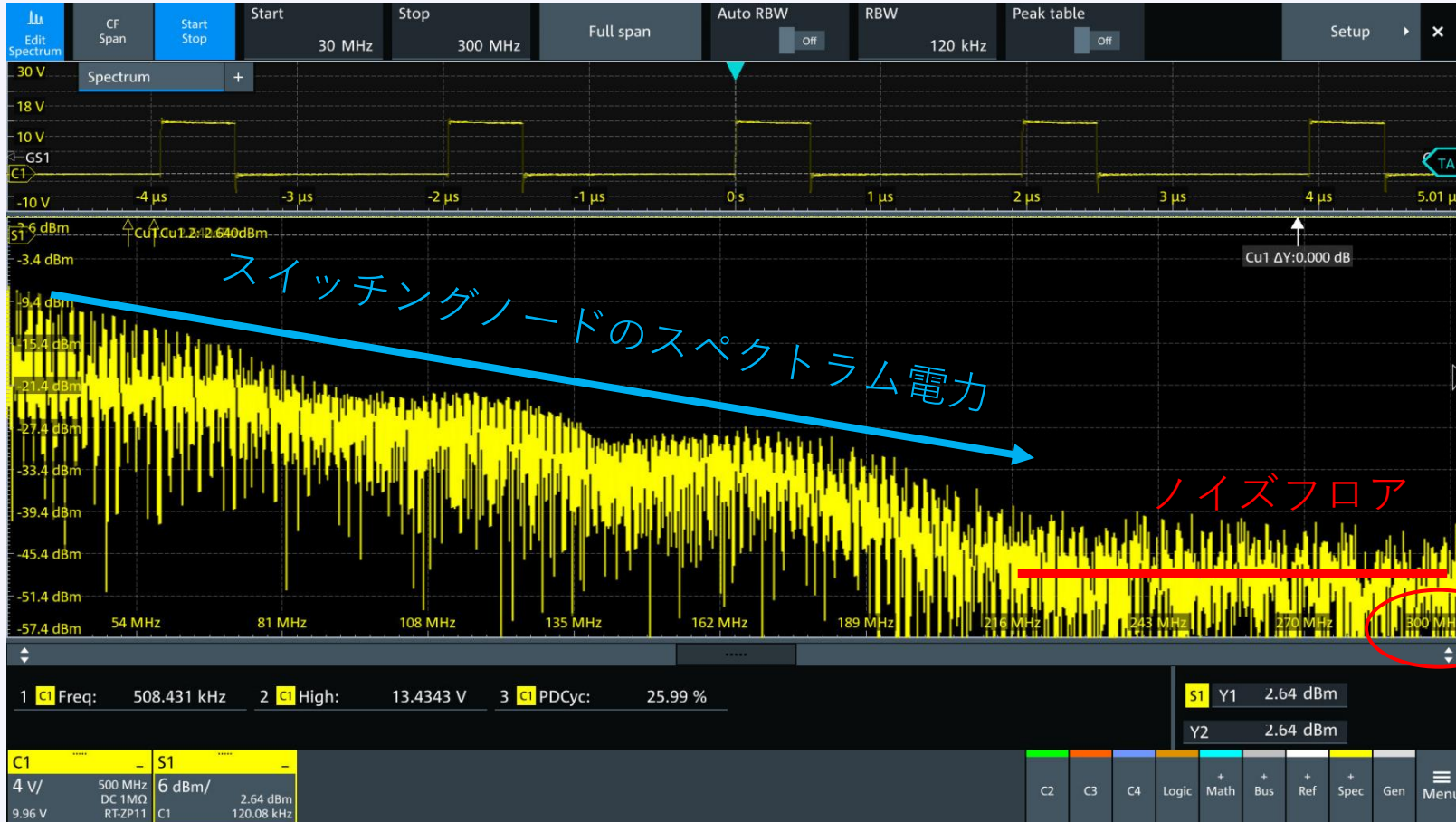
$$I_{OUT} = 1A$$

Mode = CCM

$$RBW = 9kHz$$

従来のSMPSのスペクトラム

高調波の電力は周波数とともに減少し、スイッチング周波数に応じてノイズレベルは約300MHz~700MHzになります。



VIN = 13.5V

VOUT = 5V

fSW = 500kHz

IOUT = 1A

Mode = CCM

RBW = 9kHz

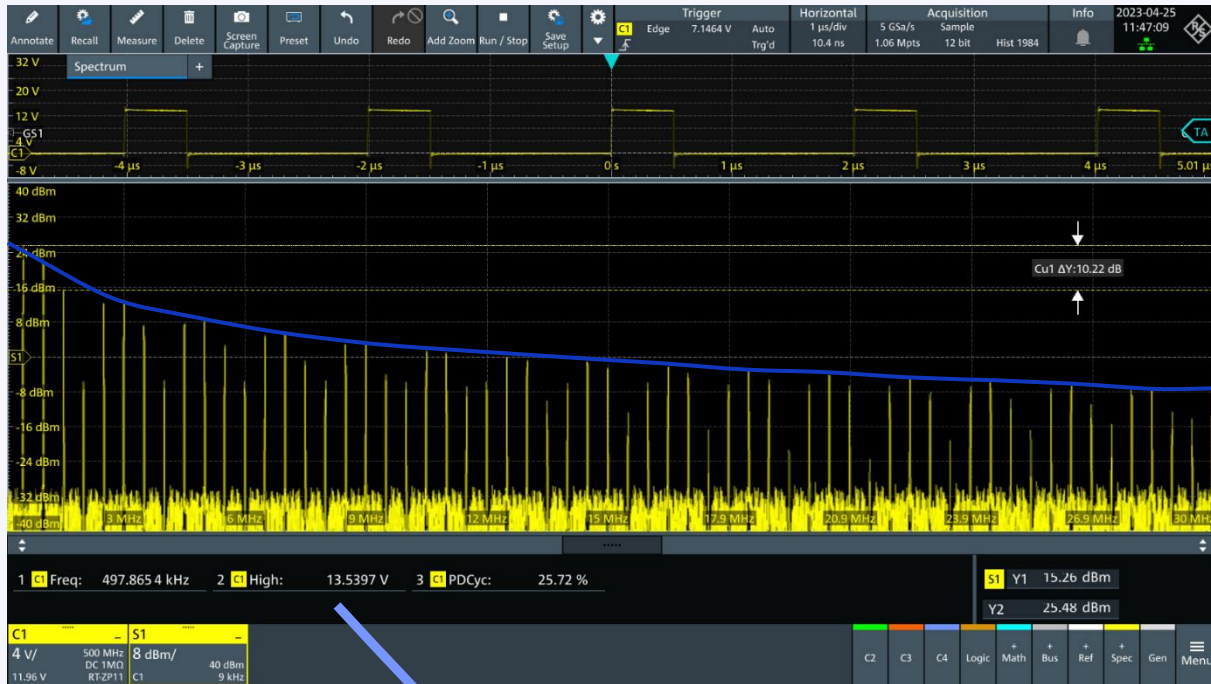
SMPSのスペクトラムにまさに影響を与えるものは何か？また、どのように影響するか？

次のパラメータが**SMPS**のスペクトラムに与える影響を調べてみましょう。

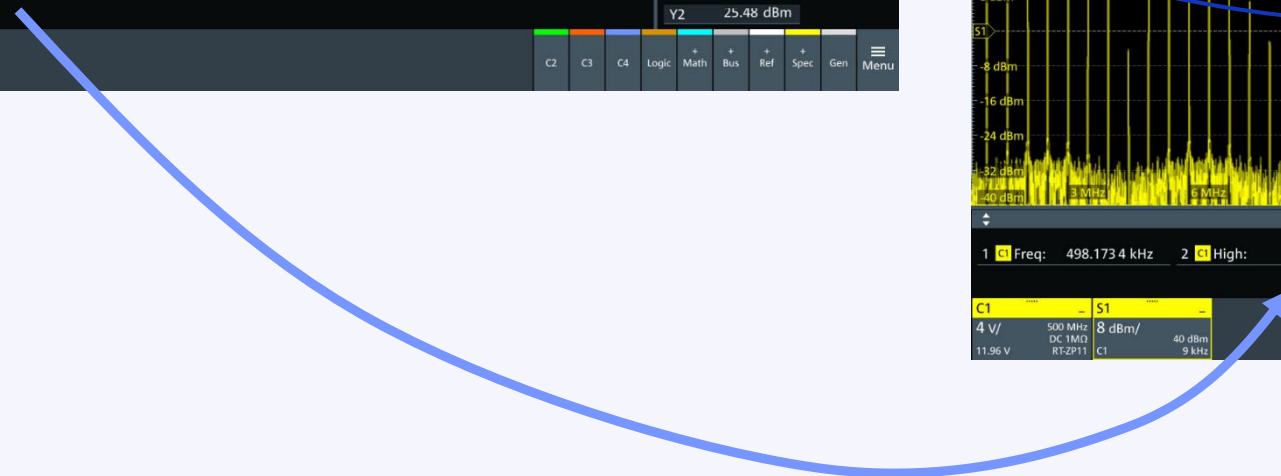
- 入力電圧
- デューティサイクル
- スイッチング周波数

従来のSMPSのスペクトラム

入力電圧を13.5Vから27Vに変更します。

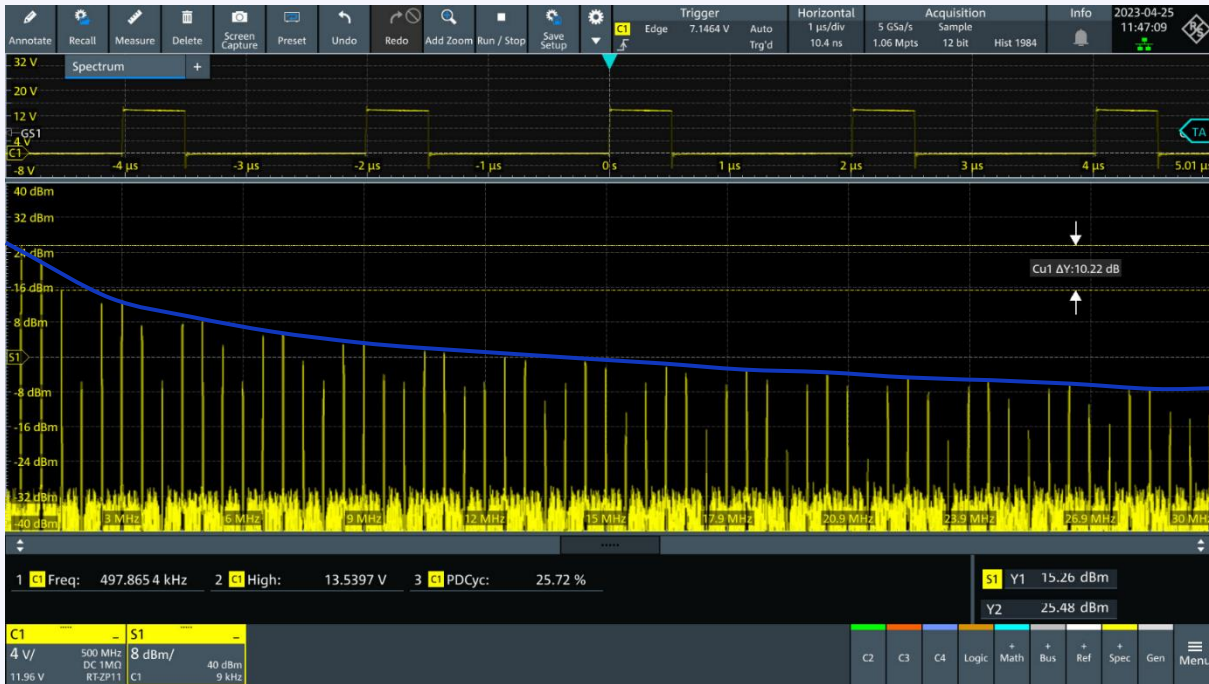


降圧レギュレータの入力電圧が高くなると、「ホットループ」のdU/dtが増加するため、EMC放射が増加します

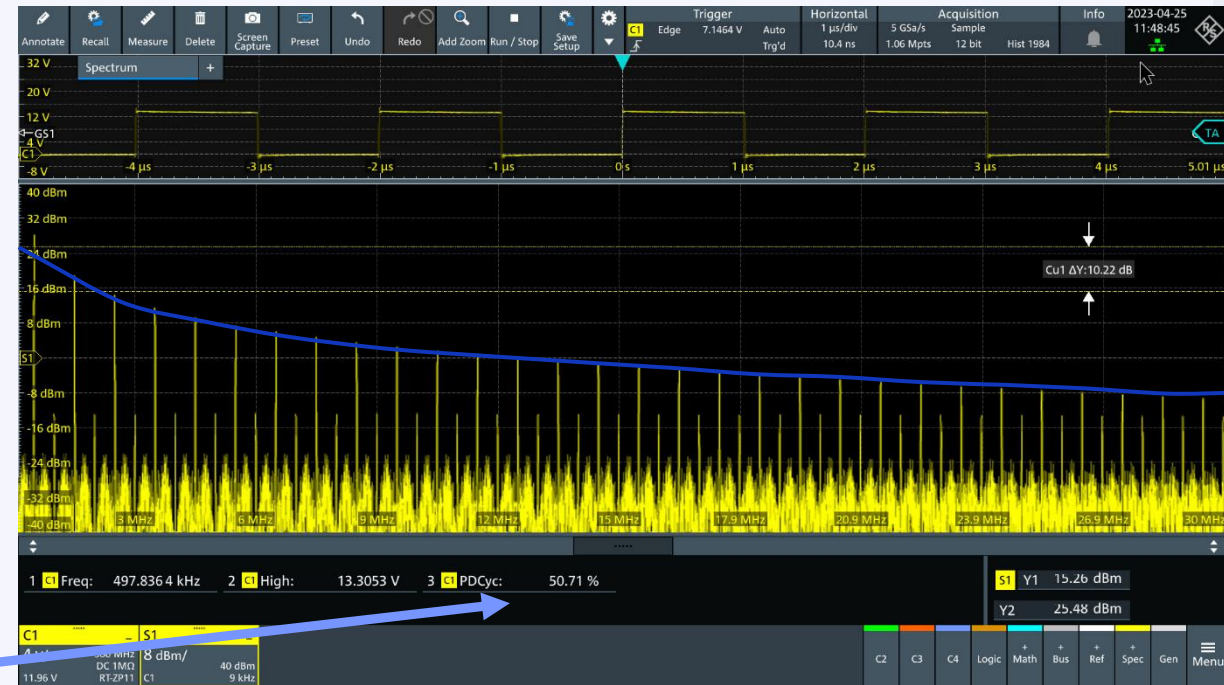


従来のSMPSのスペクトラム

デューティサイクルの変更 (DC出力電圧の変更を意味)



デューティサイクルがちょうど50%になると、すべての「偶数」高調波は消える



従来のSMPSのスペクトラム

周波数の変更: LF



スイッチング周波数を上げると、高調波が発生する特定の周波数ごとに EMC 放射が増加。

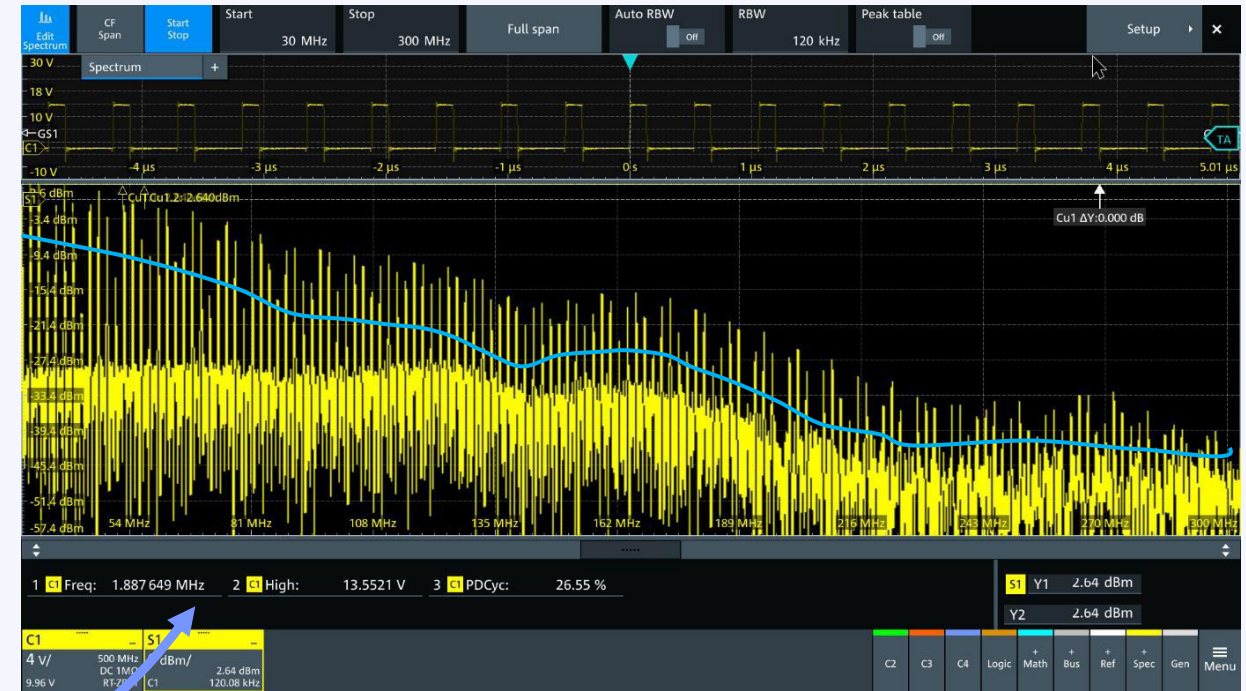
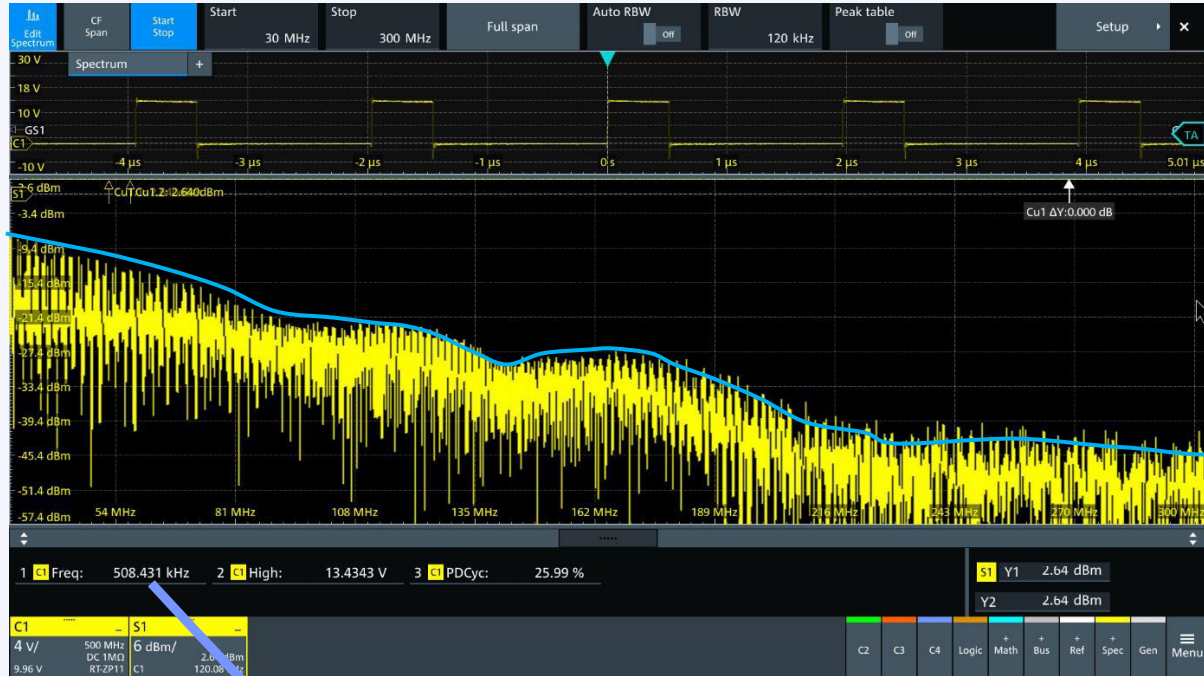
同様に、高調波間の「ギャップ」も大きくなる



従来のSMPSのスペクトラム

周波数の変更: HF

スイッチング周波数を2倍にすると、
EMC放射が6dB増加する



従来のSMPSのスペクトラム

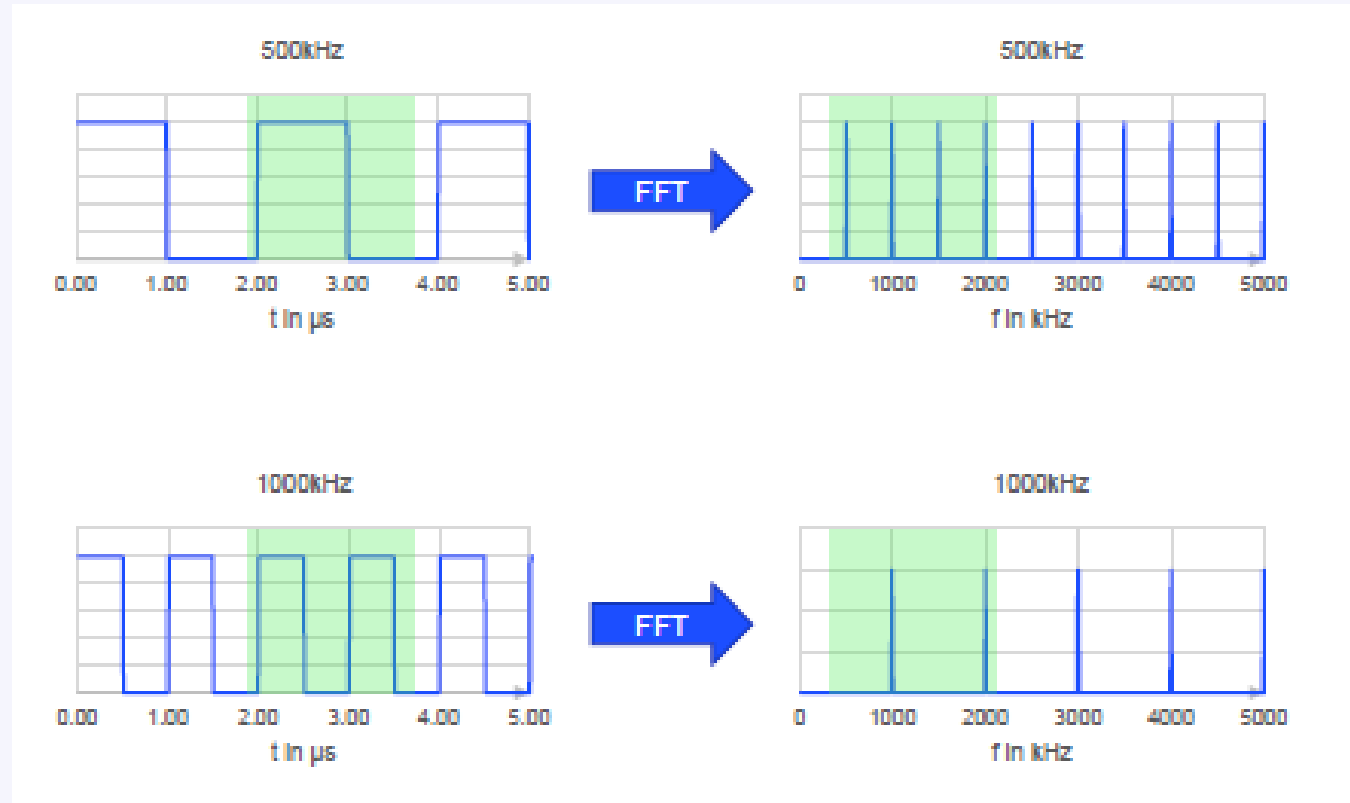
スイッチング周波数を2倍にすると、

- 時間枠ごとのスイッチング回数が2倍になる

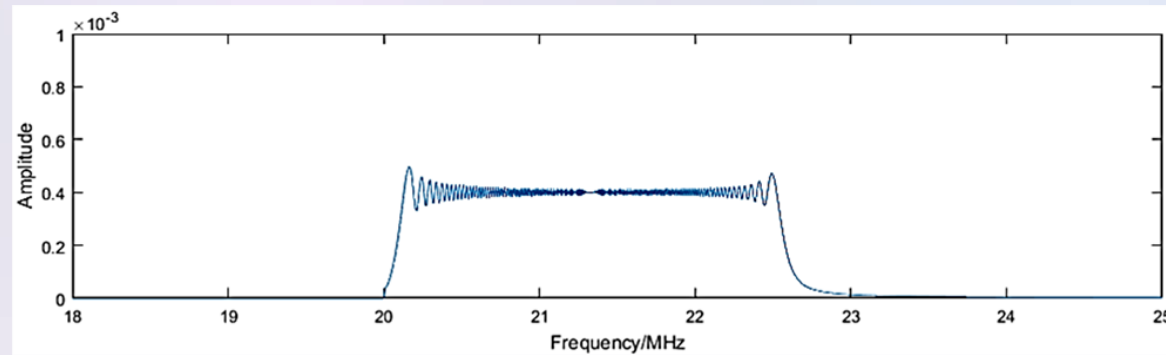
- エネルギーを変換できるスパイクの数が半分になる

これはスペクトラムの「スパイク」を増加させ、以下の式で表すことができます。

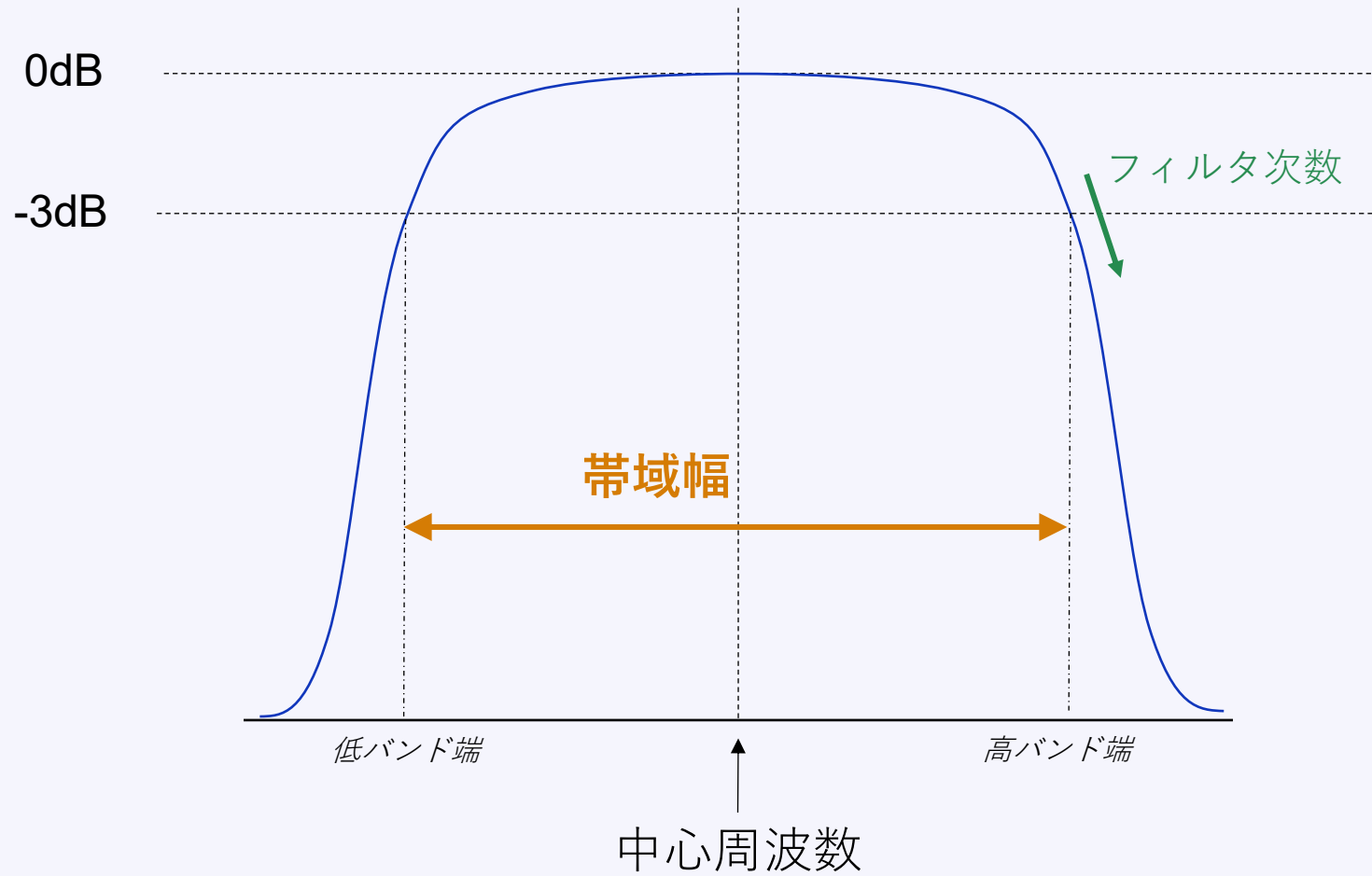
$$\frac{6dB}{\text{frequency doubling}}$$



周波数スペクトラム拡散 (FSS) の理論



分解能帯域幅 (RBW: Resolution Bandwidth) フィルタ



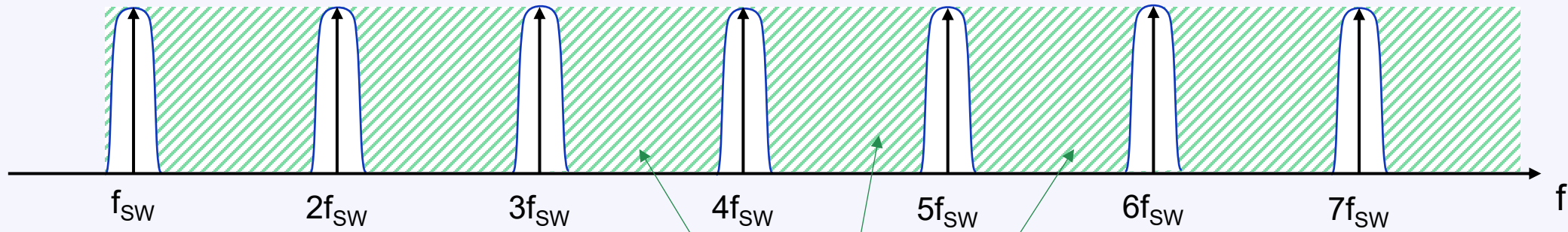
RBW は、開始周波数から停止周波数まで、選択された周波数範囲内で一定の周波数変化を伴って動きます。
通常、RBWは3つあります:

- 9kHz (主に30MHzまでの低周波数範囲で使用される)
- 120kHz (主に30MHzから1GHzの中周波数範囲で使用される)
- 1MHz (主に1GHz以上の高周波数範囲で使用される)



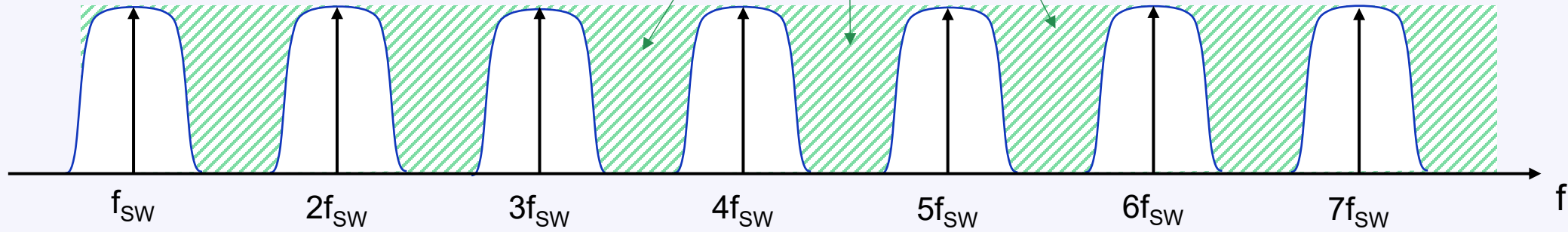
スパイクのエネルギーを隠す可能性

「低い」 RWB



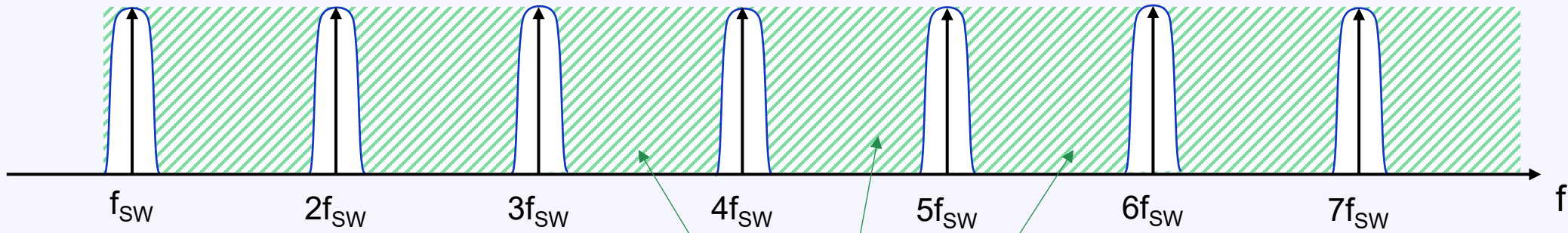
これらのスパイクのエネルギーを「隠す」ことができる領域

「高い」 RWB



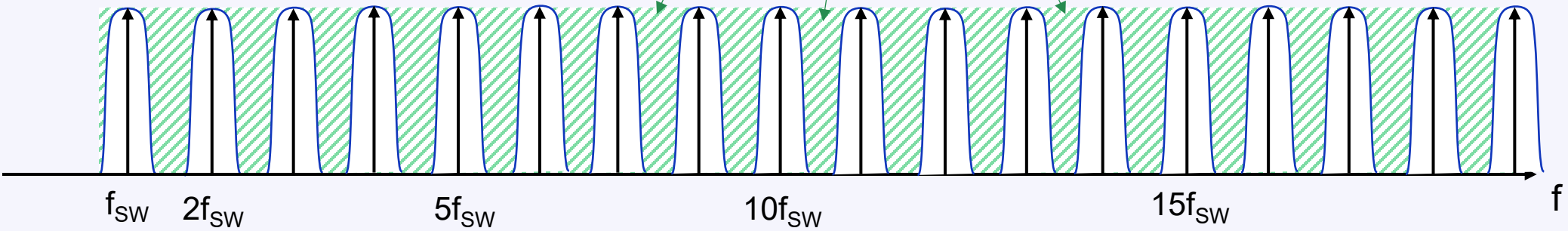
スパイクのエネルギーを隠す可能性

「高い」 f_{sw}



これらのスパイクのエネルギーを「隠す」ことができる領域

「低い」 f_{sw}

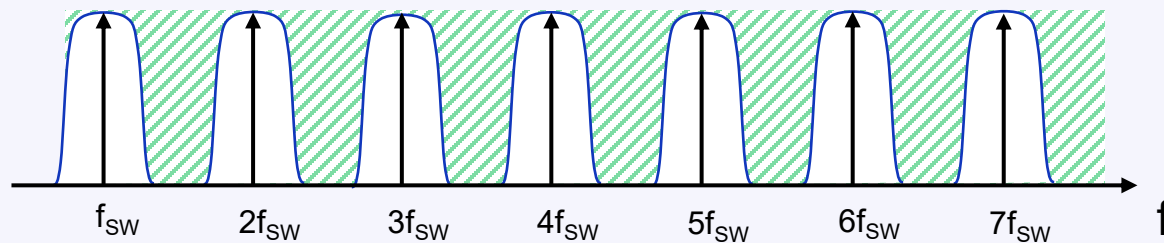


スパイクのエネルギーを隠す可能性

EMI受信機から「隠蔽」できるエネルギーは無限ではありません。RBWが高くなるほど、FSSの効果は低下します。さらに、 f_{sw} が低いほど、周波数帯域内のスパイクが減衰するため、FSSの効果は低下します。

最大減衰 (緑の領域全体を使用してスパイクからのエネルギーを「隠し」、結果としてホワイトノイズを生成する場合) は、次の式で計算できます:

$$\alpha = 10 * \log\left(\frac{RBW}{f_{sw}}\right)$$



f_{sw} (MHz)	RBWの減衰 (dB)		
	9kHz	120kHz	1000kHz
0.1	10.5	0.0	0.0
0.2	13.5	2.2	0.0
0.3	15.2	4.0	0.0
0.5	17.4	6.2	0.0
1	20.5	9.2	0.0
2	23.5	12.2	3.0
5	27.4	16.2	7.0
10	30.5	19.2	10.0
100	40.5	29.2	20.0

スパイクをFSSに変換する

SMPSの基本周波数 f_{sw} 付近で拡散スペクトラム信号を変調する方法は、周波数変調 (FM) と呼ばれます。

周波数変調:

FM

変調深度:

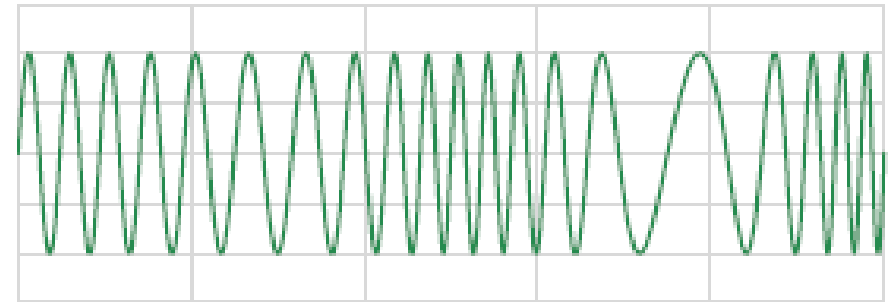
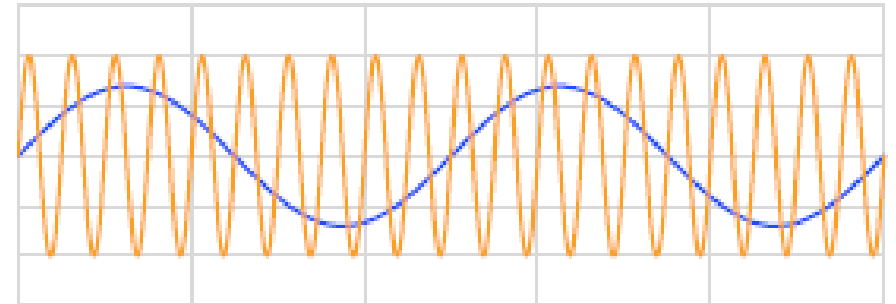
$$\Delta f = f_{Max} - f_{Min}$$

変調指数*:

$$h = \frac{\Delta f}{FM}$$

$$h = \frac{\text{周波数の広がり} \quad \text{Spread of the Frequency}}{\text{Number of points, how often we go through the Spread of the Frequency per second} \quad \text{1秒あたりの周波数の広がり} \text{をどれくらいの頻度で通過するか}}$$

* 変調指数は、変調信号が変調されていない信号を中心にどれだけ変化するかを示す。



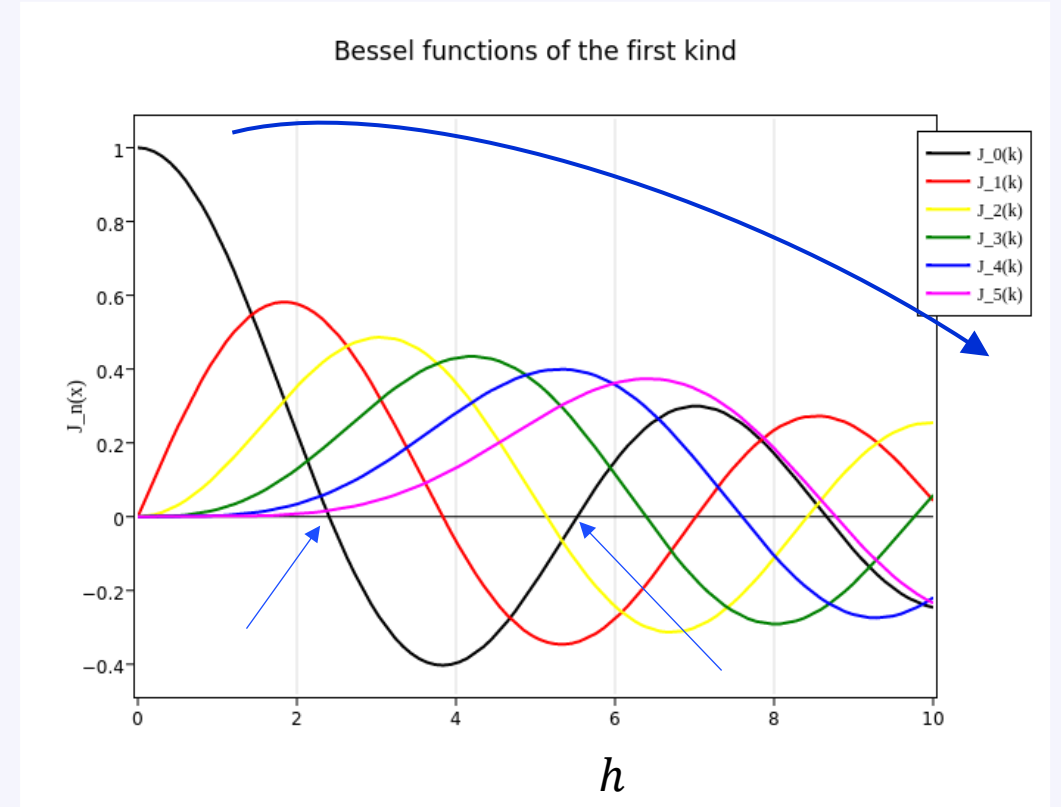
- 基本周波数
- 周波数変調 (FM)
- FM変調信号

スパイクをFSSに変換する

第1種のベッセル関数によれば、変調指数は搬送周波数電力のどれだけがサイドバンド (側波帯) に伝達されるかを示します。

一般に、変調周波数 (9kHz/120kHz) が高くなると、搬送周波数 (スイッチング周波数) の振幅 (スパイクの高さ) は小さくなります。

搬送周波数が0になる変調指数ポイントがいくつかあります。



$$h = \frac{\Delta f}{FM}$$

周波数範囲を拡大する
無限大 (SMPS 制御ループ) にはなりません

FMを下げる
これが低すぎると、安定時間の基準に違反し、減衰が0になります。

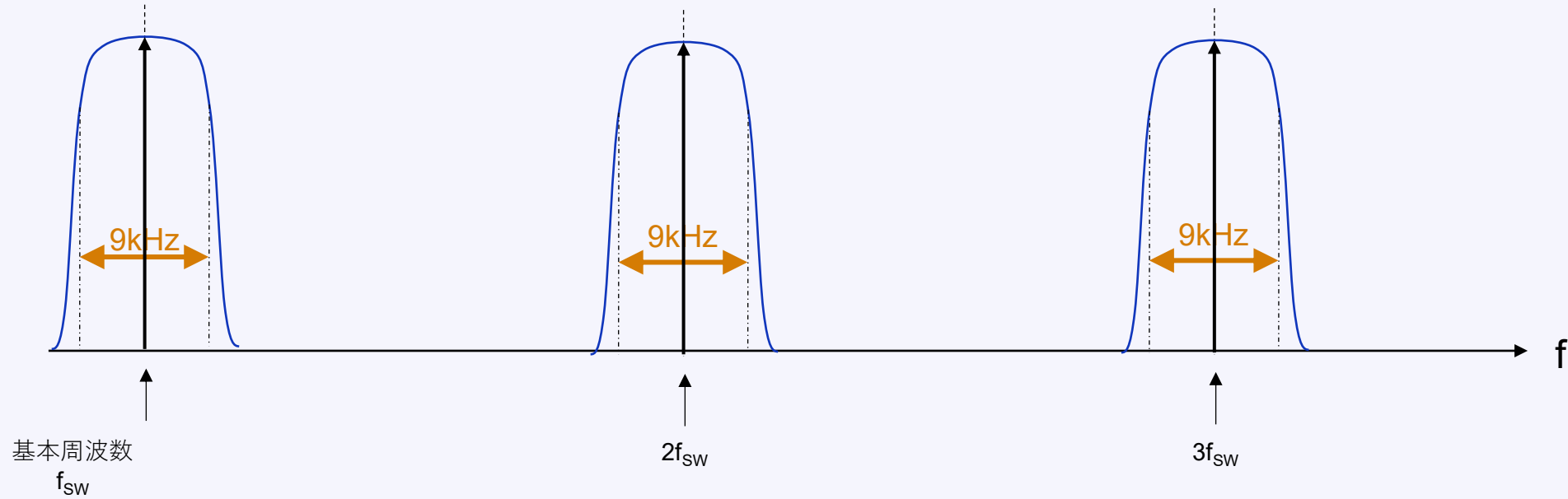
スパイクをFSSに変換する

i.e. 周波数変調 = 10kHz
変調深度 = 10kHz
基本周波数でのFM変調

$$h = \frac{10\text{kHz}}{10\text{kHz}} = 1$$

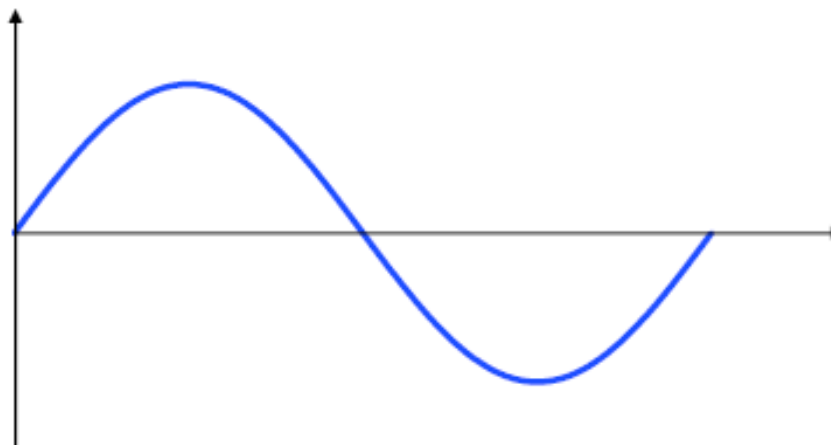
$$h = \frac{20\text{kHz}}{10\text{kHz}} = 2$$

$$h = \frac{30\text{kHz}}{10\text{kHz}} = 3$$



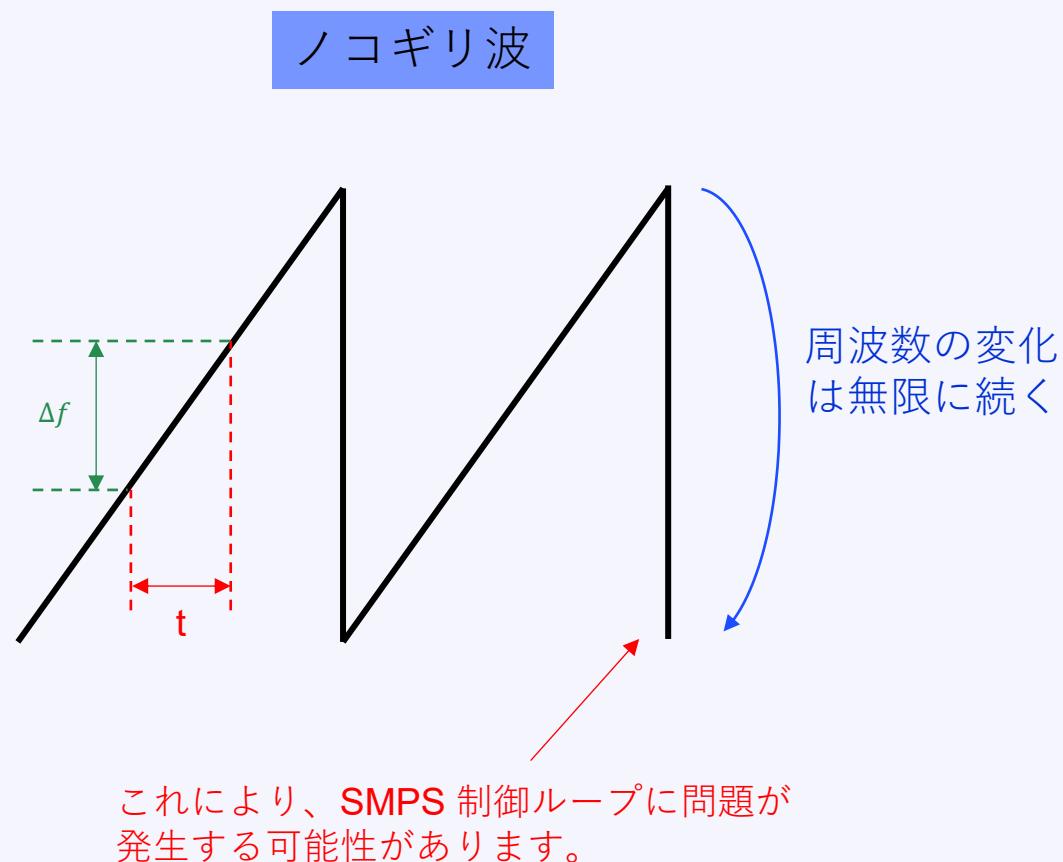
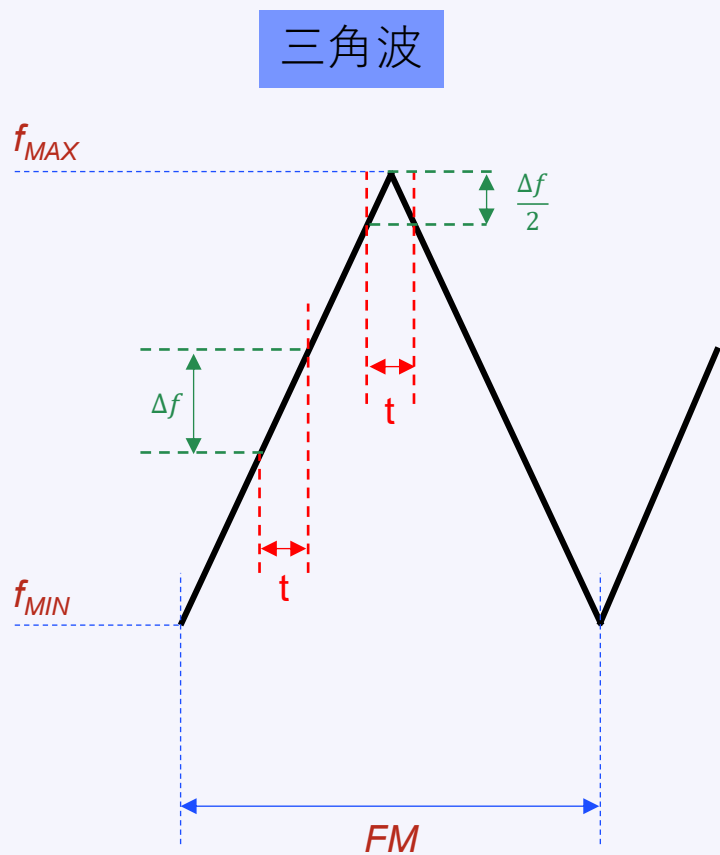
高調波は自動的に高い変調指数を達成

良好な減衰を実現するには、反復信号だけでなく一定の周波数変化も重要です。



良好な減衰を実現するには、反復信号だけでなく、一定の周波数変化も重要です。

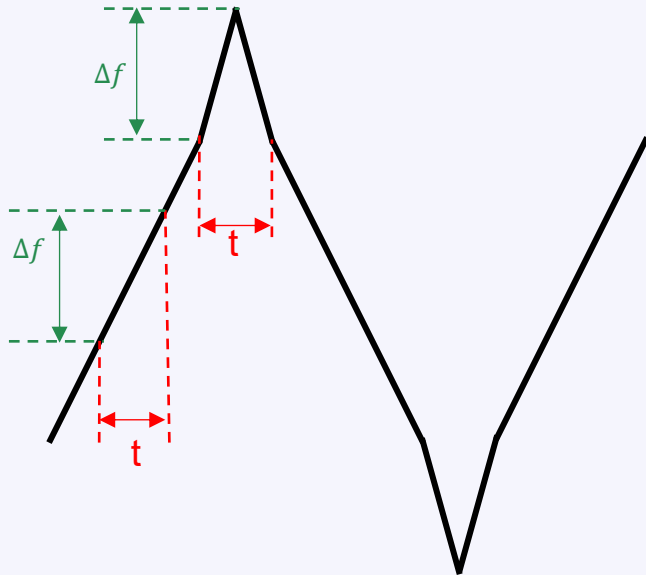
したがって、FMではさまざまな波形を使用できます。



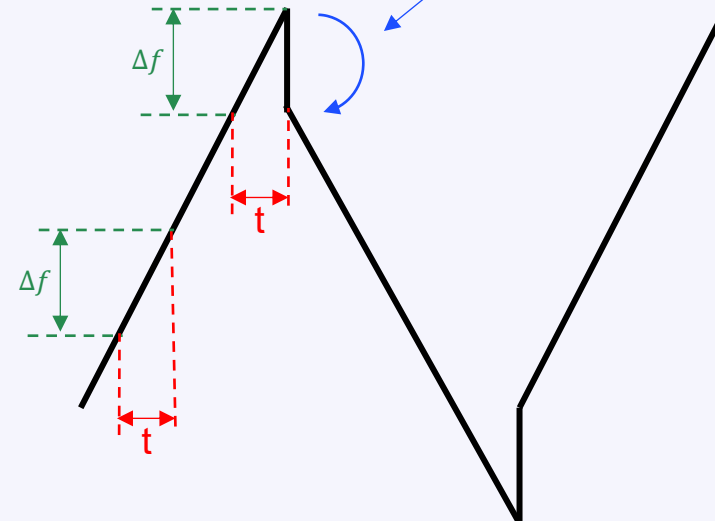
良好な減衰を実現するには、反復信号だけでなく、一定の周波数変化も重要です。

したがって、FMには異なる波形を使用できます:

Hershey Kiss波形



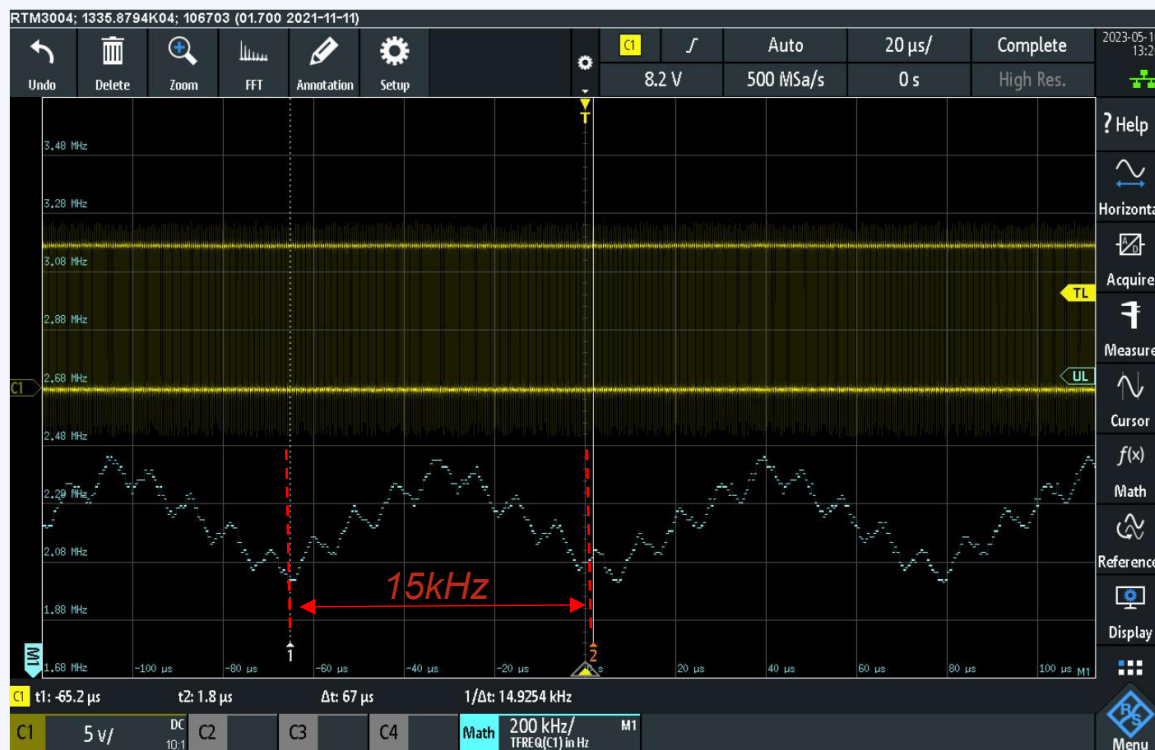
ステップ三角波



周波数の変化を小さくすると、制御ループを安定させることができます。

良好な減衰を得るには、一定の周波数変化と反復信号が重要です。
そのため、FMでは様々な波形を使用できます。

15kHz + 120kHz 変調



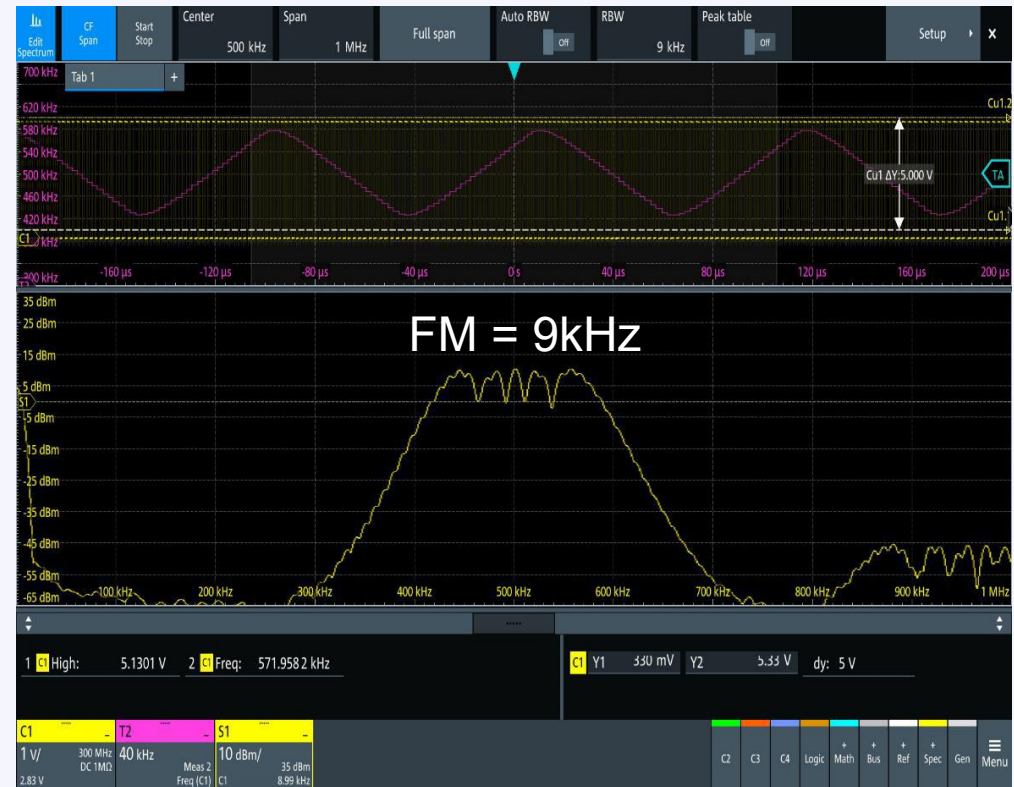
Measured with MPQ4371GVE-0000-AEC1 Frequency Spread Spectrum

実際のボード上で 実践的な測定をする利点

キャリア周波数 (スイッチング周波数) = 500kHz

$\Delta f = 20\% \rightarrow 100\text{kHz}$ (: $F_{sw} = 450\text{kHz} \sim 550\text{kHz}$ 間でスイッチング周波数を振っている)

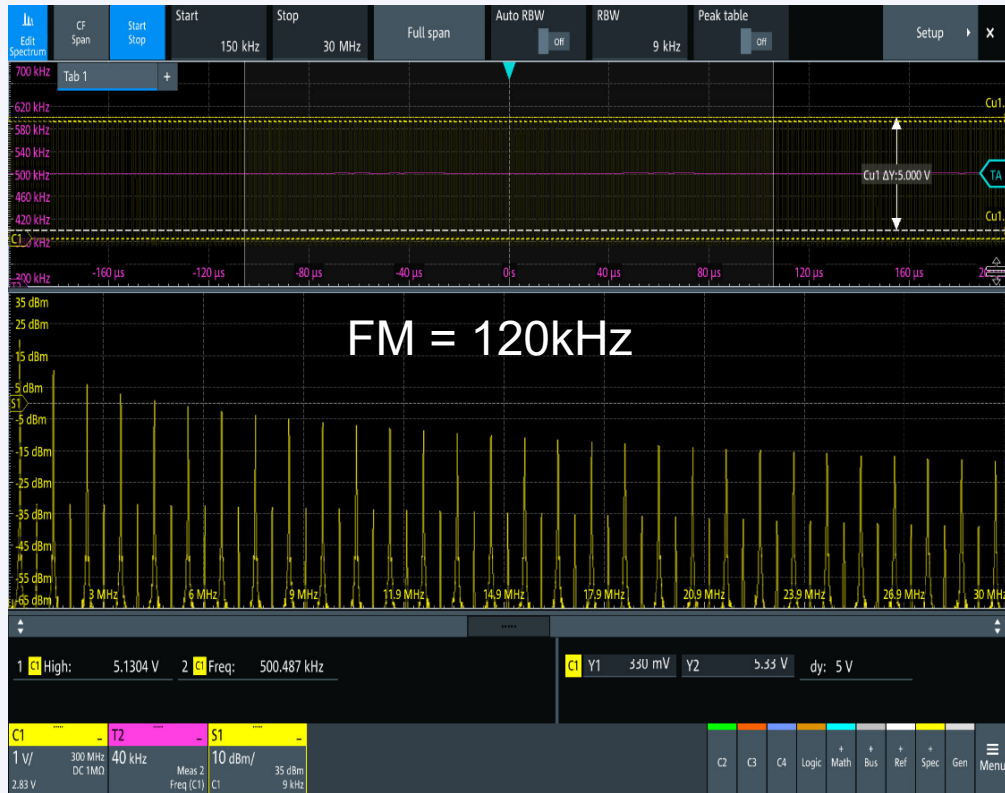
FM $\rightarrow 120\text{kHz} \sim 2\text{kHz}$ までスイープ



キャリア周波数 (スイッチング周波数) = 500kHz

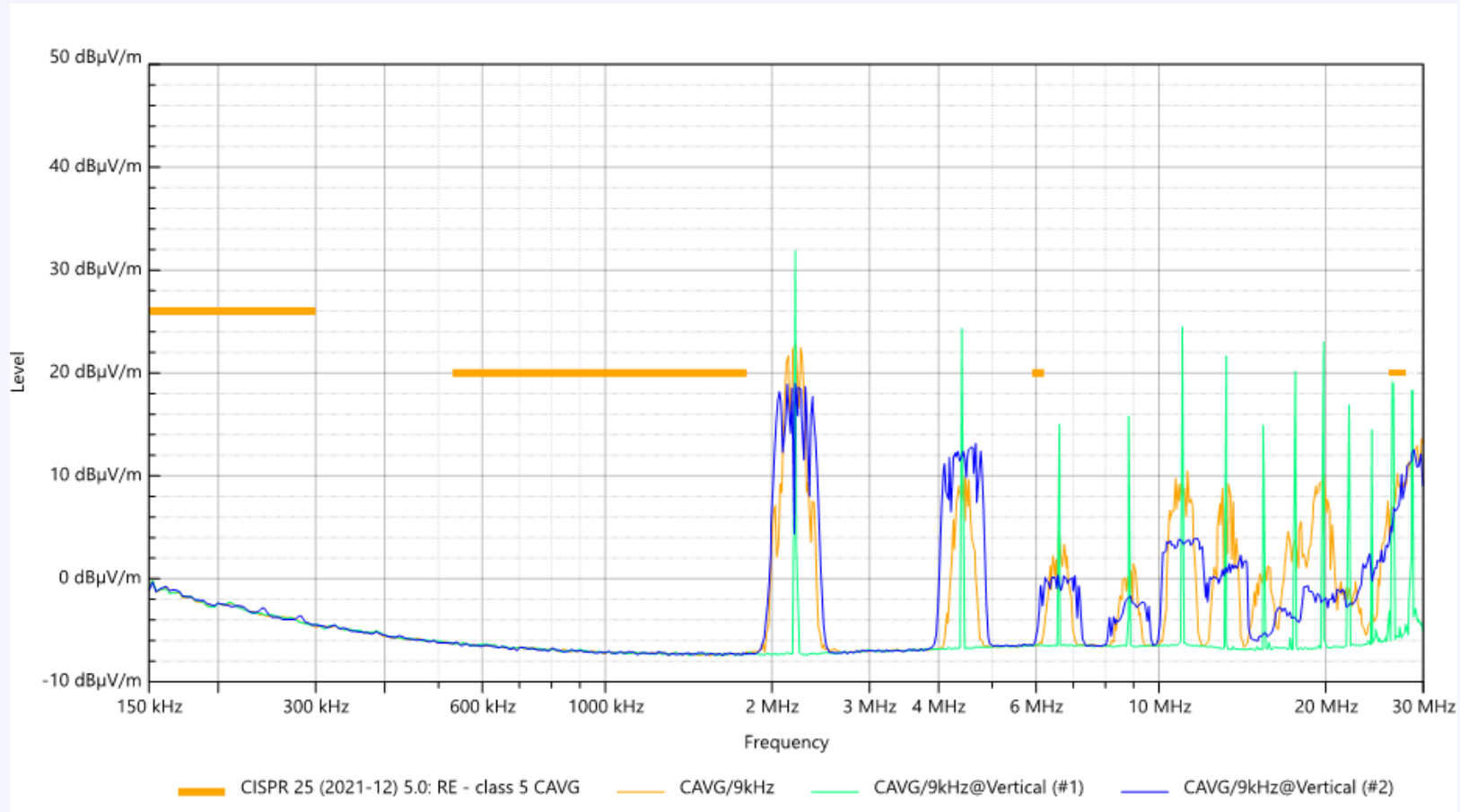
$\Delta f = 20\% \rightarrow 100\text{kHz}$

FM \rightarrow 120kHz \sim 2kHzまでスイープ



「デュアルFSS」のボーナス

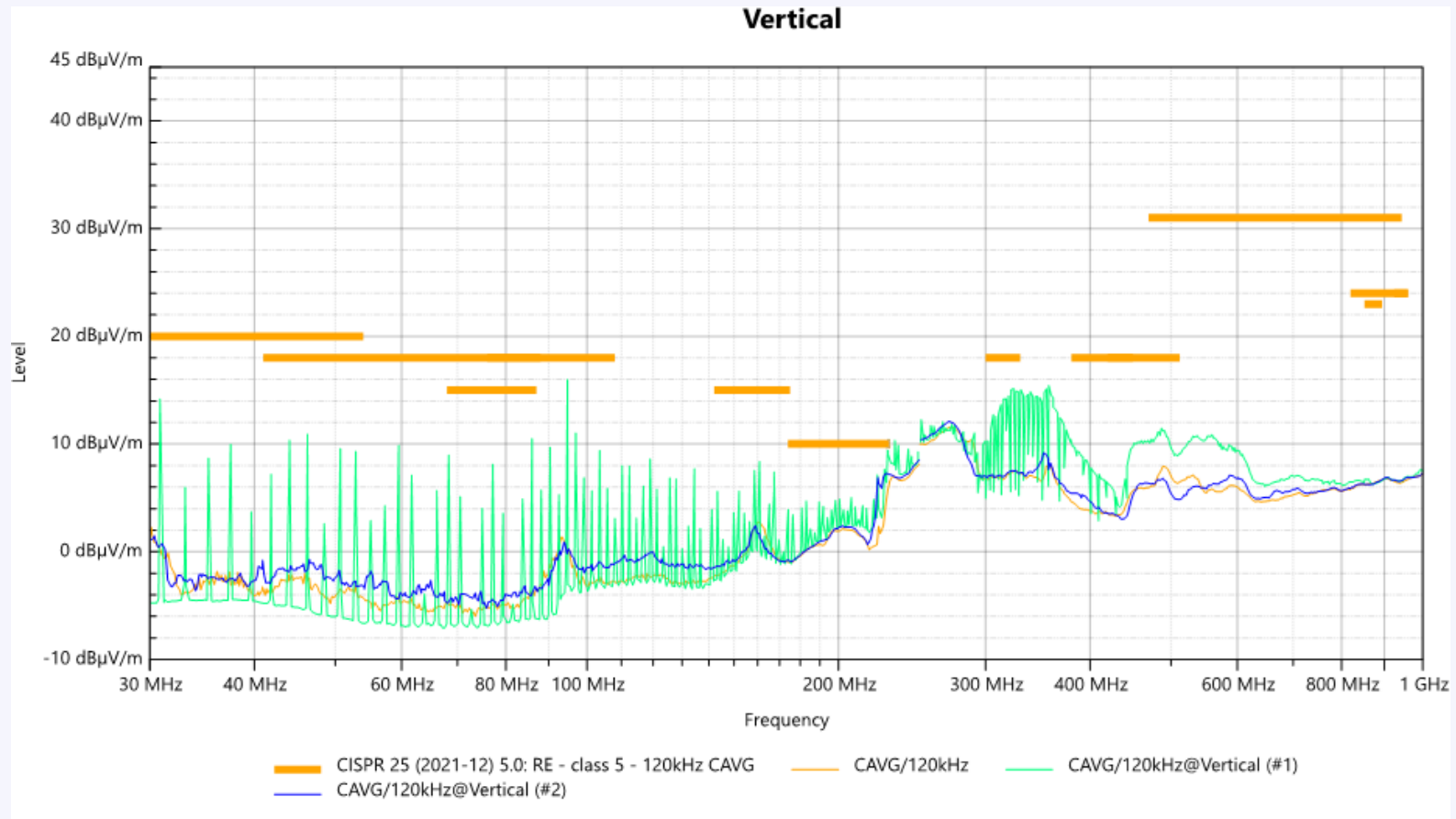
EQV4371



- FSS無しのMPQ4371-AEC1
- 15kHz FSS、±10%スパン付きMPQ4371-AEC1 (青線)
- デュアルFSSのMPQ4371-AEC1: 15 kHz FSS、±6.2%スパン、および120kHz FSS、±2.5%スパン (黄線)

「デュアルFSS」のボーナス

EQV4371



- FSS無しのMPQ4371-AEC1
- 15kHz FSS、±10%スパン付きMPQ4371-AEC1 (青線)
- デュアルFSSのMPQ4371-AEC1: 15 kHz FSS ±6.2%スパン + 120kHz FSS ±2.5%スパン (黄線)

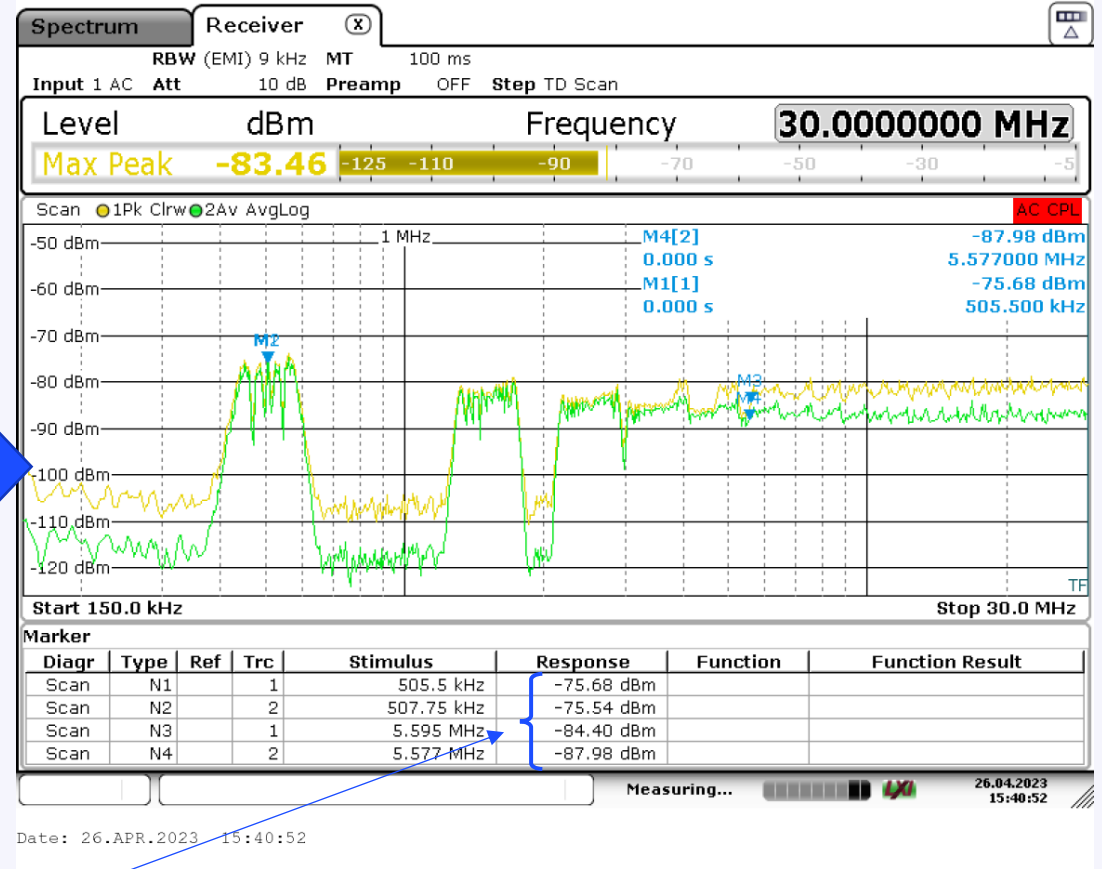
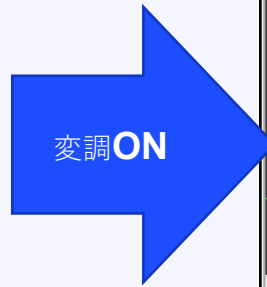
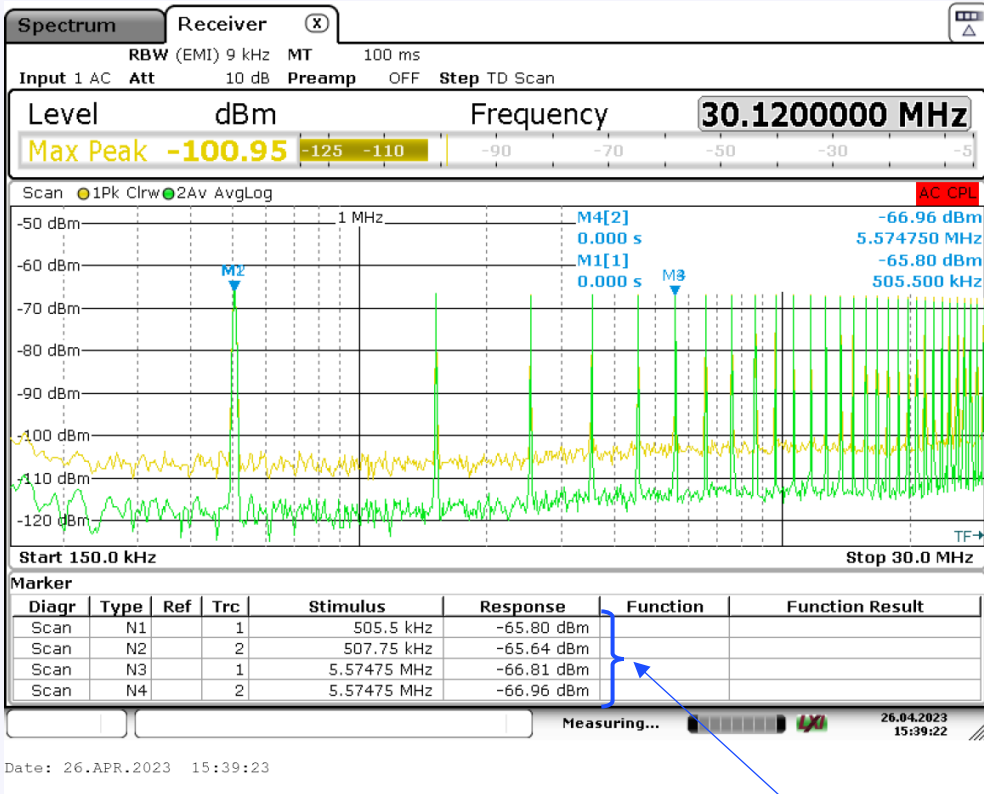
EMIレシーバを使用した 実践的な測定

測定受信機への影響とは何か

参考

キャリア周波数 = 500kHz
 $\Delta f = 20\% \rightarrow 100\text{kHz}$

FM \rightarrow 9kHz
変調波形: 三角波

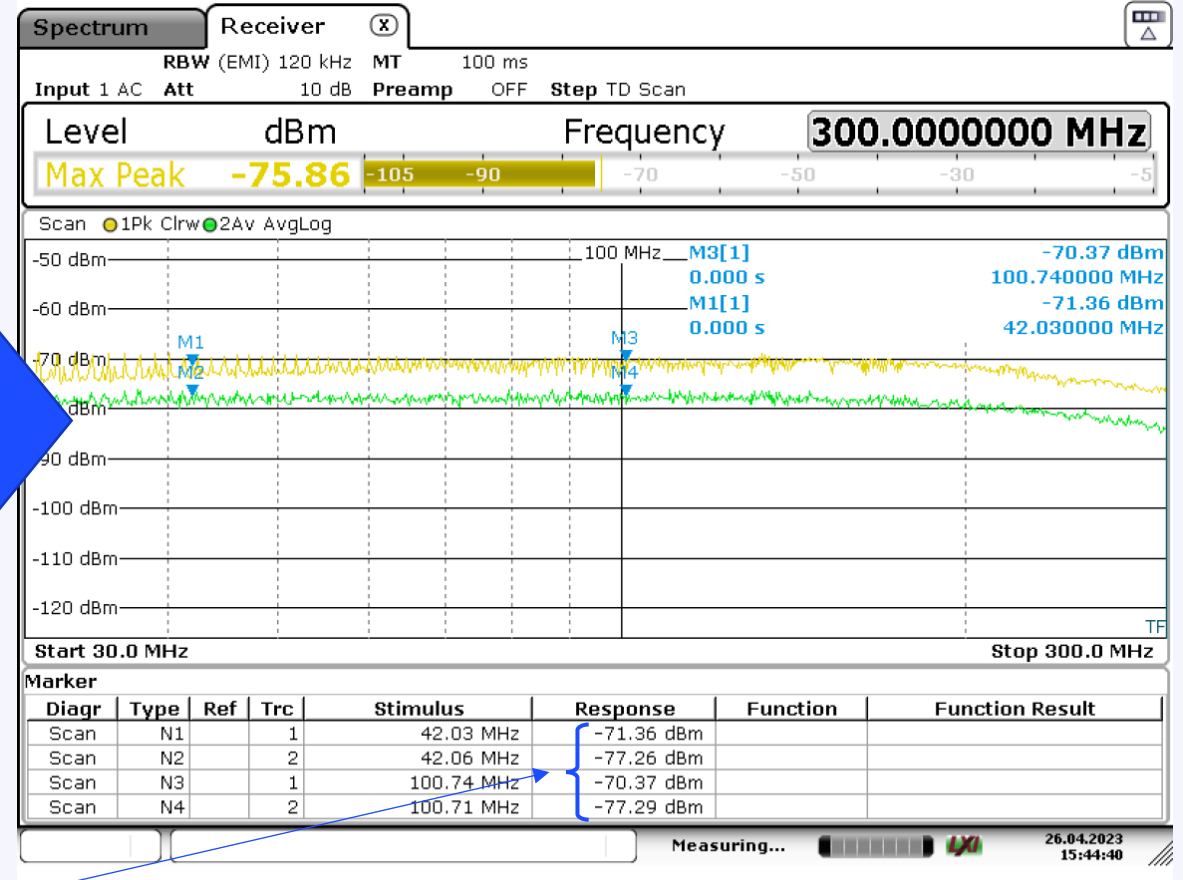
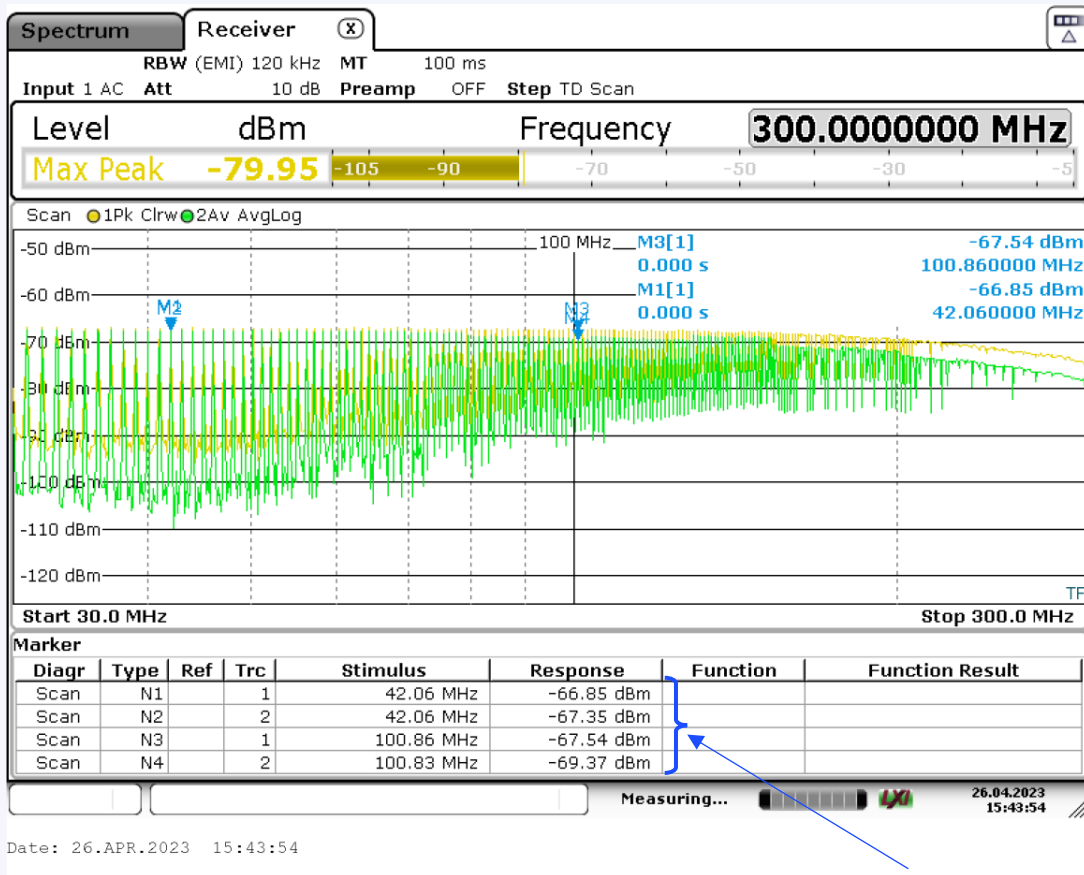


10dB~20dBの減衰

測定受信機への影響とは何か

キャリア周波数 = 500kHz
 $\Delta f = 20\% \rightarrow 100\text{kHz}$

FM \rightarrow 9kHz
変調波形: 三角波

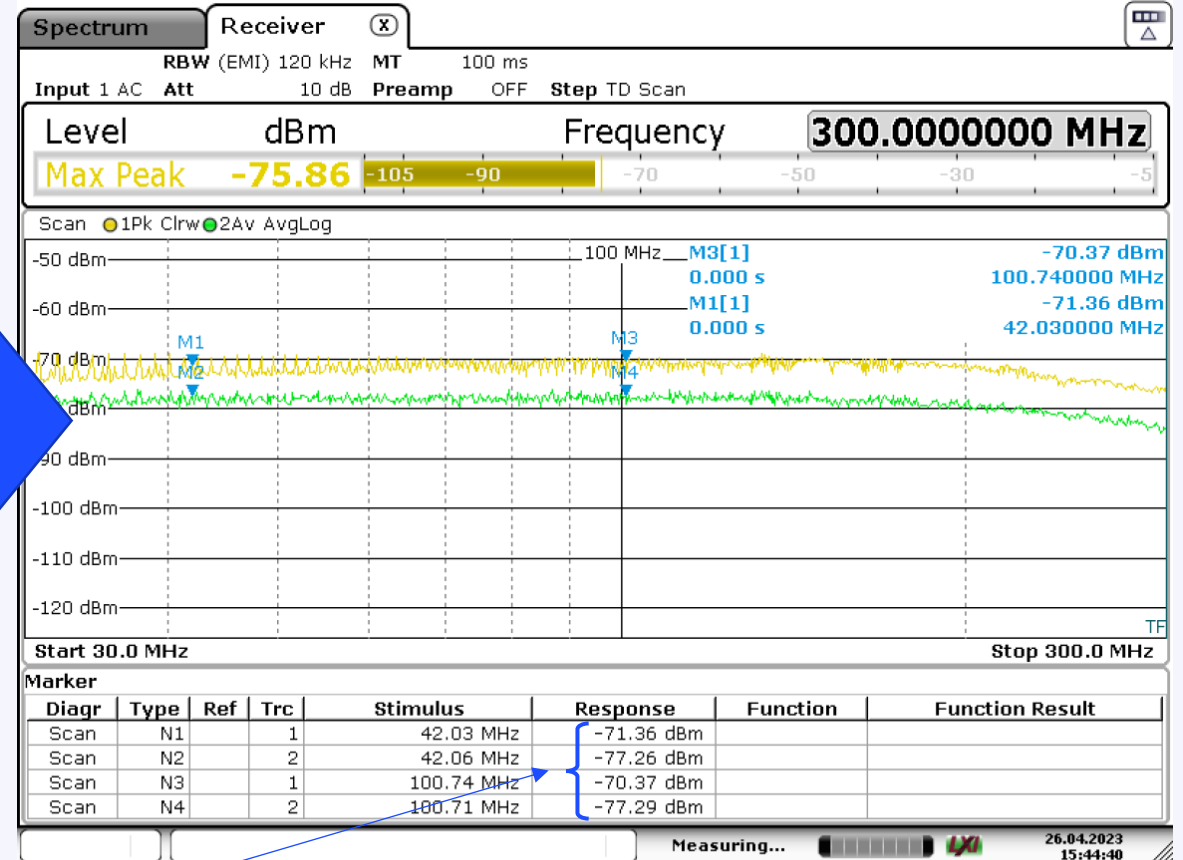
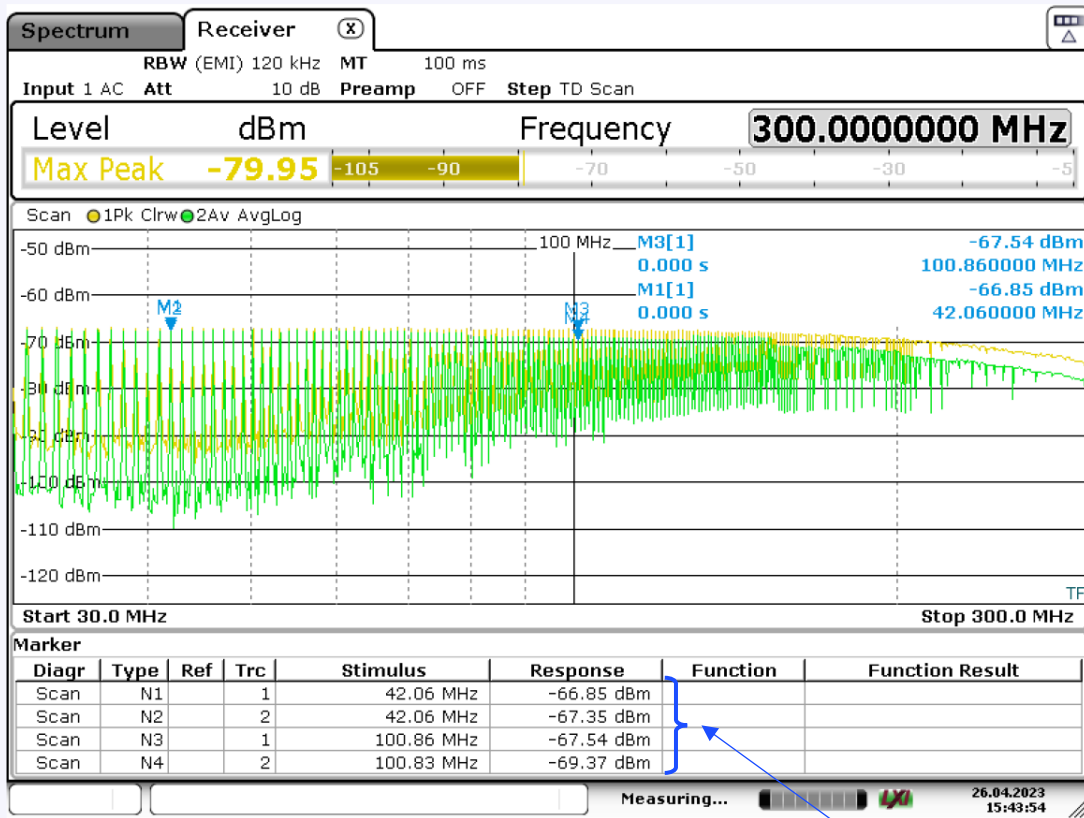


5dB~10dBの減衰

測定受信機への影響とは何か

キャリア周波数 = 500kHz
 $\Delta f = 20\% \rightarrow 100\text{kHz}$

FM \rightarrow 120kHz
変調波形: 三角波



Date: 26.APR.2023 15:43:54

26.04.2023 15:44:40

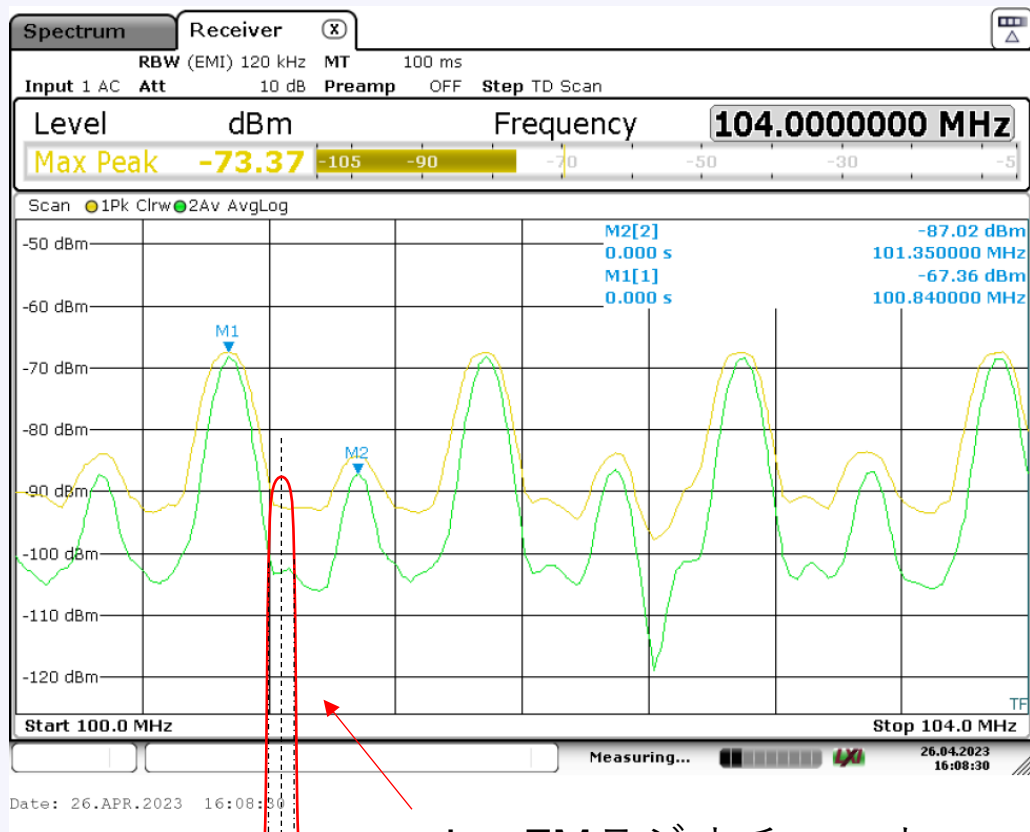
10dB~20dBの減衰

周波数スペクトラム拡散の限界

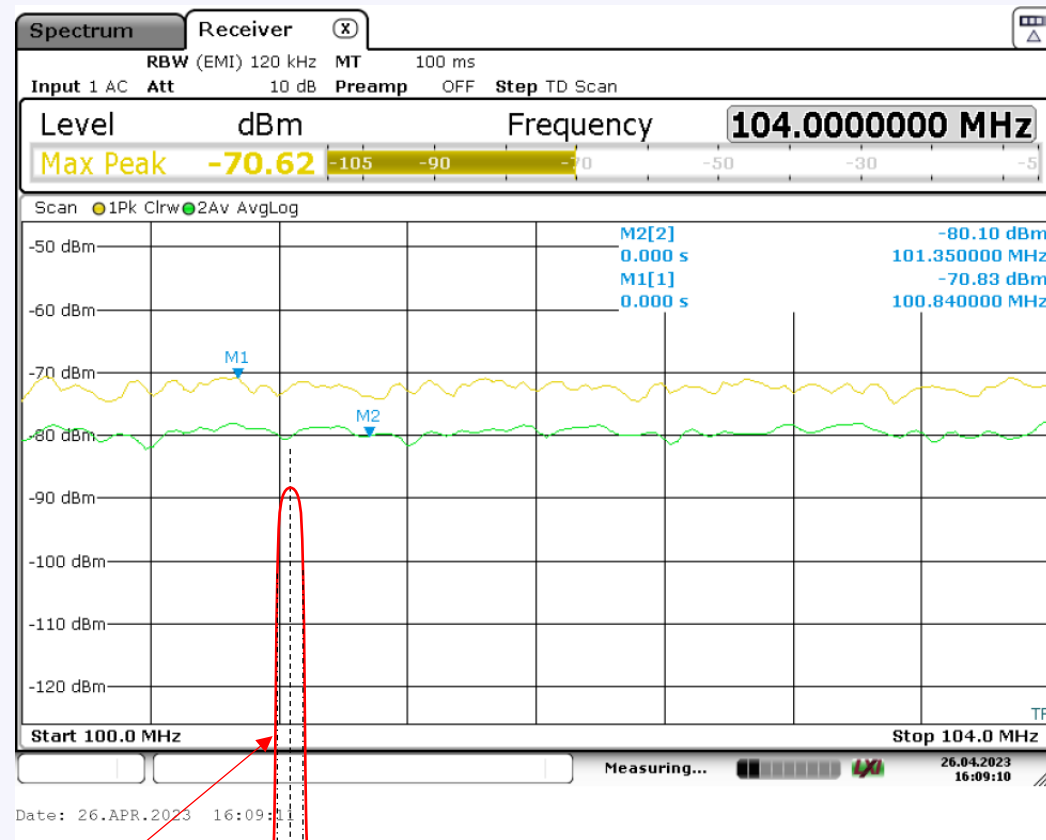
エンドユーザーへの影響

キャリア周波数 = 500kHz
 $\Delta f = 20\% \rightarrow 100\text{kHz}$
FM $\rightarrow 120\text{kHz}$
100MHz~104MHz

1st



i.e. FMラジオチューナー



減衰 ~ -20dB!

インダクタンスと出力コンデンサに応じて、FSSは出力に高い電圧リップルを追加してしまいう可能性があります。

MPQ4323: $f_{SW} = 470\text{kHz}$ 、 $V_{IN} = 13\text{V}$ 、 $V_{OUT} = 5\text{V}$ 、 $I_{OUT} = 1\text{A}$



$L = 2.2\mu\text{H}$ 、 $C_{OUT} = 2 \times 22\mu\text{F} 1210$

$L = 2.2\mu\text{H}$ 、 $C_{OUT} = 4 \times 22\mu\text{F} 1210$

$L = 470\text{nH}$ 、 $C_{OUT} = 4 \times 22\mu\text{F} 1210$

$V_{PP} = 75\text{mV}$



$V_{PP} = 65\text{mV}$



$V_{PP} = 40\text{mV}$

FSSの実装方法

1 → FSSを備えたSMPSを購入する

e.g.

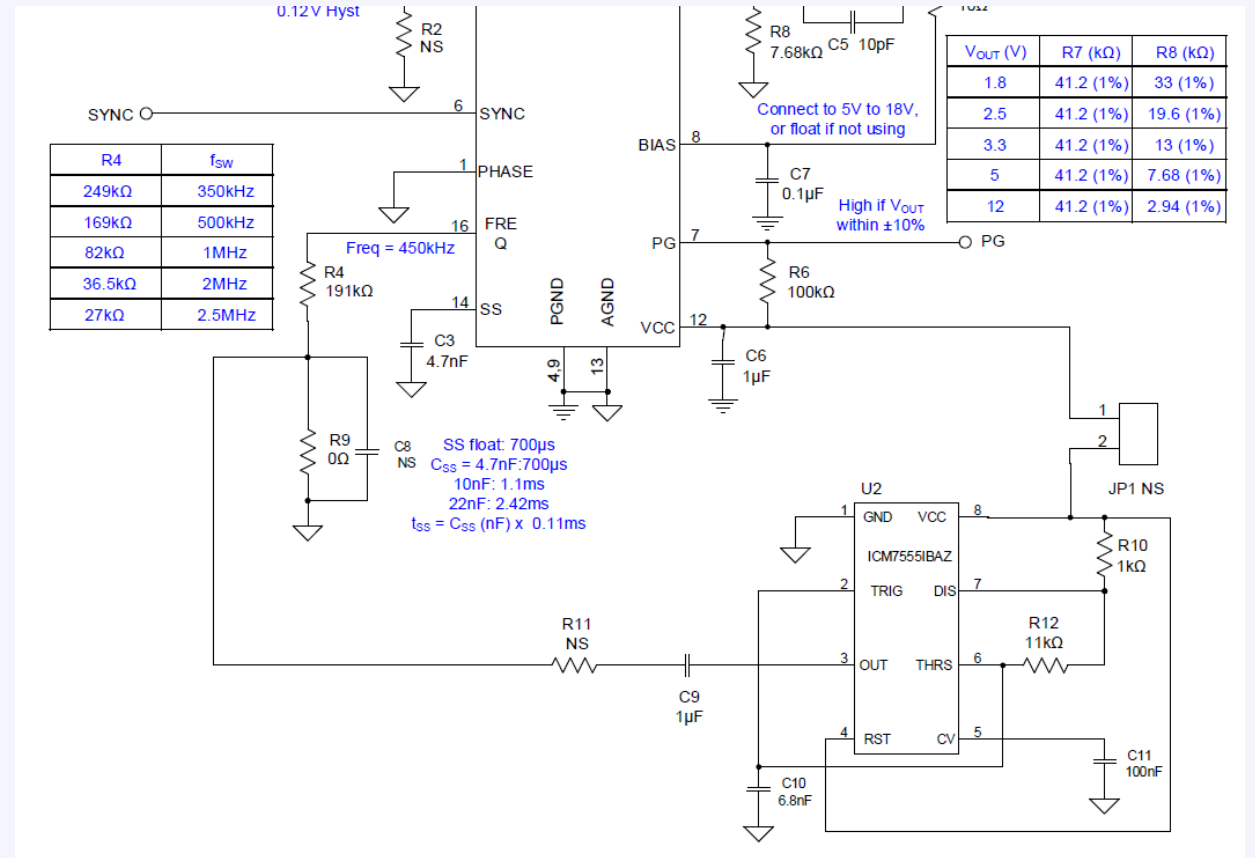
MPQ4334

または

MPQ4340A、MPQ4371/2 など

EMI的に問題となるのは、多くの場合、設計がほぼ完了している段階であり、SMPSの変更は多くの技術的パラメータと開発スケジュールに影響を与えます。

2 → 周波数ピン付きのSMPSの場合、そのピンに外部FSSを追加できる

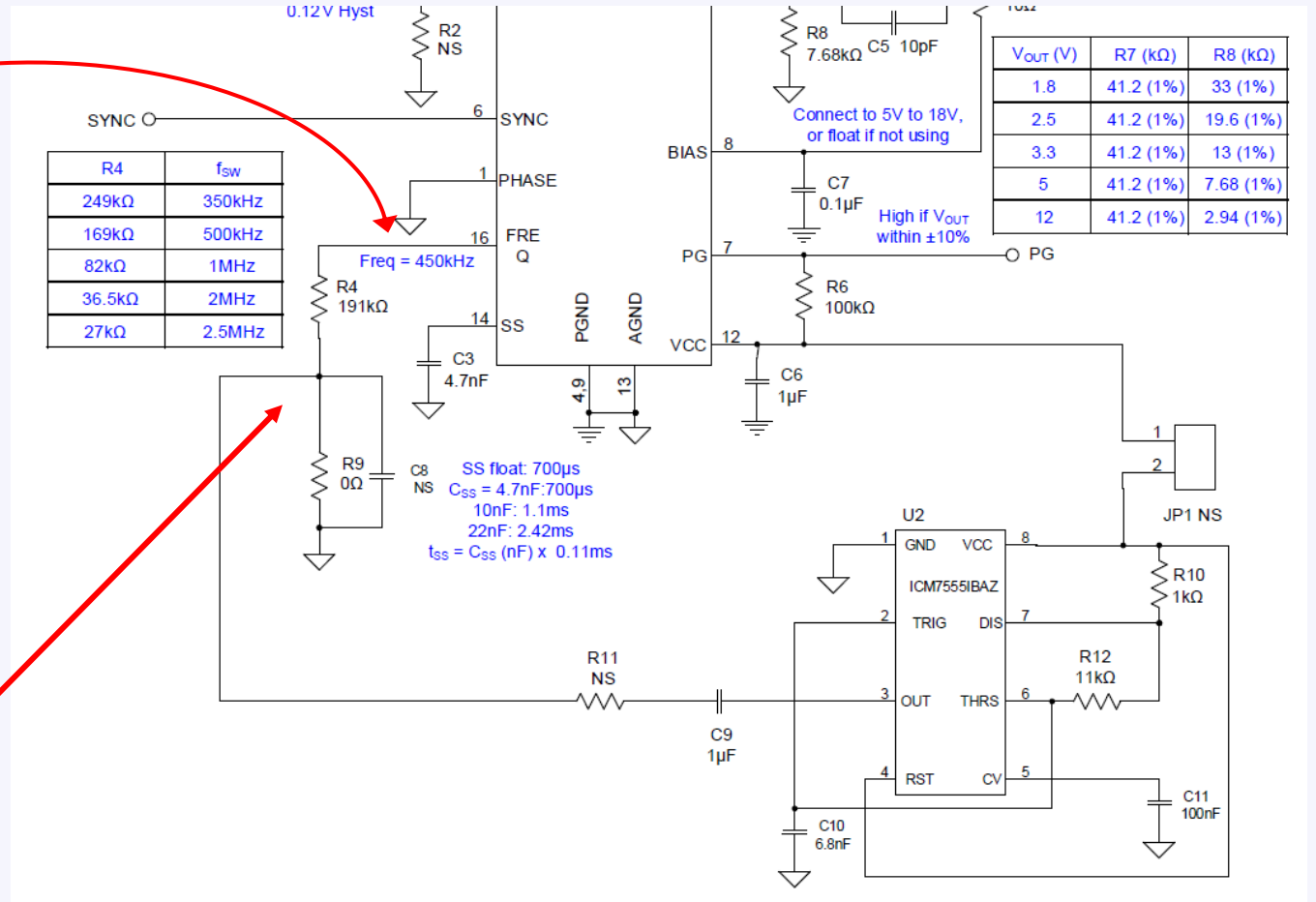


2 → 周波数ピンを備えたSMPSをお持ちの場合は、そのピンに外部FSSを追加することができます。
 → e.g. MPQ4430

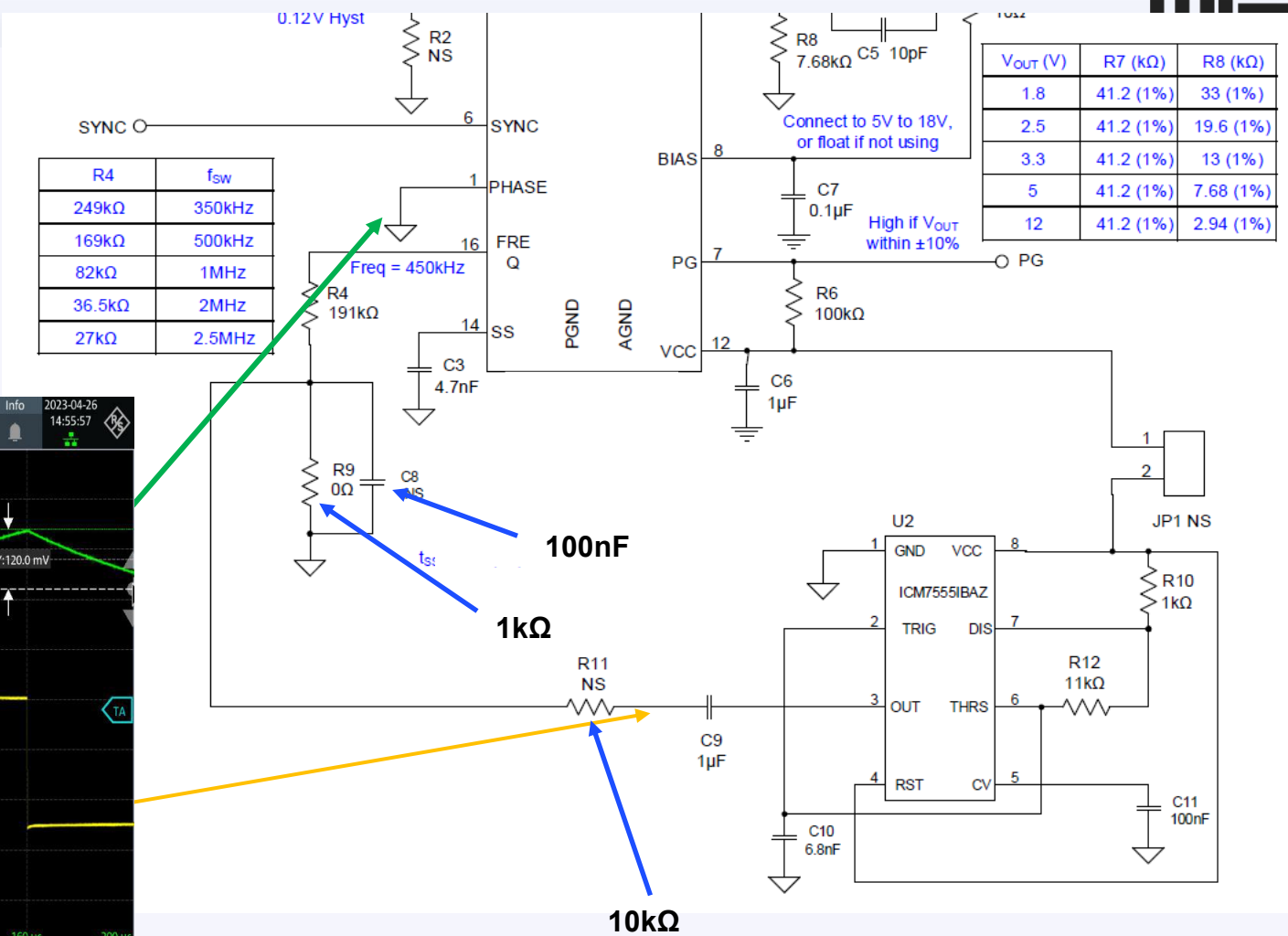
ここで、周波数ピン (FREQ) の値:
 480mV @ 500kHz

- 変調度は20%にしたい
- これはFREQの電圧を約120mV変更する必要があることを意味します

→ ±60mV



FSSの実装方法



- 周波数スペクトラム拡散 (**FSS**) には、設計の**EMI**放射を「未使用」領域に効果的に隠すことができる多くの利点があります。
- **FSS**は設計の**EMI**放射を完全に低減することはできません。
 - **FSS**は、エネルギーを単一の周波数帯域から隣接する帯域に移動させるだけです。
- 特定の周波数領域で**FSS**を使用する場合は注意し、他の周波数帯域についても注意してください。
- 外部部品の値 (例えば、パワーインダクタや出力コンデンサ) に応じて、**FSS**は出力電圧に電圧リップルを追加する可能性があります。