

無線通信機における非線形補償のための ディープラーニング適用

三菱電機株式会社
情報技術総合研究所
マイクロ波技術部 マイクロ波送受信機グループ
山下 青

1. 自己紹介、会社紹介
2. 本発表の背景
3. 非線形補償技術
4. 非線形補償技術へのディープラーニングの適用例

1. 自己紹介、会社紹介
2. 本発表の背景
3. 非線形補償技術
4. 非線形補償技術へのディープラーニングの適用例

1. 自己紹介

■ 名前
山下 青

■ 所属
三菱電機株式会社
情報技術総合研究所
マイクロ波技術部 マイクロ波送受信機グループ

■ 現在の職務内容
無線送受信機の性能向上に向けたサブシステム開発
特に、非線形補償に関する研究開発

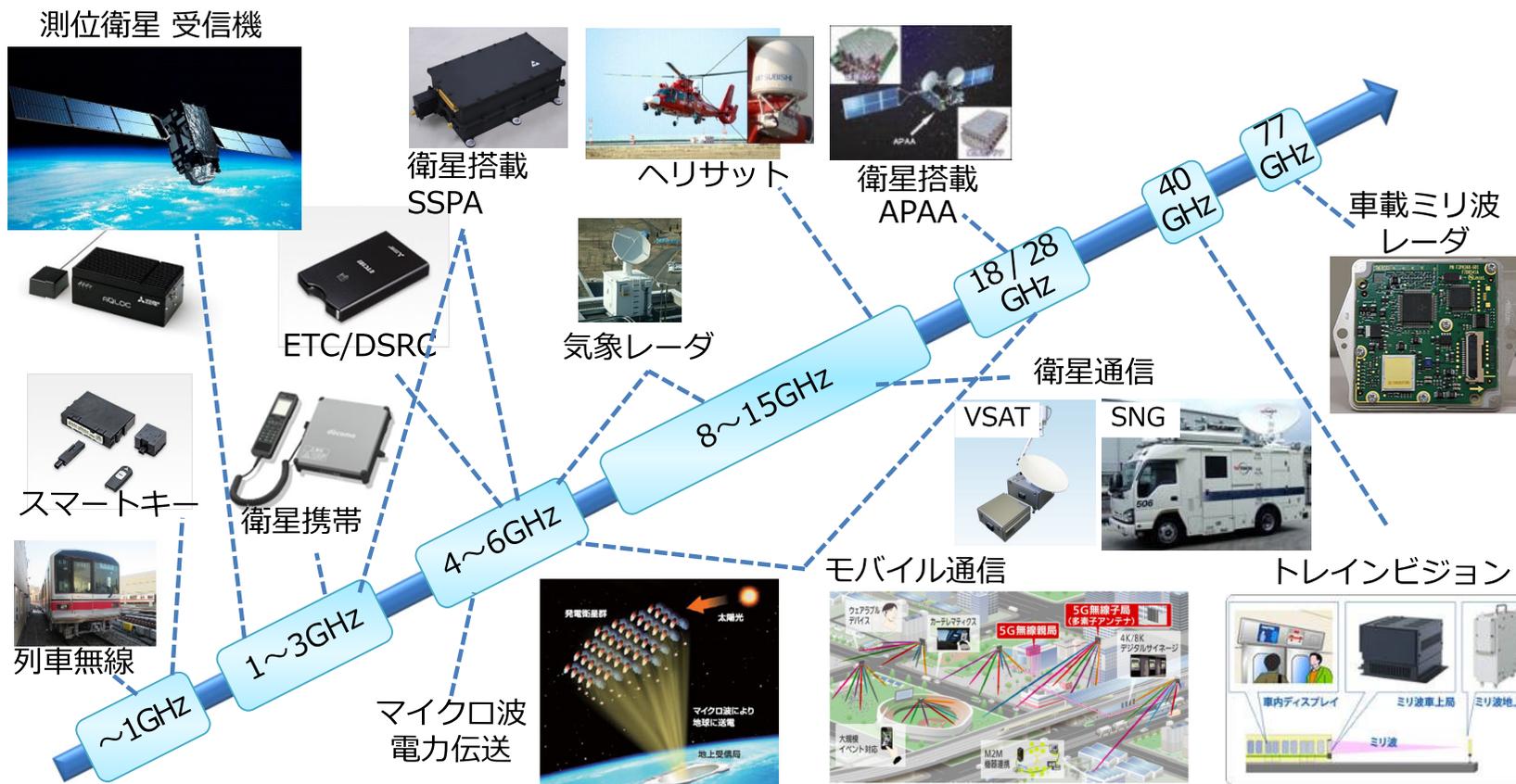


情報技術総合研究所*

*<https://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/index.html#laboratory>

1. マイクロ波技術を適用した三菱電機の製品群

マイクロ波技術は、通信や自動運転など、様々な製品に適用



SSPA : Solid State Power Amplifier, APAA : Active Phased Array Antenna, VSAT : Very Small Aperture Terminal, SNG : Satellite News Gathering, ETC : Electronic Toll Collection System, DSRC : Dedicated Short Range Communication

<https://www.mitsubishielectric.co.jp/products/>

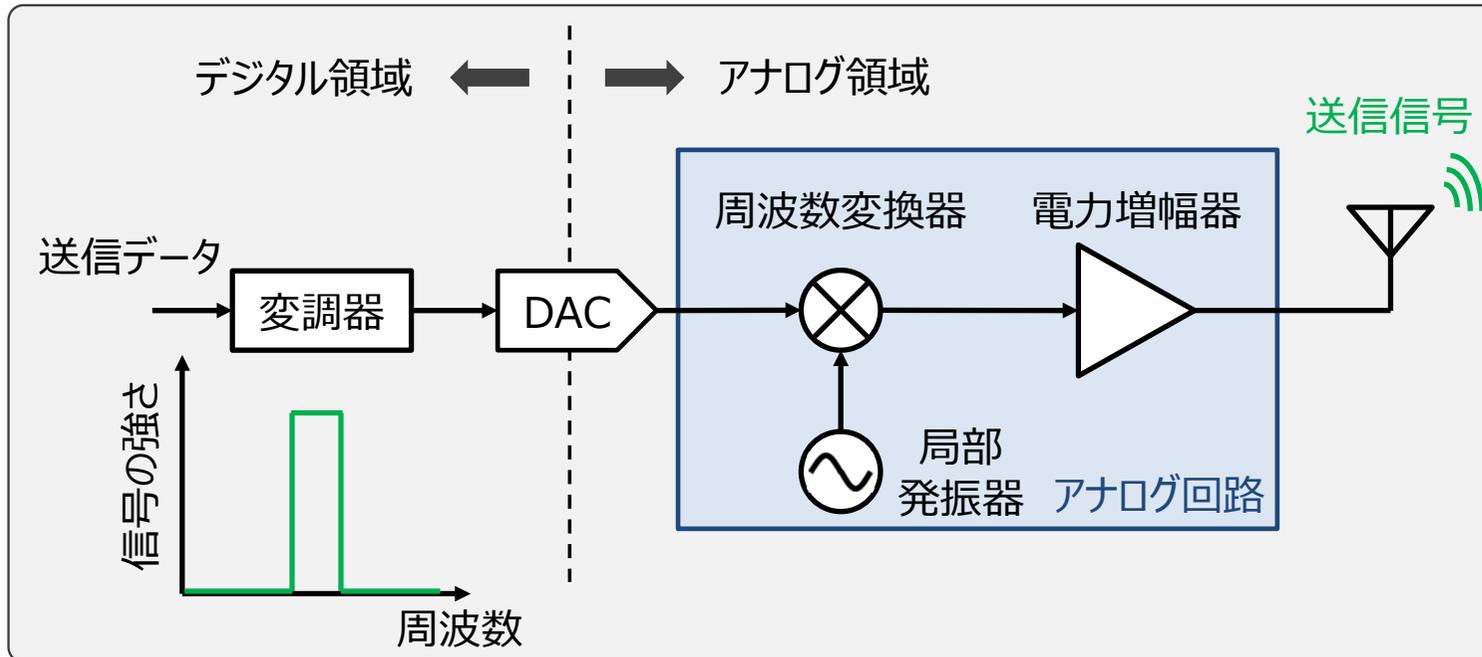
1. 自己紹介、会社紹介
2. 本発表の背景
3. 非線形補償技術
4. 非線形補償技術へのディープラーニングの適用例

2. 無線通信機とその課題

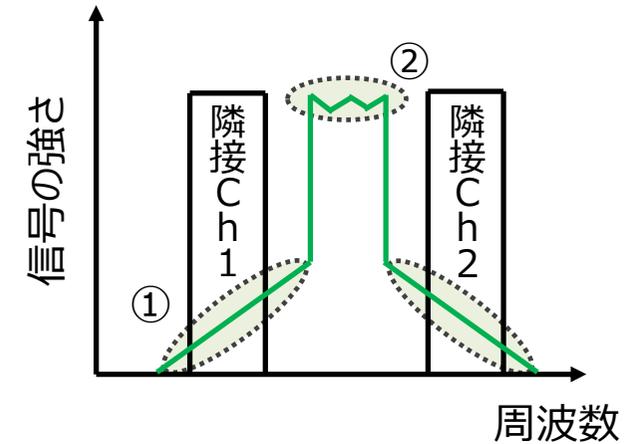
■ 無線通信機では、アナログ回路の特性によって信号品質が劣化

信号品質を劣化させるアナログ回路の主な特性

- 非線形性
- 周波数特性



無線通信機の概略構成

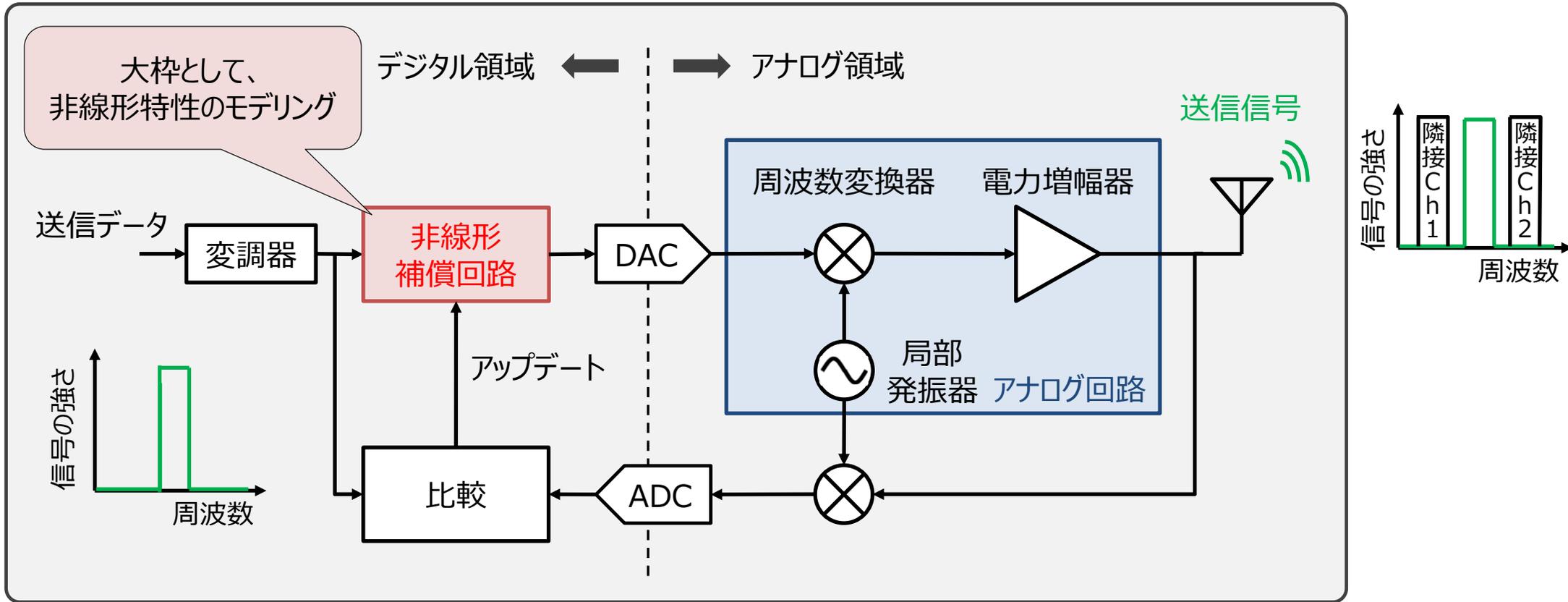


送信信号のスペクトラム

- ① 不要電波の放射
⇒隣接チャネルの通信を妨害
- ② 変調精度の低下
⇒通信エラーが発生

2. 無線通信機の課題への対策

- アナログ回路の特性を補償する“非線形補償技術”により、信号品質を改善

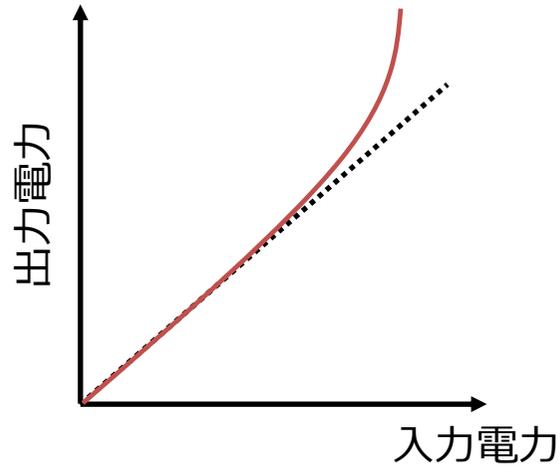
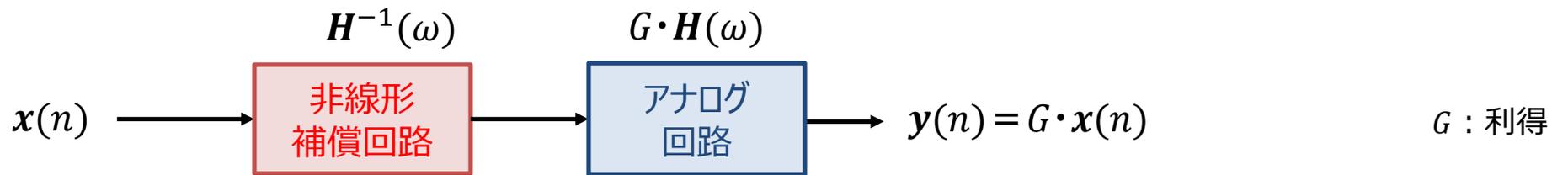


非線形補償技術を適用した無線通信機の概略構成

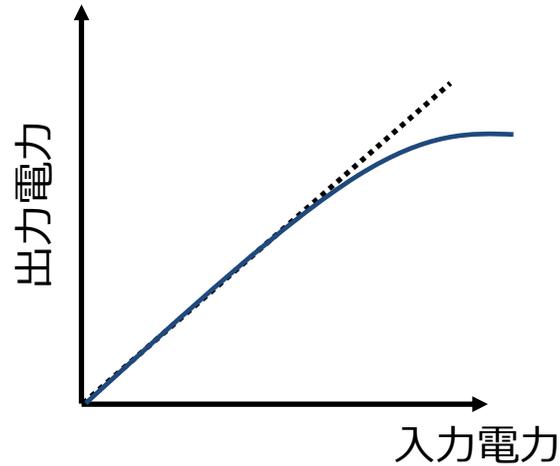
1. 自己紹介、会社紹介
2. 本発表の背景
3. 非線形補償技術
4. 非線形補償技術へのディープラーニングの適用例

3. 非線形補償技術とは

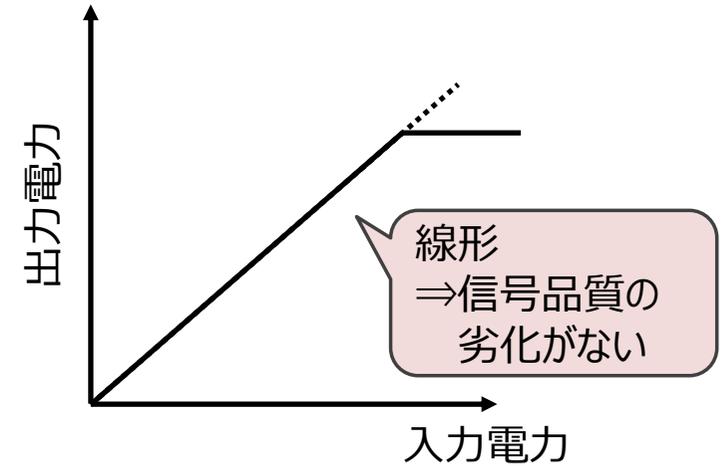
- 予めアナログ回路の非線形特性とは逆の特性を信号に与えることで、アナログ回路の非線形性を補償し、信号品質を改善



非線形補償回路の非線形特性
 $H^{-1}(\omega)$



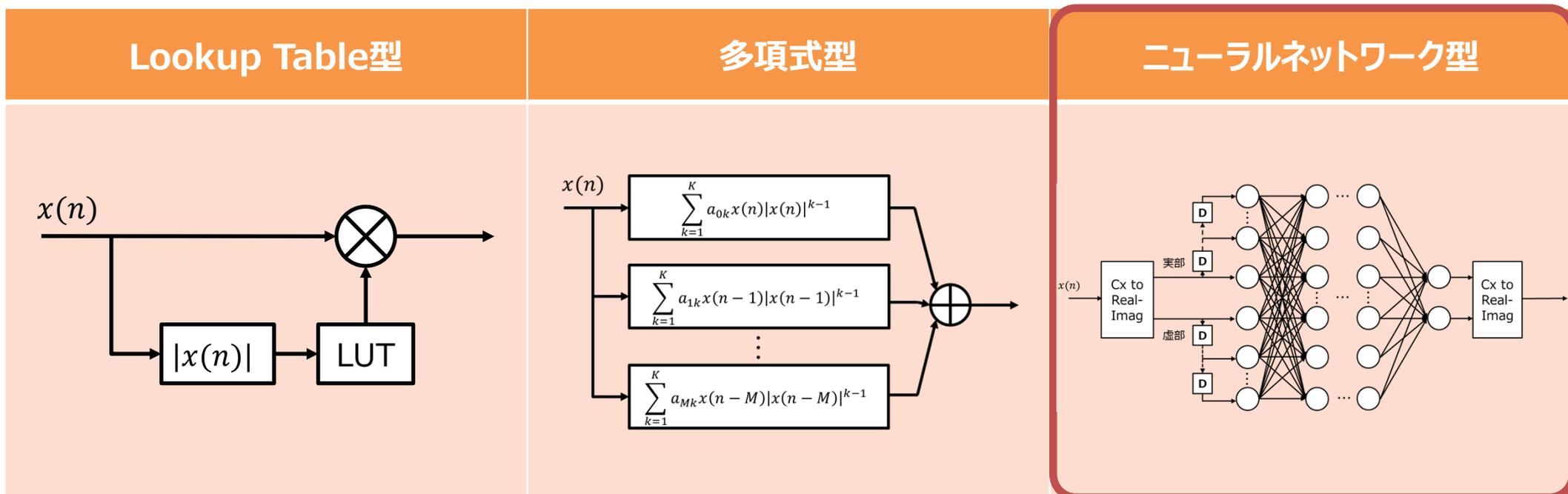
アナログ回路の非線形特性
 $H(\omega)$



非線形補償回路 + アナログ回路の特性

3. 非線形補償回路の種類

- 様々な種類の非線形補償回路が検討されている



最近では、ニューラルネットワーク型非線形補償回路が注目されている

- 通信の高速化に伴う信号の広帯域化やアナログ回路の複雑化から、Lookup Table型や多項式型では補償が困難なアナログ回路の特性が現れており、それらに対応できることが期待されている。

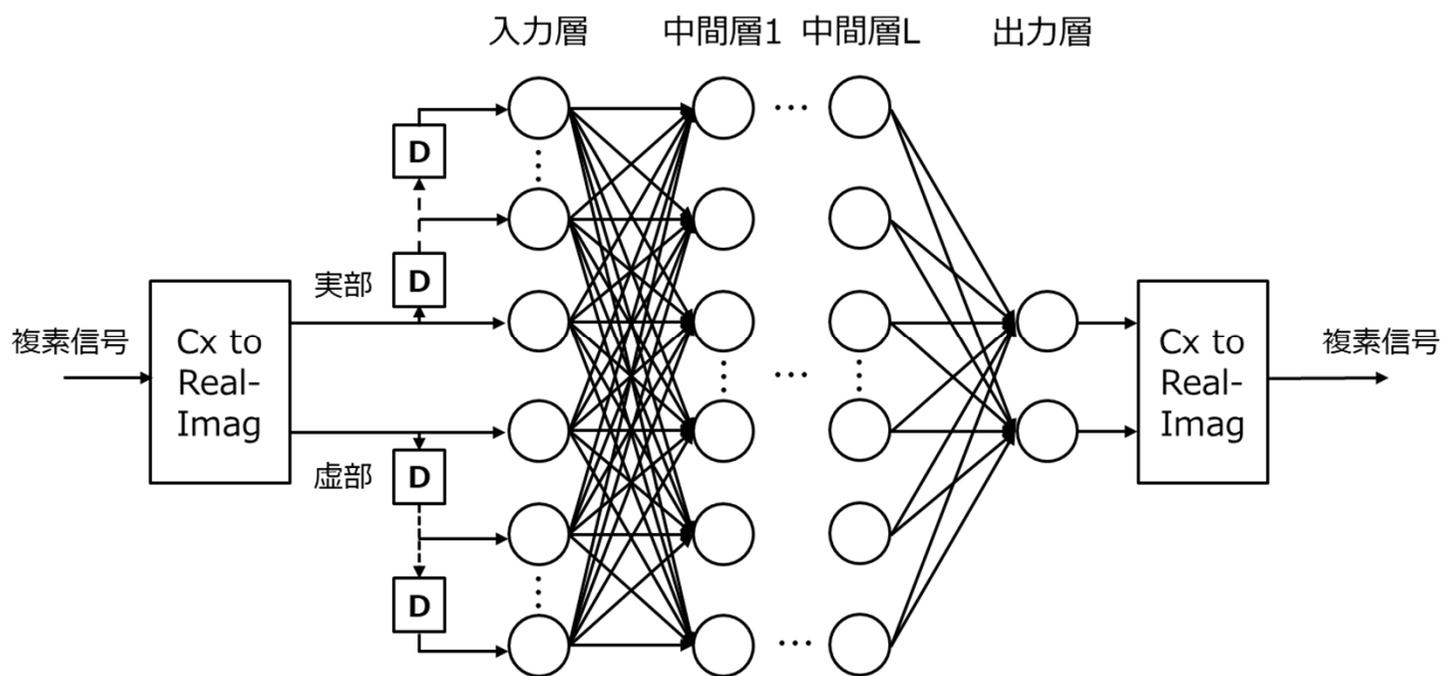
1. 自己紹介、会社紹介
2. 本発表の背景
3. 非線形補償技術
4. 非線形補償技術へのディープラーニングの適用例

4. ニューラルネットワーク型非線形補償回路

■ 非線形補償に適するニューラルネットワークのパラメータは試行錯誤で決定

ニューラルネットワークのパラメータ

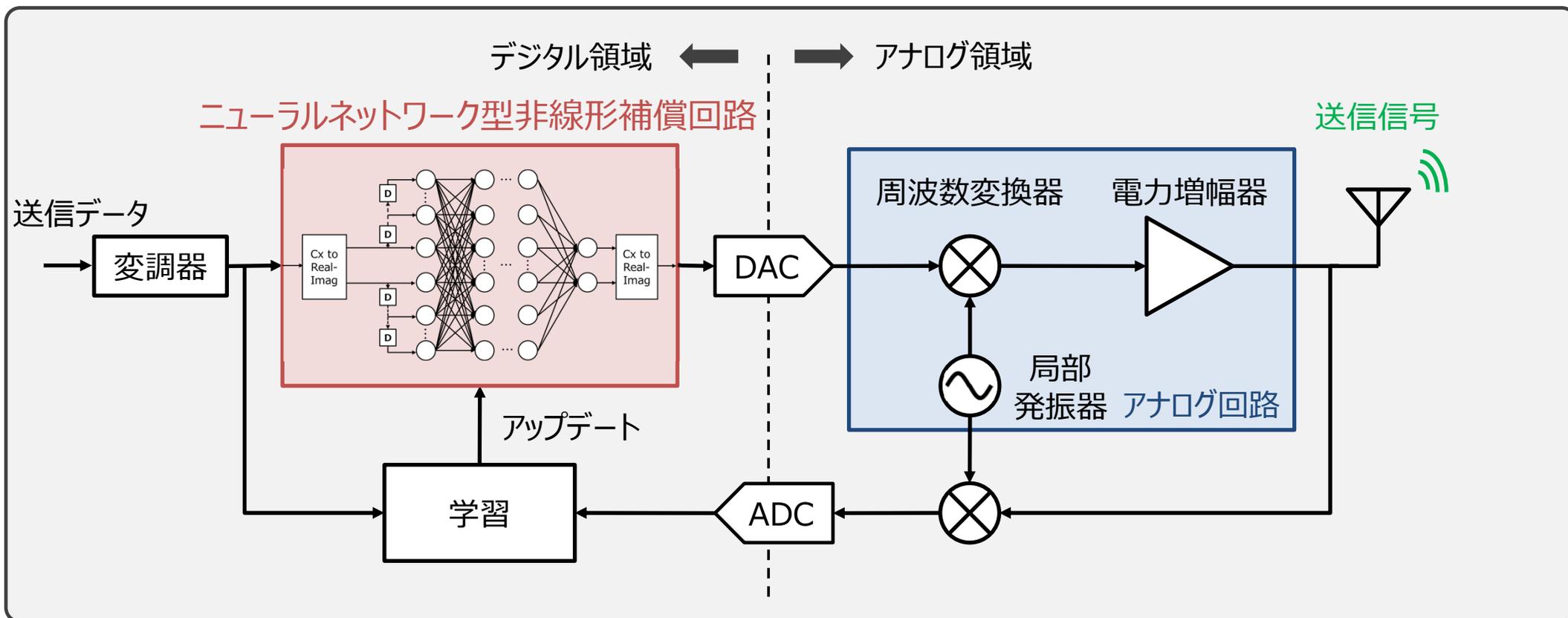
- 中間層の数
- 活性化関数
- 学習アルゴリズム
- Etc.



非線形補償における代表的なニューラルネットワークの構成

非線形補償に適するニューラルネットワークのパラメータを決めるためのシミュレータを、MATLABで構築

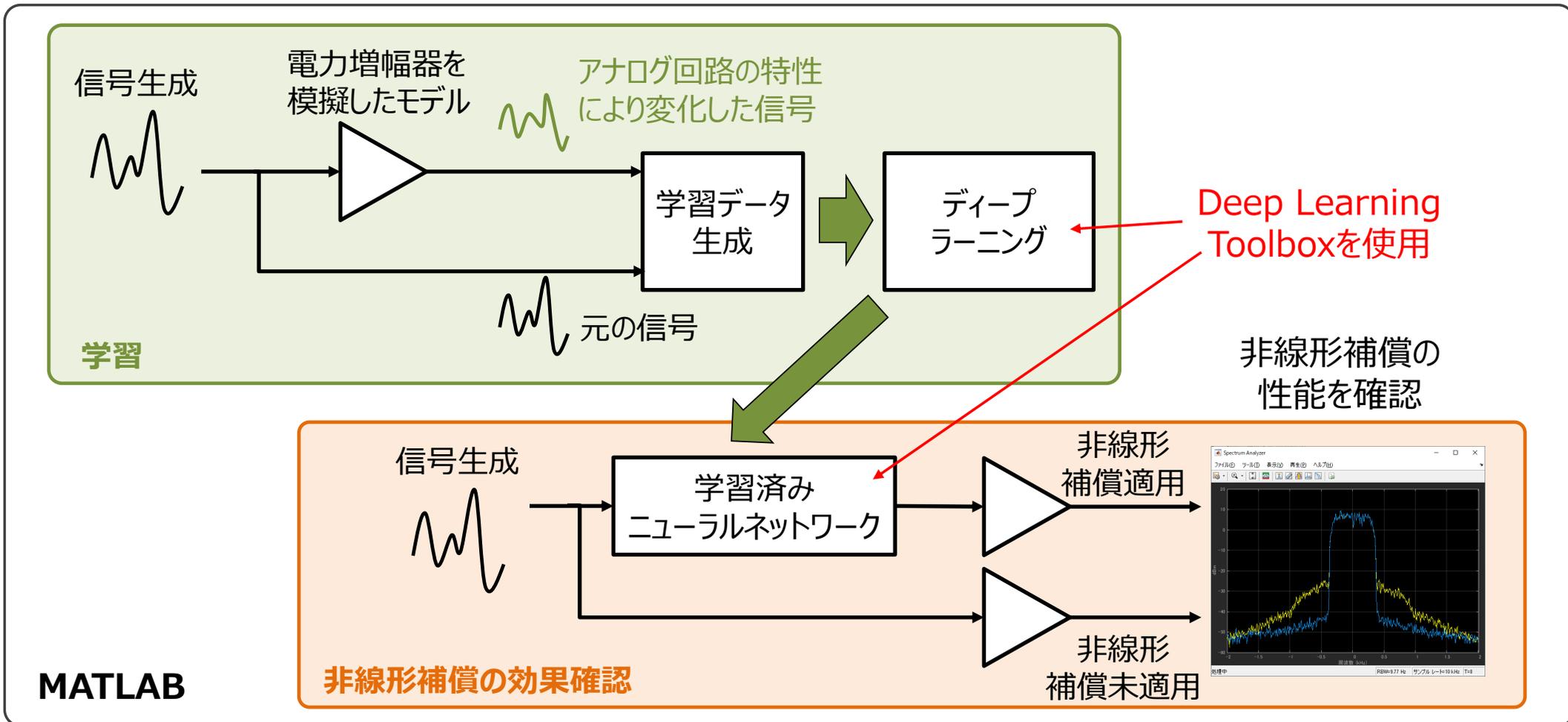
4. ニューラルネットワーク型非線形補償回路を搭載した無線通信機



ニューラルネットワーク型非線形補償回路を搭載した無線通信機の概略構成

4. ニューラルネットワーク型非線形補償回路のシミュレータ

■ Deep Learning Toolboxを使用してシミュレータを構築



4. シミュレータの動作：学習

■ ニューラルネットワークの層や学習の設定後、学習を実行

```

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35

```

• 信号生成
• 学習データ生成 など

%% 層の設定
layers = [
 imageInputLayer([1 1 Nin])
 fullyConnectedLayer(Nhid)
 reluLayer
 fullyConnectedLayer(Nout, 'WeightsInitializer')
 regressionLayer
];

%% 学習オプションの設定
options = trainingOptions('adam', ...
 'InitialLearnRate', 1e-3, ...
 'L2Regularization', 0, ...
 'GradientDecayFactor', 0.3, ...
 'SquaredGradientDecayFactor', 0.999, ...
 'Epsilon', 1e-8, ...
 'MaxEpochs', 200, ...
 'MiniBatchSize', 80, ...
 'ValidationData', {xValid, yValid}, ...
 'ValidationFrequency', 100, ...
 'Shuffle', 'never', ...
 'Plots', 'training-progress');

%% ネットワークの学習
[net, info] = trainNetwork(xTrain, yTrain, layers, options);

プログラムを
実行

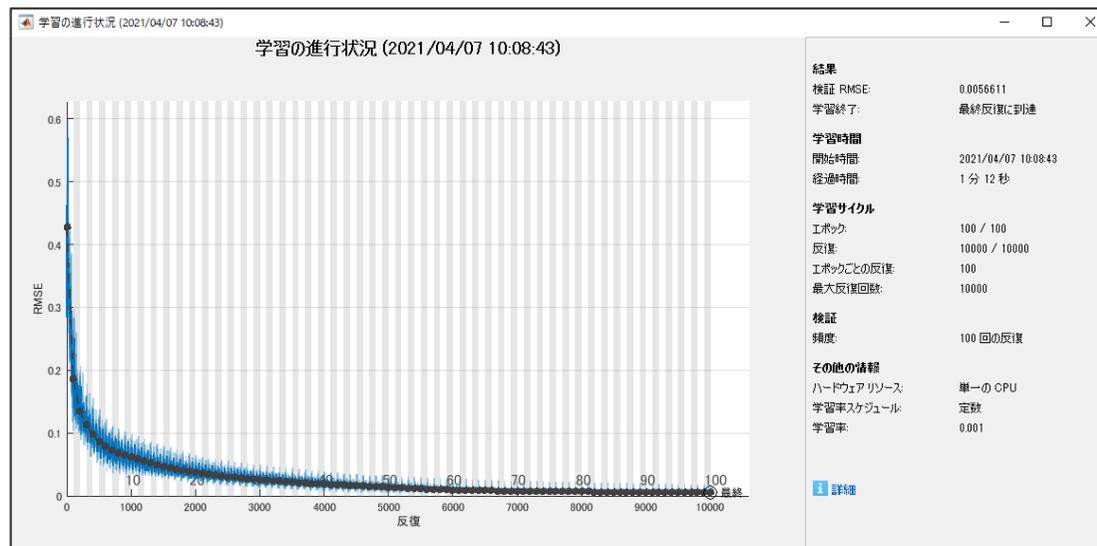


中間層数、
活性化関数
などの設定

学習アルゴリズム
などの設定

学習実行

学習の経過が表示される



学習完了

ワークスペース	
名前 ▲	値
net	1x1 SeriesNetwork

ワークスペースに学習済みのニューラルネットワークが保存される

4. シミュレータの動作：非線形補償の効果確認

- 学習済みニューラルネットワークを読み込み、非線形補償の効果を確認

```

MATLAB R2020a
ホーム プロット アプリ エディター パブリッシュ
新規作成 開く 保存 比較 移動 コメント 挿入 印刷 検索 インデント ナビゲート 編集
ファイル
エディター - C:\yamashita\test\Untitled2.m
Untitled2.m
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29

```

信号生成

```

%% 学習済みニューラルネットワークを読み込み
load net
%% 学習済みニューラルネットワークによる非線形補償
pred = predict(net, x);
predSig = pred(:,1) + 1j*pred(:,2);

```

電力増幅器を模擬したモデルに信号を入力

```

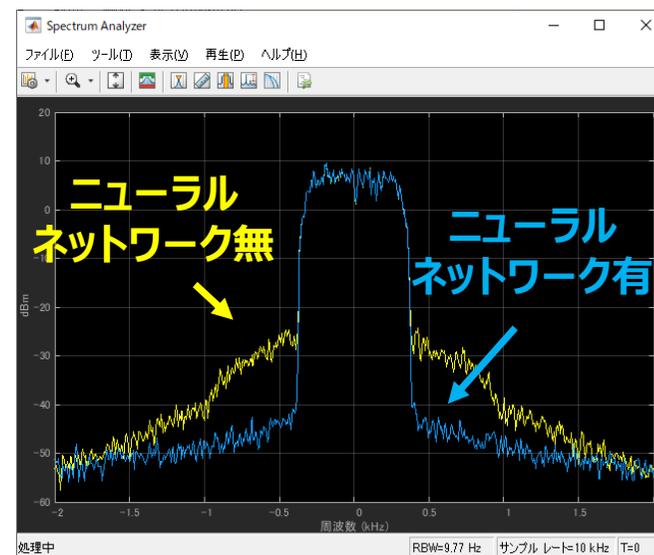
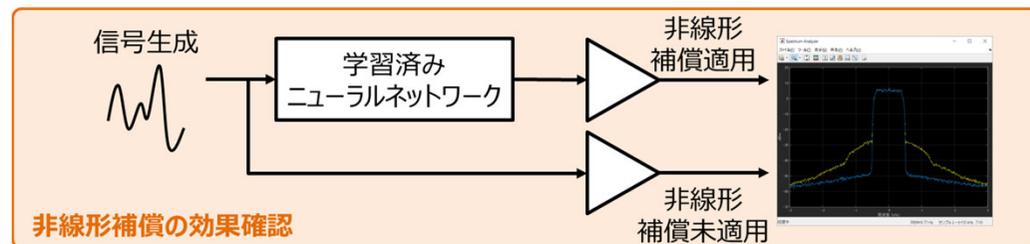
scope = dsp.SpectrumAnalyzer;
scope([x, predSig]);

```

学習済みニューラルネットワークの読み込み
→生成した信号を学習済みニューラルネットワークで処理
(非線形補償)

非線形補償の有無による
スペクトラムの違いを確認

プログラムを
実行

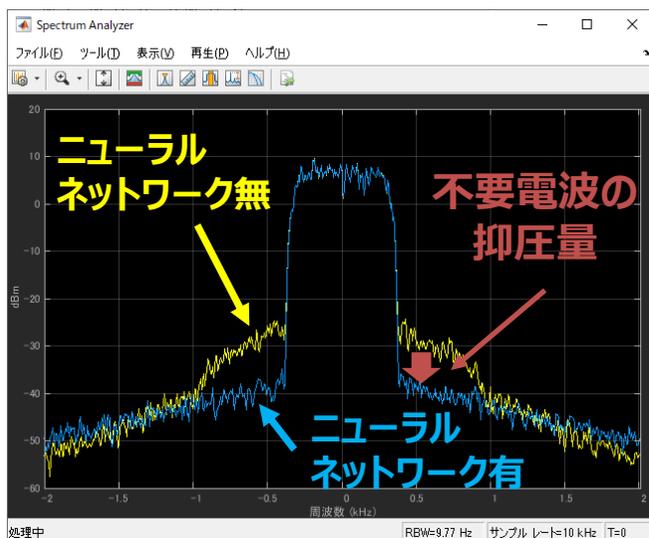


スペクトラムの一例

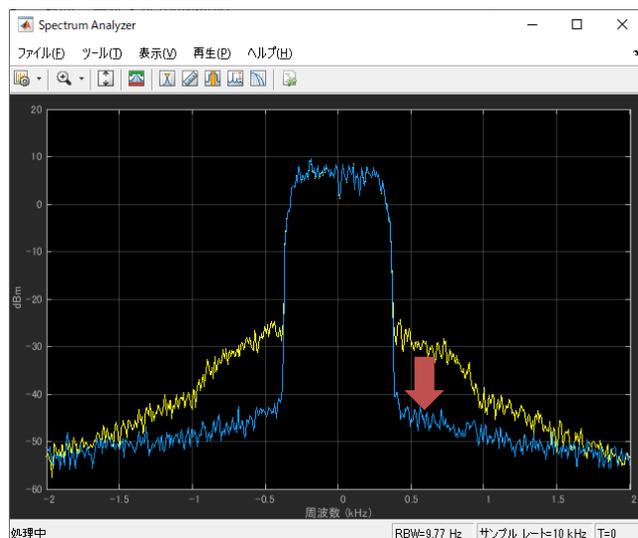
4. シミュレーションの一例

■ 中間層の数を変えた場合のシミュレーションを実施

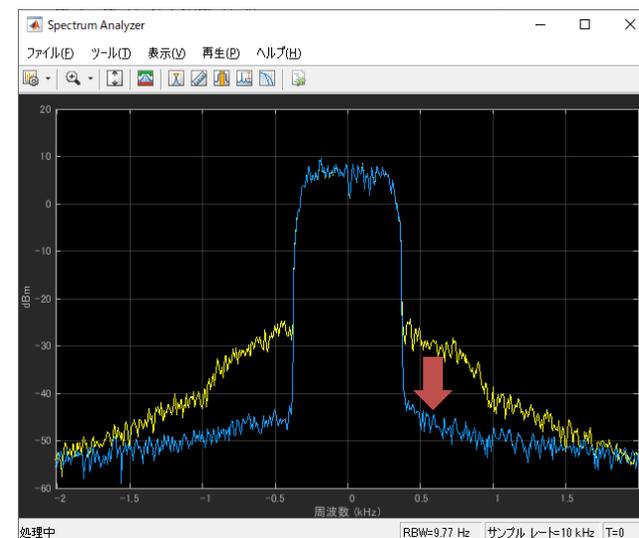
中間層の数によって非線形補償の効果が変わる（不要電波の抑圧量が変わる）。
 →同様のシミュレーションをニューラルネットワークの各パラメータについて実施し、適切なパラメータを探す。



中間層の数 1



中間層の数 2
 中間層の数1と比べて4.6倍改善



中間層の数 3
 中間層の数1と比べて3.9倍改善

4. 実験の一例

■ ニューラルネットワーク型非線形補償回路の実験系を構築して実験も実施

学習

学習データ生成

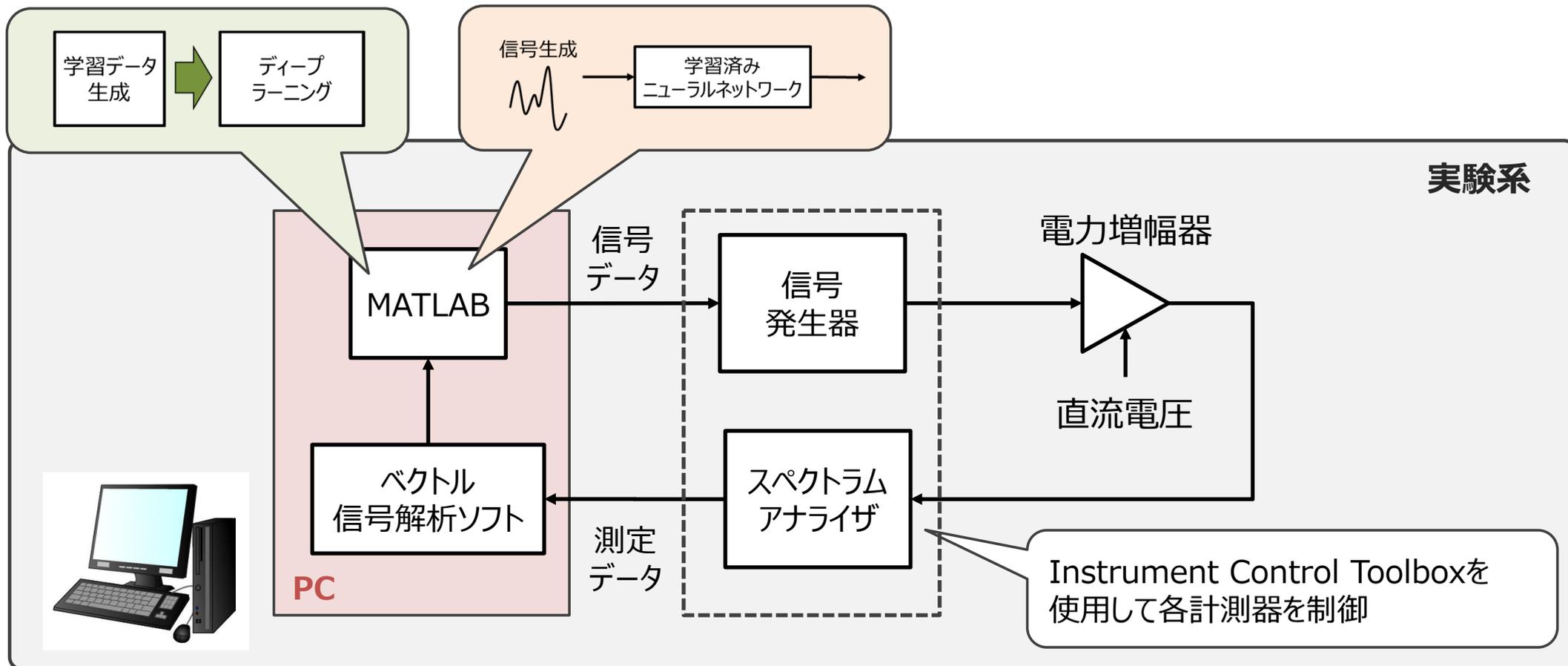
ディープラーニング

非線形補償の効果確認

信号生成



学習済みニューラルネットワーク



Deep Learning Toolboxに関する所感

- Deep Learning Toolboxは、専門家でなくともニューラルネットワークの層構成を直感的に記述することができ、扱いやすい。（マイクロ波の分野では、まだまだニューラルネットワークの馴染みが薄いと感じる）

```

9
10 %% 層の設定
11 layers = [
12     imageInputLayer([1 1 Nin])
13     fullyConnectedLayer(Nhid)
14     reluLayer
15     fullyConnectedLayer(Nout, 'WeightsInitializer')
16     regressionLayer
17 ];
18
19 %% 学習オプションの設定
20 options = trainingOptions('adam', ...
21     'InitialLearnRate', 1e-3, ...
22     'L2Regularization', 0, ...
23     'GradientDecayFactor', 0.9, ...
24     'SquaredGradientDecayFactor', 0.999, ...
25     'Epsilon', 1e-8, ...
26     'MaxEpochs', 200, ...
27     'MiniBatchSize', 60, ...
28     'ValidationData', {xValid, yValid}, ...
29     'ValidationFrequency', 100, ...
30     'Shuffle', 'never', ...
31     'Plots', 'training-progress');
32
33 %% ネットワークの学習
34 [net, info] = trainNetwork(xTrain, yTrain, layers, options);
35

```

}

入力層

↓

中間層

↓

活性化関数

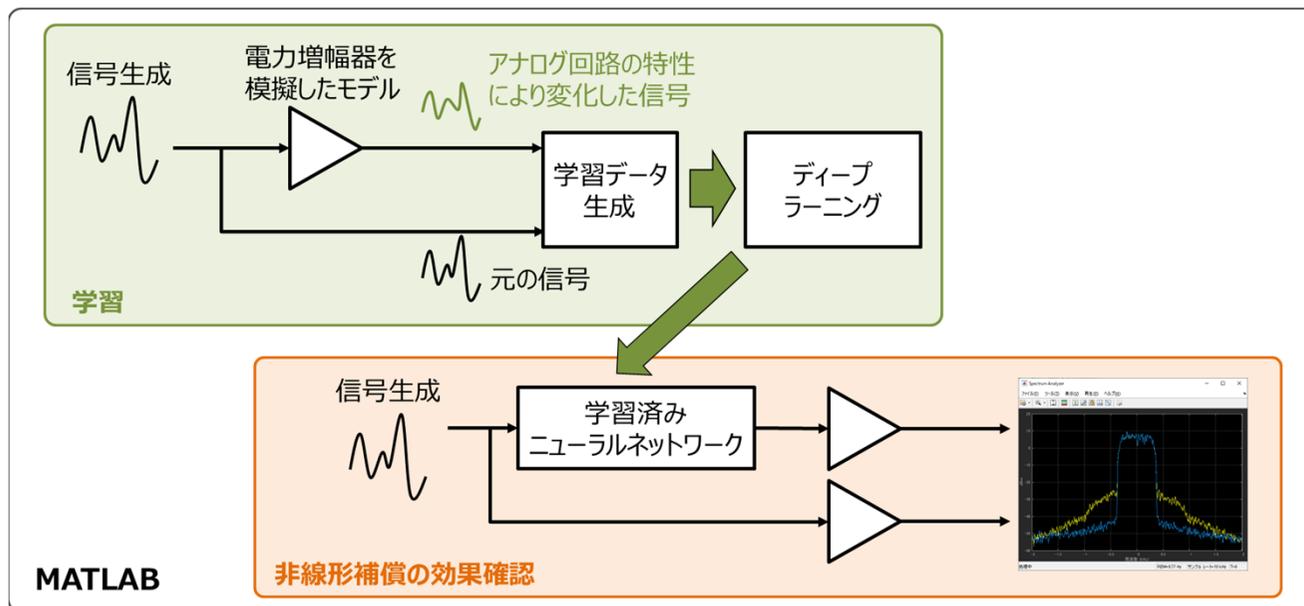
↓

出力層

- Deep Learning Toolboxにより、これまでの資産（Communications ToolboxやDSP System Toolboxなどを使用したプログラム）と併用できるシミュレータを、MATLABで統合して構築できるのは便利。

使用ツールの一覧

- MATLAB (シミュレータの構成など)
- Deep Learning Toolbox (ニューラルネットワーク型非線形補償回路)
- DSP System Toolbox (スペクトラムの確認)
- Communications Toolbox (電力増幅器を模擬したモデルなど)
- Signal Processing Toolbox (信号生成など)
- Instrument Control Toolbox (計測器の制御)



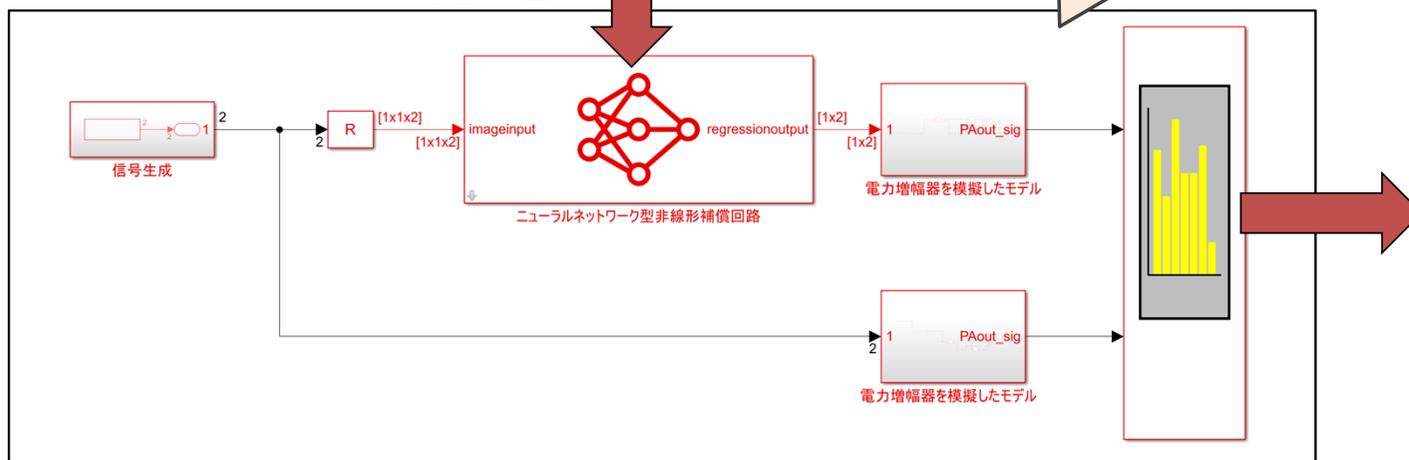
- Simulinkによるシミュレーション環境の構築を検討（MATLAB R2020bより、ニューラルネットワークのSimulinkブロックが実装）

学習済み
ニューラルネットワーク

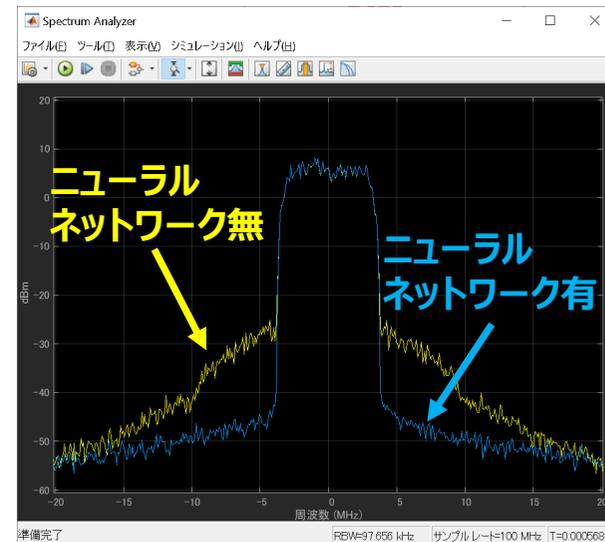
ワークスペース	
名前	値
net	1x1 SeriesNetwork

読み込み

MATLABで構築したシミュレータにおける
非線形補償の効果確認の部分



簡易的に構築したSimulinkモデル



スペクトラムアナライザ

- SimulinkやHDL Coderを活用し、ニューラルネットワーク型非線形補償回路のFPGA実装を検討する予定

