電力増幅器歪み補償技術とフェーズドアレー無線装置の基礎 Fundamentals of Power Amplifier Distortion Compensation Technology and Phased Array Devices

加保 貴奈

Takana KAHO

湘南工科大学 工学部 電気電子工学科

概要

本基礎講座では、無線信号を増幅する電力増幅器の非線形特性を補償するための歪補償技術について簡 単なレクチャを行います。増幅器の非線形歪の特徴と種類、歪補償技術の種類、非線形モデル、増幅器 メモリ効果などの解説の他、Beyond 5G 基地局向けのデジタルプリディストーション技術として GaN ト ランジスタを使ったドハティ増幅器の歪補償の事例を紹介します。また、近年著者らが取組んでいる 6G 基地局に向けた階段状アレーアンテナとバトラーマトリクス回路を用いた同時マルチビーム用フェー ズドアレーアンテナ装置の研究や、アレー装置への電力増幅器の実装技術や増幅器で発生する熱の熱流 体シミュレーションなども紹介します。



Abstract

This basic course will provide a brief lecture on distortion compensation technology to compensate for the nonlinear characteristics of power amplifiers that amplify wireless signals. In addition to explaining the characteristics and types of nonlinear distortion in amplifiers, types of distortion compensation technology, nonlinear models, and amplifier memory effects, I will also introduce an example of distortion compensation for Doherty amplifiers using GaN transistors as a digital predistortion technology for Beyond 5G base stations. In addition, I will introduce the research on simultaneous multi-beam phased array antenna devices using staircase array antennas and Butler matrix circuits for 6G base stations that the authors have been working on in recent years, as well as the implementation technology of power amplifiers in array devices and thermal fluid simulations of heat generated by amplifiers.

電力増幅器歪み補償技術と フェーズドアレー無線装置の基礎 Fundamentals of Power Amplifier Distortion Compensation Technology and Phased Array Devices

加保貴奈 Takana KAHO

湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 kaho@elec.shonan-it.ac.jp



- 1. 電力増幅器の基礎
 - ・ 電力増幅器の非線形歪み
 - ・ 電力増幅器の歪補償技術
 - ・ 基地局増幅器のデジタル歪み補償(DPD)の紹介
 - ・ EVMのシンボル評価、メモリ効果の影響
- 2. フェーズドアレーアンテナ装置の基礎
 - ・ 位相制御によるビーム制御
 - ・ バトラーマトリクスと階段状アレーアンテナの提案
 - フェーズドアレーアンテナ装置における増幅器の熱設計

無線機の基本構成



3

自由空間伝搬による無線信号の損失

距離d離れたところの電力密度S

$$S = \frac{G_t P_t}{4\pi d^2}$$

$$G_t$$
:送信アンテナ利得

P_t:送信電力



球の表面積 4πd²

例えば静止衛星 d=36000kmでは6.1×10⁻¹⁷となる。
 -162dBの減衰となるため
 アンテナ利得と送信電力を増やす必要がある

等価等方輻射電力(EIRP)

等価等方放射電力(EIRP)は送信機の電力の指標で 送信電力とアンテナ利得をかけたもの。

$$EIRP = P_t \times G_t \quad [W]$$

送信機が、メインビーム方向への放射と同じレベルで全方向に放射 (等方性アンテナ)したと仮定した場合に必要な総電力である。

参考:dB(デシベル)について

・デシベル(dB)は、電力比(電圧比、電流比)の対数表現

Pi Vi

 G
 Po
 電力比
 $G(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{Po}{Pi}$ 10倍 → 10dB
 2倍 → 3dB

 Image: Po rest of the second state of the s

電圧比
(電流比) G(dB) = 10 · log₁₀
$$\frac{Vo^2}{R}$$
 = 10 · log₁₀ $\left(\frac{Vo}{Vi}\right)^2$ = 20 · log₁₀ $\frac{Vo}{Vi}$

・dBmは、1mWを基準とした電力値(絶対値)の対数表現

$$dBm = 10 \cdot \log_{10} \frac{P}{1mW} \qquad \begin{array}{c} 0 dBm \rightarrow 1mW \\ 10 dBm \rightarrow 10mW \\ 20 dBm \rightarrow 100mW \\ -10 dBm \rightarrow 0.1m\end{array}$$

電力増幅器の基本構成

トランジスタ、インピーダンス整合回路、電源回路等で構成される



抵抗、インダクタ、キャパシタのインピーダンス

インピーダンス:直流におけるオームの法則の電気抵抗(レジスタンス)の概念を複素数 に拡張し、交流に適用したものであり、単位としてはオーム(表記はΩ)が用いられる。



電力増幅器の入出力特性



電力増幅器によるスプリアスの発生



バンドパスフィルタで高調波はかなり抑圧できる

電力増幅器の課題:相互変調歪み



電力増幅器の相互変調歪みの補償方法

増幅器単体の低歪み化

- 整合回路、電源回路インピーダンスの工夫
- 多段増幅器において前段で最終段増幅器を補償など

歪み補償回路を用いる方法

- アナログプリディストーション
- ディジタルプリディストーション
- ・ フィードバック
- ・ フィードフォワード

プリディストーション型歪み補償回路



フィードバック型、フィードフォワード型歪補償



フィードバック

フィードフォワード

歪補償方法の種類と比較

	プリディストーション				
	アナログ	ディジタル	77-5799		
重量	小	中	中	大	
消費電力	小	大	小	*	
補償量	小	大	小	大	
安定性 信頼性	問題無し	問題無し	発振の可能性	問題無し	
飽和点近傍動作 NPR=18dB	適している	適している	適している	不適	
帯域の広さ	中程度	中程度	狭い	広い	

携帯電話基地局用増幅器:ドハティ増幅器



ポスト5G向け基地局用GaN増幅器

NEDOの委託事業である「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」で、三菱電機株式会社と学校法人 湘南工科大学は、世界で初めて、ポスト5G向け基地局用窒化ガリウム(GaN)増幅器に高周波入力信号を人工知 能(AI)でデジタル制御する機能を搭載し、業界水準のひずみ性能(ACPR)-45dBcと、動作周波数帯域幅 4000MHzを両立したGaN増幅器を開発し、動作実証に成功しました。



https://www.shonan-it.ac.jp/topics/20231127_01/

1入力GaNドハティ増幅器 測定系ブロック図







ベクトルトランシーバー



- ・ナショナルインスツルメンツ社(NI)のベクトルトランシー バPXIe-5841を中心とした測定評価系を構築。
- PXIe-5841は信号源VSGとアナライザVSAを一台にま とめた測定機器。
- 9kHz~6GHzまでの範囲で、1GHz帯域幅での信号生成と解析ができる。
- ・DPD補償も行うことができる
- ・2つのベクトルトランシーバをLO信号を共用して同期す ることができる

使用したDPDのモデルとパラメタ

・DPDのモデルにはGeneralized Memory Polynomial (GMP) を選択

$$y[n] = \sum_{q=0}^{Q_a} \sum_{k=0}^{K_a - 1} a_{qk} x[n - q] |x[n - q]|^k + \sum_{q=0}^{Q_b} \sum_{m=1}^{M_b} \sum_{k=1}^{K_b} b_{mqk} x[n - q] |x[n - q - m]|^k + \sum_{m=1}^{M_c} \sum_{q=m}^{Q_c} \sum_{k=1}^{K_c} c_{mqk} x[n - q] |x[n - q + m]|^k$$

where

- K_a Sync Order (Envelope $|x[n-q]|^k$ is in 'sync' with signal x[n-q])
- Q____ Sync Memory Depth

$$K_b$$
 Lag Order (Envelope $|x[n-q-m]|^k$ lags behind signal $x[n-q]$

- M_b Maximum Lag
- K_c Lead Order (Envelope $|x[n-q+m]|^k$ leads the signal x[n-q]
- Q_c Lead Memory Depth
- M_c Maximum Lead

DUT & Waveform	Measurements		HW Configuration				
DPD	DPD MPM/GM	Р	ModAcc (LTE)		,		
	DPD Model Genera		alized Memory 🗸				
Memory Polyr	nomial (Common	Parameter	s)				
	Order	7					
8	Memory Depth		7				
Generalized N	lemory Polynom	ial (Cross T	Terms) 3固定				
Lead	Memory Depth		3				
Lead	Memory Depth Lag Order		3				
Lag	Memory Depth Lag Order Memory Depth		3 3 3				
Lag	Memory Depth Lag Order Memory Depth Maximum Lead		3 3 3 3 3				
Lag	Memory Depth Lag Order Memory Depth Maximum Lead Maximum Lag		3 3 3 3 3 3				
Lag	Memory Depth Lag Order Memory Depth Maximum Lead Maximum Lag		3 3 3 3 3 3				

Generalized Memory Polynomial DPD設定

測定:DPDによるACPRの低減

中心周波数3.8GHzで、100MHz(OSR4),300MHz(OSR3),500MHz(OSR1,OSR2)でスペクトラムを比較。
 ACPRはDPD処理で低減できていることが分かるが、広帯域になるとACPR補償量が減る。



測定:EVM(Error Vector Magnitude)の時間変化

・先頭シンボルのEVM が1%くらい増加する。 ・GaN増幅器の熱メモリ効果や電流コラプスなどが原因と考えている。



測定:信号の種類、DPDパラメタ

Test model	帯域幅 [MHz]	CC数	FDD/ TDD	CFR	OSR	中心周波数 [GHz]
3.1a	100	1	TDD	無	4	3.6
3.1a	200	2	TDD	無	6	3.6

DUT & Waveform	Measurements		HW Configuration			
DPD	DPD MPM/GMP DPD Model Gener		ModAcc (LTE)		4	•
			ralized Memory 🗸			
Memory Poly	nomial (Commor	Paramete	ers)			
	Order		7			
	Memory Depth		7			

Order (PO) 3~13Memory (M) 1~13

測定結果:べき級数の次数(PO)とメモリ深さ(M)を 変化させた時のEVMの時間変化

100MHz幅のTM3.1a信号で評価。orderごとのEVMが良いPOとMの時間変化
 (PO, M)=(9, 2)がPeakEVM、RMSEVM、先頭のシンボルを最も抑えることができた。



EVMの時間変化(PO, M)=(7, 8)

EVMの時間変化(PO, M)=(9, 2)

07M7のDPDで、Cross termのOrderを1から6まで変えた場合の測定結果



ACPR測定結果とCross Termの関係



09M2のDPDで、Cross termのOrderを1から6まで変えた場合の測定結果





ACPR測定結果とCross Termの関係



測定結果:POとMを変化させた時のACPR変化

 ・100MHz幅の変調信号:POの影響が大きく、Mの影響は少なかった。
 ・200MHz幅の変調信号:POが5次以上の時に、Mが4以上にするとACPRの補償効果が 1~2dB改善された。



29

改善された理由の考察

- ・200MHz幅の方が100MHz幅に比べて増幅器のメモリ効果の影響が大きいためACPR の改善が見られると考えられる。
- ・一般的に広帯域信号に対するメモリ効果の主要な原因はバイアス回路の低周波数イン ピーダンスが考えられる。



1.電力増幅器の基礎: まとめ

- ・電力増幅器の非線形特性
- ・各種の歪み補償方法を紹介
- ・基地局用GaNドハティ増幅器のデジタル歪み補償の測定結果を紹介
 - ・ACPRの低減効果、帯域幅依存性
 - ・EVMのシンボル変化、メモリ効果の影響

これらの成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「ポスト5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」(JPNP20017)の委託事業の結果得られたものです。

2.フェーズドアレーアンテナ装置

各アンテナ素子から出る信号の位相を制御することでビームの向きを変えられる



BFN HPA

Φ Tx Φ Φ С

Array antenna

https://www.analog.com/jp/analog-dialogue/articles/phased-arraybeamforming-ics-simplify-antenna-design.html



Beyond 5G基地局用フェーズドアレーアンテナの研究

・階段状アレーアンテナ、バトラーマトリクス回路、移相器等を組合せたmMIMO対応 小型フェーズドアレー装置



従来技術の課題:フェーズドアレーアンテナ

- ・N個のビームを同時に作るには、アンテナ素子数×ビーム数分の可変移相器が必要で、回路が複雑。
- ・同時マルチビームには複数装置を並べて対応。



従来のフェーズドアレー装置の課題

- 8x8バトラーマトリクス回路を縦横に重ねれば64素子アレーアンテナと接続し、64ビーム同時 に使えるビームを生成可能。
- ・干渉が除去しきれないので同じ周波数で同時に64ビーム利用は難しい。



バトラーマトリクスと64素子アレーアンテナ

提案する階段状アレーアンテナの電磁界設計の例

階段構成は基板の段差によってビームが傾くが、フェーズドアレーアンテナは可変移相器を 使うのでビームの向きは変えられる。





階段状アレーアンテナとバトラーマトリクス と可変移相器の組合せイメージ 全アンテナ素子が同位相で放射したときの 1ビームの放射パターン例

3.8GHz帯階段状アレーアンテナ、 バトラーマトリクスの設計試作



国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT(エヌアイシーティー))の委託業務(Beyond 5G 研究開発促進事業、 採択No. 06001「Beyond 5Gに向けた高速ビームステアリング技術の研究開発」)の支援を受けました.

180°

28GHz帯 階段状アレーアンテナとバトラーマトリクス回路の試作

バトラーマトリクス回路とリニアアレーアンテナを1枚の基板で作成し、8枚の基板を重ねている



宗 秀哉, 加保貴奈, 山本泰義, 菅 瑞紀, 高橋雄太, 白戸裕史, 北 直樹, "バトラーマトリクスを用いた階段状 アレーアンテナにおける実験評価," 電子情報通信学会 信学技報, AP2022-249, pp. 87-92, 2023 年3月.

バトラーマトリクス回路で水平方向を8ビーム同時形成 (28GHzの測定結果)



装置化:増幅器部の熱設計

- 階段状基板構成の送信用増幅器の熱特性について熱流体シミュレーションを行い実装条件を明らかにする。
- 高速切換時の増幅器部のEVM等の特性変化を測定評価。



従来技術(64素子の増幅器を1枚に並べる) Xバンドを想定、0.5λ間隔で配置



提案構成(階段状アレー構成)

周波数7.6GHzにおいて0.5λ間隔で増幅器を並べる構成 とした。

Ansys 2022 R2





- ・増幅器IC(5×4×3mm,発熱量は1個あたり5W材料:GaN)
- ・空冷ファン(127×127×38mm, フレーム及びハブ材料:アルミニウム, 回転数
 4500RPM, 最大風量200cfm, 定格入力26.4W)
- ・解析領域は直方体とし、対向する2面を開口部とし、外気温は25℃に設定した。

熱流体シミュレーション結果

従来技術





MAX:50.778°C



熱流体シミュレーション結果 空冷ファンの位置、設置数変更

MAX:52.888°C



MAX:49.709℃

2.フェーズドアレーアンテナ装置の基礎:まとめ

- ・ アンテナ素子の位相制御によるビーム制御
- バトラーマトリクスと階段状アレーアンテナによる
 同時マルチビーム形成が可能なフェーズドアレー装置の提案
- フェーズドアレーアンテナ装置における増幅器実装時の熱設計の紹介

成果の一部は、NTTアクセスサービスシステム研究所との共同研究、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT(エヌアイ シーティー))の委託業務(Beyond 5G 研究開発促進事業、採択No. 06001「Beyond 5Gに向けた高速ビームステアリング 技術の研究開発」)、JSPS 科研(22K04094)の支援を受けました.

文献(1/2)

1. NEDO ポスト 5G情報通信システム基盤強化研究開発事業

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100172.html

2. 三菱電機技報 Vol.94 No.6 超広帯域デジタル制御GaN増幅器

- 3. Y. Komatsuzaki, R. Ma, M. Benosman, Y. Nagai, S. Sakata, K. Nakatani, and S. Shinjo, "A Novel 1.4-4.8 GHz Ultra-Wideband, over 45% High Efficiency Digitally Assisted Frequency-Periodic Load Modulated Amplifier," 2019 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., Boston, MA, 2019.
- 4. 坂田修一, 小松崎優治, 斎木研人, 山中宏治, 津留正臣, "移動通信基地局向け広帯域負荷変調 GaN増幅器,"電子情報通 信学会, 信学技報, MW2021-110, pp32-37,2022.
- 5. 山中宏治, 小松崎優治, 坂田修一, 齋木研人, 加保貴奈, "シェアリング基地局用送信増幅器についての検討,"電子情報通信 学会, 信学技報, vol. 122, no. 371, MW2022-155, pp. 50-50, 2023年1月.
- 6. 森悠輝, 服部恒輝, 加保貴奈, 齋木研人, 小松崎優治, 山中宏治, "広帯域GaN増幅器のマルチキャリア入力時の歪補償特性の評価,"電子情報通信学会, 信学技報, MW2021-91, pp37-42, 2021.
- 7. 鈴木貴登, 坂田修一, 小松崎優治, 山中宏治, 加保貴奈, "2入力GaN増幅器のドハティ・アウトフェージング増幅器モードの超高 速測定" 電子情報通信学会 総合大会, C-2-4, 2023年3月.
- 8.難波八尋,坂田修一,小松崎優治,山中宏冶,加保貴奈, "GaNドハティ増幅器の5G NR TDD信号のEVM測定評価,"電子情報 通信学会 総合大会, C-2-5, 2023年3月.
- 9. 矢野綾乃, 加保貴奈, 坂田修一, 小松崎優治, 山中宏治, "GaNドハティ増幅器の5G NR TDD信号入力時のDPD補償量および 変調帯域幅依存性の評価,"信学技報, vol. 123, no. 216, MW2023-112, pp. 119-124, 2023年10月.
- 10.谷津田 臣呂, 松尾 利己人, 加保 貴奈, 坂田 修一, 小松崎 優治, 山中 宏治, "2入力GaN増幅器のアウトフェージング増幅 器モードの高効率化の検討,"信学技報, vol. 123, no. 216, MW2023-113, pp. 125-130, 2023年10月.



- 11.宗 秀哉, 渡辺義唯, 加保貴奈, 菅 瑞紀, 新井拓人, 白戸裕史, 俊長秀紀, 内田大誠, 北 直樹, "バトラーマトリクスと階段状ア レーアンテナによる小型アレーアンテナの提案," 電子情報通信学会 信学技報, AP2021-151, pp. 92-97, 2022 年1月.
- 12.H. So, T. Kaho, M. Suga, T. Arai, Y. Shirato, H. Toshinaga, D. Uchida, and N. Kita, "Novel staircase array antenna configuration using stacked Butler matrix for low profile base station," *IEICE ComEX*, vol. X11-B, no. 6, Jun. 2022.
- 13.加保貴奈, 宗 秀哉, "MIMO 対応Beyond 5G 基地局RF 装置の小型化の一検討," 電気学会電子デバイス研究会, EDD-22-069, 2022 年12 月.
- 14.宗 秀哉, 加保貴奈, 山本泰義, 菅 瑞紀, 高橋雄太, 白戸裕史, 北 直樹, "バトラーマトリクスを用いた階段状アレーアンテナに おける実験評価," 電子情報通信学会 信学技報, AP2022-249, pp. 87-92, 2023 年3月.
- 15.H. So, T. Kaho, Y. Yamamoto, M. Suga, Y. Takahashi, Y. Shirato, and N. Kita, "Staircase array antenna with stacked butler matrix for concurrent multi-beams," IEEE Access, vol. 11, pp. 76638-76646, Aug. 2023.
- 16.矢野綾乃, 宗 秀哉, 加保貴奈, "階段状アレーアンテナに適したパッチアンテナ素子の一検討,"電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, No.128, 2023年3月.
- 17.矢野綾乃, 宗 秀哉, 加保貴奈, "階段状アレーアンテナに適した無給電素子付パッチアンテナの検討,"電子情報通信学会ソサ イエティ大会, B-3-19, 2023.
- 18.松永高治, "マイクロ波ミリ波帯におけるGaN電力増幅器のための回路, デバイス技術", 電子情報通信学会 信学技報, MW2022-154, 2022.
- 19.野坂秀之, 加保貴奈, 川西哲也, "Beyond 5Gに向けた高速ビームステアリング技術,"電子情報通信学会 信学技報, PN2022-46, pp.23-27, 2023.
- 20.宗 秀哉, 行谷滉希, 丸田一輝, 加保貴奈, "高速ビームステアリングを用いたビーム探索手法の特性評価,"電子情報通信学会 信学技報, RCS2023-156, pp. 24-28, 2023 年11月.

加保貴奈 湘南工科大学 工学部 教授, kaho@elec.shonan-it.ac.jp