

# 周波数分割型高周波増幅による 高速高電圧パルス発生器の開発

渡川 和晃, 前坂 比呂和, 田中 均 (理化学研究所)

小花 利一郎 (株式会社アールアンドケー)

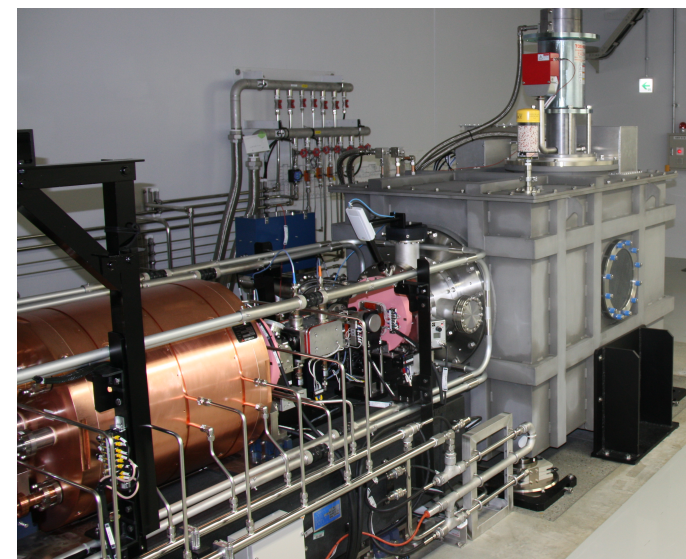
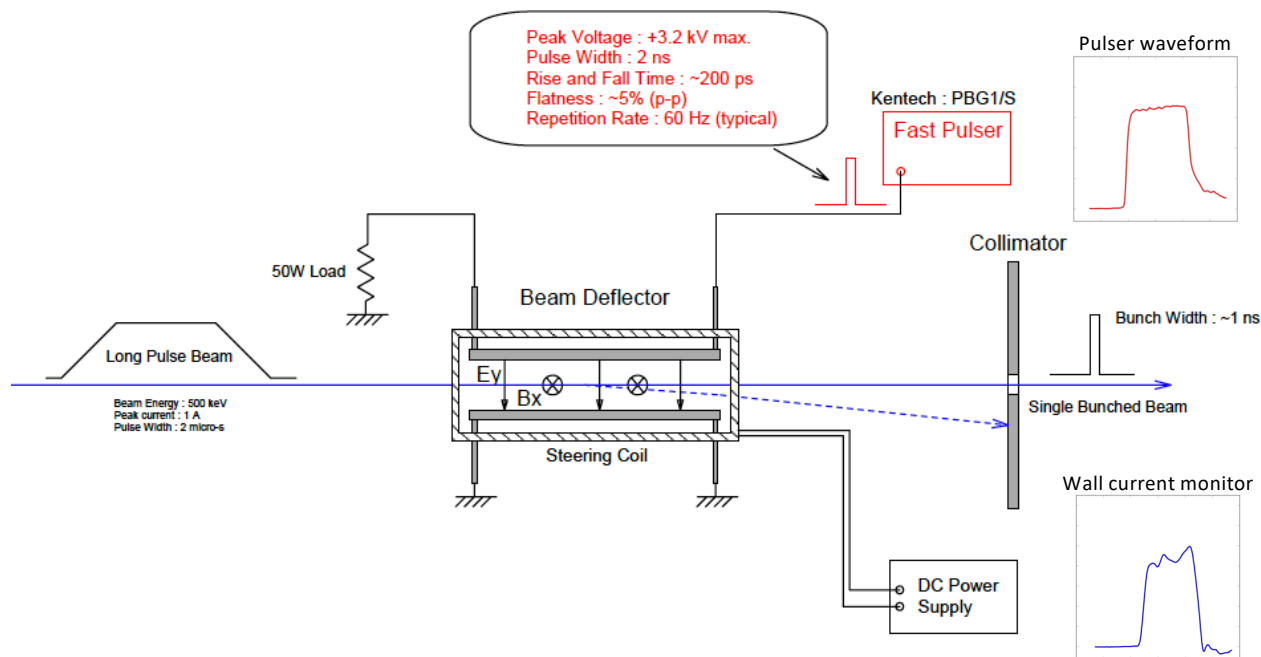
2022年10月19日

第19回日本加速器学会年会

# Introduction

- X線自由電子レーザー施設SACLAでは、 $\text{CeB}_6$ 熱電子銃で発生したマイクロ秒電子ビームから高速チョッパーを用いてナノ秒電子ビームを切り出し、線形加速器に入射している。
- ナノ秒電子ビームを切り出すために市販の高速パルサーを使用してきたが、パルス出力の不安定性や波形調整のしにくさが問題となっていた。
- XFEL光をより安定にユーザー提供するために、RFアンプを用いた新しいタイプの高速パルサーの提案と実証試験を行なった。
- 狭帯域のシグナルを増幅することを得意とするRFアンプを広帯域の短パルス生成にどう活用するのかが課題。
- RFアンプにより実現した高出力を実際のビームハンドリングに効率的に活用するための出力方式も同時に検討。

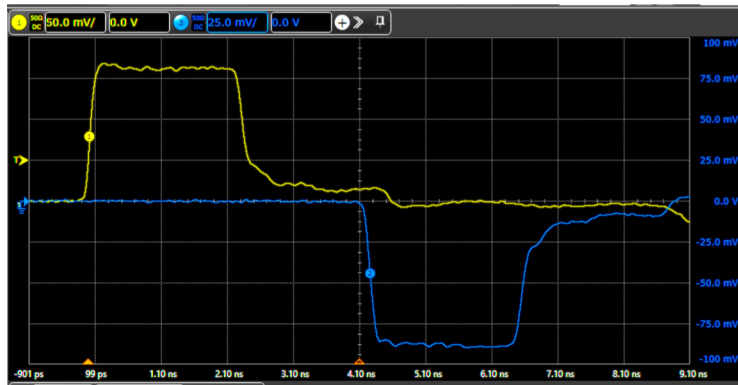
# SACLA入射部ビームチョッパー



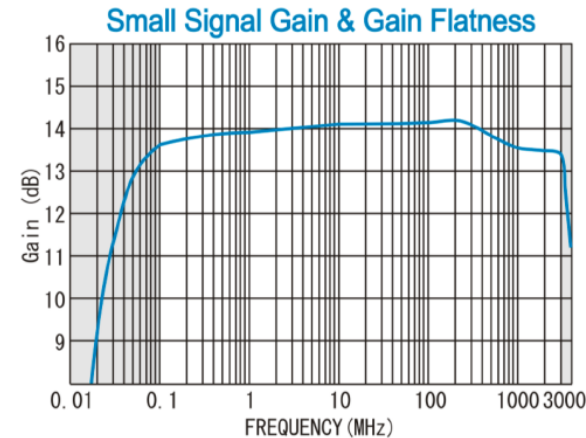
- アバランシェ型パルサーは小型の市販品が利用可能。
- パルスタイミング、波高の変動が生じることがあり、XFEL出力の不安定要因の1つとなっている。
- 波形調整が容易でない。我々ではほぼ不可能。

# 広帯域のRFアンプを用いる

- 低出力の矩形波を広帯域アンプ（MHz~GHz）で増幅し、アバランシェパルサーと同等の高電圧パルスが発生する。
- 広帯域の1個のFET素子で目立った波形歪みを生じずに増幅できることが分かった。

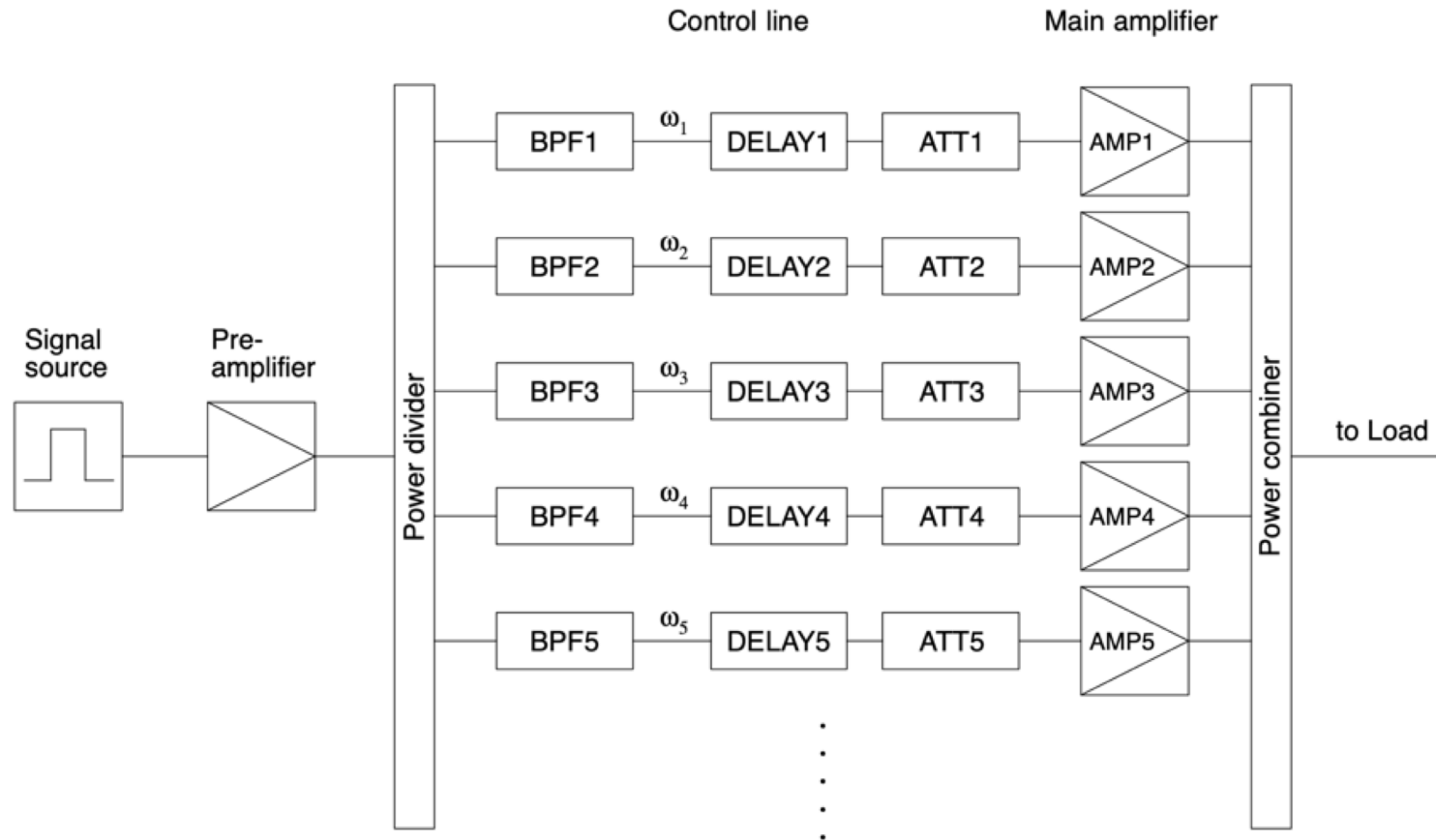


株式会社アールアンドケー R&K-AA010-0S



- 問題は、多数の増幅パルスを合成する際に、周波数に依存した群速度遅延が生じ、波形が歪んでしまうこと。これをどう克服するか。

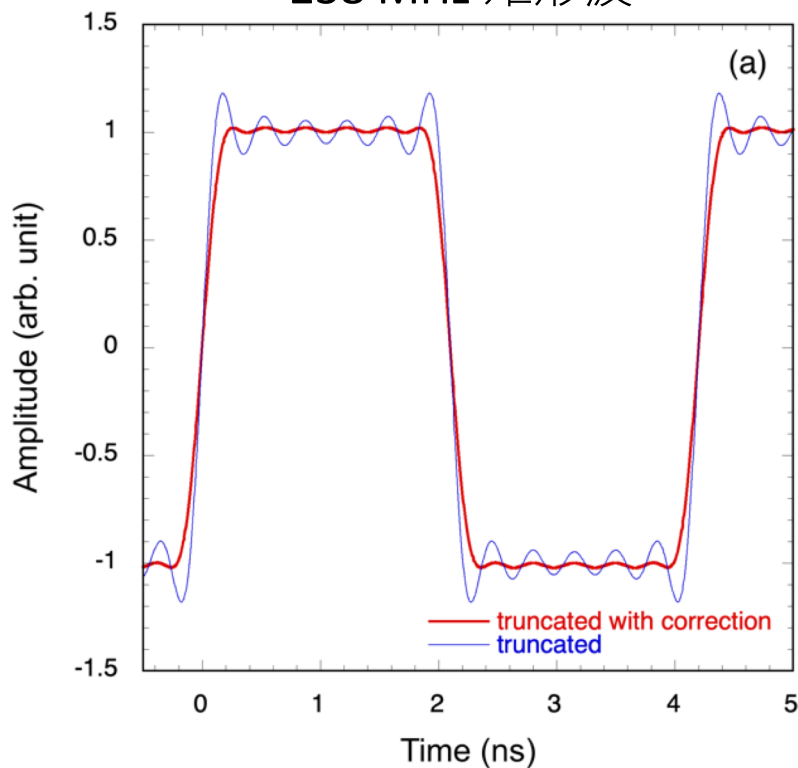
# 周波数を分割して増幅する



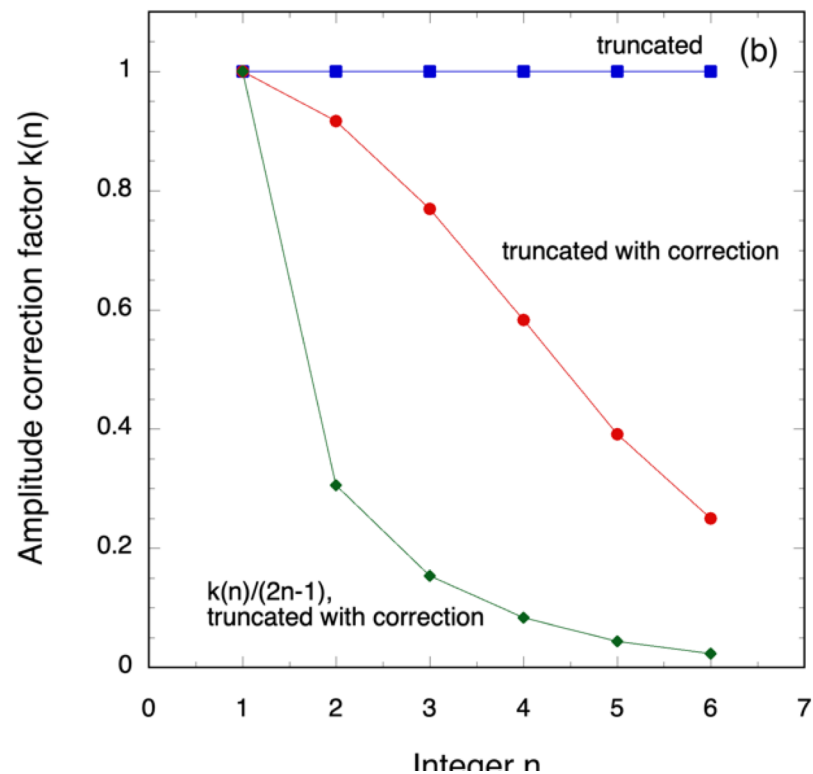
- パワーを分割し、**BPF**で波長を選択する。
- 分配器、合成器、増幅器で発生する群遅延を**DELAY**で補正する。
- 各周波数帯域の振幅を**ATT**で調整する。

# 周波数を分割して増幅する

238 MHz 矩形波



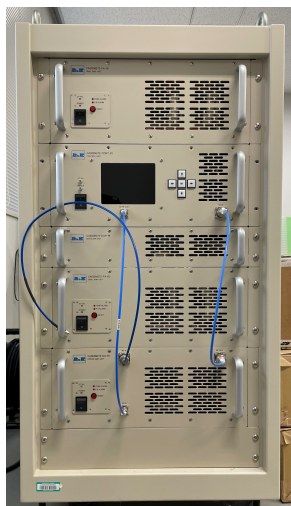
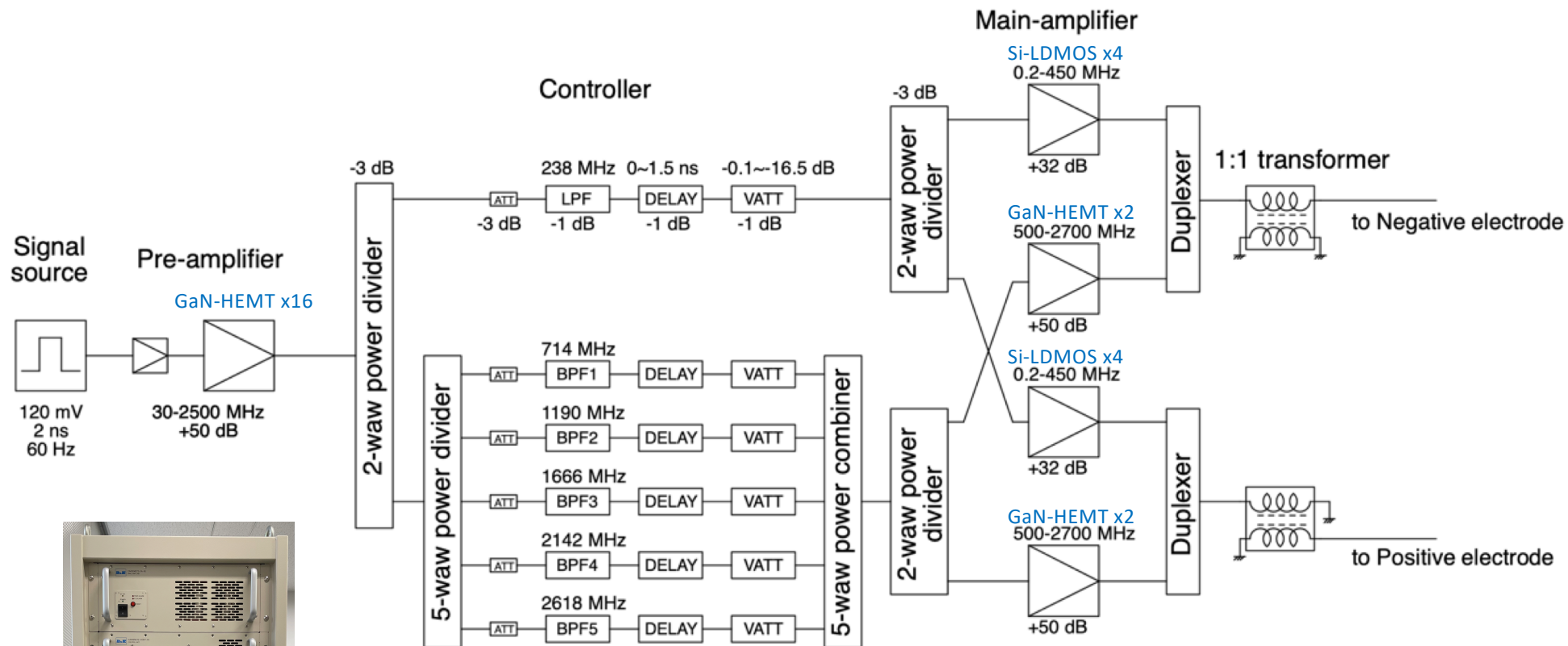
振幅補正係数



$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_1 t] \quad \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \quad g(t) = \sum_{n=1}^N \frac{4}{\pi} \frac{k(n)}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_1 t]$$

- 振幅を調整すれば、有限個の周波数でも矩形波に近づけられる。
- 高調波のパワーを大幅に低減できる。

# 試作機の回路構成

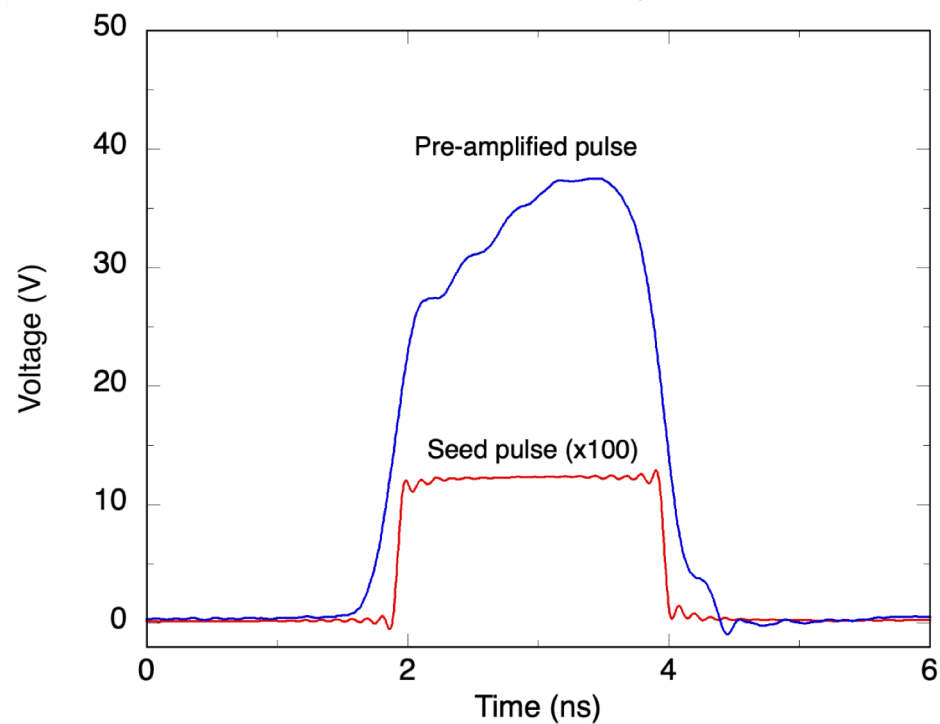


※実際は連続矩形波ではないので (60 Hz)、各周波数のBPFには帯域幅が必要。

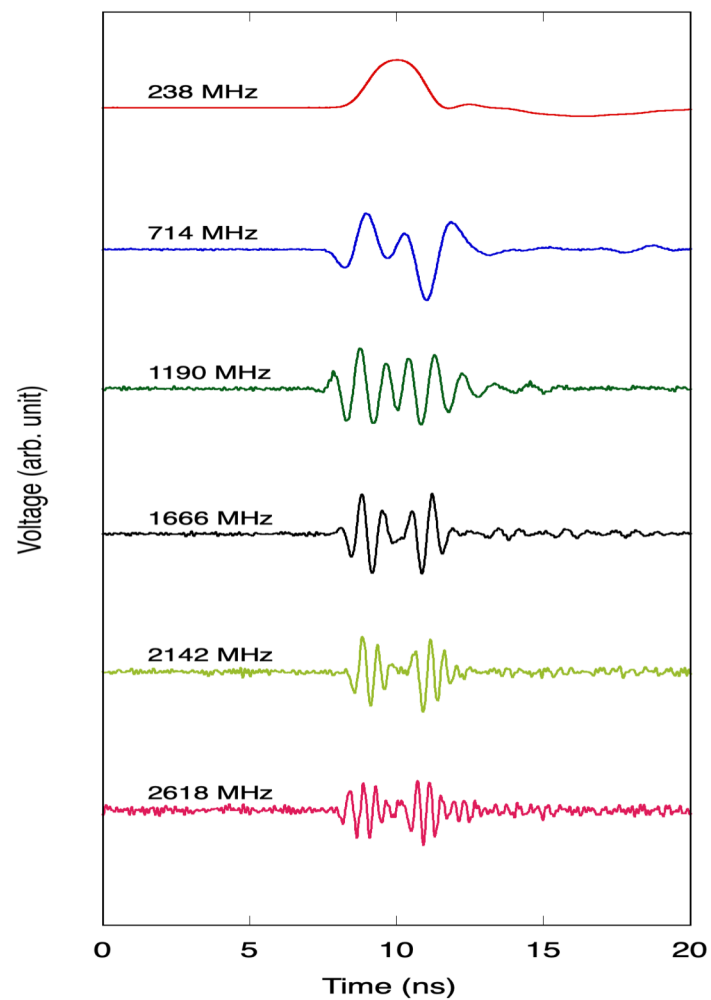
$$F(\omega) = \frac{2}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2}$$

# 各部の波形測定

入力パルスと前段増幅パルス

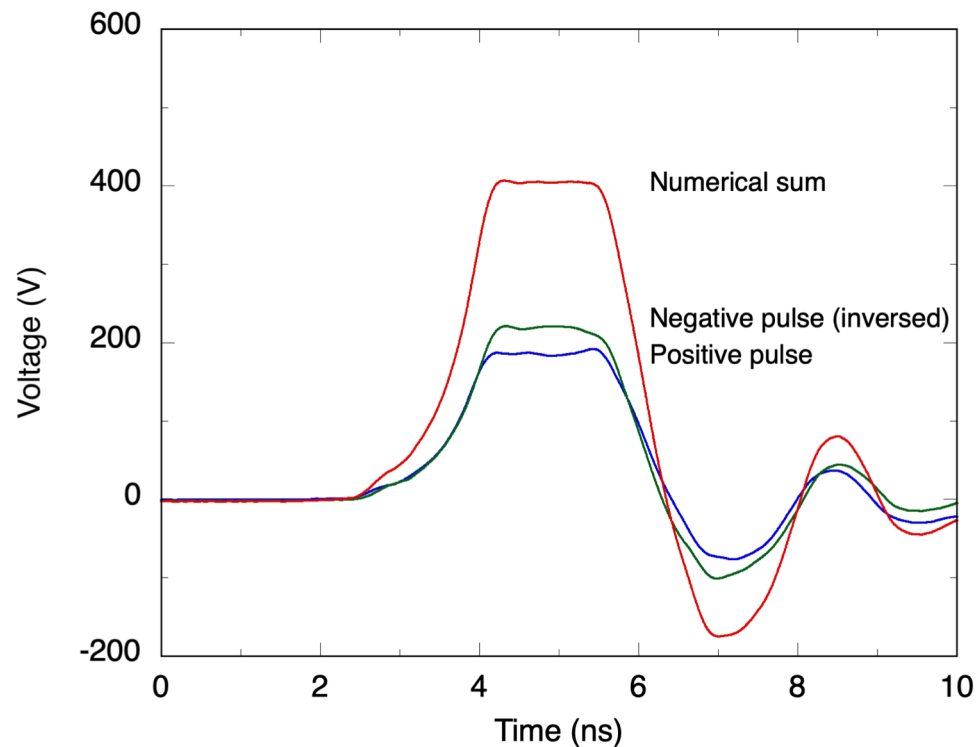


周波数分解したパルス





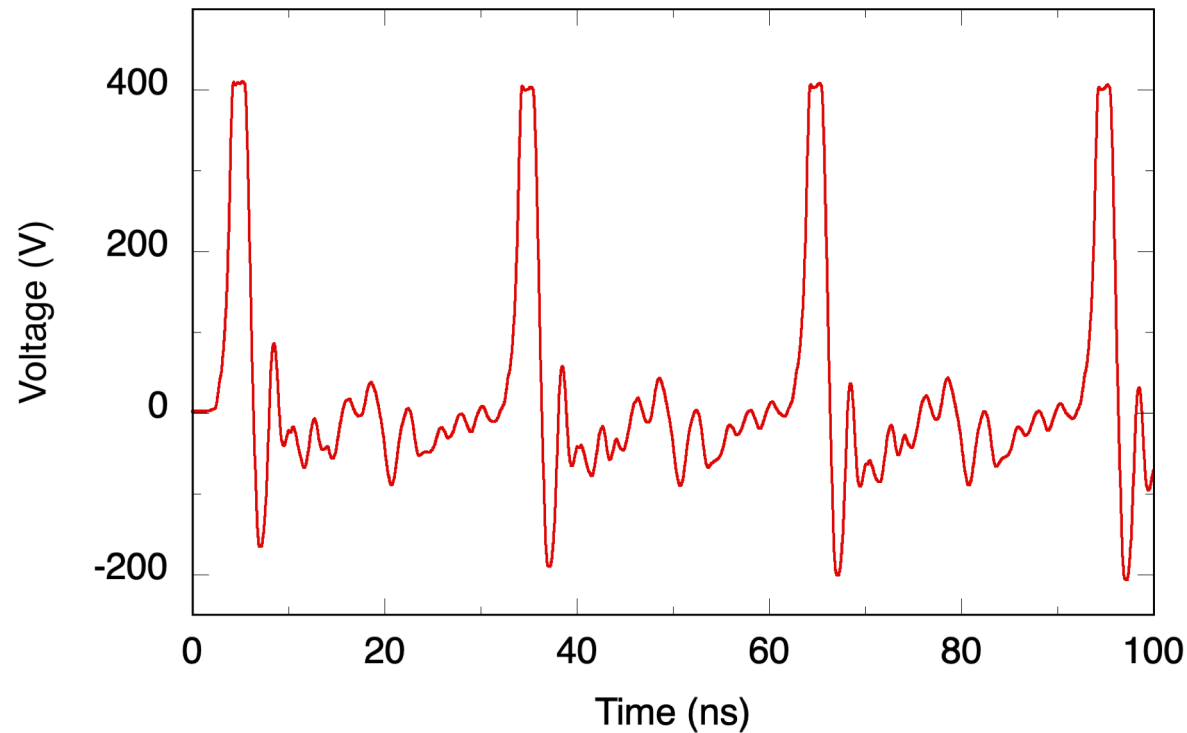
# 再合成したパルス波形



	Target	Achieved
Peak power (kW)	1	0.8
Pulse height (50 $\Omega$ impedance) (kV)	0.22	0.2
Pulse width (FWHM) (ns)	2	2.2
Rise and fall time (0%–90%) (ns)	0.15	1.1/0.63
Repetition rate (Hz)	60	60
Flattop variation (peak-to-peak) (%)	<3	0.8
Timing jitter (rms) (ps)	<10	$\leq 3$
Voltage jitter (rms) (%)	<0.3	$\leq 0.2$

- ビームkick角に比例する合成波形のflattopが平坦になるよう各周波数の群遅延と振幅を調整。
- Peak-to-peakで1%を切る平坦度を達成。
- 立ち上がり立ち下がり領域の波形歪みは、3倍高調波の712 MHzの波形歪みが原因であると推測。今後原因調査と対策を行う。

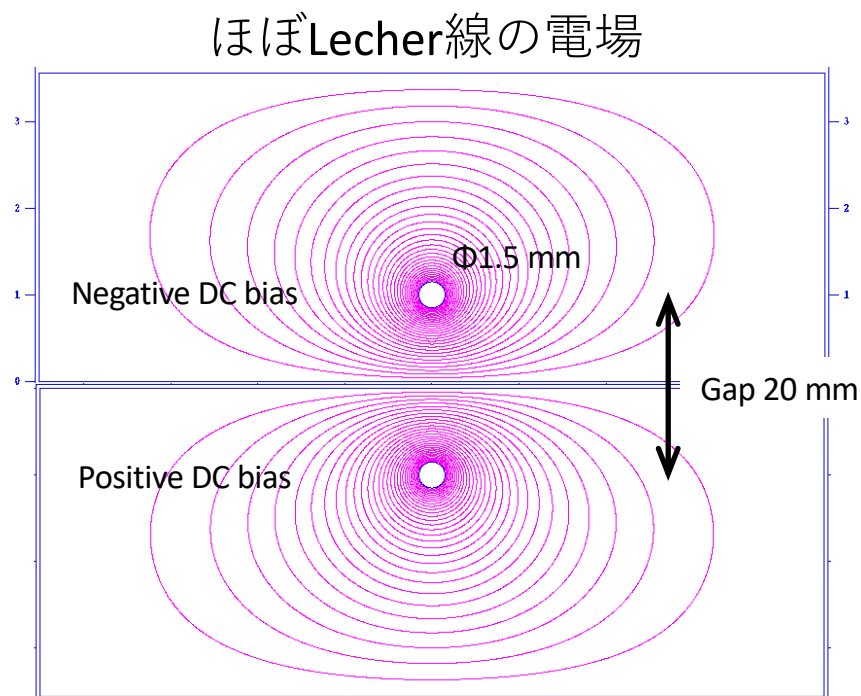
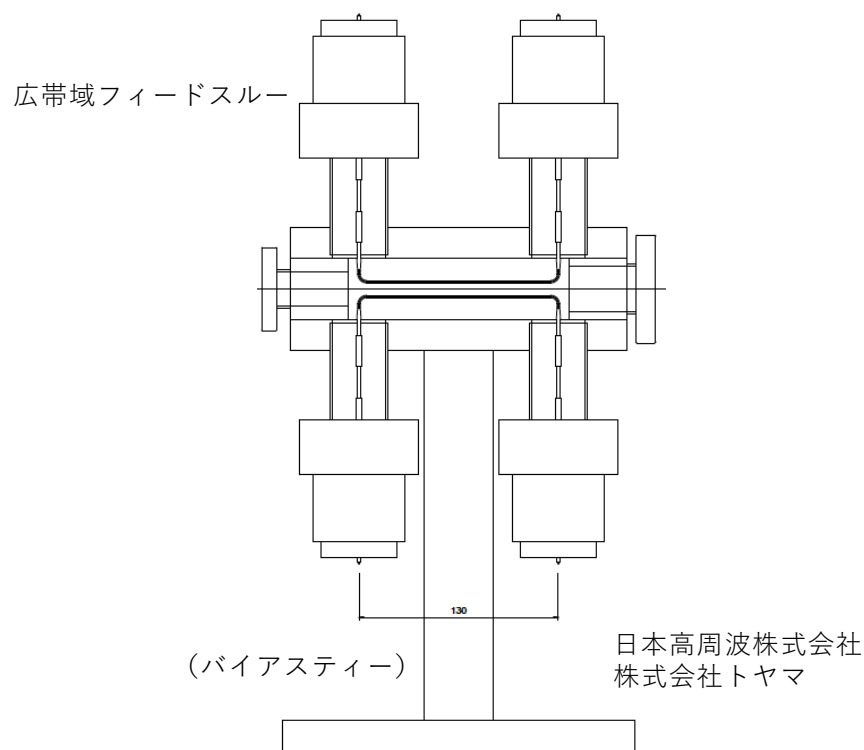
# マルチバンチ構造の生成



- 試験的にマルチバンチ構造のパルス生成をデモンストレーション。
- マクロパルスの繰り返しは**60 Hz**、バンチ数**4**、バンチ間隔**30 ns**。
- マルチバンチ生成や高繰り返しリニアックに有効。
- 原理的には任意形状のパルス増幅が可能。

# 高インピーダンスチョッパ

- 広帯域アンプのパワーを低減するために、チョッパストリップラインのインピーダンスを上げたい。50 Ωから150 Ωにすると、必要なアンプパワーが $1/1.73$  ( $V = \sqrt{PR}$ )。
- 下方向のkickはDC磁場ではなくDC電場で与え、それらを矩形パルスで相殺する。



# 今後の予定

- 広帯域アンプのパワー増強（本年度、来年度）  
ピークパワー： $0.8 \text{ kW} \times 2 \rightarrow 7.4 \text{ kW} \times 2$   
ピーク電圧（ $150 \Omega$ 換算）： $\pm 0.35 \text{ kV} \rightarrow \pm 1.05 \text{ kV}$
- 高インピーダンスチョッパーの製作（本年度）  
DC電圧印加  
高周波特性
- 電子銃テストスタンドにおけるビーム試験（来年度）  
ビームプロファイル  
スライスエミッタンス
- 実機投入

# まとめ

- XFEL光をより安定にユーザー提供するため、広帯域アンプを利用した新しいタイプの高速パルサーを提案した。
- 周波数を分割し、角周波数のラインに調整ノブを持たせることで、群遅延などが原因の波形歪みを補正できることを試作機で実証した。
- また、マルチバンチ構造など複雑な構造を持つパルス生成にも有効であることを示した。
- 増幅パワーの増強により、ピーク電圧が数kVのパルスを発生することは可能であると考えられる。
- 加速器（特に低エネルギー領域）やレーザーなど、様々な高周波デバイスに応用できると期待している。

謝辞：本研究を進める上で、株式会社アールアンドケーの伊藤賢一様、佐野由和様、長谷川貴俊様には多大なご協力頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。