

# CMB観測用コヒーレント型偏光検出器における 新しい復調方式の開発研究

Reference arXiv:1203.2407

石徹白晃治、田島治、永井誠、長谷川雅也、羽澄昌史 (KEK素核研)

# Introduction

CMB偏光Bモード: インフレーションへの決定的証拠  
しかし、ものすごく小さい ( $< 1$  nK)

CMB実験の方法: 大規模アレイによる長時間観測  
⇔ 統計量を上げる

前提条件: (観測帯域で) 検出器出力は白色ガウス雑音  
望遠鏡のスキャン速度と空間分解能

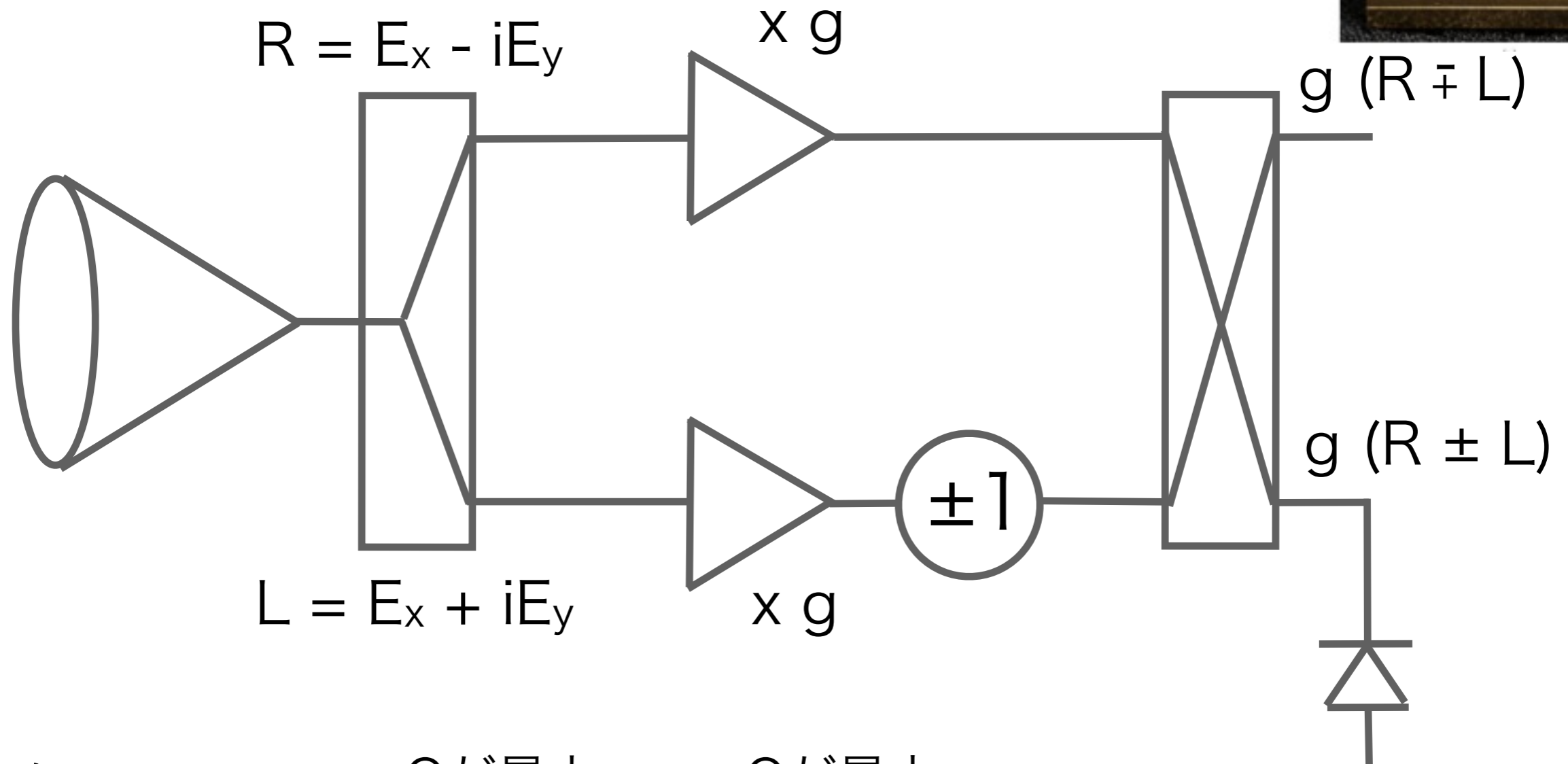
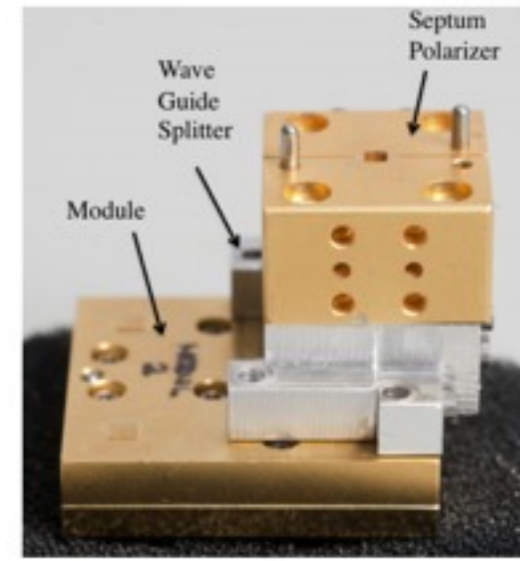
コヒーレント型検出器 (WMAP, PLANK, QUIETなど)  
変調/復調により白色ガウス雑音を実現

本講演

復調にもう1工夫を加えることで白色性の向上 (ラインの除去)

# 変調

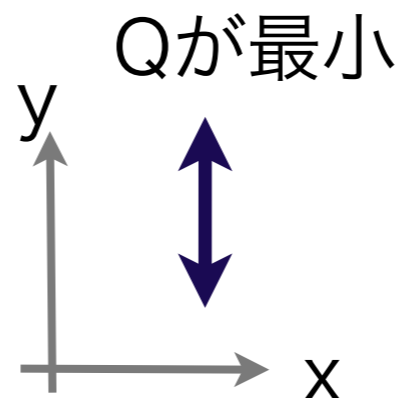
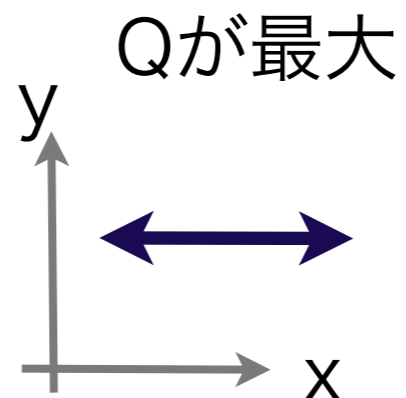
QUIET実験の場合



ストークス Q

線偏光の強度

$$Q = E_x^2 - E_y^2$$

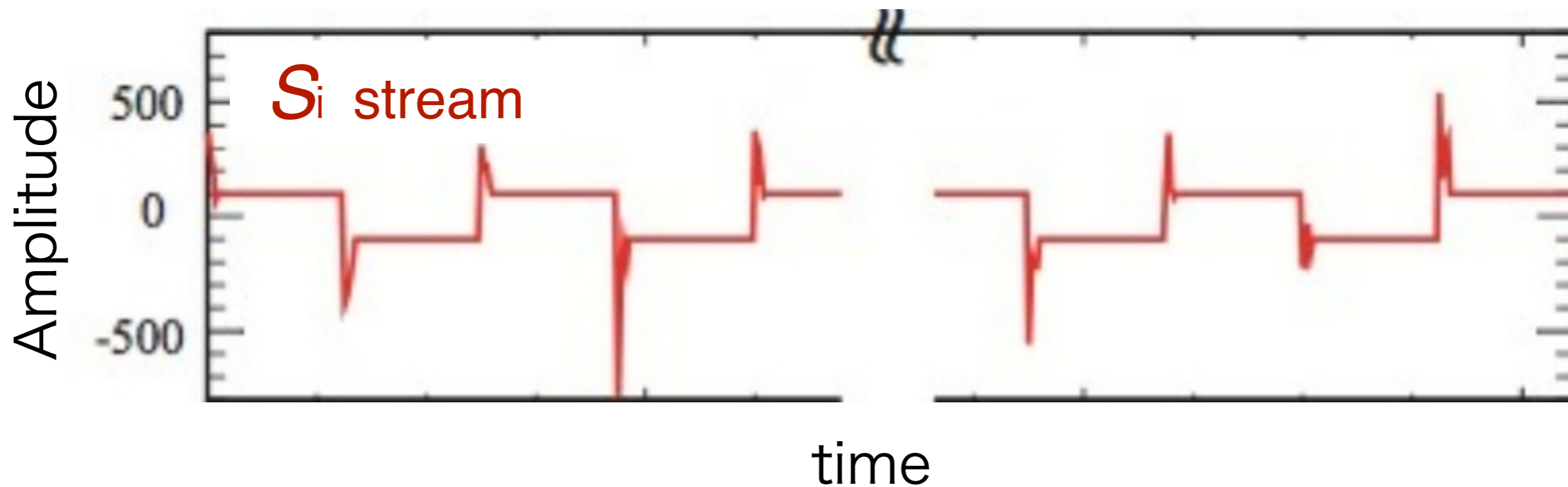


$$|g (R \pm L)|^2 = \text{const. } \pm gQ$$

# 偏光検出出力

定式化

$$S_i = \underbrace{a_i}_{\text{mod.}} \underbrace{P_i}_{\text{signal}} + \underbrace{N_i}_{\text{noise}}$$

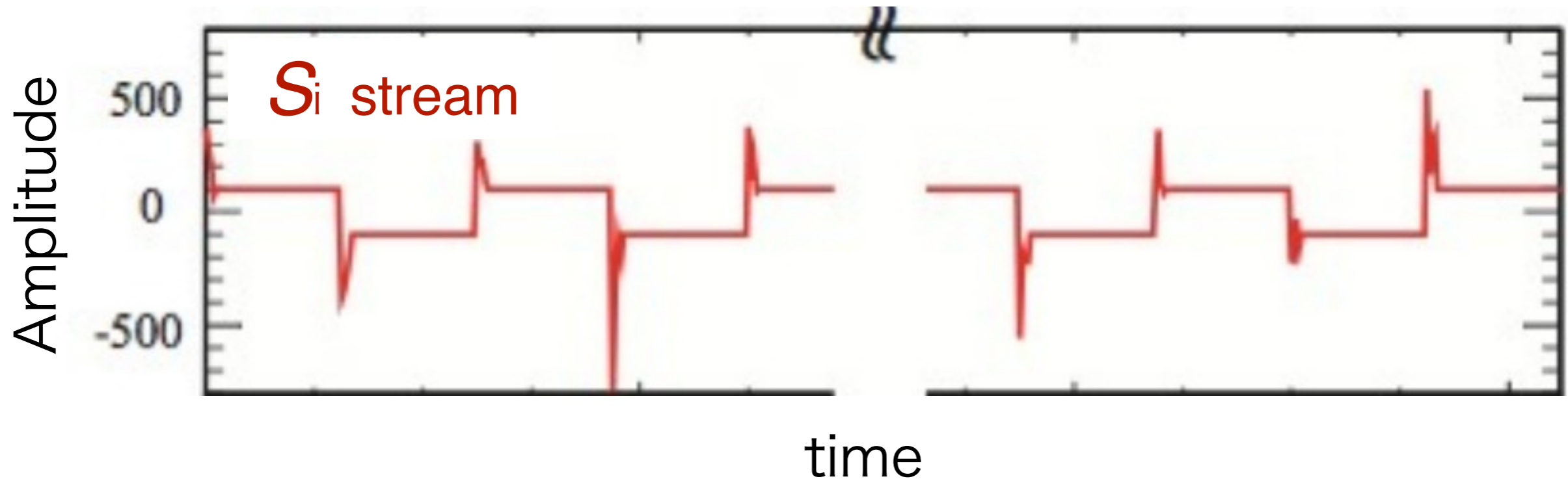


# 偏光検出出力

定式化

$$S_{2n+1} = +P_{2n+1} + N_{2n+1}$$

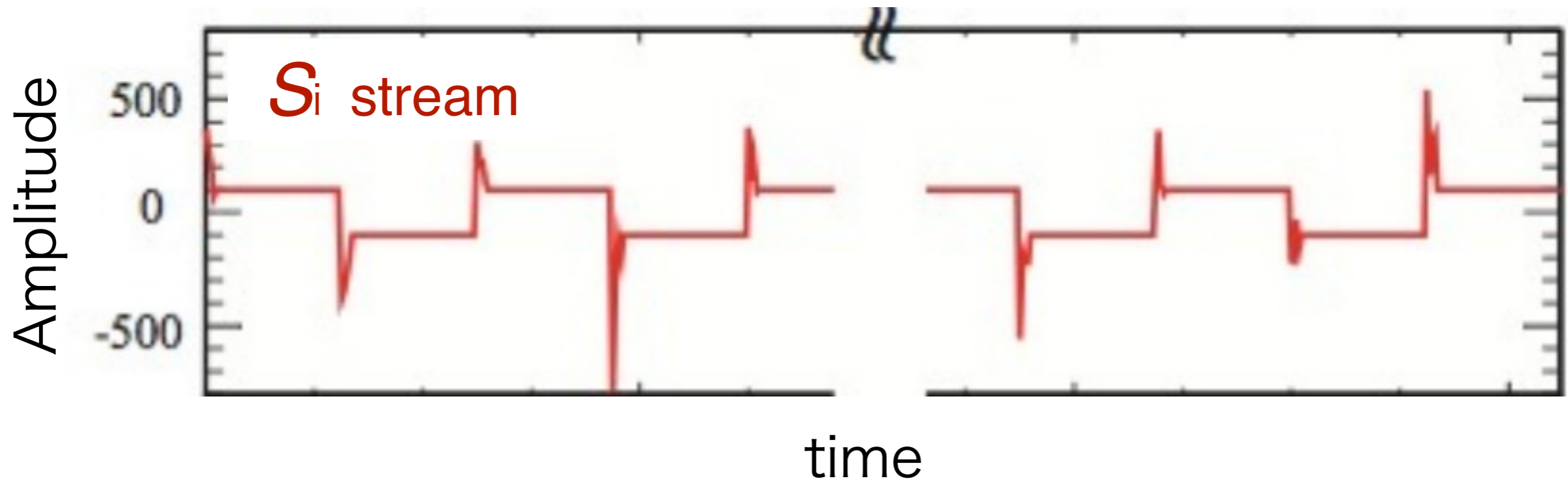
$$S_{2n} = -P_{2n} + N_{2n}$$



# 復調

$$\begin{aligned} D^{2p} &\equiv \frac{S_{2n+1} - S_{2n}}{2}, \\ &= \frac{P_{2n+1} + P_{2n}}{2} + \frac{N_{2n+1} - N_{2n}}{2} \end{aligned}$$

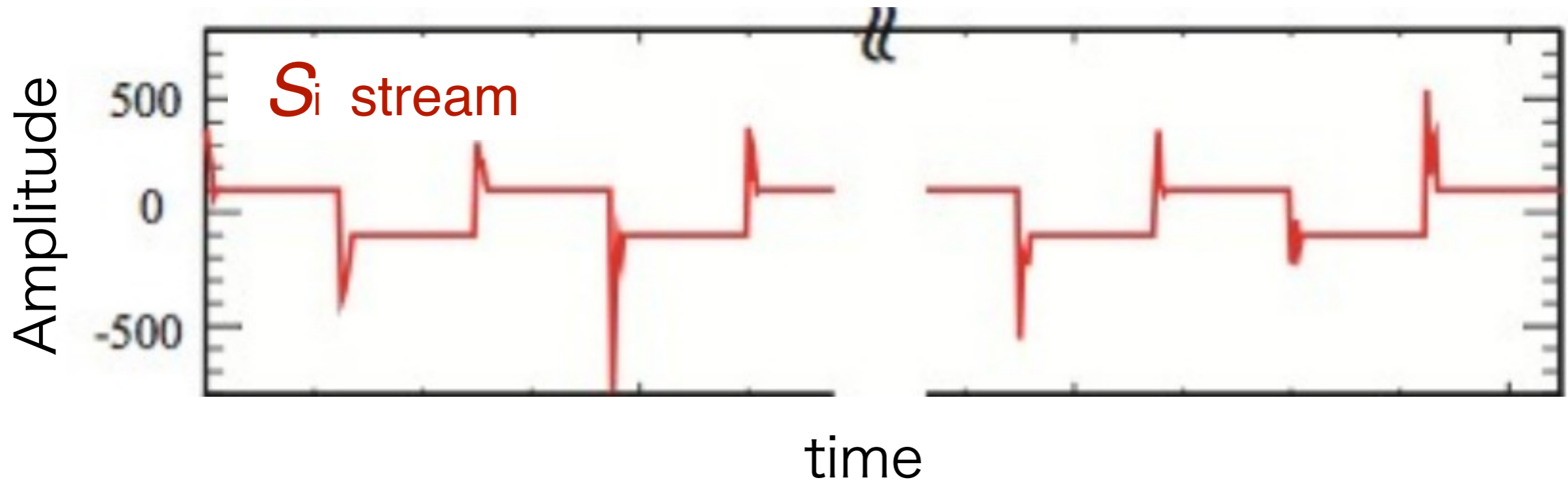
➔  $D_k^{2p} = P_k + \Delta N_k^{2p}$



# もう 1 工夫の提案

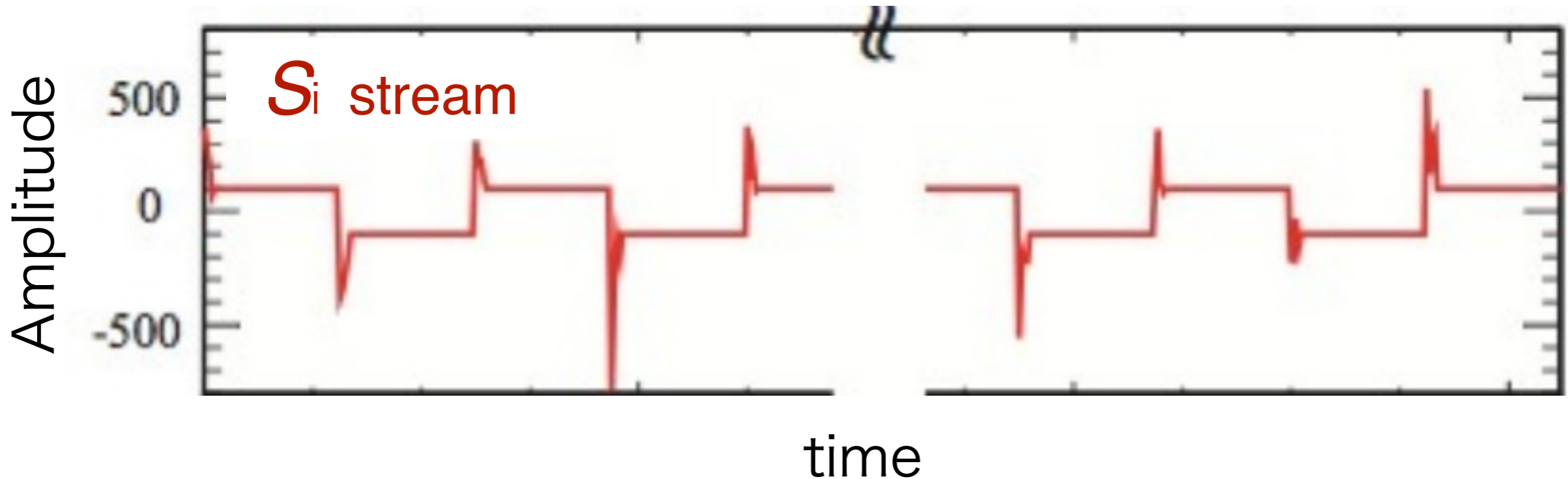
3点で復調しよう

$$D_l^{3p} \equiv \frac{1}{2} \left[ \frac{S_{2n+1} - S_{2n}}{2} - \frac{S_{2n} - S_{2n-1}}{2} \right]$$



# もう1工夫の提案

$$\begin{aligned} D_l^{3p} &\equiv \frac{1}{2} \left[ \frac{S_{2n+1} - S_{2n}}{2} - \frac{S_{2n} - S_{2n-1}}{2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{P_{2n+1} + P_{2n}}{2} + \frac{P_{2n} + P_{2n-1}}{2} \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[ \frac{N_{2n+1} - N_{2n}}{2} - \frac{N_{2n} - N_{2n-1}}{2} \right] \\ &= P_l + \Delta N_l^{3p}, \end{aligned}$$



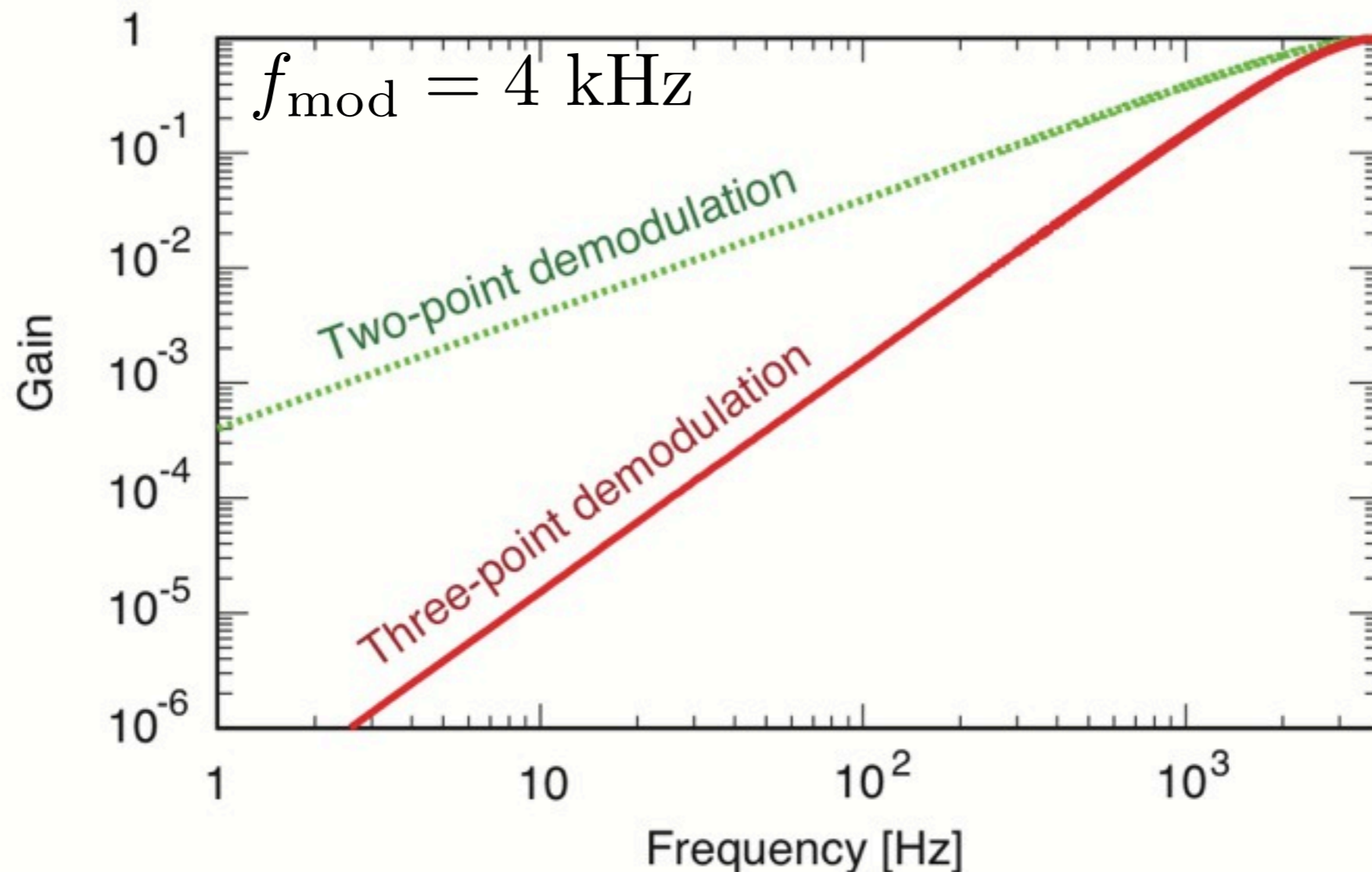


# 2つの復調の比較

復調される偏光信号Pは同じ

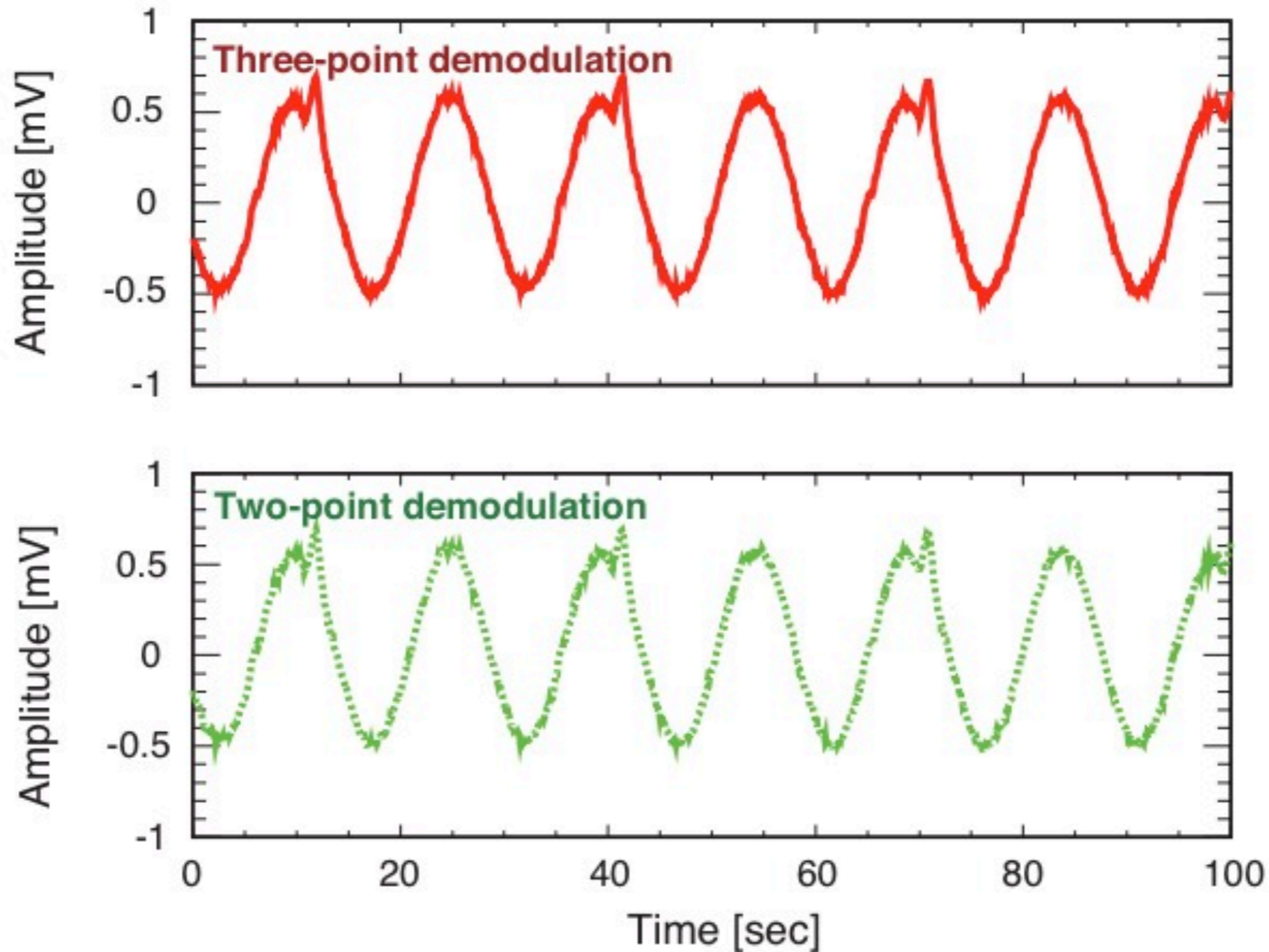
雑音の寄与は異なる (1次 vs 2次ハイパス)

- ライン除去
- $1/f$ 雑音のコンタミを低減



# 実験I

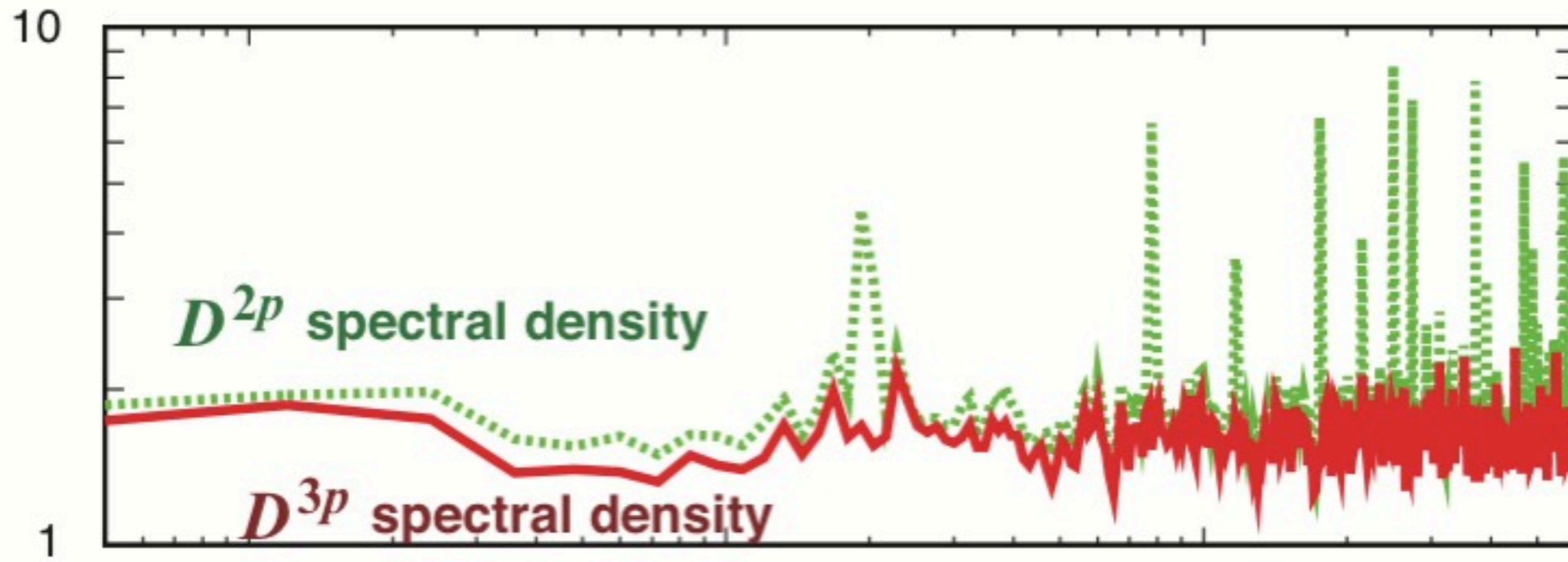
偏光信号Pの大きさが変化しないことの確認



振幅変化が0.1%以下であることを確認

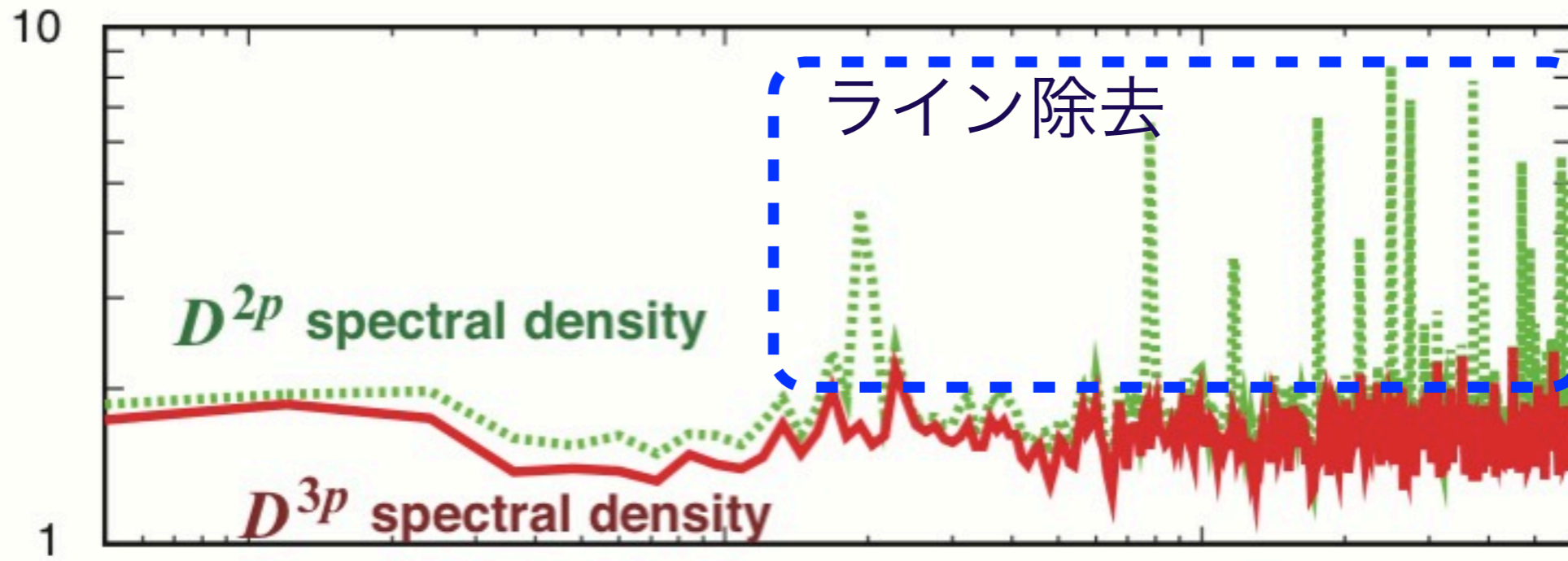
# 実験II

Spectral density [ $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$ ]



# 実験II

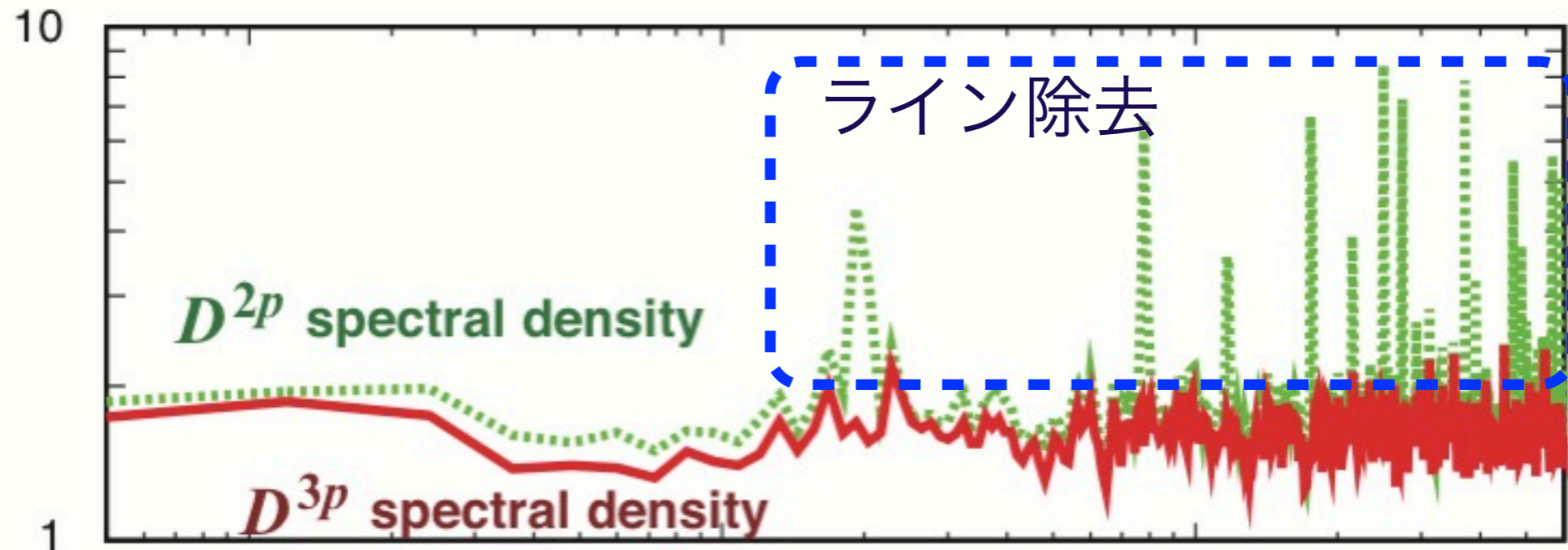
Spectral density [ $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$ ]



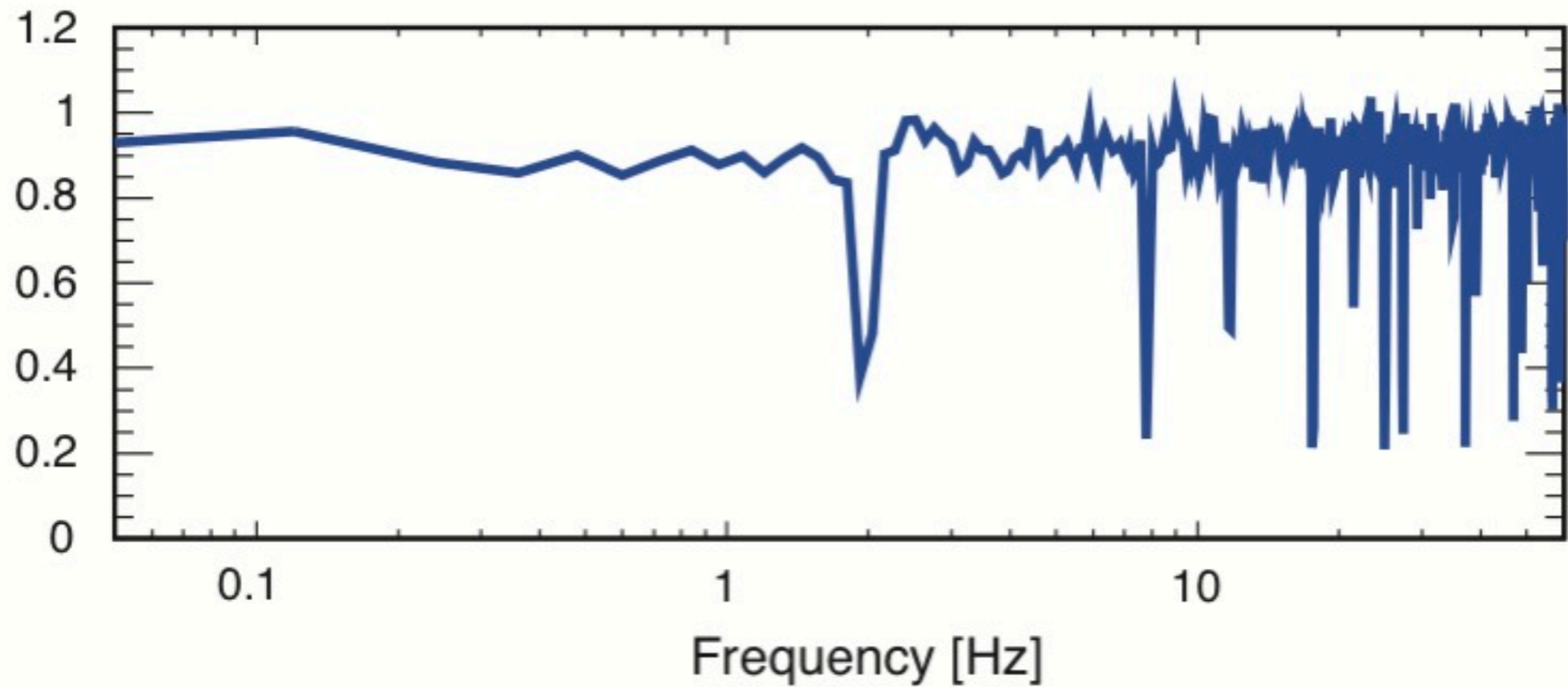


# 実験II

Spectral density [ $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$ ]



Suppression ratio



8.4%の  
フロア低減

# シミュレーション

雑音のモデリング

$$N \left\{ 1 + \left( \frac{f_{\text{knee}}}{f} \right)^\alpha \right\}$$

Input noise properties			Noise floor ( $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$ )		
$f_{\text{knee}}$ (kHz)	$\alpha$	$N$ ( $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$ )	$2p$	$3p$	$4p$
1.0	1.0	1.0	1.18	1.16	1.15
1.0	1.5	1.0	1.21	1.15	1.13
2.0	1.0	1.0	1.31	1.27	1.26
2.0	1.5	1.0	1.47	1.32	1.30

数%のフロア向上

フロアの向上は、 $1/f$ 雑音コンタミの低減から来る

# まとめ

CMB実験: 検出器出力が白色ガウス雑音を持つことは重要  
コヒーレント型偏光検出器では(電氣的な)変調/復調を使う

復調にもう1工夫を提案 (3点復調)

QUIET偏光検出を用いて、

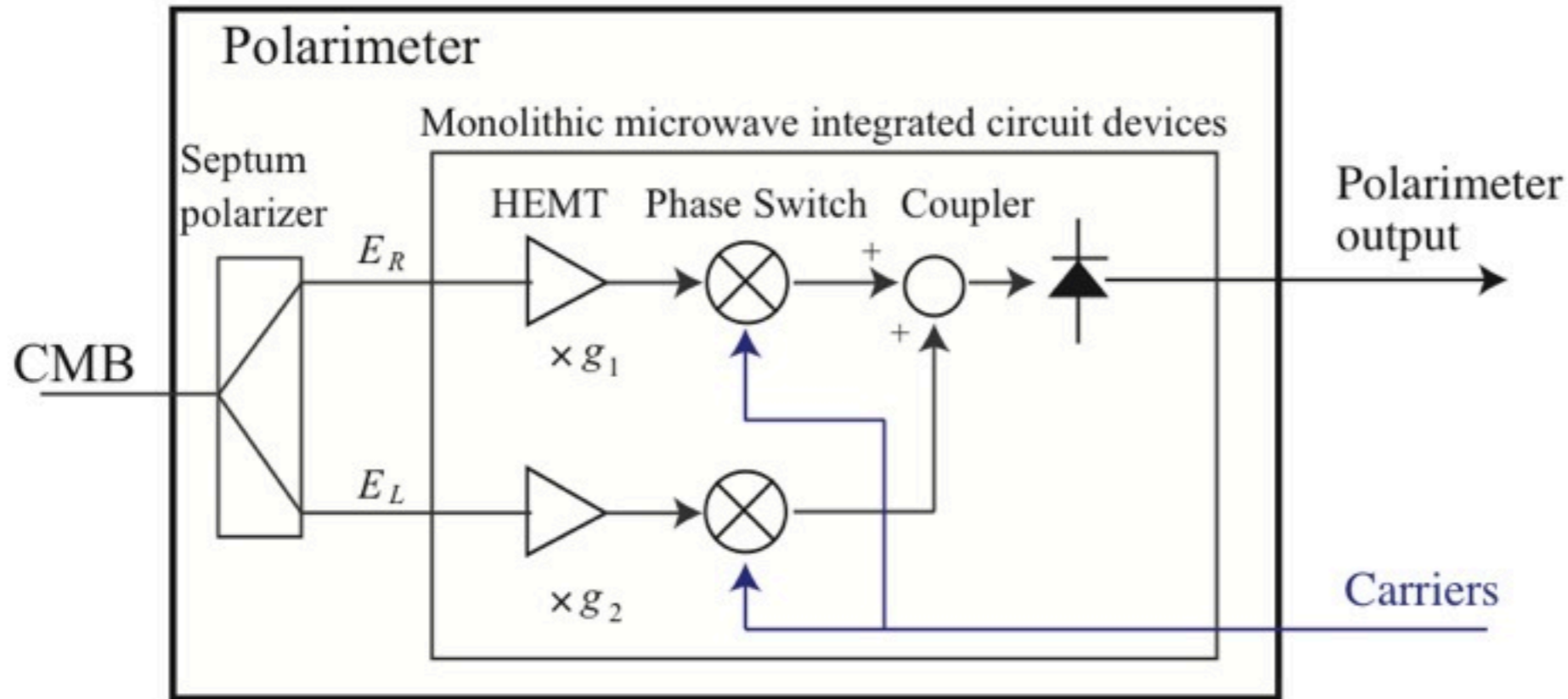
- 信号レベルが変化しないこと
- ライン除去
- フロアレベルの向上

を確認。

フロアレベルの向上は、 $1/f$ 雑音によるコンタミの  
低減であることをシミュレーションで確認。

稼働中の実験 (PLANK-LFI)や計画中の実験 (QUIET-II)で  
有効な技術

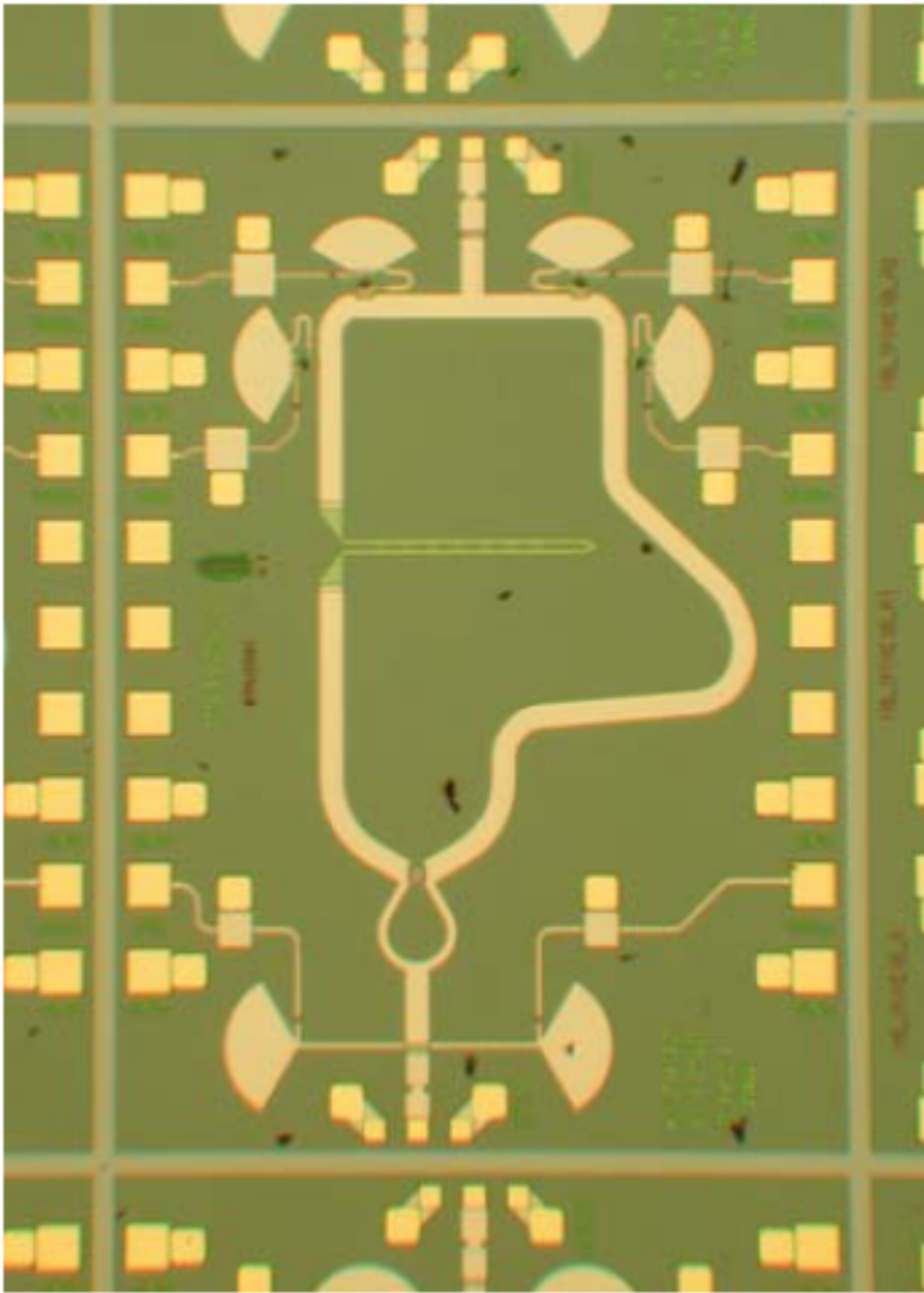
# 2重変調

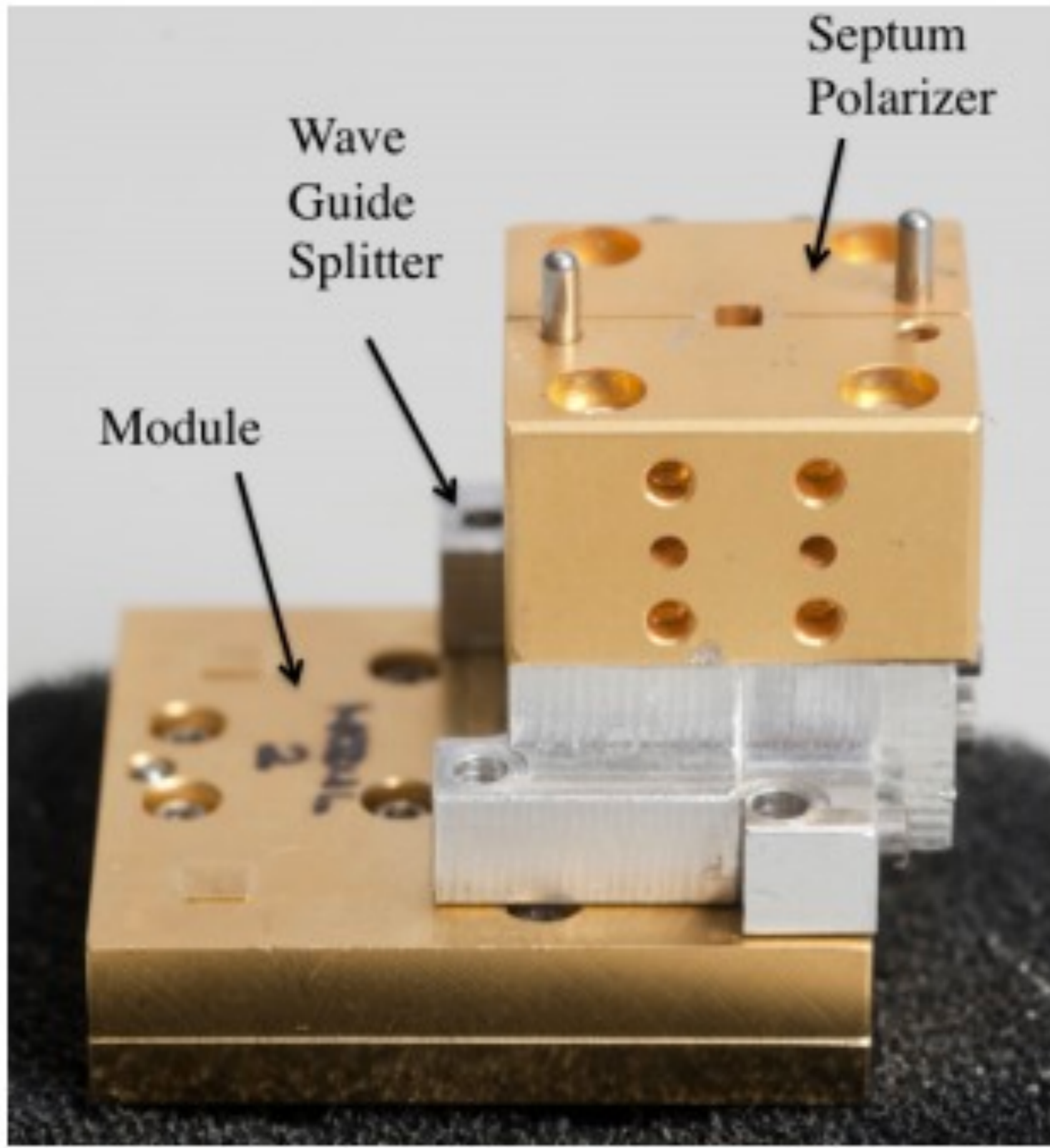


$$D(t) = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} (c_1(t)g_1E_R + n_1 + c_2(t)g_2E_L + n_2) \right|^2$$

$$D(t_i) = g_1g_2E_LE_Rc_1(t_i)c_2(t_i) + \frac{g_1^2E_L^2}{2}c_1(t_i)^2 + \frac{g_2^2E_R^2}{2}c_2(t_i)^2 + \frac{(n_1(t))^2}{2}|c_1(t_i)|^2 + \frac{(n_2(t))^2}{2}|c_2(t_i)|^2$$







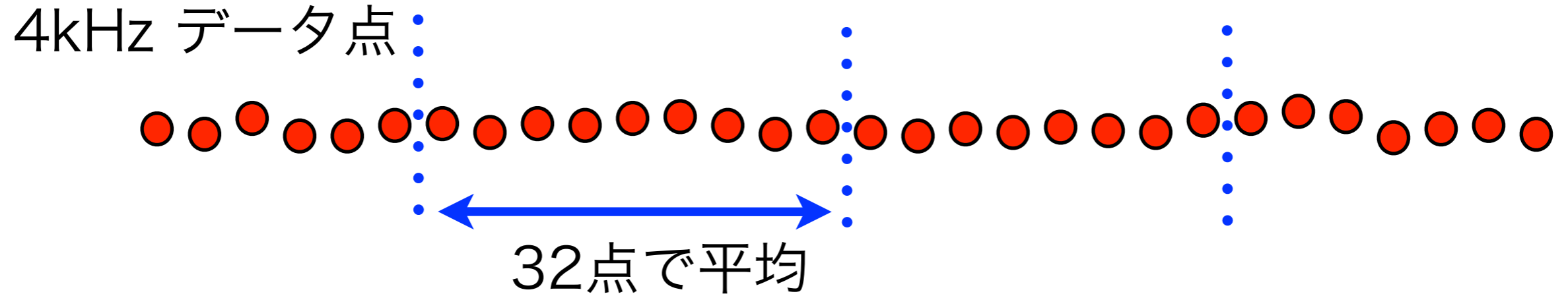
Septum  
Polarizer

Wave  
Guide  
Splitter

Module

# ダウンサンプリング

2点復調の場合



3点復調の場合

