

# 光アナログ回路での実装に適した画像復元アルゴリズムに関する研究

学籍番号：09C20047 飯國研究室 加藤大誠

## 1 はじめに

光アナログ回路は、情報担体として電子を用いる従来の演算回路とは異なり情報担体として光を用いることで、ベクトル-行列積などの演算を低遅延・省電力で実行できると期待されている [1]。しかし、光アナログ回路において増幅器を用いると、増幅率に応じた大きさの雑音が付加されてしまう。

本研究では、光アナログ回路によって全変動正則化を用いた画像復元を行うことを検討する。計算機シミュレーションによって光アナログ回路での実装を想定したノイズ除去を行い、増幅器での付加雑音を考慮した場合でもノイズを除去できることを示す。

## 2 光アナログ回路による実装に適した画像復元アルゴリズム

画像復元は多くの場合観測ベクトル  $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}^* + \mathbf{b}$  から原画像  $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^N$  を復元する問題としてモデル化できる。ただし  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{M \times N}$  は劣化過程を記述する行列（ぼけ、欠損など）、 $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^M$  は観測した際に加わるガウス雑音である。

全変動を用いた画像復元の手法として、最適化問題

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \lambda \|\mathbf{D}\mathbf{x}\|_{1,2} \right\} \quad (1)$$

を解くアプローチがある。ただし、 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{2N \times N}$  は隣接画素差分を計算するための行列であり、 $\|\cdot\|_{1,2}$  は混合  $\ell_{1,2}$  ノルムである。最適化問題 (1) は観測画像の情報を活用しつつ全変動を小さく（画像を滑らかに）するための問題と捉えることができ、ADMM (Alternative Direction Method of Multipliers: 交互方向乗数法) アルゴリズムによって解くことができる。

また、光アナログ回路において信号分割機、光加算器、光減算器では信号減衰を伴うため、光増幅器による補償を行う必要があり、そこで雑音  $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^{2N}$  が付加される。全変動最小化を用いた ADMM アルゴリズムにおいて増幅器での雑音を考慮すると、その更新式は

$$\mathbf{x}_{t+1} = \left( \mathbf{A}^\top \mathbf{A} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{D}^\top \mathbf{D} \right)^{-1} \left( \mathbf{A}^\top \mathbf{y} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{D}^\top (\mathbf{z}_t - \mathbf{v}_t) \right)$$

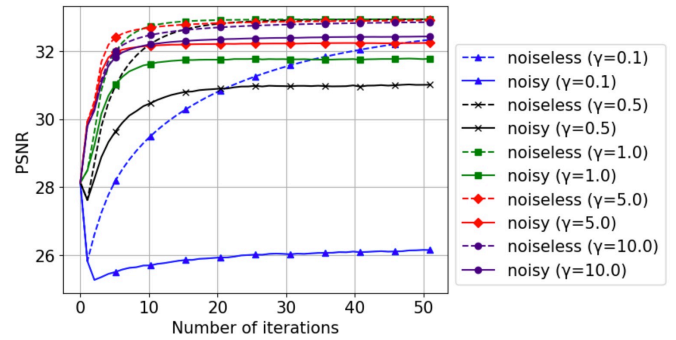
$$\mathbf{z}_{t+1} = \text{prox}_{\gamma\lambda\|\cdot\|_{1,2}}(\mathbf{D}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t + \mathbf{n})$$

$$\mathbf{v}_{t+1} = \mathbf{D}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t + \mathbf{n} - \mathbf{z}_t$$

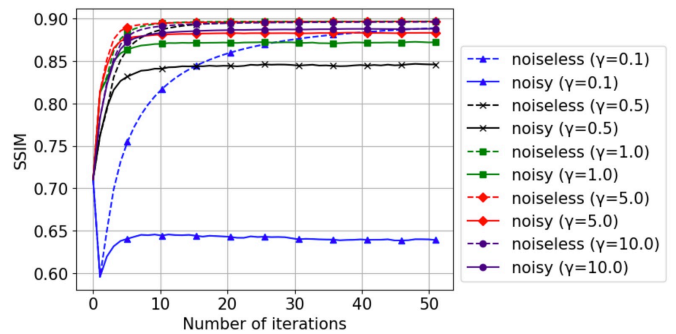
となる。ただし、 $\text{prox}_{\gamma\lambda\|\cdot\|_{1,2}}$  は混合  $\ell_{1,2}$  ノルムの近接写像である。

## 3 シミュレーション結果

観測画像は、原画像に平均 0、標準偏差 10 のガウス雑音を加えたものとした。光アナログ回路の増幅器における雑



(a) PSNR の推移



(b) SSIM の推移

図 1:  $\gamma$  の値で比較したときの PSNR, SSIM の推移

音は平均 0、標準偏差  $\sqrt{6.53} \times 10^{-2}$  のガウス雑音 ( $\mathbf{n}$ ) として、更新式を反復させるごとに加えた。初期値は  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{y}$ ,  $\mathbf{z}_0 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{v}_0 = \mathbf{0}$  とした。図 1 に用意した画像 20 枚の各反復ごとの PSNR と SSIM の平均の推移 ( $\lambda = 0.03$ ) を示す。ただし、noiseless と noisy はそれぞれ増幅器での雑音がない場合とある場合を表し、それぞれ点線と実線で表している。光増幅器で雑音に加わった場合でも、 $\gamma = 10$  とすれば極端な精度の低下はないことが分かる。

## 4 まとめ

光アナログ回路で、全変動最小化に基づく ADMM アルゴリズムを用いて画像復元することを検討した結果、光アナログ回路での制約を考慮した場合（光増幅器での雑音に乗った場合）でも適切な  $\gamma, \lambda$  を選ぶことで、ノイズを除去することができた。

## 参考文献

- [1] N. Shlezinger, G. C. Alexandropoulos, M. F. Imani, Y. C. Eldar, and D. R. Smith, “Dynamic metasurface antennas for 6g extreme massive mimo communications,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 2, pp. 106–113, 2021.