# 音響ゴーストイメージング

## Ghost Imaging with Acoustic Wave

○ 大岡佳生、深津　晋 (東大院総合)
○Y. O-oka and S. Fukatsu (UTokyo)
E-mail: o-okayoshiki@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

ゴーストイメージング (Ghost Imaging, GI) は透過・反射光の全強度を検出するだけで 2 次元マスクの画像が遠隔再生できる革新的な光技術である。2 光子の相関にもとづく GI には、暗号技術や擾乱補償光学などへの応用が期待されている [1]。近年、空間情報だけでなく時間変調情報も再生可能なこと [2] が検証されてからは応用展開の動きが加速し、透過 (吸収) スペクトルや偏光情報再生の試みなどが相次いで報告された。2 体相関にもとづく GI は、本質的に光子に限定されない技術でありながらも光子以外の粒子間相関を利用した GI の報告例はほとんど見当たらない。

凝縮物質内の音波は縦モードの素励起 (フォノン) であるのに対し、圧縮性流体内の周期圧力変調としての音波はスカラー場でも光電場と同じ古典波動の伝播として扱える。つまりマクロ系の音響 GI を試みることは 2 体相関が本質的に伝播モード間の空間識別に他ならない検証でもある。また音波による GI は、公共案内、電磁波不適合環境下の探査、超音波診断など広範な応用展開が期待できる。本研究では超音波を用いた時間領域のゴーストイメージングを試みたので報告する。

パルスパタン発生器によって 1 kbps, $2^{11}-1$ PRBS 信号で振幅変調した 40.1 kHz 矩形パルスを生成。これに駆動された送信用マイクロフォンをランダム音源とした。音源からの超音波を導波路で分波し、2 つのマイクロフォンで受信した。片側の経路では「時間マスク」であるチョッパー (50 Hz) によって音波を強度変調 $T(t_2)$ し、受信音強度 $I_{\mathrm{test}}(t_2)\,T(t_2)$ (40 us 間の平均値) の時間積算 (40 ms) 値 $B$ のみを取得した。もう一方の経路では受信音強度 $I_{\mathrm{ref}}(t_1)$ の揺らぎを取得した (250 kS/s)。これを $N = 1024$ 回繰り返し、両経路の相関 (共分散) $T_{\mathrm{GI}}(t_1) = \langle \Delta I_{\mathrm{ref}}(t_1)\,\Delta B\rangle / \beta \left\langle (\Delta I_{\mathrm{ref}}(t_1))^2 \right\rangle$ ($\beta$ : 音源振幅変調時間幅 1ms) を求めた結果 (図 1b)、音響導波路の振幅変調情報を GI で再生できることがわかった (図 2a)。さらに再生像 $T_{\mathrm{GI}}(t_1)$ と予め時間マスク透過光を時間分解測定した場合の平均値 $T_{\mathrm{Mask}}(t_2) = \langle I_{\mathrm{test}}(t_2)\,T(t_2)\rangle$ とから $\mathrm{PSNR}_{\mathrm{Linear}} = \{\mathrm{Max}\,(T_{\mathrm{Mask}}(t_2))\}^2 / \mathrm{Mean}\left(\{T_{\mathrm{GI}}(t_1) - T_{\mathrm{Mask}}(t_2)\}^2\right)$ にしたがって $\mathrm{PSNR}_{\mathrm{Linear}} = 46$ を得た。さらに予想通り $\mathrm{PSNR}_{\mathrm{Linear}}$ は積算回数 $N$ とともに線形に増加することがわかった (図 2b)。これは相互相関に起因する雑音が $N^{-1}$ でスケールするためである。

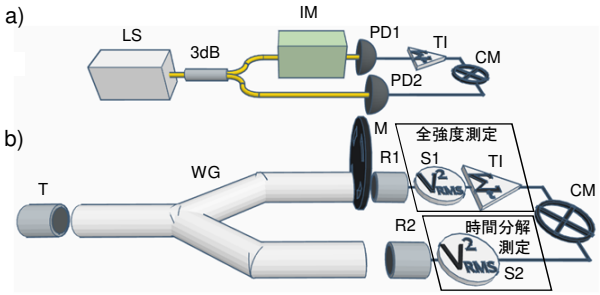


図 1: TGI の実験系.
a) 光学系 GI. ( LS: ランダム光源, 3dB: 振幅分割器, IM: 強度変調器 (時間マスク), PD: フォトダイオード, TI: 時間積算 (帯域幅制限), CM: 相関測定.)
b) 音響 GI. (T: 音波送信子, WG: 導波路, M: 変調器, R: 音波受信子, S: 自乗検波. )

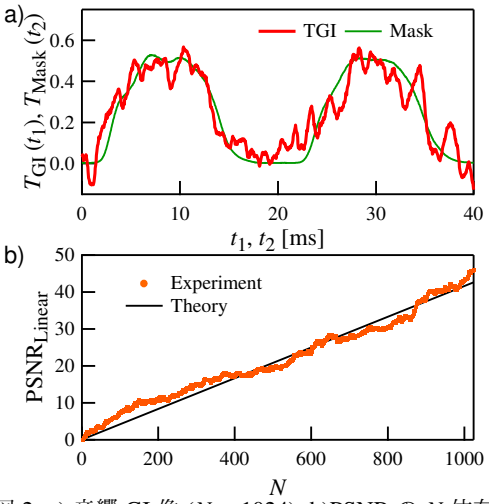


図 2: a) 音響 GI 像 ($N = 1024$). b)PSNR の $N$ 依存性.

[1] Yanhua Shih, Technologies **4**, 39 (2016).
[2] R. Ryczkowski *et al.*, Nature Photonics **10**, 167-170 (2016).