

Verso una nuova generazione di sistemi NLOS: confrontando piattaforme SPAD single-pixel ed array

Ugo Zanforlin¹, Riccardo Romanelli^{1,2}, Francesco Lorenzo Livi⁴, Pierfrancesco Ulpiani³, Massimiliano Dispenza^{1,3}, Massimiliano Proietti¹

¹Leonardo Labs – Quantum technologies lab, Via Tiburtina km 12400 – 00131 Roma, Italy

²Dipartimento Interateneo di Fisica, Università degli Studi di Bari, I-70126 Bari, Italy

³Leonardo Labs – Optronics lab, Via delle Officine Galileo, 1 – 50013 Campi Bisenzio, Italy

⁴Leonardo SpA – Electronics division, Via delle Officine Galileo, 1 – 50013 Campi Bisenzio, Italy

Abstract: I sistemi di imaging Non-Line-of-Sight (NLOS) sono emersi come una tecnologia quantistica chiave, capace di visualizzare oggetti e scene nascoste alla vista diretta. Detector a singolo pixel ed array vengono confrontati per applicazioni NLOS

I rilevatori a singolo pixel hanno storicamente rappresentato una tecnologia di base nell'imaging NLOS. Questi rilevatori operano raccogliendo transienti temporali, richiedendo tecniche di raster scanning per mappare spazialmente gli oggetti nascosti. Sebbene siano economici e semplici da implementare, i sistemi a singolo pixel presentano significativi svantaggi. La risoluzione spaziale è intrinsecamente limitata dalla natura sequenziale dell'acquisizione dei dati. Questo processo di scansione è lungo, rendendo i rilevatori a singolo pixel inadatti per scenari dinamici o applicazioni che richiedono imaging in tempo reale. L'efficienza limitata nel rilevare i fotoni riduce ulteriormente la loro capacità di ricostruire immagini di alta qualità, specialmente in scene complesse o su larga scala.

L'introduzione degli Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) arrays rappresenta un significativo passo avanti per la tecnologia di imaging NLOS. A differenza dei rilevatori a singolo pixel, SPAD arrays consentono l'acquisizione in parallelo dei segnali su una griglia di pixels, permettendo l'acquisizione simultanea di informazioni spaziali e temporali. Questo parallelismo riduce notevolmente i tempi di acquisizione rendendo questa tecnologia ideale per applicazioni di imaging in tempo reale. Inoltre, moderni SPAD array possiedono risoluzioni temporali del picosecondo nella cattura dei dati di Time-of-Flight (ToF) fornendo potenzialmente risoluzioni spaziali dell'ordine del centimetro. Questa capacità è cruciale per ricostruire accuratamente scene nascoste con geometrie complesse. Nonostante i loro vantaggi, le matrici SPAD non sono prive di sfide. Problemi come il crosstalk tra pixel, in cui i fotoni rilevati da un pixel influenzano i pixel vicini, possono degradare la qualità dell'immagine. Inoltre, l'elevato timing jitter (>100 ps) e limitata quantum efficiency (< 40%) limitano la risoluzione spaziale del sistema di imaging ed il SNR rispettivamente rendendo più complessa l'analisi di ricostruzione. Il consumo energetico rappresenta un'altra considerazione, in particolare per SPAD array di grandi dimensioni progettate per imaging ad alta risoluzione. Affrontare queste sfide richiede ulteriori innovazioni nel design delle architetture SPAD, nelle tecniche di mitigazione del rumore e nell'operatività energeticamente efficiente.

In questo lavoro viene presentata un'analisi del divario tra i sistemi NLOS basati su rilevatori a singolo pixel e quelli avanzati che utilizzano array di SPAD utilizzando dataset sperimentali e sintetici acquisiti presso il laboratorio di ricerca Quantum technologies lab (Leonardo SpA), evidenziando differenze, miglioramenti e sfide ancora aperte.

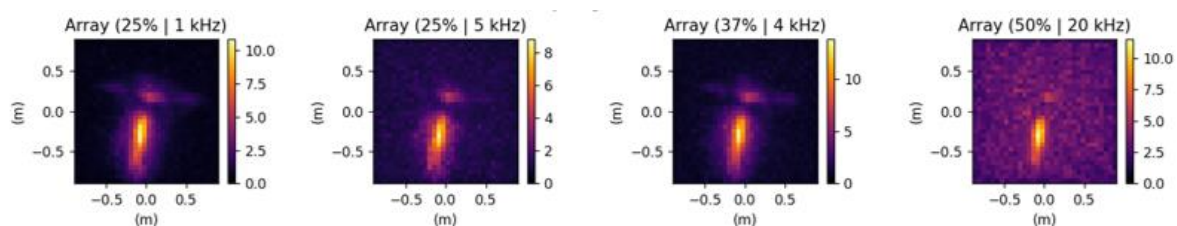


Figure 1 NLOS target with SPAD array in realistic conditions