

17.

TÉRBE MULTIPLEXELT EGYFOTONFORRÁSOK STRUKTÚRÁJÁNAK OPTIMALIZÁLÁSA

Kaszás András¹, Mechler Mátyás^{2,3}, Ádám Péter^{2,3}

¹ Pécsi Tudományegyetem, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Pécs

² HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest

³ Pécsi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Pécs

A kvantuminformatikában és a fotonikus kvantumtechnológia kutatási területén számos kísérletben és alkalmazásban szükség van egyfotonforrásokra. Ezek egyik típusa a jelzett fotonforrások, amelyekben nemlineáris optikai folyamatok segítségével korrelált fotonpárokat keltenek. A fotonpár egyik fotonjának detektálása jelzi a társfoton jelenlétét, amelyet így felhasználhatunk. Ezek a források valószínűségi források, a fotonpárok számát adott valószínűségi eloszlás írja le. A jelzett fotonforrások térbeli vagy időbeli multiplexelésével determinisztikus egyfotonforrást kaphatunk [[1],[2]]. A multiplexelés során a többfoton események valószínűsége csökkenthető a generált fotonpárok átlagos számának csökkentésével a multiplexelt egységekben, a nullfoton események valószínűsége pedig csökkenthető az egységek számának növelésével. Az ideális multiplexelő rendszerekkel tökéletes egyfotonforrást kaphatnánk, azonban a multiplexelő rendszer fizikai paraméterei, az alkalmazott optikai elemek számával arányos veszteségek a rendszerben lerontják az eredményt. A multiplexelt egyfotonforrások leírására kifejlesztettek egy általános statisztikus elméletet [3], amelynek segítségével meghatározható az optimális átlagos bemeneti fotonszám és a multiplexelt források optimális száma, amelyre a kimeneti egyfoton-valószínűség maximális. Térben multiplexelt egyfotonforrások esetén számos jelzett fotonforrást használnak párhuzamosan, a multiplexelést pedig bináris routerekből összekapcsolt bináris fa multiplexerrel valósítjuk meg [[4]-[7]]. Mivel a különböző struktúrájú multiplexerek különböző egyfoton-valószínűségekre vezetnek adott veszteségek esetén, felmerült a multiplexerek struktúrájának optimalizálásának ötlete, azaz a legjobb struktúra meghatározása [[8]]. Ez az optimalizációs feladat a multiplexerben felhasznált routerek számának faktoriálisával skálázódik, amely nagyobb routerszám esetén már nehezen megvalósítható. Ebben a közleményben egy új struktúra optimalizációs eljárást mutatunk be, amely nagy rendszerméret esetén is alkalmazható.

A multiplexelt egyfotonforrások statisztikus elmélete szerint annak valószínűsége, hogy i fotont kapunk a kimeneten fotonszámfeloldó detektorral megvalósított egyfoton detektálás esetén a következő:

$$P_i = \left(1 - P_1^{(D)}\right)^n \delta_{i,0} + \sum_{n=1}^N \left[\left(1 - P_1^{(D)}\right)^{n-1} \times \sum_{l=i}^{\infty} P^{(D)}(1|l) P^{(\lambda)}(l) V_n(i|l) \right] \quad (1)$$

Az összefüggésben $P^{(\lambda)}(l)$ az l fotonpár generálásának valószínűsége, amely termális eloszlással adható meg:

$$P^{(\lambda)}(l) = \frac{\lambda^l}{(1+\lambda)^{l+1}}, \quad (2)$$

ahol λ a generált fotonpárok átlagos száma, azaz az átlagos bemeneti fotonszám. $P^{(D)}(1|l)$ a feltételes valószínűsége, hogy egy fotont észlelünk miközben l foton érkezik a detektorra, mely a következő képlettel számítható:

$$P^{(D)}(1|l) = l V_D (1 - V_D)^{l-1}, \quad (3)$$

ahol V_D a detektor hatásfoka. Az egyfoton detektálásának teljes valószínűsége pedig

$$P_1^{(D)} = \frac{V_D \lambda}{(V_D \lambda + 1)}. \quad (4)$$

Annak a valószínűsége, hogy az n -edik multiplexelt egységről l jelzett foton esetén i foton érkezik a kimenetre a

$$V_n(i|l) = \binom{l}{i} V_n^i (1 - V_n)^{l-i}. \quad (5)$$

összefüggés írja le. V_n az adott multiplexer általános transzmissziós együtthatója, melyet általánosan a $V_n = V_b V_r^j V_t^k$ ($0 \leq j, k, \leq N$) egyenlettel írhatunk le, ahol V_b egy általános veszteségi paraméter. Ebben az összefüggésben V_r és V_t transzmissziós paraméterek, amelyek az aszimmetrikus fotonrouter két bemenetéhez rendelt veszteségeket írják le.

Az egyes multiplexer struktúrákat egész számokból álló rendezett számhalmazokkal lehet leírni a következő módon. Az N darab multiplexelt egységet tartalmazó rendszer $(N - 1)$ darab fotonroutert tartalmaz. A halmazok egyes számai a következő fotonrouter csatlakozási pontját jelzi a multiplexer előállításának egyes szakaszaiban. Az $(N - 1)$. fotonrouter kimenete hozzákapcsolható a már lehelyezett fotonrouterek $(N - 1)$ bemenetének egyikére, így az $(N - 1)$. tagja az $\{1, 2, \dots, N - 1\}$ rendezett számhalmazból választható. Az így kapott multiplexer N bemenettel rendelkezik, így a következő lépésben már N bemenet közül választhatjuk ki a következő csatlakoztatási pontot. Az így kapható számhalmazok száma $(N - 1)!$. Például a három fotonrouterből képzett különböző multiplexelt struktúrákat leíró számhalmazok a következők:

$[1, 1, 1], [1, 1, 2], [1, 1, 3], [1, 2, 1], [1, 2, 2], [1, 2, 3]$.

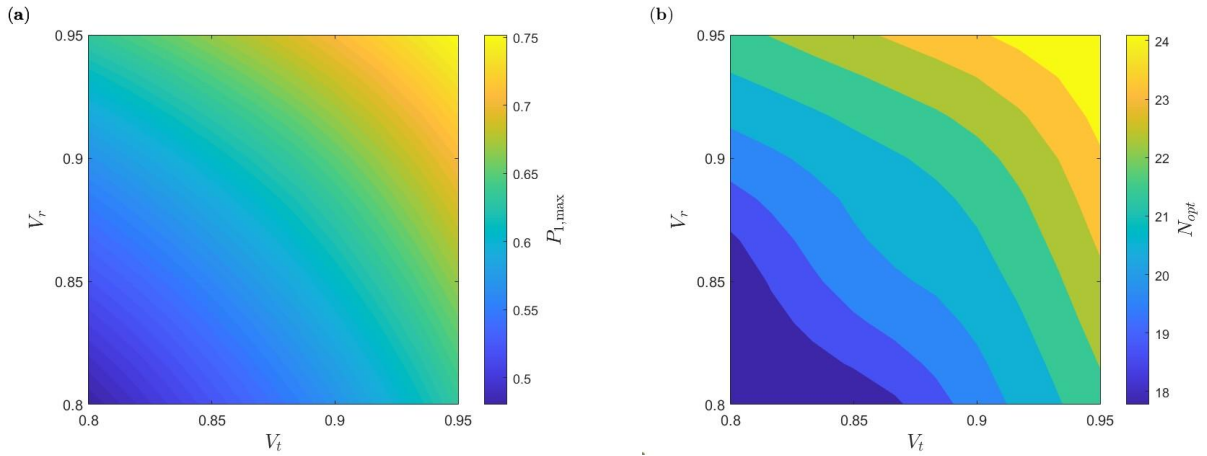
A bináris multiplexereknél fellépő szimmetriák ekvivalens struktúrákat eredményezhetnek. Ezeket kizárhatjuk, ha előírjuk, hogy az egymást követő számok csak nullával, vagy eggyel növekedhetnek, vagy csökkenhetnek. Az ilyen módon lecsökkentett struktúraszám a Catalan-számokból képzett sorozat értékeit adja [[8]], amely nagy N -ekre még mindig hatalmas számú struktúra figyelembevételét jelenti az optimalizáláskor.

A probléma megoldására a következő struktúra optimalizációs módszert javasoljuk. Amennyiben N multiplexelt egység esetén $(N - 1)! < (N - 1)^k$ (ahol k egy egész számot jelöl), akkor teljes optimalizálást végzünk az összes struktúra figyelembevételével [[8]]. Amennyiben $(N - 1)! > (N - 1)^k$, akkor lépésenkénti optimalizáljuk a struktúrát [[9]]. Ez alatt azt értjük, hogy arra az N -re, melyre ez az egyenlőtlenség bekövetkezik, vesszük a teljes optimalizáció során kapott összes struktúra közül azt az $(N - 1)^k$ struktúrát, melyekre legmagasabb az egyfoton-valószínűség ($P_{1,N}$). Ezután az új N . routert minden kiválasztott struktúra minden lehetséges bemenetére egyenként elhelyezve kiszámoljuk minden esetben az elérhető egyfoton-valószínűséget ($P_{1,(N+1)}$) a λ átlagos bemeneti fotonszám optimalizálása mellett (1) egyenlet felhasználásával. Ezután ezek közül vesszük az N^k darab legmagasabb egyfoton-valószínűséggel rendelkező struktúrát és ezekkel megismételjük a lépésenkénti optimalizálást.

Az adott eljárással magas N értékekre is végrehajtható a struktúra optimalizációja adott veszteségi paraméterek esetén, így a térben multiplexelt egyfotonforrás teljes optimalizációja is megvalósítható, azaz meghatározható az optimális átlagos bemeneti fotonszám (λ_{opt}), a multiplexelt egységek optimális száma (N_{opt}) és az ezek mellett kapható maximális egyfoton-valószínűség ($P_{1,max}$).

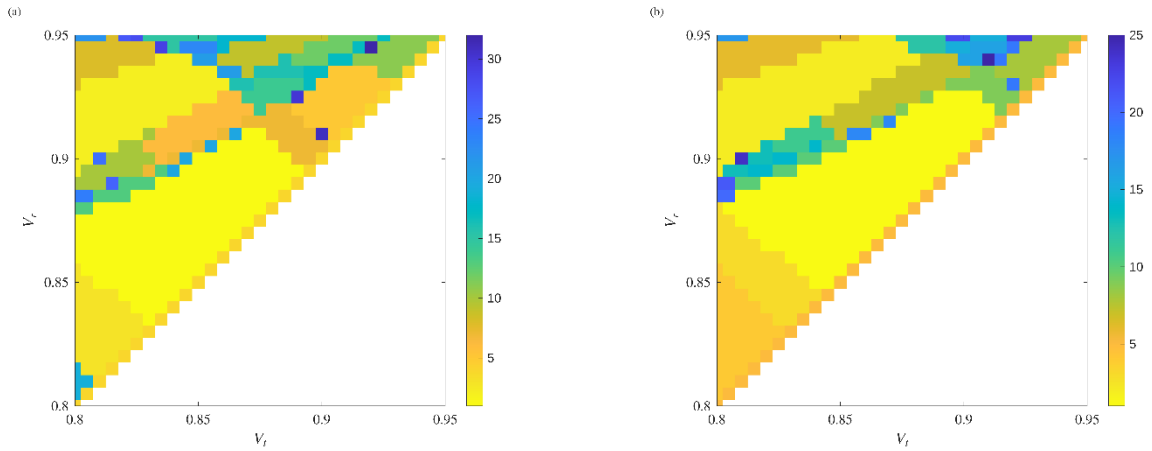
Az *ábra* a kombinált struktúra optimalizációval $k = 2$ esetben kapható $P_{1,max}$ értékeket ábrázoljuk $V_r - V_t$ paraméterek függvényében realizisztikus veszteségi értékekre, $V_D = 0.95$ detektorhatásfok mellett. Itt látható, hogy a $P_{1,max}$ érték növekszik a transzmissziós értékek emelkedésével. Ellenőriztük, hogy a kapható maximális egyfoton-valószínűségek valóban magasabbak, mint a nevezetes multiplexer struktúrákkal elérhető eredmények [[8]].

Az *ábra* a multiplexelt egységek optimális száma látható a $V_r - V_t$ paramétersíkon ábrázolva az előzővel megegyező detektorhatásfok mellett. Látható, hogy az N_{opt} érték a transzmissziós együtthatók növelésével párhuzamosan emelkedik.



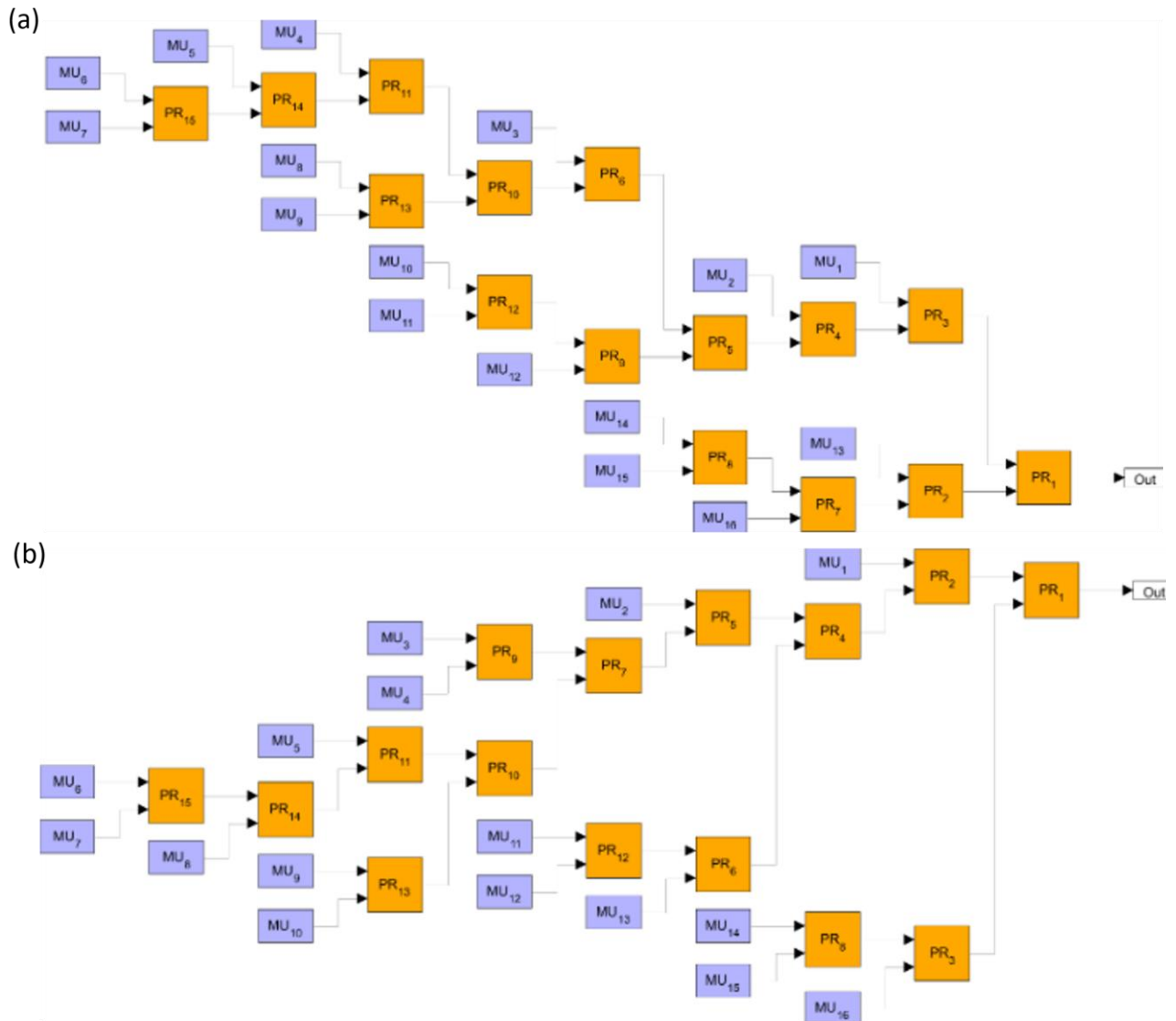
1. ábra

A *1. ábra* a maximális egyfoton-valószínűséghez tartozó optimális struktúrák előfordulása látható az egyes $V_r - V_t$ értékpárok esetén $N = 15$ fotonrouter használatakor. A *1. ábra* $V_D = 0.9$, míg a *2. ábra* $V_D = 0.95$ detektorhatásfok mellett szemléltetjük az előfordulást. Az ábrán látható színek mindegyike egy-egy optimális struktúrát jelez, vagyis a különböző struktúrák a $V_r - V_t$ sík azon régióin tekinthetők optimálisnak, melyek a hozzájuk tartozó színekkel vannak megjelölve. Az ábrán a struktúrához rendelt sorszám növelésével a színhez tartozó tartomány méret csökken, vagyis minél nagyobb sorszámot rendelünk a struktúrához, annál szűkebb régióban tekinthetjük azt optimálisnak. Az ábrákon továbbá látható, hogy csak a $V_r \geq V_t$ tartományon ábrázoltuk az előfordulást, a struktúrák szimmetriái miatt az ábra alsó felén ezek tükröképei jelennének meg.



2. ábra

A *2. ábra* példaként optimális struktúrájú egyfotonforrásokat mutatunk be $N = 16$ multiplexelt egység (PR-fotonrouter, MU-multiplexelt egység) esetén. A veszteségi paraméterek a *2. ábra* $V_r = 0.85, V_t = 0.9, V_D = 0.85$, míg a *1. ábra* $V_r = 0.9, V_t = 0.85, V_D = 0.9$. Látható, hogy a paraméterek változtatásával nagyban eltérő optimális struktúrájú egyfotonforrást kaphatunk.



3. ábra

Ebben a tanulmányban egy módszert mutattunk be az aszimmetrikus fotonrouterekből összeállított általános bináris fa multiplexerek optimális struktúrájának megtalálására, mellyel javítható a térben multiplexelt egyfotonforrások egyfoton-valószínűsége. Az eljárás kombinálja a lépésenként történő és a teljes struktúra optimalizálást az optimális multiplexer struktúra meghatározásához és alkalmazható nagy rendszerméret esetén.

Felhasznált irodalom

- [1] E. Meyer-Scott, C. Silberhorn, A. Migdall, Rev. Sci. Instrum. **91**, 041101 (2020).
- [2] P. Adam, M. Mechler, Appl. Sci. **14**, 11249 (2024).
- [3] F. Bodog, M. Mechler, M. Koniorczyk, P. Adam, Phys. Rev. A **102**, 013513 (2020).
- [4] P. Adam, F. Bodog, M. Mechler, Opt. Express **30**, 6999 (2022).
- [5] P. Adam, F. Bodog, M. Koniorczyk, M. Mechler, Phys. Rev. A **105**, 063721 (2022).
- [6] P. Adam, M. Mechler, Opt. Express **31**, 30194 (2023).
- [7] P. Adam, M. Mechler, Opt. Express **32**, 17173 (2024).
- [8] M. Mechler, P. Adam, Sci. Rep. **15**, 18939 (2025).
- [9] P. Adam, M. Mechler, Opt. Express **32**, 17173-17188 (2024).