

TÖBBFOTONOS ÁLLAPOTOK ELŐÁLLÍTÁSA JELZETT FOTONFORRÁSOK MULTIPLEXELÉSÉVEL

Szilasi Bálint Morgan^{1,2}, Mechler Mátyás^{1,2}, Ádám Péter^{1,2}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest

²Pécsi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Pécs

Több kvantumoptikai kísérlethez és kvantumtechnológiai alkalmazáshoz szükség van megbízható többfotonforrásra [1–3]. Az egyik kísérletileg megvalósítható, többfotonos állapotok előállítására alkalmas technika jelzett fotonforrásokon alapul, melyekben valamilyen nemlineáris optikai folyamatban generálnak fotonpárokat. A két módus egyikében, a „tétlen” módusban adott számú foton detektálása fotonszámfeloldó detektor segítségével a megfelelő többfotonos állapot jelenlétét jelzi a másik, „jel” módusban [4–7]. Ezt a technikát sikeresen alkalmazták egyfoton-állapotok előállítására is. A jelzett fotonforrások valószínűségi jellegét multiplexeléssel kompenzálhatjuk. Térben multiplexelt egyfotonforrások esetén számos jelzett fotonforrást használnak párhuzamosan. Az egyes forrásokban előállított fotonpárok átlagos fotonszámának csökkentése és ezzel párhuzamosan számos forrás egyidejű használata magas egyfotonvalószínűséget és alacsony többfotonos hozzájárulást biztosít [8,9].

Jelen munkában térben multiplexelt jelzett többfotonforrások használatát javasoljuk többfoton-állapotok előállítására. A multiplexelt egyfotonforrások leírására kifejlesztett statisztikus elmélet kiterjeszthető multiplexelt többfotonforrásokra is, amelynek segítségével meghatározható az optimális átlagos bemeneti fotonszám és a multiplexelt források optimális száma, amelyre a kimeneti i -foton valószínűség maximális [10–15]. A források multiplexelésére minimum-alapú, maximum-logikájú, kimeneten bővített nem teljes binárisfa-multiplexereket (OMAXV) használunk, melyek építőkövei aszimmetrikus bináris fotonrouterek [13]. Az egyfoton-állapotok keltésénél ez a multiplexer bizonyult az egyik legjobbnak.

Térben multiplexelt többfotonforrások esetén a multiplexelt egységekben fotonszámfeloldó detektort használva annak a valószínűsége, hogy a kimeneten j foton jelenik meg [9]:

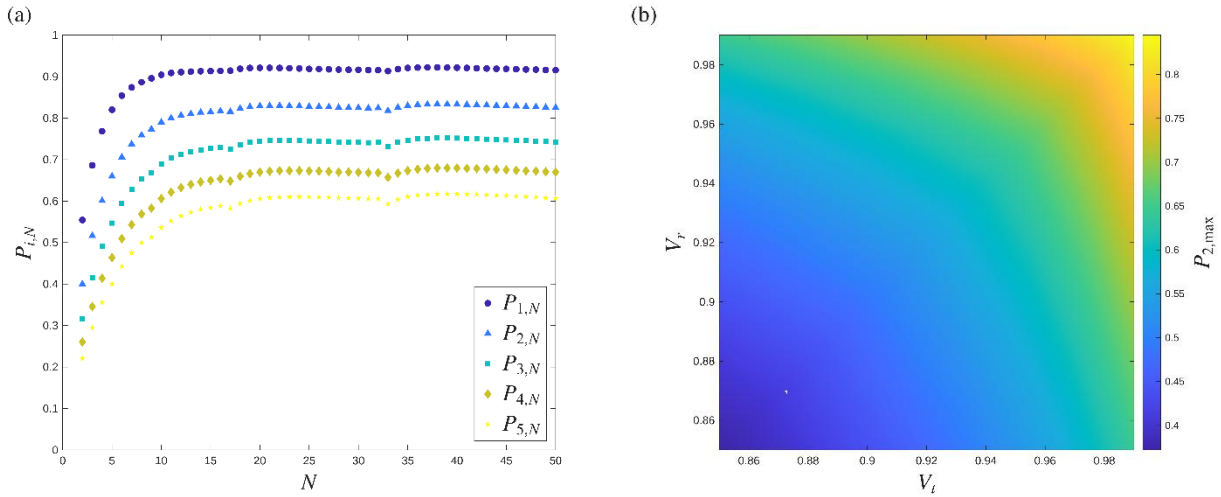
$$P_j = \left(1 - P^{(D)}(i)\right)^N \delta_{j,0} + \sum_{n=1}^N \left[\left(1 - P^{(D)}(i)\right)^{n-1} \times \sum_{l=i}^{\infty} P^{(D)}(i|l) P^{(\lambda)}(l) V_n(j|l) \right], \quad (1)$$

Itt feltételeztük, hogyha a kimenetet i fotonra szeretnénk optimalizálni, akkor a detektorok csak akkor jeleznek, ha i fotont detektáltak. Az egyenletben a $P^{(\lambda)}(l)$ jelöli annak a valószínűségét, hogy a multiplexelt egységben l fotonpár keletkezett, $P^{(D)}(i|l)$ azt a valószínűséget jelöli, hogy az l fotonból i fotont észlelt a detektor, $P^{(D)}(i)$ pedig minden olyan esemény valószínűsége, amikor i foton detektálása történt, amely valószínűség $P^{(\lambda)}(l)$ -re Poisson-eloszlást feltételezve:

$$P^{(D)}(i) = \sum_{l=i}^{\infty} P^{(D)}(i|l) P^{(\lambda)}(l) = \sum_{l=i}^{\infty} \binom{l}{i} V_D^i (1 - V_D)^{l-i} \frac{\lambda^l e^{-\lambda}}{l!} \quad (2)$$

ahol V_D a detektor hatásfok, λ pedig az átlagos bemeneti fotonszám. Az (1) egyenletben megjelenő $V_n(j|l)$ tag annak a feltételes valószínűsége, hogy a multiplexer n -edik karjában keletkezett l fotonból j érkezik a kimenetre.

$$V_n(j|l) = \binom{l}{j} V_n^j (1 - V_n)^{l-j}, \quad (3)$$



1. ábra

ahol V_n a teljes transzmissziós együttható, ami azt írja le, hogy az n -edik karban egy adott foton mekkora valószínűséggel éri el a kimenetet. A V_n -t leíró formula multiplexer típusra jellemző és a V_b , V_r és V_t paraméterek függvénye. A V_b egy általános veszteségi paraméter, melyet $V_b = 0.98$ értékűnek választottunk minden számolás esetén. A V_r és V_t transzmissziós paraméterek pedig az aszimmetrikus fotonrouter két bemenetéhez rendelt veszteséget írja le. A leírt statisztikus elmélettel a multiplexelt többfotonforrások optimalizálhatók, azaz meghatározható a multiplexelt egységek optimális száma (N_{opt}) és a multiplexelt egységekben generált fotonpárok optimális átlagos száma, azaz az optimális átlagos bemeneti fotonszám (λ_{opt}).

Az (1) egyenlet segítségével kiszámolható adott elvárt i -fotonállapot kimenet esetén a $P_{i,N}$ elérhető i -foton valószínűség a multiplexelt egységek N számának függvényében adott veszteségi paraméterek mellett. Az 1(a) ábrán ezt a $P_{i,N}(N)$ függvényt mutatjuk be OMAXV multiplexeren alapuló térben multiplexelt többfotonforrások esetén különböző i kimeneti fotonszámokat feltételezve a jelenleg elérhető legkisebb veszteségek esetére, azaz $V_D = 0.95$ detektorhatásfok, valamint a fotonrouterek $V_r = 0.99$ és $V_t = 0.985$ transzmissziós együtthatói esetén. Az ábrán az OMAXV multiplexereken alapuló egyfotonforrásokhoz hasonlóan lokális minimumok figyelhetők meg. Emellett a kimeneti fotonszámtól függetlenül a görbéknek van globális maximuma, amely $P_{i,max}$ érték a maximális i -foton valószínűség, és az az i -től függően a multiplexelt egységek más és más N_{opt} optimális értékénél található. A globális maximumok azért jelennek meg, mert az OMAXV multiplexer veszteségei általában növekednek, vagyis a multiplexelésből származó előny egy N_{opt} optimális érték után csökken, mert a jelzett fotonok elvesznek a multiplexerben. Az 1(b) ábrán a $P_{2,max}$ maximális kétfoton-valószínűséget ábrázoljuk a fotonrouterek V_t és V_r transzmissziós együtthatói függvényében $V_D = 0.95$ detektorhatásfok esetén. Látható, hogy a $P_{2,max}$ maximális kétfoton-valószínűség természetesen csökken a transzmissziós együtthatók csökkenő értékeinél. Más többfoton-állapotok előállításánál hasonló viselkedés figyelhető meg.

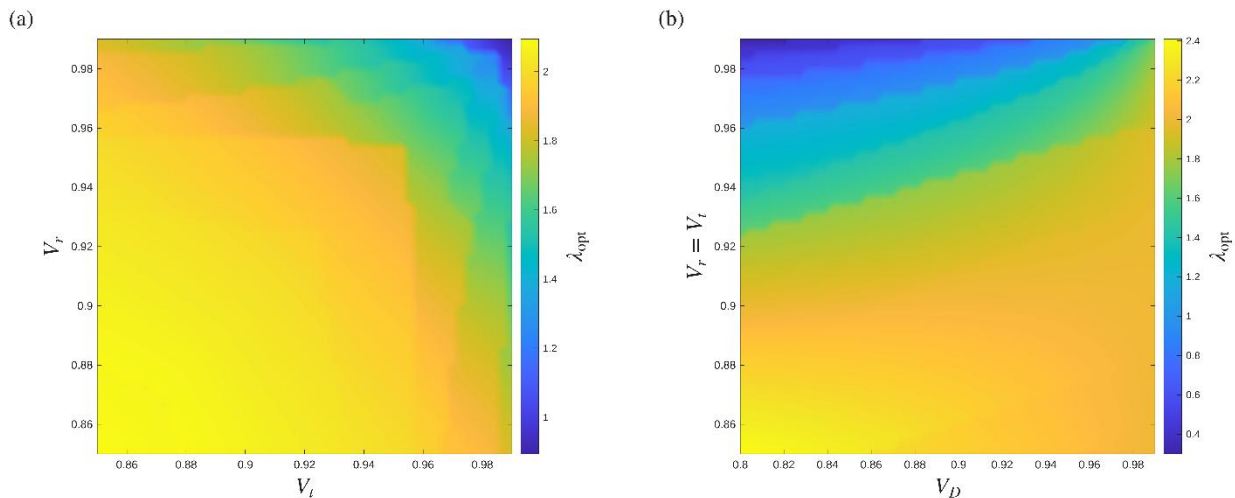
Az 1. táblázatban az OMAXV multiplexeren alapuló multiplexelt többfotonforrások (MMPS) segítségével elérhető $P_{i,max}$ maximális i -foton-valószínűségeket és a megfelelő optimális mennyiségeket, azaz a multiplexelt egységek N_{opt} optimális számát, valamint a λ_{opt} optimális átlagos bemeneti fotonszámokat mutatjuk be a fotonrouterek $V_r = 0.99$ és $V_t = 0.985$ transzmissziós együtthatói, valamint a $V_D = 0.95$ detektorhatásfok mellett. A $P_{i,max}$ és N_{opt} értékek az 1. ábra görbéinek megfelelő adatok. A táblázatban összehasonlításként feltüntettük a jelzett többfotonforrások (HMPS) $P_{i,max}$ maximális i -foton-valószínűségét $V_D = 0.95$ detektorhatásfok mellett. Látható, hogy multiplexelt többfotonforrások segítségével szignifikánsan magasabb többfoton-valószínűségek érhetők el, mint egyetlen jelzett többfotonforrással.

1. táblázat

i	$MMPS_{best}$			$HMPS_{V_D=0.95}$	
	$P_{i,max}$	N_{opt}	λ_{opt}	$P_{i,max}$	λ_{opt}
1	0.913	39	0.249	0.238	1
2	0.808	77	0.614	0.134	2
3	0.714	77	1.35	0.09	3
4	0.634	78	2.34	0.067	4
5	0.566	80	3.51	0.052	5

A következőkben megvizsgáljuk a λ_{opt} optimális átlagos bemeneti fotonszám, azaz a multiplexelt egységekben generált fotonpárok optimális átlagos számának viselkedését. Tehát a multiplexelt egységek N_{opt} optimális száma és az átlagos bemeneti fotonszám λ_{opt} optimális értéke mellett lesz maximális az adott $P_{i,max}$ i -foton-valószínűség. A 2. ábrán OMAXV típusú multiplexeren alapuló térben multiplexelt kétfotonforrások esetén mutatjuk a λ_{opt} optimális átlagos bemeneti fotonszám értékét a V_r és V_t transzmissziós együtthatók függvényeként $V_D = 0.95$ detektorhatásfok mellett (2(a) ábra), illetve a V_D detektorhatásfok és a szimmetrikus fotonroutert feltételező $V_r = V_t$ transzmissziós együtthatók függvényeként (2(b) ábra). A 2(a) ábra mutatja, hogy a fotonrouterek transzmissziós együtthatóinak növelése a vizsgált λ_{opt} mennyiség csökkenéséhez vezet. Megjegyezzük, hogy ezzel párhuzamosan a multiplexelt egységek N_{opt} optimális száma növekszik. A 2(b) ábra viszont azt mutatja, hogy a V_D növelése magas $V_r = V_t$ értékek esetén a λ_{opt} növekedéséhez, míg $V_r = V_t$ alacsonyabb értékei esetén λ_{opt} csökkenéséhez vezet. Az ezen viselkedés mögött álló folyamatok összetettsége miatt a multiplexelt kétfotonforrások egy adott N számú multiplexelt egységből álló és ismert veszteségekkel jellemzett kísérleti megvalósítása esetén az átlagos bemeneti fotonszám optimális értéke egyszerű megfontolásokból nem határozható meg. Ehhez szükség van a korábbiakban leírt teljes statisztikus modell alkalmazására.

Ebben a közleményben javasoltuk a korábban már egyfoton-állapotok előállításához használt térben multiplexelt fotonforrások alkalmazását többfoton-állapotok generálására. Ebben a rendszerben jelzett többfotonforrásokat multiplexelünk, amelyekben fotonszámfeloldó detektorokkal lehet kiválasztani az előállítani kívánt többfoton-állapotot. A rendszer elemzéséhez a minimum alapú, maxi-



2. ábra

imum logikájú kimeneten bővített nem teljes binárisfa-multiplexert választottuk, amely az egyfoton-állapotok keltésénél az egyik legjobbnak bizonyult. Egy teljes statisztikus modell alkalmazásával

meghatároztuk adott veszteségi paraméterek mellett a multiplexelt egységek N_{opt} optimális számát és az átlagos bemeneti fotonszám λ_{opt} optimális értékét, amelynél a kimeneti i -foton valószínűség maximális. Megmutattuk, hogy a javasolt séma segítségével akár $n = 5$ fotonig is lehetséges többfotonos állapotok előállítása jelentősen magasabb többfoton-valószínűségekkel, mint amekkorát a nem multiplexelt jelzett többfoton-forrásokkal el lehet érni. Kétfotonforrás esetében részletesen vizsgáltuk az átlagos bemeneti fotonszám optimális értékének viselkedését a veszteségi paraméterek széles tartományára. Ennek a mennyiségnek helyes megválasztása feltétlenül szükséges a kísérleti megvalósítás során.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta (projektek: „Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium” 2022-2.1.1-NL-2022-00004, továbbá TKP-2021-EGA-17 és KKP133827 – „Élvonal” – Kutatói kiválósági program)

Felhasznált irodalom

- [1] A. Ourjoumtsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouri, Nature **448**, 784 (2007).
- [2] C. M. Caves, P. D. Drummond, Rev. Mod. Phys. **66**, 481 (1994).
- [3] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden, Rev. Mod. Phys. **74**, 145 (2002).
- [4] M. Bouillard, G. Boucher, J. F. Ortas, B. Kanseri, R. Tualle-Brouri, Opt. Express **27**, 3113, (2019).
- [5] T. Sonoyama, K. Takahashi, T. Sano, T. Suzuki, T. Nomura, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, K. Takase, W. Asavanant, M. Endo, A. Furusawa, Opt. Express **32**, 32387 (2024).
- [6] J. Tiedau, T. J. Bartley, G. Harder, A. E. Lita, S. W. Nam, T. Gerrits, C. Silberhorn, Phys. Rev. A **100**, 041802 (2019).
- [7] E. Waks, E. Diamanti, Y. Yamamoto, New J. Phys. **8**, 4 (2006).
- [8] E. Meyer-Scott, C. Silberhorn, A. Migdall, Rev. Sci. Instrum. **91**, 041101 (2020).
- [9] P. Adam, M. Mechler, Appl. Sci. **14**, 11249 (2024).
- [10] F. Bodog, M. Mechler, M. Koniorczyk, P. Adam, Phys. Rev. A **102**, 013513 (2020).
- [11] P. Adam, F. Bodog, M. Mechler, Opt. Express **30**, 6999 (2022).
- [12] P. Adam, F. Bodog, M. Koniorczyk, M. Mechler, Phys. Rev. A **105**, 063721 (2022).
- [13] P. Adam, M. Mechler, Opt. Express **31**, 30194 (2023).
- [14] P. Adam, M. Mechler, Opt. Express **32**, 17173 (2024).
- [15] M. Mechler, P. Adam, Sci. Rep. **15**, 18939 (2025).